

# RELATÓRIO TÉCNICO DE PESQUISA

RDT CONCEPA/ANTT

## ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE

Porto Alegre, RS, Brasil

Junho, 2017



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	5
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>6</b>
2.1	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS .....	6
2.2	TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO A FRIO.....	13
2.3	TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO A QUENTE .....	15
2.3.1	Reciclagem a quente <i>in situ</i> .....	16
2.3.1.1	<i>Reciclagem de superfície</i> .....	17
2.3.1.2	<i>Repavimentação</i> .....	19
2.3.1.3	<i>Remistura</i> .....	21
2.3.2	Reciclagem a quente em usina estacionária .....	24
2.3.2.1	<i>Centrais Gravimétricas</i> .....	25
2.3.2.2	<i>Centrais Volumétricas</i> .....	27
2.3.3	Vantagens e Desvantagens .....	30
2.3.4	Estudos laboratoriais e experimentais de reciclagem a quente.....	30
2.4	AJUSTE GRANULOMÉTRICO E APLICAÇÃO DO MÉTODO BAILEY .....	40
2.5	DOSAGEM SUPERPAVE DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	42
2.6	ENSAIOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	50
2.6.1	Resistência à tração por compressão diametral.....	50
2.6.2	Módulo de resiliência .....	52
2.6.3	Módulo dinâmico uniaxial .....	54
2.6.4	<i>Flow number</i> .....	57
2.6.5	<i>Lottman</i> modificado .....	58
2.6.6	Desgaste cântabro .....	60
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA .....	61
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS .....	63
3.2.1	Material fresado.....	63
3.2.2	Agregados minerais.....	68
3.2.3	Ligante asfáltico.....	70
3.3	ENSAIOS LABORATORIAIS.....	71

3.3.1 Ajuste granulométrico e aplicação do método Bailey .....	71
3.3.2 Dosagem das misturas .....	75
3.3.3 Ensaios mecânicos e de adesividade .....	84
3.3.3.1 <i>Módulo de Resiliência</i> .....	84
3.3.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	86
3.3.3.3 <i>Módulo Dinâmico Uniaxial</i> .....	88
3.3.3.4 <i>Flow Number</i> .....	90
3.3.3.5 <i>Lottman modificado</i> .....	94
3.3.3.6 <i>Desgaste cântabro</i> .....	95
<b>4     RESULTADOS.....</b>	<b>97</b>
4.1 DOSAGEM .....	97
4.1.1 Parâmetros volumétricos .....	97
4.1.2 Parâmetros de densificação .....	103
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	104
4.2.1. Módulo de resiliência .....	104
4.2.2 Resistência à tração .....	110
4.2.3 Módulo dinâmico uniaxial .....	113
4.2.4 Flow number.....	143
4.3 PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE .....	149
4.3.1 Resistência retida à tração .....	149
4.3.2 Resistência ao desgaste .....	153
<b>5     CONCLUSÕES .....</b>	<b>155</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>158</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Do ponto de vista econômico, político e principalmente para desenvolvimento social, o transporte é considerado a indústria mais importante do mundo. No Brasil, o modal rodoviário abrange a maior parte desta importância, sendo considerado um fator indiscutível para o crescimento das cidades e dos grandes centros urbanos.

O processo de urbanização na qual o Brasil tem passado nos últimos anos tem feito com que alguns centros urbanos, principalmente aqueles com alta taxa de crescimento, sofram graves problemas sociais, ambientais e sanitários. Nenhum país consegue crescer com desenvolvimento necessário sem que seus cidadãos tenham acesso às mínimas condições de saneamento básico, habitação e estradas seguras. Este fato, aliado ao desconhecimento da correta utilização de alguns materiais e, também, às necessidades constantes de manutenção, estimulam o consumo de matéria-prima. A consequência disto é o aumento na geração de resíduos, os quais poderiam ser devidamente reciclados e que, no entanto, muitas vezes, tem seu descarte inadequado.

Assim, com esses problemas, vem surgindo a conscientização do emprego correto dos recursos naturais e a redução de emissões de gases poluentes, bem como a devida preservação ambiental. Por isso, a busca de alternativas favoráveis ambientalmente tem dado surgimento aos métodos de reciclagem de pavimentos, por serem alternativas economicamente viáveis e utilizar-se de técnicas politicamente e ambientalmente corretas.

Ao reutilizar o material fresado em camadas novas de pavimentos, reduzimos o impacto ambiental da deposição, viabilizamos economicamente o processo, além de reduzir o consumo de materiais novos e proteger o meio ambiente. Ainda, é importante ressaltar que a qualidade dos constituintes do material fresado influencia diretamente no comportamento da mistura.

Além de contribuir na política de sustentabilidade, a utilização de materiais provenientes da fresagem já tem boa aceitação no setor rodoviário, no Brasil como base e/ou sub-base de rodovias de baixo volume de tráfego, preenchimento de acostamento etc., e nos países de primeiro mundo como insumo de misturas asfáltica a quente.

Não obstante a este panorama geral, a CONCEPA – Concessionária da Rodovia Osório - Porto Alegre S/A utiliza como ferramenta de manutenção a fresagem de pavimentos o que gera, consequentemente, material fresado que tem a possibilidade de ser reciclado através de técnicas de estabilização e ser reutilizado como camada de pavimento.

Nesse contexto apresentado, torna-se premente que as pesquisas avancem no sentido de desenvolvimento da reciclagem no Brasil e da importância dos processos e técnicas utilizados, bem como buscar saber o efeito da reciclagem e do comportamento dos materiais, seja em termos relacionados à sustentabilidade, economia de energia e economia na execução de pavimentos ou, ainda, preocupação com meio ambiente, impactos causados e impactos gerados pelas propriedades físicas desses materiais, as quais podem interferir no desempenho dos pavimentos.

A reciclagem de pavimentos, a exemplo da reciclagem de outros materiais, consiste na reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento, na base, sub-base ou revestimento, em que os materiais são novamente misturados e compactados; pode-se ainda adicionar agregados virgens para correção granulométrica e/ou agentes rejuvenecedores e/ou cimentantes.

As principais vantagens da reciclagem são:

- redução nos custos de construção;
- conservação de agregados e ligantes;
- preservação da geometria do pavimento existente;
- manutenção da drenagem;
- preservação do meio ambiente;
- conservação de energia;
- homogeneização estrutural;
- readequação estrutural;
- rápida liberação da pista.

A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (The Asphalt Recycling and Reclaiming – ARRA), define cinco categorias principais para os diferentes métodos de reciclagem:

- Reciclagem a frio (Cold recycling);
- Reciclagem a quente (Hot recycling);
- Reciclagem a quente in situ (Hot in-place recycling);
- Reciclagem a frio in-situ (Cold in-place recycling)

- Reciclagem profunda (Full depth reclamation).

Qualquer técnica de reciclagem pressupõem a desagregação parcial do pavimento e sua reconstrução; para tanto é possível se utilizar equipamentos tipo estabilizadoras (que desagregam e remisturam o material in situ) ou de fresadoras que desbastam o material que deve ser tratado em usina apropriada. É muito comum, entretanto, a fresagem do pavimento e colocação de uma nova capa sendo que o material fresado retirado é subutilizado ou simplesmente colocado em bota fora.

As obras rodoviárias geram grandes quantidades de material fresado quando da restauração dos pavimentos. Quando o material fresado é reutilizado para revestimento, o ligante asfáltico é recuperado através da incorporação de agentes rejuvenescedores, e a granulometria pode ser corrigida pela adição de novos materiais. Já no reaproveitamento do fresado, para base e/ou sub-base rodoviária, corrige-se a granulometria e pode-se adicionar cimento, cal, betume, etc..

A reciclagem a quente enfrenta dificuldades para virar prática no Brasil, que vão do desconhecimento das propriedades dos materiais provenientes destas misturas e a falta de projetos que incentivem tais práticas; consequência disso é que usinas de asfalto com capacidade de reciclar a quente ainda são raras em nosso país, apesar da grande difusão destes equipamento no exterior.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é estudar em laboratório o comportamento mecânico e de adesividade de misturas asfálticas a quente utilizando material fresado, ou seja, simulando o processo de reciclagem a quente.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) realizar um levantamento bibliográfico sobre os temas que envolvem a pesquisa;
- b) caracterizar agregados, o ligante e o fresado que serão utilizados na pesquisa;
- c) realizar a dosagem de concretos asfálticos a quente com 3 diferentes teores de fresado (10, 20 e 30%) além de uma mistura convencional e estudar o comportamento destas misturas do ponto de vista mecânico e de adesão/coesão.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), a reciclagem dos pavimentos consiste em uma solução para alguns problemas encontrados nos grandes centros urbanos e, ainda, oferece inúmeras vantagens em relação à utilização de materiais virgens convencionais. Entre os benefícios da reciclagem está a conservação de agregados, ligantes e de energia, bem como a preservação ambiental e, também, a restauração das condições geométricas existentes.

De acordo com Brosseau (2011) o surgimento da reciclagem dos materiais da pavimentação corresponde à necessidade de proteger o meio ambiente, economizando em materiais provenientes de recursos naturais (agregados), espaços físicos (descargas), energia e redução de gases do efeito estufa.

Para Bernucci et al. (2010) há necessidade de restauração de sua capacidade de carga através da colocação de espessuras adicionais de camadas ou através do corte de todo ou parte do revestimento, quando um pavimento asfáltico em uso torna-se deteriorado estruturalmente. Este processo é feito através de equipamento especial (fresadora), no qual é executado uma nova camada de revestimento asfáltico e, ainda, onde este material gerado no corte pode ser reaproveitado por reciclagem.

Assim, reciclar pavimentos consiste no processo de reutilizar as misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para a produção de novas misturas, onde é possível aproveitar os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo de agente rejuvenescedor, espuma de asfalto, CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) ou emulsão novos, se necessários e, também, com a adição de aglomerantes hidráulicos.

Ainda, segundo DNIT (2006), além da reutilização dos agregados propiciarem uma diminuição na demanda de novos materiais, bem como prolongando o tempo de exploração das jazidas existentes, a reutilização dos ligantes constitui uma vantagem considerada, também, de grande importância. Logo, com a reutilização do asfalto envelhecido, pode-se reduzir a quantidade de asfalto novo para a restauração do pavimento. Além disso, com a adoção de técnicas de reciclagem, é possível que as condições geométricas da pista sejam mantidas ou modificadas com facilidade.

Segundo Bonfim (2000) a origem do termo fresagem remonta a técnica de desbaste ou corte de metais por meio de uma engrenagem motora constituída de um cortador giratório de ângulos diversos, ou de várias freses com um movimento giratório contínuo. Ainda, para Bernucci et al. (2010) esta operação de corte ou desbaste através da fresagem, serve como forma de restauração da qualidade ao rolamento da superfície, ou como melhoria da capacidade de suporte da mesma.

Para Suzuki et al. (2004) a restauração de pavimentos utilizando a técnica de reciclagem consiste em um método bastante promissor quando a superfície a qual será reciclada apresenta grau de trincamento acentuado, o qual possa ser conduzido ao problema de reflexão de trincas nas camadas sobrejacentes do reforço, ou, ainda, que exija espessuras elevadas de recapeamento. Além disso, a reciclagem é designada como uma alternativa para a reabilitação de pavimentos, à medida que é utilizada a reutilização dos materiais constituintes do próprio pavimento para fins de trabalhos de reconstrução e conservação, o que propicia uma melhora na redução da demanda de materiais novos e, ainda, prolongando o período de exploração e fornecimento nas jazidas e pedreiras.

Bonfim (2000) afirma que uma das maneiras de reciclar é através da fresagem do pavimento, a qual pode ser realizada de duas maneiras quanto à temperatura de ocorrência, ou seja, esta pode ser realizada a quente ou a frio. O processo de fresagem a frio é realizado em temperatura ambiente, sem o pré-aquecimento do pavimento, onde o único tipo de aquecimento consiste na energia liberada pelo impacto dos dentes de corte da máquina fresadora no pavimento, durante o processo de fresagem. Já na fresagem a quente, é efetuado um pré-aquecimento do revestimento.

Vasconcelos e Soares (2003) afirmam que a reciclagem de revestimentos asfálticos consiste em um processo pelo qual uma mistura asfáltica existente, geralmente em condição deteriorada, é fresada e pode ser misturada a um novo ligante asfáltico e a novos agregados, o que possibilita o seu reaproveitamento. Ainda segundo estes autores, pode-se destacar, entre as principais vantagens do uso da reciclagem, o menor impacto ambiental, diminuição da exploração de jazidas, redução de custos na construção de novos pavimentos e, também, o melhor reaproveitamento do material.

A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (*Asphalt Recycling and Reclaiming Association – ARRA*, 1997) afirma que a reciclagem dos pavimentos

asfálticos existentes tem como principais vantagens a considerável redução nos custos de construção, bem como de materiais, a manutenção da geometria global da via existente, além da conservação da energia nas etapas de produção e a preservação do meio ambiente.

Para Oliveira et al. (2010), a reciclagem de pavimentos realizada pelo método a quente, consiste em uma mistura aplicada a quente no pavimento, logo após a dosagem dos materiais. No método de reciclagem a frio, a mistura é aplicada sem este aquecimento, e, ainda, poderão ser adicionados, além de materiais betuminosos e agregados, agentes rejuvenescedores ou estabilizantes químicos como cal, cimento ou cinzas volantes.

Segundo Brosseaud (2011), no caso da França, especificamente, pesquisas realizadas em 2007 e 2010 mostraram que houve um significativo aumento da proporção de misturas asfálticas antigas recuperadas e recicladas, as quais foram empregadas em novas misturas, passando de 23% para 42% em apenas três anos.

Para Pradyumna et al. (2013) a reciclagem consiste em um processo no qual são recuperados os materiais asfálticos e combinados com materiais novos, com a presença ou não de agente rejuvenescedor, para reproduzir novas misturas de aplicação em pavimentos. Ainda segundo os autores, um projeto executado corretamente com misturas recicladas, pode ter um desempenho melhor ou semelhante aos de novas misturas asfálticas convencionais.

A Betunel – Tecnologia em Asfaltos – caracteriza um Agente Rejuvenescedor (AR) como asfalto de baixa consistência, utilizado em serviços de reciclagem a quente, tanto em usina como *in situ*. Este AR contém compostos aromáticos que devolvem ao asfalto suas características originais de ductilidade e consistência, perdidas ao longo do tempo pelo envelhecimento, o qual é usado para recompor esta consistência original do ligante asfáltico. Ainda, é importante ressaltar que o AR selecionado depende das características de envelhecimento do ligante presente no pavimento o qual será reciclado.

Para Pradyumna et al. (2013) os agentes rejuvenescedores são definidos como materiais orgânicos com características físicas e químicas selecionadas para estabelecer as propriedades do asfalto envelhecido com as especificações recomendadas. Na escolha do agente de reciclagem, as características de viscosidade do ligante asfáltico envelhecido, combinadas com o agente rejuvenescedor, são os fatores determinantes. Ainda segundo os autores, a escolha

dos agentes de reciclagem (no inglês *Recycling Agent – RA*) ou agentes rejuvenescedores (AR) irá depender da quantidade e da dureza do asfalto no pavimento envelhecido, ou seja, quanto mais envelhecido estiver o ligante asfáltico do pavimento reciclado, menos consistente será o AR usado.

DNIT (2006), através do Manual de Restauração de Pavimentos, aborda a reciclagem como uma solução para muitos problemas de pavimentação e oferece, ainda, as técnicas de aplicação de acordo com alguns critérios estabelecidos:

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

Ainda segundo DNIT (2006), é importante ressaltar que, desde que a reciclagem tenha sido considerada a alternativa mais viável para a restauração, deve ser escolhida a melhor modalidade: a quente ou a frio. Para este processo deverão ser considerados itens como a condição da superfície, sua capacidade estrutural, qualidade do material, disponibilidade de material virgem, resistência à derrapagem (se o material for usado como camada de revestimento), condições geométricas, tráfego, características do subleito e base e, ainda, o objetivo da restauração.

Para Bonfim (2000) a classificação dos tipos de reciclagem depende da geometria original da via, local de processamento dos materiais, fresagem do material, profundidade de corte, usina reciclada, uso da mistura e dos materiais adicionados. Quanto à geometria da via, esta pode manter as cotas do greide (sem modificação) ou não manter as cotas do greide (com modificação); quanto ao local de processamento dos materiais, esta pode ser em usina (fixa ou móvel, quente ou frio), *in situ* ou mista; quanto à fresagem dos materiais, esta pode ser a frio ou a quente; quanto à profundidade do corte, esta pode ser superficial (quando realizada apenas na camada de revestimento) ou profunda (atingindo camada de revestimento, base e até sub-base); quanto à mistura reciclada, esta pode ser a frio (Pré-Misturado a Frio -

PMF) ou a quente (CA, PMQ – Pré-Misturado a quente); quanto ao uso da mistura, esta pode ser como base reciclada, camada de ligação ou, ainda como revestimento; e quanto aos materiais adicionados, esta pode ser com adição de agregados para correção granulométrica, de cimento e cal para aumento da capacidade estrutural, emulsão e CAP para rejuvenescimento, ou, ainda, com a adição de misturas asfálticas, caso do material fresado.

As técnicas determinadas para a realização do trabalho de reciclagem que são consideradas no decorrer deste trabalho são as citadas a seguir, sendo que este trabalho de pesquisa foi desenvolvido dando ênfase à reciclagem a quente. Bonfim (2000) apresenta uma classificação bem definida dos tipos de reciclagem. Já a ARRA (1997) define cinco categorias principais para os diferentes métodos de reciclagem.

São elas:

- Fresagem (*Cold Planing*);
- Reciclagem a quente em usina (*Hot Recycling*);
- Reciclagem a quente *in situ* (*Hot in-place Recycling*);
- Reciclagem a frio *in situ* (*Cold in-place Recycling*);
- Reciclagem profunda – *Full Depth Reclamation*.

No Brasil, quanto ao aspecto da reciclagem, ainda são poucas as experiências com reciclagem a quente, o que se vê são estudos diversos com adição de cimento e outros materiais e, ainda, a reciclagem a frio. Além disso, na realidade brasileira, existem poucas centrais a quente, usinas e equipamentos, bem como a falta de incentivos do governo, onde os editais públicos sequer solicitam a reciclagem a quente, no qual é possível encontrar, com facilidade, diversos trabalhos a frio ou outros tipos de reciclagem.

Conforme Brosseaud (2011) há uma grande quantidade de técnicas de reciclagem as quais se pode utilizar material asfáltico fresado, o RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*, como é conhecido internacionalmente, onde o desenvolvimento da reciclagem é muito variável de um país para outro, ou mesmo de região para região. Nos Estados Unidos, os materiais mais reciclados são as misturas asfálticas, sendo mais de 80 milhões de toneladas por ano, o que representa, aproximadamente, duas vezes mais que os quatro resíduos notadamente mais reciclados (papéis, vidros, plásticos e alumínio), os quais, juntos, somam 40 milhões de toneladas recicladas por ano.

Trichês et al. (2010) afirmam que, no Brasil, a técnica da reciclagem dos pavimentos começou a ganhar destaque apenas no início de 1990, os quais relatam indícios de reciclagem a quente *in situ* do revestimento na rodovia Dutra, ganhando impulso a partir dos programas de concessão de rodovias, os quais já haviam sido iniciados em 1996. Assim, a partir disto, várias concessionárias têm utilizado esta técnica para recuperar segmentos de malha que necessitam de acréscimos na sua capacidade estrutural.

Segundo Rosa et al. (2007), as restaurações de pavimentos flexíveis e semi-rígidos no Sistema Anchieta – Imigrantes, em São Paulo, desde 1998 produziram uma média anual de 110.000 toneladas de resíduos de material oriundo da operação de fresagem. Por esta razão, a partir de 2001, os técnicos da Ecovias dos Imigrantes utilizaram o material fresado como camada final de terraplenagem e reforço de subleito, inclusive em obras de duplicação da Rodovia dos Imigrantes, gerando um passivo ambiental com substituição de revestimentos primários de vias urbanas, o qual ficou evidente a viabilidade e benefício da execução de camadas de pavimento como solução ambiental, técnica e econômica.

Sachet e Gonçalves (2008) apresentaram uma proposta de trabalho que visou o controle tecnológico de obras de reciclagem de pavimentos a frio *in situ* de bases granulares. A proposta foi aplicada em trechos rodoviários de monitoramento no Estado do Rio Grande do Sul no ano de 2006, os quais estavam sendo restaurados de forma experimental. Para a estimativa da capacidade de suporte das camadas da estrutura foi utilizada a verificação do ISC (Índice de Suporte Califórnia) *in situ* através do uso do *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP). As análises mostraram que todos os trechos foram aceitos em termos da capacidade de suporte de bases granulares recicladas e para apontamentos de heterogeneidades construtivas localizadas.

Rosa et al. (2007) apresentaram um estudo aplicando material resultante de um CA (Concreto Asfáltico) fresado o qual foi utilizado nas camadas nobres de pavimentos flexíveis ou semi-rígidos. Para fins deste estudo, foram feitos ensaios geotécnicos de solo do subleito, ensaios de caracterização e módulo de resiliência das misturas de material fresado com e sem adição de cimento Portland. Na estrutura do pavimento estudado continha uma camada de concreto asfáltico, base com 60% de material fresado, sub-base com 65% de fresado e camada de reforço de subleito também com 65% de fresado. Os autores avaliaram que esta experiência propiciou em vantagens como a enorme facilidade de trabalho do material fresado em condições

adversas de clima para serviços de pavimentação, bem como a utilização de incômodo passivo ambiental com a supressão de depósitos de material fresado e, ainda, a redução dos custos das camadas de pavimentação com relação à solução tradicional, sendo o fresado uma alternativa nobre para uso como camada de pavimento.

Para a pesquisa realizada por Cavalcante et al. (2007), foram realizados estudos na restauração das condições funcionais e estruturais do pavimento da Rodovia BR-116-CE, trecho Fortaleza – Div. Fortaleza – CE/PE, através da reciclagem com uso de cimento Portland. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que, na medida em que se aumenta a espessura da reciclagem, incorporando o material da base, para uma mesma taxa de cimento, as características de deformabilidade da mistura melhoram substancialmente e, além disso, constataram que a reciclagem do revestimento + base sem adição de cimento não é recomendável para rodovias de tráfego médio a elevado, pois consiste em uma estrutura demasiadamente resiliente. Assim, segundo os autores, torna-se importante a adição de aglutinantes cimentantes, com o propósito de promover coesão e rigidez à camada e, ainda, aumentar a rigidez global da estrutura.

Oliveira et al. (2010) apresentaram uma análise de projeto de restauração buscando diagnosticar o estado estrutural e funcional de um pavimento existente, os quais adotaram a reciclagem profunda de pavimentos como solução de restauração para alguns dos segmentos da BR-282, entre Florianópolis e Lages, no estado de Santa Catarina. Os autores concluíram que a solução de reciclagem profunda de pavimentos com correção granulométrica e, ainda, a adição de cimento, era a alternativa mais adequada. Da mesma forma, ficou evidente a economia da reciclagem dos pavimentos, além de que seu desempenho se mostrou satisfatório nas rodovias onde o processo foi executado.

Trichês e Santos (2011) mostraram uma avaliação do desempenho da reciclagem com a adição de cimento empregada na restauração da rodovia SC 303, Trecho de 30 km de extensão da BR 282 (Joaçaba) – Capinzal (SC). A reciclagem do pavimento contemplou a adição de 15% de agregado virgem na composição granulométrica, mais 3% em peso de cimento, Trituração do revestimento junto com parte da camada de base e execução de camada de revestimento em asfalto-borracha. Neste artigo foram apresentados os resultados de ensaio de laboratório e campo obtidos no processo executivo. Com base na análise dos resultados, pode-se

estimar que a vida útil do pavimento seria de 40% maior do que a vida útil definida em projeto, na qual os resultados obtidos indicam que 3,5% das seções inventariadas apresentavam trincamento, o que é relativamente elevado, se considerado o período de projeto. Assim, os autores concluíram que a reciclagem realizada no pavimento com cimento, com a incorporação do revestimento na camada de base, propiciou uma significativa redução na deflexão do pavimento existente logo no terceiro dia de cura da camada reciclada, além de homogeneizar a sua capacidade estrutural.

A pesquisa realizada por Specht et al. (2015) utilizando a técnica de reciclagem de pavimentos, consistiu em transformar um pavimento degradado em uma estrutura homogênea adequadamente dimensionada para receber os esforços do tráfego. O processo consistiu em uma correção granulométrica com adição de aglomerante, o qual objetivou avaliar a possibilidade de utilização de material fresado reciclado através de técnicas de estabilização e possibilidade de utilização em camadas de base e sub-base. O material fresado estabilizado mecanicamente resultou um CBR de 56%, enquanto que o material fresado estabilizado granulometricamente chegou a 95%, sendo ambos os valores compatíveis com materiais granulares utilizados em camadas de pavimento. Com isso, a implantação de segmentos teste deste trabalho teve êxito, o que indica que ao longo do tempo poderá subsidiar novas alternativas e ações envolvendo a reciclagem de pavimentos.

## 2.2 TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO A FRIO

ARRA (1997) afirma que entre os métodos de reciclagem a frio destacam-se a fresagem (*cold planing*) e a reciclagem a frio *in situ*, que pode ser efetuada de duas formas: com profundidade total (*full depth*), ou profundidade parcial do pavimento. Ainda, a ARRA recomenda que a superfície resultante de operações de fresagem a frio deve possuir uniformidade, estrias longitudinais descontínuas ou outro padrão uniforme, conforme mostra a Figura 1. Além disso, a principal vantagem de uma reciclagem a frio é quanto ao esmagamento do RAP, o qual resulta em uma maior taxa de produção. Logo, não existe nenhum tipo de calor e uma quantidade mínima de poeira é produzida.

Figura 1 – Superfície típica resultante de fresagem a frio



Fonte: (ARRA, 1997).

Wirtgen (2015) descreve a reciclagem a frio como um procedimento aplicado para recuperar e reutilizar o material de um pavimento existente, sem a utilização do calor como artifício para realização do trabalho. Para a ARRA (1997) a reciclagem a frio é uma mistura técnica de reabilitação que reutiliza material existente sem a aplicação de calor. De um modo geral, um agente de reciclagem e/ou um ligante asfáltico é adicionado ao RAP, onde o principal objetivo é a reutilização deste material proveniente do pavimento. Assim, reciclagem a frio consiste em uma mistura de vários métodos de reciclagem, onde a vantagem mais importante é a conservação de recursos e a economia.

A PCA – *Portland Cement Association* (2013) relata sobre a reciclagem profunda que utiliza os materiais do pavimento de asfalto deteriorada com incorporação de cimento, o qual cria uma nova base estabilizada. Sendo uma técnica que recicla o material do pavimento asfáltico, criando uma base mais rígida, uniforme e resistente à umidade quando comparada à base original, resultando em uma camada com maior durabilidade e uma vida longa com baixa manutenção. Ainda, o mais importante, os custos de reciclagem são, normalmente, pelo menos 25 a 50% menores do que a remoção e substituição do antigo pavimento.

## 2.3 TÉCNICAS DE RECICLAGEM DE PAVIMENTO A QUENTE

Para Lima (2003), as misturas asfálticas com material reciclado têm mostrado um desempenho similar e, em alguns casos, superiores às misturas convencionais. No caso do processo de reciclagem a quente, o material depois de fresado é remisturado e tratado termicamente com adição de ligantes e/ou AR's, com ou sem correção granulométrica.

De acordo com a ARRA (1997) o processo de reciclagem a quente consiste em recuperar materiais de pavimentação, combinados com novos materiais, muitas vezes com um agente de reciclagem, para produzir misturas de asfalto as quais diferem de acordo com a temperatura em que ocorrerá o processo, ou seja, sob condições de aquecimento dos materiais.

Ainda, segundo Lima (2003), a reciclagem a quente consiste, basicamente, no processo ao qual o pavimento asfáltico existente é removido por intermédio de um equipamento fresador, capaz de arrancar a camada superficial a uma profundidade previamente estabelecida, na qual é transportada a um local de estocagem para que seja reciclada em usina.

Wirtgen (2015) afirma que o método de reciclagem a quente é usado exclusivamente para a reabilitação de superfícies de pavimentos asfálticos danificadas. A estrutura do pavimento subjacente à camada de desgaste deve cumprir integralmente todas as exigências em termos de capacidade e resistência. Quando executada uma reciclagem a quente, o reciclagem processa o pavimento existente, melhorando-o. Assim, após a conclusão da operação de reciclagem, o novo campo de superfície deve cumprir integralmente todos os requisitos de uma vez só. Portanto, através desse método, é possível restabelecer todas as propriedades relevantes, tanto da superfície do revestimento quanto do perfil do pavimento até a composição dos agregados da camada de desgaste. Logo, ajudar na restauração da resistência à derrapagem, capacidade de drenagem da pista e, ainda, eliminar os afundamentos de trilha de roda.

Segundo o Manual de Restauração (DNIT, 2006) as técnicas de reciclagem a quente podem ser classificadas de acordo com o local onde irá acontecer a mistura dos materiais: no próprio local onde está sendo executada a obra (*in situ*) ou através de uma usina estacionária.

### 2.3.1 Reciclagem a quente *in situ*

Segundo a norma do DNIT (2006) – DNIT-ES 034/2005 – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de serviço, um concreto asfáltico reciclado a quente no local consiste em uma mistura realizada por equipamento apropriado, o qual se utiliza como agregado o material de revestimento asfáltico removido do pavimento existente, cimento asfáltico e agregados adicionais e, ainda, agente de reciclagem misturado, espalhado e comprimido a quente.

De acordo com a ARRA (1997) a reciclagem a quente no local consiste de um método no qual o pavimento existente é aquecido e amolecido e, em seguida, escarificado/moído até uma profundidade especificada. Entre as vantagens da reciclagem a quente *in situ* está a de que as fissuras superficiais podem ser eliminadas, bem como afundamentos podem ser corrigidos e asfaltos envelhecidos podem ser rejuvenescidos, onde a interrupção do tráfego é mínima e os custos minimizados.

Para Lima (2003) tal procedimento consiste, basicamente, em um processo de correção da superfície do pavimento asfáltico, que engloba a remoção mecânica da superfície através de aquecimento e consequente amolecimento, chamado de fresagem a quente. Após esse processo, a superfície é misturada com o ligante asfáltico, agregados virgens e agentes rejuvenescedores, onde essa mistura reciclada é recolocada sobre o pavimento remanescente.

Para o DNIT (2006) a reciclagem a quente *in situ* pode ser associada à mistura reciclada com material virgem realizada tanto como uma operação de passagem única, como uma operação de duas passagens, na qual a mistura reciclada é recompactada, onde é efetuada a aplicação de uma nova camada de desgaste após um período de espera prescrito.

ARRA (1997) descreve que tal procedimento pode ser realizado em operações de passada simples (*single-pass*) ou múltiplas passadas (*multiple-pass*). No processo de *single-pass*, materiais virgens são misturados ao RAP, o qual é oriundo do pavimento asfáltico fresado, e executado em uma única passagem. Ao passo que no processo *multiple-pass*, uma nova camada de rolamento é adicionada e, após, o RAP é recompactado.

Lima (2003) cita três processos básicos de reciclagem a quente *in situ*, os quais são reconhecidos pela ARRA (1997):

- Escarificação com aquecimento (*Heater-scarification*) ou reciclagem da superfície, onde o pavimento é aquecido, escarificado, rejuvenescido, nivelado, reperfilado e compactado;
- Repavimentação (*Repaving*), onde é utilizado o mesmo procedimento citado anteriormente, com adição de uma nova camada de mistura asfáltica de pouca espessura sobre a superfície reciclada;
- Remistura (*Remixing*), processo similar aos anteriores, porém, com um aquecimento mais efetivo, permitindo a colocação de revestimento mais espesso e, ainda, uma melhoria no revestimento antigo com correções na granulometria do agregado e, também, ajustes nas propriedades do ligante.

Para a etapa de execução, a ARRA (1997) destaca os procedimentos necessários ao processo de reciclagem a quente *in situ*:

- Amolecimento da superfície do pavimento asfáltico com calor;
- Fresagem e/ou remoção mecânica do material da superfície;
- Mistura do material com agentes rejuvenescedores e ligante asfáltico;
- Adição de material granular virgem, quando necessário para correção de granulometria;
- Assentamento e compactação da mistura reciclada sobre a superfície do pavimento.

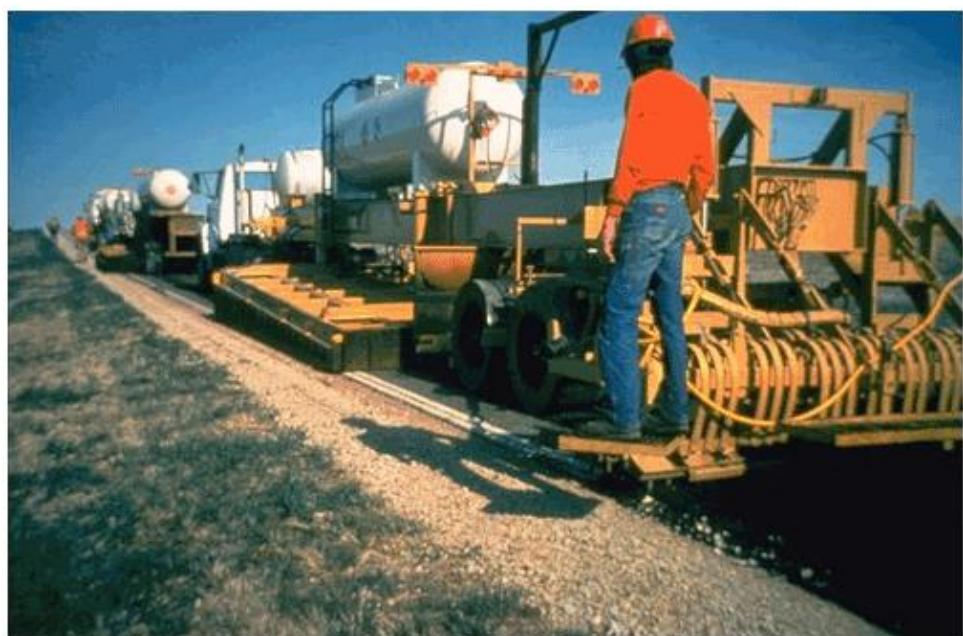
### 2.3.1.1 *Reciclagem de superfície*

A ARRA (1997) define a reciclagem de superfície como sendo um processo de reabilitação que restaura pavimentos frágeis e irregulares em preparação para um curso de revestimento final. Os pavimentos ideais para esse processo são aqueles com base estável e adequada, embora uma profundidade de 50 mm de profundidade também pode ser conseguida, sendo as profundidades mais comuns aquelas que variam entre 20 mm a 25 mm.

Ainda, mesmo que o objetivo principal do processo de reciclagem de superfície (Figura 2) consista em eliminar irregularidades da superfície, o processo também é utilizado para restaurar superfícies, para obtenção de seção transversal que assegure uma drenagem adequada, melhora na resistência de atrito da superfície e, ainda, na remoção de rachaduras reflexivas quando usado antes da sobreposição da mistura a

quente. Isto pode ser mais eficaz se um escarificador a quente for utilizado imediatamente antes da sobreposição, para melhorar a ligação entre a antiga e a nova camada (ARRA, 1997).

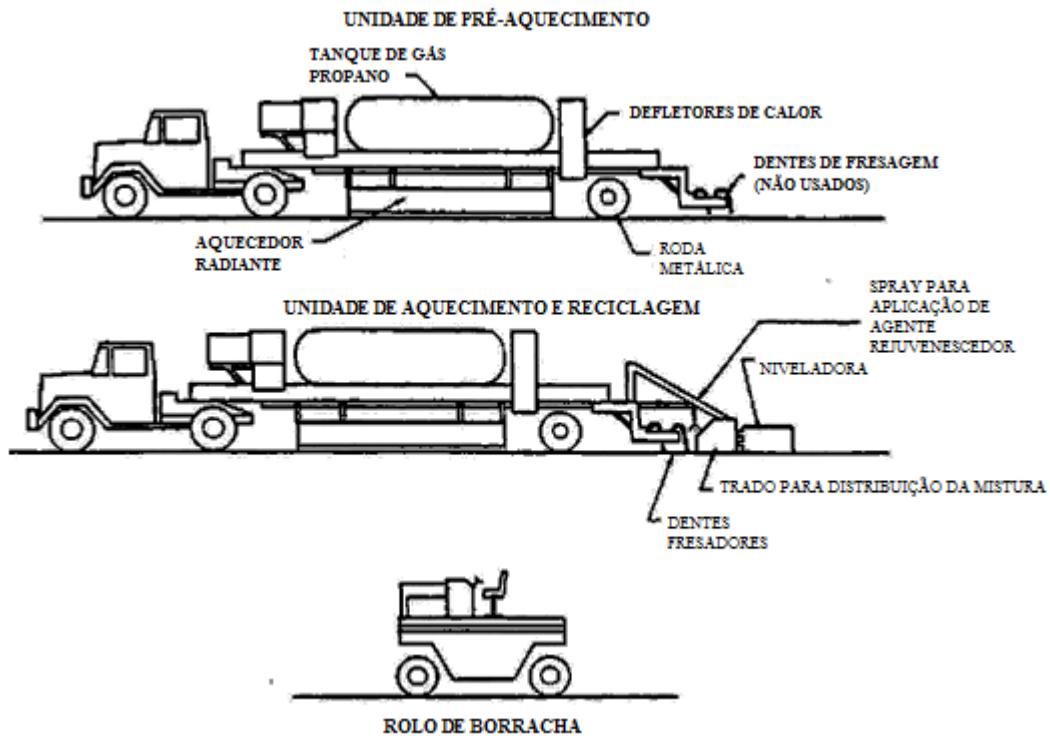
Figura 2 – Reciclagem de superfície



Fonte: (ARRA, 1997).

A Figura 3 mostra um esquema do processo de reciclagem de superfície, onde o equipamento consiste de uma unidade de pré-aquecimento, uma unidade de aquecimento e reciclagem e um rolo de pneus de borracha. A unidade de aquecimento e reciclagem aplica mais calor e fresa o pavimento com um conjunto de dentes não rotativos e agentes de reciclagem. Em seguida, o material do antigo pavimento e os agentes de reciclagem são misturados com um trado padrão e estabilizados com uma placa. Um rolo de pneus de borracha é utilizado para compactar o material reciclado. Nenhum agregado novo é, geralmente, adicionado ao processo de reciclagem de superfície.

Figura 3 – Esquema do processo de reciclagem da superfície de base



Fonte: (ARRA, 1997).

#### 2.3.1.2 Repavimentação

A ARRA (1997) define o método de reciclagem de superfície como uma reciclagem combinada com a superfície de sobreposição simultânea de uma nova camada de CA para formar uma ligação térmica entre a camada nova e a reciclada. Trata-se, basicamente, no processo de reciclagem da superfície seguido de um processo de pavimentação de sobreposição, o qual é utilizado para corrigir as deficiências da parte superior do pavimento, de 20 e 50 mm. O processo de repavimentação (Figura 4) é útil quando o processo de reciclagem da superfície não é suficiente para restaurar os requisitos de superfície desejados do pavimento.

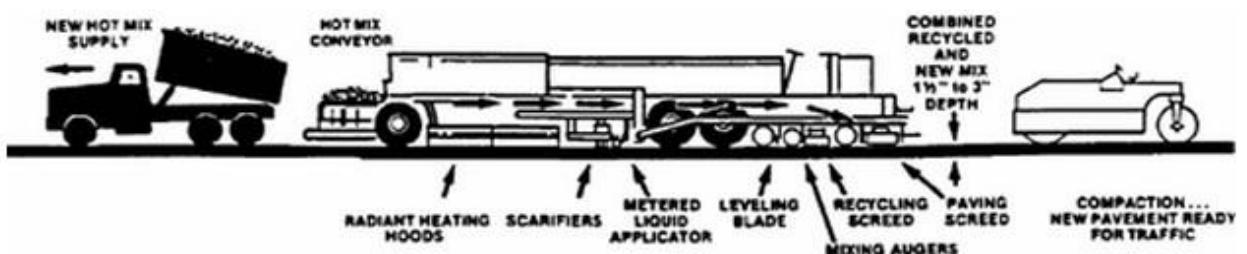
Figura 4 – Processo de Repavimentação



Fonte: (ARRA, 1997).

No processo *single-pass* de repavimentação são usadas duas argamassas de CAP. Uma é aplicada para nivelar a mistura fresada e a outra para nivelar a camada nova de CA. Os passos até a colocação da mistura reciclada são semelhantes aos do processo de reciclagem de superfície, conforme mostra a Figura 5 (ARRA, 1997).

Figura 5 – Esquema do processo de repavimentação por *single-pass*

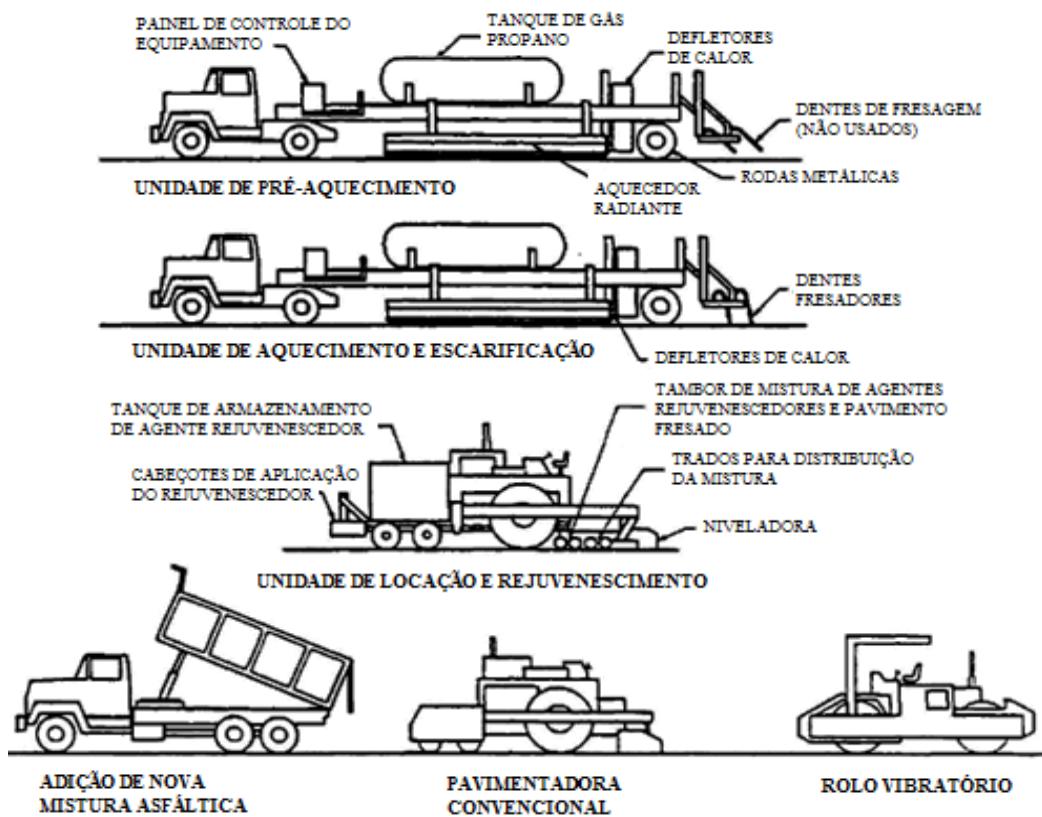


Fonte: (ARRA, 1997).

O processo de *multiple-pass* consiste de pré-aquecimento, aquecimento e escarificação e/ou moagem rotativa, aplicação e mistura de um agente de reciclagem,

aplicando a mistura reciclada como uma camada de nivelamento e, após, a colocação de um novo revestimento de CA, de acordo com a ARRA (1997), conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 – Esquema do processo de repavimentação por *multiple-pass*



Fonte: (ARRA, 1997).

### 2.3.1.3 Remistura

A ARRA (1997) define remistura (Figura 7) como um processo que consiste nas etapas de aquecimento da faixa de rolamento até uma profundidade de 40 mm a 50 mm, a escarificação e recolha do material amolecido numa leira, mistura dos agregados com o material virgem e agentes de reciclagem em um triturador de lâminas. Este método é, normalmente, utilizado quando o processo de repavimentação não é suficiente para restaurar as propriedades desejáveis do

pavimento no que diz respeito a conforto e segurança do usuário da rodovia. O processo pode, efetivamente, eliminar rachaduras e oxidação de superfície, onde são adicionados agregados e/ou CA novos, o que garantem o restabelecimento da capacidade de suporte e estabilidade para o pavimento reciclado.

Figura 7 – Processo de remistura

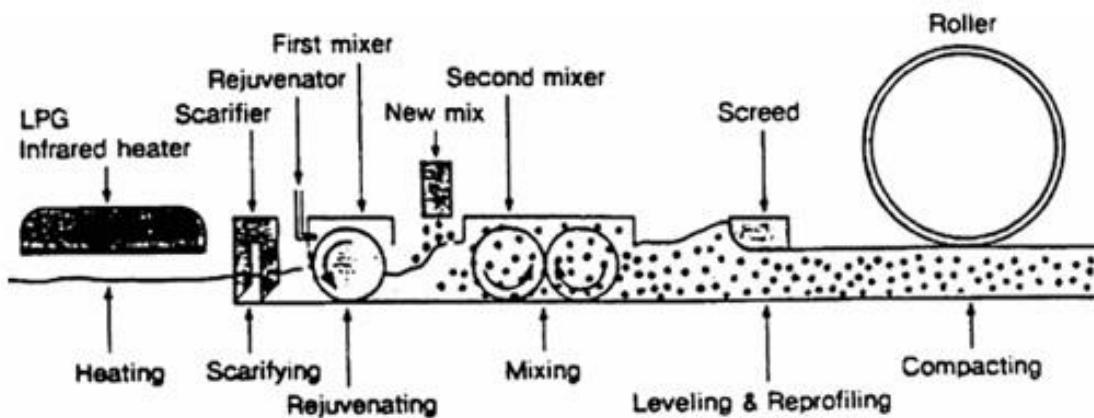


Fonte: (ARRA, 1997).

Um conceito esquemático do método de remistura é apresentado na Figura 8. No processo de execução, o pavimento é aquecido e amolecido por aquecedores infravermelhos em unidades de pré-aquecimento. A temperatura do asfalto é elevada até níveis compreendidos entre 85°C e 104°C. Então, o material amolecido é escarificado e coletado em uma leira. A escarificação pode ser feita por escarificadores fixos, podendo ser seguida de um conjunto adicional de fresadores, atingindo profundidades que variam entre 25 mm e 40 mm, embora possa alcançar mais de 50 mm. O material coletado na leira é misturado com agentes de reciclagem e agregados virgens para recomposição da granulometria. Em alguns casos, o agente de reciclagem é adicionado antes da mistura no triturador de lâminas, o que permite tempo suficiente para uma boa dispersão e mistura. A partir daí o material é espalhado

por um conjunto de brocas transversais. Uma mesa vibratória é utilizada para compactar parcialmente o material. O processo final de compactação é realizado pelo método usual.

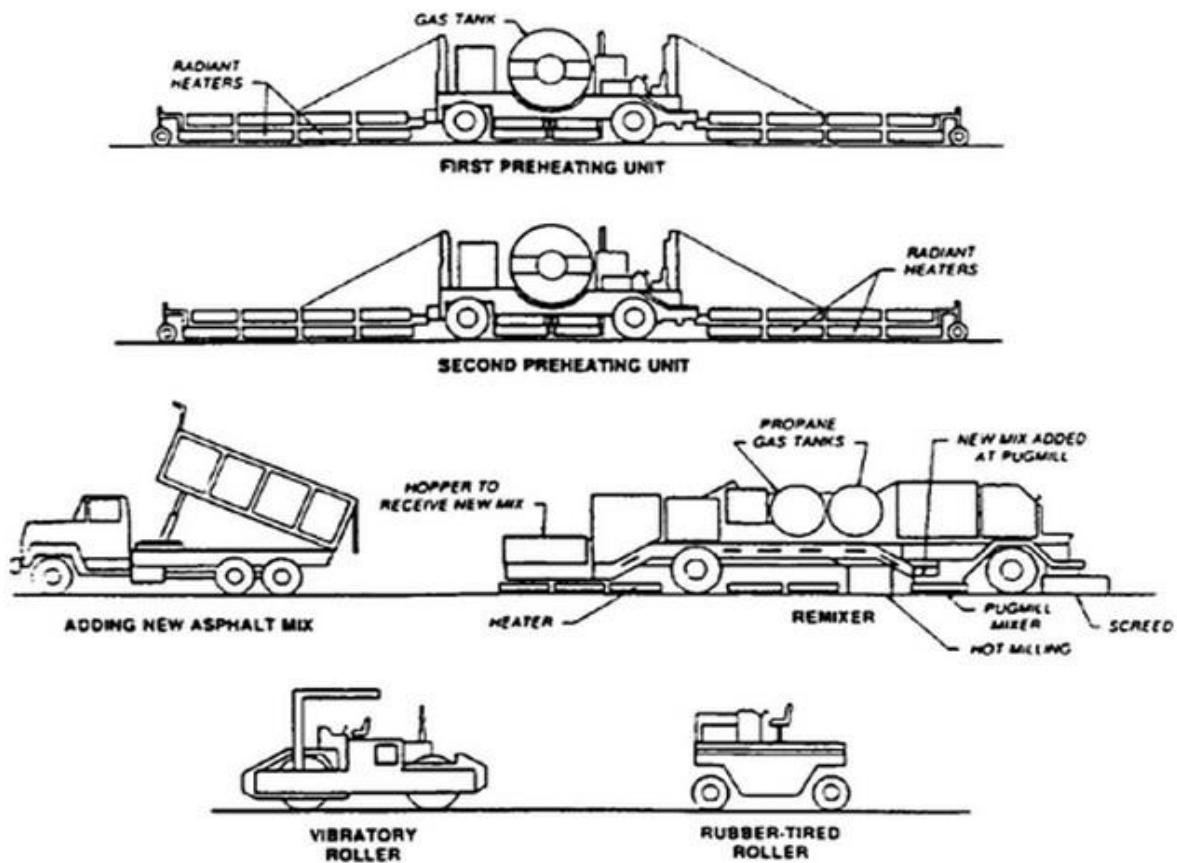
Figura 8 – Esquema do processo de remistura



Fonte: (ARRA, 1997).

A Figura 9 mostra um processo de remistura de passagem única. Esta operação requer menor uso de caminhões de transporte e pode remisturar apenas 16 a 30 kg/m<sup>2</sup> de material novo, o que resulta, portanto, em menor tempo de encerramento das faixas e menos interrupções de trânsito.

Figura 9 – Esquema do processo de remistura *single-pass*



Fonte: (ARRA, 1997).

### 2.3.2 Reciclagem a quente em usina estacionária

A reciclagem a quente em usina estacionária, segundo DNIT (2006) é um processo na qual uma parte ou toda a estrutura do revestimento é removida e reduzida, geralmente, através de fresagem a frio, com posterior transporte para mistura e recuperação em usina de asfalto. O tipo de usina mais empregado para o processo é a *drum mixer* e o produto final deve atender às especificação de misturas asfálticas a serem aplicadas nas camadas desejadas, seja base, binder ou de rolamento. Ainda, o processo inclui a adição de agregados novos, material de enchimento, CAP e, se necessário, um agente rejuvenescedor.

A sequência do desenvolvimento dos trabalhos de construção de misturas recicladas a quente em usina fixa seguem, geralmente, quatro etapas distintas. A

primeira etapa consiste na preparação do material, onde inclui a remoção do pavimento asfáltico existente com posterior redução ou fragmentação até um tamanho adequado. Tal redução pode ser feita removendo material da pista com posterior transporte para usina ou, ainda, a fragmentação do mesmo nas instalações de britagem junto à usina. A segunda etapa consiste na avaliação dos estoques, a qual consiste em conhecer as características do material estocado para fins de mistura reciclada. Ou seja, os estoques de material provenientes de uma mesma origem requerem técnicas de amostragem similares àquelas utilizadas na amostragem do agregado. Além disso, se forem removidos materiais de fontes diferentes, é importante tomar cuidados especiais na combinação dos materiais em uma única pilha. A terceira etapa consiste na usinagem a quente, na qual o principal objetivo consiste em algumas modificações no processamento das usinas convencionais, ou seja, o revestimento asfáltico removido deve ser aquecido e seco sem ser exposto diretamente à chama do secador. A exposição direta à chama pode produzir poluição do ar, bem como um endurecimento adicional do asfalto remanescente no revestimento removido. E, por fim, a quarta etapa é a de lançamento e compactação, onde a mistura será lançada e compactada como um concreto asfáltico normal, usando os procedimentos e equipamentos convencionais (DNIT, 2006).

DNIT (2006) ressalta, ainda, que na terceira etapa do trabalho de reciclagem a quente em usina, para se produzir uma mistura asfáltica reciclada a quente com sucesso, pode-se utilizar tanto usinas do tipo intermitente (gravimétrica), como usinas do tipo tambor-misturador (*drum-mixer*).

Para a ARRA (1997), os processos possíveis para obtenção de misturas asfálticas recicladas a quente em usina, são divididos em:

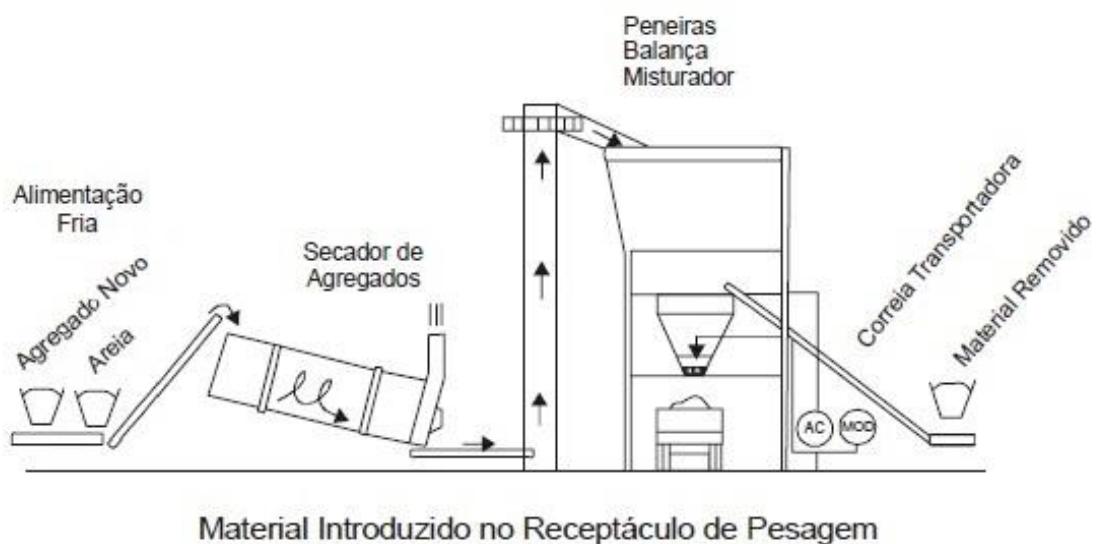
- Planta de batelada ou Centrais Gravimétricas;
- Tambor secador misturador (TSM) ou *Drum Mixer*, ou, ainda, Centrais Volumétricas.

#### 2.3.2.1 Centrais Gravimétricas

De acordo com o DNIT (2006) a principal diferença da reciclagem em usina intermitente ou gravimétrica está na introdução do material removido. Conforme mostra o esquema da Figura 10, esse material não deve passar pelo secador. Na operação de usina intermitente convencional, o agregado virgem é seco e aquecido

num secador convencional, peneirado em várias frações e, finalmente, misturado em proporções adequadas de cimento asfáltico aquecido. No primeiro esquema apresentado, o material removido, já reduzido a dimensões apropriadas e devidamente estocado, é transferido para o receptáculo de pesagem na torre de mistura, por um sistema de correia transportadora. O material removido é descarregado dentro do misturador junto com o agregado virgem superaquecido, ocorrendo a transferência de calor enquanto os dois materiais são misturados. A única técnica que tem obtido sucesso na reciclagem com usinas intermitentes é o método de transferência de calor, o qual minimiza a possibilidade de problemas de poluição do ar, ao evitar a passagem do material removido através do secador, do elevador quente e da torre de peneiramento.

Figura 10 – Esquema do processo de usina intermitente



Fonte: (DNIT, 2006).

O segundo esquema, apresentado na Figura 11, consiste na estocagem do material removido em um determinado silo do sistema de silos quentes, ou seja, o material removido é introduzido diretamente dentro do silo por meio de uma correia transportadora, sem passar pela peneiração. Após, o material removido é introduzido dentro do receptáculo de pesagem, como se fosse um agregado virgem e, finalmente, devidamente proporcionado de acordo com a fórmula de trabalho (DNIT, 2006).

Figura 11 – Esquema do processo de usina intermitente

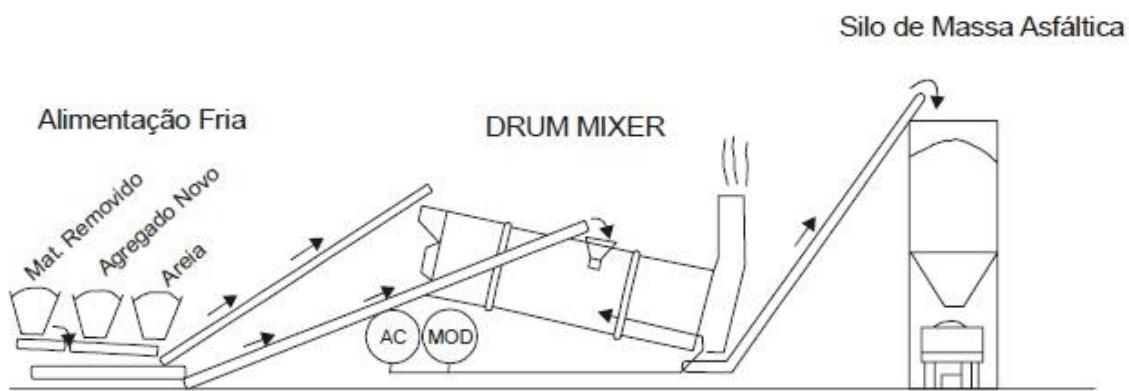


Fonte: (DNIT, 2006).

### 2.3.2.2 Centrais Volumétricas

Para o DNIT (2006), o tambor de secagem convencional, na operação de reciclagem nas usinas do tipo *drum mixer*, pode ser utilizado com algumas modificações, para que, assim, se evite que o material removido seja exposto diretamente à chama o maçarico. Além disso, a reciclagem nessas usinas é, geralmente, satisfatória, no entanto, podem não atender às exigências mínimas de qualidade do ar. Para evitar esse tipo de problema, tem-se utilizado o sistema de alimentação no centro do tambor, conforme mostra a Figura 12, onde o sistema central é o mais comumente utilizado para produzir misturas asfálticas recicladas em tambor misturador, através do qual a transferência de calor ocorre quando os dois materiais são combinados. Ainda, é nesta fase que são adicionados o cimento asfáltico adicional e/ou o agente rejuvenescedor.

Figura 12 – Operação de usina *drum mixer* na reciclagem a quente



Fonte: (DNIT, 2006).

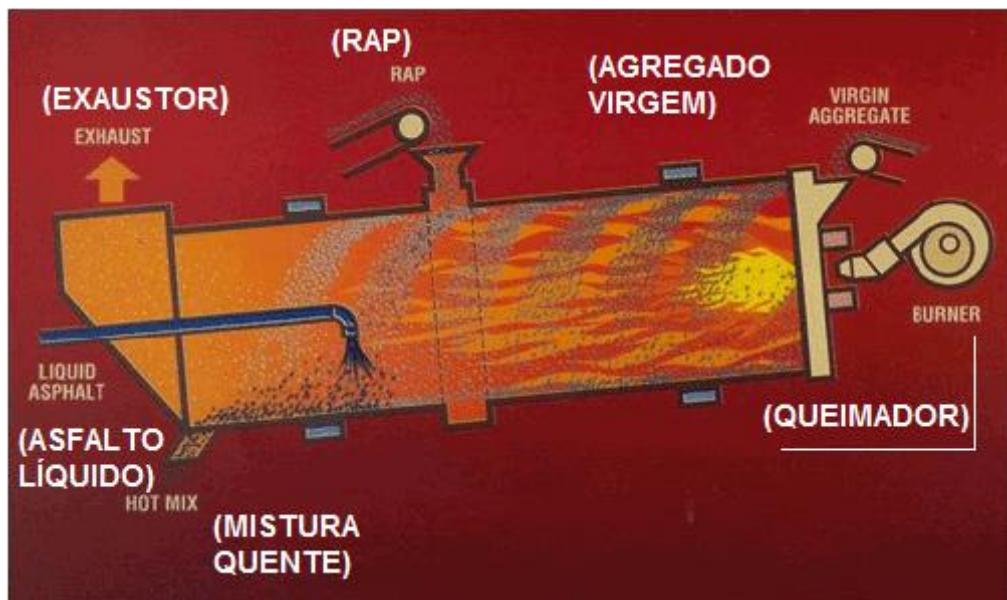
Com relação às centrais em lote de mistura, a ARRA (1997) destaca algumas vantagens importantes do TSM:

- Portabilidade: as centrais com TSM são mais portáteis e requerem menor tempo de instalação em comparação às centrais em lote;
- Versatilidade: um percentual relativamente mais elevado de material fresado pode ser incluído na mistura reciclada;
- Produção: as taxas de produção são relativamente pouco afetadas pelo percentual de material fresado utilizado;
- Mistura: uma mistura mais homogênea pode ser produzida em uma central com TSM, desde que o material fresado seja misturado com agregados virgens e ligantes asfálticos por um longo período de tempo.

Segundo a ARRA (1997), embora existam variações no processo, basicamente, o TSM é o método mais utilizado para reciclagem de misturas a quente. O processo de produção de misturas asfálticas em usinas com TSM, descrito resumidamente, funciona da seguinte forma: os agregados a serem utilizados são dispostos, previamente dosados, conforme especificações de projeto, e armazenados em silos de acordo com sua granulometria. São lançados em uma esteira que os transporta até o TSM. O interior do TSM é continuamente aquecido por uma chama proveniente de um queimador que funciona a óleo ou a gás natural. Os agregados são, em uma primeira etapa, aquecidos e secos para, então, serem misturados ao CAP que é

injetado no tambor a jusante da chama, nos tambores de fluxo paralelo e, a montante nos tambores de contra fluxo que, por sua vez, são mais vantajosos e eficientes. A mistura sai do tambor a aproximadamente 155°C pronta para ser empregada na obra. Neste processo, o RAP é introduzido no tambor, para misturar com os agregados virgens superaquecidos pelo contato direto com a chama. Os agregados virgens quentes aquecem os agregados reciclados por condução, assim, o material reciclado é protegido de entrar em contato direto com a chama do queimador por um véu denso de agregados adicionados antes do ponto em que é adicionado o fresado, conforme mostra o esquema da Figura 13. A temperatura do agregado virgem cai conforme o RAP é aquecido. A mistura reciclada é elevada até alta temperatura na última etapa do tambor, quando é incorporado asfalto líquido ao processo, completando a mistura.

Figura 13 – Esquema de tambor misturador com entrada central



Fonte: (Adaptado de ARRA, 1997).

Portanto, o material fresado não pode ser processado em usinas *drum mixer* convencionais, pois o contato do RAP com a chama do tambor, que tem por finalidade gerar calor para secagem dos agregados virgens que serão incorporados na mistura, irá resultar em queima do ligante envelhecido que está aderido ao material. Essa queima resulta na produção da chamada “fumaça azul”, que acaba prejudicando o funcionamento do sistema (ARRA, 1997).

### **2.3.3 Vantagens e Desvantagens**

De acordo com o DNIT (2006), do ponto de vista da eficiência dos custos, é possível afirmar que a reciclagem a quente dos pavimentos deve ter maior aplicação no planejamento da restauração de pavimentos. Um fator importante para esta constatação é a conservação de energia do método quando comparada com outros métodos de reconstrução. A economia proveniente das operações de reciclagem a quente na pista é bastante significativa quando comparada com um recapeamento com mistura nova.

A ARRA (1997) afirma que, quando devidamente concebido e construído, o TSM pode ser usado para corrigir defeitos de pavimento e, além disso, o processo elimina os problemas de descarte e pode ser feito repetidamente usando os mesmos materiais. Além destas vantagens, incluindo a portabilidade e a versatilidade.

Balbo e Bodi (2004) afirmam, no que diz respeito à reciclagem a quente em usina, quando comparado com outros tipos de reciclagem, além da melhor homogeneidade do processo de termo-regeneração, não está restrita a pequenas espessuras de fresagem para uma reciclagem eficiente. Por outro lado, a grande desvantagem ligada ao processo de reciclagem a quente em usina estacionária está associada ao transporte requerido, tanto para levar o RAP até a usina onde será processado, quanto para retorná-lo ao local da obra para posterior aplicação. Tal fator é decisivo na escolha do método de reabilitação aplicado em um pavimento, pois agrupa altos custos de transporte e contratemplos na obra.

### **2.3.4 Estudos laboratoriais e experimentais de reciclagem a quente**

Na atualidade, de acordo com Bressi et al. (2015), é possível observar um interesse crescente na produção de misturas asfálticas recicladas com propriedades similares aos materiais feitos de componentes 100% virgens. Além de ser economicamente viável devido aos crescentes custos com CAP e, por outro lado, desencadeada pela crescente consciência com a produção de materiais de pavimentos rodoviários sustentáveis. Na Europa, é permitida a quantidade de RAP regulada por normas nacionais. Por exemplo, na Suíça, a norma permite a utilização de um máximo de 70% de RAP em camadas de sub-base e 60% na base.

Bueche et al. (2015) também afirmam que a adição de pavimento asfáltico recuperado em misturas asfálticas a quente é uma prática comum na Suíça. Logo, com esse aumento de material reciclado, a problemática na otimização de projetos de misturas torna-se uma questão importante a ser considerada.

Na Holanda, de acordo com Mohajeri et al. (2015), misturas asfálticas recicladas a quente contendo elevadas porcentagens de RAP são cada vez mais comuns, sendo produzidas em tambor misturador ligado em paralelo, pré-aquecendo o RAP, ou por meio de cilindro de tambor duplo, o qual aquece os agregados virgens e, em seguida, mistura com RAP à temperatura ambiente. A prática mais comum, no Países Baixos, são as misturas com 50% de material reciclado, onde não é incomum pré-aquecer os agregados virgens a 320° C para obter uma temperatura de mistura, no tambor duplo, de 160°C.

Rowe et al. (2015) realizaram uma investigação local de um projeto envolvendo altas quantidades de material reciclado (quase 100%) para avaliar e determinar as diferenças de desempenho de uma seção, localizada em Fort Wayne, Indiana, um ano após a construção, quando comparada com o desempenho de um pavimento de referência. A utilização de misturas com elevadas porcentagens de RAP, avaliadas nesta pesquisa, ilustraram que o desempenho destes pavimentos é idêntico ao desempenho obtido quando comparado com misturas convencionais. Segundo os autores, a reciclagem a quente utilizando RAP vem ocorrendo nos últimos 40 anos e, devido aos fatores econômicos e ambiental, aliados à necessidade de reciclar um material que é produzido em grandes quantidades, está se tornando uma prática cada vez mais comum. Este estudo apresenta, ainda, algumas tendências de reciclagem que vêm ocorrendo nos Estados Unidos, o qual, ainda, apresenta alguns dos desenvolvimentos que têm ocorrido nos últimos anos com relação à reciclagem a quente utilizando-se de altos teores de RAP. Tal discussão fornece uma visão sobre o surgimento de tecnologias para a produção de misturas com elevados teores de RAP, o qual está ganhando força para que sejam produzidas misturas com teor superior a 70%. As porcentagens de RAP variam de acordo com cada estado e localização, dependendo de especificações locais e, ainda, de cada Departamento de Transportes (*DOT – Department Of Transport*), o qual define suas próprias políticas no que diz respeito às porcentagens de RAP permitido.

De acordo com Domingues e Balbo (2006), além da Ásia, em várias cidades médias e grandes da América do Norte e da Europa, estão sendo estudadas, *in situ*,

tecnologias semelhantes de reciclagem a quente de Concreto Asfáltico, tendo em vista a redução de custos e manutenção de pavimentos, de maneira que se tornem possíveis esses serviços em qualquer época do ano. Portanto, a garantia final da qualidade do produto exige evitar a queima do material no tambor e, além disso, é importante avaliar que a qualidade do CA reciclado depende do material a ser reciclado, bem como da fixação de diretrizes de qual tipo de CA seria mais adequado como material reciclado.

De acordo com Bento (2010), em Portugal, os estudos e obras efetuados com material reciclado são desenvolvidos utilizando uma taxa de até 40% deste agregado recuperado. No entanto, o autor desenvolveu uma pesquisa de reciclagem a quente em central incorporando 70% de fresado, submetido a ensaios de resistência à ação da água e avaliação da resistência a deformações permanentes. Para os ensaios de sensibilidade à agua, o autor verificou que as amostras atenderam o limite mínimo preconizado para a categoria mais exigente de resistência à tração, de acordo com as normas europeias utilizadas, bem como os ensaios de pista realizados em laboratório para avaliação da resistência a deformações permanentes. Além disso, o autor concluiu que quanto maior a taxa de incorporação de material recuperado, maiores as dificuldades na elaboração das várias fases do estudo, bem como o cumprimento das exigências de conformidade definidas para este tipo de mistura. No entanto, as misturas recicladas a quente com elevada taxa de incorporação de material reciclado constituem uma solução técnica e ambiental importante, pois, apresentam propriedades mecânicas similares ou superiores às das misturas tradicionais.

Vasconcelos e Soares (2003) analisaram os resultados de dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente com teores de 0, 10 e 50% de material fresado e um cimento asfáltico de petróleo classificado como CAP 50/60. Além disso, os autores utilizaram o agente rejuvenescedor AR-75, visto que o ligante existente no material fresado encontrava-se bastante oxidado. A análise do comportamento mecânico das misturas foi realizada através dos ensaios de MR e RT. Embora os valores encontrados pelos autores, para os diferentes teores de fresado, foram semelhantes, foi observada uma tendência de crescimento tanto do MR quanto do RT, principalmente para o maior teor de fresado incorporado. Assim, através dos resultados dos ensaios mecânicos, foi apontada que a utilização do material fresado em misturas asfálticas não compromete o comportamento mecânico das mesmas.

Ainda, Vasconcelos e Soares (2004) avaliaram a influência do percentual de 10, 30 e 50% de material fresado e seu envelhecimento de curto prazo na dosagem de 3 misturas asfálticas recicladas a quente (MARQ). A seleção dos agregados foi enquadrada na Faixa C do DNER, sendo utilizada brita 3/4", como agregado graúdo, areia de campo como agregado miúdo e filer natural proveniente da própria areia de campo, todos provenientes da pedreira de Itaitinga/CE. O ligante utilizado foi o CAP 50/60. Para esta pesquisa, a dosagem das MARQ's mostrou-se de difícil execução quando baseada nos parâmetros volumétricos, devido à heterogeneidade do material fresado. Com exceção da mistura com 10% de fresado e 1h em estufa, todas as demais apresentaram aumento do teor de projeto com o aumento do tempo de envelhecimento de curto prazo. O CA convencional foi o que apresentou menor variação do teor de projeto com o tempo de envelhecimento em estufa. Segundo os autores, a diferença em relação às MARQ's pode ter sido causada pela diferença de absorção dos agregados virgens e do RAP.

Já Neves Filho et. al (2007) avaliaram a influência da incorporação de aditivos melhoradores de adesividade comerciais (dopes) no comportamento de misturas asfálticas a quente. O comportamento das misturas asfálticas foi avaliado por meio de ensaios de MR e RT em amostras virgens e previamente submetidas a variações do condicionamento proposto pelo método da AASHTO T-283 (*Lottman* modificado), o qual compara a resistência à tração de dois grupos de amostras, um de amostras não condicionadas e o outro sujeito à saturação parcial de vácuo com ciclo de congelamento. Os resultados do programa experimental desenvolvido pelos autores mostraram que alguns dos agentes utilizados proporcionaram melhoria na adesividade entre o ligante e o agregado de misturas asfálticas a quente e que o ensaio de RT foi o que permitiu, de maneira mais eficaz, a avaliação desta propriedade, pois, o valor de MR após o condicionamento severo, não possibilitou uma avaliação adequada das propriedades adesivas das misturas asfálticas. No entanto, os autores recomendam que esse procedimento deva ser melhor investigado para avaliação da adesividade.

Souza et. al (2008) realizaram um estudo sobre o comportamento de 3 misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo no estado do Pará, os quais atendiam à Faixa C da antiga especificação do DNER, ES-313/97, moldadas com ligante CAP 50/70. As características mecânicas das misturas foram definidas pelo MR, RT e deformabilidade sob cargas repetidas e fadiga em corpos de

prova cilíndricos compactados, segundo a metodologia Marshall. Ainda, a análise dos autores foi baseada no método Bailey, o qual obtiveram uma mistura confeccionada com seixo britado que atendeu às recomendações definidas pelo método e, ainda, teve o melhor desempenho com relação à fadiga. Com respeito aos resultados de MR, os módulos das misturas analisadas apresentaram valores semelhantes, variando de 2469 MPa à 2576 MPa, o qual foi possível observar, de maneira geral, que a variabilidade entre resultados individuais de cada mistura é muito pequena. Para os resultados de RT, a utilização do seixo britado proporcionou um aumento da RT em uma das misturas (0,79 MPa), sendo que as outras duas misturas apresentaram um valor considerado igual (0,75 e 0,74 MPa), do ponto de vista prático, dificultando associar esse parâmetro ao teor de ligante ou à granulometria de cada mistura. Com este estudo, os autores confirmaram a viabilidade técnica e econômica do seixo rolado, em laboratório, conforme bom comportamento do CA verificado em campo, já que o emprego de seixo rolado como agregado em misturas asfálticas, no estado do Pará, é uma realidade de prática comum em obras de pavimentação.

Lima (2003) tratou do comportamento mecânico, em laboratório, de misturas asfálticas recicladas a quente, através de misturas asfálticas dosadas sem a adição de material fresado e com adição de 10%, 30% e 50% de fresado. Ainda, o autor utilizou um agente rejuvenescedor à base de petróleo (AR-75) para as misturas recicladas. Para o parâmetro de RT, o autor observou uma tendência de aumento com o aumento do teor de fresado. No entanto, a mistura sem fresado apresentou um valor médio de RT acima dos valores apresentados por misturas convencionais. Para resultados de MR, as misturas apresentaram valores médios crescentes com a quantidade de material fresado utilizado e, ainda, apresentaram uma maior variação nos valores medidos nas misturas com maior quantidade de fresado, o que demonstra um aumento na rigidez. As relações MR/RT também apresentaram valores crescentes com o aumento do teor de fresado. Ainda, o autor concluiu que a elevada rigidez das misturas avaliadas indicou um não completo rejuvenescimento do ligante envelhecido por parte do AR e, também, que a mistura com maior teor de fresado (50%) foi a que apresentou um melhor comportamento mecânico quando comparada às demais misturas. Além disso, segundo o autor, um outro fator importante e responsável pelo aumento da rigidez em misturas asfálticas recicladas foi o tipo e a proporção na mistura asfáltica do AR, necessária para trazer a mistura para a viscosidade definida no processo de dosagem.

Pereira (2011) utilizou teores de fresado ainda maiores, da ordem de 70%, 80% e 90%. O trabalho consistiu em avaliar o desempenho técnico de pavimentos flexíveis usinados a quente com a adição do material fresado, utilizando CAP 50/70 e agente rejuvenescedor AR-75 com porcentagens de 15% e 30%. Os resultados obtidos com a adição de 15% de AR apresentaram valores crescentes com o aumento do teor de fresado, onde há um aumento na rigidez das misturas. Ao passo que nos resultados obtidos com adição de 30% de AR, houve aumento na rigidez, contudo, os resultados ficaram próximos da Faixa C do DNIT sem adição de fresado. Para resultados do parâmetro de estabilidade, a autora encontrou valores crescentes com o aumento do teor de fresado, indicando aumento na rigidez das misturas. Para resultados de fluência, praticamente, não teve variação de uma amostra para outra com aumento no teor de fresado e AR. A mistura que apresentou o melhor comportamento mecânico foi a com adição de 30% de AR e 70% de material fresado, isto quando comparada com as demais misturas com adição de fresado e AR, pois esta não ficou tão rígida quanto às demais. Ao passo que a mistura que mais se aproximou à faixa C do DNIT foi a mistura que não teve adição de fresado.

Os resultados obtidos por Domingues e Balbo (2006) revelam as características de um CA reciclado pelo processo a quente empregando mini-usinas transportáveis, tais como o elevado módulo de elasticidade para misturas sem adição de agentes de reciclagem, bem como o contrário quando da introdução de produtos desta espécie. O procedimento de reciclagem adotado pelos autores contemplou o caso de elevada taxa de reciclagem, com 100% de CA fresado ou em pedaços, sem a adição de novos agregados, apenas com a incorporação de AR e CAP modificado com borracha moída. Além disso, os autores observaram que, logicamente, quanto menor a quantidade de reciclados no misturador, menor o tempo de mistura, embora o material úmido aumente tal tempo. Para eles, o emprego de pequena quantidade de material reciclado deixa este sujeito a superaquecimento, o que resulta em misturas muito rígidas, embora permita uma rápida preparação e boa produção, fica restrita a pequenos reparos ou, ainda, uma possível circunstância de emprego seria como base rígida e não como revestimento. Já o emprego de volumes maiores de material reciclado no tambor misturador evitou a queima da mistura e, ainda, resultou em melhores CA reciclados, os quais foram considerados passíveis de emprego como camada superficial. No entanto, a ausência de um controle *a priori* sobre o AR ou o novo CAP, o qual exige uma intimidade e experiência muito grande do operador, foi

considerado como uma das maiores limitações do processo empregado, que fica dependente de um empirismo razoável, diferindo, portanto, do processo convencional de reciclagem a quente em usina fixa de grande porte.

A pesquisa de Zubaran e Motta (2015) resumiu um trabalho feito para avaliar o comportamento de misturas recicladas a quente em laboratório, criando projetos com diferentes taxas de material fresado e agente rejuvenescedor. O objetivo da pesquisa foi avaliar o comportamento volumétrico e mecânico de misturas recicladas a quente produzidas em laboratório com diferentes taxas de fresado, com avaliações relativas a uma mistura de referência (sem adição de fresado) comparadas àquelas produzidas em usina (do tipo mistura morna). O ligante utilizado foi o CAP 30/45, atualmente utilizado em, praticamente, todas as misturas asfálticas produzidas no estado do Rio de Janeiro, e um agente rejuvenescedor denominado AR-75. O material fresado da pesquisa foi proveniente de uma importante avenida da cidade do Rio de Janeiro chamada, popularmente, de Linha Vermelha, cujo nome oficial é Av. João Goulart. Foram desenvolvidos cinco projetos de misturas asfálticas, o primeiro constituído apenas de materiais virgens, o segundo com aproximadamente 30% de fresado, e os outros três com aproximadamente 50% de fresado. O objetivo de produzir três projetos com 50% de fresado foi de avaliar diferentes dosagens de AR-75 e CAP 30/45. Para as misturas fabricadas em usina, os resultados de RT foram inferiores às misturas produzidas em laboratório, o que correlaciona a rigidez com o envelhecimento a curto prazo do ligante asfáltico, o que indica que a usinagem provocou um menor envelhecimento do que as duas horas de tratamento a curto prazo utilizadas pela moldagem prévia da metodologia Superpave. Os valores de MR também foram inferiores para as misturas fabricadas em usina, concluindo que as misturas fabricadas em usina apresentaram menor rigidez do que as fabricadas em laboratório. Além disso, todas as misturas obtiveram dano por umidade induzida abaixo do recomendado. Entretanto, as misturas com fresado reduziram a susceptibilidade das mesmas à ação deletéria da água. Os autores também concluíram que a inserção do material fresado aumentou a resistência ao cisalhamento das misturas, principalmente a com 50% de fresado, através da análise das misturas em laboratório e ensaiadas pelo procedimento de *Flow Number*.

Brosseaud (2011) apresentou um estudo sobre as características mais importantes da combinação de misturas asfálticas de módulo elevado com adição de 50% e 65% de material fresado. A ideia central do artigo foi verificar o desempenho

da mistura asfáltica, para efeito de comparação dentro do estudo preliminar e dos ensaios laboratoriais com misturas provenientes de usina, para avaliação das propriedades mecânicas, como módulo complexo e deformação permanente. Não foi utilizado agente rejuvenescedor, apenas um asfalto duro. Nesta pesquisa, o autor concluiu que, se forem aplicadas as disposições de se poder reutilizar os materiais nas mesmas condições que no estado inicial, na reciclagem, onde, na mesma camada, as taxas mais elevadas possíveis são compatíveis com as disponibilidades do material sem comprometer a durabilidade da rodovia e, além disso, sempre conservando a simplicidade e a eficácia das misturas asfálticas em um ambiente econômico e ambientalmente compatível, assim, é prevista uma taxa de economia de reciclagem de 10% sistemática para as centrais fixas, reciclando as misturas asfálticas antigas fresadas e peneirando. Por outro lado, se forem consideradas essas mesmas disposições, a taxa de economia passa a 50% nos trechos de autopistas ou similares, permitindo a utilização total das misturas asfálticas antigas disponíveis, o que preservaria os recursos naturais de maneira sustentável, reduzindo os transportes de matéria prima.

A tese de Araújo (2004) mostra o estudo do comportamento do material fresado de revestimento asfáltico, visando sua aplicação em reciclagem de bases de pavimentos rodoviários. Para tanto, diversos ensaios laboratoriais foram realizados no material fresado e, posteriormente, foi feito um estudo da porcentagem ótima deste material em uma mistura com cascalho laterítico de base. Entre as diversas conclusões do trabalho, o autor cita que a película de ligante que envolve os grãos do fresado de revestimento asfáltico influencia nas propriedades do material. Além disso, a presença do filme asfáltico produz uma redução do ângulo de atrito interno, o que confere ao fresado uma componente de deformação viscosa, a qual reflete nos valores de CBR, RT e MR, tanto do fresado quanto da mistura com cascalho laterítico de base. Quanto à resistência, o autor notou que a presença do ligante asfáltico envolvendo os agregados facilita o deslizamento de uma partícula sobre a outra, diminuindo assim, o atrito e, consequentemente, o CBR. E, ainda, outro aspecto verificado foi com relação ao comportamento de resiliência os materiais estudados diz respeito à incorporação do fresado ao cascalho, visto que, por exemplo, com a incorporação de 25% de fresado, houve ganho de módulo de resiliência. Logo, as análises mecânicas e econômicas mostraram que a reciclagem de material fresado

de revestimento asfáltico e cascalho é uma solução técnica e economicamente viável para a pavimentação.

Bressi et al. (2015) realizaram um trabalho baseado na hipótese de que, durante a reciclagem, o RAP seria combinado com agregados virgens, bem como CAP virgem. Os autores esperavam, como resultado desse processo, que o RAP se anexasse aos agregados virgens ou, ainda, formasse um aglomerado em conjunto com o CAP virgem, sendo que um dos grandes desafios na reciclagem de CAP é a aderência do pavimento asfáltico recuperado. Por isso, os autores investigaram dois tipos de misturas contendo agregados virgens, CAP e 50% e 90% de RAP em diferentes temperaturas de mistura. Entre as conclusões do estudo foi apresentado que o índice de agrupamento indicou que o CAP extraído da mistura era mais rígido do que o que representa as proporções de projeto, revelando menos presença de CAP virgem na parte fina da mistura. Na maioria dos casos, a diferença é mais evidente nas temperaturas médias e altas, isto por que as propriedades do ligante nestas temperaturas, geralmente, são mais sensíveis do que em misturas de baixas temperaturas. Além disso, conforme a quantidade de RAP na mistura diminui, o fenômeno de agrupamento se torna menos evidente ou até nulo.

Fonseca et al. (2013) apresentaram um estudo com foco na problemática da reciclagem, tratando, especificamente, da produção de misturas betuminosas recicladas com elevadas taxas de incorporação de material fresado, a quente e temperadas, utilizando porcentagens crescentes até 50% de material fresado. Neste trabalho, os autores determinaram as propriedades do material fresado e as condições ideais em que deveriam ser produzidas estas misturas, de modo que possuíssem um desempenho mecânico idêntico ao de uma mistura betuminosa convencional e, ainda, mantendo adequadas condições de produção em central. Com isso, verificou-se que o processo de separação do material fresado tem uma significativa influência nas propriedades das frações fina e grossa do material. Ainda, o betume deste material encontrou-se muito envelhecido e, por isso, foi fundamental o seu rejuvenescimento, para que, assim, pudesse ser reduzida a sua rigidez e melhorada a sua flexibilidade. Logo, os autores verificaram a importância de realizar uma adequada caracterização do material fresado a ser utilizado em misturas betuminosas recicladas a quente, em especial quando se pretende utilizar elevadas taxas de incorporação do material reciclado.

Gomes et al. (2006) estudaram misturas recicladas com o rejuvenescimento do betume envelhecido através da utilização de aditivos. Os autores analisaram seis tipos de misturas: mistura betuminosa sem adição de fresado utilizando CAP 35/50, mistura com 30% de fresado utilizando CAP 35/50, mistura com 30% de fresado utilizando CAP 50/70 e três misturas com 30% de fresado e CAP 35/50 com diferentes tipos de agente rejuvenescedor. Tal estudo revelou que as misturas recicladas apresentaram um comportamento inferior, quando comparadas a misturas tradicionais, do ponto de vista da resistência às deformações permanentes. Já, quando comparadas pela resistência à fadiga, as misturas recicladas não diferem do comportamento da mistura tradicional.

Basueny et al. (2015) realizaram um estudo de avaliação das propriedades de módulo complexo e fadiga, através de quatro misturas contendo RAP nas proporções de 0, 15, 25 e 40% adicionados ao agregado virgem e ligante asfáltico. Segundo os autores, a avaliação de desempenho de misturas asfálticas recicladas consiste na grande prioridade para a reciclagem de pavimentos. Os principais resultados desta investigação giraram em torno das propriedades viscoelásticas lineares e resistência à fadiga das misturas, através dos ensaios de módulo complexo e vida de fadiga investigados através de testes de tensão-compressão. Em geral, os resultados do estudo indicaram que as misturas contendo RAP apresentaram maior rigidez ou, pelo menos, semelhantes à mistura de referência, a qual não continha material reciclado. As misturas asfálticas contendo 25% de RAP apresentaram maior rigidez quando submetidas a temperaturas mais baixas ou altas frequências e, ainda, os autores não encontraram nenhuma tendência entre a quantidade de RAP e o número de ciclos necessários para alcançar o rompimento por fadiga, sendo que a maior resistência à fadiga foi encontrava nas misturas com 40% de RAP. Os resultados de módulo complexo foram analisados através do modelo reológico 2S2P1D, no qual as misturas foram classificadas pela rigidez em alta frequência e baixa temperatura, iniciando pela mistura de referência, seguida pela mistura com 40% de RAP e a mistura com 15% de RAP, sendo a mistura com 25% de RAP considerada como a mistura mais rígida. O experimento indica que a adição de RAP em misturas asfálticas afeta o módulo complexo e a vida de fadiga, No entanto, os autores observaram que os resultados de módulo complexo foram inesperados, uma vez que a adição de RAP, geralmente, aumenta a rigidez de uma mistura e, neste caso, a mistura com 25% apresentou-se mais rígida do que a mistura com 40% de RAP.

## 2.4 AJUSTE GRANULOMÉTRICO E APLICAÇÃO DO MÉTODO BAILEY

As misturas asfálticas, atualmente, são dosadas por tentativas a partir de uma faixa granulométrica de referência, por exemplo, a Faixa C do DNIT utilizada neste trabalho, tornando-se, para projetistas menos experientes, um método difícil, de tentativas e erros, no qual as características desejadas não são garantidas e, tampouco, o aproveitamento da contribuição do esqueleto mineral sobre as características mecânicas das misturas asfálticas.

O agregado apresenta uma importante tarefa na mistura asfáltica, pois tem a capacidade de resistir à maior parte das cargas impostas pelo tráfego, possuindo esta capacidade devido a sua textura superficial, dureza, angularidade, forma e distribuição granulométrica. Sendo assim, faz-se necessário um método de dosagem de misturas asfálticas que se baseie na distribuição granulométrica dos agregados e, ainda, que considere a importância dos mesmos para o desempenho e a durabilidade, o que é essencial para garantir pavimentos de qualidade.

O Método Bailey se baseia numa seleção e avaliação granulométrica que visa a escolha de uma estrutura adequada de agregados de misturas densas e descontínuas para o bom desempenho das misturas asfálticas. Tal método também permite ajustes no volume de vazios das misturas em função da porcentagem de cada material utilizado e, ainda, considerando o intertravamento dos agregados graúdos.

Este método foi desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey no Departamento de Transportes de Illinois (IDOT) e é usado desde 1980, no entanto, ainda com pouco uso e conhecimento no Brasil. De acordo com Cunha et. al (2004) o método visa aperfeiçoar a seleção granulométrica por volume dos agregados e, consequentemente, o desempenho das misturas asfálticas. Através da seleção e do ajuste da graduação dos agregados, a técnica proporciona uma mistura asfáltica com esqueleto de agregados bem equilibrado, capaz de resistir à deformação permanente. Além disso, resulta em um proporcionamento adequado do volume de vazios no agregado mineral, o que permite um maior teor de ligante e aumento da durabilidade da mistura.

Segundo o *Asphalt Institute* (2015), este método consiste em uma ferramenta prática que tem sido utilizada com sucesso para o desenvolvimento e análise de misturas asfálticas a quente no laboratório e no campo. O método oferece um bom ponto de partida para o projeto de mistura e uma ajuda inestimável de ajustamentos

no projeto para melhorar o número de vazios de ar e a viabilidade da mistura, tanto usando o método de dosagem Marshall quanto o Superpave. Essencialmente, o Método Bailey pode ajudar a explicar por que algumas misturas são difíceis de compactar e, ainda, fornece uma visão sobre por que pequenas alterações na graduação dos materiais, que geralmente ocorrem durante a produção e estão dentro das tolerâncias admissíveis, podem causar mudanças significativas nas propriedades volumétricas das misturas asfálticas.

Para Mendes (2011) os dois princípios básicos utilizados pelo método de Bailey são o arranjo de agregados e a definição de agregados graúdos e miúdos, que se diferencia das definições utilizadas normalmente. Além disso, para iniciar a aplicação do método, combinam-se os agregados em volume e a mistura resultante é analisada. Inicialmente, deve ser selecionado o grau de intertravamento dos agregados, que torna a mistura capaz de resistir às deformações permanentes. Para garantir que a quantidade de ligante asfáltico seja suficiente, deve ser modificada a quantidade de agregado graúdo e miúdo, alterando-se os Vazios no Agregado Mineral (VAM).

Segundo Cunha (2004) a técnica do método de Bailey possibilita o intertravamento do agregado graúdo, se desejado, e uma boa compactação dos agregados. O intertravamento dos agregados é dado de entrada para os cálculos, sendo o responsável pela resistência à deformação permanente da mistura. Para assegurar uma quantidade ideal de asfalto, os vazios no agregado mineral podem variar mudando a quantidade de agregado graúdo e fino na mistura. Desta forma, misturas selecionadas granulometricamente pelo Método Bailey podem ter um esqueleto de agregados com alta estabilidade e um volume adequado de VAM para uma boa durabilidade.

Por isso, além da utilização de materiais adequados, com melhores propriedades físicas, como forma, textura superficial e angularidade adequadas, é necessário um método de dosagem granulométrica que garanta uma estrutura adequada e que permita, ao mesmo tempo, um teor de ligante suficiente para manter a boa durabilidade. Assim, o método visa suprir a necessidade de um método sistemático de seleção granulométrica de misturas asfálticas, capaz de proporcionar um revestimento com resistência às deformações, trincas por fadiga e ao desgaste (CUNHA, 2004).

Conforme Cunha (2004), para misturas dosadas com o Método Bailey, foram obtidos maiores valores de vazios no agregado mineral e de relação betume vazio

(RBV) do que em misturas dosadas por métodos tradicionais, o que indica misturas menos propensas a deformações permanentes e potencialmente mais resistentes às trincas por fadiga. Além disso, as misturas dosadas através do Bailey apresentaram menores valores de relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração, indicando equilíbrio entre a resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga, o que justifica a utilização do método.

Segundo Mendes e Marques (2012), o método de Bailey apresenta uma forma diferente de classificar os agregados graúdos e miúdos, a qual se baseia no Tamanho Máximo Nominal (TMN) de cada mistura. Nesta denominação, os agregados graúdos são aqueles que formam vazios quando colocados em um volume definido, e os agregados miúdos são aqueles capazes de preencher os vazios criados pelos agregados graúdos presentes na mistura. Além disso, para poder diferenciar os agregados graúdos e miúdos, o método utiliza uma Peneira de Controle Primário (PCP), que se baseia no TMN da mistura.

Para Mendes (2011) são definidas três proporções para os agregados: proporção de agregados graúdos (proporção AG), proporção graúda dos agregados finos (GAF) e proporção fina dos agregados finos (FAF), as quais caracterizam o arranjo dos agregados.

## 2.5 DOSAGEM SUPERPAVE DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Através de procedimentos experimentais, Bernucci et al. (2010) definem a dosagem de uma mistura asfáltica como sendo um método de escolha de um teor dito como ótimo de ligante, a partir de uma faixa granulométrica predefinida. Como forma de ressaltar que sua definição é convencional, este teor ótimo de ligante é denominado teor de projeto da mistura, o qual varia de acordo com o método de dosagem escolhido e, ainda, em função de parâmetros como energia de compactação, tipo de mistura, entre outros.

Para o *Asphalt Institute* (2015) existem vários tipos de procedimentos de dosagem em laboratório, tais como o Superpave, Marshall, Hveem e métodos especiais. Cada procedimento tem suas vantagens e desvantagens. O método do Superpave, ainda pouco conhecido e utilizado no Brasil, já é amplamente praticado no exterior, e este será o método de dosagem utilizado nesta pesquisa.

De acordo com Alshamsi (2006), o procedimento de Hveem é o mais abrangente e fornece uma abordagem relativamente fundamental para a caracterização de misturas. O método Marshall determina o conteúdo de ligante com base em um teste mecânico simples, o qual fornece alguns índices para misturas características. Já o Superpave foi introduzido para desenvolver uma melhor mistura de projeto para ser aplicado em vários volumes de tráfegos, cargas por eixo e condições climáticas.

O método Superpave, segundo o *Asphalt Institute* (2015), é atualmente considerado o mais comum procedimento de dosagem de mistura asfáltica na América do Norte, o qual foi desenvolvido no início de 1990, como parte do Programa de Pesquisa Estratégica. Então, este método desenvolvido nos Estados Unidos pelo programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) chamado de especificação SUPERPAVE (*Superior PERformance asphalt PAVEments*), de acordo com Lima (2003) representa um sistema aperfeiçoado para especificações de ligantes e agregados, para projeto e análise de misturas betuminosas e, ainda para a previsão do desempenho de pavimentos.

Ainda de acordo com o *Asphalt Institute* (2015) o objetivo do Programa de Pesquisa do Asfalto era desenvolver uma especificação de ligante asfáltico com base no desempenho, uma especificação de mistura – *Performance-Graded* (PG) – seria o resultado da pesquisa. Esta tecnologia representa uma evolução das ideias que foram avaliadas ao longo dos anos. No entanto, uma das limitações dos sistemas de projeto de misturas atual (Marshall, Hveem ou Superpave) é a incapacidade de medir o desempenho esperado, especificamente a capacidade de medir a resistência, trincas por fadiga e envelhecimento do ligante asfáltico e, ainda, resistência da mistura e danos por umidade.

Alshamsi (2006) descreve que, no sistema de classificação PG, as camadas são especificadas com base no clima e no nível escolhido de confiabilidade. Vários testes foram propostos para avaliar o CAP, na qual os requisitos para as propriedades físicas dos ligantes de asfalto eram os mesmos, enquanto que a temperatura a que se esperava que o aglutinante atingisse a propriedade mudaria de acordo com o clima. O autor afirma que os ligantes PG são especificados por PG X-Y, na qual o primeiro número de X é referido à temperatura elevada e esta seria a temperatura máxima média de 7 dias do pavimento. O segundo número Y representa a menor temperatura,

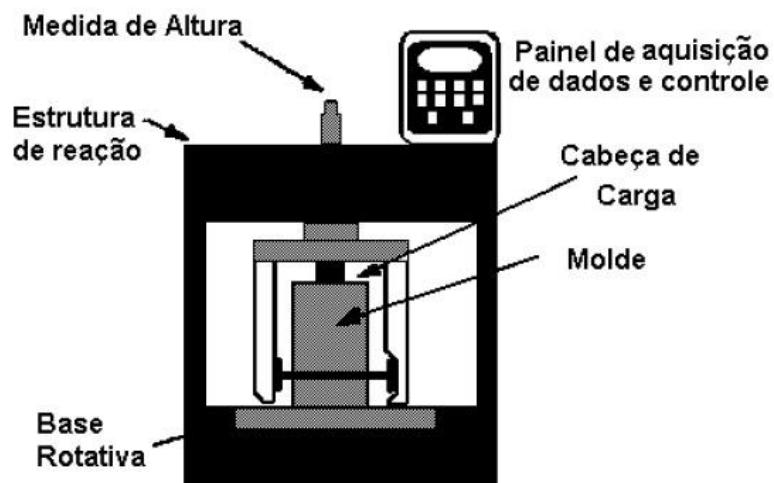
na qual é esperado que esta seja a temperatura a qual o ligante possui flexibilidade suficiente para evitar fissuração.

Segundo Bernucci et al. (2010) desde 1993 os departamentos de transporte norte-americanos vêm utilizando a metodologia Superpave, a qual ainda se encontra em fase de testes no Brasil. Foi proposta pela SHRP, entre outras mudanças, uma metodologia distinta que consiste, basicamente, em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis. Além disso, a grande diferença entre o método Superpave e o Marshall é a forma de compactação, ou seja, enquanto na dosagem Marshall a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave esta é realizada por amassamento (giros).

Para Alshamsi (2006) o compactador giratório Superpave é capaz de monitorar a taxa de densificação durante a compactação. A pressão dinâmica é monitorada por um manômetro de pressão e carregamento, capaz de manter a pressão de compactação. Além disso, o número de giros do projeto depende do nível de tráfego para o qual a mistura é projetada, onde a energia de compactação mais elevada é aplicada a misturas de tráfego pesado.

De acordo com o esquema simplificado de Marques (2004), a base do compactador giratório é afixada em uma estrutura de reação constituída por um pórtico não deformável, o qual suporta o molde e permite o giro (Figura 14). A compressão do corpo-de-prova é feita pela cabeça de carga durante a compactação, sendo que seu diâmetro corresponde, nominalmente, ao diâmetro interno do molde (100 mm ou 150 mm). O ângulo de compactação utilizado no ensaio foi definido em 1,25°, a uma velocidade constante de giro de 30 rpm, enquanto a pressão de compactação é de 600 kPa, a qual é fornecida por um sistema hidráulico ou mecânico.

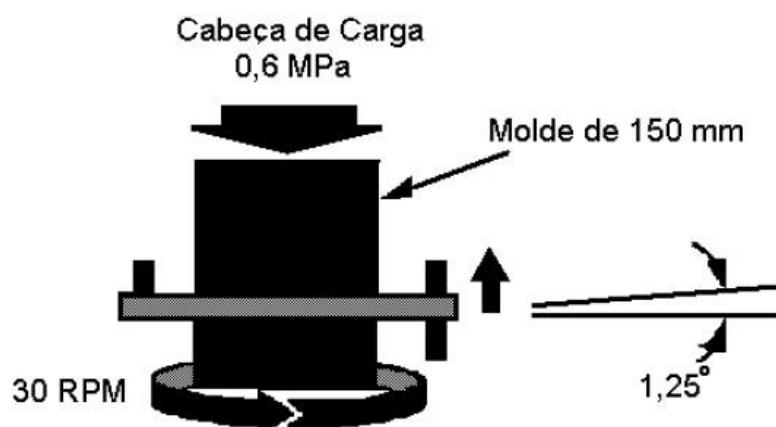
Figura 14 – Esquema simplificado do compactador giratório



Fonte: (MARQUES, 2004).

Durante a compactação, a pressão da cabeça de carga pode ser medida e, para que a pressão de compactação seja mantida constante durante o processo, conforme o corpo-de-prova vai adensando, o sistema de carregamento é acionado para ajustar a posição da cabeça de carga, conforme Nascimento (2008). Além disso, a variação vertical da posição da cabeça de carga é igual à variação da altura do corpo-de-prova. A Figura 15 mostra as configurações finais do molde e os parâmetros de compactação adotados para o ensaio.

Figura 15 – Configurações e parâmetros de compactação



Fonte: (MARQUES, 2004).

Lima (2003) afirma que as etapas para a dosagem de uma mistura asfáltica são comuns, independente do método que se venha a utilizar. Tais etapas consistem em um plano de amostragem para coleta de material, determinação da granulometria do fresado (com e sem asfalto), determinação do teor e da viscosidade do ligante envelhecido, propriedades físicas dos ligantes novos e do material agregado.

A utilização do Compactador Giratório Superpave (CGS), utilizado neste método, constitui, basicamente, em estimar um teor provável de projeto através da fixação do volume de vazios e conhecimento de granulometria dos agregados disponíveis (ARAÚJO ET AL., 2008).

Para a realização do ensaio de dosagem utilizando o procedimento Superpave, o tamanho do molde a ser utilizado é um aspecto importante. Bernucci et al. (2010) descrevem o molde requerido com 150 mm de diâmetro, porém, o CGS também admite moldagem de corpos-de-prova com 100 mm.

Em seu estudo, Nascimento (2008) constata que tanto os corpos-de-prova com 100 mm, quanto os corpos-de-prova com 150 mm apresentaram uma distribuição dos vazios vertical simétrica em todas as regiões, com aumento sistemático da porcentagem de vazios nas extremidades superior e inferior. Além disso, após desconsiderar as extremidades, o autor verificou que a densificação ao longo da altura foi bastante uniforme. E, ainda, a pesquisa concluiu que a distribuição dos vazios nas amostras oriundas da pista era próxima daquela apresentada pelos corpos-de-prova do Superpave.

Alshamsi (2006) afirma que a análise das amostras compactadas deve ser feita em termos de porcentagem de densidade máxima teórica (DMT) em três níveis de compactação:

- $N_{\text{inicial}}$ : corresponde ao número de oscilações usado como medida da mistura de compactabilidade durante a fase de construção.
- $N_{\text{projeto}}$ : representa o número de giros necessários para produzir uma mistura com a mesma densidade que o esperado no campo após a quantidade indicada de tráfego.
- $N_{\text{máx}}$ : representa o número de giros necessários para produzir, em laboratório, uma densidade que nunca deve ser excedida em campo.

De acordo com Nascimento (2008), após pesquisa realizada por SHRP com o objetivo de determinar o número de giros de projeto, foi definida uma pressão de giro constante, bem como um número de giros especificado que pudesse definir os níveis

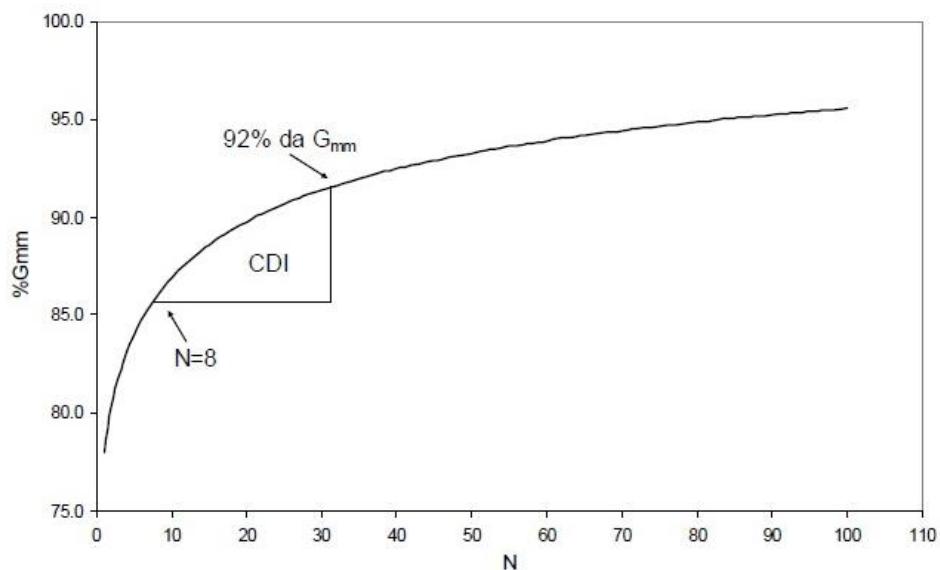
de compactação em compactação de tráfego (96% da densidade relativa máxima -  $G_{mm}$ ) e compactação de construção (92% da  $G_{mm}$ ). Sendo que o percentual de compactação é definido como a razão entre a densidade relativa aparente da mistura ( $G_{mb}$ ) e a sua densidade relativa máxima ( $G_{mm}$ ).

Ainda, Nascimento (2008) considera que o valor de 92% da densidade relativa máxima, para compactação de tráfego é uma hipótese válida, contanto que os pavimentos analisados tenham sido projetados para ter uma densidade *in loco* de 92% da  $G_{mm}$  ou 8% de vazios de ar. Além disso, o autor constata que, considerando que apenas 30 giros são suficientes para compactar uma mistura de 86% a 92% da compactação máxima, esta hipótese de 8% de vazios de ar não afeta, significativamente, o número de giros inicial. Assim, sendo que algumas misturas são difíceis de compactar e requerem compactação ou equipamentos adicionais, o uso de parâmetros relacionados com a trabalhabilidade das misturas e, ainda, baseados no desempenho, podem servir de complemento aos procedimentos de dosagem utilizados atualmente.

Mahmoud e Bahia (2004) utilizam alguns índices oriundos das curvas de compactação giratória, entre eles o *Compaction Densification Index* (CDI) e o *Traffic Densification Index* (TDI), os quais podem ser utilizados, respectivamente, para prever a trabalhabilidade da mistura e a resistência desta quanto à deformação permanente. Além disso, tais índices são considerados requisitos para o procedimento de dosagem de misturas asfálticas, e representam o comportamento das misturas durante a construção da pista e ao longo da vida de serviço.

De acordo com Nascimento (2008) o CDI simboliza uma medida volumétrica de representação do trabalho da vibro-acabadora durante o processo de espalhamento do material em pista e ao final do processo de construção, e é definido, na curva de densificação obtida com o CGS, como sendo a área a partir do oitavo giro ( $N=8$ ) até 92% da  $G_{mm}$ , conforme mostra, graficamente, a Figura 16. Além disso, misturas com valores de CDI entre 50 e 100 têm melhor compactabilidade, ao passo que misturas com valores de CDI baixos, apresentam problemas de estabilidade, deixando o pavimento suscetível a afundamentos devido à deformação plástica.

Figura 16 – Exemplo de representação gráfica do CDI

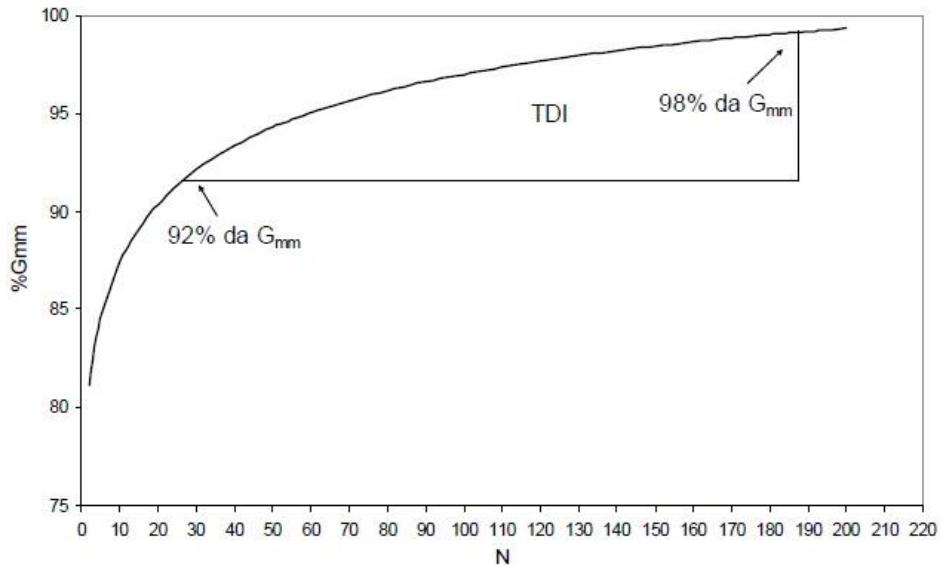


Fonte: (NASCIMENTO, 2008).

Para Alshamsi (2006) o CDI é definido com a área sob a curva de densificação a partir de  $N=1$ . Ainda, este índice indica a hipótese de estar relacionado com a compactabilidade de misturas de asfalto, onde os valores mais altos deste índice estão associados com misturas que são difíceis de compactar.

Já o TDI é definido como sendo a área sob a curva de densificação entre 92% e 98% do valor da  $G_{mm}$ , de acordo com a representação da Figura 17. Este índice é baseado no princípio de que o pavimento, após aberto ao tráfego, continua a se densificar em função das cargas impostas pelos veículos. Além disso, tendo em vista que o esqueleto pétreo exerce importante papel no comportamento da mistura asfáltica e, embora a compactação giratória seja realizada em temperaturas bem mais elevadas do que a temperatura de serviço do pavimento, espera-se que o TDI oriundo da compactação giratória esteja relacionado com a estabilidade da mistura. Quanto maiores os valores deste índice, melhores serão as expectativas do revestimento asfáltico resistir aos esforços impostos pelo tráfego durante sua vida de serviço (NASCIMENTO, 2008).

Figura 17 – Exemplo de representação gráfica do TDI



Fonte: (NASCIMENTO, 2008).

Alshamsi (2006) afirma que o TDI é a área sob a curva de densificação a partir do ponto de travamento até 98% da G<sub>mm</sub> ou o fim da compactação, o que ocorre primeiro. Além disso, este índice representa a hipótese de estar relacionado com a estabilidade de misturas sob carga de tráfego. Teoricamente, os valores mais elevados são, supostamente, indicativos de uma melhor estabilidade de misturas.

Para camadas de revestimento em rodovias brasileiras, visando adequado desempenho em termos de deformação permanente, Nascimento (2008) recomenda valores de CDI e TDI, para tráfego médio, maiores que 50 e maiores que 250, respectivamente. Já para tráfego pesado, o autor recomenda que os mesmos sejam maiores que 50 e maiores que 400.

## 2.6 ENSAIOS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Os ensaios mecânicos são utilizados com o objetivo de reproduzir as condições de campo em laboratório para que, assim, possa ser feita uma análise do desempenho das misturas asfálticas.

A partir destes ensaios, é avaliada a técnica da reciclagem das misturas asfálticas recicladas a quente, com relação às suas propriedades mecânicas, através dos ensaios de Módulo de Resiliência, Resistência à Tração por Compressão Diametral, *Flow Number* e Módulo Dinâmico Uniaxial e, também com relação às propriedades de adesividade, através dos ensaios de *Lottman* Modificado e Desgaste Cântabro.

### 2.6.1 Resistência à tração por compressão diametral

Para o ensaio de Resistência à tração por compressão diametral a norma utilizada é a norma do DNIT 136/2010 – ME – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, o qual consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrices opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga. Antes de aplicar a carga o corpo-de-prova deve estar apoiado sobre uma geratriz em compartimento com temperatura controlada de 25°C durante no mínimo 4 horas. A medida resultante é a resistência à tração (RT). A Figura 18 mostra a prensa utilizada neste ensaio.

A norma utilizada para o ensaio determina que o molde cilindro a ser utilizado seja de 10 x 20 cm, sendo 10 cm de diâmetro interno do cilindro e 20 cm de altura, mas em função da forma como os resultados são encontrados, se pode utilizar cilindros com alturas menores. Desta forma, serão utilizados os mesmos moldes de misturas asfálticas, onde as amostras ficam com aproximadamente 6,5 cm de altura, pelos mesmos 10 cm de diâmetro.

Figura 18 – Prensa utilizada para realização do ensaio de RT



Os resultados da ruptura dos corpos-de-prova passam pela Equação 1 para determinar a resistência à tração:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100 \pi D H} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_R$ : Resistência à Tração por Compressão Diametral (MPa);

$F$ : carga de ruptura (N);

$D$ : diâmetro do corpo de prova (cm);

$H$ : altura do corpo de prova (cm).

## 2.6.2 Módulo de resiliência

Para Huang (1993) o módulo de resiliência (MR) é o módulo de elasticidade para ser usado com a teoria da elasticidade. Para o autor, a maioria dos materiais de pavimentação não possuem características elásticas, mas apresentam alguma deformação permanente depois de cada aplicação de carga. No entanto, se a carga for pequena em comparação com a resistência do material, e for repetida para um grande número de vezes, a deformação sob a carga de cada repetição é quase completamente recuperável e proporcional à carga, podendo ser considerado elástico.

De acordo com Bernucci et al. (2010), o MR varia tanto com o tempo de aplicação da carga como com o tempo de repouso, para materiais viscoelásticos, uma vez que o deslocamento recuperável depende de ambos. Portanto, não representa um parâmetro puramente elástico para misturas asfálticas, uma vez que está associado a um dado pulso de carregamento, logo, desenvolvem-se deformações viscoelásticas, as quais são contabilizadas como deformações elásticas.

O ensaio de MR em misturas asfálticas é padronizado no país pela norma do DNIT. O método de dimensionamento de pavimentos norte-americano estabelecido pela AASHTO na versão de 1986 (com revisão em 1993) substituiu o ISC pelo MR do subleito na expressão do dimensionamento e também considerou esse parâmetro no cálculo dos coeficientes estruturais dos materiais asfálticos. Com isso, o MR foi reconhecido como de grande importância no dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos. A recomendação de substituir o ISC e outros valores de resistência de materiais pelo MR foi baseada nas seguintes razões (Bernucci et al, 2010):

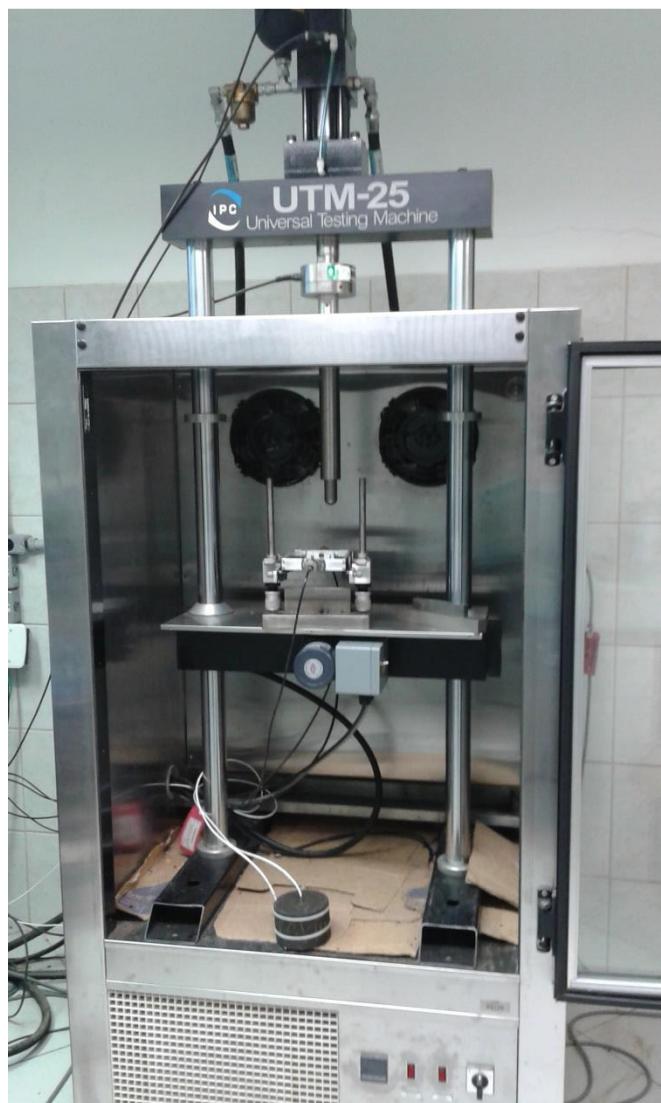
- O MR indica uma propriedade básica do material que pode ser utilizada na análise mecanística de sistemas de múltiplas camadas;
- Há técnicas disponíveis para estimar o MR em campo com testes rápidos e não-destrutivos, o que facilita a uniformização entre os procedimentos de dimensionamento de pavimentos novos e de reforço de pavimentos antigos.

Bernucci et. al (2010) descrevem o ensaio em misturas asfálticas realizando a aplicação de uma carga repetidamente no plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico regular. Ou seja, o MR é a relação entre a tensão de tração aplicada ( $\sigma$ ) repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura asfáltica e a deformação específica recuperável ( $\varepsilon$ ) correspondente à tensão aplicada.

Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. É medido, então, o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura.

A Figura 19 mostra a prensa UTM 25 da IPC Global, utilizada para a realização de ensaio de MR.

Figura 19 – Prensa UTM 25 utilizada para realizar ensaio de MR



O ensaio tem como intuito determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia quando solicitado a um carregamento e, após, retornar ao seu estado inicial. E, assim como os demais ensaios da pesquisa, serão determinados os

módulos de resiliência das amostras em um CA (concreto asfáltico) convencional e, após, com misturas substituindo o material virgem por 10%, 20% e 30% de material fresado. O ensaio de MR realizado na UTM apresenta resultados de MR total, onde o cálculo é realizado a partir da deformação total medida no ensaio.

Antes de iniciar o ensaio propriamente dito de determinação do MR, aplica-se uma sequência de carregamentos dinâmicos com a finalidade de eliminar as grandes deformações permanentes que ocorrem nas primeiras aplicações de tensão desvio e de reduzir o efeito do histórico de tensões no valor do MR. A aplicação da carga é semi-senoidal para se aproximar da forma de carregamento da passagem de um pneu. A frequência das cargas repetidas é de 1Hz (60 ciclos por minuto) e a duração é de cerca de 0,1 segundo, com 0,9 segundo de repouso.

### 2.6.3 Módulo dinâmico uniaxial

O módulo dinâmico, valor absoluto o módulo complexo, pode ser obtido através de ensaios ou de modelos de previsão. Os modelos de previsão se aplicam a todos os tipos de misturas, bem como a ligantes convencionais e modificados, os quais são adotados pelo método de dimensionamento da AASHTO (2002).

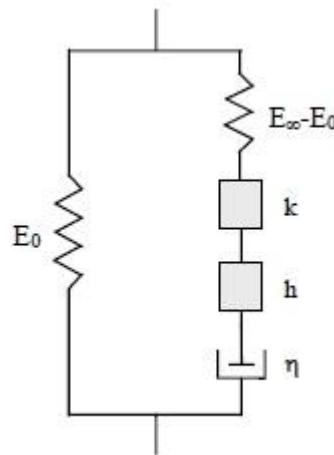
Para Bernucci et al. (2010), o módulo complexo vem sendo pesquisado, na caracterização de misturas asfálticas, como uma alternativa ao módulo de resiliência, onde a análise dos dados provenientes deste ensaio envolve a geração de curvas mestras. Além disso, o módulo complexo e, em consequência, o módulo dinâmico, podem ser obtidos através de ensaios ou modelos de previsão. Tais modelos correspondem a equações derivadas da análise estatística de valores obtidos, previamente, por meio de ensaio.

Segundo Kim (2009) foram desenvolvidos modelos para capturar os efeitos de carregamento, envelhecimento, umidade, temperatura, estado de tensão, entre outros fatores, sobre o desempenho do concreto asfáltico. A maior parte destes modelos são de natureza empírica, onde a principal razão da natureza destes é a falta de poder de computação necessário para calcular o desempenho de longo prazo do CA e, por conseguinte, dos pavimentos asfálticos.

Di Benedetto et al. (2004) desenvolveram uma campanha experimental sobre a caracterização do comportamento viscoelástico linear de diferentes materiais betuminosos, onde o principal objetivo era estabelecer as ligações entre as

propriedades viscoelásticas lineares das misturas betuminosas. Assim, o comportamento viscoelástico linear de ligantes e misturas foi estudado através da realização de testes de módulo complexo a diferentes temperaturas e frequências, utilizando o estudo de modelagem desenvolvido pelos próprios autores em 2003, o chamado modelo 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot). Tal modelo foi desenvolvido para modelagem de propriedades viscoelásticas lineares tanto de ligantes quanto de misturas asfálticas. O modelo consiste, basicamente, em uma generalização do modelo analógico *Huet-Sayegh*, o qual é válido para qualquer material betuminoso, adaptado pela adição de um amortecedor linear em série com dois elementos parabólicos e a mola de rigidez, de acordo com a Figura 20.

Figura 20 – Representação do modelo 2S2P1D



De acordo com Di Benedetto et al. (2004), o modelo 2S2P1D é baseado em uma simples combinação de elementos físicos: 2 molas, 2 elementos parabólicos e 1 amortecedor, o qual tem um espectro contínuo, ou seja, pode ser representado por uma infinidade de elementos em série ou em paralelo. A uma dada temperatura, o modelo 2S2P1D tem 7 constantes e seu módulo complexo é dado pela seguinte expressão:

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2)$$

Com  $i$ : número complexo definido por  $i^2 = -1$ ,

$\omega$ : a pulsação =  $2\pi \cdot f_r$ , (onde  $f_r$  é a frequência),

$k, h$ : expoentes tais como  $0 < k < h < 1$ ,

$\delta$ : constante

$E_0$  o módulo de elasticidade estático quando  $\omega \rightarrow 0$ ,

$E^\infty$  o módulo vítreo quando  $\omega \rightarrow \infty$ ,

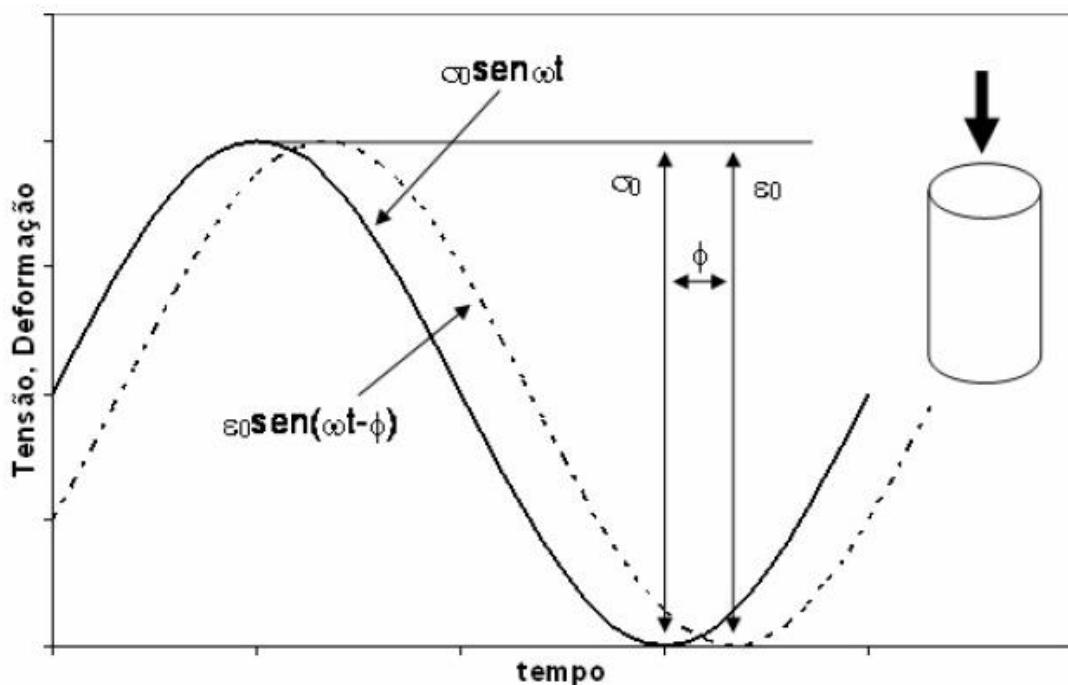
$\tau$ : tempo característico, cujo valor varia apenas com a temperatura.

Conforme Renaud (1996), os diferentes componentes do módulo complexo variam de acordo com a temperatura e a frequência de solicitação, fixadas para cada teste elementar. Os resultados experimentais são, geralmente, expressos através de curvas isotermas, curvas isócronas, curvas no plano cole cole e espaço black. As curvas isotermas são obtidas com traçados do módulo complexo em função da frequência, para cada uma das temperaturas em que o ensaio é submetido. Com as curvas isotérmicas, é possível estimar a susceptibilidade à temperatura do asfalto, através da variação do módulo em função da variação da temperatura. A representação do plano cole cole, parte real  $E_1$  do módulo complexo no eixo das abscissas em função da parte imaginária  $E_2$  no eixo das ordenadas, representa a curva característica do material estudado. Através desta é possível calibrar um modelo de comportamento reológico, no entanto, não muito preciso para valores baixos de módulo. Para a realização da calibração com valores baixos de módulo, é utilizada a representação do espaço black. Tal representação consiste em um traçado logarítmico do módulo complexo de acordo com o ângulo de fase correspondente. Esta curva é utilizada para visualizar a região de baixos módulos e, em particular, o ângulo de fase para diminuir as altas temperaturas.

De acordo com Medina e Motta (2015) o Módulo Complexo  $E^*$ , definido como um número complexo, relaciona deformações e tensões para materiais viscoelásticos sujeitos a um carregamento senoidal, onde a parte real representa a componente elástica e a imaginária representa a componente viscoelástica. Por isso, o valor absoluto de Módulo Complexo  $|E^*|$  é referido como Módulo Dinâmico.

Para Nascimento (2008), o ensaio de módulo dinâmico consiste, basicamente, em aplicar uma carga uniaxial compressiva senoidal em um corpo-de-prova cilíndrico, o qual pode estar confinado ou não, conforme mostra a Figura 21.

Figura 21 – Esquema do ensaio de módulo dinâmico uniaxial



Fonte: (NASCIMENTO, 2008).

Assim, quando uma tensão axial de compressão é aplicada a uma amostra de material betuminoso, numa dada temperatura e frequência de carregamento, onde as frequências de teste podem variar de 0,001 Hz a 25 Hz, esta tensão aplicada recuperável resultante da resposta de tensão da amostra pode ser medida e usada para calcular o módulo de elasticidade dinâmico e seu ângulo de fase, conforme consta na norma AASHTO T 342-11. Ainda, a norma afirma que os valores de módulo dinâmico medidos ao longo das temperaturas (-20°C, -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C) e frequências de carregamento, podem ser deslocados para uma curva principal de caracterização do concreto asfáltico, o qual funciona como uma análise de seu desempenho, onde os valores de módulo e ângulo são usados como critérios de desempenho.

#### 2.6.4 Flow number

Neste teste, a amostra, a uma temperatura de teste específica, é submetida a um impulso axial de carga de compressão de 0,1 segundo a cada 1,0 segundo. O ensaio pode ser realizado com ou sem pressão confinante, na qual os resultados axiais permanentes são

medidos como uma função de tempo e o número de fluxo é definido como o número de ciclos de carga correspondente à taxa mínima de mudança de tensão axial (NCHRP, 2008).

Medina e Motta (2015) descrevem o ensaio como sendo um ensaio de compressão axial de carga repetida (dinâmico), realizado em amostras com 10 cm de diâmetro e 15 cm de altura, com LVDTs colocados do topo à base.

De acordo com a AASHTO TP 79-12 este é um teste de desempenho simples de misturas de concreto asfáltico para deformação permanente com base em cargas repetidas. Neste teste, a amostra, que pode ser, primeiramente, condicionada para temperatura específica, é submetida a um carregamento repetido axial com pulso de carga de compressão. A frequência da repetição é fixada em Hertz e o ensaio pode ser realizado com ou sem uma tensão de confinamento aplicada às amostras. Logo, o *Flow Number* (FN) é definido como o número de ciclos de carga correspondente à taxa mínima de mudança de tensão axial permanente.

#### **2.6.5 *Lottman* modificado**

A norma utilizada como base para este ensaio é descrita na AASHTO T 283, onde amostras compactadas cilíndricas regulares de misturas asfálticas com teores de vazios preestabelecidos são parcialmente saturadas com água e submetidas a baixas temperaturas para congelamento, durante um período de horas estabelecido em norma, simulando, com isso a presença de água na mistura e as tensões internas induzidas por cargas do tráfego (BERNUCCI ET AL., 2010). As amostras descongeladas e à temperatura de equilíbrio de 25°C são submetidas ao ensaio de resistência à tração (RT'); outro conjunto similar de amostras compactadas cilíndricas regulares, não submetidas ao processo de saturação e congelamento, são igualmente submetidas ao ensaio de RT à temperatura de 25°C. A relação entre RT'/RT indica a perda de resistência por umidade induzida ou resistência retida à tração (RRT). Essa relação deve ser maior ou igual a 0,70, ou seja, a perda deve ser inferior a 30%.

No Brasil, a norma que segue os passos descritos na AASHTO é a ABNT NBR 15617 – Misturas Asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida, utilizada em corpos-de-prova de misturas asfálticas moldados em laboratório, resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água. De acordo com esta norma, os corpos-de-prova devem ter uma porcentagem de vazios com ar de 7% ( $\pm 1\%$ ). Para fins de ensaio, as

amostras são divididas em dois conjuntos. O primeiro conjunto de três corpos-de-prova deve ser submetido ao ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral conforme a ABNT NBR 15087. O segundo conjunto de três corpos-de-prova, antes da realização da determinação da resistência à tração, deve ser submetido ao vácuo na faixa de 13 a 67 kPa de pressão absoluta por, no mínimo, 5 minutos até, no máximo 10 minutos, de modo que a água entre nos vazios com ar do corpo-de-prova, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 – Corpo de prova submetido ao vácuo no ensaio de *Lottman*



Após esse procedimento, para condicionamento de elevada severidade, o corpo-de-prova é embalado em filme plástico com 10 mL de água, o qual deve ser levado a um sistema de resfriamento que seja capaz de manter, de forma controlada, a temperatura em -18°C ( $\pm 3$ ), por um tempo de, no mínimo, 16h. Em seguida, os corpos-de-prova devem ser levados em banho-maria por 24 h + 1 h em um conjunto de banho de 60°C. Decorrido isto, os mesmos devem ser submetidos, imediatamente, à submersão em banho de água a 25°C + 1°C, por 2 h

a 3 h. Após este processo, os corpos-de-prova são submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Bernucci et al. (2010) afirmam que a avaliação do dano nas misturas asfálticas causado pela umidade é de grande importância, uma vez que afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos, pois, o dano por umidade evidencia os possíveis problemas de adesividade do agregado com o ligante asfáltico.

#### **2.6.6 Desgaste cântabro**

Bernucci et al. (2010) afirma que essa técnica consiste no ensaio usualmente realizado para determinar a resistência à desagregação do pavimento, submetidos à norma DNER-ME 383/99, baseada na norma espanhola (NTL, 1986), a qual consiste na análise das massas submetidas ao aparelho e abrasão Los Angeles, onde, apesar de sua concepção estar relacionada para pavimentos drenantes, o ensaio pode ser estendido para outros tipos de misturas asfálticas, normatizados através da ABNT-NBR 15140/2004.

O desgaste máximo admitido é de 25% para misturas asfálticas porosas, além disso, o desgaste para cada teor de ligante deve ser realizado a partir de média aritmética de três corpos-de-prova, com o valor individual não diferindo 20% do valor médio (BERNUCCI ET AL., 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, são apresentados como foi o planejamento no decorrer da pesquisa, os materiais utilizados, bem como os ensaios laboratoriais executados. São detalhados número de amostras utilizadas e, ainda, quais normas foram seguidas para cada ensaio.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O planejamento desta pesquisa contemplou as etapas de coleta de amostras de fresado, bem como a coleta e caracterização dos agregados virgens e do cimento asfáltico de petróleo (CAP), além do ajuste granulométrico e aplicação do método Bailey e, por fim, a realização dos ensaios laboratoriais das misturas asfálticas, sendo que a realização da dosagem destas foi feita através do Compactador Giratório Superpave (CGS).

Para isso, foram realizadas coletas de amostras de fresado, as quais visaram a realização dos ensaios laboratoriais. Os materiais são provenientes da BR 392 em trecho localizado entre os municípios de Santa Maria e São Sepé. Os mesmos foram utilizados em substituição ao agregado virgem, nas proporções de 10%, 20% e 30%.

Já os agregados utilizados na pesquisa, de origem basáltica, foram obtidos através de processo de britagem e fornecidos pela empresa Della Pasqua Engenharia e Construção LTDA, bem como o cimento asfáltico de petróleo, o qual será utilizado na pesquisa o CAP 50/70. Os agregados foram enquadrados na Faixa C – DNIT 031/2006-ES.

Além da usual Faixa C, os agregados foram ajustados através do método Bailey, o qual foi utilizado para a adequada seleção dos agregados da mistura. O método, entre outros fatores, visa a escolha de uma estrutura adequada de agregados para o bom desempenho das misturas asfálticas, permitindo ajustes no volume de vazios em função da porcentagem de cada material utilizado, considerando o intertravamento dos agregados.

As misturas foram designadas em mistura de Concreto Asfáltico de Referência (CAref), CA com adição de 10% de material fresado (CAF10), CA com adição de 20% de fresado (CAF20) e CA com 30% de fresado (CAF30).

Foram realizadas as dosagens através da metodologia Superpave das amostras, para posterior escolha do teor de projeto de ligante para cada uma das misturas analisadas. Para o processo de dosagem utilizaram-se 48 corpos-de-prova, sendo 3 amostras por cada teor escolhido para determinação do teor de projeto (4 teores) por mistura (4 misturas), conforme mostra a Tabela 1, sendo estes de dimensões 10 cm de diâmetro por 11 cm de altura, utilizados apenas para fins de dosagem.

Posteriormente, foram moldados 108 CPs para fins de ensaios predeterminados, sendo 84 nas dimensões de 10 cm x 6,5 cm para realização de ensaios de MR, RT, *Lottman* Modificado e Desgaste Cântabro, e 24 nas dimensões de 10 cm x 15 cm para ensaios de Módulo Dinâmico e *Flow Number*, conforme constam na Tabela 1. Para os ensaios de MR, RT e Cântabro, os CPs moldados apresentavam volume de vazios de 4%. Para os ensaios de MR e RT foram utilizadas as mesmas amostras para ambos os ensaios. Já, as amostras para ensaios de *Lottman* e *Flow Number* apresentavam volume de vazios de 7%, e para ensaio de Módulo Dinâmico o volume de vazios ficou em 5,5%, conforme também constam na Tabela 1. Além disso, foram moldados CPs para determinação da densidade específica máxima ( $G_{mm}$ ) de cada uma das misturas, sendo moldadas 2 amostras para cada mistura já no teor escolhido de projeto. O ensaio utilizado para determinação da  $G_{mm}$  foi o método de Rice, o qual obedece a AASHTO T 209-05, normatizada no Brasil através da NBR 15619 para misturas asfálticas.

Tabela 1 – Detalhamento das amostras utilizadas na pesquisa

Ensaio realizado	Quantidade de amostras por mistura	Total de amostras	Volume de Vazios (%)	Dimensão do CP
<i>Rice</i>	2	8	-	-
<i>Dosagem Superpave</i>	3	48	-	10 x 11
<i>MR/RT</i>	5	20	4,00	10 x 6,35
<i>Lottman</i>	6	24	7,00	10 x 6,35
<i>Cântabro</i>	8	32	4,00	10 x 6,35
<i>E*</i>	3	12	5,50	10 x 15
<i>FN</i>	3	12	7,00	10 x 15
<b>Total de amostras</b>		<b>156</b>		

Com os resultados obtidos através da dosagem, foram comparados os teores de projeto de ligante de cada mistura, bem como as propriedades volumétricas das mesmas. Além disso, ainda foram calculados os índices de compactação giratória (CDI e TDI), baseados nas curvas de densificação ( $G_{mm} \times$  número de giros).

Após obtidas as moldagens das amostras de cada mistura, foram realizados os ensaios para avaliar as propriedades mecânicas, através dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração por compressão diametral, *Flow Number* e módulo dinâmico, bem como as propriedades de adesividade, através dos ensaios de *Lottman*, e cântabro.

Além disso, foi realizada uma análise de dados para as misturas, a fim de comprovar o desempenho das propriedades viscoelásticas, através do modelo de 2S2P1D.

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na pesquisa são aqueles convencionalmente utilizados em obras e empreendimentos rodoviários, os quais estão disponíveis na região de atuação do projeto, além da adição de material fresado proveniente de processo de recapeamento local.

#### 3.2.1 Material fresado

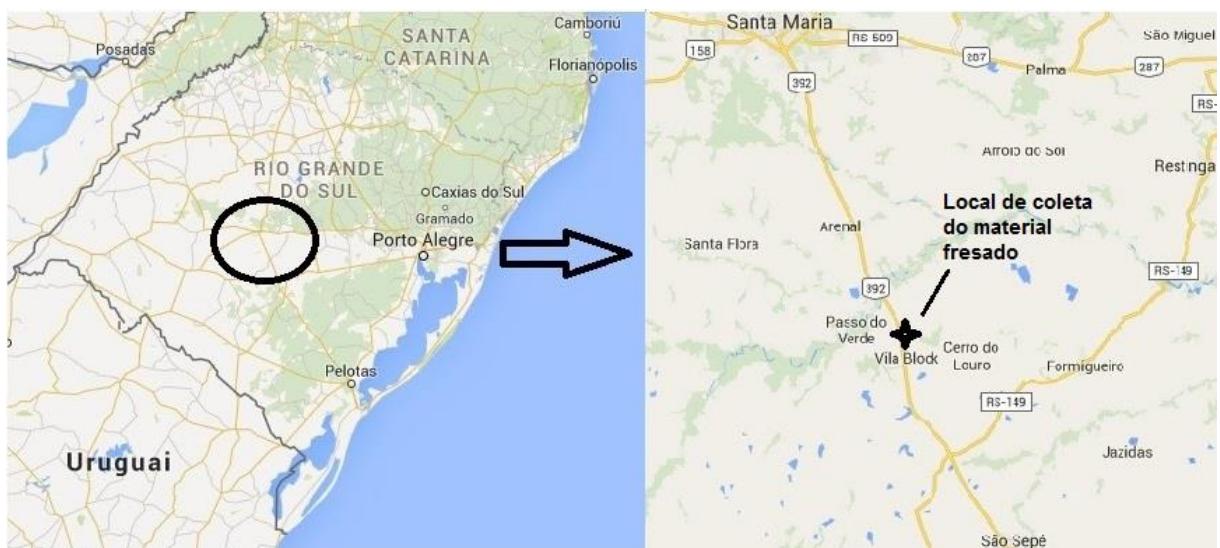
O material fresado utilizado na etapa laboratorial foi coletado na BR 392, durante o processo de recapeamento do pavimento asfáltico, no trecho próximo ao km 338 entre Santa Maria e São Sepé. Foram feitas coletas diretamente da esteira da máquina fresadora, colocadas em caminhão e depositadas nos fundos do LMCC da UFSM.

Dessa coleta, foram separadas amostras, secas ao ar e preparadas para ensaios de caracterização: análise granulométrica, determinação do teor de ligante e análise granulométrica pós extração de ligante.

A máquina fresadora utilizada na coleta foi a Wirtgen W 100, com largura de corte de 1,00 m e espessura de corte de até 5 cm, considerada uma máquina de pequeno porte. A durabilidade dos dentes de corte (bits) é de 10 a 15 mil metros quadrados de uso e, no caso desta pesquisa, a fresadora encontrava-se com

aproximadamente 60% de desgaste. O cilindro de corte utiliza 96 dentes de corte e a fresagem foi feita à frio com água. Nas Figuras 23 a 27 aparecem imagens do trecho onde foi retirado o material fresado, bem como do equipamento e do processo de coleta de amostras do material na BR 392.

Figura 23 – Localização do trecho do km 338 na BR 392



Fonte: (Adaptado de Google Maps).

Figura 24 – Máquina fresadora Wirtgen W 100



Figura 25 – Detalhe do cilindro de corte da fresadora Wirtgen W 100



Figura 26 – Vista do trecho em que foi realizada a fresagem da pista



Figura 27 – Coleta da amostra diretamente da fresadora



Para o material fresado foram realizados ensaios de granulometria com 3 amostras, conforme Tabela 2 e Figura 28, bem como a extração de betume do material através do ensaio de Rotarex elétrico, normatizado pela norma do DNER-ME 053/1994, no qual foi obtida uma média de 6,76%, conforme mostram os dados da Tabela 3.

Tabela 2 – Resultado da granulometria das 4 amostras de fresado

Peneira	mm	Porcentagem Passante			
		Fresado AM1	Fresado AM2	Fresado AM3	Média
2"	50,8	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
1 1/2"	38,1	100,0	96,0	100,0	<b>98,7</b>
1"	25,4	92,7	95,1	96,3	<b>94,7</b>
3/4"	19,1	83,9	89,5	86,8	<b>86,7</b>
1/2"	12,7	75,4	76,5	66,7	<b>72,8</b>
3/8"	9,5	63,3	61,7	51,1	<b>58,7</b>
n 4	4,8	36,8	31,6	23,1	<b>30,5</b>
n 10	2,0	10,9	7,9	7,1	<b>8,7</b>
n 40	0,42	1,5	1,0	1,6	<b>1,4</b>
n 80	0,18	0,6	0,5	0,8	<b>0,6</b>
n 200	0,075	0,5	0,4	0,6	<b>0,5</b>

Figura 28 – Curva granulométrica do material fresado

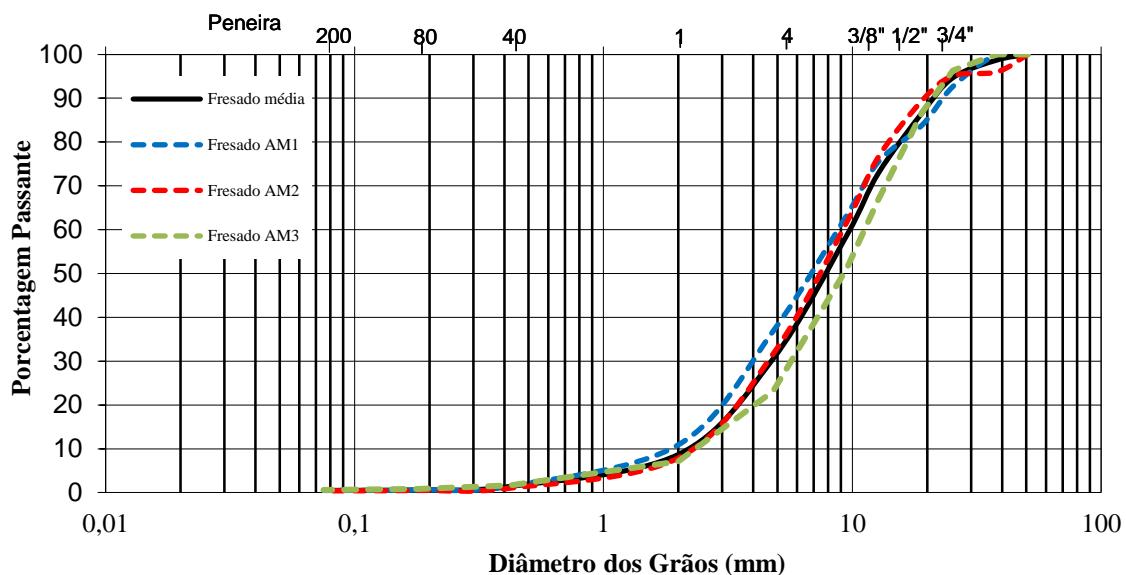


Tabela 3 – Resultados obtidos através do ensaio de extração de betume

Amostra	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Teor de asfalto (%)	7,11	6,66	6,52
Teor médio de asfalto (%)	<b>6,76</b>		

Além disso, também foi realizado o ensaio para determinação da densidade máxima teórica do material fresado, através do método de Rice, conforme segue na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado da densidade máxima teórica

Ensaio	Norma	Resultado
Massa específica/densidade aparente - DMT ou $G_{mm}$	Rice - NBR 15619 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e massa específica máxima teórica em amostras não compactadas	2,367 g/cm <sup>3</sup>

### 3.2.2 Agregados minerais

Os agregados minerais, bem como os ligantes asfálticos, são componentes de uma associação constituinte de todos os revestimentos asfálticos. Além disso, essas associações devem gerar estruturas duráveis, quando executadas e aplicadas apropriadamente. Assim, o agregado escolhido para determinada utilização deve apresentar propriedades que são capazes de suportar tensões impostas na superfície do pavimento e no seu interior. De acordo com a norma ABNT NBR 9935/2005, a qual determina a terminologia dos agregados, o termo agregado representa um material sem forma e volume definidos, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e concreto e, geralmente, são materiais inertes (BERNUCCI ET AL., 2010).

Renaud (1996) afirma que a forma geométrica, a composição e natureza mineralógica e o tamanho dos agregados influenciam no comportamento mecânico das misturas. Por exemplo, na França, na maioria dos casos, os agregados utilizados são as rochas sólidas completamente esmagadas, as quais apresentam bordas afiadas, que facilitam no bloqueio do esqueleto granulométrico. Tal esqueleto apresenta diferentes classes granulométricas numa determinada proporção, onde a distribuição dos grãos consiste na curva de distribuição, a qual pode ser contínua ou descontínua.

Para esta pesquisa, os agregados virgens utilizados nas misturas foram obtidos através de processo de britagem e coletados diretamente das unidades de produção, os quais foram fornecidos pela empresa Della Pasqua Engenharia e Construção LTDA. A pedreira da empresa fica localizada no município de Itaara/RS.

Foram utilizadas as frações de agregados 3/4", 3/8" e pó-de-pedra, conforme segue a granulometria apresentada nas Tabela 5 e Figura 28, sendo que o ensaio granulométrico foi realizado com três amostras de cada fração, obtendo-se a respectiva média. Ainda, algumas propriedades desses materiais pétreos foram conferidas em laboratório, as quais estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 5 – Resultado da média das granulometrias dos agregados

Peneira	mm	Porcentagem Passante Média		
		Brita 3/4	Brita 3/8	Pó de Pedra
1"	25,4	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	64,9	100,0	100,0
3/8"	9,5	21,5	100,0	100,0
n 4	4,8	0,4	12,7	99,9
n 10	2,0	0,4	0,6	59,2
n 40	0,42	0,4	0,6	16,8
n 80	0,18	0,4	0,6	9,0
n 200	0,075	0,4	0,6	3,2

Figura 29 – Curva granulométrica do material pétreo

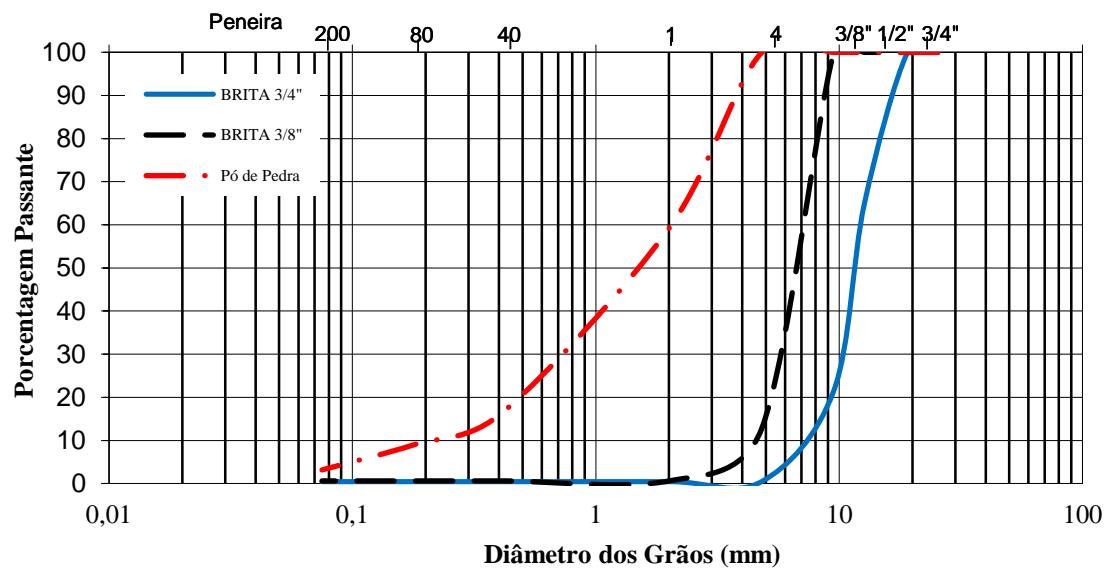


Tabela 6 – Propriedades dos agregados utilizados nas misturas

Ensaio	Norma	Material	Resultado
Massa específica absoluta	DNER - ME 081/98 - Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	Agregado graúdo - Brita 3/4"	2,48 g/cm <sup>3</sup>
Absorção			2,66%
Massa específica absoluta	DNER - ME 081/98 - Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo	Agregado graúdo - Brita 3/8"	2,47 g/cm <sup>3</sup>
Absorção			3,22%
Massa específica	Picnômetro - ASTM C 127/2007	Agregado miúdo (pó de pedra)	2,66 g/cm <sup>3</sup>
Abrasão Los Angeles	DNER - ME 035/98 - Agregados - Determinação da abrasão Los Angeles	Agregado graúdo - Brita 3/4" e Brita 3/8"	14,35%
Sanidade	DNER - ME 089/94 - Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio	Agregado graúdo - Brita 3/4"	2,86%
		Agregado graúdo - Brita 3/8"	0,19%

### 3.2.3 Ligante asfáltico

No Brasil, de acordo com Bernucci et al. (2010), a denominação Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é utilizada para designar o asfalto utilizado em pavimentação, sendo este um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo, o qual apresenta a propriedade de ser um adesivo termoviscoplástico, impermeável à agua e pouco reativo. Além disso, o CAP é semi-sólido a baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas.

Renaud (1996) afirma que o revestimento asfáltico herda as propriedades viscoelásticas contidas no ligante, o qual é um material viscoelástico termosusceptível. Assim, quando são aplicadas cargas com maiores velocidades, apresenta um comportamento quase elástico, já, quando as cargas aplicadas apresentam velocidades reduzidas, apresenta um comportamento predominantemente viscoso. Logo, entre os dois casos extremos, o comportamento se torna viscoelástico, o qual depende do nível de deformação.

Para esta pesquisa, o ligante asfáltico utilizado foi o CAP 50/70, o qual foi fornecido pela empresa Della Pasqua Engenharia e Construção LTDA e caracterizado em laboratório pelas propriedades de ligante, conforme mostra a Tabela 7. Ainda, através do ensaio de Viscosidade Brookfield, foi possível encontrar as temperaturas de compactação e mistura do ligante asfáltico, as quais foram utilizadas no decorrer de todo o processo de dosagem e moldagem das amostras, sendo que a temperatura de compactação do agregado deve estar 10°C acima da temperatura de compactação do ligante, neste caso, igual a 159°C, conforme mostram os dados da Tabela 8.

Tabela 7 – Propriedade do ligante asfáltico CAP 50/70

Propriedade	Norma	Unidade	CAP 50/70
Viscosidade Brookfield a 135°	NBR 15184/2004	Pa.s	0,333
Viscosidade Brookfield a 150°	NBR 15184/2004	Pa.s	0,138
Viscosidade Brookfield a 177°	NBR 15184/2004	Pa.s	0,068
Ponto de amolecimento	NBR 6560/2008	°C	49
Ponto de fulgor	NBR 11341/2008	°C	334
Penetração a 25°C, 100 g, 5 s	NBR 6576/2007	dmm	70

Tabela 8 – Temperaturas de mistura e compactação do ligante asfáltico

Atividade	Viscosidade Rotacional (Pa.s)	Temperatura (°C)	Temperatura Média Utilizada (°C)
<b>Mistura</b>	0,15 - 0,19	146-152	149
<b>Compactação</b>	0,25 - 0,31	134-140	137

### 3.3. ENSAIOS LABORATORIAIS

#### 3.3.1 Ajuste granulométrico e aplicação do método Bailey

Para Daniel e Rivera (2009), o sistema de projeto de misturas asfálticas Superpave fornece orientação na escolha dos materiais dos componentes adequados para uma mistura de concreto asfáltico. No entanto, esse projeto de seleção depende da experiência do profissional e isto, consequentemente, resulta em um processo de tentativa e erro, na qual deve atender os parâmetros volumétricos especificados. Além

disso, este trabalho é dificultado devido ao fato de o profissional não ter meios para avaliar como a mistura irá se comportar em campo durante sua execução, compactação e posterior uso. Por isso, é importante compreender a influência da estrutura agregada no que diz respeito às propriedades volumétricas, de construção, bem como o desempenho da mistura. Assim, o método de Bailey surge como um meio para evitar a deformação permanente e, ainda, manter a durabilidade das misturas, pois o método proporciona ferramentas para avaliar o efeito da estrutura agregada em propriedades de mistura e desempenho.

De acordo com Mendes (2011) o arranjo de agregados e a definição de agregados graúdos e miúdos são os dois princípios básicos utilizados pelo método de Bailey, os quais se diferenciam das definições utilizadas normalmente. Além disso, segundo Cunha et al. (2004) as misturas resultantes deste processo de seleção tendem a ser mais estáveis e possuírem um volume de vazios no agregado mineral (VAM) compatível com uma boa durabilidade.

Através da Peneira de Controle Primário (PCP), a qual se baseia no Tamanho Máximo Nominal da mistura (TMN), foi possível diferenciar os agregados graúdos e miúdos utilizados nas misturas desta pesquisa. A PCP é definida através da Equação 3:

$$PCP = TMN \times 0,22 \quad (3)$$

Nesta pesquisa, as 4 misturas estudadas apresentam um mesmo TMN, a qual simboliza a peneira acima daquela que retém mais de 10% do material, na faixa de 19 mm, logo, a PCP escolhida foi a peneira 4,75 mm. Além disso, foram determinadas a massa específica solta para o agregado graúdo e a massa específica compactada para o agregado miúdo, através do procedimento da norma descrita na AASHTO T19, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Propriedades dos agregados determinadas pelo método Bailey

Ensaio	Norma	Material	Resultado
Massa específica solta	AASHTO T-19 Massa específica e vazios no agregado	Agregado graúdo - Brita 3/4"	1264,73 kg/m <sup>3</sup>
		Agregado graúdo - Brita 3/8"	1255,42 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica compactada		Agregado miúdo (pó de pedra)	1738,25 kg/m <sup>3</sup>

Conforme recomendações do método, foram executadas misturas com o objetivo de verificar os efeitos dos agregados em misturas asfálticas, sendo que estas devem, impreterivelmente, respeitar os limites para os valores recomendados para as proporções dos agregados de acordo com a TMN. Assim, para caracterização do arranjo dos agregados de acordo com o método, foram definidas a proporção de agregados graúdos (proporção AG), a proporção graúda dos agregados finos (GAF) e a proporção fina dos agregados finos (FAF), conforme mostra a Tabela 10 com tais parâmetros definidos para cada uma das misturas estudadas.

Tabela 10 – Resultado da proporção de agregados nas misturas dentro das faixas recomendadas

Limites	Proporção de agregados	CAref	CAF10	CAF20	CAF30
0,60 a 0,75	AG	0,71	0,66	0,65	0,64
0,35 a 0,50	GAF	0,46	0,45	0,44	0,42
0,35 a 0,50	FAF	0,49	0,47	0,45	0,44

Ainda, inicialmente, buscou-se uma mistura que estivesse enquadrada dentro dos limites prescritos para a Faixa C do DNIT, sendo que, após tomada uma mistura de referência contendo apenas materiais virgens, o proporcionamento dos agregados foi feito utilizando-se o método tradicional de tentativas. A partir desta mistura de referência, foram aplicadas as sugestões do método Bailey para proporcionamento dos componentes, obtendo-se, assim, uma mistura que se enquadrasse nos

parâmetros do método, bem como dentro dos limites exigidos pela especificação da Faixa C do DNIT. O mesmo foi realizado para as misturas contendo material fresado, sendo que, primeiramente, foi estipulada e fixada a porcentagem deste material reciclado e, após, seguindo o método de tentativas, foi realizado o enquadramento das misturas respeitando os dois parâmetros citados. As proporções de material, em porcentagem, para cada uma das misturas, resultaram conforme mostram os dados da Tabela 11.

Tabela 11 – Proporção de material determinada para cada mistura

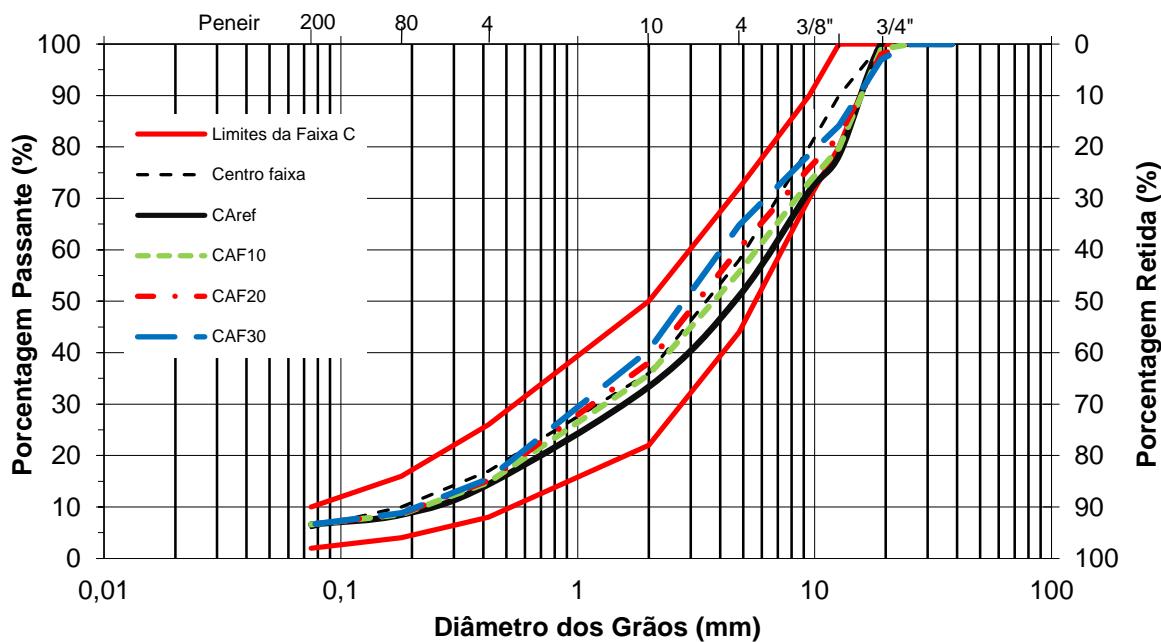
Mistura	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Fresado	Pó de pedra
CAref	32%	18%	0%	50%
CAF10	27%	13%	10%	50%
CAF20	21%	9%	20%	50%
CAF30	15%	5%	30%	50%

Por fim, a Tabela 12 e a Figura 30 mostram o resultados obtidos através da granulometria das misturas, os quais respeitam os limites impostos pela Faixa C do DNIT, bem como os parâmetros descritos com relação à proporção dos agregados de acordo com o método Bailey.

Tabela 12 – Composição granulométrica obtida através do método de Bailey

PENEIRA	mm	CAref	CAF10	CAF20	CAF30
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	100,0	99,0	98,02	97,0
1/2"	12,7	78,4	79,8	82,0	84,1
3/8"	9,5	71,4	73,2	75,9	78,5
n 4	4,8	51,0	55,6	60,2	64,8
n 10	2,0	33,4	35,7	38,1	40,5
n 40	0,42	14,4	14,8	15,2	15,5
n 80	0,18	8,5	8,6	8,7	8,8
n 200	0,075	6,6	6,6	6,6	6,6

Figura 30 – Composição granulométrica das misturas utilizadas na pesquisa (Faixa C DNIT)



### 3.3.2 Dosagem das misturas

O projeto de mistura desta pesquisa foi executado, por inteiro, de acordo com os procedimentos determinados para dosagem SUPERPAVE, utilizando os critérios de projeto nível 1 (critério volumétrico), o qual depende do tráfego, com valores limite de tráfego (número N), e da importância da rodovia, conforme Bernucci et al. (2010).

Inicialmente, foi realizada a separação dos agregados virgens utilizados nas misturas, bem como do material fresado. Após a devida separação, os agregados pétreos passaram por processo de lavagem e peneiramento, o material fresado apenas pelo processo de peneiramento, os quais foram divididos nas frações apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Peneiras utilizadas no processo de separação e mistura dos materiais

Material	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Fresado
Peneira utilizada	1/2"	n 4	n 4	3/4"
	3/8"		n 10	1/2"
			n 40	3/8"
			n 80	n 4
			n 200	n 10
			passante 200	n 40

Posterior ao processo de separação, lavagem e peneiramento dos materiais, através da aplicação do método Bailey, foi realizado o processo de formação das misturas, de acordo com a proporção anteriormente apresentada na Tabela 11. Com as misturas devidamente separadas, se deu início ao processo de dosagem através da metodologia Superpave.

O processo de dosagem foi realizado, primeiramente, através do método de tentativa e erro para definição do teor ótimo de projeto do ligante asfáltico. Nesta fase, às proporções dos agregados foram adicionados os teores escolhidos para cada uma das misturas, conforme a Tabela 14, utilizando um total, em peso de agregado, de 6000 g, o qual corresponde a 4 amostras de 1500 g, que deram origem a respectivos 4 corpos-de-prova de dimensões 10 x 11 cm. Para este processo, foi utilizado o misturador da marca *infraTest testing systems*, modelo *Bituminous Laboratory Mixer 30 Liter Special Version 380V 60 Hz 3Ph with neutral wire/conductor* (Figura 31).

Tabela 14 – Teor de ligante adicionado a cada mistura para definição do teor de projeto

<i>Mistura</i>	<i>Teor de ligante (%)</i>	<i>Ligante adicionado (g)</i>
CAref	5,0	315,8
	5,5	349,2
	6,0	383,0
	6,5	417,1
CAF10	4,0	250,0
	4,5	282,7
	5,0	315,8
	5,5	349,2
CAF20	3,0	185,6
	3,5	217,6
	4,0	250,0
	4,5	282,7
CAF30	2,5	153,8
	3,0	185,6
	3,5	217,6
	4,0	250,0

Figura 31 – Misturador Infratest da UFSM



Conforme Bernucci et al. (2010), o tamanho do molde utilizado em dosagens que utilizam o método Superpave é um aspecto importante e, por mais que o Compactador Giratório requeira o molde de 150 mm, o método também admite a moldagem de corpos-de-prova com 100 mm. Por isso, para execução deste trabalho, foram utilizados moldes com 100 mm de diâmetro.

Todo o procedimento de dosagem e, também, de moldagem das amostras ensaiadas, foi executado utilizando o CGS (Figura 32). Segundo Bernucci et al. (2010) este equipamento apresenta as seguintes características:

- Ângulo de rotação de  $1,25 \pm 0,02^\circ$ ;
- Taxa de 30 rotações por minuto;
- Tensão de compressão vertical durante a rotação de 600 kPa;
- Capacidade de produzir corpos-de-prova com diâmetros de 150 mm e 100 mm.

Figura 32 – Compactador Giratório Superpave (IPC Servopac) da UFSM



Através do procedimento Superpave, a compactação das amostras realizada no CGS para fins de dosagem, e durante todo o processo de moldagem das amostras, foi executada com pressão aplicada de 600 kPa e ângulo de rotação de 1,25° com velocidade constante de giro de 30 rpm, esta sendo acionada por um motor elétrico atuando sobre a base rotativa, enquanto a pressão é fornecida por um sistema hidráulico ou mecânico. As amostras são fixadas na estrutura suportando o molde e permitindo o giro, onde, para que o molde seja posicionado no ângulo de giro, são usados mancais. A pressão da cabeça de carga é medida durante a compactação, onde a variação vertical da posição desta representa a variação da altura da amostra.

Além disso, destaca-se o fato da mistura não-compactada permanecer em estufa, à temperatura de compactação, obtida através do ensaio de viscosidade do ligante, por um período de 2 horas antes da compactação (Figura 33), de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem.

Figura 33 – Simulação de envelhecimento de curto prazo em estufa



Após o procedimento de moldagem das amostras para realização da dosagem, sendo três amostras para cada teor teste, foi separada uma delas para realização do ensaio para determinação da densidade máxima teórica, através do método de Rice (Figura 34), as quais apresentaram os valores de acordo com a Tabela 15. Ainda, através desse parâmetro de densidade, foi possível calcular, em média, o volume de vazios para cada teor e, assim, sendo possível determinar o teor ótimo de projeto para cada mistura, o que corresponde a um volume de vazios ( $V_v$ ) igual a 4%.

Figura 34 – Realização do ensaio de densidade da mistura através do método de Rice



Tabela 15 – Valores de densidade obtidos através do Rice para cada mistura

<i>Mistura</i>	<i>Teor de ligante (%)</i>	<i>Gmm (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Vv (%)</i>
CAref	5,0	2,392	5,79
	5,5	2,369	4,66
	6,0	2,358	3,46
	6,5	2,353	2,27
CAF10	4,0	2,407	5,96
	4,5	2,395	5,09
	5,0	2,368	2,26
	5,5	2,363	1,86
CAF20	3,0	2,448	8,98
	3,5	2,413	7,05
	4,0	2,383	4,17
	4,5	2,366	2,97
CAF30	2,5	2,436	9,57
	3,0	2,419	7,42
	3,5	2,380	4,43
	4,0	2,366	2,40

Com esses dados e, através da curva vazios x ligante, foi possível determinar, para cada uma das misturas, o teor ótimo de ligante correspondente ao Vv de 4% (Tabela 16), com esforço de compactação de projeto baseado no número de giros de projeto ( $N_{projeto}$ ), o qual corresponde a um número de giros, utilizados nesta pesquisa, igual a 100, que representa um tráfego equivalente à carga de eixo simples entre  $3 \times 10^6$  e  $3 \times 10^7$ , considerado em vias urbanas de tráfego médio a pesado. No Brasil, as escolha do teor de projeto corresponde a um Vv de 4%, segundo Bernucci et al. (2010), sendo também, neste caso, uma média de 3 teores correspondentes aos teores associados à massa específica aparente máxima da amostra compactada.

Tabela 16 – Teor de projeto correspondente às misturas utilizadas na pesquisa

<i>Mistura</i>	<i>Teor de projeto (%)</i>	<i>Vv (%)</i>
CAref	5,70	4,00
CAF10	4,60	4,00
CAF20	4,15	4,00
CAF30	3,65	4,00

Através das propriedades físicas das misturas e dos agregados nela utilizados, foi possível obter os parâmetros volumétricos das amostras. Na Tabela 17 estão apresentados os requisitos volumétricos, para as amostras com Vv de 4% de vazios no agregado mineral (VAM) e da relação betume-vazios (RBV), para a dosagem Superpave.

Tabela 17 – Requisitos volumétricos das amostras

CAP	Volume de vazios (%)	VAM min (%)	RBV (%)
50/70	4,00	13	65-75

Ainda, foi determinada a densidade específica aparente (Gsb) de todas as amostras. Este procedimento foi realizado segundo a norma AASHTO T 166-05, onde o volume aparente inclui o volume de agregado sólido adicionado ao volume de poros superficiais contendo água.

De acordo com Nascimento (2008), durante a compactação das amostras, são registrados, a cada giro, os dados de altura, tensão vertical e o ângulo de giros. Logo, existe um arquivo com o histórico de compactação de cada amostra, onde o principal dado utilizado para os cálculos é a altura correspondente a cada giro. Com esta altura é possível determinar o volume da amostra, que, juntamente com a massa do material, permite estimar a densidade da amostra ao longo da compactação, de acordo com a Equação 4:

$$G_{mb(\text{estimada})} = \frac{W_m / V_{mx}}{\gamma_w} \quad (4)$$

Onde:

$G_{mb(\text{estimada})}$  = densidade específica aparente estimada durante a compactação;

$W_m$  = massa do CP, grama;

$\gamma_w$  = massa específica da água;

$V_{mx}$  = volume do CP calculado a partir do diâmetro interno do molde (100 mm) e a altura medida pelo SGC em um determinado giro.

No entanto, Nascimento (2008) afirma que esse cálculo assume o CP com uma forma cilíndrica perfeita, e que isto não está correto, uma vez que as irregularidades superficiais levam a um volume levemente inferior ao considerado no cálculo, influenciando, assim, no valor da densidade específica aparente estimada. Por isso, usa-se um fator de correção para a densidade, que representa a relação entre a densidade medida por pesagem hidrostática e a densidade estimada ao final da compactação. Esta relação é representada pela Equação 5:

$$C = \frac{G_{mb}(medida)}{G_{mb}(estimada)} \quad (5)$$

Onde:

$C$  = fator de correção;

$G_{mb}(medida)$  = densidade específica aparente medida após final da compactação;

$G_{mb}(estimada)$  = densidade específica aparente medida estimada na compactação.

Assim, após a obtenção do fator de correção, este é aplicado para os outros giros, onde é possível obter a densidade corrigida em qualquer momento da compactação, seguindo a Equação 6:

$$G_{mb}(corrigida) = C \times G_{mb}(estimada) \quad (6)$$

Onde:

$G_{mb}(corrigida)$  = densidade específica aparente corrigida em um giro qualquer;

$G_{mb}(estimada)$  = densidade específica aparente estimada em um giro qualquer.

Logo, é possível determinar a porcentagem da  $G_{mm}$ , através do valor da densidade corrigida, em qualquer giro da compactação através da seguinte relação:

$$\% G_{mm} = 100 \times \frac{G_{mb}(corrigida)}{G_{mm}} \quad (7)$$

Assim, ao longo do processo de compactação, após a determinação da  $\% G_{mm}$ , é possível plotar a mesma em função do número de giros, onde se obtém a curva de densificação do CP. No caso deste trabalho, todos os cálculos foram processados em planilha eletrônica do Microsoft Excel.

Através desta curva, foram calculados os índices CDI, TDI e TDIm de cada amostra, onde o TDIm representa um parâmetro derivado do TDI, no entanto, ao invés de considerar a área sob a curva de densificação de 92% a 98% da  $G_{mm}$ , este leva em conta a área a partir de 92% até o final da compactação. Este índice foi definido

de acordo com Nascimento (2008), uma vez que não se costuma compactar os CPs até 98% da  $G_{mm}$ , durante o processo de dosagem das misturas asfálticas. A Tabela 18 apresenta os limites inicial e final da curva de densificação utilizados para o cálculo dos índices CDI, TDI e TDIm.

Tabela 18 – Limites da curva de densificação

<i>Índices</i>	<i>Limite inicial</i>	<i>Limite final</i>
CDI	Giro 8 ( $N_{ini}$ )	92% da $G_{mm}$
TDI	92% da $G_{mm}$	98% da $G_{mm}$
TDIm	92% da $G_{mm}$	Final da compactação

Fonte: (Adaptado de Nascimento, 2008).

Após definidos os teores de ligante de projeto para cada mistura, foi realizado o procedimento de moldagens das amostras para os ensaios mecânicos e de adesividade. O procedimento de moldagem dessas amostras obedeceu os mesmos princípios da dosagem, também utilizando o compactador giratório Superpave IPC Servopac disponibilizado pelo LMCC da UFSM, variando apenas o número de giros, de acordo com o volume de vazios requerido para cada ensaio, bem como a dimensão da amostra. A quantidade de massa a ser processada para cada amostra foi calculada de modo a obter a altura desejada do corpo-de-prova.

### 3.3.3 Ensaios mecânicos e de adesividade

Os ensaios e seus respectivos procedimentos estão apresentados neste item, de maneira resumida, os quais foram efetivamente realizados.

#### 3.3.3.1 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) realizado nas misturas asfálticas desta pesquisa foi realizado, de acordo com as prescrições das normas do DNIT-M3 135/2010 e ASTM D 4123:1982. O equipamento utilizado (Figura 35) é uma *Universal Test Machine* (UTM) da IPC Global, a qual é composta por um pistão acoplado a um regulador de tempo e frequência.

O ensaio consiste, basicamente, em aplicar uma carga repetidamente no plano diametral vertical das amostras cilíndricas regulares com dimensões 10 x 6,5 cm e Vv de 4% ( $\pm 1\%$ ), sendo medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico equivalente, no ensaio, a 10 Hz, com tempo de 0,1 s e 0,9 s de repouso, através de LVDTs (*linear variable differential transformers*) nas duas faces do corpo-de-prova, ligados a um microcomputador. Esta carga aplicada gera uma tensão na qual pode-se medir o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão, nas temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C. Cada amostra de cada mistura foi ensaiada em três frequências de carregamento: 5 Hz, 10 Hz e 25 Hz, em cada uma das temperaturas, sendo que o coeficiente de Poisson utilizado teve sua variação de acordo com a temperatura, conforme mostra a Tabela 19. Todas as amostras foram condicionadas por um período de, pelo menos, 12 horas, em todas as temperaturas, antes da realização dos ensaios.

Figura 35 – Prensa hidráulica UTM-25



Tabela 19 – Valores de Coeficiente de Poisson utilizados na pesquisa

Temperatura (°C)	Coeficiente de Poisson
10	0,15
25	0,30
35	0,35

### 3.3.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Após a realização do ensaio de MR, foi iniciado o ensaio para avaliar a resistência à tração por compressão diametral (RTCD ou RT), utilizando-se as mesmas amostras do ensaio de MR, já que o ensaio de módulo é não destrutivo para as amostras.

A norma que prescreve as orientações para a determinação da RT é a norma do DNIT 136/2010, onde são utilizadas amostras com dimensões de 10 cm para o diâmetro e 6,35 cm para a altura, as quais também foram moldadas pelo método Superpave. O ensaio consiste em aplicação de uma carga estática de compressão (Figura 36), com velocidade de 0,8 mm/s, distribuída ao longo de duas geratrizess opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicular à carga, onde a medida resultante é a resistência à tração dada pela Equação 8.

Figura 36 – Corpo-de-prova submetido ao ensaio de RT



$$RT = \frac{2.F}{\pi.D.H} \quad (8)$$

Onde:

RT = Resistência à tração;

F = Força obtida pelo produto da constante do anel com o valor máximo atingido pelo extensômetro do anel dinamométrico durante o ensaio;

D = Média de quatro medidas do diâmetro da amostra;

H = Média de quatro medidas da altura da amostra.

As amostras foram condicionadas por um período de 12 horas, antes da realização do ensaio, sendo realizado na temperatura de 25°C.

### 3.3.3.3 Módulo Dinâmico Uniaxial

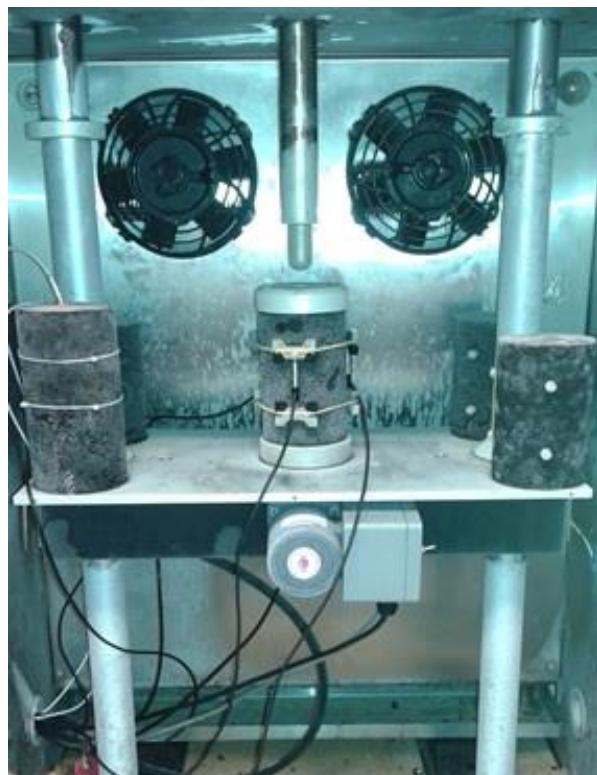
O ensaio de módulo dinâmico foi realizado com 8 amostras de dimensões 10 x 15 cm, apresentando Vv de 5,5% ( $\pm 0,5\%$ ), sendo 2 amostras para cada mistura estudada. O módulo complexo foi determinado após aplicação de carga em todas frequências possíveis (25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz, 0,1 Hz e 0,01 Hz), nas temperaturas de -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C. O condicionamento das amostras, bem como toda a realização do ensaio, seguiu os preceitos da norma AASHTO T 311 – *Determining Dynamic Modulus of Hot-mix Asphalt Concrete Mixtures*. O ensaio foi realizado utilizando a prensa hidráulica UTM-25, a mesma utilizada para os ensaios de MR, disponibilizada pelo LMCC da UFSM. A Figura 37 mostra um corpo-de-prova submetido ao ensaio de Módulo Dinâmico a -10°C. O tempo de condicionamento para cada temperatura está detalhado na Tabela 20.

Tabela 20 – Tempo mínimo recomendado para equilíbrio da temperatura para amostras submetidas ao ensaio de E\*

Temperatura de ensaio (°C)	Tempo para equilíbrio da temperatura a partir da temperatura da sala de ensaio de 25°C (h)	Tempo para equilíbrio da temperatura a partir da temperatura de teste anterior (h)
-10	Uma noite	Uma noite
4	Uma noite	4 horas ou uma noite
21	1	3
37	2	2
54	3	1

Fonte: (Adaptado de AASHTO T 311).

Figura 37 – Corpo de prova submetido ao ensaio de  $E^*$  à -10°C



A deformação axial controlada foi fixada entre 50 e 75 microstrains, no intuito de buscar um regime de viscoelasticidade linear. O cálculo de ajuste para alcançar esta faixa de deformação é realizado através da Equação 9:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (9)$$

Onde, de acordo com Nascimento (2008), as porções real e imaginária do módulo complexo ( $E^*$ ) podem ser escritas da seguinte forma:

$$E^* = E1 + E2 \quad (10)$$

Onde E1 representa, genericamente, a fração de armazenamento ou a fração elástica do módulo complexo, e o E2 representa a fração de perda ou a fração viscosa do módulo.

Além disso, o ângulo de fase,  $\phi$ , que é definido como um indicador das propriedades viscosas do material ensaiado, pode ser representado como o ângulo de atraso de  $\epsilon_0$  em relação a  $\sigma_0$ , conforme a Equação 11:

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (11)$$

Onde:

$t_i$  = fração de tempo entre os picos de tensão e deformação;

$t_p$  = tempo de um ciclo de carga;

$i$  = número imaginário.

Ainda conforme Nascimento (2008), para um material puramente elástico  $\phi = 0^\circ$ , onde o módulo complexo será igual ao módulo dinâmico. Para um material puramente viscoso, por outro lado, o valor de  $\phi$  será igual a  $90^\circ$ .

### 3.3.3.4 Flow Number

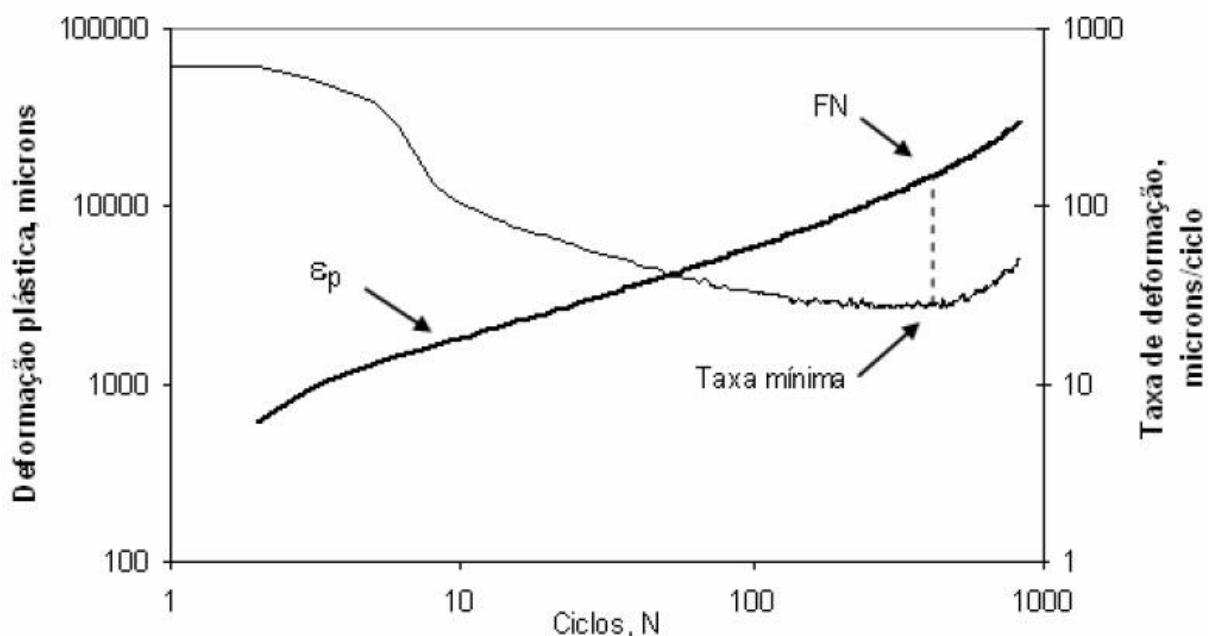
Com as misturas asfálticas estudadas neste trabalho, foram realizados ensaios para avaliação da resistência das misturas a deformações permanentes, onde o parâmetro escolhido foi o ensaio de *Flow Number* (FN). O ensaio através do qual o FN é determinado, consiste da aplicação de pulsos de carga cíclica na direção axial de amostras cilíndricas. Os ciclos aplicados em uma frequência de 1 Hz, com carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s. Este ensaio não é normatizado no Brasil, por isso, para a realização do mesmo, foi utilizada a norma americana AASHTO TP 79-12.

De acordo com o descrito por Medina e Motta (2015) o ensaio consiste em se determinar qual é o número de ciclos de carregamento de 204 kN, aplicado com tempo de pulso de 0,1 s e repouso de 0,9 s, o qual leva a amostra à ruptura. Esta ruptura é caracterizada visualmente pelo embarrigamento da amostra, no entanto, durante o ensaio, existe um critério de definição do ciclo o qual caracteriza a deformação permanente terciária, ou seja, de crescimento acelerado.

Segundo Witczak et al. (2002), o FN corresponde ao número de ciclos em que a taxa de deformação plástica é mínima e, a partir da qual, a amostra de ensaio atinge a ruptura e passa a sofrer cisalhamento a volume constante. O ensaio pode ser finalizado em três casos: quando o FN é atingido, quando o ciclo de 10.000 é atingido ou, ainda, quando a mistura atinge 5% de deformação. Para fins de execução deste ensaio em laboratório, na prensa UTM 25, foram consideradas apenas as duas últimas hipóteses. Além disso, observa-se que existem três regiões de deformação durante o ensaio. A primeira, região primária, a densificação da amostra ensaiada ocorre a uma taxa elevada. Em seguida, na região secundária, a taxa de deformação é, praticamente, constante. Enfim, na região terciária, a amostra já se encontra rompida. O ciclo referente ao FN está exatamente entre a região secundária e a terciária, onde ocorre a deformação a volume constante e a taxa de deformação volta a subir, visto que a amostra não oferece mais resistência ao carregamento.

Nascimento (2008) afirma que o número de ciclos onde começa o estágio terciário, oriundo do ensaio uniaxial de carga repetida, consiste no cisalhamento com volume constante, referido como *Flow Number*. Logo, o FN, determinado no ensaio, é o número de ciclos em que a taxa de deformação plástica é mínima, onde, a partir do qual, a amostra atinge a ruptura (Figura 38). Em uma rodovia de volume médio de tráfego, o número de ciclos requerido no FN deve ser superior a 300, sendo que em uma rodovia de alto volume de tráfego pesado em velocidade maior que 60 km/h e temperaturas moderadas, este número passa a ser superior a 750 ciclos.

Figura 38 – Deformação plástica e taxa de deformação plástica ao longo do ensaio

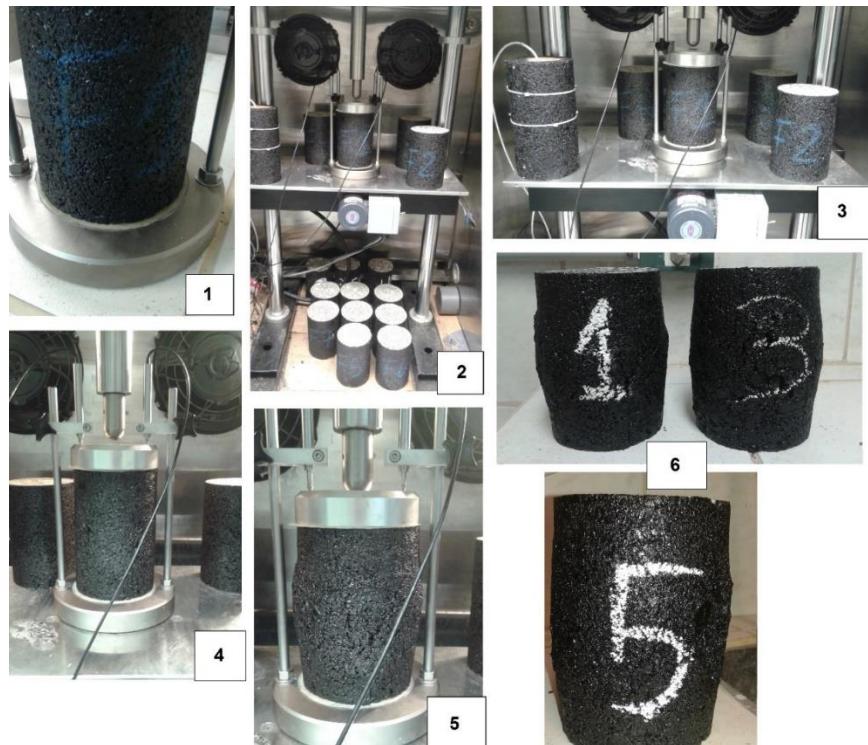


Fonte: (Nascimento, 2008).

Para a realização deste ensaio, foram utilizadas três amostras de cada mistura, contendo, em cada uma delas, um volume de vazios de 7%,  $\pm 0,5\%$ , com dimensões de 10 x 15 cm. As amostras foram condicionadas a 60° por um período de 8 horas. A mistura asfáltica foi submetida ao carregamento cíclico de compressão com frequência de 0,1 s de carga e 0,9 s de descanso, descanso este com uma carga equivalente a 5% da carga aplicada, que representa o repouso. As deformações acumuladas são obtidas em função do número de ciclos, e a tensão aplicada em cada ciclo do ensaio foi de 204 kPa no período de 0,1 s e de 10,2 kPa durante os 0,9 s de repouso.

As amostras de cada mistura foram ensaiadas individualmente, conforme mostra o passo-a-passo da Figura 39, utilizando-se de duas membranas de látex dupla, cada uma com espessura de, aproximadamente, 1 mm, coladas uma à outra com silicone, conforme experiência prévia do Laboratório LMP/UFC, para fixar a amostra durante o ensaio. Foram realizados ensaios para duas amostras de cada mistura, com posterior obtenção de média.

Figura 39 – Passos da realização do ensaio de FN



O coeficiente de variação para o FN é de cerca de 20%, de acordo com a norma utilizada. A Tabela 21 mostra o coeficiente de variação da média de ensaios em amostras múltiplas, no caso desta pesquisa, para duas amostras.

Tabela 21 – Coeficiente de variação de média das propriedades de FN

Número de amostras	Coeficiente de variação por média (%)	
	Deformação permanente antes de atingir o FN	Flow Number
2	10,6	14,1
3	8,7	11,5
4	7,5	10,0
5	6,7	8,9
6	6,1	8,2
7	5,7	7,6
8	5,3	7,1
9	5,0	6,7
10	4,7	6,4

Fonte: (Adaptado de AASHTO T 79).

### 3.3.3.5 *Lottman modificado*

O ensaio de Lottman Modificado, segundo Specht (2004), considerando o efeito deletério da água, é utilizado para avaliar as propriedades de adesividade em misturas asfálticas através de análise feita pela relação entre a resistência à tração de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento. Esta relação é denominada Resistência Retida à Tração (RRT).

A norma utilizada como base para este ensaio é descrita na AASHTO T 283. No Brasil, a norma que segue os preceitos desta é a ABNT NBR 15617, a qual foi base para realização do ensaio nesta pesquisa.

Para determinação do dano por umidade induzida, através deste ensaio, foram preparadas 6 amostras por mistura, seguindo a metodologia Superpave, com volume de vazios de 7% ( $\pm 1\%$ ), as quais foram separadas em dois grupos de 3 amostras cada. O primeiro grupo foi submetido ao ensaio de RT após condicionamento de 25°C por 12 horas. As amostras do segundo grupo foram, inicialmente saturadas, com grau de saturação entre 55% e 80%, usado como critério de aceitação e descarte das amostras, sendo essa saturação conseguida através da aplicação de vácuo na faixa de 13 kPa a 67 kPa de pressão absoluta. As amostras deste grupo foram submetidas ao condicionamento de elevada severidade, onde o corpo-de-prova é levado ao congelamento com temperatura de -18°C por um tempo mínimo de 16h. Após remoção da refrigeração, as amostras foram, imediatamente, imersas em banho, em água destilada, à temperatura de 60°C, por um período de 24h (Figura 40). Por fim, as amostras foram submetidas a banho em temperatura de 25°C por um período de 2h, sendo, após, submetidas ao ensaio de RT.

Figura 40 – Amostras imersas em banho de água destilada à temperatura de 60°C



A relação entre  $RT'/RT$  indica a perda de resistência por umidade induzida. De acordo com Bernucci et al. (2010), essa relação deve ser maior ou igual a 0,70, ou seja, a perda deve ser inferior a 30%. Já, segundo a metodologia Superpave, o valor mínimo, indicador de boa resistência o efeito deletério da água, de  $RRT$  recomendado, é de 80%.

### 3.3.3.6 Desgaste cântabro

Para o ensaio de perda de massa cântabro, o qual mede a resistência ao desgaste ou abrasão de misturas asfálticas, foram moldadas amostras com volume de vazios de 4% ( $\pm 1\%$ ), através da metodologia Superpave. Todas as amostras foram ensaiadas após condicionamento de 12 horas a 25°C.

O ensaio consistiu em submeter as amostras condicionadas de cada uma das misturas asfálticas, uma amostra por vez, à máquina de abrasão Los Angeles do LMCC da UFSM (Figura 41), sem as esferas metálicas, à 300 revoluções. De acordo

com Specht (2004), este ensaio avalia, de maneira indireta, a coesão, resistência à abrasão e resistência à desagregação de misturas asfálticas. A massa das amostras foi determinada antes e depois do ensaio e, após, calculada a perda de massa por desgaste.

Figura 41 – Aparelho de abrasão Los Angeles do LMCC



## 4 RESULTADOS

### 4.1 DOSAGEM

#### 4.1.1 Parâmetros volumétricos

Foram utilizadas, para a determinação dos teores de ligante de projeto, no procedimento de dosagem, três amostras para cada mistura. Com esses valores, foi possível determinar cada um dos teores de projeto, os quais estão apresentados na Tabela 22, bem como os resultados dos parâmetros volumétricos de cada mistura, com Vv de 4%.

Tabela 22 – Resultados volumétricos das dosagens Superpave das misturas asfálticas

Mistura	Teor de Ligante Adicionado (%)	Teor de Ligante Antigo (%)	Teor de Ligante Total (%)	Proporção Ligante Adicionado e Antigo (%)	VAM (%)	RBV (%)
CAref	5,70	-	5,70	100,0 – 0,0	17,3	76,8
CAF10	4,60	0,68	5,28	87,1 – 12,9	15,0	74,0
CAF20	4,15	1,35	5,50	75,4 – 24,6	16,0	65,0
CAF30	3,65	2,03	5,68	64,3 – 35,7	14,5	75,0

É possível observar que é atendido, para todas as misturas o volume de agregado mineral (VAM) mínimo de 13%, no entanto, para os limites de RBV, a mistura convencional de referência apresentou um valor acima do limite máximo, mas, mesmo assim, a mistura foi aceita.

As Figuras 42, 43, 44 e 45 detalham os parâmetros volumétricos de cada uma das misturas pesquisadas.

Figura 42 – Volume de Vazios para todas as misturas

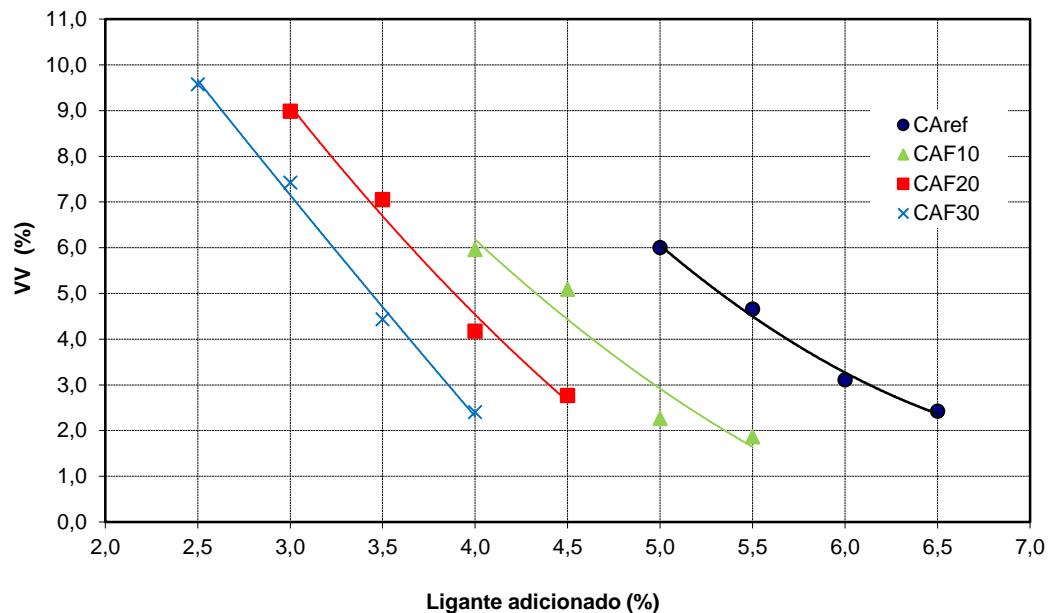


Figura 43 – Vazios no Agregado Mineral para todas as misturas

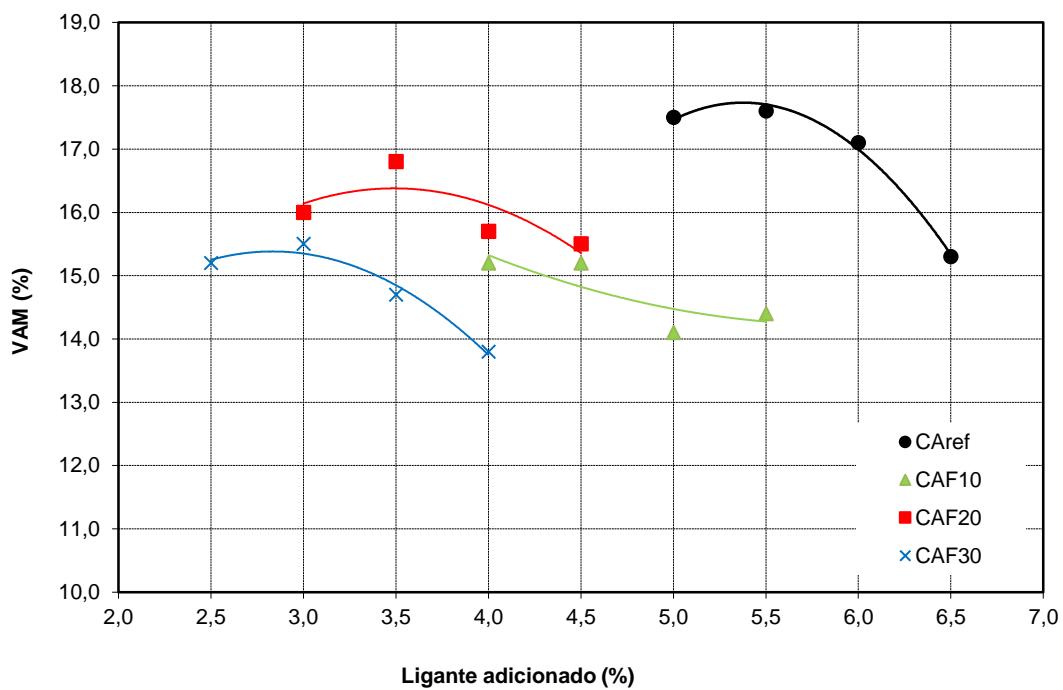


Figura 44 – Relação Betume/Vazios para todas as misturas

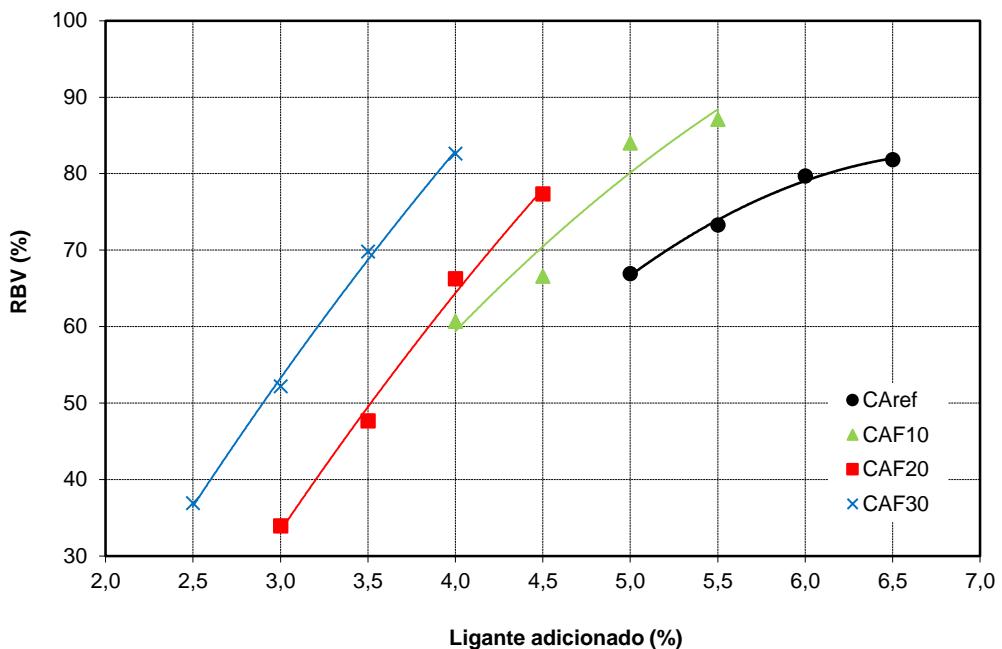
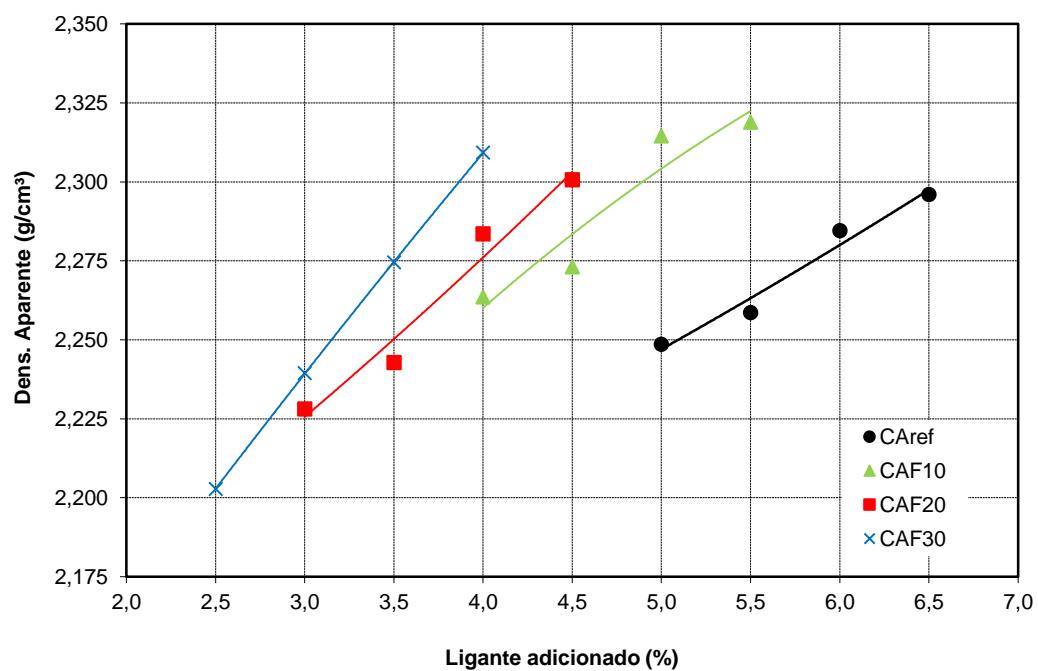


Figura 45 – Massa Específica Aparente para todas as misturas



#### 4.1.2 Parâmetros de densificação

Os parâmetros de densificação giratória foram calculados, para todas as amostras, a partir de dados oriundos do SGC durante os procedimentos do projeto de dosagem. Assim, para cada mistura, foi possível obter as curvas com variações dos índices de CDI e TDIm. Os resultados obtidos para os parâmetros de densificação estão apresentados na Tabela 23, sendo, os valores apresentados, as médias dos resultados calculados com 3 amostras de cada mistura.

Tabela 23 – Índices de compactação giratória das misturas

<i>Mistura</i>	<i>Teor de Ligante Adicionado (%)</i>	<i>CDI</i>	<i>TDIm</i>
CAref	5,70	90,5	459,5
CAF10	4,60	77,6	554,8
CAF20	4,15	74,6	510,3
CAF30	3,65	103,1	541,8

De acordo com Nascimento (2008), misturas com valores de CDI entre 50 e 100 são consideradas ideais e têm melhor compactabilidade, o que é desejável, ao passo que misturas com valores de CDI baixos têm problemas de estabilidade e devem ser evitadas. As misturas estudadas nesta pesquisa obtiveram valores entre a faixa considerada ideal, exceto a mistura CAF30, que obteve valor de CDI um pouco acima do limite considerado, mas, ainda assim, possuindo boa compactabilidade.

Quanto aos valores de TDIm, energia oriunda da compactação giratória, Nascimento (2008) afirma que a tais valores estão relacionados com a estabilidade da mistura. Por isso, valores de TDIm mais elevados, são considerados com melhores expectativas de o revestimento asfáltico resistir aos esforços impostos pelo tráfego, durante sua vida útil. Assim, é possível observar, através dos dados apresentados, que as misturas contendo material fresado em sua composição apresentam melhor desempenho, quando comparadas à mistura convencional CAref.

## 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Neste item, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas desta pesquisa. Para tanto, as amostras moldadas nos respectivos teores de projeto de ligante de cada uma das misturas, são aquelas já descritas anteriormente. Foram moldadas amostras particulares para cada ensaio, de modo a fixar o Vv exigido, bem como a dimensão de cada amostra, exceto para o caso do ensaio de RT, o qual foram utilizadas as mesmas amostras do ensaio de MR.

### 4.2.1. Módulo de resiliência

Para o ensaio de módulo de resiliência, as amostras foram submetidas à aplicação de carga nas temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C. Cada amostra de cada mistura foi ensaiada em três frequências de carregamento: 5 Hz, 10 Hz e 25 Hz, nas três temperaturas.

O ensaio, normatizado no Brasil através de DNIT-ME 135/2010 – Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência, foi realizado na Universal Testing Machine – UTM 25 no LMCC da UFSM, onde as amostras foram condicionadas, primeiramente, a 25°C.

A UTM utiliza a norma ASTM D4123 (1982) – “Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures” da “American Society for Testing and Materials” como base para realizar o ensaio de MR, a qual atende integralmente o método do DNIT (2010).

Nas Tabelas 24, 25 e 26 estão apresentados os valores de MR para cada uma das misturas, de acordo com a frequência de ensaio e a respectiva temperatura, sendo que os resultados apresentados são formados pela média de três amostras ensaiadas nas mesmas condições, com seus respectivos coeficientes de variação.

Tabela 24 – Resultados de MR para a frequência de carregamento 5 Hz

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Mistura</b>	<b>Teor de ligante</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>CV (%)</b>
10°	Mistura Referência	5,70	9767	886	9,08
	Mistura 10%	4,60	12528	116	0,93
	Mistura 20%	4,15	12193	983	8,07
	Mistura 30%	3,65	11691	243	2,08
25°	Mistura Referência	5,70	3754	175	4,65
	Mistura 10%	4,60	5715	179	3,14
	Mistura 20%	4,15	5108	296	4,85
	Mistura 30%	3,65	6405	126	1,97
35°	Mistura Referência	5,70	995	240	24,14
	Mistura 10%	4,60	1641	217	13,2
	Mistura 20%	4,15	1981	124	6,25
	Mistura 30%	3,65	2366	354	14,94

Tabela 25 – Resultados de MR para a frequência de carregamento 10 Hz

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Mistura</b>	<b>Teor de ligante</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>CV (%)</b>
10°	Mistura Referência	5,70	11951	664	5,55
	Mistura 10%	4,60	12290	488	3,97
	Mistura 20%	4,15	12812	695	5,43
	Mistura 30%	3,65	13429	674	5,02
25°	Mistura Referência	5,70	5138	194	3,77
	Mistura 10%	4,60	6575	166	2,52
	Mistura 20%	4,15	6755	222	3,29
	Mistura 30%	3,65	7506	313	4,18
35°	Mistura Referência	5,70	1224	293	23,95
	Mistura 10%	4,60	2048	305	14,9
	Mistura 20%	4,15	2678	146	5,47
	Mistura 30%	3,65	3020	383	12,69

Tabela 26 – Resultados de MR para a frequência de carregamento 25 Hz

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Mistura</b>	<b>Teor de ligante</b>	<b>MR (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>CV (%)</b>
10°	Mistura Referência	5,70	11186	737	9,08
	Mistura 10%	4,60	14010	298	0,093
	Mistura 20%	4,15	14673	1914	8,07
	Mistura 30%	3,65	14460	454	2,08
25°	Mistura Referência	5,70	6358	155	4,65
	Mistura 10%	4,60	8665	56	3,14
	Mistura 20%	4,15	7895	319	4,85
	Mistura 30%	3,65	8525	252	1,97
35°	Mistura Referência	5,70	995	474	24,14
	Mistura 10%	4,60	1641	330	13,2
	Mistura 20%	4,15	1981	316	6,25
	Mistura 30%	3,65	2366	351	14,94

As Figuras 46, 47 e 48 apresentam as médias dos resultados de MR com seus valores acrescidos e subtraídos dos desvios-padrão, respectivamente. Todos os ensaios de MR foram realizados na sequência das menores para as maiores temperaturas, bem como das maiores para as menores frequências.

Figura 46 – Resultados de MR a 10°C em função da frequência

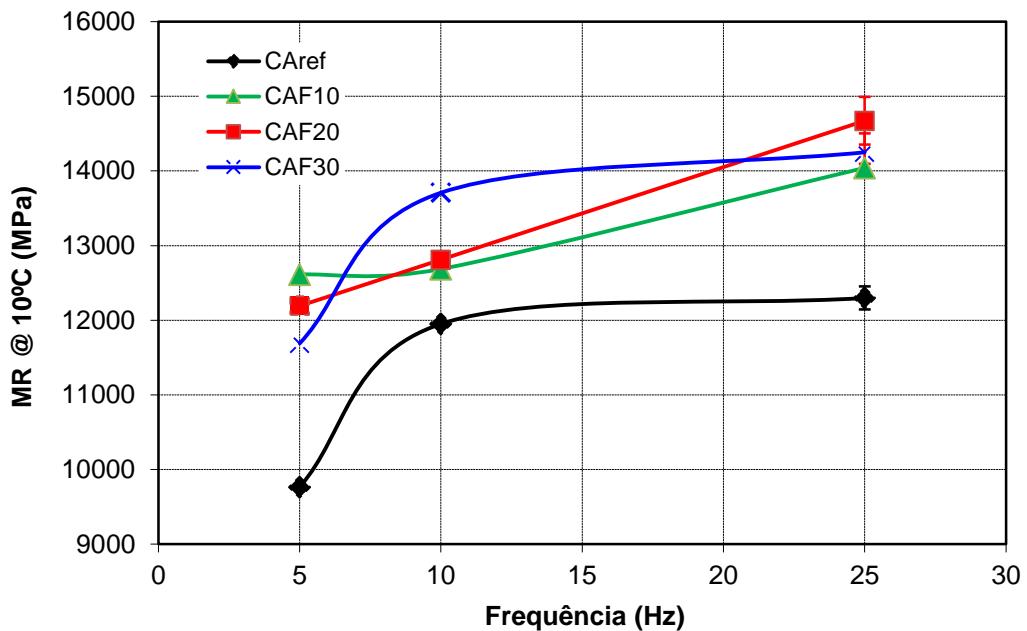


Figura 47 – Resultados de MR a 25°C em função da frequência

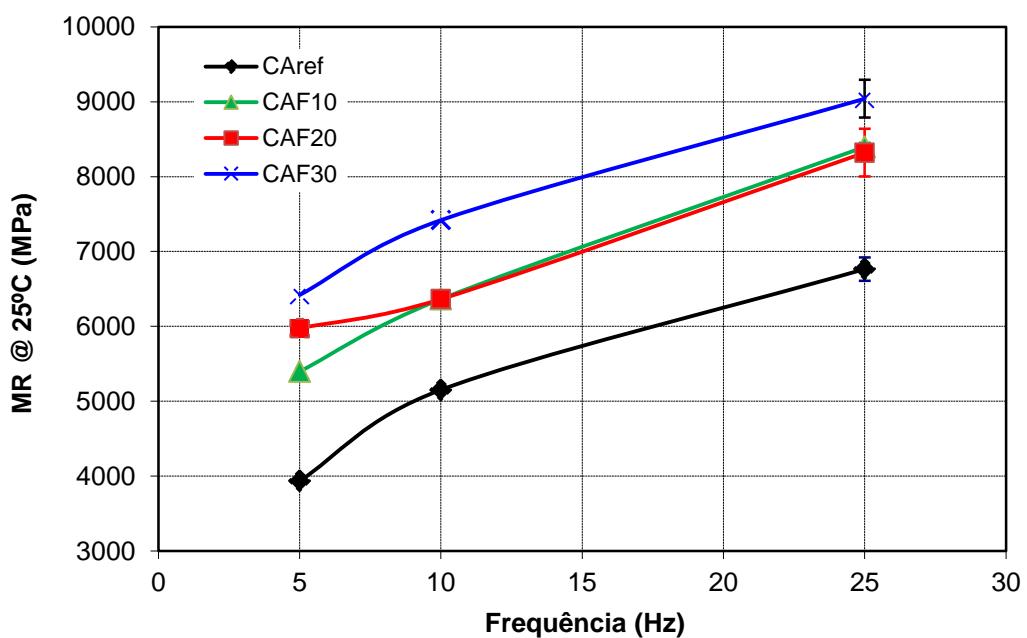
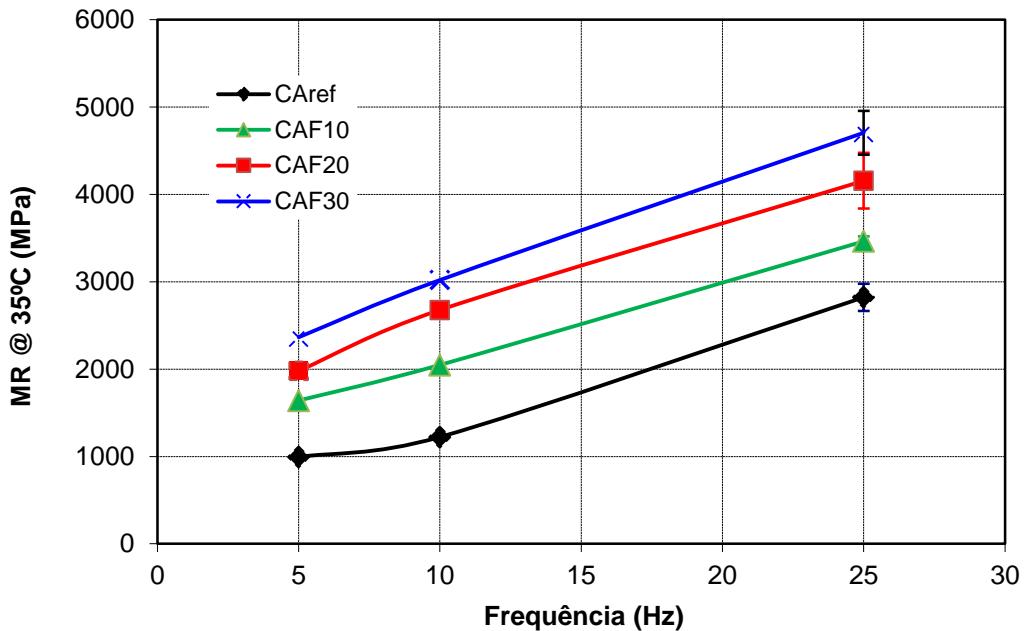


Figura 48 – Resultados de MR a 35°C em função da frequência



Através dos gráficos apresentados nas figuras anteriores, é possível verificar que a deformabilidade das misturas diminui ao passo que a quantidade de material fresado aumenta, ficando claro que o agregado reciclado aumentam a rigidez das misturas. Nota-se, ainda, principalmente a temperaturas mais baixas (10°C), que a heterogeneidade do material fresado tem grande influência nas misturas, sendo que a rigidez aumenta aleatoriamente com a inserção de agregado reciclado, onde a mistura de referência permanece com a rigidez mais baixa entre as misturas analisadas.

Por outro lado, ao se analisar os resultados apenas pela temperatura, é possível perceber que a dispersão dos valores de MR é maior a 10°C. Isto ocorreu devido à precisão de leitura exigida para um menor deslocamento dos LVDTs, conforme Marques (2004). O sistema de controle e aquisição de dados do equipamento fixa uma sensibilidade mínima dos LVDTs, sendo assim, para que o valor de MR comece a ser registrado, é necessário que o deslocamento atinja tal valor ao longo do diâmetro horizontal. No entanto, quando a temperatura é baixa, é necessário um esforço maior para atingir o valor mínimo para o início das determinações, pois a rigidez da mistura é maior.

Além disso, outro fator é possível ser verificado através dos gráficos, na análise em relação à frequência de carregamento, é possível verificar que os maiores valores de resistência são aqueles onde a frequência aplicada foi a mais alta (25 Hz). As maiores quedas de valores foram encontradas nas misturas ensaiadas na frequência mais baixa (5 Hz), onde, ainda, a mistura de referência se manteve mais baixa em relação às misturas com adição de fresado.

Ainda, é importante ressaltar que, devido à grande heterogeneidade do material fresado, as misturas CAF10 e CAF20 não seguiram totalmente o esperado, sendo que a CAF20 deveria apresentar maior rigidez quando comparada com a CAF10, o que pode ser observado através da Figura 47, onde a CAF10 apresenta, levemente, uma maior rigidez. Ainda quanto à heterogeneidade dos materiais, a mistura CAF30, quando submetida à temperatura de 10°C, apresenta resistência abaixo da esperada, sendo a CAF20 a mistura com maior valor.

Para altas temperaturas, as misturas apresentaram o comportamento esperado, a mistura com maior quantidade de fresado apresentou também a maior resistência, e a mistura de referência, apenas com agregados naturais, apresentou resistência mais baixa que as demais. Logo, quando se analisa o desempenho das misturas em relação às diferentes frequências, nota-se que, independentemente do valor desta, a mistura CAref sempre apresenta menor resistência que as demais.

De acordo com Bernucci et al. (2010), são considerados valores típicos na faixa de 2.000 a 8.000 MPa, para concretos asfálticos a 25°C, o que pode ser, facilmente observado através da Figura 47, onde todos os valores encontrados apresentam MR acima de 2.000 MPa, sendo que, na frequência de 25 Hz, as misturas contendo material fresado apresentaram valores acima de 8.000 MPa, o que pode ser explicado devido à influência da distribuição granulométrica, do tamanho máximo de agregado, além da heterogeneidade do material reciclado.

Vasconcelos e Soares (2003) encontraram resultados de MR com valores menores, da ordem de 2.680 e 2.908 MPa para misturas sem adição de fresado, 2.822 e 3.031 MPa para misturas com adição de 10% de fresado, e 3.163 e 3.796 MPa para misturas com adição de 50% de fresado. Embora os valores sejam relativamente mais baixos que os encontrados nesta pesquisa, observa-se uma tendência de crescimento do MR com a adição de fresado, bem como os valores apresentados e descritos anteriormente, os quais variaram de 4.000 a 9.000 MPa, aproximadamente, à temperatura padrão de 25°C.

Já Oliveira (2013) obteve resultados mais próximos ao desta pesquisa. Utilizando uma mistura de referência e misturas com 15, 35 e 50% de adição de fresado, o autor obteve os valores de MR, em misturas a quente, de 3.809, 6.056, 7.144 e 8.435 MPa, respectivamente. Tais resultados apresentam valores bastante semelhantes aos valores descritos nesta pesquisa, o que salienta e comprova, através da literatura, que a presença de material reciclado aumenta a rigidez das misturas de concreto asfáltico.

#### 4.2.2 Resistência à tração

Na Tabela 27 é possível verificar que os valores de resistência aumentam conforme se eleva o teor de fresado na mistura, o que também é possível verificar através do gráfico. Ao passo que, com a adição de ligante, a mistura perde resistência.

Tabela 27 – Resultados de RT à temperatura de 25°C

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Mistura</b>	<b>Teor de ligante adicionado</b>	<b>RT (MPa)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
25°	Mistura Referência	5,70	1,42	0,14
	Mistura 10%	4,60	1,79	0,23
	Mistura 20%	4,15	2,08	0,23
	Mistura 30%	3,65	2,36	0,12

A Tabela 27 apresenta as médias dos resultados do ensaio de RT realizado nas misturas desta pesquisa, em temperatura de 25°C. A Figura 49 mostra o resultado de RT em função do teor de ligante antigo, teor de ligante adicionado e teor de ligante total de cada mistura, já a Figura 50 mostra a média dos resultados e o desvio-padrão para as misturas de acordo com o teor de fresado.

Observando os dados apresentados na Tabela 27, do ponto de vista prático, é possível verificar que há um leve aumento nos valores de RT, como era esperado, conforme aumenta a quantidade de material fresado inserido na mistura. Oliveira (2013) encontrou, em sua pesquisa, valores da ordem de 0,9, 1,4, 1,8 e 2,2 MPa para as misturas, respectivamente, de referência, com adição de 15, 35 e 50% de fresado, o que se assemelha aos valores encontrados (1,42, 1,79, 2,08 e 2,36 MPa, respectivamente para as misturas CRef, CAF10, CAF20 e CAF30 desta pesquisa).

Figura 49 – Resultados de RT a 25°C em função do teor de fresado

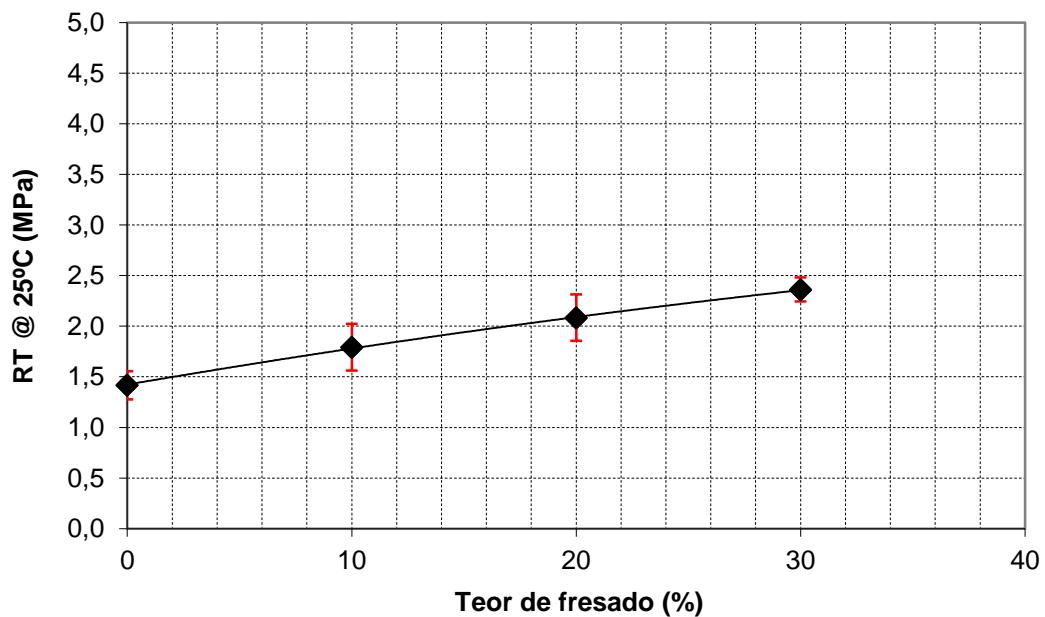
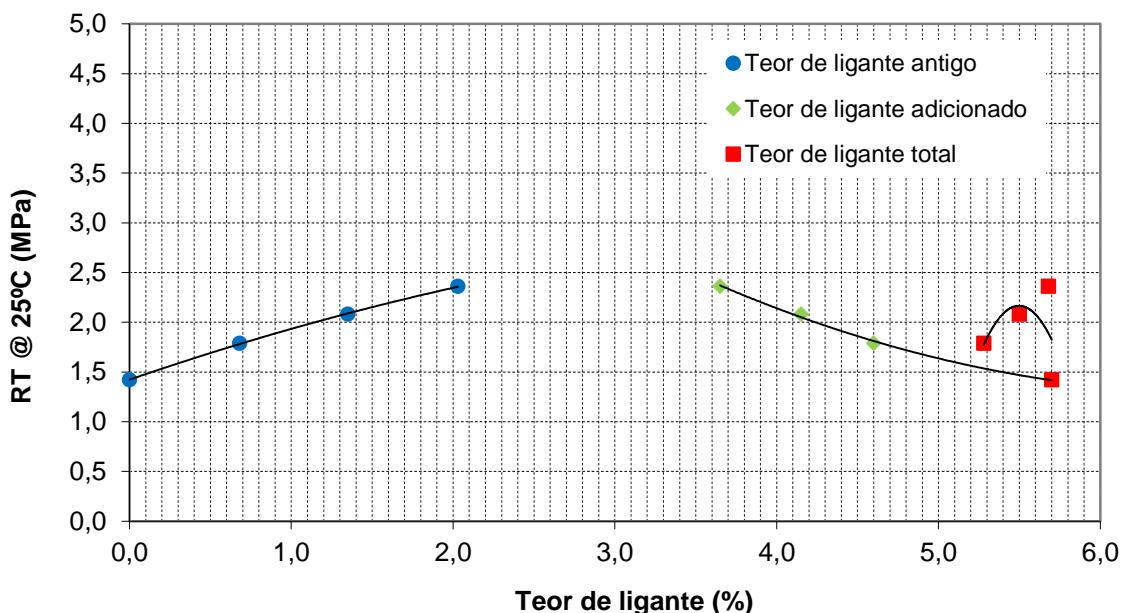


Figura 50 – Resultados de RT a 25°C em função do teor de ligante



Nota-se, através da Figura 49, que à medida em que se aumenta o teor de fresado nas misturas, os resultados de RT também aumentam, o que era esperado, visto que aumenta a quantidade de ligante antigo, sendo que o ligante, quando envelhecido, torna-se mais rígido e, consequentemente, enrijece a mistura. O mesmo pode ser observado para a Figura 50, onde a RT aumenta com a quantidade de ligante antigo existente. O contrário acontece com o ligante novo adicionado, o qual é menos rígido, usando a mesma lógica do ligante envelhecido, consequentemente torna a mistura menos rígida.

Os valores encontrados condizem com a literatura. Bernucci et al. (2010) afirmam que, para misturas asfálticas a quente, os valores típicos situam-se na média de 0,5 e 2,0 MPa, sendo este valor aumentado dada a consistência mais dura do ligante asfáltico, por exemplo, em misturas de módulo elevado. Além disso, também estão de acordo com o limite imposto pelo DNIT 031/2006 – ES para concretos asfálticos, o qual recomenda que o limite mínimo seja de 0,65 MPa.

#### 4.2.3 Módulo dinâmico uniaxial

As Figuras 51 à 55 apresentam os resultados de módulo dinâmico obtidos em cada temperatura em função de cada frequência de ensaio, são chamadas isotermas de módulo dinâmico.

Através das isotermas é possível observar que os valores, na maioria das situações, aumentam com a adição de material fresado na mistura, sendo, ainda, os menores valores encontrados na mistura de referência, o que corrobora os resultados obtidos no ensaio de MR.

Portanto, segundo estes resultados, é possível verificar que à medida em que se diminui a temperatura de ensaio e se aumenta a frequência, o módulo dinâmico se eleva. Além disso, nota-se que, para algumas temperaturas, conforme aumenta a frequência, a rigidez das misturas aumenta, exceto à temperatura de 54°C, onde a mistura CAF20 se comportou de maneira distinta, o que também pode ter sido ocasionado devido à dificuldade operacional do ensaio.

Figura 51 – Resultados de  $E^*$  a -10°C

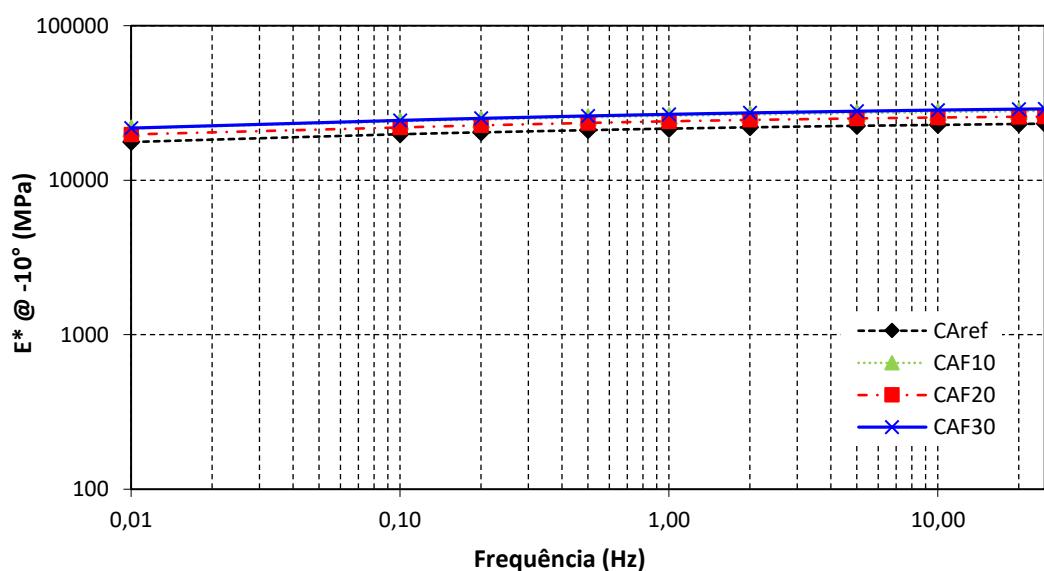


Figura 52 – Resultados de  $E^*$  a 4°C

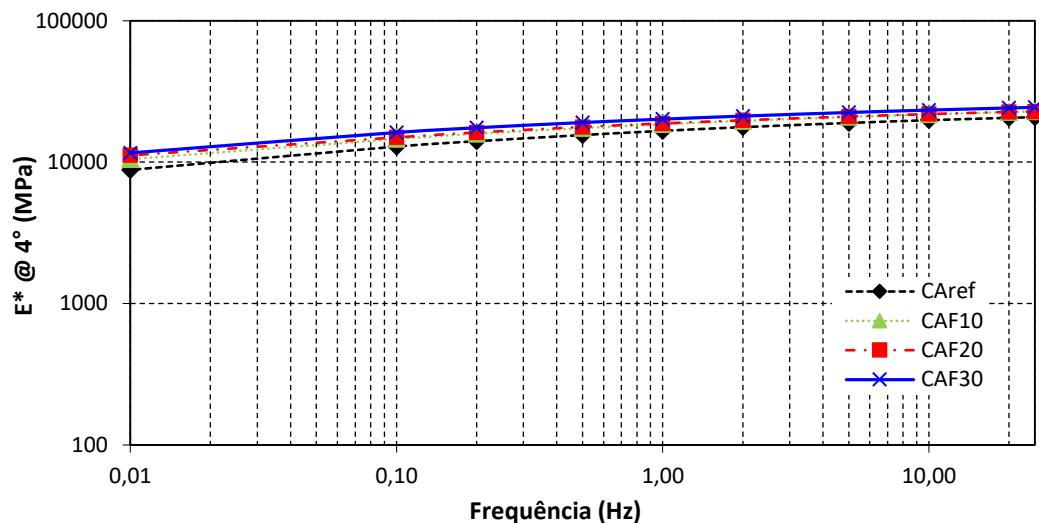


Figura 53 – Resultados de  $E^*$  a 21°C

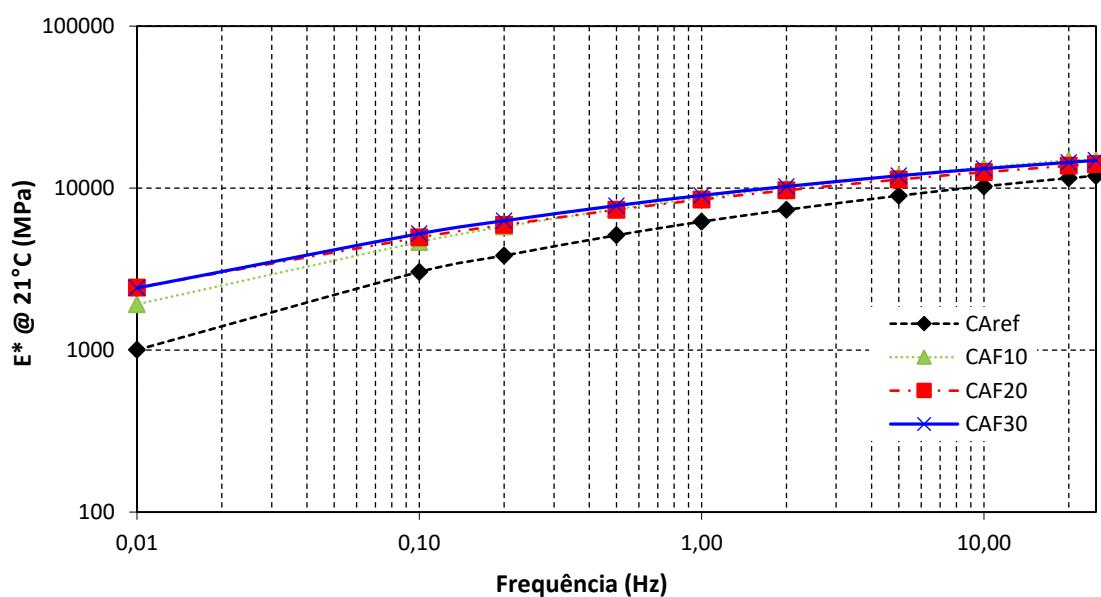


Figura 54 – Resultados de  $E^*$  a 37°C

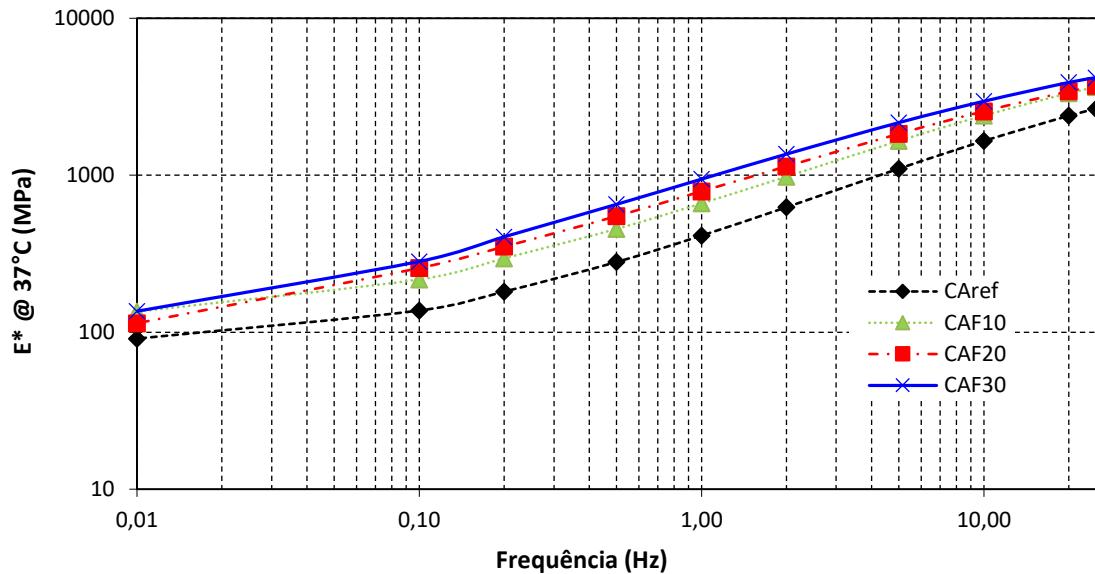
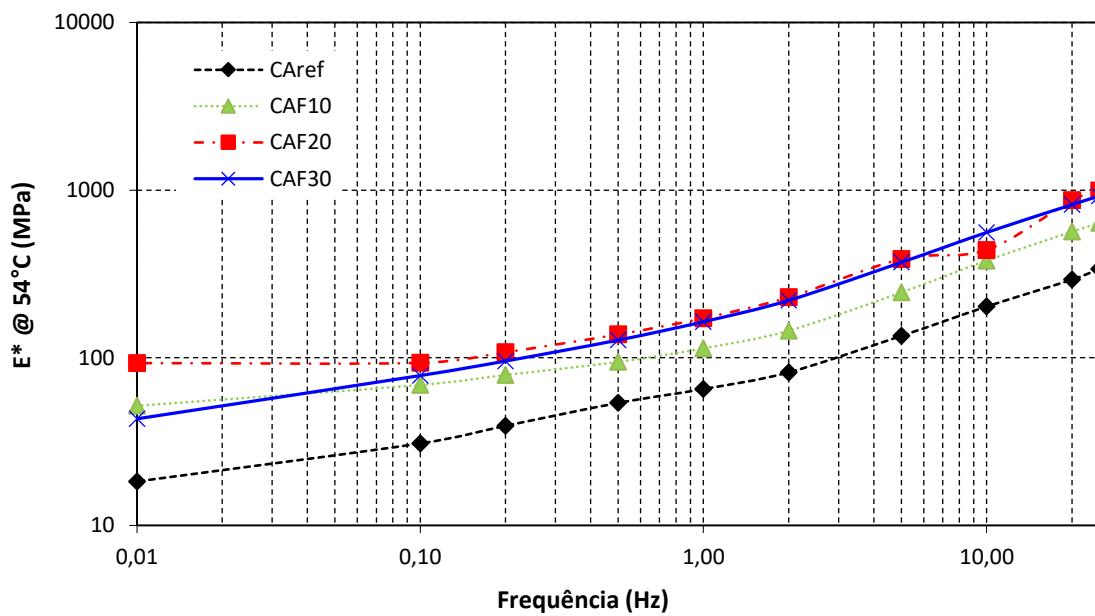


Figura 55 – Resultados de  $E^*$  a 54°C



Já, através das Figuras 56 à 60, é possível observar os resultados de cada ângulo de fase, obtidos em cada temperatura, pela frequência de ensaio, os quais são chamados de isotermas de ângulo de fase.

Em função destes resultados, é possível verificar que o ângulo de fase diminui, à temperatura constante, à medida em que se aumenta a frequência de carregamento. As misturas contendo fresado, ou seja, mais rígidas, apresentaram os menores valores, já que dissipam menos energia viscosa ao longo dos carregamentos.

Além disso, nota-se que os menores valores de ângulo de fase são encontrados a temperaturas mais baixas, à medida que a temperatura de ensaio é aumentada, o ângulo de fase também aumenta. Ainda, em altas temperaturas, o ângulo de fase apresenta valores aleatórios, com aumentos e decréscimos no decorrer da variação de frequência. Essa dificuldade na obtenção de valores constantes de ângulo de fase se deve ao fato da dificuldade em medir o ângulo em altas temperaturas, principalmente pela dificuldade de fixação dos LVDTs.

Figura 56 – Ângulo de fase das misturas a -10°C

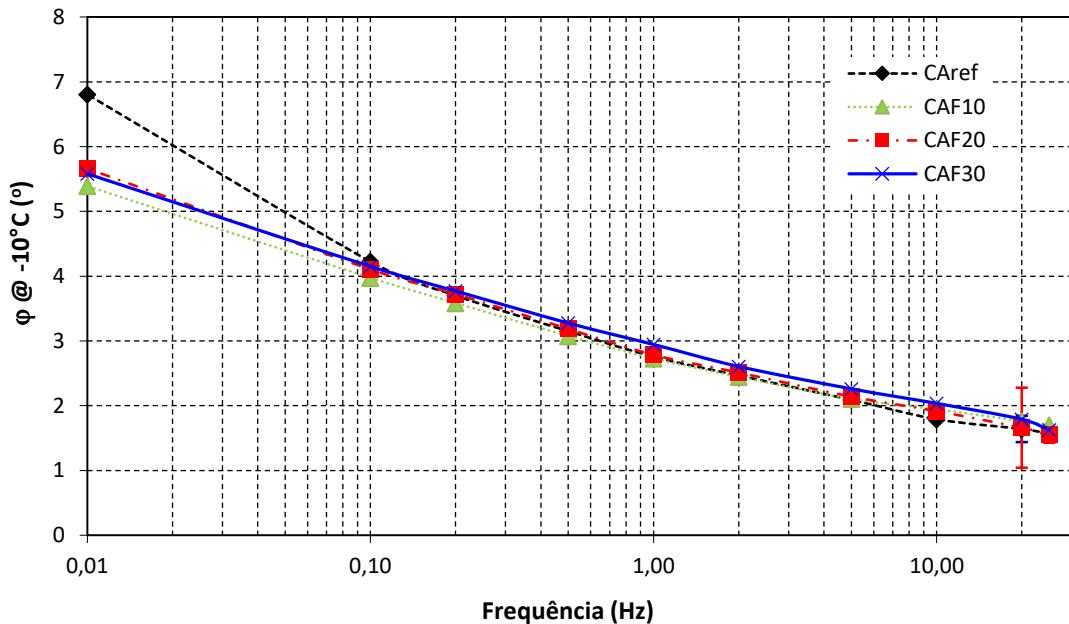


Figura 57 – Ângulo de fase das misturas a 4°C

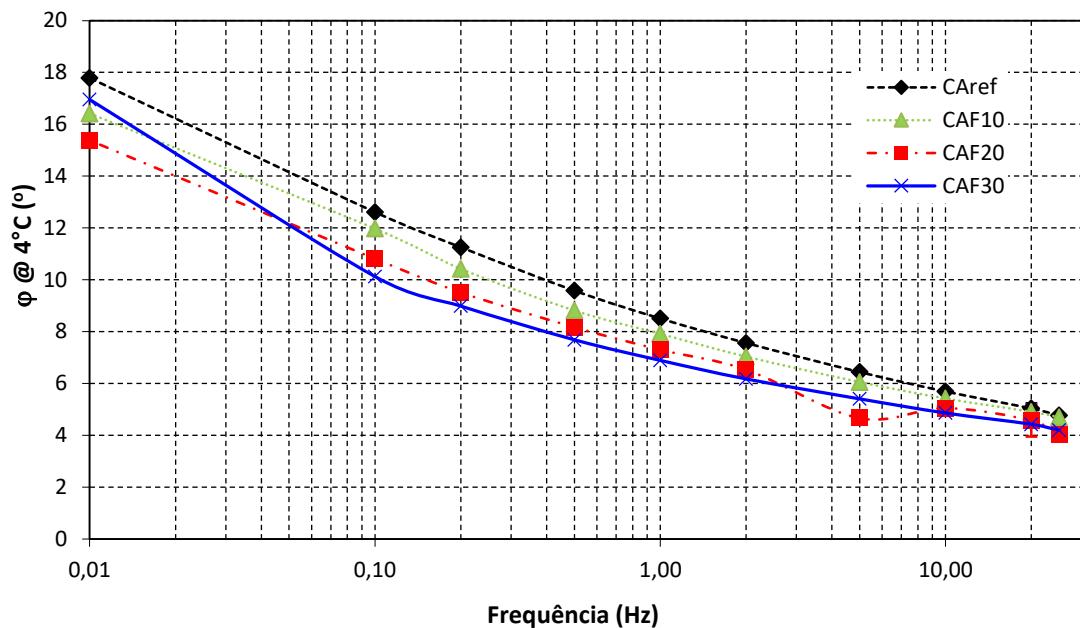


Figura 58 – Ângulo de fase das misturas a 21°C

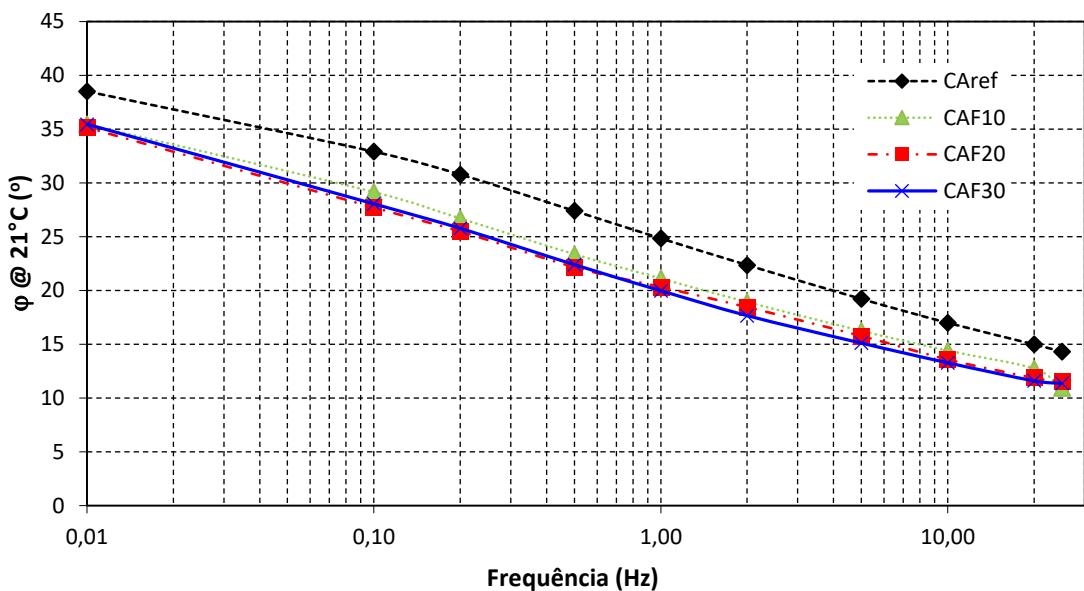


Figura 59 – Ângulo de fase das misturas a 37°C

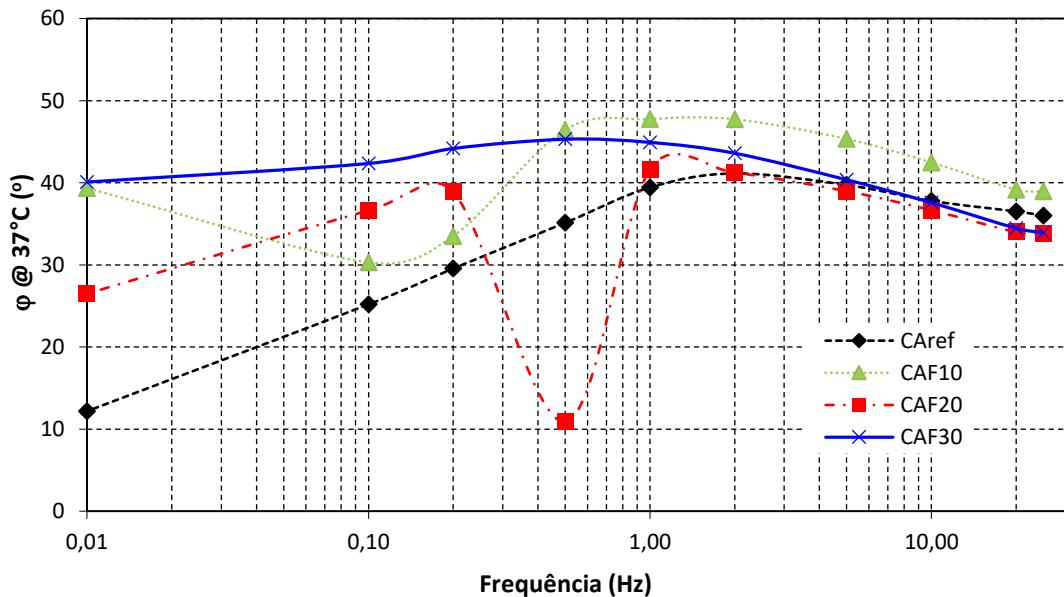
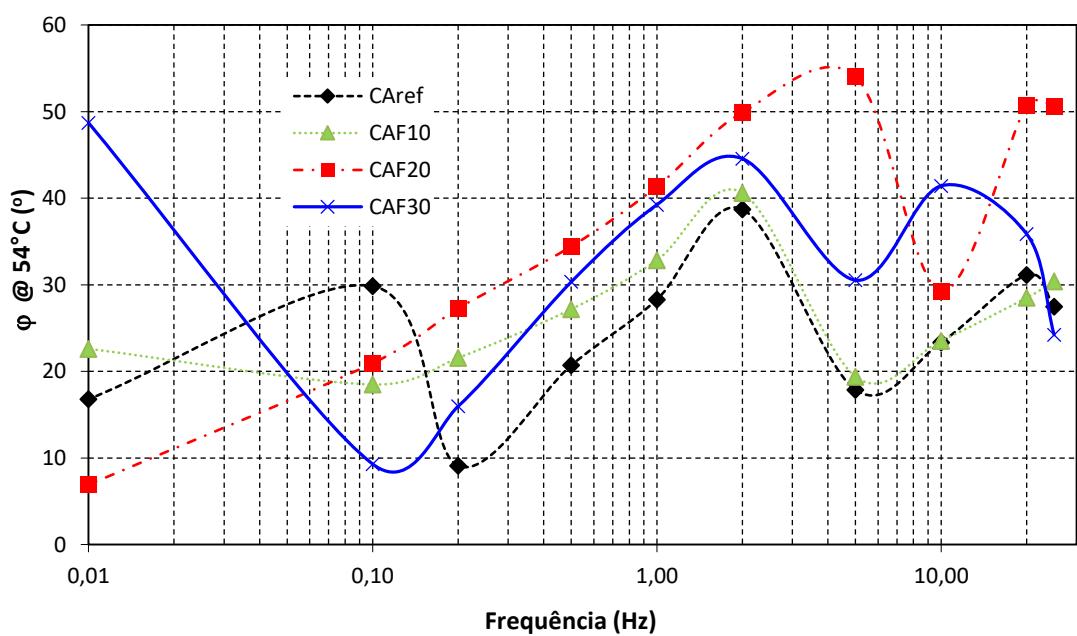


Figura 60 – Ângulo de fase das misturas a 54°C



A verificação da suscetibilidade cinética das misturas pode ser analisada a partir da inclinação das curvas, chamadas isócronas, as quais apresentam o módulo dinâmico em cada frequência pela respectiva temperatura de ensaio.

Neste sentido, quanto menor a frequência de carregamento, menor será o valor de módulo complexo. Assim, quanto maior a inclinação da curva, maior é a suscetibilidade cinética da mistura, ou seja, maior é o efeito do tempo de carregamento no comportamento reológico do material.

As Figuras 61 à 70 apresentam as isócronas de módulo dinâmico. Através dessas curvas é possível observar que o  $E^*$  diminui, independente da frequência, conforme aumenta a temperatura de ensaio.

Figura 61 – Resultados de módulo dinâmico a 0,01 Hz

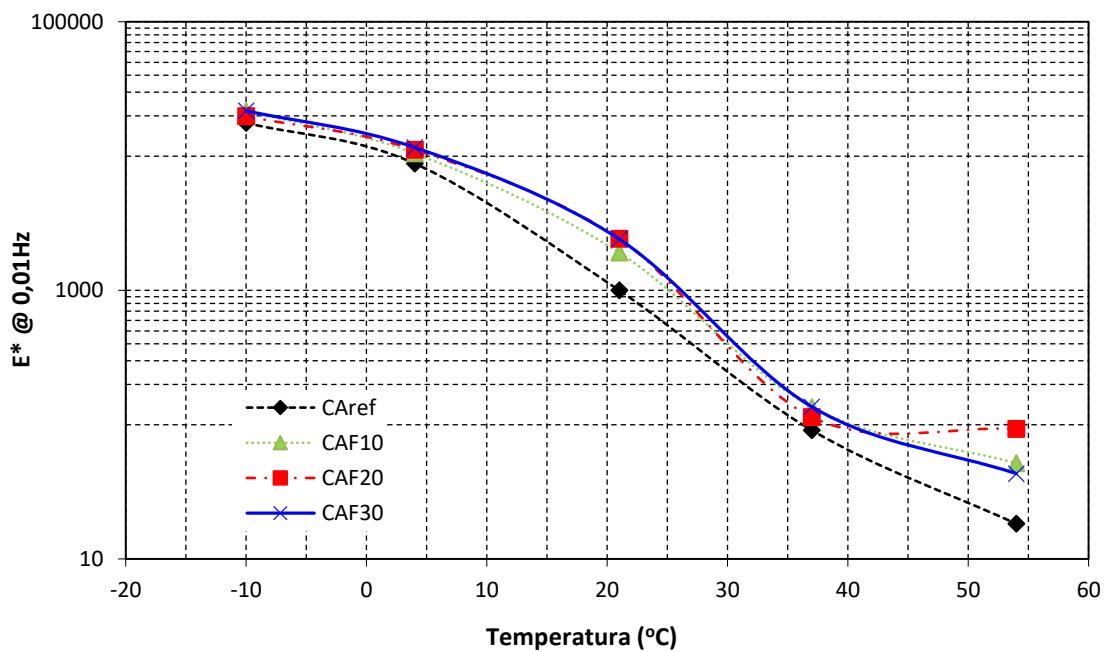


Figura 62 – Resultados de módulo dinâmico a 0,1 Hz

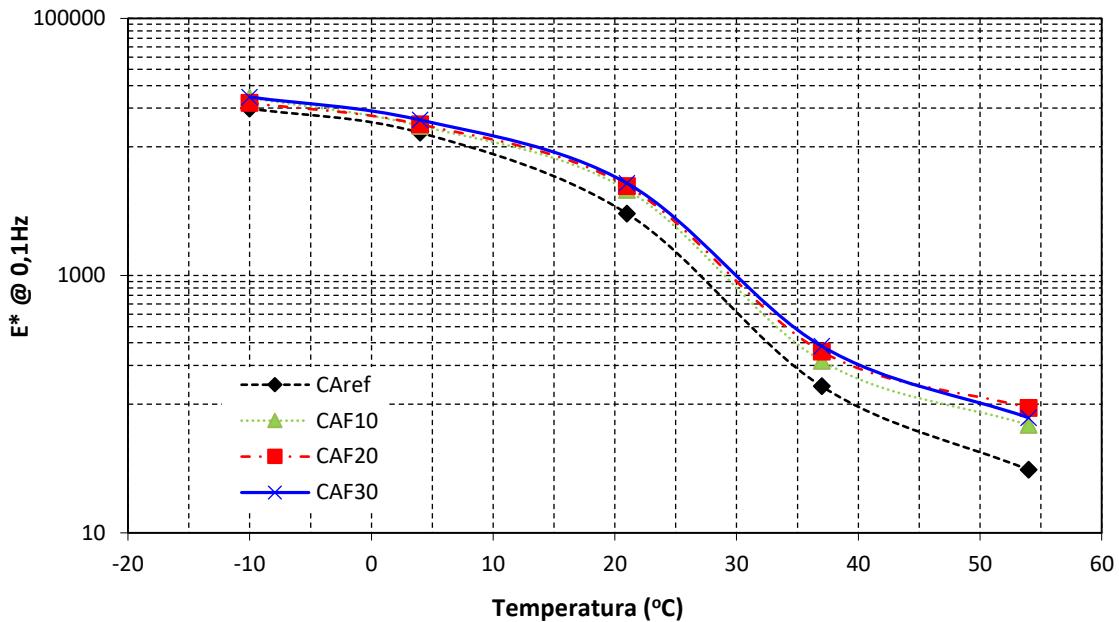


Figura 63 – Resultados de módulo dinâmico a 0,2 Hz

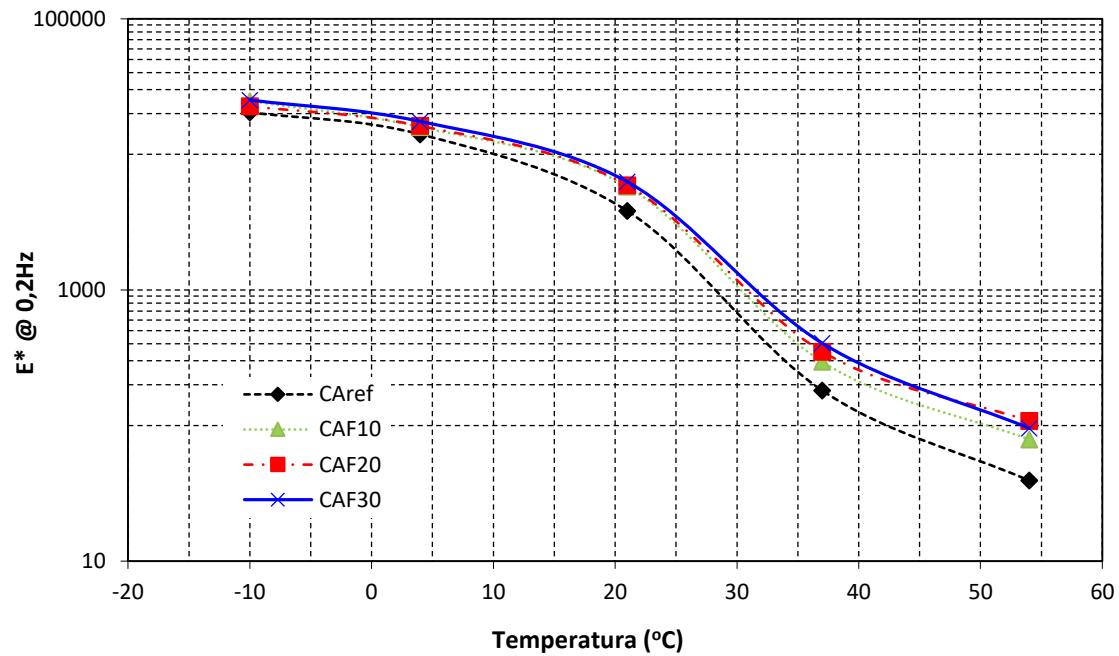


Figura 64 – Resultados de módulo dinâmico a 0,5 Hz

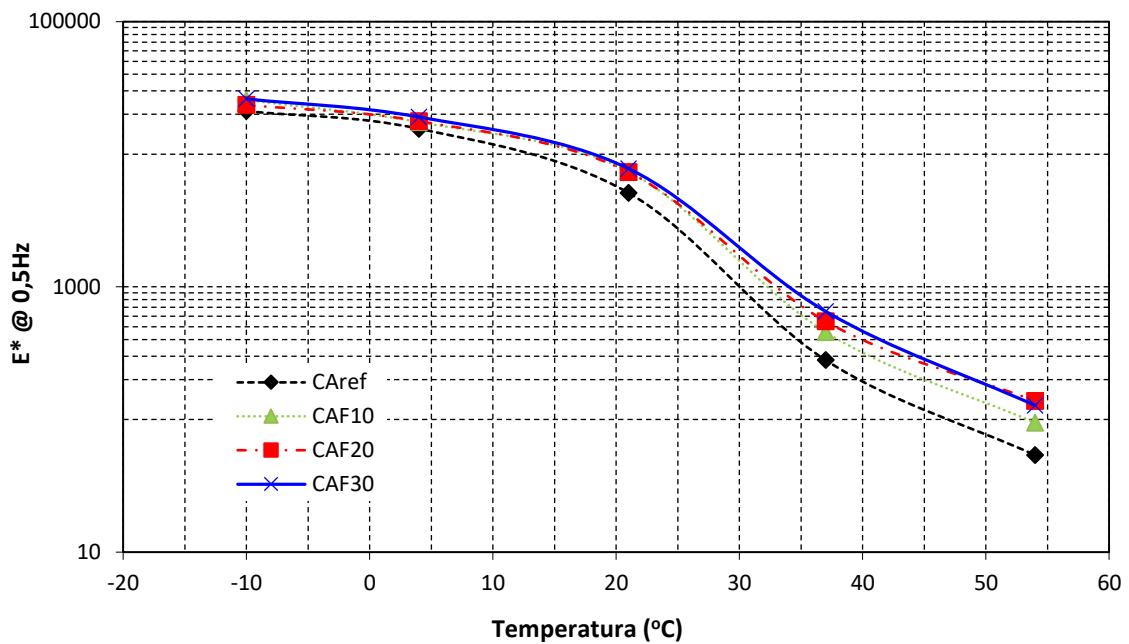


Figura 65 – Resultados de módulo dinâmico a 1,0 Hz

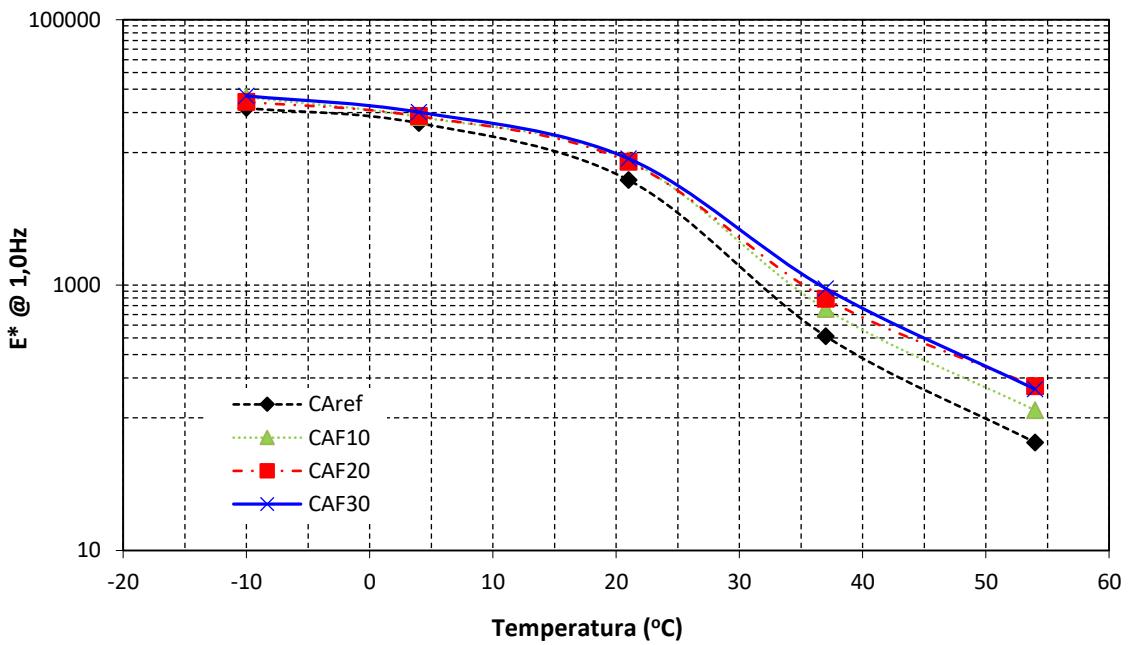


Figura 66 – Resultados de módulo dinâmico a 2,0 Hz

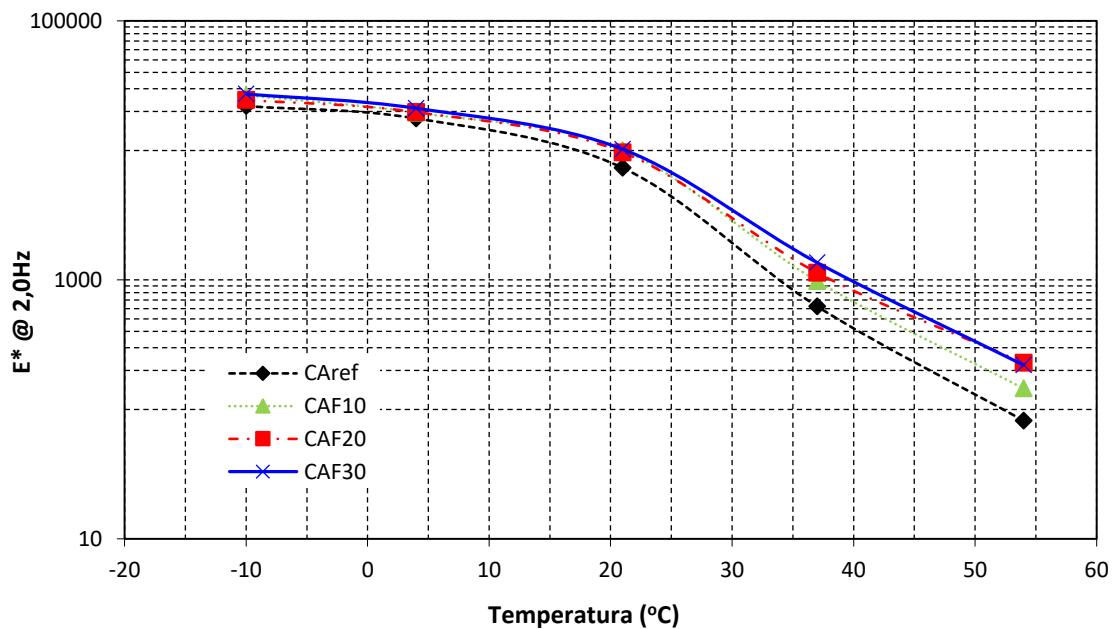


Figura 67 – Resultados de módulo dinâmico a 5,0 Hz

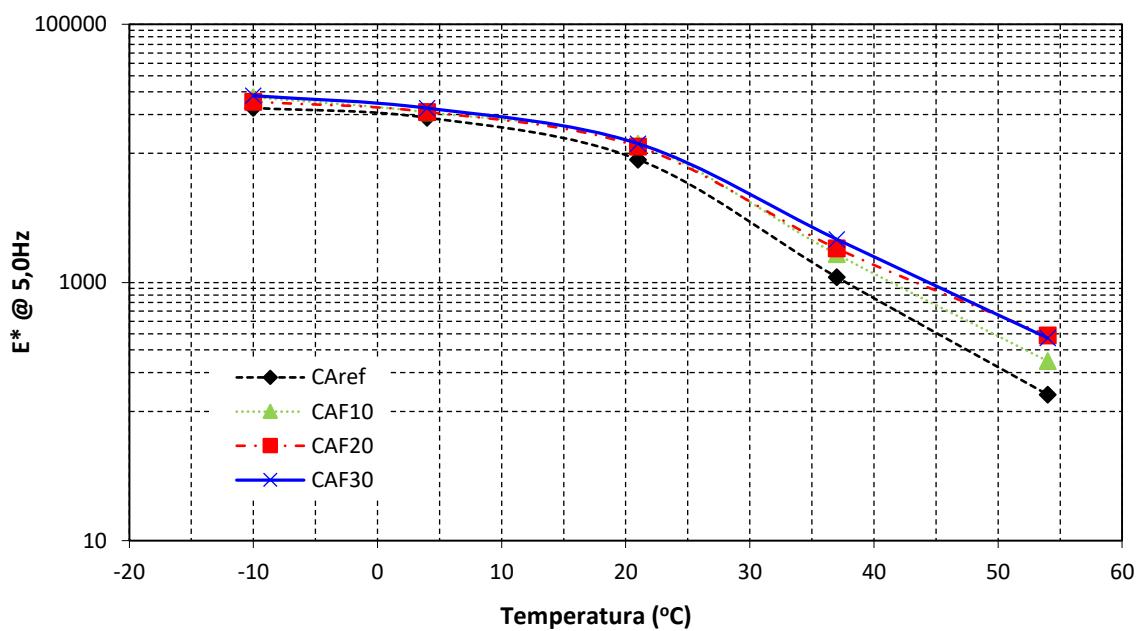


Figura 68 – Resultados de módulo dinâmico a 10,0 Hz

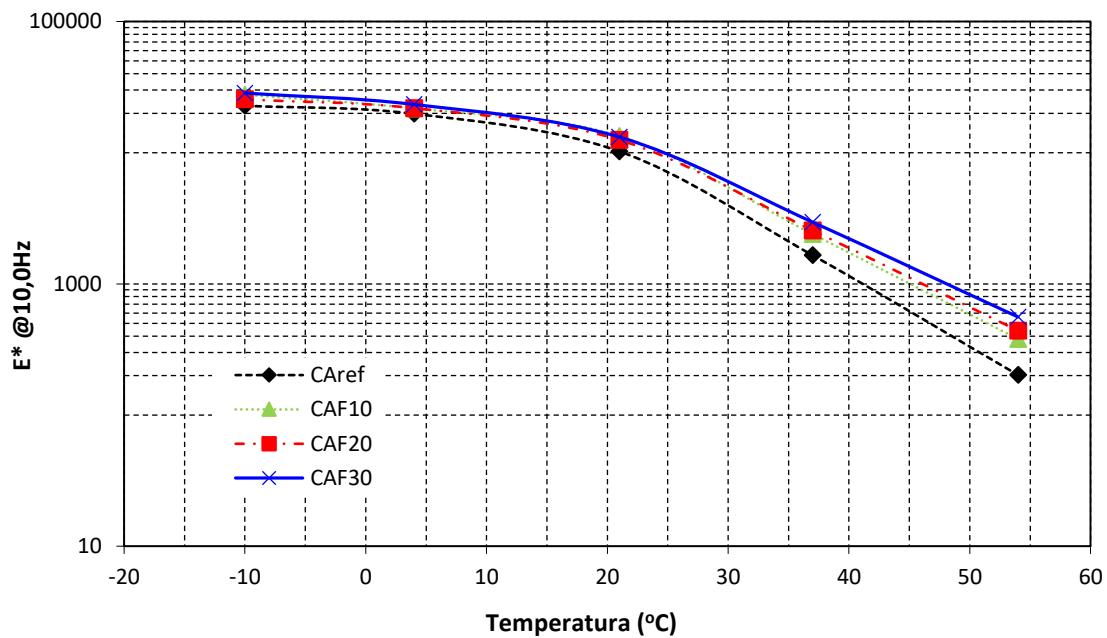


Figura 69 – Resultados de módulo dinâmico a 20,0 Hz

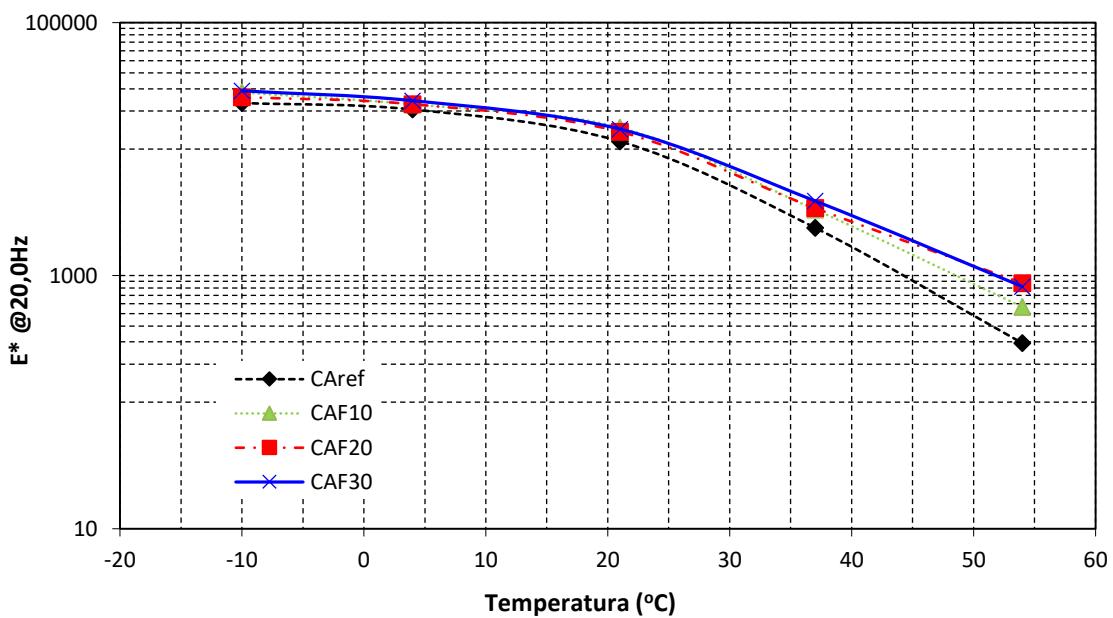
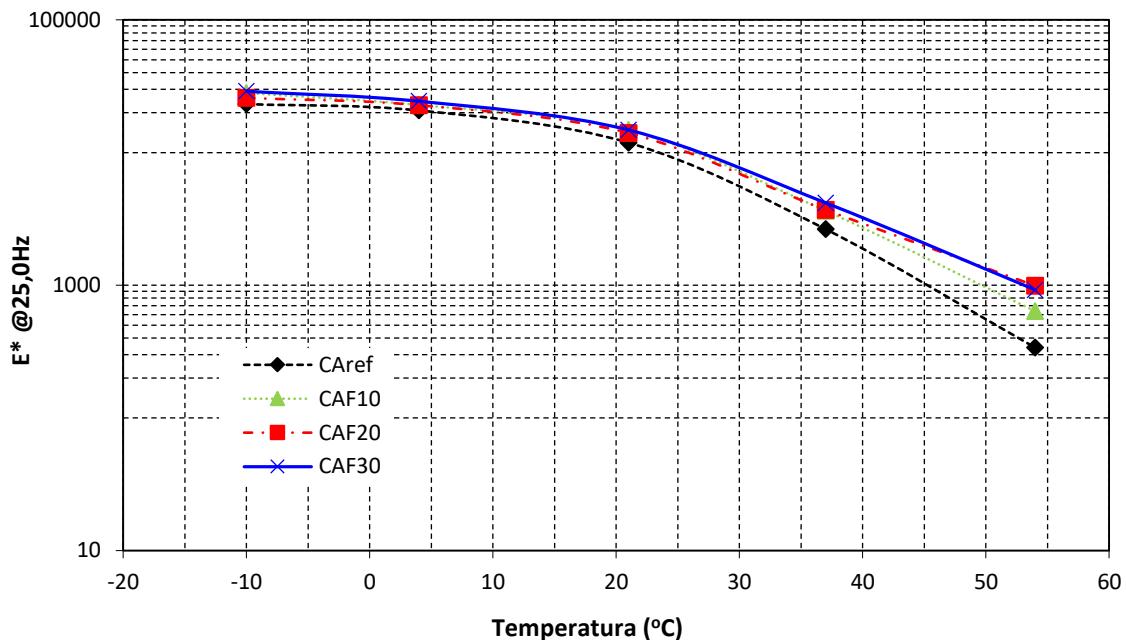


Figura 70 – Resultados de módulo dinâmico a 25,0 Hz



As Figuras 71 à 80 mostram as isócronas de ângulo de fase para as misturas estudadas. Através destas curvas é possível constatar que, em todas as misturas, quanto maior a temperatura, maior a sensibilidade cinética. Logo, a suscetibilidade cinética deve ser levada em conta, visto que é considerada uma importante propriedade da mistura asfáltica, pois ganhos neste aspecto retratam menor dano à deformação permanente das misturas sob volume de tráfego lento e pesado.

Além disso, ainda é possível observar que os menores valores de ângulo de fase são encontrados, para todas as misturas, nas frequências mais altas e temperaturas mais baixas.

Figura 71 – Ângulo de fase das misturas a 0,01 Hz

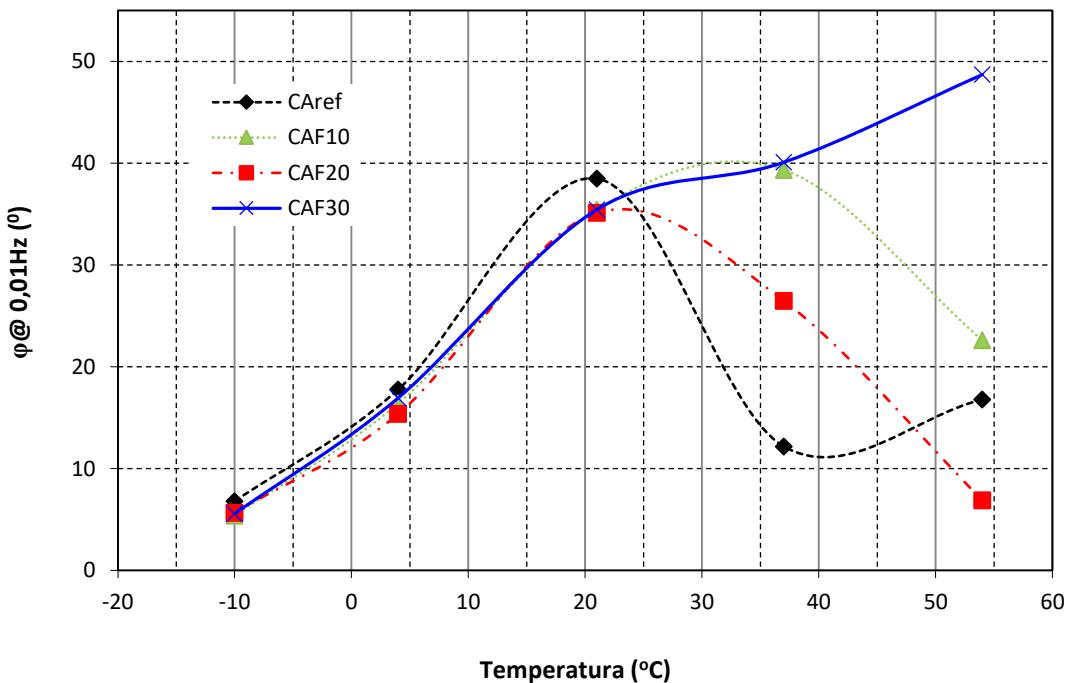


Figura 72 – Ângulo de fase das misturas a 0,1 Hz

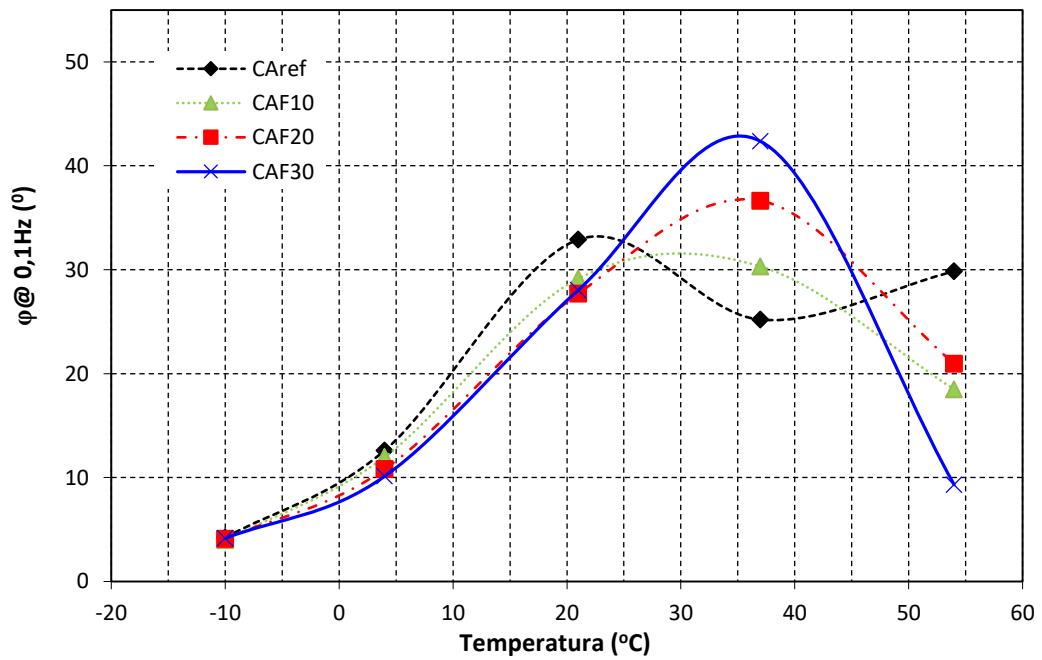


Figura 73 – Ângulo de fase das misturas a 0,2 Hz

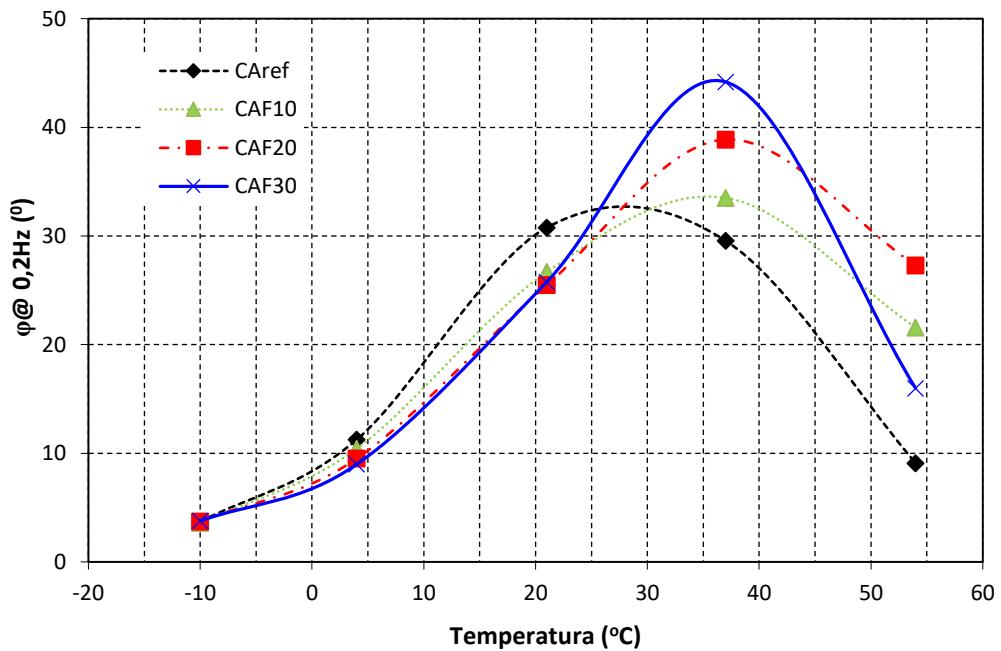


Figura 74 – Ângulo de fase das misturas a 0,5 Hz

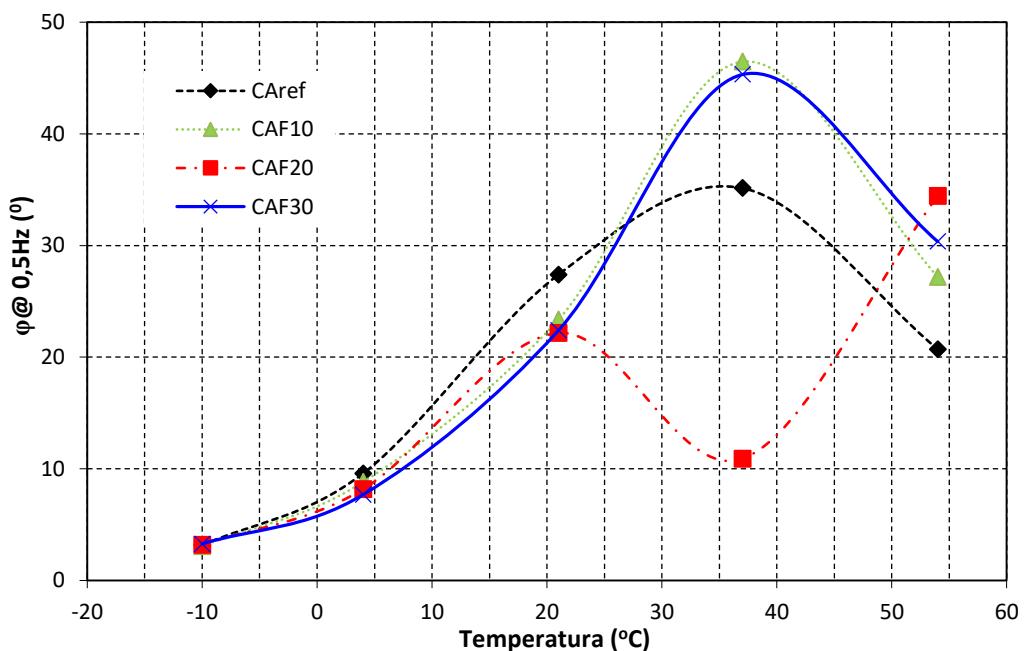


Figura 75 – Ângulo de fase das misturas a 1,0 Hz

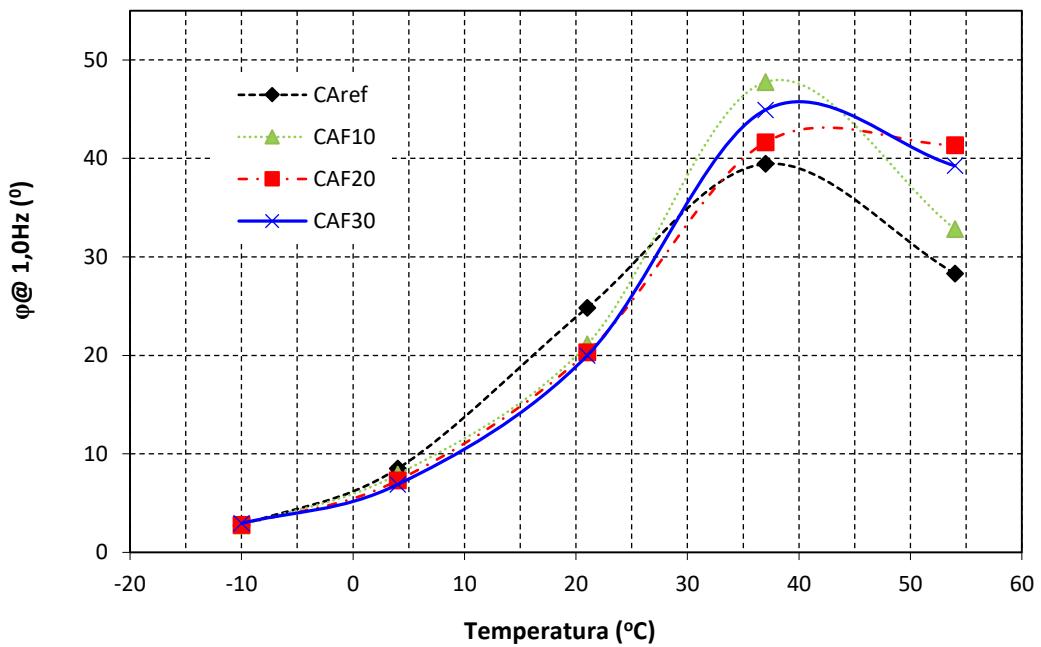


Figura 76 – Ângulo de fase das misturas a 2,0 Hz

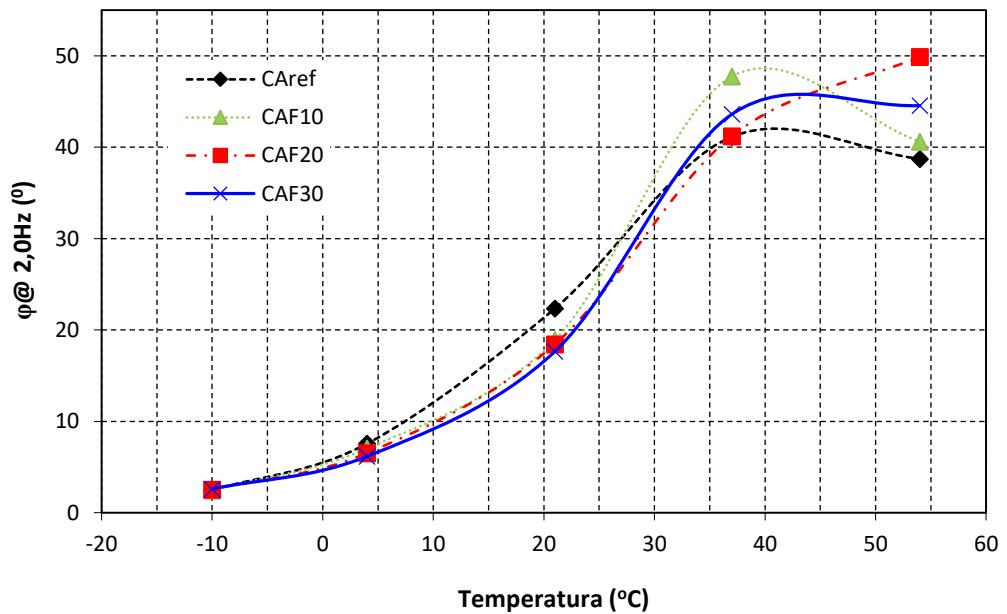


Figura 77 – Ângulo de fase das misturas a 5,0 Hz

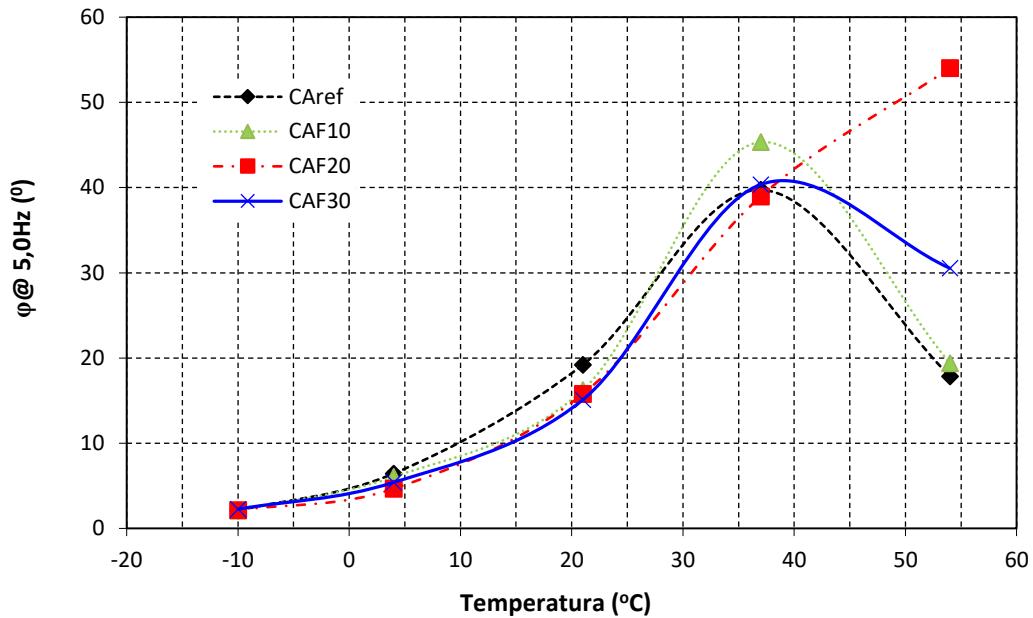


Figura 78 – Ângulo de fase das misturas a 10,0 Hz

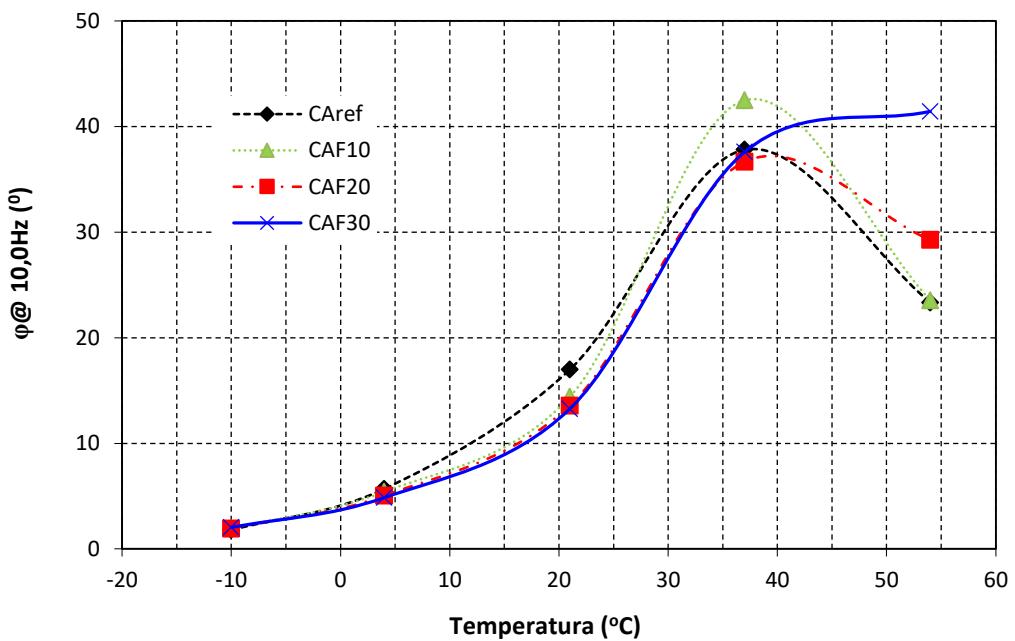


Figura 79 – Ângulo de fase das misturas a 20,0 Hz

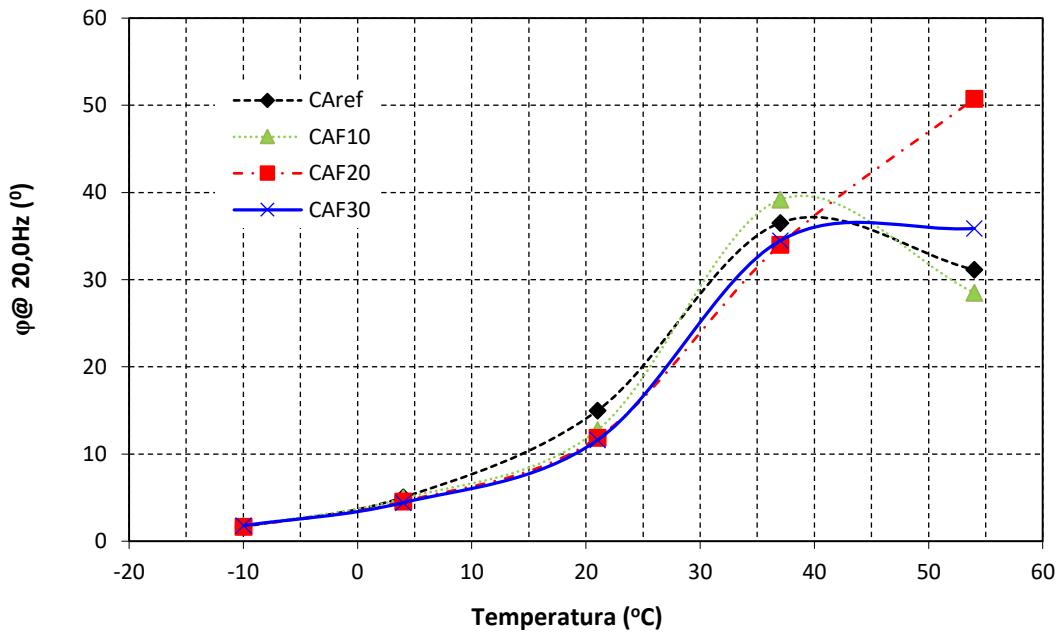
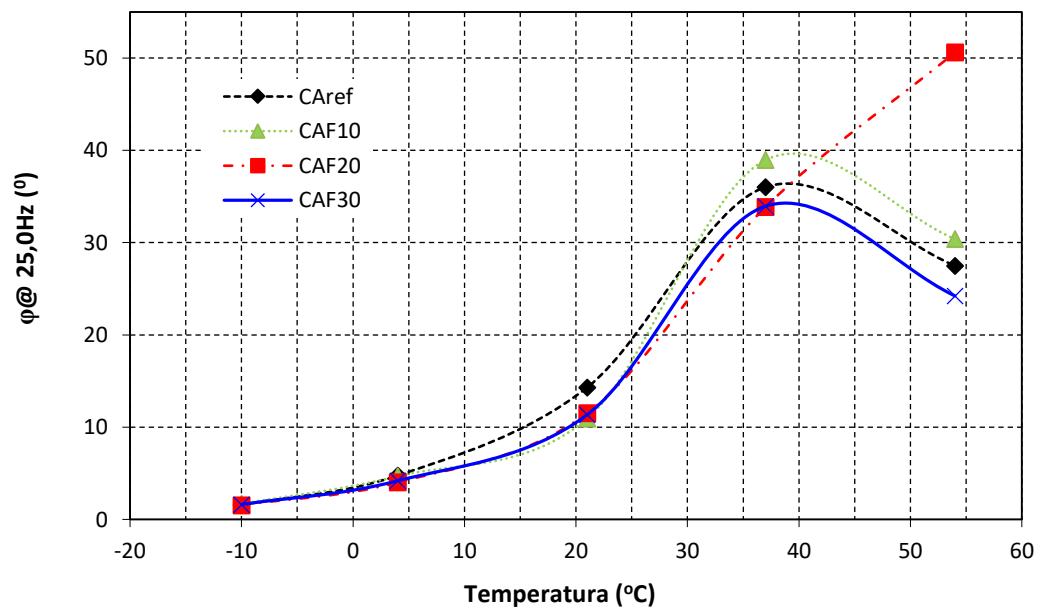


Figura 80 – Ângulo de fase das misturas a 25 Hz



As Figuras 81 e 82 apresentam a representação gráfica dos resultados no espaço Cole Cole, com todas as amostras realizadas, bem como para a média das amostras, respectivamente, tanto para os resultados experimentais, quanto para os resultados obtidos através da modelagem 2S2P1D. Na Cole Cole é representada, em escala aritmética, a parte real E1 e a parte imaginária ou de perda E2.

Através das figuras, fica claro que os dados formam curvas de formato semicírculo, o qual era esperado para a Cole Cole e, ainda, que a mistura de referência apresenta os menores valores de E2, no geral, quando comparadas às misturas com adição de fresado, o que indica que as misturas com fresado apresentam mobilização do esqueleto mineral, bem como maior dissipação de energia. Além disso, é possível observar que os maiores valores de perda são encontrados em altas temperaturas.

Figura 81 – Espaço Cole Cole para todas as misturas com todas as amostras realizadas

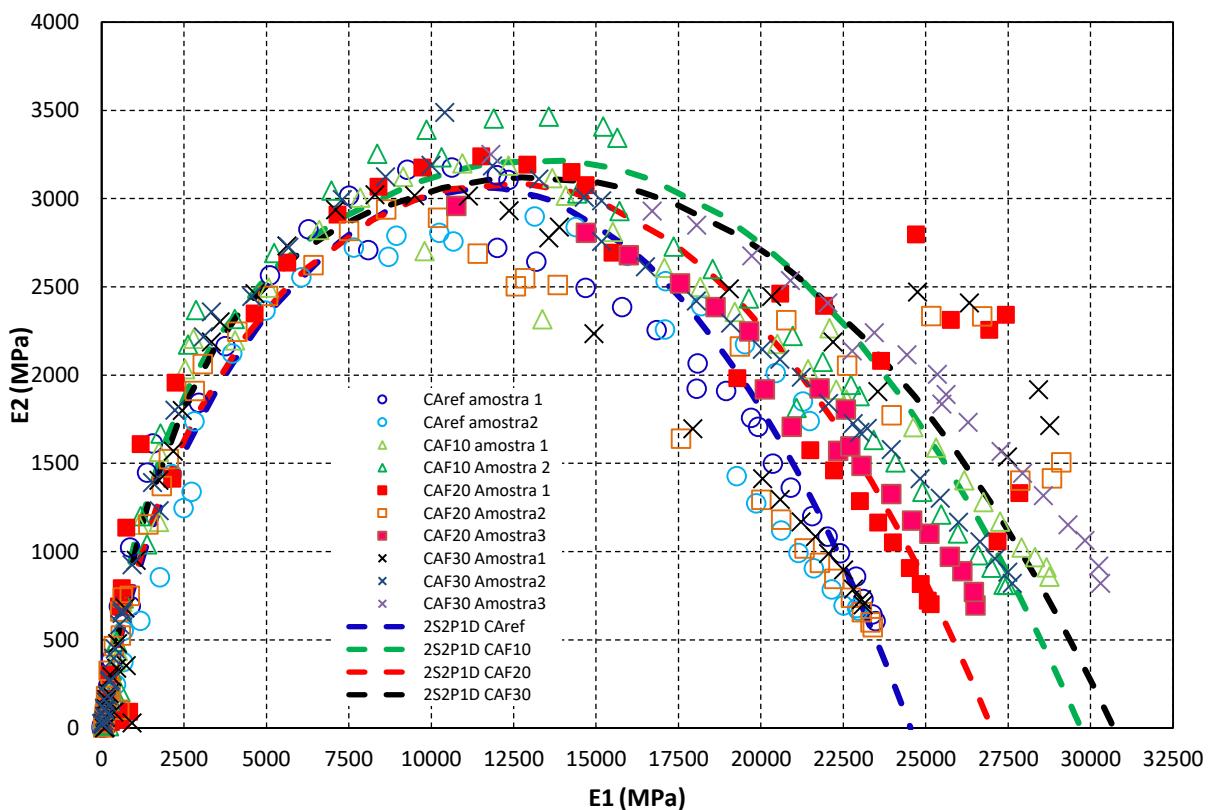
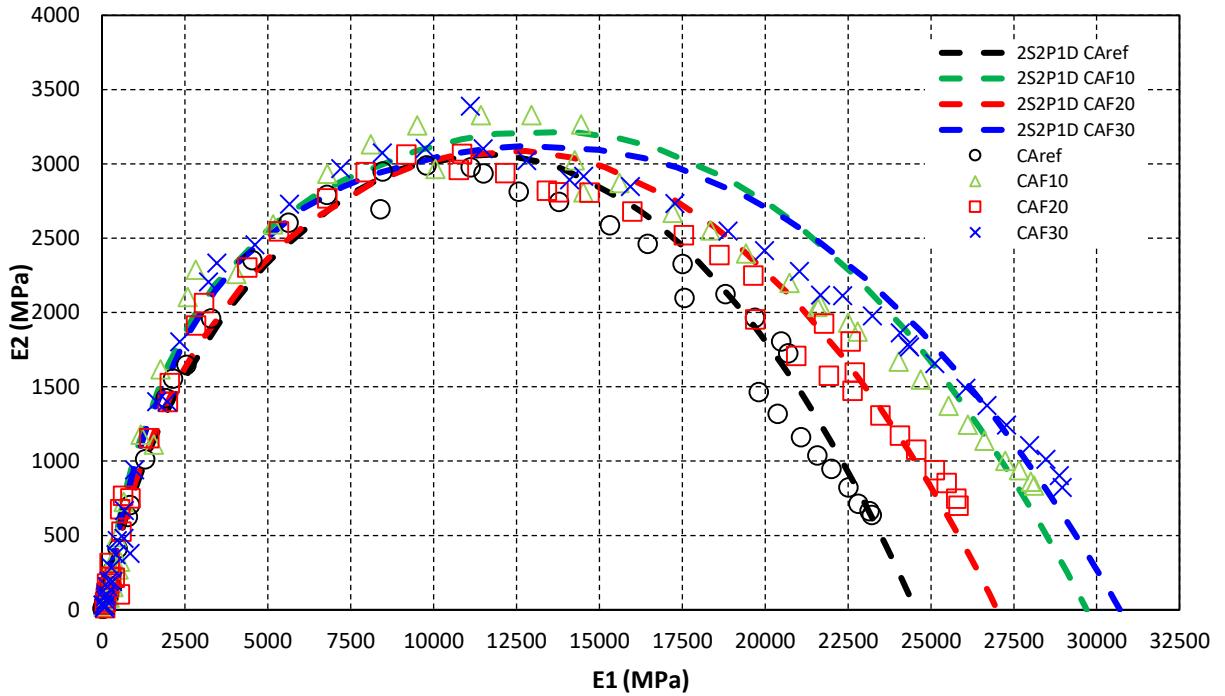


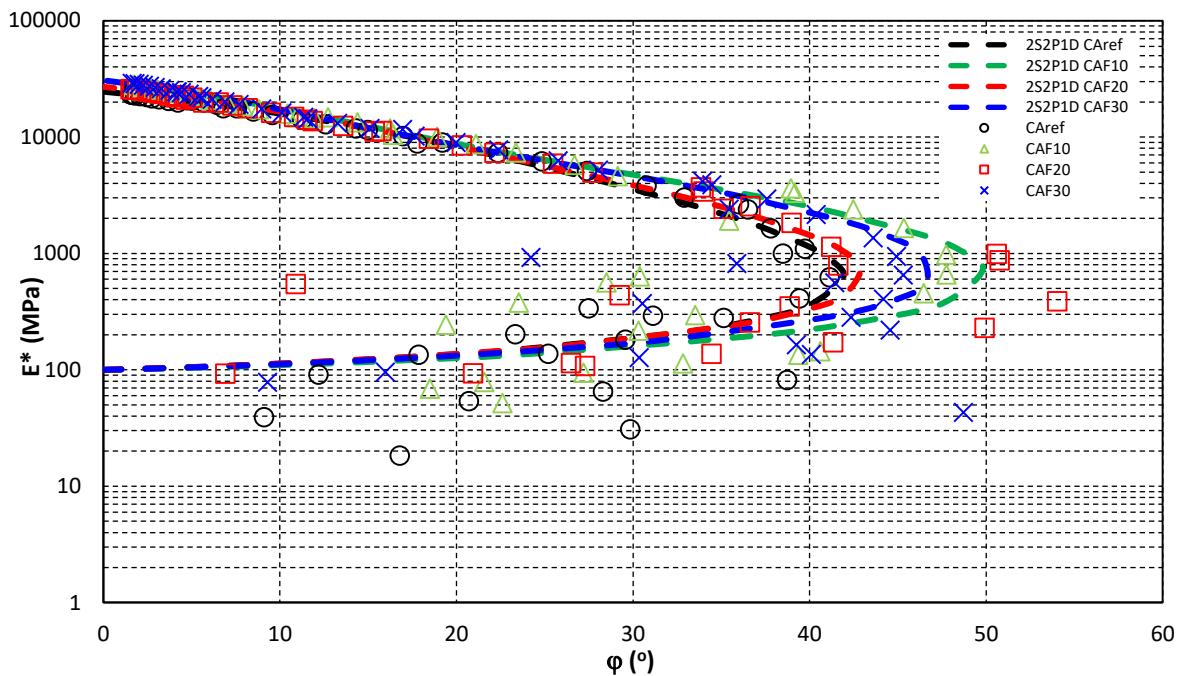
Figura 82 – Espaço Cole Cole para todas as misturas com a média das amostras



A Figura 83 apresenta, para todas as misturas, a representação gráfica dos resultados no Diagrama Black, tanto para os resultados experimentais, quanto para os resultados obtidos através da modelagem 2S2P1D. Através desses dados é possível verificar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase para diferentes temperaturas. Além disso, nota-se que a região dos módulos onde ocorre o acréscimo do ângulo de fase é identificada para condições de temperatura elevada (a partir de 37°C até 54°C) e, ainda, observa-se que a mistura CAF10, na modelagem, apresenta os maiores valores de ângulo de fase, onde, através dos dados experimentais, verifica-se que isso ocorre com a mistura CAF20, ou seja, essas misturas apresentam uma parcela viscosa mais importante, com relação à parcela elástica. A partir disso, é possível inferir que estas duas misturas apresentariam, em campo, mais deformações plásticas quando comparadas às demais misturas.

Ainda através do espaço Black, é possível verificar que, para a temperatura mais elevada de 54°C, os resultados ficaram fora do padrão com relação às outras temperaturas, possivelmente devido aos ângulos de fase. Isto pode ser um indicativo de que a instrumentação utilizada nos ensaios pode não ter sido capaz de medir corretamente os resultados ou, ainda, que a amostra pode ter apresentado deformação plástica, o que deve ser melhor investigado.

Figura 83 – Diagrama de Black para todas as misturas



Assim, tendo em vista o comportamento termoreológico das misturas, a partir dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase, foram construídas curvas mestras, através do princípio da superposição tempo-temperatura (TTSP – *time-temperature superposition principle*). Estas curvas foram ajustadas ao modelo sigmoidal, onde os fatores de deslocamentos em função da temperatura foram ajustados a um polinômio de segunda ordem.

Utilizando o modelo reológico 2S2P1D para a construção da curva mestra das misturas, os resultados experimentais e os parâmetros do modelo foram ajustados com as constantes C1 e C2 do WLF (William, Landel e Ferry), de acordo com a Tabela 28.

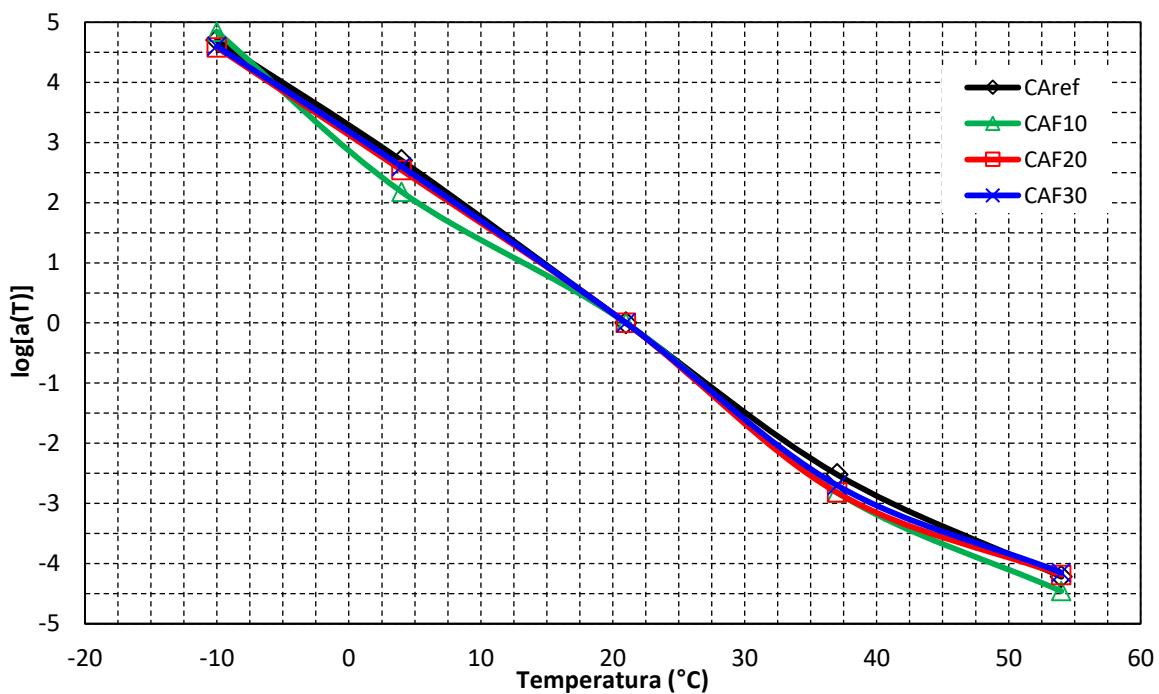
Tabela 28 – Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 para todas as misturas

Mistura	E*							WLF	
	$E_{00}$ (MPa)	$E_0$ (MPa)	$\delta$	$k$	$\beta$	$h$	$\tau_E$ (s)	C1	C2
CAref	100	24540	3,90	0,297	900	0,695	0,4	52,48	377,24
CAF10	100	29700	3,50	0,260	900	0,760	0,5	63,51	437,38
CAF20	100	27000	3,45	0,270	900	0,680	0,4	57,52	420,35
CAF30	100	30700	3,20	0,240	900	0,705	0,6	53,03	388,21

Para Yusoff et al. (2011) as propriedades reológicas das misturas asfálticas são, normalmente, apresentadas em termos de módulo complexo e curvas mestras em conjunto com ângulos de fase e determinação de fatores de desvio ou deslocamento (*shift factors*) associados com a mudança de temperatura dos parâmetros reológicos. A dependência da temperatura no comportamento viscoelástico das misturas é indicada pelo fator de deslocamento e expressa por  $a(T)$  em escala logarítmica. Ainda, segundo os autores, a dependência da temperatura não deve ser confundida com suscetibilidade à temperatura. Dependência de temperatura pode ser definida como um conceito fundamental que indica a forma como o processo de relaxamento dentro das misturas muda com a temperatura. Já a suscetibilidade à temperatura é um conceito empírico com base na mudança da consistência ou dureza das misturas com a temperatura.

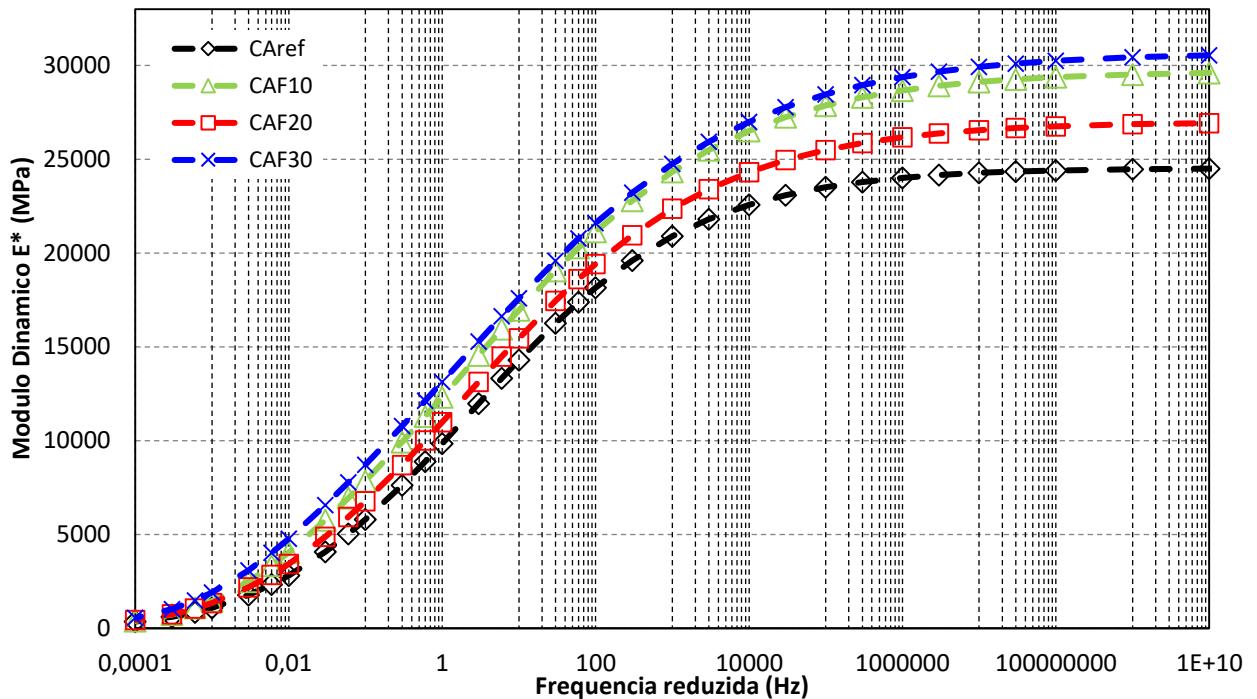
A Figura 84 apresenta um comparativo das curvas  $\log a(T)$  onde é possível observar que, quanto mais próximos de zero forem os valores, menor é a suscetibilidade à temperatura das misturas, isto é, maior é sua tendência à estabilidade. Através do gráfico fica claro que a suscetibilidade é pior nas altas temperaturas do que nas baixas.

Figura 84 – Comparação curva log a(T) para todas as misturas (@ 21°C)



Para Yusoff et al. (2011), as curvas mestras têm sido utilizadas por diversos pesquisadores para descrever e representar as características viscoelásticas de ligantes e misturas asfálticas em uma ampla faixa de temperatura e frequência. De acordo com os autores, a construção de curvas mestras pode ser feita usando uma temperatura de referência arbitrariamente selecionada para todos os dados reológicos analisados. A temperatura de referência é o valor igual a um, ou seja,  $\log a(T)$  é igual a zero. Em geral, pode ser usado esse tipo de modelagem para a equivalência de tempo-temperatura em relação a ligantes e misturas asfálticas. Para o caso desta pesquisa, a temperatura foi fixada em 20°C. Logo, uma das grandes vantagens da curva mestra é que esta possibilita a previsão dos valores de uma determinada propriedade reológica ao longo de uma gama de frequências mais ampla do que a utilizada inicialmente, bem como nas mais variadas temperaturas. A Figura 85 traz a comparação de todas as curvas mestras das misturas estudadas.

Figura 85 – Comparação curva mestra para todas as misturas



Através dos dados apresentados, é possível verificar que o módulo dinâmico cresce em função da frequência. Este crescimento se deve ao fato de que, quando a frequência é aumentada, existe um menor tempo em carga, ou seja, não há tempo para manifestações de deformações viscoelásticas. Além disso, quando a frequência é muito alta, os valores de módulo atingem seu maior pico, ou seja, praticamente, só existem deformações elásticas no material. Ainda, em baixas frequências, o tempo de carregamento é maior, assim, as deformações viscoelásticas podem se manifestar em sua totalidade, o que provoca um módulo dinâmico menor. O menor valor verificado para o módulo dinâmico é encontrado nas frequências mais baixas, o que explica o formato da curva mestra.

Analizando os dados da curva apresentada, é possível verificar que houve uma inversão nas curvas da mistura CAF10 com a mistura CAF20, levando em conta que o esperado para estas era que a CAF10 estivesse entre a CAreft e a CAF20. Assim, de acordo com a curva, observa-se uma certa tendência de que a mistura com 10% de fresado tenha adquirido maior rigidez do que a mistura com 20% de fresado em sua composição. Tal fator pode ser explicado devido à heterogeneidade do material

reciclado ou, ainda, pelas características do ligante envelhecido presente neste material, onde o ligante asfáltico exerce forte efeito na rigidez das misturas. Além disso, outro fator que poderia explicar essa inversão nos dados seria quanto à disposição dos materiais nas amostras, visto que as amostras foram moldadas em laboratório, com auxílio de misturador e compactador giratório.

Para corroborar a pesquisa, foram remoldadas 3 amostras da mistura CAF10, nos mesmos moldes utilizados para as anteriores, visando a certificação de que não ocorreram erros de moldagem nas amostras, nem na realização do ensaio. Logo, através das novas amostras e nova realização do ensaio de  $E^*$ , foi possível comprovar que a mistura CAF10 realmente se apresenta mais rígida frente às misturas CAref e CAF20.

Basueny et al. (2015) encontraram resultados inesperados semelhantes a estes, onde tal experimento indicou que a adição de RAP em misturas asfálticas resulta em maior rigidez da mistura contendo 25% de adição de material reciclado, sendo que foi considerada mais rígida do que a mistura contendo 40% de RAP. Estes autores também analisaram os dados de módulo complexo pelo modelo 2S2P1D, tal como realizado nesta pesquisa, no qual as misturas foram classificadas pela rigidez iniciando pela mistura de referência, seguida por 40% de RAP e 15% de RAP, sendo a mistura com 25% de RAP considerada a mistura mais rígida. Segundo a revisão de literatura realizada pelos autores, geralmente, a adição de RAP aumenta a rigidez de uma mistura, onde o comportamento das misturas asfálticas é determinado, principalmente, pelo ligante asfáltico. Logo, um asfalto mais duro resulta em uma mistura com módulo de elasticidade mais elevado. O autor ainda afirma que outros investigadores encontraram conclusões semelhantes, relacionados com a dispersão dos dados para as misturas contendo RAP. A hipótese de Basueny et al. (2015) é de que a adição de material envelhecido e frágil, oriundo do RAP, resultou em uma formação de microfissuras, as quais explicam as propriedades de misturas asfálticas em temperaturas baixas.

A Figura 86 mostra um comparativo da representação gráfica dos resultados no espaço Cole Cole, com todas as médias das amostras, tanto para resultados experimentais como para os resultados obtidos na modelagem 2S2P1D e, ainda, uma ligeira comparação com os dados obtidos na modelagem de Basueny et al. (2015). Através das curvas apresentadas, é possível verificar que a Mistura 25 dos autores, apresenta uma rigidez muito maior do que as outras misturas, tanto as destas

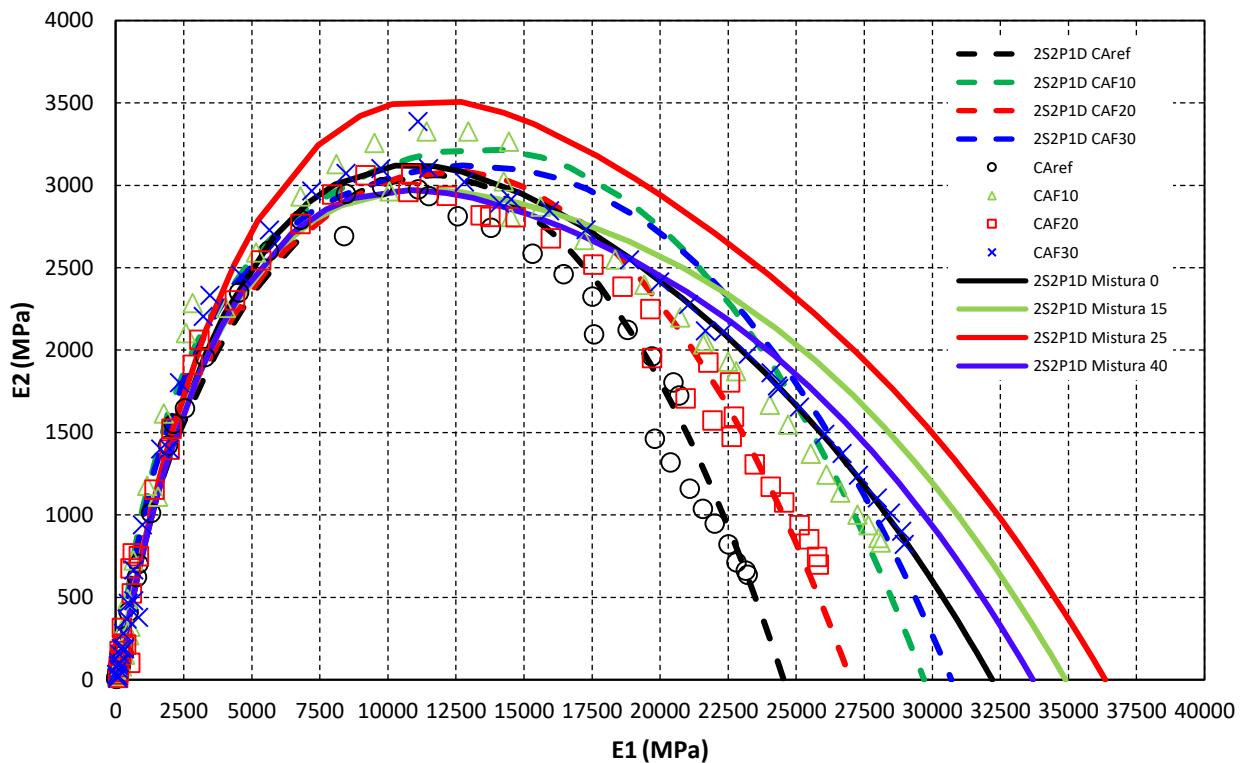
pesquisa, como as misturas da própria pesquisa dos autores. Ainda, através do gráfico, nota-se que as misturas utilizadas pelos autores apresentam rigidez consideravelmente maiores do que as encontradas nesta pesquisa. Outro fator que é importante relatar é que a Mistura 25 dos autores, apresenta um comportamento visivelmente diferente das outras misturas, o que se assemelha a mistura CAF10, a qual também apresenta um pico mais elevado de  $E^*$ , tal qual a Mistura 25. Assim, esses dados reforçam a comprovação de que é possível que haja uma mistura com menor teor de fresado adicionado e que, ainda assim, apresente maior rigidez que uma mistura com maior teor deste material em sua composição. As curvas de Basuheny et al. (2015) foram montadas de acordo com os dados apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 para as misturas de Basuheny et al. (2015)

Mistura	$E^*$							WLF	
	$E_{00}$ (MPa)	$E_0$ (MPa)	$\delta$	$k$	$\beta$	$h$	$\tau_E$ (s)	C1	C2
Mistura 0	100	32200	1,82	0,182	500	0,530	0,135	20,96	148,09
Mistura 15	60	34900	2,30	0,177	500	0,544	0,180	27,38	178,00
Mistura 25	127	36350	1,81	0,177	500	0,544	0,210	26,13	179,53
Mistura 40	110	33700	2,15	0,177	500	0,544	0,220	22,26	150,16

Fonte: Adaptado de Basuheny et al. (2015).

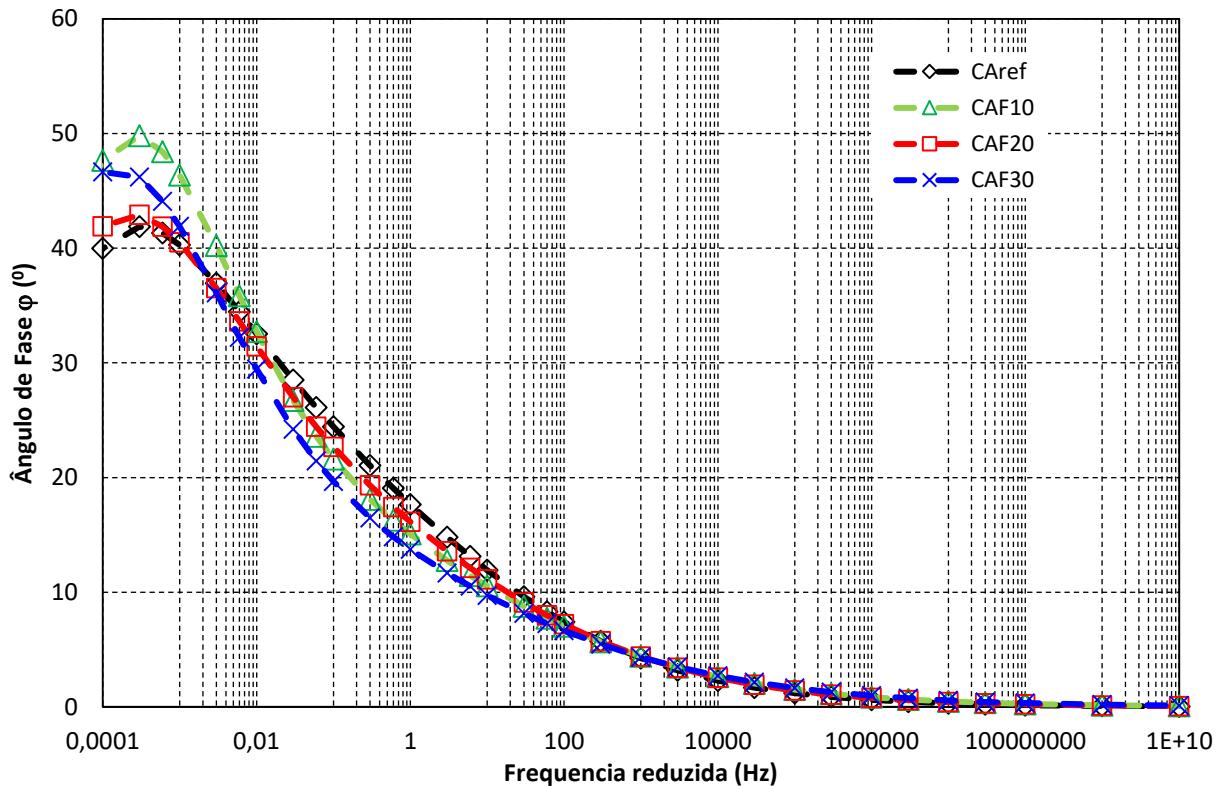
Figura 86 – Comparação espaço Cole Cole desta pesquisa com dados de Basueny et al. (2015)



Ainda, através dos dados apresentados, é possível observar que o aumento de material fresado na composição das misturas, resultou em aumento na rigidez, quando comparados à mistura convencional. A mistura menos rígida, CAreft, tem módulo dinâmico de, aproximadamente, 14.287 MPa a 10 Hz e 20°C, enquanto que a mistura mais rígida, CAF30, tem módulo de, aproximadamente, 17.600 MPa, na mesma condição.

Por fim, a Figura 87 apresenta a curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas. Através desses dados, é possível verificar que a mistura CAF10 apresenta os maiores ângulos de fase à frequência mais baixa de 0,0001 Hz, havendo inversão de comportamento, migrando para um comportamento mais esperado, à medida em que aumentam as frequências, a partir de 0,01 Hz.

Figura 87 – Comparação curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas

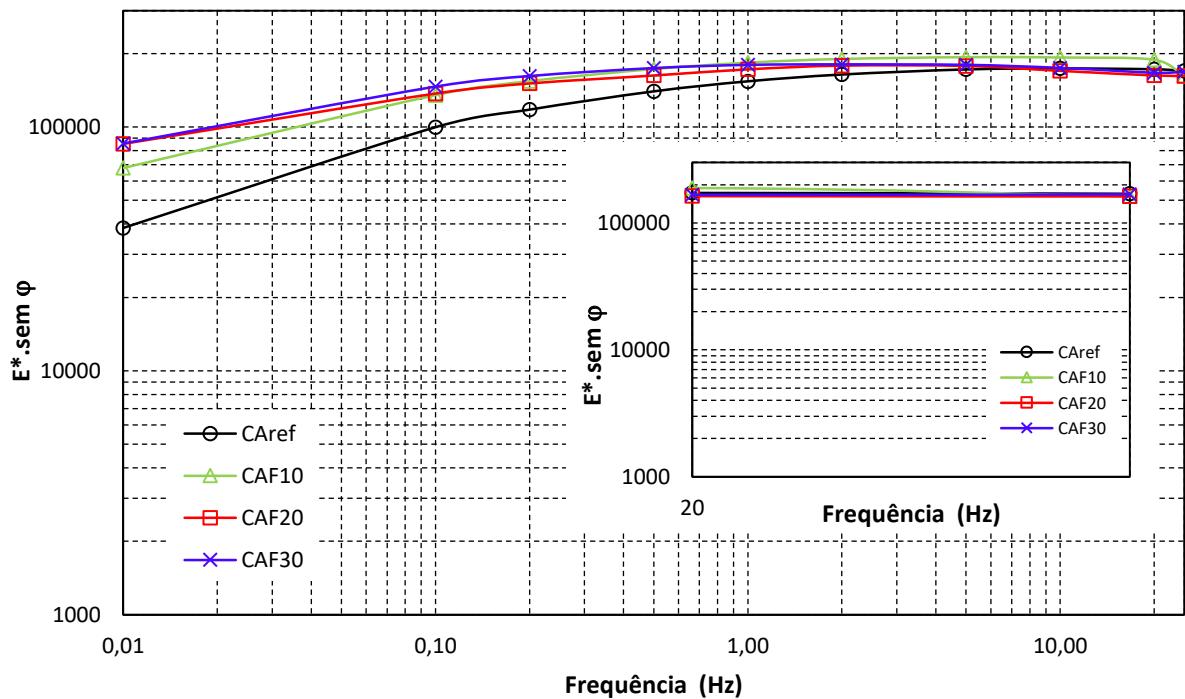


Além disso, na região da esquerda, com frequências mais baixas e temperaturas mais elevadas, o ligante não tem capacidade elástica, onde, ainda, o pico de comportamento da mistura recebe forte influência do esqueleto mineral. Esta afirmação reforça à hipótese de que a CAF10 talvez apresente alguma disposição diferenciada dos materiais dentro das amostras, visto que é a mistura que apresenta maior pico no gráfico. As demais misturas apresentaram comportamento esperado, a CRef teve o menor pico, visto que não tem material granular reciclado em sua composição, e a CAF30 com um pico mais elevado, ficando abaixo apenas da CAF10.

Ainda, foi realizada uma análise para avaliação quanto à fadiga e deformação permanente. Para análise de correlação de ligante da especificação Superpave, foi feita uma tentativa de relacionar as variáveis de ângulo de fase e módulo dinâmico para deformação permanente e fadiga através de  $E^* \cdot \text{sen}\varphi$  e  $E^*/\text{sen}\varphi$ .

A Figura 88 mostra, para o caso crítico de temperatura mediana de 21°C, onde, no gráfico, quanto menor o valor de  $E^* \cdot \text{sen}\phi$  melhor é o desempenho da mistura frente à fadiga, nas quais são utilizadas, para avaliação deste parâmetro, preferencialmente, as frequências mais altas. Logo, observa-se que a mistura CAref é a que apresenta o melhor índice, na análise das frequências mais baixas, dando indício de um bom comportamento frente à fadiga. Além disso, é possível verificar que a adição de fresado, em baixas frequências, deixa a mistura mais propensa à fadiga, sendo a CAF10, entre as misturas com fresado, a mistura a qual fica mais vulnerável. No entanto, em altas frequências, que é onde mais interessa para análise da fadiga, com a adição do agregado reciclado não é verificada uma melhora, nem piora, significativa no comportamento das misturas, como pode ser visto no detalhe da Figura 88. Logo, uma análise de fadiga torna-se viável para pesquisas futuras com material fresado.

Figura 88 – Análise de dados para avaliação frente à fadiga a 21°C

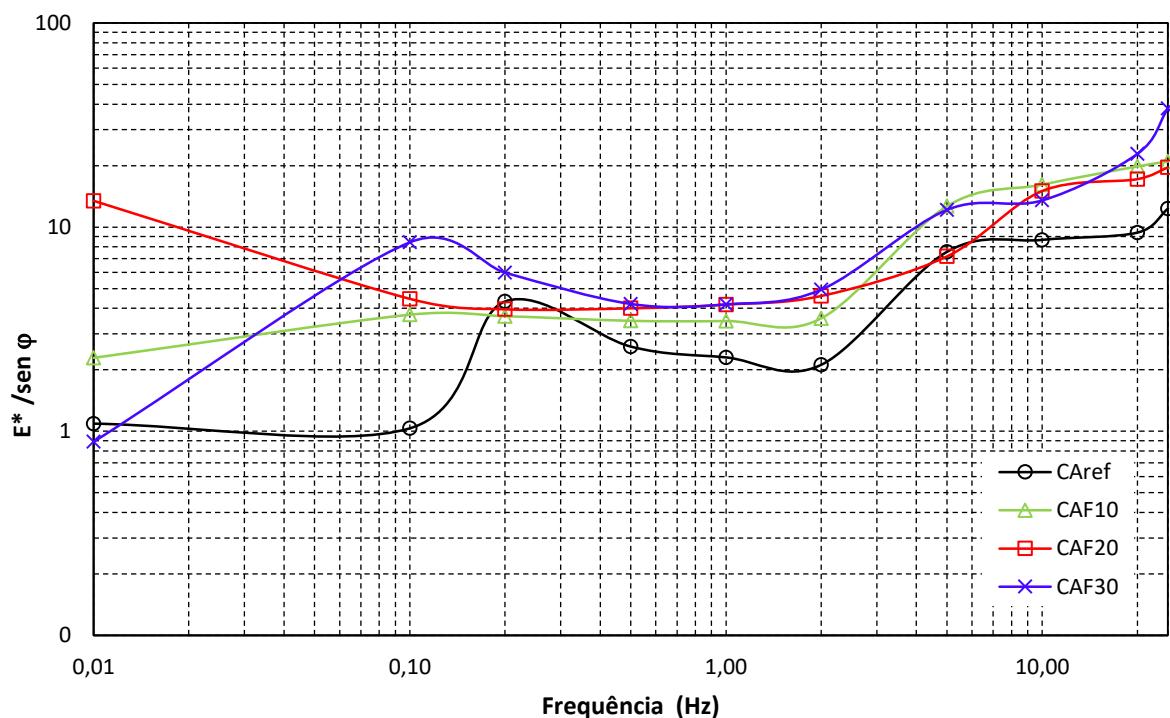


Outra análise realizada nas misturas foi no aspecto da deformação permanente, onde, através da análise do gráfico, quanto maior o valor de  $E^*/\text{sen}\phi$

melhor é o desempenho da mistura frente à deformação permanente, na qual a análise é feita avaliando as frequências mais baixas.

A Figura 89 mostra, para o caso crítico de alta temperatura, 54°C, que as misturas CAref e CAF30 apresentaram a maior variabilidade de comportamento frente à variação de frequência. A mistura CAF30, em alta frequência, apresentou o melhor resultado para deformação permanente, no entanto, para baixa frequência, foi a que apresentou o pior resultado entre as 4 misturas. Já a mistura CAref apresentou um resultado ruim em baixas frequências e, também, apresentou o pior resultado quando submetida a altas frequências de carregamento.

Figura 89 – Análise de dados para avaliação frente à deformação permanente a 54°C

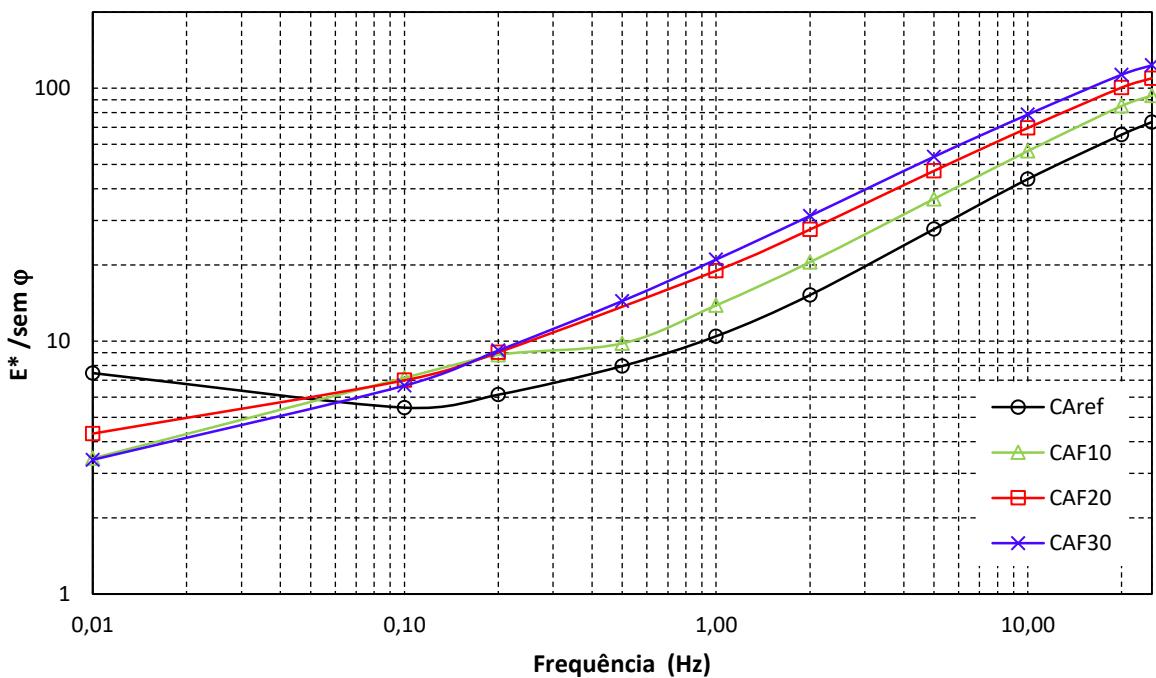


Logo, através da análise destes dados, é possível afirmar que a adição de material fresado nas misturas tem sua eficácia levemente melhorada frente à deformação permanente, visto que, em baixas frequências, os melhores resultados

encontrados foram para as misturas com material fresado em sua composição, onde a melhor mistura foi a CAF20, seguida pela CAF10, CAre e CAF30.

No entanto, devido à grande dispersão de dados obtidos à temperatura de 54°C, onde já havia sido observada esta tendência no Diagrama de Black e no Espaço Cole Cole, devido, possivelmente, a problemas de leitura do ângulo de fase, para corroborar, a Figura 90 mostra a análise dos dados à temperatura de 37°C. Através desta é possível confirmar o que já havia sido evidenciado a 54°C, a problemática nos ângulos de fase, seja por deformação plástica da amostra ou seja pela instrumentação utilizada na realização dos ensaios.

Figura 90 – Análise de dados para avaliação frente à deformação permanente a 37°C



A análise desses dados é realizada quanto maior o valor de  $E^*/\text{sen}\varphi$ , para baixas frequências de carregamento, melhor é o desempenho da mistura frente à deformação permanente, como mencionado anteriormente. Com isso, é possível observar que a CAre apresenta o melhor desempenho, seguida pela CAF20, e CAF10 e CAF30 empatadas. Logo, através da análise desses dados, a deformação

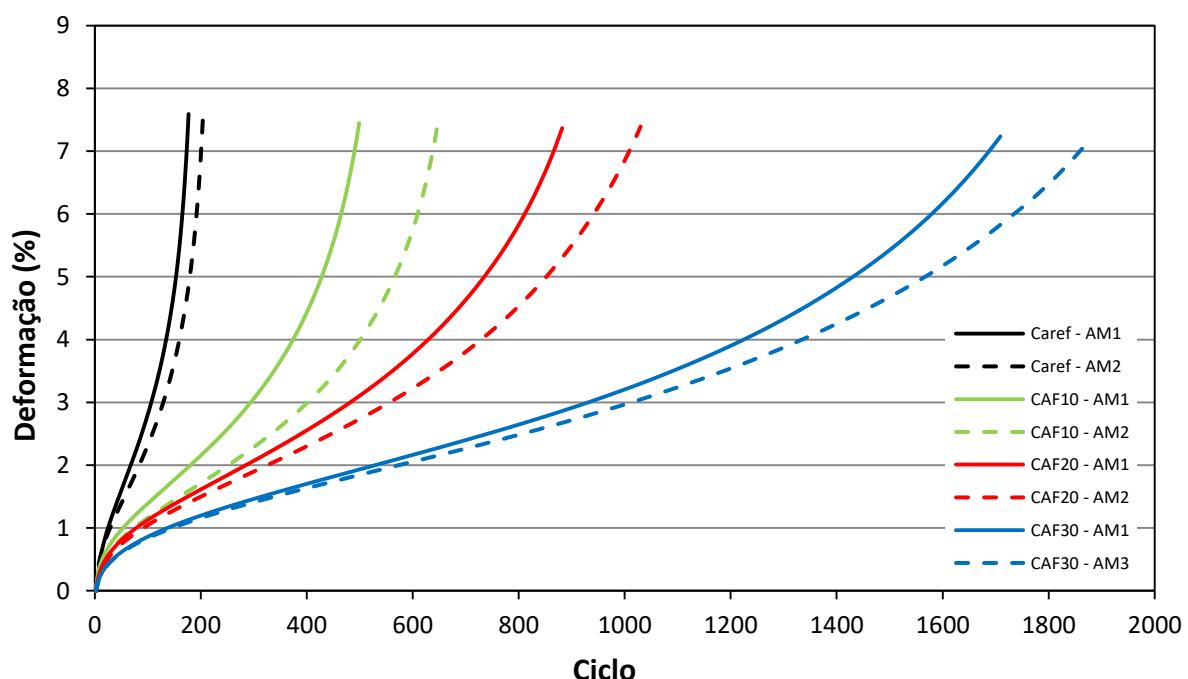
permanente piora com a adição de fresado, o que, no entanto, tem outra análise quando submetido ao ensaio de FN, o qual corresponde ao ensaio característico para obtenção da deformação permanente, a qual é considerada para fins de avaliação, pois, evidência experimental é avaliada melhor do que a correlação realizada através destes dados.

#### 4.2.4 Flow number

Para o ensaio de FN, as amostras foram submetidas à aplicação de carregamento cíclico de compressão com frequência de 0,1 s e repouso de 0,9 s, com condicionamento prévio por, aproximadamente, 8 h, para execução do ensaio à temperatura de 60°C.

Com dados obtidos no ensaio, foi possível plotar o gráfico de ciclos em função da deformação, para todas as misturas, através da média de duas amostras, conforme Figura 91.

Figura 91 – Resultado do ensaio de FN para todas as misturas: número de ciclos x deformação



Com isso, pode-se verificar que o FN aumenta com a adição de fresado nas misturas. Logo, a pior mistura, com relação à deformação, é aquela que apresenta o menor FN, ou seja, a mistura CAref, seguida pela CAF10, CAF20 e, após, com o melhor resultado frente à deformação permanente, a mistura CAF30, com a maior adição de fresado. Tais resultados corroboram com a análise de deformação permanente apresentada na Figura 88, onde a mistura CAref apresenta um dos piores resultados frente à deformação, isto é, a inserção de material fresado influencia diretamente neste parâmetro.

As deformações acumuladas foram obtidas em função do número de ciclos, onde a tensão aplicada em cada ciclo do ensaio foi de 204 kPa. Na Tabela 30 estão demonstrados os resultados de FN de cada uma das amostras, bem como a média correspondente para cada mistura. Os ensaios de todas as amostras foram finalizados quando a mistura atingiu 5% da deformação.

Tabela 30 – Resultado do FN para as amostras e média de cada mistura

Mistura	FN	Média	DP	CV (%)
CAref	60 59	60	0,78	1,19
CAF10	140 160	150	14,14	9,43
CAF20	250 275	262	17,68	6,73
CAF30	530 550	540	14,14	2,62

Através desses dados, foi possível certificar que os resultados de coeficiente de variação (CV) atenderam a norma AASHTO T 79 para CV de média das propriedades de FN, apresentada anteriormente na Tabela 21. De acordo com os parâmetros da norma, o CV por média para duas amostras ensaiadas não deve exceder o valor de 14,1% ao atingir o FN, logo, através da análise da Tabela 30, nota-se que os CV's de todas as misturas se apresentaram abaixo deste valor, atendendo, assim, o limite imposto pela norma.

Então, montou-se a curva do FN em função do teor de fresado de cada mistura (Figura 92) e, também, (Figura 92) em função do teor de ligante antigo, teor de ligante

adicionado e teor de ligante total. A Figura 92 mostra, claramente, que o FN aumenta conforme aumenta o teor de fresado, onde, consequentemente, o teor de ligante adicionado é menor.

Através da Figura 93, fica claro a influência do teor de ligante das misturas na sua resistência e, ainda, que a quantidade de ligante envelhecido afeta diretamente esse parâmetro. Nota-se que o FN aumenta à medida em que o teor de ligante antigo envelhecido é maior e, consequentemente, diminui com a adição de ligante novo. Isso se deve ao fato de que quanto mais envelhecido é o ligante, maior é a sua rigidez, o que influencia diretamente na resistência das misturas.

Figura 92 – Resultado do FN em função do teor de fresado das misturas

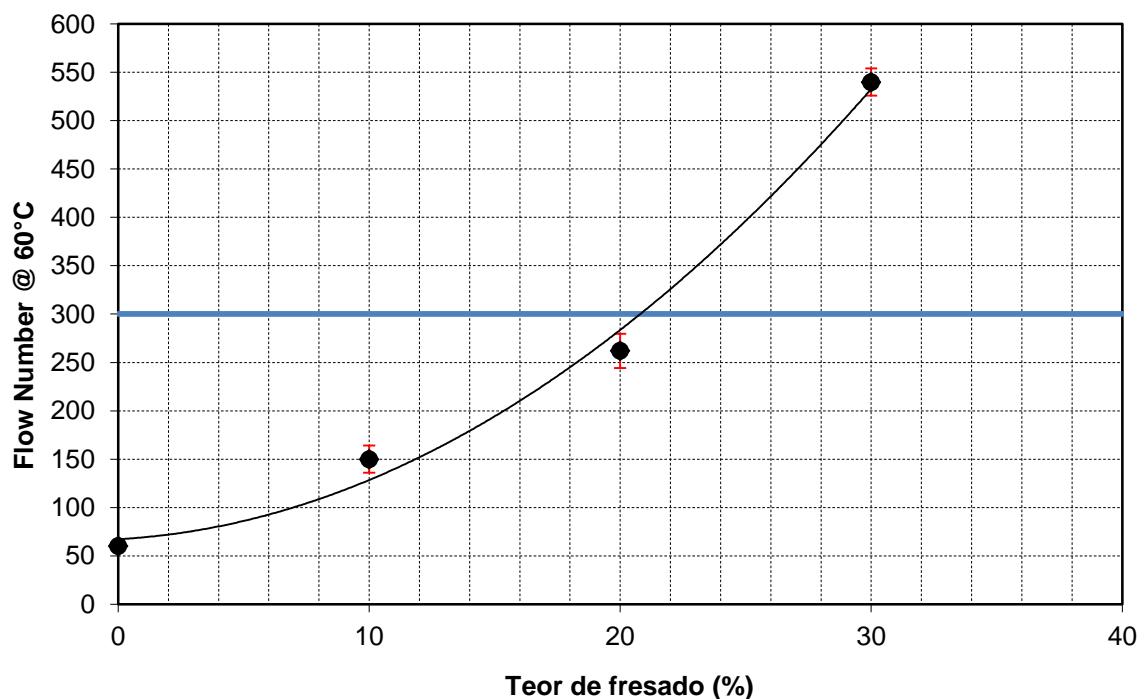
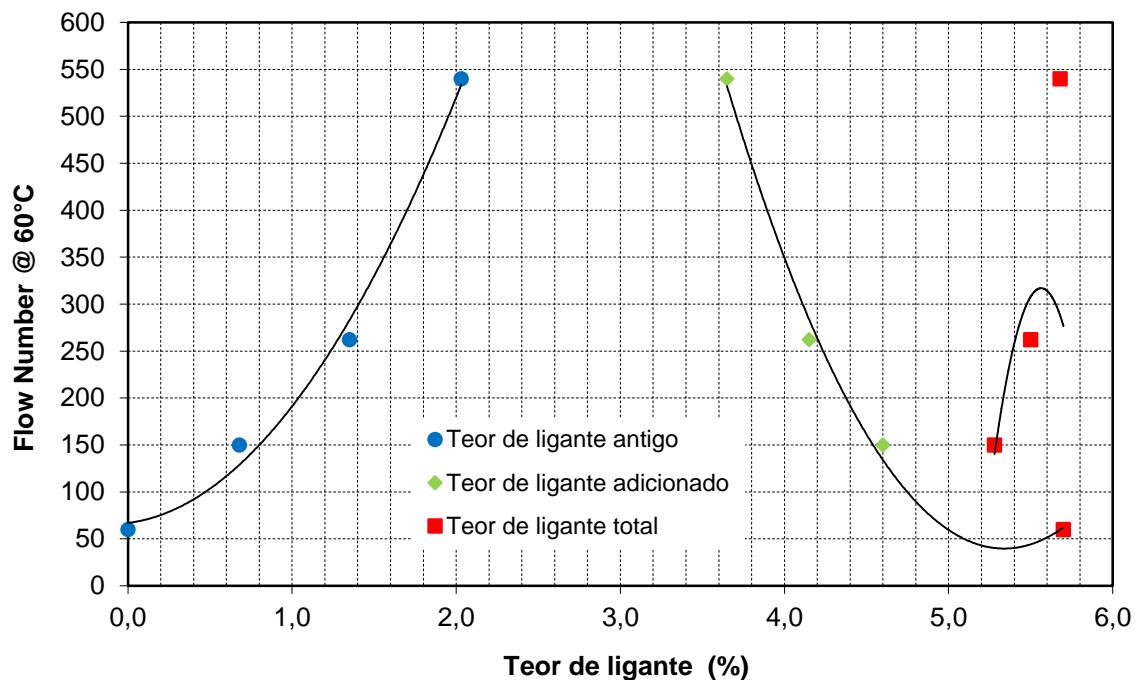
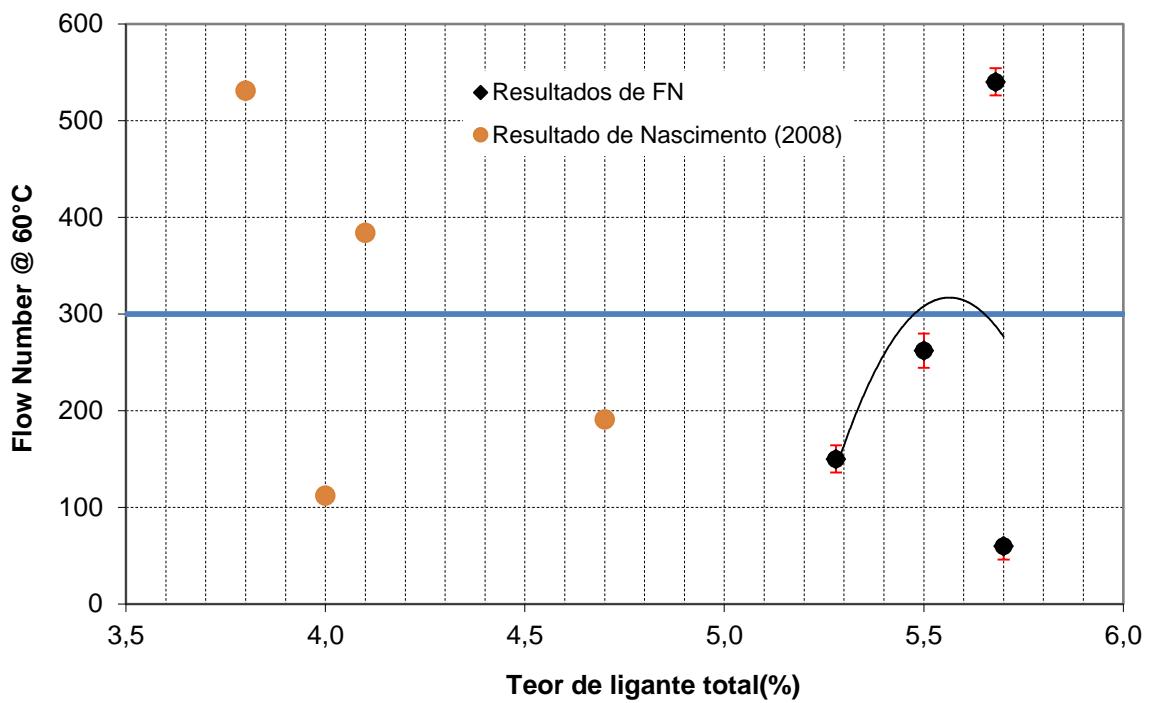


Figura 93 – Resultado do FN em função do teor de ligante



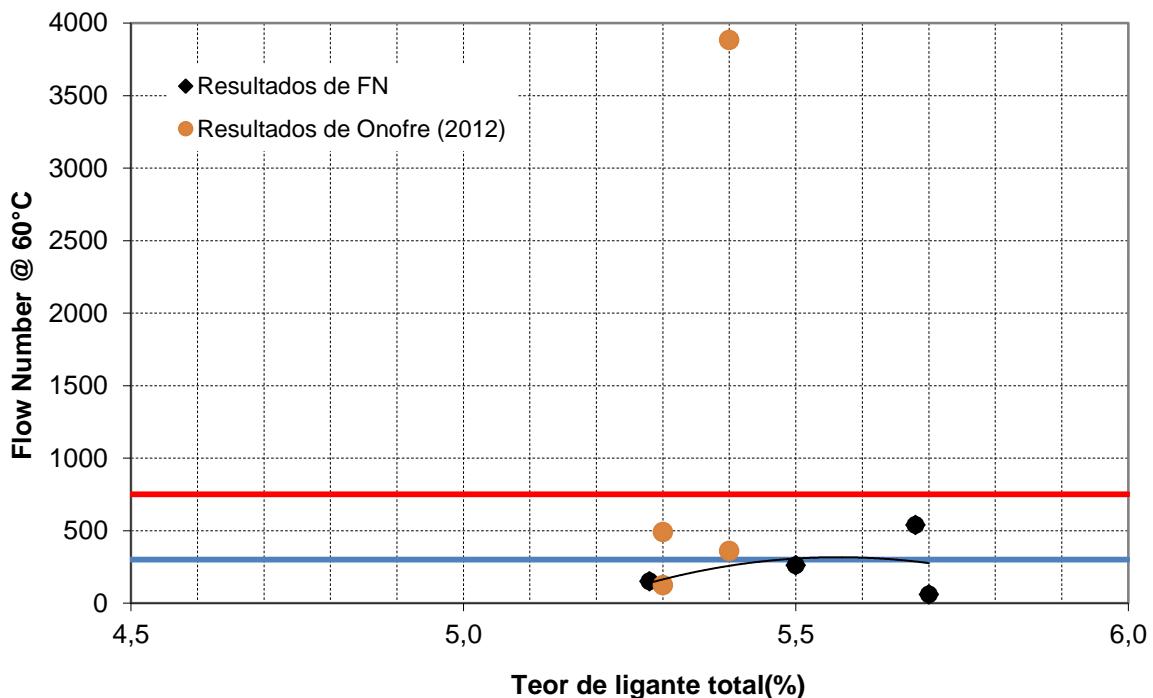
Para corroborar, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com os de Nascimento (2008), bem como os resultados de Onofre (2012), os quais estão apresentados nas Figuras 94 e 95, respectivamente.

Figura 94 – Comparativo dos resultados de FN com os resultados de Nascimento (2008)



Além disso, Nascimento (2008) afirma que, para tráfego médio, o valor de FN deve ser maior do que 300 ciclos, sendo que, para tráfego pesado, esse valor aumenta para 750 ciclos. Logo, seguindo esse parâmetro, apenas a mistura CAF30 apresenta resultado positivo quanto à análise do número de ciclos para tráfego médio, sendo que nenhuma delas atende ao critério de tráfego pesado. No entanto, através dos dados apresentados, é possível verificar que todas as misturas estão relativamente de acordo com as misturas de Nascimento (2008), o qual utilizou misturas com diferentes TMN de agregado e CAP 20 REVAP.

Figura 95 – Comparativo dos resultados de FN com os resultados de Onofre (2012)



Onofre (2012) encontrou valores para misturas com diferentes tipos de agregados e ligantes CAP 50/70 Lubnor (PG 70-18), CAP 50/70 Replan (PG 64-22), CAP com adição de ácido polifosfórico e CAP com adição de polímero Elvaloy e ácido polifosfórico, da ordem de 490, 124, 361 e 3884, respectivamente. Sendo a mistura com CAP Replan a pior entre as analisadas, o que era esperado, segundo o autor, pois a mistura possui ligante com menor PG. Ainda de acordo o autor, os resultados mostraram que a modificação dos ligantes asfálticos aumentou a resistência frente à deformação permanente, onde, apesar de ser difícil quantificar exatamente a influência de cada componente da mistura na resistência à deformação permanente, foi possível perceber que a resistência foi mais sensível frente à mudança de agregado do que à mudança de ligante.

De acordo com os dados de Onofre (2012), foi possível verificar que também houve coerência relativa com os dados obtidos nesta pesquisa. Além disso, apenas

uma das misturas do autor atendeu ao número de ciclos para tráfego pesado e, ainda, somente uma não atendeu ao limite de tráfego médio.

Por fim, através dos dados obtidos no ensaio de FN, nota-se que a resistências das misturas a deformações permanentes aumenta conforme aumenta a adição de material reciclado na composição. Isto corrobora com os dados de rigidez apresentados, anteriormente, na Tabela 22, na qual foi possível verificar que a mistura CAF30 apresenta um teor de ligante antigo de 35% em relação ao teor de ligante adicionado. Visto que o ligante antigo, ao envelhecer, torna-se mais rígido, consequentemente aumenta a rigidez da mistura, pressupondo uma relação da rigidez com a resistência ocorrente de deformações plásticas. Isto é, quanto maior a quantidade de ligante envelhecido na mistura, maior será sua influência nos resultados de FN.

#### 4.3 PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE

Neste item, são apresentados os resultados dos ensaios de adesividade das misturas asfálticas desta pesquisa. Para tanto, foram moldadas, através do método Superpave, amostras particulares para cada ensaio, de modo a fixar o Vv exigido pelo mesmo.

##### 4.3.1 Resistência retida à tração

O ensaio de Lottman Modificado avaliou a propriedade de adesividade nas misturas asfálticas desta pesquisa, considerando o efeito deletério da água em amostras cilíndricas, preparadas através da metodologia Superpave, com volume de vazios de 7% ( $\pm 1\%$ ). A Tabela 31 apresenta as médias dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das amostras com e sem condicionamento (grupo I e grupo II, respectivamente) bem como a RRT (Resistência Retida à Tração).

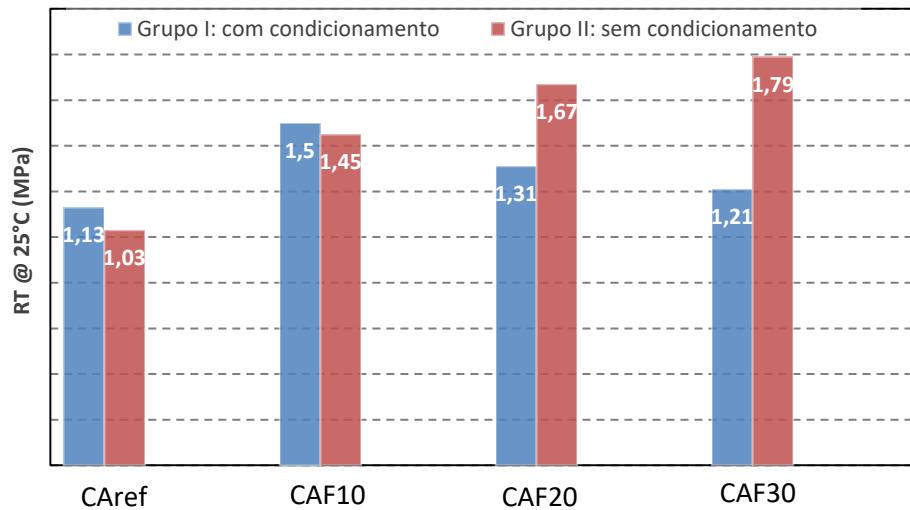
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de efeito deletério da água nas misturas

<b>Mistura</b>	<b>Grupo I (MPa)</b>	<b>Grupo II (MPa)</b>	<b>RRT (%)</b>
Mistura Referência	1,13	1,03	110
Mistura 10%	1,50	1,45	103
Mistura 20%	1,31	1,67	79
Mistura 30%	1,21	1,79	68

Specht (2004) encontrou valores de RRT da ordem de 56 a 90%, levando em conta que utilizou ligantes modificados com borracha reciclada de pneus, na composição de algumas misturas. Já Bock et al. (2009) encontraram, para mistura de referência, um valor de RRT de 85%, sendo este valor aumentando com a adição de cal e outros materiais. Com isso, é possível afirmar que, tanto a mistura CAref, apenas com agregados convencionais, como as demais misturas, contendo agregados reciclados da pavimentação, apresentaram resultados normais quanto ao efeito deletério da ação da água, sendo esse efeito tendo queda de valor conforme a adição de material fresado em sua composição.

A Figura 96 apresenta os resultados dos ensaios de RT das amostras com e sem condicionamento. Nota-se que, para as amostras sem condicionamento, conforme aumenta o teor de fresado na mistura, maiores são os valores de resistência. Já para as amostras com condicionamento, as amostras da mistura de referência CAref apresentou valor diferenciado das demais, estas, apresentaram valores decrescentes conforme aumento do teor de fresado na mistura.

Figura 96 – Resultados dos ensaios de resistência à tração do *Lottman* Modificado



De acordo com a metodologia Superpave aplicada em toda a pesquisa, os valores de referência preconizados para RRT são aqueles acima de 80%. Através dos resultados apresentados nas Figuras 97 e 98, é possível verificar que apenas a mistura com o maior teor de fresado (CAF30) não respeitou o limite da metodologia. Apesar de a mistura CAF20 ter ficado 1% abaixo do recomendado pela metodologia Superpave, Hicks (1991) afirma que a maioria dos departamentos estaduais de transportes norte-americanos utilizam o limite de 70%. Logo, apenas a mistura CAF30 não atende o limite recomendado, estando abaixo dos 70%. Além disso, é possível verificar que, à medida em que se aumenta o teor de ligante antigo, a RRT diminui, ao passo que, conforme a quantidade de ligante novo é adicionado, a RRT aumenta. Ou seja, a inserção de ligante envelhecido não é favorável à resistência retida à tração.

Figura 97 – Resultados dos ensaios de efeito deletério da água em função do teor de fresado

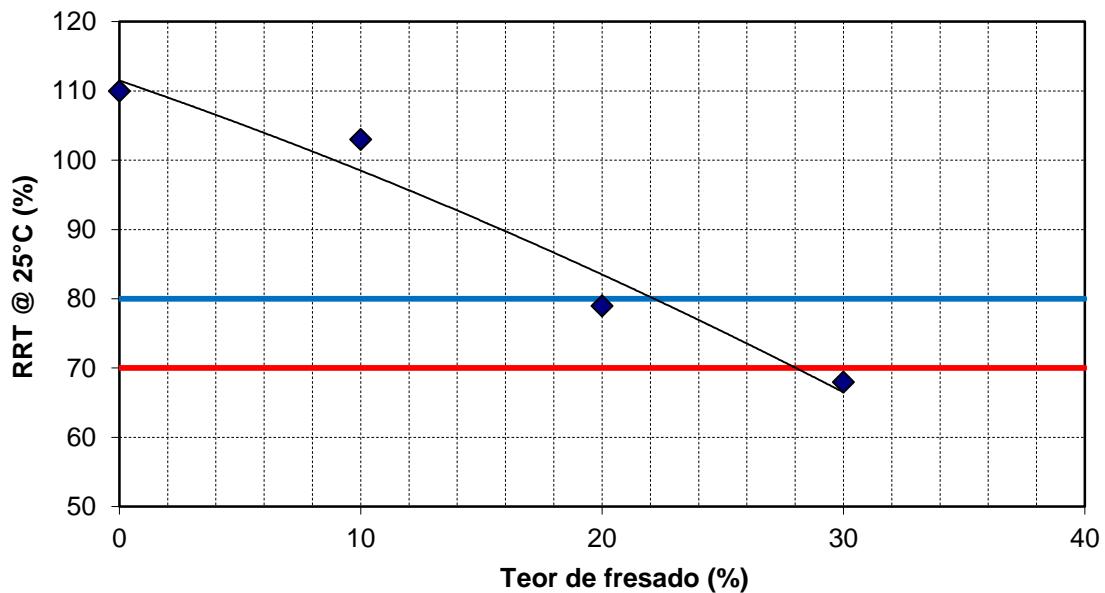
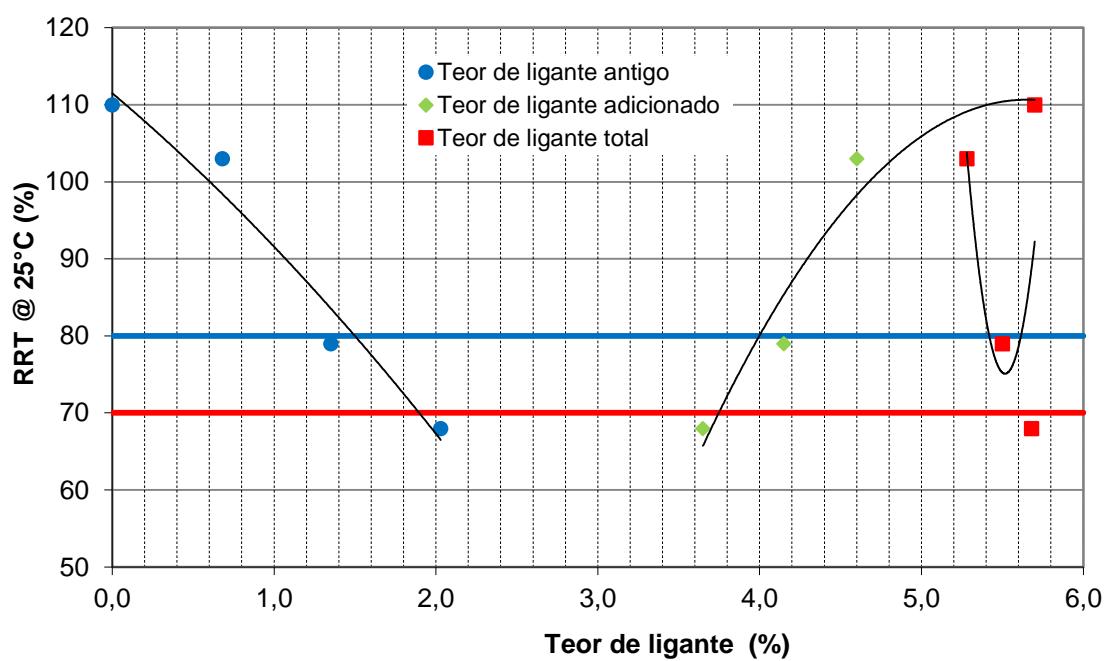


Figura 98 – Resultados dos ensaios de efeito deletério da água em função do teor de ligante



#### 4.3.2 Resistência ao desgaste

Para o ensaio de resistência ao desgaste por perda de massa Cântabro, todas as amostras foram previamente condicionadas à temperatura de 25°C, sendo o volume de vazios de cada amostra fixado em 4% ( $\pm 1\%$ ). A Tabela 32 mostra os resultados obtidos pelo ensaio e, através dos dados apresentados, pode ser observado que, conforme aumenta o teor de fresado nas misturas, os valores de perda de massa, em média, também crescem, o que significa que o fresado aumenta a tendência ao desgaste.

Tabela 32 – Resultados dos ensaios de perda de massa Cântabro

Mistura	Perda de massa (%)					Desvio Padrão
	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Média	
CAref	5,05	4,76	5,23	6,11	5,29	0,58
CAF10	6,09	6,60	6,11	6,62	6,35	0,29
CAF20	7,13	6,19	6,08	7,34	6,68	0,64
CAF30	8,86	7,88	8,85	6,84	8,11	0,96

Specht (2004) encontrou valor de média, para mistura de referência, de 5,91% de perda de massa, o que está muito próximo do valor de 5,29%, encontrado nesta pesquisa. Além disso, Bock et al. (2009) encontraram valor de perda de massa de 5,71%, para uma mistura de referência, sendo que, com a adição de outros materiais (cal e agregados) a perda de massa sempre aumentava, com relação à mistura de referência, de acordo com o tipo de material adicionado.

A Figura 99 mostra os mesmos resultados, mas em função do teor de fresado, já a Figura 100 mostra as médias plotadas com os resultados de cada uma das misturas ensaiadas em função do teor de ligante antigo, teor de ligante adicionado e teor de ligante total em cada mistura. Nota-se que, para as misturas contendo material fresado, o desvio padrão aumenta à medida que aumenta a perda de massa das amostras. Ainda, é possível verificar que o desgaste é maior à medida que o teor de ligante antigo é maior, e que o inverso ocorre para o teor de ligante novo adicionado. Além disso, o desgaste por abrasão final, realizado através das médias dos ensaios

para cada mistura, apresenta valores individuais que não diferem do valor médio de 20% exigido pela norma.

Figura 99 – Resultado dos ensaios de perda de massa em função do teor de fresado

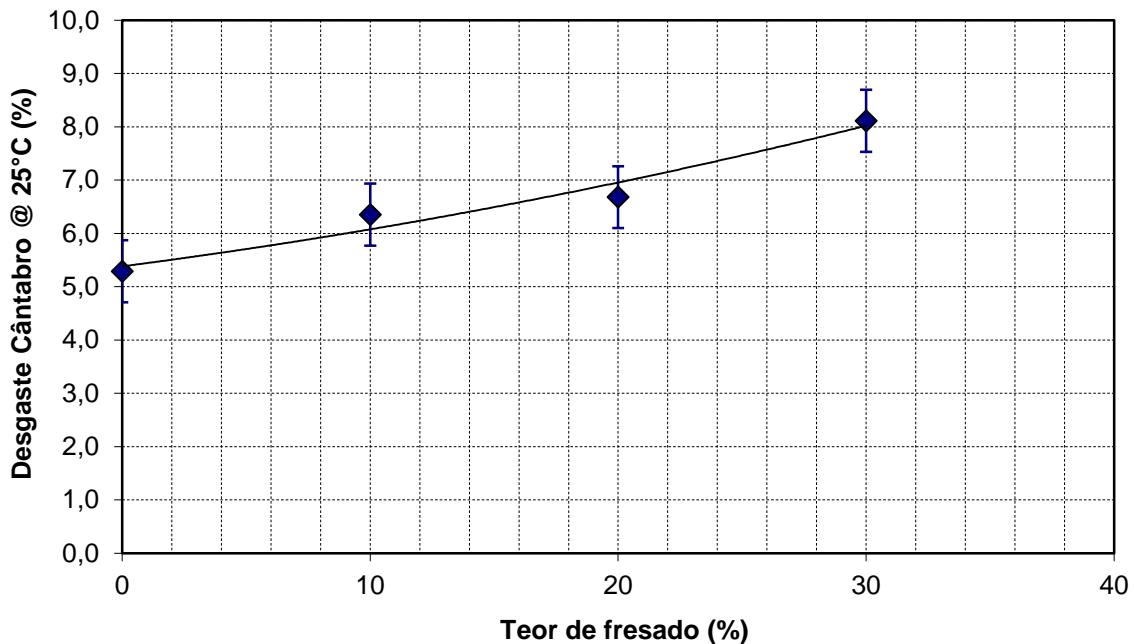
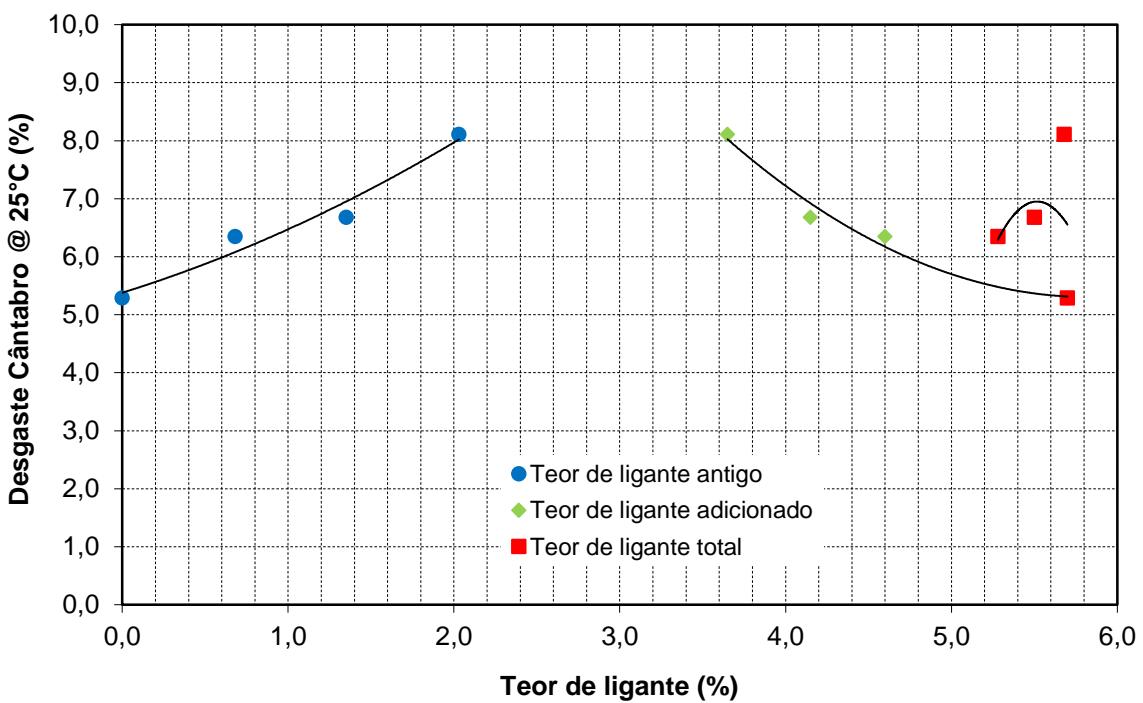


Figura 100 – Resultado dos ensaios de perda de massa em função do teor de ligante



## 5 CONCLUSÕES

Devido à necessidade de preservação dos recursos disponíveis, a questão ambiental torna-se cada vez mais um fator preocupante, também, na elaboração de projetos de engenharia. Assim, o material fresado oriundo de grande parte das obras rodoviárias, o qual apresenta disponibilidade sempre que se faz necessário uma intervenção na rodovia, e sua correta aplicação e estudo, pode vir a afirmar sua capacidade técnica e econômica.

Por isso, este trabalho teve como objetivo analisar, através de ensaios laboratoriais, o comportamento mecânico do material fresado em substituição ao agregado natural para utilização em obras de restauração de camadas de pavimentos flexíveis. Assim, através da reutilização do material asfáltico oriundo da fresagem e, aplicando as técnicas de reciclagem a quente, para os ensaios laboratoriais, serão avaliadas as melhorias em quesitos de resistência mecânica, obedecendo as normas vigentes, as quais este material poderá vir a proporcionar.

Assim, nesta pesquisa, a avaliação mecânica apresentou resultados positivos com a inserção de material fresado, quando comparados a uma mistura convencional. Através dos resultados de MR foi possível verificar que a resistência das misturas aumenta, ao passo que a quantidade de material fresado é inserido nestas, ficando claro o bom comportamento do fresado nas misturas. À temperatura de 25°C observou-se que os resultados de módulo eram de, aproximadamente 4.000 MPa até 6.900 MPa para a mistura convencional, enquanto que para as misturas com adição de fresado, esses valores variaram de, aproximadamente, 5.300 MPa até 9.000 MPa.

Quanto à análise da resistência à tração, também foi possível verificar que os valores de RT aumentam conforme se eleva o teor de fresado nas misturas, como era esperado. Os valores de RT para as misturas CAre, CAF10, CAF20 e CAF30 foram de 1,42 MPa, 1,79 MPa, 2,08 MPa e 2,36 MPa, respectivamente.

No geral, na análise dos resultados de MR e RT, estes apresentaram valores superiores para as misturas contendo agregado reciclado, quando comparados com os valores obtidos nos mesmos ensaios para a mistura de referência. Acredita-se que estes resultados tenham sido motivados pela presença do material fresado, que, por sua vez, age elevando a resistência das misturas as quais contém esse material na composição.

Para os resultados de módulo dinâmico, através das isotermas ficou claro que a resistência das misturas aumentou com a inserção de material fresado, onde os menores valores foram encontrados na mistura de referência. Além disso, foi possível verificar que o  $E^*$  se eleva à medida em que se diminui a temperatura de ensaio e se aumenta a frequência de carregamento. Outro fator analisado foi que, para a maioria das temperaturas, a resistência das misturas aumentou, no geral, com o aumento da frequência.

Analizando as isotermas de ângulo de fase foi possível verificar que este diminui, à temperatura constante, à medida em que a frequência de carregamento aumenta. As misturas mais rígidas, CAF10, CAF20 e CAF30 apresentaram os menores valores. Além disso, os menores valores de ângulo de fase foram encontrados nas temperaturas mais baixas onde, ao passo que a temperatura era aumentada, o ângulo de fase também aumentava.

Através das curvas isócronas foi possível analisar a suscetibilidade cinética das misturas, onde, quanto menor a frequência, menor o valor de  $E^*$ . Logo, quanto maior a inclinação da curva, maior a suscetibilidade. A curva que obteve a maior inclinação foi da mistura CAre, seguida pela CAF10. Além disso, os menores valores de ângulo de fase foram encontrados nas frequências mais altas e temperaturas mais baixas.

Com a curva mestra das misturas foi possível verificar que o  $E^*$  aumenta em função da frequência. Através destes dados notou-se que a mistura que apresentou maior resistência foi a CAF10, seguida pela CAF30, CAF20 e, por último, a CAre. Esse resultado foi considerado inesperado, visto que, geralmente, a adição de fresado nas misturas aumenta a rigidez, o que, neste caso, não se confirmou em sua totalidade, sendo que a mistura com adição de 10% de fresado apresentou-se mais rígida que a mistura com adição de 30% de fresado. No entanto, ainda assim, o experimento indica que a adição de fresado em misturas asfálticas afeta o módulo e aumenta a resistência das misturas, pois, a mistura menos resistente foi a que não apresentava material reciclado em sua composição.

Na análise dos dados frente à fadiga, foi possível concluir que a inserção de material reciclado nas misturas não teve melhora nem piora significativa no comportamento, sendo a CAF10, entre as misturas com adição de fresado, a mistura a qual ficou mais vulnerável neste aspecto. No entanto, como a análise é feita em altas frequências, foi possível observar que a adição de fresado não tem influência significativa no aspecto da fadiga, sendo viável uma análise mais aprofundada deste

parâmetro. Por outro lado, quando a avaliação é feita para a deformação permanente, a correlação não funcionou como o esperado, sendo necessária a avaliação do ensaio característico de FN para obtenção de avaliação adequada.

No que diz respeito aos resultados de adesividade das misturas, para o ensaio do efeito deletério da água (*Lottman Modificado*), as amostras obtiveram resultados condizentes com a literatura, mas que deve ser melhor investigado. Quanto ao desgaste por perda de massa Cântabro, foi possível observar que, conforme se aumenta o teor de fresado nas misturas, a média dos valores de perda de massa também aumenta, o que significa que o fresado aumenta a tendência ao desgaste das misturas.

Por fim, na análise de FN foi possível verificar, claramente, que o FN aumenta conforme o teor de fresado nas misturas também aumenta. Isto é evidenciado pela quantidade de teor antigo presente, ou seja, à medida em que o teor de ligante antigo é maior, consequentemente, a resistência da mistura também é maior, visto que o ligante envelhecido apresenta maior rigidez que o ligante novo, o que reflete diretamente na resistência da mistura. Assim, de acordo com este ensaio, é possível afirmar que o material reciclado aumenta a resistência, ao passo que a deformação permanente não é um problema quando da inserção deste material na composição das misturas.

Assim, ao realizar uma análise geral dos resultados, foi possível concluir que a adição de material fresado em misturas asfálticas é de grande importância, visto que os experimentos de laboratório demonstraram o crescimento de desempenho e resistência destas misturas quando comparadas a misturas convencionais.

Em função das análises realizadas no decorrer da pesquisa, sugere-se:

- Aprofundar os estudos relacionados à fadiga e adesividade com a inserção de agregado reciclado nas misturas;
- Estudar métodos de reciclagem para misturas mornas e/ou com adição de polímeros ou fresado de misturas com polímero;
- Realizar pesquisa com outras porcentagens de material fresado, bem como executar trechos testes para melhor avaliar o comportamento;
- Investigar métodos de recuperação do ligante envelhecido do material reciclado para que, assim, se possa tornar ainda mais econômica a utilização do fresado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO, 2001, **Standard Specifications for SUPERPAVE Volumetric Mix Design**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO MP2, Washington, D. C.
- AASHTO, 2001, **Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for HMA Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO TP 79-12, Washington, D. C.
- AASHTO, 2002, **Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO R 30, Washington, D. C.
- AASHTO, 2005, **Determining Dynamic Modulus of Hot-mix Asphalt Concrete Mixtures**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 342 11, Washington, D. C.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15140**: Misturas asfálticas - Determinação do desgaste por abrasão Cântabro. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_.NBR 15184: **Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_.NBR 15617: **Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida**. Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_.NBR 6296: **Produtos betuminosos semi-sólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa**. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_.NBR 15087: **Misturas asfálticas — Determinação da Resistência à Tração indireta por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_.NBR 15619: **Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas**. Rio de Janeiro, 2012.
- ALSHAMSI, K., S. **Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures**. Tese submetida ao corpo docente da Louisiana State University em cumprimento parcial aos requisitos para o grau de Doutor. University of Birmingham, United Kingdom. Maio, 2006.
- ARAÚJO JR., P. C.; VALE, A. C.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T. **Análise laboratorial do cimento asfáltico de petróleo – CAP 30/45 – em misturas asfálticas**. 19º Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP. Rio de Janeiro. 2008.
- ASPHALT INSTITUTE. Education; Asphalt Academy Classes; Asphalt Magazine. 2015. Disponível em: <http://www.asphaltinstitute.org/>. Acesso em: 15 jul. 2015.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book.** U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. Dezembro, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4123:** Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. Philadelphia, 1982. 4p.

\_\_\_\_\_. ASTM, 1979, **Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures.** American Society for Testing and Materials, ASTM D 3497-79, USA.

ARAÚJO, L. M. D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos.** Tese (Doutorado em Geotecnia). 2004, 128 p. Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2004.

BALBO, J.T.; BODI, J. **Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: Alternativa para bases de elevado módulo de elasticidade.** In: XVIII ANPET – CONGRESSO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2004.

BASUENY, A.; CARTER, A.; PERRATON, D.; VAILLANCOURT, M. **Laboratory Evaluation of Complex Modulus and Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures with RAP.** 8<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. Volume 11. RILEM 2015.

BENTO, F. T. A. M. **Avaliação de Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas a Quente.** Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Novembro, 2010.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica:** Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2010. 504 p. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.

BETUNEL, Tecnologia em Asfaltos. **Aditivos Asfálticos de Reciclagem para Misturas a Quente.** Disponível em <http://www.betunel.com.br/pdf/ar.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2015.

BOCK, A. L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPECHT, L.; CERATTI, J. A. **Estudo Laboratorial sobre os Efeitos de Diferentes Formas de Adição de Cal e Concreto Asfáltico.** Revista TPEC - Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 14, p. 59-69. Outubro, 2009.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** 112p, São Paulo, 2000.

BRESSI, S.; CAVALLI, M. C.; PARTL, M. N.; TEBALDI, G.; ET AL. **Particle Clustering Phenomena in Hot Asphalt Mixtures with High Content of Reclaimed Asphalt Pavements.** Article in Construction and Building Materials. Novembro, 2015.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de misturas asfálticas:** Evolução após 20 anos e a situação atual na França. In: 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 2011, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, 2011.

BUECHE, N.; DUMONT, A. G.; PITTEL, M.; BRESSI, S. **Asphalt Mixture with RAP: Mix Design Optimization.** 8<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. Volume 11. RILEM 2015.

CAVALCANTE, F. P.; MACÉDO, J. A. G.; MACÉDO, R. M. LIMA, J. F. P.; CAVALCANT, C. M. B. **Restauração do pavimento da rodovia BR-116-CE através de reciclagem das camadas de revestimento e base com adição de cimento Portland.** In: 38<sup>a</sup> RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2007, Manaus, AM. *Anais...* 2007.

CUNHA, M. B. **Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas.** 2004. 118p. Dissertação apresentada à Escola de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração: Transportes. São Carlos. 2004.

CUNHA, M. B.; GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JR, J. L.; MOTTA, L. M. G. **Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas:** análise do método Bailey. XVIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. *Anais.* Florianópolis/SC. 2004.

DANIEL, J. S., RIVERA, F. **Application of the Bailey Method to new Hampshire Asphalt Mixtures.** FHWA-NH-RD-13733F. New Hampshire Department of Transportation. University of New Hampshire. Dezembro, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 301/97:** Pavimentação: sub-base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997, 7 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 089/94:** Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ES 303/97:** Pavimentação: base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 1997, 7 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 035/98:** Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **DNER-ES 383/99:** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – Ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999, 2 p.

\_\_\_\_\_. **DNER-ES 405/2000:** Pavimentação – reciclagem à frio “in situ” com espuma de asfalto. Rio de Janeiro, 2000, 10 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3º ed. Rio de Janeiro, 2006, 274 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**, 2º Ed. Rio de Janeiro, 2006, 314 p.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ES 034/2005**: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2005, 13 p. Origem: DNER-ES 319/1997.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 135/2010**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010, 6 p. Origem: DNER-ME 133/1994.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ME 136/2010**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. **Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials**: from binders to mixes. Road Materials and Pavements Design. Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE), 2004. 41p.

DOMINGUES, M. P.; BALBO, J. T. **Estudo de Características de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente com o Emprego de Usinas Transportáveis de Pequeno Porte**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo/SP, 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Pavement Recycling Executive Summary and Report**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-95-060, Washington, D.C. Março, 1996.

FONSECA, P.; GUIMARÃES, C.; GOMES, V.; PALHA, D.; ET AL. **Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de Reciclagem**. Universidade do Minho, C-TAC – Centro do Território Ambiente e Construção, Campus de Azurém, Guimarães, Portugal, 2013.

GARDINER, M., S. **Recycling and Reclamation of Asphalt Pavements Using In-Place Methods – A Synthesis of Highway Practice**. National Cooperative Highway Research Program - NCHRP Synthesis 421. Chico, California. 2011.

GOMES, L.; MARICATO, S.; SANTOS, J. **Misturas Betuminosas com Reciclagem a Quente**. V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias. Recife/PE, Julho, 2006.

HICKS, R. G. **Moisture damage in asphalt concrete**. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 175, Transportation Research Board, Washington, 1991. 91p.

HUANG, H. Y. **Pavement Analysis and Design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 805p.

KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete.** McGraw-Hill Construction. American Society of Civil Engineers, 2009. 482p.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente.** 2003. 117 p. Dissertação submetida ao programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência em Engenharia de Transportes – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. **Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures.** Wisconsin highway research program 0092-01-02, Madison, Wisconsin, EUA, 2004.

MARQUES, G.L.O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; Efeito da compactação por impacto e giratória.** Tese (Doutorado). 2004, 461 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** 3º ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2015, 638 p.

MENDES, L. O. **Utilização do Método Bailey para a Seleção de Agregados em Dosagem de Misturas Asfálticas.** 2011. 131 p. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Juiz de Fora. 2011

MENDES, L. O.; MARQUES, G. L. O. **Avaliação da influência do Método Bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas.** Transportes v. 20, n. 4 (2012) p. 35-43.

MOREIRA, J. P. V.; PEREIRA, P.; CORREIA, A. G. **Reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento.** 2003. IV Congresso Rodoviário Português – Centro de Congressos do Estoril.

MOHAJERI, M.; MOLENAAR, A. A. A.; VAN DE VEN, M. F. C. **Bleding Simulation of RA and Virgin Binders in Hot Recycled Mixtures.** 8<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. Volume 11. RILEM 2015.

NASCIMENTO, L.A. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Rio de Janeiro, 2008, 204 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM – NCHRP. **Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice.** Transportation Research Board. Washington, D. C. 2008.

NEVES FILHO, A. S.; PINTO, S.; CARNEIRO, L. A. V. **Influência da adição de dopes na adesividade em misturas asfálticas a quente.** In: 38<sup>a</sup> RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2007, Manaus, AM. *Anais...* 2007.

OLIVEIRA, A.; BARAN, K. R.; SCHMIDT, F. S. **Reciclagem de pavimento para restauração da BR 282 em Santa Catarina – estudo de caso.** In: 40<sup>a</sup> RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2010, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 2010.

OLIVEIRA, J. A. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo.** 2013. 142 p. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências, área de concentração: Engenharia de Transportes – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2012.

PCA (2013). **Portland Cement Association.** Disponível em: <[http://www.cement.org/pavements/pv\\_sc\\_fdr.asp](http://www.cement.org/pavements/pv_sc_fdr.asp)>. Acesso em: 29 mai. 2015.

PEREIRA, P. F. **Desempenho técnico de pavimentos rodoviários flexíveis usinados a quente com adição de pavimentos fresados.** 88 p. Trabalho apresentado à Universidade de Uberaba, como parte das exigências à Conclusão da disciplina de Projeto de Graduação do 10º semestre do Curso de Engenharia Civil. Uberlândia/MG, 2011.

PIRES, G. M. **Estudo de material fresado estabilizado química e granulometricamente para aplicação em camadas de pavimentos.** 2014. 164p. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PRADYUMNA, T. A.; MITTAL, A.; JAIN, P.K. **Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction.** 2º Conference of Transportation Research Group of India – Procedia – Social and Behavioral Sciences, 2013.

RENAUD, C. L. R. S. A. **Module de rigidité et comportement em fatigue des enrobés bituminex.** Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse. These pour l'obtention du grade de docteur. Ecole Centrale Paris, novembre 1996.

ROSA, P. LORENZO, C. PACHECO, A. **Material fresado – de problema à solução econômica em obras de pavimentação.** In: 38<sup>a</sup> RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2007, Manaus, AM. *Anais...* 2007.

ROWE, G. M.; BARRY, J.; CRAWFORD, K. **Evaluation of a 100% Rap Recycling Project in Fort Wayne, Indiana.** 8<sup>th</sup> RILEM International Symposium on Testing and

Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. Volume 11. RILEM 2015.

SACHET, T.; GONÇALVES, F. P. **Reciclagem de bases granulares para pavimentos asfálticos.** In: 39<sup>a</sup> REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2008, Recife. Anais... Recife, 2008.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo dos três solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica.** Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

SOUZA, J. B. Q.; MACEDO, J. A. G.; MOTTA, L. M. G.; COSTA, L. M. **Comportamento de misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo no estado do Pará.** In: 39<sup>a</sup> RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2008, Recife. Anais... Pernambuco, 2008.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia. PPGEC/UFRGS. Porto Alegre/RS, 2004. 280p.

SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELO, T.; ET AL. **Utilização de Material Fresado como Camada de Pavimento:** Estudo Laboratorial e Aplicação em Campo. In: 42<sup>a</sup> RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2015, Foz do Iguaçu, PR. Anais... 2015.

SUZUKI, C.Y.; PEREIRA, A. C. O.; AZEVEDO, A. M.; DIAZ, P. H.; TUCHUMANTEL, O. J. **Avaliação Estrutural de Trecho Experimental Urbano de Pavimento Asfáltico Reciclado a Frio.** 35<sup>o</sup> REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Rio de Janeiro, 2004.

TRICHÊS, G.; SANTOS, A. **Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC 303.** In: 7<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 2011, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, 2011.

TRICHÊS, G.; LORENA, M.; SANTOS, A. **Reciclagem de pavimento com adição de cimento: estudo do desempenho da rodovia SC 303, trecho BR 282 - Capinzal (SC).** 40<sup>a</sup> RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2010, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2010.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. **Projeto de Misturas de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente com Diferentes Teores de Material Fresado.** Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. **Influência do percentual de fresado e do envelhecimento de curto prazo na dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente.** Universidade Federal do Ceará, XVIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Anais. Florianópolis/SC. 2004.

WIRTGEN, Wirtgen Group. **Histórico.** Windhagen, 2015. Disponível em: <<http://www.wirtgen-group.com/en/>>. Acesso em: 27 mai. 2015.

WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EI-BASYOUNY, M. e Von Quintus, H. **Simple performance test for superpave mix design.** *NCHRP Report 465.* National Research Council, Transportation Research Board. Washington, D.C, 2002.

YUSOFF, N. I.; CHAILLEUX, E.; AIREY, G. D. **A Comparative Study of the Influence on shift Factor Equations on Master Curve Construction.** International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 4. No. 6. Nov. 2011.

ZUBARAN, M.; MOTTA, L. M. G. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.** In: 42<sup>a</sup> RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2015, Foz do Iguaçu, PR. *Anais...* 2015.