

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

Kátia Aline Bohn

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MORNAS
COM USO DE LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO POR
POLÍMERO**

Santa Maria, RS
2017

Kátia Aline Bohn

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MORNAS
COM USO DE LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO POR
POLÍMERO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bohn, Kátia Aline

Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero / Kátia Aline Bohn.- 2017.
254 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2017

1. Fresado 2. Reciclagem de pavimentos 3. Mistura asfáltica morna 4. Misturas asfálticas recicladas mornas 5. Asfaltos modificados por polímeros I. Specht, Luciano Pivoto II. Título.

Kátia Aline Bohn

**AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MORNAS
COM USO DE LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO POR
POLÍMERO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 30 de março de 2017:

Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)
Presidente/Orientador

Luis Alberto Herrmann do Nascimento, Dr. (Petrobras/Cenpes)
Examinador

Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)
Examinador

**Santa Maria, RS
2017**

*Dedico esse trabalho ao meu pai e minha mãe,
Albano e Neusa,
que não medem esforços por minha felicidade*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que dá sentido à vida e me proporcionou concluir mais essa etapa.

Em especial, ao meu orientador, professor Luciano Pivoto Specht, pela oportunidade de ser sua orientanda durante o mestrado, por todos os conhecimentos repassados, por sua dedicação e empenho. Servirá de exemplo de profissional e de inspiração, pelo seu amor à pavimentação. Obrigada por acreditar em mim e ter estado presente em todos os momentos da pesquisa.

Ao Luis Alberto Herrmann do Nascimento pela disponibilidade em compor a banca examinadora, como membro externo, compartilhando seus conhecimentos e experiências.

Ao professor Deividi da Silva Pereira pelos ensinamentos repassados durante a pós-graduação e por aceitar em fazer parte da banca examinadora.

À professora Tatiana Cureau Cervo e ao professor Rinaldo José Barbosa Pinheiro por serem incentivadores e presentes no laboratório, pela prestatividade em sempre ajudar e pelos conhecimentos compartilhados.

À minha família, em especial, aos meus pais, Albano e Neusa, e a meu irmão Pedro, por terem sido suporte e apoio em todos os momentos desta caminhada. Pelo amor, carinho, compreensão, força e incentivos de sempre. Sem vocês não teria chegado até aqui!

Ao meu namorado Douglas, pela ajuda na realização dos ensaios, por aguentar todos meus desesperos e estresses, e mesmo assim, ter estado ao meu lado, dando todo apoio e incentivo que precisasse. Pelo amor e companheirismo, e por ter deixado essa trajetória ainda mais bonita e recompensadora. Compartilho essa conquista contigo!

À minha prima Nivea e as amigas que Santa Maria me deu, Daiane e Katieli, por todo o apoio e incentivo, por terem ouvido meus incansáveis desabafos. Vocês tornaram esses dois anos muitíssimos agradáveis e alegres. Levarei a vossa amizade para sempre!

Aos colegas e amigos João, Priscylla, Bruno, Gabriela, Gracieli e Rodrigo, por terem acompanhado e estado presentes em todos os momentos, desde o início dessa etapa, dando-nos força e incentivos para não desistirmos. Desejo sucesso e que obtenham êxito em suas vidas!

Aos colegas de laboratório e amigos Valdir, Fernando, Maurício, Roberta Pedro, Mateus, Fernanda, Évelyn, Cléber, Lucas e Eduardo Druzian, pelo acolhimento que recebi de cada um de vocês quando ingressei na UFSM e durante todo percurso, por todos os conhecimentos compartilhados e ajuda na realização dos ensaios. Em especial, ao amigo Valdir, por ter contribuído para que pudesse me familiarizar com o laboratório desde o início, sendo prestativo em todos os momentos em que precisei. Que tenham muito sucesso e prosperidade em suas vidas!

Aos colegas e amigos Chaveli e Sílvia, pela linda amizade construída e por toda ajuda prestada para que pudéssemos realizar os nossos ensaios de Módulo Complexo. Levarei a amizade de vocês para sempre e desejo que sejam muito felizes e alcancem todos os seus objetivos!

A todos os integrantes do grupo GEPPASV, em especial à Karlla, Gustavo e Antônio Daniel, pela dedicação e prestatividade de cada um de vocês, vocês foram fundamentais para a conclusão desta pesquisa. A todos os Geppasvianos, meu muitíssimo obrigada!

Ao LMCC, PPGEC e à UFSM por todo o suporte e disponibilização de pessoal e equipamentos, em especial à Marília, por toda dedicação e ajuda durante o período de estudo.

À CAPES pelo suporte financeiro, através da bolsa disponibilizada no decorrer de todo o mestrado.

À Petrobrás/ANP e a Rede de Asfalto pelo aporte financeiro na compra de equipamentos utilizados na pesquisa.

À empresa Triunfo Concepa, Compasul, Carpenedo e Cia Ltda e a MeadWestvaco Corporation/RJ pela disponibilização dos materiais necessários à pesquisa.

Enfim, a todos os amigos que estiveram presentes e que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MORNAS COM USO DE LIGANTES CONVENCIONAL E MODIFICADO POR POLÍMERO

AUTORA: KÁTIA ALINE BOHN
ORIENTADOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT

A crescente preocupação com o meio ambiente, nos últimos anos, desperta o estudo de novas tecnologias no ramo da pavimentação. Tecnologias menos poluentes, que minimizem a degradação do ambiente e que busquem atender as medidas de sustentabilidade são o fio condutor de muitas pesquisas desenvolvidas atualmente. Dentro deste contexto, a reciclagem de pavimentos surgiu como alternativa de reduzir a quantidade de agregados virgens necessários em novos pavimentos, e reaproveitar esse material de grande valor econômico, que antes era deposto sobre o meio ambiente, sem reutilização adequada. Buscando atender às premissas do Protocolo de Kyoto, de 1997, surgiram as misturas asfálticas mornas, que trouxeram uma série de benefícios, se comparadas às misturas convencionais a quente, permitindo a redução das temperaturas de usinagem e compactação usualmente empregadas, além da redução do consumo energético, diminuição da emissão de poluentes e melhoria nas condições de trabalho dos operadores. Dessa forma, tem início o estudo das misturas asfálticas recicladas mornas, as quais aliam a inserção do material reciclado de pavimento com a tecnologia das misturas mornas, obtendo um ganho expressivo na quantidade de material a ser inserido em novas massas asfálticas, devido ao menor reaquecimento do material fresado. Com esse intuito, o objetivo da presente pesquisa foi realizar um estudo sobre misturas asfálticas recicladas mornas, utilizando ligantes convencional CAP 50/70 e modificado por polímero CAP 60/85. Estudaram-se quatro misturas asfálticas por ligante, entre misturas convencional a quente (referência), morna (sem fresado), e morna com 25 e 50% de fresado (em substituição à massa total de agregados virgens), totalizando em oito misturas pesquisadas. Após dosadas pela metodologia Superpave e analisadas suas propriedades volumétricas e de densificação, as amostras foram avaliadas quanto às propriedades de resistência (resistência à tração por compressão diametral e *Flow Number*), deformabilidade (módulo de resiliência e módulo complexo) e adesão e coesão (*Lottman* modificado e resistência ao desgaste cântabro). Os principais resultados apontaram que o desempenho das misturas asfálticas mornas é equivalente às convencionais a quente. Existe também uma melhora significativa para as misturas com fresado incorporado, ressaltando os ganhos obtidos no ensaio de *Flow Number*, que cresce expressivamente à medida em que se aumenta o teor de fresado da mistura, assim como, os resultados de adesão e coesão, através do ensaio *Lottman* modificado, que se mostraram positivos, provavelmente, devido ao fresado utilizado na presente pesquisa dispor de ligante envelhecido modificado com polímero (CAP 60/85) em sua composição. Quanto às misturas com ligante modificado, é possível afirmar que existe uma expressiva melhora de desempenho quando comparadas às misturas com ligante convencional.

Palavras-Chaves: Fresado, reciclagem de pavimentos, mistura asfáltica morna, misturas asfálticas recicladas mornas, asfaltos modificados por polímeros

ABSTRACT

EVALUATION OF RECYCLED WARM ASPHALT MIXTURES USING CONVENTIONAL AND POLYMER MODIFIED BINDERS

AUTHOR: KÁTIA ALINE BOHN
ADVISOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT

The growing concern with the environment, in recent years, awakens the study of new technologies in the field of paving. Less polluting technologies that minimize the degradation of the environment and that seek to meet sustainability measures are the guiding principle of many researches currently developed. Within this context, pavement recycling emerged as an alternative to reduce the amount of virgin aggregates needed in new pavements, and to reuse this material of great economic value, which was previously deposited on the environment, without adequate reuse. In order to meet the requirements of the Kyoto Protocol of 1997, warm asphalt mixtures have emerged, which have brought a number of benefits when compared to conventional hot mixes, allowing the reduction of the machining and compacting temperatures usually employed, as well as the reduction of consumption decreasing the emission of pollutants and improving the working conditions of operators. Thus, the study of the warm recycled asphalt mixtures begins, which combine the insertion of the recycled pavement material with the technology of the warm mixtures, obtaining an expressive gain in the amount of material to be inserted in new asphalt masses, due to the lower reheating of the milled material. The aim of the present study was to conduct a study on warm recycled asphalt mixtures using conventional binders CAP 50/70 and modified by polymer CAP 60/85. Four asphalt mixtures were studied per binder, between conventional hot mix (reference), warm (no milling), and warm mixtures with 25 and 50% milling (replacing the total mass of virgin aggregates), totaling in eight blends surveyed. After being dosed by the Superpave methodology and analyzed for its volumetric and densification properties, the samples were evaluated for tensile strength (tensile strength by diametral compression and Flow Number), deformability (modulus of resilience and complex modulus) and adhesion and cohesion (Lottman Modified and wear resistance). The main results indicated that the performance of the warm asphalt mixtures is equivalent to the conventional hot mixes. There is also a significant improvement for blends with embedded milling, highlighting the gains obtained in the Flow Number test, which grows significantly as the milling content of the blend increases, as well as the results of adhesion and cohesion through Modified Lottman test, which proved to be positive, probably due to the milling used in the present research to have modified polymer binder (CAP 60/85) in its composition. As for the modified binder mixtures, it is possible to affirm that there is an expressive improvement of performance when compared to the mixtures with conventional binder.

Keywords: Milling, pavement recycling, warm asphalt mix, warm recycled asphalt mixtures, polymer modified asphalts

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de Usina <i>Drum-Mixer</i> , para produção de misturas recicladas....	40
Figura 2 - Etapas de envelhecimento do ligante asfáltico	43
Figura 3 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados)	48
Figura 4 - Resumo da história das misturas asfálticas mornas	51
Figura 5 - Aditivo sob a forma de pastilha adicionado a mistura asfáltica	56
Figura 6 - Aditivo surfactante agindo como melhorador de adesividade	57
Figura 7 - Sistema de mistura da água e ligante da usina de asfalto	62
Figura 8 - Diferença de emissões de fumos de asfalto em pista entre mistura morna (à direita) e mistura a quente (à esquerda).....	65
Figura 9 - Gráfico comparativo entre mistura quente e mistura morna quanto à emissão de HPA.....	66
Figura 10 - Consumo de energia e de emissão de gases durante a produção de misturas asfálticas	67
Figura 11 - Diminuição dos fumos (%) em relação a redução de temperatura (°C) ..	68
Figura 12 - Toneladas de WMA produzidas na Noruega, durante os últimos anos...	76
Figura 13 - Material fresado utilizado na pesquisa	90
Figura 14 - Curva granulométrica do material fresado, com e sem betume, utilizado na pesquisa	92
Figura 15 - Localização da pedreira da Concessionária Triunfo Concepa, às margens da BR 290 - Km 30, em Santo Antônio da Patrulha/RS	94
Figura 16 - Agregados virgens utilizados: a) brita 3/4"; b) brita 3/8"; e, c) pó de pedra	95
Figura 17 - Curvas granulométricas dos materiais pétreos e fresado utilizados na pesquisa	96
Figura 18 - Aditivo químico surfactante Evotherm® M1	99
Figura 19 - Composições granulométricas das misturas asfálticas em estudo, adotando fresado como " <i>black rock</i> "	104
Figura 20 - Composições granulométricas das misturas asfálticas em estudo, adotando fresado como agregado comum, sem ligante asfáltico.....	105
Figura 21 - Curvas de viscosidade dos ligantes CAP 50/70 e CAP 60/85 sem e com adição de 0,5% de Evotherm®.....	107
Figura 22 - Processo de usinagem das misturas asfálticas estudadas com o InfraTest	110
Figura 23 - Compactador Giratório Superpave, equipamento do laboratório LMCC, e amostras dos corpos-de-prova moldados para ensaio.....	111
Figura 24 - Teor de ligante adicionado e total das misturas estudadas, de acordo com as dosagens Superpave	116
Figura 25 - Parâmetros de densificação CDI para todas as misturas estudadas	118
Figura 26 - Parâmetros de densificação TDI _m para todas as misturas estudadas .	118

Figura 27 - Corpos-de-prova condicionados a 25°C e após ensaiados na prensa RT	123
Figura 28 - Condicionamento a 60°C das amostras, na câmara da UTM - 25 e execução do ensaio de FN	125
Figura 29 - Ensaio de MR realizado no equipamento UTM-25	127
Figura 30 - Condicionamento das amostras, fixação dos pinos, montagem do ensaio e tela do <i>software</i> utilizado para o ensaio de E*	128
Figura 31 - Execução do ensaio de <i>Lottman</i> Modificado para o grupo de amostras condicionadas (primeiro grupo).....	131
Figura 32 - Corpos-de-prova submetidos ao equipamento Abrasão Los Angeles, do LMCC, para realização do ensaio de Cântabro	132
Figura 33 - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C, em função do teor de fresado	136
Figura 34 - Resistência à Tração das misturas estudadas com os limites das normas do DNIT e DNER	136
Figura 35 - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C, em função do teor de ligante adicionado	137
Figura 36 - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C, em função do teor de ligante total.....	138
Figura 37 - Corpos-de-prova sendo ensaiados para determinação do <i>Flow Number</i>	141
Figura 38 - Resultados do ensaio de <i>Flow Number</i> a 60°C em função do teor de fresado.....	142
Figura 39 - <i>Flow Number</i> das misturas estudadas com os limites mínimos propostos por Nascimento (2008)	143
Figura 40 - Resultados do ensaio de <i>Flow Number</i> , a 60°C, em função do teor de ligante adicionado	144
Figura 41 - Resultados do ensaio de <i>Flow Number</i> , a 60°C, em função do teor de ligante total.....	145
Figura 42 - Comparativo dos resultados do ensaio de <i>Flow Number</i> das misturas estudadas com as de Schuster (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Oliveira (2013), em escala log-log	147
Figura 43 - Correlação de FN, a 60°C, com os resultados de TDIm.....	148
Figura 44 - Correlação de FN, a 60°C, com a proporção AG, adotando fresado “ <i>black rock</i> ”.....	149
Figura 45 - Correlação de FN, a 60°C, com a proporção AG, adotando fresado sem ligante, como agregado comum.....	149
Figura 46 - Correlação entre a porosidade FAD e o FN, considerando fresado como “ <i>black rock</i> ”	151
Figura 47 - Correlação entre a porosidade FAD e o FN, considerando fresado sem ligante, como agregado comum.....	151
Figura 48 - Resultados de Módulo de Resiliência a 10°C em função da frequência de carregamento.....	155

Figura 49 - Resultados de Módulo de Resiliência a 25°C em função da frequência de carregamento	156
Figura 50 - Resultados de Módulo de Resiliência a 35°C em função da frequência de carregamento	157
Figura 51 - Módulo de Resiliência das mistura estudadas, a 25°C e 10Hz, com os limites propostos por Bernucci <i>et al.</i> (2006)	158
Figura 52 - Correlação de MR, a 25°C e 10Hz, com os resultados de <i>Flow Number</i>	160
Figura 53 - Isoterma de $ E^* $ a 21°C	162
Figura 54 - Isoterma de ϕ a 37°C.....	162
Figura 55 - Isócrona de $ E^* $ a 10,0Hz	163
Figura 56 - Isócrona de ϕ a 10,0Hz.....	163
Figura 57 - Comparação das linhas de tendência lineares das curvas $\log [a(T)]$ para todas as misturas (@20°C)	165
Figura 58 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Convencional CAP 50/70	166
Figura 59 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Convencional CAP 50/70	166
Figura 60 - Espaço Cole Cole, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D	168
Figura 61 - Diagrama Black, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D	169
Figura 62 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico para todas as misturas (@20°C).....	172
Figura 63 - Curvas mestras de Ângulo de Fase para todas as misturas (@20°C) ..	174
Figura 64 - Comparativo das curvas mestras de Módulo Dinâmico (@20°C) desta pesquisa com Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015).....	176
Figura 65 - Comparativo das curvas mestras de Ângulo de Fase (@20°C) desta pesquisa com Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015).....	177
Figura 66 - Comparativo dos resultados de Módulo Dinâmico $ E^* $ desta pesquisa com Gennesseaux (2015)	179
Figura 67 - Inferência à fadiga à 21°C das misturas, em escala log-log	180
Figura 68 - Inferência à deformação permanente à 54°C das misturas, em escala log-log.....	182
Figura 69 - Inferência à deformação permanente à 37°C das misturas, em escala log-log.....	182
Figura 70 - Correlação <i>Flow Number</i> com a relação $E^*/\sin \phi$, na frequência de 0,01Hz	183
Figura 71 - Correlação <i>Flow Number</i> com a relação $E^*/\sin \phi$, na frequência de 0,1Hz	184
Figura 72 - Correlação <i>Flow Number</i> com a relação $E^*/\sin \phi$, na frequência de 1Hz	184

Figura 73 - Resultados do ensaio <i>Lottman</i> Modificado, realizado a 25°C, das misturas com CAP 50/70.....	186
Figura 74 - Resultados do ensaio <i>Lottman</i> Modificado, realizado a 25°C, das misturas com CAP 60/85.....	186
Figura 75 - Resultados da Resistência Retida à Tração do ensaio <i>Lottman</i> Modificado, realizado a 25°C, em função do teor de fresado.....	188
Figura 76 - Resistência Retida à Tração das misturas estudadas com os limites propostos por Hicks (1991) e pela Metodologia Superpave.....	188
Figura 77 - Resultados da Resistência Retida à Tração do ensaio <i>Lottman</i> Modificado, realizado a 25°C, em função do teor de ligante adicionado.....	189
Figura 78 - Resultados da Resistência Retida à Tração do ensaio <i>Lottman</i> Modificado, realizado a 25°C, em função do teor de ligante total.....	190
Figura 79 - Comparativo dos resultados da Resistência Retida à Tração das misturas estudadas com as de Centofante (2016), com os limites de Hicks (1991) e pela Metodologia Superpave.....	191
Figura 80 - Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de desgaste por perda de massa Cântabro.....	194
Figura 81 - Resultados do ensaio de Resistência ao Desgaste por perda de massa Cântabro, realizado a 25°C, em função do teor de fresado.....	195
Figura 82 - Resistência ao Desgaste Cântabro das misturas estudadas com o limite da norma DNER - ES 386/99.....	196
Figura 83 - Resultados do ensaio de Resistência ao Desgaste por perda de massa Cântabro, realizado a 25°C, em função do teor de ligante adicionado..	196
Figura 84 - Resultados do ensaio de Resistência ao Desgaste por perda de massa Cântabro, realizado a 25°C, em função do teor de ligante total.....	197
Figura 85 - Proporção de efeito do uso de misturas asfálticas recicladas mornas .	200

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Milhões de toneladas de misturas WMA produzidas entre 100 a 150°C..	49
Tabela 2 - Aditivos mais empregados para produzir misturas asfálticas mornas	54
Tabela 3 - Resumo das principais tecnologias de produção de misturas asfálticas mornas	55
Tabela 4 - Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) relativa à produção de misturas quentes e mornas, à disponibilidade de RAP e sua utilização em novas misturas.	73
Tabela 5 - Número de amostras necessárias, de acordo com os ensaios realizados na pesquisa, para cada mistura asfáltica estudada.....	89
Tabela 6 - Resultados da granulometria do fresado com e sem betume	91
Tabela 7 - Resultados obtidos através do ensaio de extração de betume	92
Tabela 8 - Resultado da densidade máxima medida do fresado.....	93
Tabela 9 - Resultados da granulometria dos materiais utilizados na pesquisa, agregados minerais juntamente com o fresado.....	95
Tabela 10 - Resultado dos ensaios de caracterização do agregado mineral	96
Tabela 11 - Especificação do CAP 50/70	97
Tabela 12 - Especificação do CAP 60/85 - STYLINK PG 76-22.....	98
Tabela 13 - Temperaturas de trabalho dos ligantes asfálticos	98
Tabela 14 - Propriedades do Evotherm® M1	100
Tabela 15 - Parâmetros das misturas dentro da especificação Bailey, adotando fresado como “black rock”	102
Tabela 16 - Parâmetros das misturas dentro da especificação Bailey, adotando fresado como agregado comum, sem ligante asfáltico.....	102
Tabela 17 - Composições granulométricas das misturas asfálticas	103
Tabela 18 - Porcentagem média passante (%) das misturas asfálticas, adotando fresado como “black rock”	103
Tabela 19 - Porcentagem média passante (%) das misturas asfálticas, adotando fresado como agregado comum, sem ligante asfáltico.....	105
Tabela 20 - Parâmetros de uso do Evotherm®	106
Tabela 21 - Resultados do Viscosímetro Brookfield para as amostras de ligantes CAP 50/70 e CAP 60/85 sem e com adição de 0,5% de Evotherm®	107
Tabela 22 - Temperaturas de mistura e compactação das misturas convencionais e mornas pesquisadas	108
Tabela 23 - Valores de densidade obtidos através do Rice para cada mistura asfáltica estudada.....	112
Tabela 24 - Requisitos volumétricos para as misturas dosadas pela metodologia Superpave	113
Tabela 25 - Parâmetros volumétricos e de densificação obtidos com as dosagens Superpave	116

Tabela 26 - Resultados da metodologia FAD nas misturas asfálticas estudadas, considerando fresado como “ <i>black rock</i> ” e como agregado comum, sem ligante	121
Tabela 27 - Valores médios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C.....	134
Tabela 28 - <i>Flow Number</i> , por corpo-de-prova, obtido pelo Modelo Francken e seus respectivos parâmetros.....	140
Tabela 29 - Influência do aumento do teor de fresado na melhora à deformação permanente das misturas em estudo.....	146
Tabela 30 - Valores de Módulo de Resiliência a 10°, 25° e 35°C	154
Tabela 31 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura	164
Tabela 32 - Parâmetros da modelagem 2S2P1D e valores de C1 e C2 das misturas de Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015)	175
Tabela 33 - Valores de Resistência Retida à Tração para o ensaio de <i>Lottman</i> Modificado.....	185
Tabela 34 - Valores do ensaio de Resistência ao Desgaste por perda de massa Cântabro	193
Tabela 35 - Resumo do efeito do uso de misturas asfálticas recicladas mornas....	200

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A, B, C e D	Parâmetros Modelo Francken
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Proporção de Agregados Graúdos
AMPT	<i>Asphalt Mixture Performance Tester</i>
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AR	Agente Rejuvenescedor
ARRA	<i>Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
ARE	Agente Rejuvenescedor Emulsionado
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
a[T]	Curvas Fator de Deslocamento Dependente da Temperatura
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
BR	Brasil
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CDI	<i>Compaction Densification Index</i>
CEC	Centro de Estudios Carreteras
CECA	Cecabase - Arkema Group
CGS	Compactador Giratório Superpave
CI	Componentes Intersticiais
cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo-de-Prova
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CV	Coeficiente de Variação
C1 e C2	Parâmetros do Modelo 2S2P1D
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem
DAT	<i>Dispersed Asphalt Technology</i>
DMM ou <i>Gmm</i>	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOTs	<i>United States Department of Transportation</i>
DP	Desvio Padrão
E*	Módulo Complexo
E*	Módulo Dinâmico
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EN	Norma Européia
ES	Especificação de Serviço

ESAL	<i>Equivalent Single Axle Load</i>
ET	<i>Emulsion Technology</i>
EUA	Estados Unidos da América
EVA	Polietileno-Vinil-Acetato
E1	Parte Real Módulo Complexo
E2	Parte Imaginária Módulo Complexo
FAD	Faixa de Agregados Dominantes
FAF	Proporção Fina de Agregados Finos
FAV	<i>Asphalt Producer Association in Norway</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos
FN	<i>Flow Number</i>
GAF	Proporção Graúda de Agregados Finos
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
g/cm ³	Grama por Centímetro Cúbico
h	Horas
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
HPA	Compostos Policíclicos Aromáticos
H ₂ S	Hidrocarbonetos
Hz	Hertz
IDOT	Departamento de Transportes de Illinois
INIR	Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP
kg	Quilograma
kPa	Quilopascal
LEA	<i>Low Energy Asphalt</i>
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
m	Metro
ME	Método de Ensaio
MEA	Massa Específica Aparente
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
MWV	<i>MeadWestvaco Asphalt Innovations</i>
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
NBR	Norma Brasileira
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
NLT	Norma Espanhola
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
Nproj	Número de Projeto
Pa.s	Pascal Segundo
PG	<i>Performance Grade</i> ou Grau de Desempenho

RAP	<i>Recycled Asphalt Pavement ou Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RAS	<i>Recycled Asphalt Shingles</i>
RBV	Relação Betume-Vazios
RRt	Resistência Retida à Tração
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RT'	Resistência à Tração (Ensaio <i>Lottman</i> Modificado)
SABITA	<i>Southern African Bitumen Association</i>
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SBR	Estireno-Butadieno-Rubber
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SINICESP	Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
SO ₂	Dióxido de Enxofre
TDI	<i>Traffic Densification Index</i>
TDIm	<i>Traffic Densification Index Modificado</i>
TLA	<i>Trinidad Lake Asphalt</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
TRA	<i>The Road Authority</i>
TSR	<i>Tensile Strength Ratio</i>
TTSP	<i>Time-Temperature Superposition Principle</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VI	Volume Intersticial
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis
Vv	Volume de Vazios
WLF	William, Landel e Ferry
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>
2S2P1D	<i>2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot</i>
3G	Terceira Geração
φ	Ângulo de Fase
°C	Grau Celsius
°	Graus
%	Porcentagem

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	21
1. INTRODUÇÃO	29
1.1. OBJETIVO GERAL	32
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
2.1. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	34
2.1.1. Material Fresado	34
2.1.2. Reciclagem a Quente	38
2.1.3. Limitações do RAP	42
2.2. MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS	46
2.2.1. Classificação das Misturas Asfálticas quanto à temperatura de produção	46
2.2.2. Breve histórico das misturas mornas	50
2.2.3. Técnicas de produção de misturas mornas	53
2.2.4. Benefícios da produção de misturas asfálticas mornas	63
2.2.5. Misturas Asfálticas Recicladas Mornas	72
2.3. ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMERO	82
3. METODOLOGIA	88
3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA	88
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	90
3.2.1. Material fresado	90
3.2.2. Agregados Minerais	93
3.2.3. Ligantes asfálticos e aditivo químico	97
3.3. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS	100
3.3.1. Ajuste Bailey e composição granulométrica das misturas asfálticas	100
3.3.2. Parâmetros de uso do aditivo químico	106
3.3.3. Parâmetros da dosagem Superpave e moldagens dos corpos-de-prova de ensaios das misturas asfálticas	109

3.3.4. Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD).....	119
3.4. ENSAIOS LABORATORIAIS	122
3.4.1. Propriedades de Resistência.....	122
3.4.1.1. Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	122
3.4.1.2. <i>Flow Number</i>	123
3.4.2. Propriedades de Deformabilidade.....	125
3.4.2.1. Módulo de Resiliência	125
3.4.2.2. Módulo Complexo	127
3.4.3. Propriedades de Adesão e Coesão.....	130
3.4.3.1. <i>Lottman</i> Modificado	130
3.4.3.2. Resistência ao Desgaste Cântabro	132
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	134
4.1. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA.....	134
4.1.1. Resistência à Tração por Compressão Diametral	134
4.1.2. <i>Flow Number</i>	139
4.2. PROPRIEDADES DE DEFORMABILIDADE	152
4.2.1. Módulo de Resiliência	152
4.2.2. Módulo Complexo.....	161
4.3. PROPRIEDADES DE ADESÃO E COESÃO	184
4.3.1. <i>Lottman</i> Modificado	185
4.3.2. Resistência ao Desgaste Cântabro.....	192
4.4. RESUMO DOS RESULTADOS	198
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	201
5.1. CONCLUSÕES.....	201
5.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	204
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	205
APÊNDICES.....	221

1. INTRODUÇÃO

Um pavimento pode ser definido como um sistema de múltiplas camadas semi-infinitas, destinado a distribuir os esforços verticais e horizontais oriundos do tráfego, proteger as camadas inferiores das intempéries e proporcionar aos usuários uma superfície segura e regular de maneira a permitir o deslocamento com conforto, segurança e economia (PAPAGIANNAKIS & MASSAD, 2008; BERNUCCI *et al.*, 2006, MEDINA & MOTTA, 2005).

Do total de 1,72 milhões de quilômetros de rodovias brasileiras, somente cerca de 12,3% deste montante são pavimentadas (CNT, 2016). Entretanto, ainda necessitam de muitas obras para melhoria das condições de trafegabilidade e segurança. Mesmo que os investimentos em infraestrutura de transportes estivessem em uma trajetória ascendente, até meados de 2014, eles ainda se apresentavam muito aquém da demanda existente, o que é evidenciado pela grande deficiência das rodovias brasileiras (CNT, 2015). A Confederação Nacional do Transporte - CNT (2016) relata a grande crise enfrentada pelo setor econômico do Brasil nesse último ano, e a enorme necessidade de recuperação desse cenário, com a volta de investimentos no setor rodoviário. Afirma ainda ser imprescindível assegurar a recuperação e a expansão da malha rodoviária para permitir um crescimento social e econômico com bases permanentes.

Nos últimos anos, vem crescendo expressivamente a preocupação com o meio ambiente, e o setor rodoviário tem buscado o desenvolvimento de novas tecnologias no campo da pavimentação. Ações que visam suprir as necessidades atuais dos seres humanos, sem comprometer a capacidade das próximas gerações em atender suas próprias necessidades, são princípios da sustentabilidade que começam a ser fortemente debatidos e medidas de maior preservação, com menos emissões de poluentes e redução de agressões ao meio ambiente como um todo, começam a ser adotadas, conforme determinação do Protocolo de Kyoto, em 1997.

Logo após a sua construção, os pavimentos rodoviários ficam sujeitos a ações diversas, climáticas e do tráfego, que contribuem continuamente para a sua degradação, diminuindo a sua qualidade inicial. Assim, o nível de serviço da rodovia onde o mesmo está inserido vai gradualmente diminuindo. Para se conseguir manter esse nível é necessário proceder a ações de conservação e/ou reabilitação do

pavimento, de modo a manter as suas características funcionais e estruturais ao longo do seu ciclo de vida. E dessa forma, devido aos grandes volumes de material antigo retirado dos pavimentos degradados, surge a necessidade de reincorporá-lo em novas massas asfálticas.

Objetivando um crescimento sustentável, há uma busca constante por novas matérias-primas e por meios de produção mais eficientes, que minimizem os desperdícios e os danos ambientais, contribuindo, dessa forma, para que os bens naturais não se esgotem. Nesse aspecto, as novas técnicas de pavimentação que vêm surgindo reduzem os impactos causados tanto pela construção e reabilitação, quanto pela operação de rodovias. A reciclagem de pavimentos aportou como alternativa de minimizar a quantidade de insumos virgens necessária em novas misturas asfálticas. Começaram assim os estudos sobre incorporação de resíduos em camadas de pavimentos, como escórias, fresado de pavimento, resíduos de construção e demolição, borracha de pneu, resíduos industriais, entre outros (CENTOFANTE, 2016; GENNESSEAU, 2015; MANGIAFICO, 2014; MERIGUI, 2014; SPECHT, 2004).

A técnica de reciclagem de pavimentos é bastante antiga e consiste em transformar um pavimento degradado em uma estrutura homogênea, adequadamente dimensionada para receber os esforços do tráfego, através da reciclagem a quente ou a frio, *in situ* ou em usina. É evidente que com o aumento do uso dessa tecnologia, e, conseqüentemente, com o aumento da quantidade de material fresado, foi necessário o desenvolvimento de processos que pudessem reutilizar tal material, tendo em vista que a simples estocagem do mesmo acarretaria em gastos financeiros desnecessários e que o descarte desse tipo material traria uma série de danos ao meio ambiente, além do enorme valor econômico que esse material ainda possui.

Nos últimos anos, o foco da indústria no exterior tem sido colocar uma maior quantidade de *Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP -, conhecido como material reciclado de pavimento, nas massas de asfalto (MANGIAFICO, 2014; PRADYUMA *et al.*, 2013; HUANG *et al.*, 2005). Este é um resultado decorrente da triplicação dos custos do ligante asfáltico, ocorrido durante a última década, que surgiu em um momento de financiamento extremamente difícil para a construção e manutenção de estradas. A maior parte dos estudos incorporam até 40% de RAP no projeto de mistura a quente, e atualmente é considerado ainda como um alto teor de material reciclado

para se inserir em novas misturas, devido ainda existir deficiências, principalmente em relação ao envelhecimento do ligante contido no fresado. Porém, a busca por correntes tecnologias de ponta e o *know-how* podem permitir saltar as etapas intermediárias e tirar proveito de RAP, reciclando-o totalmente, o que já vem sendo estudado nos melhores centros de pesquisa do mundo (ZAUMANIS & MALLICK, 2014(a), 2014(b); ZAUMANIS *et al.*, 2014; ZHAO *et al.*, 2013; SHIRODKAR *et al.*, 2011; WEST *et al.*, 2009; BONAQUIST, 2007)

Como forma de atender as premissas do Protocolo de Kyoto, surgiu uma nova técnica chamada de *Warm Mix Asphalt - WMA* -, traduzida como mistura asfáltica morna. Essas misturas asfálticas mornas são aquelas produzidas a temperaturas intermediárias, ou seja, que não se encaixam na definição de misturas asfálticas frias (produzidas entre 25 a 55°C), nem nas semimornas (de 55 a 105°C) e também não são enquadradas na faixa das misturas asfálticas quentes (fabricadas entre 145 até 180°C). Sendo assim, são produzidas a temperaturas que variam na faixa de 105 a 145°C (D'ANGELO *et al.*, 2008).

A redução de temperatura na usinagem e compactação das misturas asfálticas mornas traz importantes benefícios relacionados ao meio ambiente e à qualidade da pavimentação, pois reduz o consumo energético, emite menos poluentes na atmosfera, reduz a exposição dos trabalhadores aos fumos, diminui o envelhecimento asfáltico, aumenta a possibilidade de se transportar as misturas asfálticas a maiores distâncias entre pista e usina e aplicar em locais de clima frio, além de trazer um grandioso benefício que é a implementação de maiores quantidade de material fresado, devido ao menor temperatura de produção das misturas (MEJÍAS SANTIAGO *et al.*, 2012; MELLO, 2012; MOREA *et al.*, 2012; MOTTA, 2011(a), 2011(b); SABITA, 2011; PENZ, 2010; OTTO, 2009; PROWELL & HURLEY, 2007; PROWELL *et al.*, 2007).

O princípio fundamental das misturas asfálticas mornas, com uso de aditivos surfactantes, está diretamente ligado a redução da tensão superficial entre agregado e ligante. Quando produzidas a temperaturas inferiores às tradicionais, as misturas asfálticas também atenuam de forma significativa a emissão de gases como o CO_2 , sendo este ponto de extrema importância, pois possibilita a instalação de usinas em locais anteriormente proibidos por questões ambientais. Além, da consequente

diminuição do consumo de energia, que é um grande benefício aos produtores de asfalto, trazendo redução do custo da tonelada de massa asfáltica.

Na busca pela sustentabilidade, a união da tecnologia apresentada pelas misturas mornas e a reinserção de maiores quantidades de RAP deu origem as misturas asfálticas recicladas mornas, uma das grandes áreas de estudo do ramo rodoviário na atualidade (GENNESSEAUX, 2015; ZUBARAN, 2014; OLIVEIRA, 2013; MOGAWER *et al.*, 2011). Através de pesquisas nos países europeus e norte-americanos, assim como em trabalhos já desenvolvidos no Brasil, pode-se perceber que implementação dessas misturas traz inúmeros ganhos, tanto para o meio ambiente, como para empreiteiras e trabalhadores desse setor, e vêm mostrando resultados promissores e satisfatórios.

Além do mais, ainda como aliado a aumentar cada vez mais o desempenho e qualidade das misturas asfálticas, há incremento do uso de ligantes modificados por polímeros nas misturas asfálticas recicladas. Por ser uma prática cada vez mais comum em vias de elevado volume de tráfego, os ligantes modificados têm como objetivo a melhoria das características reológicas desses materiais, principalmente em temperaturas extremas (ALMEIDA Jr., 2016; BARROS, 2014; HAJJ *et al.*, 2014; ONOFRE, 2012; PAGLIOSA, 2004)

As melhorias dos ligantes modificadores somadas às características das misturas asfálticas recicladas mornas podem trazer significativos ganhos para o ramo rodoviário e promover estradas mais sustentáveis, com a busca de maior qualidade aliada a maior preservação do meio ambiente.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é avaliar o comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas, utilizando ligantes convencional e modificado, a partir de ensaios em laboratório, analisando, principalmente, a influência do teor de fresado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, busca-se cumprir os seguintes itens com a presente pesquisa:

- Verificar o comportamento das misturas mornas em relação às convencionais (referência a quente), sob análise de ligante convencional e modificado por polímero, quanto às propriedades de dosagem, resistência, deformabilidade e adesão e coesão;
- Observar o comportamento de diferentes teores de material fresado, inseridos em misturas asfálticas mornas, quanto à dosagem, utilizando ligantes convencional e modificado por polímero;
- Analisar a influência do percentual de material fresado, em relação às propriedades de resistência, deformabilidade e adesão e coesão das misturas asfálticas mornas, e seus possíveis impactos causados no comportamento dos pavimentos, com uso de ligantes convencional e modificado por polímero.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como função abordar os principais assuntos relacionados ao embasamento teórico e a importância desta pesquisa. Inicialmente, apresenta-se a relevância de estudos sobre o material reciclado de pavimento e da necessidade de sua reutilização em maior escala, seguido de um breve histórico sobre misturas mornas e os ganhos, econômicos e ambientais, com a utilização da fusão dessas duas técnicas, dando origem as misturas asfálticas recicladas mornas. Por fim, enfatiza-se a melhoria de desempenho dos pavimentos com utilização de ligantes modificados por polímero nas misturas asfálticas.

2.1. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reciclagem de 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 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT, 2006). 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, além da diminuição dos custos com implantação.

2.1.1. Material Fresado

Um pavimento é projetado e construído para propiciar viagens confortáveis, seguras e econômicas, o que é determinado pela qualidade de sua superfície. Quando o revestimento não atende mais a essa finalidade, deve-se em ele intervir visando a sua restauração (BONFIM, 2011).

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, possibilitando o seu reaproveitamento, conforme Vasconcelos & Soares (2003).

Conceituando, a fresagem é a operação de corte, através de equipamento especial - fresadora -, de parte ou de todo o revestimento asfáltico existente em um trecho de via, ou até englobando outra camada do pavimento, como forma de restauração da qualidade à pista de rolamento ou como melhoria da capacidade de suporte (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Bonfim (2011) conceitua fresagem de pavimentos como sendo o corte ou desgaste de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada, através de processo mecânico realizado a quente ou a frio, visando à restauração do pavimento.

O material proveniente do corte de revestimento asfálticos tem sido designado de RAP - *Reclaimed Asphalt Pavement* - que, traduzido para o português, seria pavimento asfáltico recuperado (ZUBARAN, 2014).

De acordo com a NCHRP - *National Cooperative Highway Research Program - Report 452* (2001), o RAP é o velho pavimento asfáltico moído, retirado da faixa de rolamento. Este material pode ser reutilizado em novas misturas asfálticas pois seus componentes - ligante e agregados - ainda tem valor. Usando o RAP em misturas novas reduz-se a quantidade de material novo que precisa ser adicionado à mistura asfáltica, economizando assim, dinheiro e recursos naturais.

Além da reutilização dos agregados do pavimento degradado, propiciando uma diminuição da demanda de novos materiais e das respectivas distâncias de transporte, também pode-se reutilizar os ligantes asfálticos, pois o asfalto remanescente no pavimento antigo é um recurso valioso (DNIT, 2006). Todavia há uma ressalva para o asfalto, que devido ao seu envelhecimento, acaba perdendo algumas das suas propriedades originais, decorrentes dos fatores de oxidação e volatilização, mas que podem ser reestabelecidas combinadas com um asfalto novo ou adicionando um agente rejuvenescedor.

Corroborando com esta ideia, Bernucci *et al.* (2006) também falam a respeito da reciclagem, dizendo que os agregados de uma mistura envelhecida mantêm as suas características físicas e de resistência mecânica intactas. Porém, em contrapartida, o ligante asfáltico tem suas particularidades alteradas, pois se torna mais viscoso nessas condições.

Ratificando o que consta na NCHRP *Report 452* (2001), Pradyumna *et al.* (2013) também afirmam que um projeto executado corretamente com misturas

recicladas, pode ter um desempenho melhor ou semelhante aos de novas misturas asfálticas convencionais.

A reciclagem é mais uma opção de reabilitação de pavimentos degradados, e não se deve simplesmente reciclar porque é um cenário ecológico, mas sim, porque é tecnicamente adequado e dela derivam vantagens econômicas, tanto para as empreiteiras como para os órgãos administradores da rodovia, como relatam as disposições normativas de Portugal, segundo o INIR - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP - (2015).

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 e rápida liberação da pista (SPECHELT *et al.*, 2013).

Salienta-se a grande relevância da reciclagem: de que todo material triturado ou cortado pelas fresadoras pode ser reaproveitado, não estocando assim resíduos sobre o meio ambiente. Assunto este que é tão debatido num século onde as agressões ao ambiente buscam veemente serem controladas e contornadas com utilização de novas técnicas de reaproveitamento de materiais, em todas as áreas de trabalho.

De acordo com o DNIT (2006), a seleção da reciclagem, entre as diversas alternativas disponíveis para a restauração de um pavimento, depende de diversos fatores, entre eles:

- 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.

Nos dias atuais, como comenta Bonfim (2011), a fresagem de pavimentos asfálticos é uma técnica constantemente aplicada como parte de um processo de restauração de pavimentos deteriorados, buscando a solução de problemas tipicamente urbanos, a fim de evitar problemas como, por exemplo, o alteamento de calçadas e de drenagem pluvial, assim como a atenuação do efeito da propagação de trincas.

O processo de fresagem, segundo Bonfim (2011), teve início na década de 1970, motivado pela escassez dos materiais asfálticos e pela crise econômica internacional. No Brasil, de acordo com o mesmo autor, essa técnica foi utilizada, pioneiramente, na década de 1980, utilizando uma fresadora norte-americana na obra de restauração da Via Anchieta, no estado de São Paulo.

As fresadoras utilizam rolos especiais munidos de pontas (*bits*) cortantes, devido à presença de diamantes nas mesmas. Antes do uso das fresadoras, o material era extraído do pavimento com o auxílio de escarificadores.

Segundo Bonfim (2011), existem três tipos de fresagem:

- *Fresagem superficial*: conhecida como fresagem de regularização, destinada à correção de defeitos existentes na superfície do pavimento, não necessitando de posterior recapeamento da pista, uma vez que a textura obtida permite o rolamento de forma segura, porém sem muito conforto;
- *Fresagem rasa*: tipo de fresagem que atinge normalmente as camadas superiores do pavimento, em alguns casos, podendo chegar à camada de ligação, com corte médio em torno de 5 cm; utilizada na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais;
- *Fresagem profunda*: nesse tipo de tecnologia o corte atinge níveis consideráveis, podendo alcançar até a camada de sub-base do pavimento; utilizada em intervenções que objetivam o aspecto estrutural, seja por recomposição da estrutura do pavimento ou para a incorporação dos materiais do revestimento à camada de base.

A fresagem traz benefícios como a praticidade e a rapidez na execução dos serviços. Ela possibilita a manutenção dos greides originais da pista, evitando que se elevem quando da aplicação de um novo revestimento asfáltico. Também ajuda a corrigir ou alterar a inclinação da pista, assim como, nivela os tampões de ferro.

A técnica da fresagem dos pavimentos é apontada também como a melhor alternativa para aliviar o peso de estruturas que receberam sucessivos recapeamentos, sem ser retirado o revestimento anterior, como por exemplo, pontes e viadutos (OLIVEIRA, 2013).

Bonfim (2011) apresenta um estudo sobre a granulometria resultante do processo de fresagem de revestimentos asfálticos. O autor estudou dois trechos experimentais na mesma pista, onde um se apresentava mais trincado do que o outro. Esses trechos foram fresados adotando-se três profundidades de corte diferentes - 3, 5 e 8cm - combinadas com três velocidades de avanço da fresadora - 3, 6 e 10m/min - para análise da granulometria do material resultante. Foram realizados ensaios com e sem extração do CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo).

Com relação às curvas granulométricas obtidas, como conclui Bonfim (2011), a fresagem provoca um deslocamento das mesmas se comparadas às respectivas curvas originais. As curvas granulométricas obtidas com a extração do betume, ou seja, após a fresagem e sem grumos, são deslocadas para cima, tornando a curva mais fina. Isso ocorreu devido aos agregados terem seus tamanhos máximos nominais diminuídos, por causa da quebra dos mesmos após o processo de fresagem. O inverso ocorre com as curvas resultantes do material fresado sem a extração do betume. Como o material é analisado da maneira como resulta da fresagem, com os grumos, há um aumento no tamanho nominal dos agregados, o que faz com que a porcentagem de material passante em cada peneira seja menor. Sendo assim, há uma falta de finos, fato que se acentua com o aumento da velocidade de avanço da fresadora, fazendo com que a curva obtida se situe abaixo da curva original.

2.1.2. Reciclagem a Quente

Desde que a reciclagem tem sido considerada como uma alternativa viável para a restauração de pavimentos, a melhor opção viável para cada tipo de obra deve ser escolhida, conforme prescreve o DNIT (2006), em seu Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.

Bernucci *et al.* (2006) afirmam que a reciclagem pode ser efetuada de duas formas:

- a quente, utilizando CAP, agente rejuvenescedor (AR) e agregados fresados aquecidos (técnica utilizada no presente trabalho); ou,
- a frio, utilizando EAP (Emulsão Asfáltica de Petróleo), agente rejuvenescedor emulsionado (ARE) e agregados fresados à temperatura ambiente.

Nessa pesquisa adotar-se-á a técnica de reciclagem a quente. Essa técnica teve início na década de 1970, na Índia e Singapura, tornando-se mais importante após a crise econômica dessa década (VASCONCELOS & SOARES, 2003).

As normas que regem a reciclagem a quente são a DNIT - ES 033/2005 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico reciclado a quente na usina - e DNIT - ES 034/2005 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico reciclado a quente no local, respectivamente, especificações de serviço para concreto asfáltico reciclado a quente na usina ou no local (*in situ*). O produto final deve atender as condições de misturas asfálticas a quente que são destinadas às camadas de base, “binder” ou de rolamento.

Conforme afirma a ARRA - *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (1997), a reciclagem a quente “in situ” consiste no método onde o pavimento existente é aquecido e amolecido e, em seguida, escarificado/moído, até uma profundidade especificada. Além disso, apresenta como vantagens a eliminação de fissuras superficiais, bem como correção de afundamentos e rejuvenescimento de asfaltos envelhecidos. Nessa técnica, a interrupção do tráfego é mínima e os custos minimizados.

Já a reciclagem a quente feita em usinas, pode ser executada tanto nas usinas do tipo intermitente (centrais gravimétricas), como naquelas tipo tambor-misturador (*drum-mixer*) ou centrais volumétricas, como também podem ser chamadas. As usinas mais ocupadas no processo de reciclagem são as do tipo *drum-mixer*, porém, elas sofreram adaptações em relação ao modelo convencional para que o RAP não tenha contato direto com a chama, no processo de secagem do material.

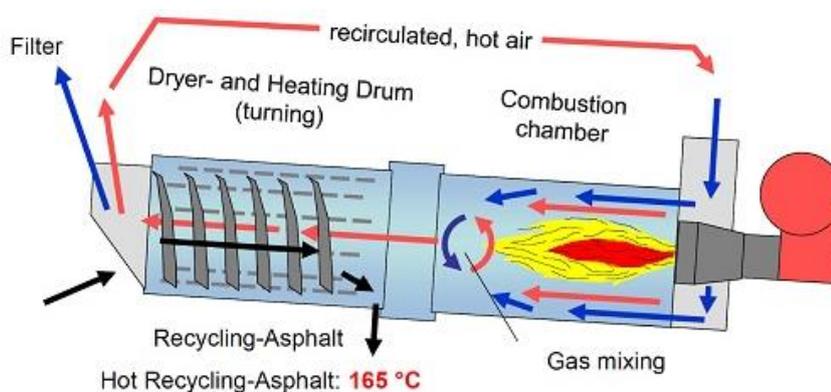
A sequência de desenvolvimento das misturas recicladas a quente, em usina fixa, seguem, geralmente, quatro etapas distintas, de acordo com o DNIT (2006):

- *Primeira etapa*: preparação do material, incluindo a remoção do pavimento asfáltico existente com posterior redução ou fragmentação até um tamanho adequado; tal redução pode ser feita removendo-se material da pista com posterior transporte para usina ou, ainda, a fragmentação do mesmo com preparo adicional, nas instalações de britagem, junto à usina;

- *Segunda etapa:* avaliação dos estoques, a fim de conhecer as características do material estocado, para estudo de mistura reciclada;
- *Terceira etapa:* processo de usinagem a quente, onde o principal objetivo consiste em algumas modificações 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;
- *Quarta etapa:* lançamento e compactação, a mistura será lançada e compactada como um concreto asfáltico normal, usando os procedimentos e equipamentos convencionais.

A Figura 1 mostra um exemplo de tambor para produção de misturas convencionais a quente, com utilização de material reciclado, da empresa Amman, modelo "RAH100". A planta utiliza um secador único que permite o aquecimento do RAP, sem contato direto com chama. Nesse sistema, o cilindro é instalado no topo da torre, e composto de dois tambores, sendo que o tambor externo gira em torno do tambor interno, e nele são aquecidos os materiais reciclados. O RAP é aquecido com ar quente e é descarregado antes de entrar em contato com a chama. Dessa forma, reduzem-se as emissões de gases e limita-se um maior envelhecimento do ligante contido no fresado.

Figura 1 - Exemplo de Usina *Drum-Mixer*, para produção de misturas recicladas



Fonte: Disponível em: http://www.ammann-group.com/fileadmin/ammann/syncfiles/International/images/ammann_asphalt_mixing-plant_brochure_en.pdf. Acesso em: 03 fev. 17.

Todavia, ainda é necessário grande empenho para que as usinas estejam preparadas a ponto que as misturas asfálticas recicladas sejam produzidas em maior escala, segundo Gennesseaux (2015, p.45):

O desenvolvimento da reciclagem em usina necessitou – e ainda requer – importantes investimentos por parte das empresas, para adaptar e complementar o material, desenvolver plataformas de estocagem para os materiais a serem reciclados, organizar os circuitos de coleta, estudar as dosagens, e colocar em prática os controles de qualidade adequados.

O aproveitamento do RAP não é apenas uma alternativa benéfica para o futuro, mas também é uma garantia econômica de competitividade para construção de pavimentos flexíveis, como dizia Al-Qadi (2007). Zubaran (2014) relata que devido ao crescente aumento dos preços de CAP e também às rígidas normas ambientais, é preciso maximizar a quantidade de RAP utilizada na construção ou reabilitação de pavimentos. Dessa forma, muitas pesquisas vêm sendo realizadas sobre o uso de altos teores de RAP nas misturas asfálticas, ainda comprometido devido ao envelhecimento do ligante antigo presente nesse material.

O país que se destaca na reciclagem a quente de pavimentos, sem dúvida, são os Estados Unidos (EUA). De acordo com a NAPA - *National Asphalt Pavement Association* - (2013), eram utilizadas, em média, 20% de RAP em misturas mornas ou a quente, em substituição ao agregado virgem. A evolução de uso de material reciclado, se comparado aos anos de 2009, 2010, 2011 e 2012 foi de, respectivamente, 56%, 62,1%, 66,7% e 68,3%. Conforme dados da NAPA (2014), a indústria de asfalto continua a ser a número um em reciclagem do país, reutilizando RAP, em pavimentos asfálticos, a uma taxa superior a 99%. Ainda de acordo com a associação, 100% dos empreiteiros relataram o uso de RAP em 2013, pelo menos em alguma de suas misturas, 2% a mais se comparada ao ano de 2012, quando 98% dos construtores de pavimentos dos Estados Unidos reportaram o uso de RAP em misturas asfálticas (NAPA, 2013).

Em quantidade, foram reaproveitados 67,8 milhões de toneladas em 2013, um aumento de 21% sobre a quantidade utilizada em 2009 (56 milhões de toneladas), porém, se comparado ao ano de 2012 (68,3 milhões de toneladas), houve redução de 1% sobre as toneladas utilizadas (NAPA, 2014). Supondo que tenha 5% de asfalto

líquido no RAP, representaria mais de 3,4 milhões de toneladas (19 milhões de barris) de ligante asfalto conservado, entre os anos de 2012 e 2013, nos Estados Unidos.

Além do mais os benefícios da reciclagem a quente ou morna incluem a economia de recursos naturais, reutilização de pavimentos deteriorados, redução de energia e emissões, em comparação com o concreto asfáltico convencional, e economia financeira, em função dos preços dos insumos (ZUBARAN, 2014). Adicionalmente a todos os benefícios supracitados, West *et al.* (2009) afirma que as misturas com RAP vêm apresentando comportamento tão bom quanto as com material virgem, destacando a importância de mais estudos sobre a inserção desse valioso material nos pavimentos asfálticos.

2.1.3. Limitações do RAP

Existem alguns obstáculos e cuidados quanto ao manejo do material reciclado de pavimento, apresentados, sucintamente, abaixo.

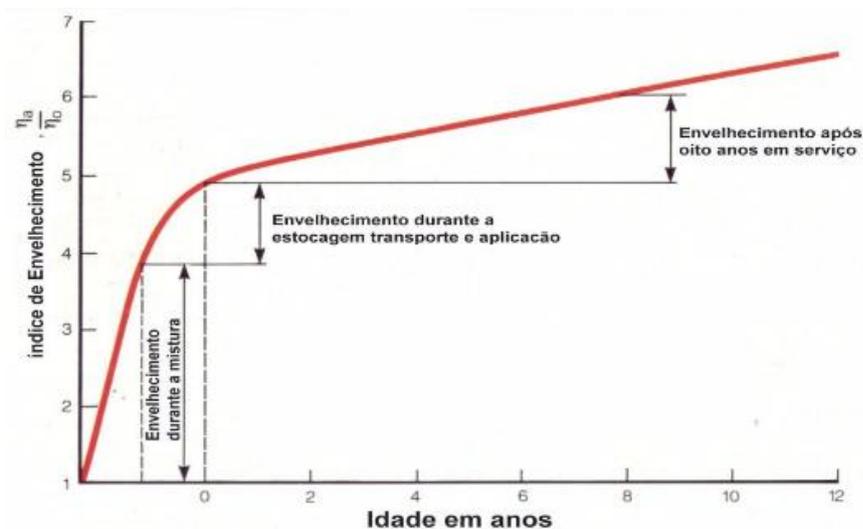
- *Envelhecimento do ligante asfáltico contido no RAP*

Um dos grandes problemas do envelhecimento é dado pelo endurecimento do ligante asfáltico. O ligante enrijecido é mais resistente a deformações permanentes, mas mais susceptível ao trincamento (BUDNY, 2012). Fisicamente, o envelhecimento de um ligante asfáltico é representado pelo aumento de sua viscosidade e ponto de amolecimento, diminuição da penetração e perda de suas propriedades aglutinantes (PINTO, 1991). O ligante envelhecido é também mais frágil, menos dúctil e mais elástico.

A Figura 2 evidencia a gravidade do fenômeno. O índice de envelhecimento é representado pela razão $\frac{\eta_a}{\eta_0}$, onde η_a representa a viscosidade em uma data de condição de envelhecimento e η_0 representa a viscosidade inicial do ligante asfáltico. Como apresentado na Figura 2, o envelhecimento do ligante asfáltico se dá em três etapas: a primeira ocorre durante a usinagem da mistura asfáltica e é responsável por 60% do envelhecimento; a segunda etapa ocorre durante a estocagem (comum em usinas de grande porte, mas não no Brasil), transporte, espalhamento e compactação,

sendo responsável por 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante; e por fim, a última etapa se dá durante a vida útil do pavimento, devido à ação do meio ambiente, e é responsável por 20% do envelhecimento do ligante (TONIAL, 2001).

Figura 2 - Etapas de envelhecimento do ligante asfáltico



Fonte: Adaptado de Whiteoak (1990)

- *Heterogeneidade do RAP*

Para misturas asfálticas com altos percentuais de reciclado (acima de 20%), é essencial a verificação da homogeneidade do RAP utilizado e necessários diversos controles. Conforme diz Genesseeux (2015), os problemas relacionados à heterogeneidade das misturas recicladas podem ser divididos em três grupos:

- heterogeneidade do RAP;
- grau de mistura entre o RAP e os novos materiais (escala macroscópica); e,
- grau de mistura entre o ligante do RAP e o novo ligante (escala microscópica), que pode não ter ocorrido caso o ligante asfáltico do RAP não tenha sido remobilizado.

O ligante asfáltico contido em uma mistura é distribuído entre os grãos de acordo com a superfície específica dos mesmos (relação entre a área total da

superfície dos grãos e sua massa). Dessa forma, a parte fina de uma mistura é mais rica em ligante que a parte mais graúda, devido a maior superfície específica dos finos (GENNESSEAU, 2015). Dessa forma, os erros de amostragem do RAP estão ligados não só ao esqueleto granular da mistura reciclada resultante, mas também ao teor de ligante final. Em vista disso, o destorroamento e o fracionamento do RAP podem proporcionar maior controle na dosagem da mistura reciclada, como relata a mesma autora.

De acordo com Valdés *et al.* (2011), o uso de 60% RAP na preparação de misturas é viável tecnicamente. Porém, é imprescindível caracterizar e manusear as pilhas de RAP adequadamente de modo a evitar misturas muito heterogêneas. A análise de amostras de RAP revela variabilidade no teor de ligante e na análise granulométrica, sendo superior para as frações graúdas. Portanto, utilizar RAP peneirado em várias frações e utilizar maior percentual de frações finas do RAP resulta em menor variação (VALDÉS *et al.*, 2011). Autores com Don Brock & Richmond (2007) também concordam com tal afirmação, alegando que a variabilidade no teor de ligante e na granulometria é reduzida por meio da preparação de misturas asfálticas usando RAP fracionado e estocado em montes por fração.

- *Superaquecimento do RAP*

Além da heterogeneidade, o aquecimento do RAP, em misturas asfálticas com taxas de fresado acima de 25%, também é motivo de limitações do seu uso. No processo de reciclagem, quando o RAP é incorporado em taxas reduzidas, seu aquecimento se dá por transferência de calor a partir do agregado natural para o RAP. Em taxas elevadas, esse procedimento torna-se inviável energeticamente, pois se deve superaquecer o agregado natural (acima de 250°C ou mesmo 300°C), de acordo com Gennesseaux (2015). Além disso, este superaquecimento pode degradar superficialmente certos tipos de agregados, de origem calcária, por exemplo, produzindo ultrafinos (BROUSSEAUD, 2011).

A questão da temperatura de aquecimento dos componentes da mistura requer adaptações nas usinas, de modo a aumentar a produtividade e reduzir o envelhecimento do ligante durante a usinagem. As modificações a serem efetuadas podem ser a partir da construção de usinas *Drum-Mixer*, do tipo contra fluxo, ou

através do aquecimento do material fresado por microondas, ou ainda, pela separação do RAP em frações, para maior controle da graduação e do aquecimento seletivo do mesmo (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Como alternativa de incorporar maiores porcentagens de RAP nas misturas asfálticas pode ser utilizada a técnica de misturas asfálticas mornas, pois as mesmas reduzem a temperatura de usinagem e compactação de 30° a 50°C. Essa redução também induz a diminuição do consumo de energia durante o processo de reciclagem, enfim, da produção das massas asfálticas como um todo.

- *Remobilização do ligante do RAP*

Conforme Doyle & Howard (2010) mencionam em seu trabalho, existem três posições conceituais nas quais pode-se encaixar as misturas asfálticas que contém RAP em sua composição:

- *Agregado negro ou “Black Rock”*: considera que todo o RAP atua como um agregado normal dentro da mistura reciclada, e que 0,0% do ligante é remobilizado;
- *Mistura completa*: considera que ocorre uma mistura completa entre o ligante do RAP e o ligante asfáltico virgem adicionado, ou seja, todo o ligante contido no RAP se torna fluido, sendo remobilizado durante a reciclagem;
- *Parcialmente utilizado*: uma parte do ligante proveniente do RAP é reutilizado na nova mistura asfáltica, levando-se em consideração diversos fatores, como as propriedades de envelhecimento do ligante, a temperatura, o tempo de envelhecimento e os aditivos.

A especificação Superpave, através dos preceitos da norma AASHTO M 323-13 - *Superpave Volumetric Mix Design*, não recomenda modificações para projetos de misturas com menos de 15% de RAP. Entre teores de 15% e 25% de RAP incorporado, a especificação aconselha o uso de um ligante virgem com baixa viscosidade. Para a incorporação de RAP em quantidades superiores a 25%, a norma sugere o uso de gráficos de mistura (*blending charts*), com o objetivo de indicar o grau

de desempenho (PG) que o ligante virgem deve apresentar para ser utilizado na mistura reciclada.

Doyle & Howard (2010) mostram que de 67 a 87% do total de ligante antigo, proveniente do RAP, é reutilizado na nova mistura, e que os materiais mais viscosos têm menores quantidades de ligante reutilizáveis. O estudo do autores mostrou que o uso de elevado teor de RAP em misturas mornas é viável, apesar de vários avanços serem necessários antes dessa utilização generalizada.

2.2. MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Nos últimos anos, muitos países vêm procurando novas alternativas que contribuam com as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, visto que se acredita que estes poluentes sejam os grandes responsáveis pelo aquecimento global. Nesse aspecto, a União Europeia começou a buscar novas maneiras de honrar tais metas, tendo sido este um grande propulsor para o surgimento das primeiras iniciativas de se produzir as chamadas misturas asfálticas mornas (GENNESSEAU, 2015).

2.2.1. Classificação das Misturas Asfálticas quanto à temperatura de produção

As misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com a temperatura empregada em sua produção, divididas basicamente em quatro grupos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio (MOTTA, 2011a). As misturas a quente são preparadas a partir do aquecimento dos agregados pétreos e do ligante asfáltico, sendo a usinagem executada em níveis elevados de temperatura, da ordem de 145° a 180°C (ASPHALT INSTITUTE, 2007; BROWN *et al.*, 2009; BERNUCCI *et al.*, 2006).

A mistura asfáltica mais utilizada no Brasil é o Concreto asfáltico (CA), ou também chamado de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Segundo as definições de Balbo (2007, p.168-170) o CBUQ é:

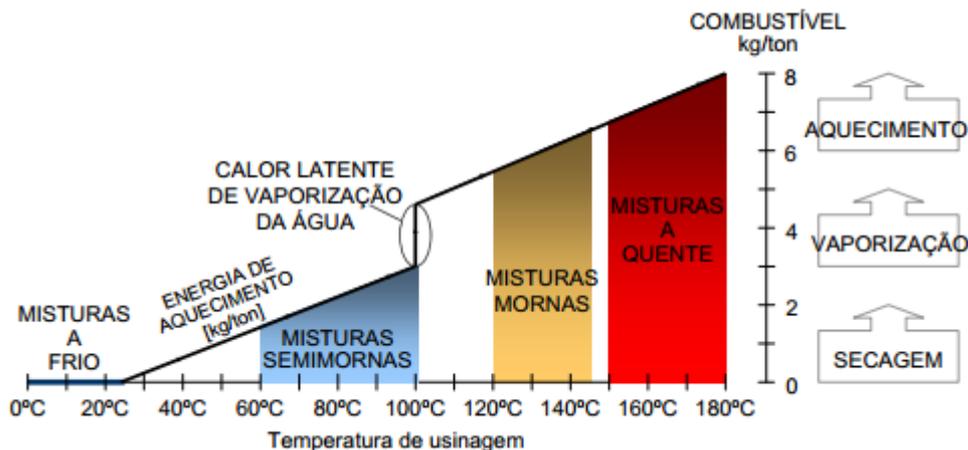
[...] um material para construção de revestimentos de pavimentos, incluindo as capas de rolamento e camadas de ligação imediatamente subjacentes aos revestimentos, obtido a partir da mistura e homogeneização de agregados minerais (naturais ou artificiais, britados ou em sua forma disponível), em geral bem graduados, de material fino de enchimento - fíler (pó-de-pedra, finos calcários ou cimento Portland) - e de cimento asfáltico de petróleo (CAP). Trata-se de uma mistura elaborada a quente, em usina misturadora (central de usinagem), contínua ou descontínua, de grande, médio ou pequeno porte.

As misturas preparadas em temperaturas intermediárias às das misturas a quente e a frio são denominadas de misturas semimornas e mornas. As misturas asfálticas semimornas diferem da mistura morna pela temperatura de mistura, sendo que, se a temperatura de mistura em usina for abaixo de 105°C a mistura é considerada semimorna (BERNUCCI *et al.*, 2006).

As misturas asfálticas mornas são aquelas produzidas a temperaturas que não se encaixam na definição de misturas asfálticas frias, as quais são as produzidas à temperatura ambiente, entre 25° a 55°C, e também não estão enquadradas na faixa das misturas asfálticas quentes. As misturas asfálticas mornas são produzidas a temperaturas intermediárias, em uma faixa que varia de 105° a 145°C, conforme Bernucci *et al.* (2006).

A crescente preocupação em se produzir misturas asfálticas com maior economia e menor impacto ambiental tem instigado o setor de pavimentação ao desenvolvimento de novas tecnologias que mantenham as mesmas propriedades das misturas asfálticas convencionais quentes e que minimizem os impactos ambientais. Conforme o nível de aquecimento no processo de usinagem, há variação da energia consumida (combustível), como ilustrado na Figura 3, onde apresenta-se a classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem. Nota-se também, que nos processos anteriores, de secagem e vaporização da água, demandam grande quantidade energética para serem efetuados, mostrando a grande economia gerada com as misturas mornas se comparado as misturas quentes.

Figura 3 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados)



Fonte: D'Angelo *et al.* (2008) e Olard (2008), adaptado por Motta (2011a)

Misturas asfálticas mornas ou *Warm Mix Asphalt* (WMA) são misturas asfálticas produzidas em temperaturas mais baixas, que reduzem o gasto com combustível, as emissões de gases poluentes e a exposição dos trabalhadores aos fumos durante a usinagem ou aplicação da mistura. O emprego de misturas mornas também viabiliza a incorporação de maiores quantidades de resíduos provenientes da fresagem de pavimentos asfálticos às misturas recicladas (BARTHEL *et al.*, 2004; PROWELL *et al.*, 2007).

As misturas asfálticas mornas também podem ser produzidas com asfaltos modificados por polímero e com material fresado de revestimento (D'ANGELO *et al.*, 2008), intensificando muito os estudos e importância dessa nova tecnologia, pois alia melhor desempenho dos pavimentos com menor agressão ao meio ambiente.

A tecnologia é recente e está sob constante estudo no Brasil. De acordo com Cavalcanti (2010, p.56):

As expressões asfalto morno ou mistura morna têm sido usadas no Brasil para representar a sigla WMA (Warm - Mix Asphalt) que agrupa uma série de tecnologias que permite a redução de temperatura na qual as misturas asfálticas são produzidas e aplicadas. Estas tecnologias permitem a diminuição da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas de 20° a 55°C mais baixas que a temperatura das misturas quentes. Assim há melhoria na trabalhabilidade e na compactação, há redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante, que é responsável pelo melhor desempenho em termos de trincas e suscetibilidade da mistura.

De acordo com a *European Asphalt Pavement Association - EAPA - (2014)*, as misturas asfálticas mornas operam acima de 105°C, sendo várias técnicas usadas para reduzir a viscosidade efetiva do ligante e permitir o revestimento completo dos grãos da mistura e compactabilidade a temperaturas mais baixas. A EAPA publicou dados, conforme Tabela 1, com as milhões de toneladas de WMA produzidas em seus países, misturas produzidas com técnica especial e/ou com uso de aditivos, que foram usinadas entre 100 a 150°C, mostrando o aumento expressivo da técnica WMA pelo mundo.

Tabela 1 - Milhões de toneladas de misturas WMA produzidas entre 100 a 150°C

País	Milhões de Toneladas de WMA		
	2013	2014	2015
Áustria	0,000	0,000	0,000
Bélgica	Sem dados	Sem dados	<0,050
Croácia	0,000	0,040	0,060
República Tcheca	0,030	0,001	0,020
Dinamarca	0,120	0,200	0,200
Estônia	Sem dados	Sem dados	0,008
Finlândia	0,000	0,120	0,240
França	3,550	4,023	4,552
Grã-Bretanha	<1,000	<1,000	Sem dados
Hungria	0,020	0,038	0,070
Luxemburgo	0,000	0,007	0,007
Países Baixos	0,060	0,133	0,100
Noruega	0,380	0,540	0,592
Eslováquia	Sem dados	Sem dados	0,014
Eslovênia	0,000	0,000	0,000
Espanha	0,086	0,140	0,140
Suécia	0,500	0,700	0,700
Suíça	0,870	0,388	Sem dados
Turquia	Sem dados	Sem dados	0,080
EUA	69,000	103,000	109,000
Japão	0,152	0,231	0,274
Ontário - Canadá	Sem dados	0,750	0,900
África do Sul	0,150	0,150	0,200

Fonte: EAPA - Asphalt in Figures (2015)

2.2.2. Breve histórico das misturas mornas

As primeiras pesquisas de análise à possibilidade de diminuir a temperatura de produção de misturas asfálticas foram realizadas no ano de 1956, onde o professor Csanyi, da Universidade do Iowa, avaliou o potencial da espuma de ligante asfáltico, formada através da introdução de vapor de água no betume quente, e que poderia ser utilizada como um ligante para solos (CHOWDHURY & BUTTON, 2008).

Após esse primeiro estudo, vários se sucederam até que o Protocolo de Kyoto fosse criado, e fizesse então intensificar a pesquisa sobre novas tecnologias, mais limpas, na Europa. Com o objetivo de adequar os procedimentos empregados pela indústria da pavimentação às premissas desse tratado internacional, criaram-se as misturas asfálticas mornas, no ano de 1997. A partir de então, diversos tipos de misturas asfálticas têm sido produzidas com a tecnologia das misturas mornas, na Europa e no mundo inteiro, como, por exemplo, as misturas de graduação densa, *Stone Matrix Asphalt* (SMA) e misturas porosas.

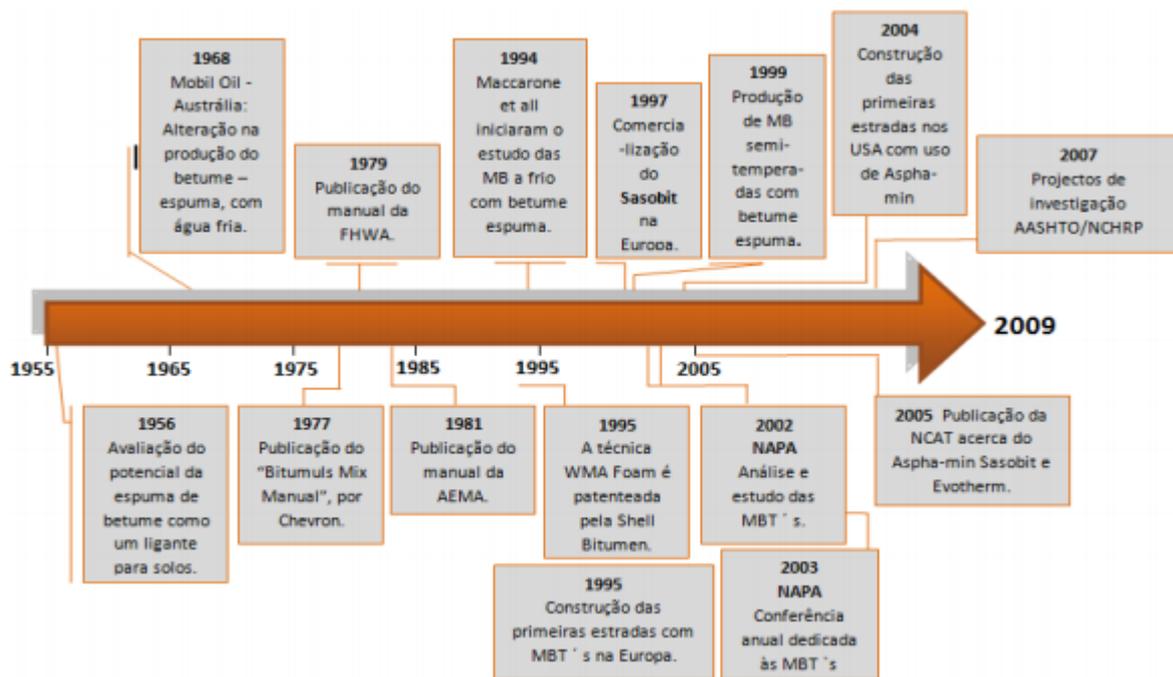
Já de acordo com Motta (2011a), o início dos estudos na União Europeia foi em 1996, quando o Ministério do Trabalho e das Relações Sociais alemão determinou limites de exposição para os trabalhadores expostos a fumos de asfalto.

Em 1997, teve início a comercialização do aditivo Sasobit® na Europa, pela empresa *Sasol Wax International* AG (CHOWDHURY & BUTTON, 2008). No mesmo ano, um programa denominado *Low Temperature Asphalt* é iniciado na Alemanha com a missão de investigar métodos para produção de misturas asfálticas às temperaturas mais baixas que aquelas produzidas a temperaturas convencionais a quente (BARTHEL *et al.*, 2004).

Em 2002, o tema passou a ser explorado nos Estados Unidos por um grupo de pesquisadores coordenados pela *Federal Highway Administration* - FHWA - em conjunto com a *American Association of State Highway and Transportation Officials* - AASHTO - e a *National Cooperative Highway Research Program* - NCHRP - (PROWELL *et al.*, 2007). Este tema se tornou, então, uma das maiores áreas de interesse no âmbito de materiais betuminosos, sendo considerada, por alguns estudiosos, um potencial para ser um dos mais importantes avanços da indústria de asfalto, durante os anos subsequentes (GENNESSEAU, 2015).

Em 2004, no “*World of Asphalt*” foram apresentados projetos e desenvolvimentos nesta área por diversas empresas e entidades rodoviárias. Desde então, nos Estados Unidos e na Europa, não mais se parou de estudar as vantagens da tecnologia de produção de misturas mornas (FERREIRA, 2009). A Figura 4 mostra um cronograma, montado pelo mesmo autor, sobre o histórico das misturas mornas.

Figura 4 - Resumo da história das misturas asfálticas mornas



Fonte: Ferreira (2009)

No Brasil, um dos primeiros trabalhos a respeito dessas misturas foi publicado, em 2006, por Sousa Filho (2006), através da dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Ceará (UFC), tendo como título “Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas”.

Muitos estudos já foram desenvolvidos abordando a temática WMA através da comparação do comportamento mecânico destas com misturas convencionais, por meio de ensaios mecânicos como: módulo de resiliência, módulo complexo, resistência à tração, desgaste Cântabro, resistência ao dano por umidade induzida, deformação permanente e fadiga. Os resultados apresentados pelos diversos autores concluem que, geralmente, não há comprometimento do dano por umidade induzida

e da deformação permanente das misturas mornas avaliadas, desde que as condições de níveis de redução de temperatura sejam bem controladas.

Rohde *et al.* (2008) relatam o uso de da adição de 0,3% de uma zeólita natural sobre o peso total de ligante mais agregado, com temperaturas de mistura entre 100°C e 120°C, e de compactação de 80°C a 100°C. Os resultados indicaram que as técnicas avaliadas por eles permitem adotar o WMA com temperaturas intermediárias ao redor de 100°C, tendo como produto final misturas asfálticas com características mecânicas compatíveis com as observadas para a mistura asfáltica a quente.

Otto (2009) estudou misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas. O autor concluiu que estas misturas apresentavam maior susceptibilidade ao efeito do dano por umidade induzida, valores de módulo complexo maiores do que da mistura convencional, contudo, o seu desempenho à fadiga foi muito inferior. Desta forma para uma mesma solicitação de carregamento, as misturas mornas deveriam ter camadas mais espessas.

Penz (2010) analisou as propriedades mecânicas de misturas mornas com adição de zeólitas sintetizadas a partir de resíduos da queima de carvão, e encontrou desempenho inferior se comparado às misturas convencionais, através de reduções de 70% nos resultados de RT (resistência a tração por compressão diametral) e de 55% nos de MR (módulo de resiliência). Todavia, obteve valores da razão MR/RT baixos, indicando que a mistura apresenta rigidez que evita elevadas tensões que poderiam levar ao trincamento, e também possui alta resistência à tração associada a uma maior resistência à fadiga.

Motta (2011a) realizou um estudo sobre a redução das emissões de poluentes e do consumo energético gerado pelas misturas mornas, mostrando que não há necessidade de alteração do método de dosagem convencional para as misturas mornas e que o mesmo teor de projeto pode ser utilizado. Os resultados também indicaram redução de cerca de três vezes do total de poluentes quando do uso de misturas mornas. Visualmente, a autora também constatou uma diminuição expressiva dos fumos de asfalto com a mistura morna em campo, além de significativa economia de consumo de combustível com a redução da temperatura de secagem e aquecimento dos agregados.

Budny (2012) também avaliou o comportamento mecânico de misturas WMA, através do processo de espumação. As misturas foram submetidas a ensaios de

resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga, dano por umidade induzida e resistência a deformações permanentes, através do ensaio de *Flow Number*, mostrando resultados distintos, dependente da mistura estudada. Porém, o autor concluiu que são satisfatórias as respostas dadas pelas misturas mornas, e que podem sim, serem usadas como alternativa a misturas asfálticas convencionais.

Wargha Filho (2013) estudou a influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas, na Universidade Federal do Ceará, utilizando CAP 50/70 e estudando três técnicas distintas de uso das misturas mornas. Pode-se dizer que todas as misturas modificadas se comportaram de forma semelhante àquela mistura produzida sem qualquer alteração no ligante ou na temperatura de produção e de compactação. Em virtude dos resultados observados é possível prever que as misturas asfálticas mornas terão uma forte participação na área de pavimentação a nível mundial, como citou o autor em sua conclusão.

Merigui (2014) pesquisou sobre revestimentos de pavimentos com misturas asfálticas mornas, com adição de borracha moída de pneu, executando pistas experimentais para análise a longo prazo do comportamento das misturas mornas e convencionais quente. Quanto aos parâmetros de desempenho do pavimento, como irregularidade e condições de superfície, os resultados mostraram que a mistura asfáltica morna, ao longo de três anos de observação, obteve resultados positivos.

Dentre todos os trabalhos supracitados, muitos outros já foram realizados ou estão em realização no Brasil e no mundo. Com base em todos os resultados encontrados, pode-se constatar a real grandiosidade dessa técnica e do ganho econômico e ambiental. Claro, que existem desvantagens, restrições e problemas quanto ao uso de misturas asfálticas mornas, que vêm sendo estudadas e desvendadas, mas que têm pouca relevância quando citadas as vantagens oferecidas.

2.2.3. Técnicas de produção de misturas mornas

Atualmente, existem diferentes tecnologias que objetivam reduzir a temperatura de usinagem das misturas asfálticas mornas. Perkins (2009) relata que

as misturas asfálticas mornas podem ser classificadas conforme o tipo de tecnologia empregada para reduzir a temperatura de trabalho. As WMAs são basicamente produzidas a partir de três tecnologias distintas: aditivos orgânicos/ceras, aditivos químicos/surfactantes, e, formação de espuma.

Budny (2012), em sua pesquisa, tabelou as principais referências em estudo de misturas asfálticas mornas, seus aditivos e processos empregados, assim como a redução da temperatura alcançada, apontando se o estudo foi feito experimentalmente em campo ou laboratório. Essa lista é apresentada na Tabela 2.

Um resumo, apresentado na Tabela 3, foi elaborado por Ferreira (2009), onde o autor lista as principais tecnologias existentes, no qual foram inseridos os principais produtos disponíveis, as empresas proprietárias das patentes e sua temperatura de produção. Atualmente, já existem novos produtos, que tem o mesmo objetivo, porém os mais usuais estão compilados na tabela citada.

Tabela 2 - Aditivos mais empregados para produzir misturas asfálticas mornas

Aditivo	Processo	Experimento (Campo C ou Laboratório L)	Redução de Temperatura (°C)	Referências
Sasobit	Aditivo Orgânico	C/L	20 a 40	Sampath (2010); Prowell & Hurley (2007); Zhang (2010); Hurley <i>et al.</i> (2009); Sullivan (2009)
Evotherm ET	Aditivo Químico	C/L	20 a 30	Zaumanis (2010); Sampath (2010); Prowell & Hurley (2007); Davidson (2008); Zhang 92010); Hurley <i>et al.</i> (2009)
Rediset WMX	Aditivo Químico	C/L	20 a 30	Zaumanis (2010); Kristjansdottir (2006); Sampath (2010)
Aspha-min	Espuma Indireta	L	até 50	Kristjansdottir (2006); Hurley <i>et al.</i> (2009)
WAM Foam®	Espuma	L	até 50	Kristjansdottir (2006)
Zeólita	Espuma Indireta	C/L	até 50	Prowell & Hurley (2007)
Advera Synthetic Zeolite	Espuma Indireta	C/L	até 40	Zhang (2010); Sullivan (2009)
Cecabase RT	Aditivo Químico	L	20 a 30	Sheth (2010)

Fonte: Adaptado de Budny (2012)

Tabela 3 - Resumo das principais tecnologias de produção de misturas asfálticas mornas

Tecnologia	Empresa proprietária da patente	Gama de temperatura de fabrico (°C)
ADITIVOS ORGÂNICOS		
Sasobit® (Ficher-Tropsch wax)	Sasol Wax GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170°C
Asphaltan B® (Cera de Montana, estéril de baixo peso molecular)	Romonta GmbH, Alemanha	
Licomont BS 100®	Clariant, Suíça	
ADITIVOS QUÍMICOS		
Rediset®	Akzo Nobel, Holanda	Redução de cerca de 15°C da temperatura referência das MBQ
Cecabase RT®	CECA, França	120-140°C
Interlow T®	Interchimica, Itália	120-140°C
Evotherm®	MeadWeastvaco, EUA	85-115°C
Revix® ou Evotherm 3G®	MeadWeastvaco Mathy-Ergon, EUA	130-140°C
ESPUMA DE BETUME COM MINERAIS SINTÉTICOS OU NATURAIS		
Aspha-Min® (Zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170°C
Advera® (Zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA	
Zeólito Natural	Vários	
ESPUMA DE BETUME POR INJEÇÃO DE ÁGUA		
WAM Foam®	Shell, UK, e Kolo-Veidekke, Noruega	110-120°C
Terez WMA System	Terex, EUA	130°C
Double-Barrel® Green	Astec Industries, EUA	121-135°C
LEA - Low Energy Asphalt (EBT® e EBT®)	LEA-CO (Joint-Adventure Eiffage/Fairco para divulgar a LEA). Nos EUA os direitos de utilização são da McConnaughay	<100°C
LT Asphalt® (LEA)	Nynas, Suécia	
LEAB®	Royal BAM Group, Holanda	110-115°C
Ultrafoam GX®	Gencor Industries, EUA	

Fonte: Adaptado de Ferreira (2009)

- *Aditivos orgânicos/ceras*

Quando misturados ao CAP, os aditivos orgânicos modificam as suas propriedades reológicas, diminuindo sua viscosidade em altas temperaturas. Diferentes tipos podem ser utilizados para baixar a viscosidade do ligante asfáltico, a

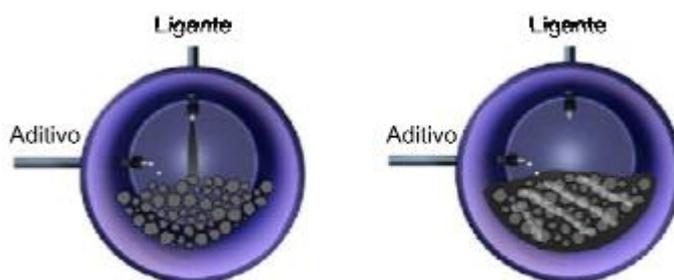
temperaturas acima de cerca de 90°C, que é o ponto de amolecimento das ceras (D'ANGELO *et al.*, 2008). Aditivos orgânicos normalmente dão uma redução de temperatura entre 20° a 30°C, ao mesmo tempo que também melhoram a resistência à deformação de asfalto modificado. Usualmente são constituídos de ceras e aminas gordas, as quais podem ser adicionadas quer à mistura, quer ao ligante.

São também conhecidos como “fíleres inteligentes” por promovem uma redução da viscosidade do CAP na temperatura de produção e compactação das misturas asfálticas e um aumento desta viscosidade na temperatura de serviço do revestimento. Croteau & Tessier (2008) afirmam que este fato é um benefício adicional específico para o sistema WMA, proporcionando assim o aumento da resistência à deformação permanente quando aplicadas a temperaturas de serviço elevadas. Porém, os mesmos autores relatam que existe uma investigação sobre o efeito benéfico/prejudicial da utilização de ceras nas propriedades do ligante, devida a estrutura química das ceras.

Um exemplo de aditivo orgânico é o Sasobit® que é uma cera parafínica, obtidas a partir da gaseificação do carvão na presença de um catalisador e tem como característica uma longa cadeia de hidrocarbonetos alifáticos de polimetileno (HURLEY & PROWELL, 2005). O Sasobit® é o aditivo orgânico mais utilizado nos EUA para WMA (MEJÍAS SANTIAGO *et al.*, 2012).

São comercializados em flocos ou em pastilhas, sendo que, quando utilizados em flocos, devem ser incorporados diretamente ao ligante, e, quando utilizados sob a forma de pastilhas, precisam ser adicionados à massa asfáltica (MELLO, 2012). A Figura 5 ilustra a adição de aditivo sob forma de pastilha.

Figura 5 - Aditivo sob a forma de pastilha adicionado a mistura asfáltica



Fonte: Motta (2011b apud MELLO, 2012)

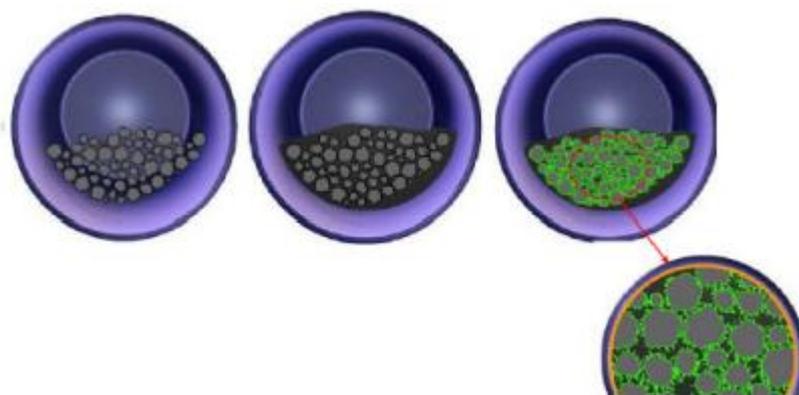
- *Aditivos químicos/surfactantes*

Os aditivos químicos não alteram a viscosidade do ligante asfáltico, agindo como tensoativos que modificam a tensão interfacial entre agregados e ligante. De acordo com Motta (2011a), os aditivos químicos podem reduzir as temperaturas de mistura e compactação em cerca de 30° a 40°C.

Zubaran (2014) relata que os esses aditivos se tratam de surfactantes ou ainda, de uma emulsão com alto teor de resíduo asfáltico. Ainda segundo o mesmo autor, por serem melhoradores de adesividade, eles podem ser amplamente utilizados para aumentar a adesão (ativa e passiva) entre a superfície do agregado (hidrófilo) e a superfície do asfalto (hidrofóbico).

Os aditivos químicos não alteram as propriedades de consistência do asfalto - viscosidade, penetração e ponto de amolecimento (MOTTA, 2011a). Zubaran (2014) diz que os aditivos mais conhecidos são o Evotherm® e o Rediset®. Além desses, o Revix® e o Cecabase RT® também são amplamente utilizados. Vale frisar que, o aditivo Cecabase RT®, de acordo com seu fabricante, melhora a trabalhabilidade e facilita a compactação da mistura quando da adição de taxas mais elevadas de RAP ou *Recycled Asphalt Shingles* (RAS), ponto relevante e de primordial importância, condizente a todas as técnicas de WMA. A Figura 6 apresenta um esquema de como se comportam as misturas asfálticas mornas quando da adição um aditivo surfactante.

Figura 6 - Aditivo surfactante agindo como melhorador de adesividade



Fonte: Motta (2011b apud MELLO, 2012)

- Aditivo Evotherm®

O processo Evotherm® utiliza-se de um “pacote químico” misturado a uma emulsão ou a um asfalto, que tem por finalidade melhorar o recobrimento dos agregados, a adesividade e a trabalhabilidade da mistura asfáltica, produzida a temperaturas inferiores daquelas usualmente praticadas, conforme afirma Mello (2012). Se trata de uma tecnologia americana e é um caso típico em que um conjunto de aditivos é utilizado na forma de emulsão (HURLEY & PROWELL, 2006a; NCHRP, 2001).

Segundo a *MeadWeastvaco Asphalt Innovations - MWV - (2015)*, sua fabricante, pode-se utilizar o Evotherm® em qualquer tipo de concreto asfáltico. A mistura asfáltica produzida assemelha-se a uma mistura betuminosa a quente, conseguindo-se reduções de temperatura de usinagem e compactação de cerca de 65°C (HURLEY & PROWELL, 2006b). Barros (2014) diz que esta tecnologia permite a aplicação do asfalto a uma temperatura de 50 a 75°C abaixo da temperatura convencional de compactação, na qual o aditivo é misturado já na usina asfáltica, e não necessita de alteração nos equipamentos.

Devido à redução da temperatura, há uma diminuição da degradação do ligante por oxidação. Além disso, o aditivo aperfeiçoa o projeto de mistura e torna possível o uso mais eficiente dos materiais, podendo-se incorporar maiores teores de RAP nas misturas asfálticas (até 40% a mais do que adicionado em misturas quentes), reduzindo o custo final da obra para a empreiteira (MWV, 2015). Além de trazer economia de combustível e energia ao processo, reduz a emissão ambiental em 97% e permite o trabalho em local praticamente livre de fumaça, tornando o local da obra mais confortável e limpo para a equipe de trabalho e para a vizinhança. Esse pacote químico aumenta a adesividade do asfalto com o agregado e o torna mais resistente ao tráfego, já que a superfície fica mais homogênea.

De acordo com Mello (2012, p. 46),

O Evotherm® é um aditivo fácil de usar, pois agrega lubrificidade às partículas microscópicas de asfalto, além de gerar a formação de micelas que desenvolvem “planos de deslizamento”, o que permite que as partículas de asfalto se movimentem mais facilmente, exigindo menos energia mecânica durante a mistura e compactação. Na verdade, a mistura morna com Evotherm® apresenta as mesmas propriedades reológicas que o CBUQ convencional quando submetida a baixas forças de cisalhamento; mas

quando submetida a alto cisalhamento (usinagem e rolagem) apresenta menor viscosidade mesmo em temperaturas mais baixas.

De acordo com a fabricante, desde 2013, o Evotherm® tem sido usado para pavimentar mais de 50.000 km de rodovias produzidas com a tecnologia WMA, ao redor do mundo. O *National Center for Asphalt Technology - NCAT* - (2015), dos EUA, avaliou pavimentos com Evotherm®, de 2005 a 2012, e os mesmos demonstraram que ele pode suportar mais de 20 milhões de ESALs (carga equivalente do eixo individual) de tráfego com menos de 3 mm de afundamento de trilha de rodas.

O Evotherm® sofreu alterações desde o seu surgimento, existindo três gerações produzidos pela *Meadwestvaco*: Evotherm® ET, que foi substituído por Evotherm® DAT e, após, Evotherm® 3G.

A primeira geração, Evotherm® *Emulsion Technology* (ET) é uma combinação química que permite a presença de água no ligante, melhorando sua adesividade. Quando misturado ao material pétreo, a água evapora e restam apenas agregados e ligante asfáltico (HURLEY & PROWELL, 2006a; D'ANGELO *et al.*, 2008). A usinagem é feita entre as temperaturas de 85° a 115°C. Não há diferença visual entre a mistura morna e a mistura quente (PROWELL & HURLEY, 2007). Conforme Mello (2012), esse aditivo é diretamente adicionado a uma emulsão asfáltica com alto teor de asfalto (70%), sendo em seguida armazenado à temperatura de 80°C. O pacote químico já é vendido misturado à emulsão. Este processo reduz a temperatura de produção das misturas asfálticas mornas em 30 % se comparada às misturas asfálticas quentes.

A segunda geração, Evotherm® *Dispersed Asphalt Technology* (DAT), foi introduzida em 2007. O mesmo pacote químico, utilizado no primeiro processo, passou a ser dissolvido em uma pequena quantidade de água e injetado no ligante asfáltico durante a usinagem (D'ANGELO *et al.*, 2008). O aditivo diminui a viscosidade do ligante em baixas temperaturas, o que faz com que os agregados sejam totalmente revestidos pela mistura. Neste caso, o aditivo é vendido separadamente, sendo incorporado no ligante diretamente na usina.

Conforme Zubaran (2014, p. 13-14),

Com esta tecnologia, é possível produzir misturas asfálticas a temperaturas entre 120°C e 105°C, dependendo do tipo de agregados, da classificação do asfalto e do tipo de misturas asfáltica produzida. O ganho energético estimado fica entre 35% e 55% dependendo da umidade dos agregados e das condições ambientais. Estima-se redução em 48% dos gases do efeito estufa, 58% de óxido de nitrogênio e 41% de dióxido sulfúrico, este último responsável pelas chuvas ácidas. As temperaturas de aplicações ocorrem entre 80°C e 110°C.

Recentemente, foi desenvolvida a terceira geração do aditivo químico, o Evotherm® 3G. Nessa última versão o princípio de funcionamento do Evotherm® deixa de ser a água ou o vapor de água, e passa a atuar no atrito interno entre as partículas dos agregados. Estas, quando submetidas a altas taxas de cisalhamento durante a usinagem e compactação da mistura, resultam na redução do atrito interno dos agregados através de agentes tensoativos ou agentes de tensão superficial que facilitam o recobrimento dos agregados pelo ligante asfáltico, conforme afirma Mello (2012).

A adição de Evotherm® 3G na mistura asfáltica inclui moléculas tensoativas que permitem que grande parte da energia térmica necessária seja substituída por energia química. Para se obter um pavimento resistente é preciso uma adequada compactação, e esse aditivo tem como característica a dinâmica das micelas, que permite que elas mudem de forma e permaneçam intactas ao serem compactadas pelo rolo, criando uma superfície deslizante e admitindo que a mistura asfáltica seja compactada até 50°C abaixo das temperaturas usualmente utilizadas em campo, como complementa Mello (2012).

Segundo a fabricante, *MeadWeastvaco Corporation*, a redução das temperaturas de produção da mistura asfáltica, utilizando Evotherm® 3G, pode chegar a 38°C. Devido a isso, obtêm-se uma redução do consumo de energia em torno de 55%, representado 45% na redução de CO_2 e SO_2 (FHWA, 2008).

Conforme consta no relatório da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT - (2014), elaborado juntamente com o Centro de Pesquisas Rodoviárias, da Concessionária CCR NovaDutra, a adição de Evotherm® 3G não altera as propriedades de caracterização do ligante asfáltico. Dessa forma, o teor de ligante asfáltico de projeto determinado na mistura asfáltica convencional a quente é o mesmo a ser utilizado na mistura asfáltica morna. Em 2011, começaram a ser executados trechos experimentais no Brasil, como por exemplo, Rodovia Bandeirante (aplicação de asfalto borracha, obtendo resultados satisfatórios) e o segmento da BR 116/PR, em Rio Negro, trecho de estudo da dissertação de Mello (2012).

O Evotherm® M1 (terceira geração) é um aditivo derivado de aminas graxas (MWV, 2014). Pode ser acrescentado no terminal de asfalto ou no momento da mistura e é útil para a produção de misturas asfálticas mornas com base em todos os ingredientes de formulação comuns, incluindo ligantes de asfalto modificado e não

modificado, o asfalto de borracha, e os agregados de silicatos, materiais calcários e RAP. O uso de Evotherm® M1 permite reduções de temperatura de 35 a 50°C em comparação com a mistura convencional, e é o aditivo utilizado na presente pesquisa.

- *Formação de espuma*

As tecnologias com espuma utilizam pequenas quantidades de água fria injetadas no ligante quente ou diretamente na câmara de mistura de asfalto (RIVOIRE Jr., 2014). A água evapora rapidamente e é incorporada ao ligante, produzindo um grande volume de espuma, de acordo com Zaumanis (2010).

Rivoire Jr. (2014) comenta que a ação da espuma no ligante aumenta temporariamente o volume do mesmo e reduz a viscosidade, o que melhora a mistura e a trabalhabilidade. Um cuidado essencial é ao adicionar a água, pois precisa ser em quantidade suficiente para provocar a formação de espuma, e sem excesso para que não ocorram problemas de adesão.

É aconselhado utilizar também aditivos que melhorem a adesividade, a fim de garantir que a susceptibilidade a umidade da mistura asfáltica seja minimizada. Aditivos líquidos melhoradores de adesividade são recomendados para processos de produção de WMA (CHOWDHURY & BUTTON, 2008; D'ANGELO *et al.*, 2008), sendo adicionados ao ligante apenas antes da mistura com os agregados, tipicamente em 0,5% do peso de ligante (ZAUMANIS, 2010).

A técnica de se espumar o asfalto, para produzir misturas asfálticas, já existe há algumas décadas, desde 1956, quando o professor Ladis Csanyi, da *Iowa State University*, reconheceu o potencial de se utilizar o asfalto espumado como um ligante de solo (CHOWDHURY & BUTTON, 2008). Esta técnica foi mais tarde refinada pela Mobil Oil Australia, em 1968, que desenvolveu a primeira câmara de expansão para a mistura de água e ligante quente, como comenta Zubaran (2014).

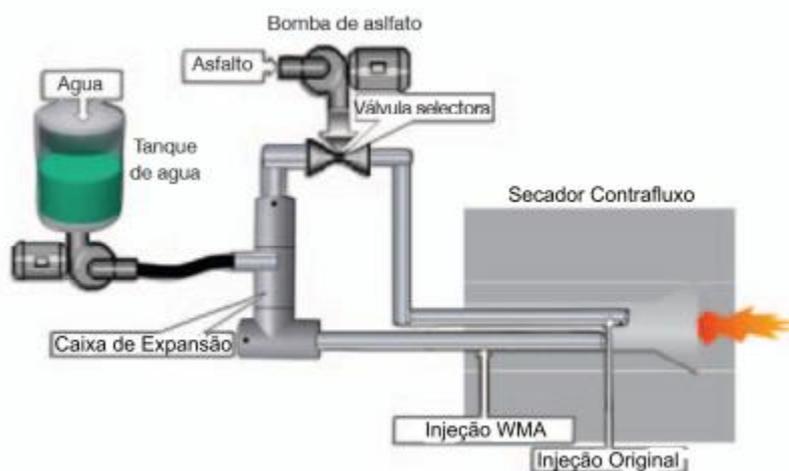
A Wirtgen, em 1995, desenvolveu a técnica de espuma asfáltica em câmara de expansão para uso em recicladoras a frio (modelo WR 2500), e para uso de RAP nas misturas, em especial com incorporação de base e revestimentos (WIRTGEN, 2014). Portanto, foi na década de 90, que começaram a surgir as tecnologias de WMA que se valiam da técnica de espumar o ligante para que a mistura pudesse ocorrer em temperatura reduzida (MOTTA, 2011a).

Devido a essa técnica fazer com que a água se torne vapor, é uma razão para que a limitação entre a mistura morna e a semimorna ser a temperatura de 100°C, já que este é o ponto de vaporização da água, de acordo com Pavia Systems (2015) e NAPA (2014).

Dois técnicas são comumente usadas para a formação de espuma: o método direto e o indireto. No método direto, tem-se a inserção direta de água no ligante asfáltico. Como diz Mello (2012, p.41): “Nas misturas asfálticas em que se emprega o processo de espuma de asfalto, a água é inserida no processo de usinagem por injeção direta, espumando o ligante asfáltico antes do mesmo ser misturado com o agregado”. Isso resulta em um grande, mas temporário, aumento no volume efetivo do ligante de revestimento, que facilita utilizar temperaturas mais baixas. Alguns vapores permanecem no asfalto durante a compactação, reduzindo a viscosidade e facilitando a compactação eficaz. Ao arrefecer o ligante volta ao normal, pois a quantidade de água é insignificante. Esta técnica pode permitir uma redução da temperatura de mistura em cerca de 20 a 40°C.

Um exemplo desse método é o processo WMA *Foam*®, que utiliza o equipamento produzido pela *Terex Roadbuilding*, o qual consiste em uma barra anexada à usina para espumação do asfalto, que controla a temperatura, a pressão de injeção de água, ar e dosagem fina dos componentes através de uma bomba de deslocamento positivo, conforme explica Mello (2012). A Figura 7 ilustra o sistema de funcionamento dessa técnica.

Figura 7 - Sistema de mistura da água e ligante da usina de asfalto



O outro método trata-se da formação de espuma de modo indireto, utilizando um mineral como a fonte de água para a formação de espuma. Minerais hidrofílicos da família zeólito são comumente usados em virtude de sua estrutura, pois a zeólita apresenta alto grau de hidratação, baixa densidade, grande volume de espaços vazios quando desidratada, entre outros (SOUSA FILHO, 2006).

As zeólitas contêm cerca de 20% de água cristalina, que é libertada acima de 100°C. Esta libertação de água cria um efeito de formação de espuma controlada, o que pode proporcionar uma trabalhabilidade melhorada durante um período de 6 a 7 horas, ou até que a temperatura seja inferior a 100°C. Os resultados dessa técnica trazem uma melhor trabalhabilidade à mistura, que assim permite uma diminuição na temperatura da mistura de cerca de 30°C.

Uma outra alternativa indireta usa a umidade da areia (ou do RAP) para gerar, naturalmente, a espumação do asfalto. A tecnologia LEA® (*Low Energy Asphalt*) foi desenvolvida na França e baseia-se nessa técnica, ou seja, na espumação do asfalto realizada através da água contida na fração miúda dos agregados.

2.2.4. Benefícios da produção de misturas asfálticas mornas

A redução das temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas mornas pode trazer diversos benefícios relacionados ao meio ambiente, à exposição ocupacional e à qualidade da pavimentação. Croteau & Tessier (2008) relatam que os dados de desempenho, coletados na Europa e na América do Norte, indicam que WMA tem uma performance igual ou possivelmente melhor do que a mistura convencional *Hot Mix Asphalt* - HMA. O mais antigo pavimento WMA foi colocado na Alemanha em meados dos anos 90, enquanto o mais antigo relatado na América do Norte está em serviço desde 2004 .

O mundo todo está investindo na busca de informações sobre o desempenho dos pavimentos com a técnica de misturas mornas. Todos os relatórios técnicos apresentados tratam-se de sistemas específicos, ou seja, que podem alterar as características do pavimento de local para local. Porém, todos indicam que o sistema WMA tem os seguintes aspectos (CROTEAU & TESSIER, 2008):

- Densificação do sistema WMA é melhorada;
- Rigidez da mistura não é totalmente prejudicada, mas tende a diminuir;

- Resistência não é prejudicada;
- Endurecimento do ligante é menor;
- Resistência ao craqueamento térmico pode ser melhorada;
- Danos causados pela umidade requerem atenção específica;
- Sistemas WMA podem ser usados com qualquer tipo de misturas;
- Efeito sobre as propriedades da pasta se trata da pasta e do sistema específico, em estudo.

Além dos supracitados, pode-se listar ainda as vantagens de aumento da percentagem de material reciclado adicionado ao novo pavimento e aumento do tempo de compactação em condições meteorológicas mais difíceis. Pode-se dizer que uma das grandes vantagens das misturas asfálticas mornas é a redução na temperatura de mistura e compactação, pois a mesma gera uma série de benefícios adicionais, como:

- Menor consumo de energia;
- Menor emissão de gases de efeito estufa (CO_2) e poluentes (CO , SO_2 e NO_x);
- Maior trabalhabilidade, facilitando o trabalho manual, em especial na construção de juntas;
- Incorporação de maior quantidade de material fresado;
- Maior eficiência de compactação;
- Menor envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação;
- Menor exposição dos trabalhadores aos fumos.

a) *Redução de emissão de gases;*

Motta (2011b) diz que com uma redução de 30°C no aquecimento das pedras, diminui-se em 15% ou mais os gastos necessários com combustível na fabricação da mistura, e assim, conseqüentemente, às emissões reduzem em até três vezes. Há uma diferença visível de redução de gases quando trabalhado com misturas mornas, se comparado à aplicação das misturas convencionais a quente, quando pode ser visto a formação de uma névoa no local da obra, conforme pode ser visto na Figura 8.

Alguns desses poluentes, presentes nas emissões ocorridas durante as operações de pavimentação, podem contribuir para o efeito estufa e, eventualmente, afetar a saúde dos trabalhadores deste ramo. Ponto chave de debate no Protocolo de Kyoto, o aumento do efeito estufa fez com que o mercado internacional buscasse tecnologias mais limpas e soluções de maior âmbito ecológico, criando assim, as WMA que trazem ao ramo de pavimentação um novo desafio e uma conscientização de trabalho com menor agressão ao meio ambiente.

Figura 8 - Diferença de emissões de fumos de asfalto em pista entre mistura morna (à direita) e mistura a quente (à esquerda)



Fonte: Motta (2011a)

D'Angelo *et al.* (2008) relatam que as emissões de poluentes nas usinas de produção de WMA chegam a redução de 30% a 40% de CO_2 e SO_2 , 50% de compostos orgânicos voláteis (VOC), 10% a 30% de monóxido de carbono (CO), 60% a 70% de óxidos nitrogenados (NO_x) e 20% a 25% de poeiras.

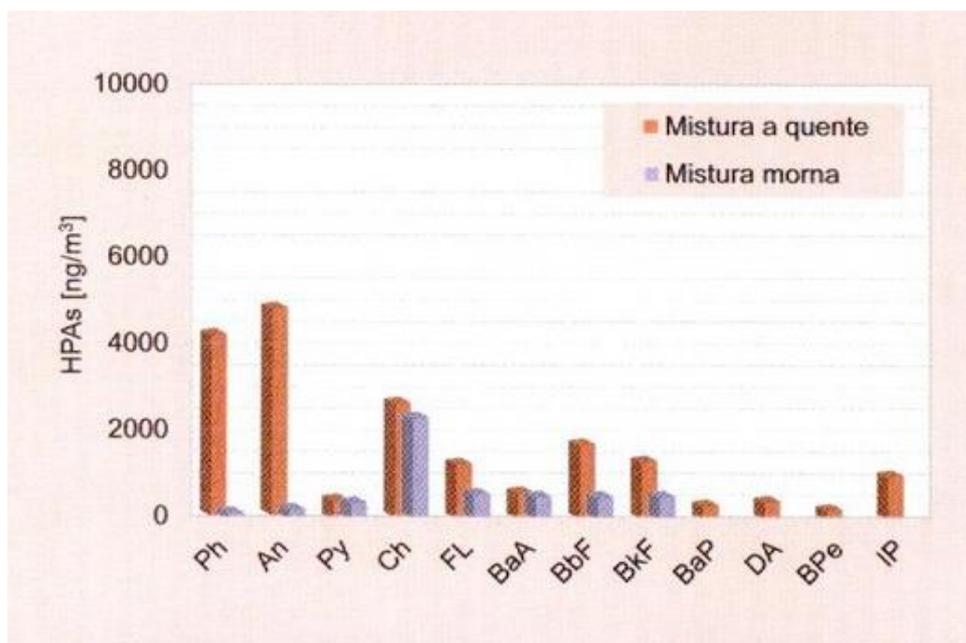
As emissões podem ser provenientes não só da menor queima de combustível em usina, mas também da decomposição térmica do asfalto, sendo compostas de elementos orgânicos, em fase gasosa e particulada. A fase particulada é constituída de componentes sólidos e líquidos (chamados de aerossóis), que ficam suspensos na atmosfera em função de sua pequena dimensão (inferior a $100\ \mu m$).

A temperatura de $150^\circ C$ começam a ser produzidas as emissões de fumaças e vapores pela massa asfáltica. A massa asfáltica é constituída de hidrocarbonetos, H_2S e de compostos policíclicos aromáticos (HPA) liberados da massa asfáltica no processo de aquecimento (BERNUCCI *et al.*, 2006).

De acordo com Paniz (2015), os HPAs apresentam uma estrutura na forma de anéis de benzeno unidos, e são compostos químicos complexos e amplamente distribuído na atmosfera. Alguns HPAs já têm sido considerados como tendo potencial carcinogênico e/ou mutagênico. Sendo assim, é muito importante a redução dessas emissões, principalmente para os profissionais que trabalham diretamente na pavimentação, nas frentes de serviço, para que sua saúde seja preservada.

Motta (2011b) realizou um estudo sobre a emissão de poluentes e consumo energético das misturas asfálticas mornas, e comparou com misturas a quente. A autora verificou que, devido à diferença de temperatura, no caso da mistura a quente foram observados todos os HPAs prioritários considerados na pesquisa, diferentemente da mistura morna, como pode ser observado na Figura 9. Além disso, a mistura a quente também demonstrou uma maior concentração de HPAs totais (somatório de todos os compostos prioritários), visto que foram encontrados 19.458ng/m^3 , contra 5.226ng/m^3 no caso da mistura morna, significando uma redução de HPAs em mais de 3 vezes.

Figura 9 - Gráfico comparativo entre mistura quente e mistura morna quanto à emissão de HPA

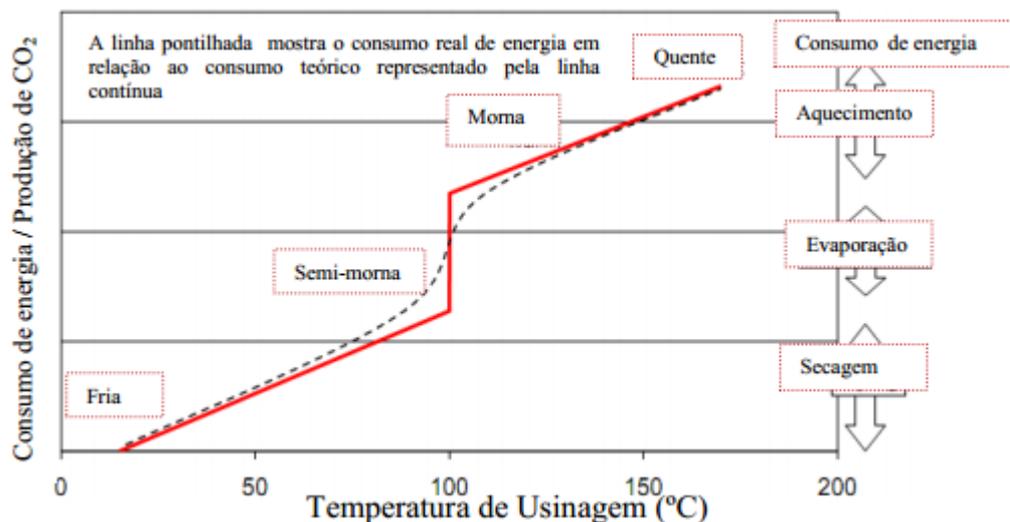


Fonte: Boletim técnico SINICESP (2013)

Dentro desse contexto, considerando-se que alguns HPAs são apontados como nocivos ao meio ambiente e à exposição ocupacional, verifica-se que a redução de temperatura é um fator crucial para a diminuição das emissões destes compostos, e o uso de misturas mornas é promissor neste sentido.

A Figura 10 faz um comparativo entre as misturas a frio, semimornas, mornas e a quente. Percebe-se que na medida em que se aumenta a temperatura, a emissão de CO_2 ou o consumo de energia aumenta significativamente. Ressaltando, novamente, a importância do estudo de misturas asfálticas mornas.

Figura 10 - Consumo de energia e de emissão de gases durante a produção de misturas asfálticas



Fonte: Wall (2012 apud WARGHA FILHO, 2013, p.14)

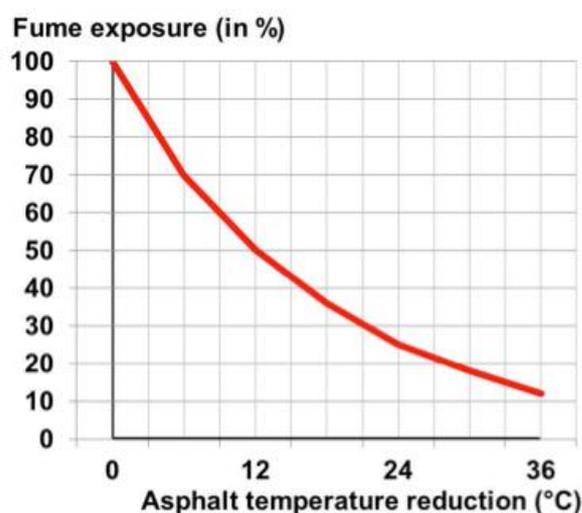
Na Austrália, aproximadamente 390.000 toneladas de CO_2 são anualmente lançadas à atmosfera, oriundas da produção de 8.000.000 toneladas de mistura asfáltica, enquanto que com a diminuição da temperatura de produção, utilizando-se misturas mornas, poderia gerar redução de mais de 120.000 toneladas de CO_2 por ano (JENNY, 2009 apud AUSTROADS, 2012). A estimativa citada mostra o significativo impacto que a diminuição da emissão de CO_2 causaria no país.

Já investigações feitas em usinas americanas, a partir de dados da *Southern African Bitumen Association - SABITA* - (2011), concluíram que quando a temperatura de produção reduz de 29 a 43 $^{\circ}C$, há uma diminuição de 67 a 77% de emissão de

materiais particulados, enquanto o nível dos fumos de asfalto, medidos através do método de materiais solúveis em benzeno, foi reduzido para 72% a 81%, se comparado com as misturas convencionais.

Para a EAPA (2014), a liberação dos fumos é minimizada em cerca de 50% para cada 12°C de redução da temperatura, conforme Figura 11. Dessa forma, uma redução de 25°C na temperatura de produção do asfalto levará a uma diminuição de cerca de 75% dos fumos. Considerada está uma das mais importantes razões da indústria europeia estimular o uso de WMA.

Figura 11 - Diminuição dos fumos (%) em relação a redução de temperatura (°C)



Fonte: Disponível em: <<http://www.eapa.org/promo.php?c=202>>. Acesso em: 08 fev. 2017.

b) Redução do consumo de energia na produção de misturas asfálticas;

Como explanado no item anterior, Motta (2011b) relata que com uma redução de 30°C no aquecimento dos agregados utilizados na mistura asfáltica morna é possível diminuir em 15% ou mais, dependendo do material e do tipo de mistura, os gastos necessários com combustível, durante o processo de fabricação da WMA.

Conforme a Figura 10, pode-se ver também a economia de energia necessária para usinagem de misturas mornas, apresentando-se bem inferior a quente, devido a redução da temperatura de fabrico.

Cervarich (2007) chegou a uma economia de 11% para uma redução de temperatura de 28°C. Segundo Prowell *et al.* (2012), a média da redução de consumo foi de 23%. Já Prowell & Hurley (2007) apontam que a economia de combustível fóssil variou entre 20% a 35%. No entanto, eles apontam que a economia de combustível fóssil depende de diversos fatores como temperatura de produção, umidade dos agregados e, detalhes característicos das usinas de asfalto.

c) Transporte da massa asfáltica a maiores distâncias;

As misturas asfálticas mornas apresentam-se como uma ótima alternativa, pois sendo produzidas a temperaturas inferiores, esfriam a uma taxa menor, pois possuem um menor gradiente térmico (PROWELL & HURLEY, 2007). As misturas asfálticas mornas permitem aumentar a distância de transporte, ou ter mais frente de serviço, e mesmo assim a massa ter trabalhabilidade e compactação satisfatória, conforme Merighi (2014).

Prowell *et al.* (2012) dizem que o uso de misturas asfálticas mornas ajudam a aumentar a distância de transporte entre a usina e o trecho de aplicação devido à taxa reduzida de esfriamento e viscosidade reduzida, no caso de alguns tipos de aditivos. Os autores citam um caso de obra na Austrália, que a mistura morna foi transportada por mais de nove horas em caminhão, com isolamento, e mesmo assim foi satisfatória sua compactação.

d) Aplicação em épocas e locais de clima muito frio;

As especificações a nível nacional (DNIT) estabelecem que, a produção, transporte e aplicação do concreto betuminoso usinado a quente só deve ser realizada quando à temperatura ambiente mínima de 10°C, pois em temperaturas inferiores há grande preocupação com perdas expressivas de temperatura, que acabam impedindo a perfeita compactação da mistura asfáltica na pista.

As misturas asfálticas mornas permitem pavimentar em ambientes frios sem perder qualidade, pois sua temperatura é menor que a mistura asfáltica convencional. Prowell *et al.* (2012) discorrem que o potencial de estender o período de pavimentação, nos países que são castigados por condições meteorológicas no

inverno, é uma vantagem da tecnologia. Testes realizados na Alemanha apontaram que, misturas asfálticas mornas apresentam bom resultado de compactação (com misturas mornas obtém-se melhor densidade da massa com menos passadas do rolo compressor) quando aplicadas às temperaturas ambientes de -3°C e -4°C (D'ANGELO *et al.*, 2008).

e) Redução do envelhecimento do ligante asfáltico;

O aquecimento do ligante, em temperaturas elevadas, mesmo ocorrendo por curto período de tempo, similar ao que acontece durante a usinagem, pode causar o envelhecimento elevado do ligante (BERNUCCI *et al.*, 2006). No caso das misturas asfálticas mornas, há a diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico devido à produção da mistura em temperaturas menores. Esta diminuição ajuda a compensar os ligantes já envelhecidos no caso de utilização de material reciclado na mistura asfáltica, similarmente a utilizar um asfalto de grau menos rígido (D'ANGELO *et al.*, 2008).

A diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico resulta também em melhoria na flexibilidade, resistência à fadiga da mistura e, também, resistência ao surgimento de trincas térmicas (SABITA, 2011). Segundo a mesma fonte, estes ganhos aumentam o desempenho do pavimento e o tempo entre suas manutenções, o que promove economia financeira para os órgãos responsáveis pelas vias.

f) Melhorias na compactação;

Para misturas que utilizam grande porcentagem de material reciclado, a melhoria de compactação permite incorporar mais quantidade de material reciclado e esta característica é vantajosa na utilização de misturas mais rígidas (PROWELL *et al.*, 2012). A melhoria na trabalhabilidade da massa asfáltica, devido a técnica WMA, aumenta a coesão da mistura, lubrificando-a, e garantido melhor compactação, devido a redução da fricção interna do ligante asfáltico (SABITA, 2011).

g) Melhores condições para os trabalhadores;

A redução de temperatura tanto na produção da mistura asfáltica quanto na sua aplicação em pista promove melhores condições de trabalho. Segundo SABITA (2011), a segurança ao trabalhador é beneficiada diretamente pela redução da temperatura da mistura asfáltica, que reduz o risco de acidentes relacionados com temperatura e aumenta a produtividade. Além de ganhos com conforto, referentes à redução da emissão dos gases e de temperatura.

h) Uso de maiores quantidades de material fresado.

O emprego de misturas mornas favorece a adição de maiores quantidades de fresados na produção de misturas recicladas (OLARD, 2008; BARTHEL *et al.*, 2004; PROWELL & HURLEY, 2007). Devido a temperatura ter efeito nas características reológicas do ligante, causando envelhecimento deste, o ideal é que o material fresado não seja submetido a temperaturas muito altas (em relação às das misturas convencionais com agregados virgens), na usinagem de misturas recicladas a quente, para que se previna um envelhecimento ainda maior do asfalto contido no fresado, e assim, a rápida deterioração do pavimento (MOTTA, 2011a).

A utilização de material reciclado deixa a mistura asfáltica menos trabalhável e a tecnologia WMA traz benefício neste aspecto, de modo que permite a adição de maior quantidade de material reciclado. Este potencial de incorporar maior quantidade de RAP é devido a redução da temperatura de usinagem, o que produz menor envelhecimento do ligante, e ajuda a neutralizar a rigidez do betume antigo, advindo do material reciclado (RUBIO *et al.*, 2013).

Corroborando, Prowell & Hurley (2007) complementam afirmando que o benefício pode acontecer de duas maneiras, a primeira é que ao reduzir a viscosidade da mistura há melhoria na compactação da massa, e a segunda é a diminuição do envelhecimento do ligante asfáltico, devido à produção em temperaturas menores, ajudar a rejuvenescer o ligante asfáltico do material reciclado, aumentando o tempo de serviço do pavimento, evitando problemas de trincamento. Os autores ainda citam trechos experimentais que utilizaram várias tecnologias de mistura morna e uma porcentagem de material reciclado que variou de 20 a 45%, em Maryland, nos quais

houve economia de U\$4,55 (dólares) por tonelada, quando do aumento de RAP de 20 a 45%.

A técnica das misturas mornas é relativamente nova e combinada ao uso de grandes quantidades de material fresado, na produção de misturas asfálticas recicladas, constitui a vanguarda da pesquisa e desenvolvimento de materiais para pavimentação (DOYLE & HOWARD, 2010). Os autores também realizaram um estudo com misturas asfálticas mornas adicionando 100% de material fresado, e concluíram que o uso de grandes quantidades de reciclados, neste tipo de mistura, é totalmente viável.

2.2.5. Misturas Asfálticas Recicladas Mornas

Devido à necessidade de proteger o meio ambiente no que diz respeito à economia de recursos naturais (agregados), aos espaços físicos (descargas), ao desperdício de energia e à redução dos gases de efeito estufa, surgiu a reciclagem de materiais no ramo da pavimentação. A reciclagem consiste na reutilização dos materiais provenientes dos pavimentos, ao final da sua vida útil, ou cujas características se pretendem melhorar (GENNESSEAU, 2015).

O reaproveitamento de material gera redução dos gastos com construção de novos pavimentos, pois além de diminuir o impacto ambiental causado pelo despejo inadequado de materiais (fresado), reduz a necessidade de exploração de novas jazidas. Como saliente Genesseeaux (2015), quanto maior a taxa de incorporação de material reciclado em novas misturas, maior o benefício econômico e ambiental proporcionado, sendo uma opção sustentável para a indústria de pavimentação. E o estudo por maiores taxas de incrementação de fresado nas misturas asfálticas vem sendo estudado também por outros autores do mundo inteiro (HUANG *et al.*, 2005; SHIRODKAR *et al.*, 2011), aliado à técnica das misturas mornas, que surgem como alternativa viável para misturas com maiores teores de reciclado.

Nos últimos anos, houve um aumento da reciclagem de misturas asfálticas, acompanhado de um aumento (menos pronunciado) da taxa de reciclagem, conforme cita Genesseeaux (2015). Dessa forma, na Tabela 4, apresenta-se uma visão geral de como os países buscam reaproveitar a quantidade enorme de material reciclado,

proveniente de antigos pavimentos, na fabricação de novas misturas asfálticas HMA ou WMA.

Tabela 4 - Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) relativa à produção de misturas quentes e mornas, à disponibilidade de RAP e sua utilização em novas misturas.

	Alemanha	França	Itália	Países Baixos	Turquia	EUA
2010						
Produção de HMA e WMA (milhões de toneladas)	45	38,8	29	9,5	35,3	327
RAP disponível (milhões de toneladas)	14	7,1	11	4	2,42	66,5
% de RAP disponível utilizado nas reciclagem quente e morna	82	40	20	75	19	84
% de RAP disponível utilizado nas reciclagens a frio	18	Sem dados	Sem dados	Sem dados	81	12
% de novas misturas HMA e WMA com adição de RAP	60	Sem dados	Sem dados	67	10	Sem dados
2013						
Produção de HMA e WMA (milhões de toneladas)	41	35,4	22,3	9,7	46,2	318,1
RAP disponível (milhões de toneladas)	11,5	6,9	10	4,5	1,2	69
% de RAP disponível utilizado nas reciclagem quente e morna	90	64	20	76	3	92
% de RAP disponível utilizado nas reciclagens a frio	10	Sem dados	Sem dados	Sem dados	96	8
% de novas misturas HMA e WMA com adição de RAP	Sem dados	>65	Sem dados	70	1	Sem dados
2015						
Produção de HMA e WMA (milhões de toneladas)	39	31,5	23,1	8	37,9	331
RAP disponível (milhões de toneladas)	11	7	9	4,5	1,52	69,7
% de RAP disponível utilizado nas reciclagem quente e morna	90	68	20	70	2	91
% de RAP disponível utilizado nas reciclagens a frio	0	Sem dados	30	10	0	0
Área de aplicação de novas misturas com reutilização de RAP em reciclagem a quente (m ²)	Sem dados	928.700	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
Quantidade de RAP apenas reaquecido e utilizado em novas misturas (toneladas)	Sem dados	167,172	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados

Fonte: Adaptado de EAPA - Asphalt in Figures 2010, 2013 e 2015

Nos Estados Unidos, os pavimentos asfálticos são os materiais mais reciclados, com, aproximadamente, 70 milhões de toneladas por ano, o que representa aproximadamente duas vezes mais que o total dos quatro resíduos mais reciclados, que são papéis, vidros, plásticos e alumínio (40 milhões de toneladas por ano) (PROWELL & HURLEY, 2007). Atualmente, de acordo com dados de 2015, percebe-se que reduziu para 70 milhões de toneladas de RAP disponível para reciclagem, de acordo com a Tabela 4, e desses 91% foram reaproveitados. Porcentagem muito expressiva, resultado do país que mais pavimenta, maior quantidade de RAP produz e que apresenta a maior porcentagem de RAP reutilizado em misturas recicladas a quente ou mornas.

Considera-se rotineiro o uso de 10% a 25% de RAP em misturas asfálticas utilizadas pelos Departamentos de Transportes Norte-Americanos, da sigla DTOs - *United States Department of Transportation* -, contudo o uso de quantidades acima de 25% em peso de agregados é menos utilizado, pois, de acordo com Brown *et al.* (2009), a mistura resultante pode ser de baixa qualidade. Segundo dados da NCAT (2015), a média de RAP contida em revestimentos asfálticos novos gira em torno de 12% em massa da mistura asfáltica, mesmo que existam trabalhos na busca de maior durabilidade do pavimento com inclusão de até 50% de RAP.

Com o método de dosagem Superpave e com o interesse na qualidade dos pavimentos, a quantidade de RAP em misturas recicladas tem sido, em alguns estados americanos, limitada a 20% (DON BROCK & RICHMOND, 2007), a menos que o RAP seja processado. Mas, como frisa NCAT (2015), o objetivo dos americanos é incorporar um teor de fresado maior, de pelo menos 25% de RAP às misturas asfálticas, economizando assim mais de 71 milhões de toneladas de agregados e 21 milhões de barris de ligante asfáltico, além de reduzir a emissão de 1,5 milhões de toneladas de CO_2 por ano.

Na Alemanha, os princípios de reciclagem são considerados de grande relevância há vários anos, sendo que o país recicla de 80 e 90% do total de RAP disponível, desde 2010 a 2015, diferentemente da Itália que recicla em torno de 20%, no mesmo período.

Já na França, a quantidade de misturas asfálticas a quente e mornas produzidas em 2010, 2013 e 2015 foi de, aproximadamente, 39, 35 e 32 milhões de toneladas. A cada ano, são geradas em torno de 7 milhões de toneladas de RAP, seja

por meio de fresagem ou de desconstrução. Pesquisas realizadas nos mesmos anos de 2010 a 2015, mostraram que houve um aumento da proporção de RAP, que foram empregadas em novas misturas a quente ou mornas, passando de 40 para 68%. Por meio da Tabela 4, pode-se ver que a França realizou 930 mil m² de área pavimentada com RAP, por reciclagem a quente, em 2015.

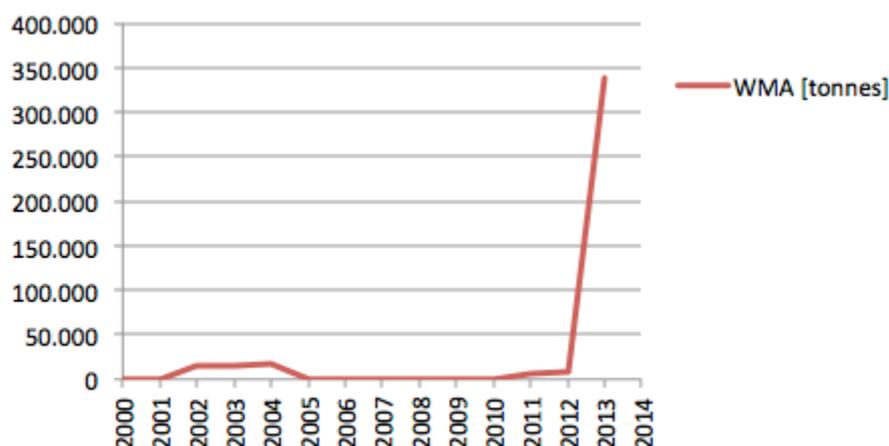
Além desses países, alguns outros da EAPA também se destacam pelo uso de WMA, aliado ao uso de RAP. Na República Tcheca o uso de misturas mornas teve início em 2013, quando sua primeira pista experimental foi desenvolvida numa estrada secundária, em outubro do respectivo ano. A empresa que realizou a usinagem dessa mistura também dispõe de um tambor paralelo, em sua planta de mistura, que permite a adição de 50% de RAP. O uso de WMA, através da tecnologia de espuma, permitiu manter a temperatura a produção em cerca de 130°C. A implementação da WMA na República Checa está descrita em um documento sobre a Conferência HAPA sobre WMA, em 2013 (FIEDLER *et al.*, 2013).

Em 2010, a *Asphalt Producer Association in Norway* - FAV - iniciou um novo projeto chamado *Low Temperature Asphalt*, com a finalidade de estudar as consequências para a saúde e a qualidade do asfalto morno, fabricando 11 pistas experimentais, com 6 técnicas diferentes. A temperatura de produção foi diminuída em 30°C. Em cada local também foi estabelecida uma pista de referência com HMA comum. As principais conclusões desse estudo foram: não há diferenças significativas na carga de trabalho para os trabalhadores; existe uma redução de 50% dos fumos; e, não há diferenças na qualidade para WMA *versus* pavimento HMA, em relação a vazios de ar, uniformidade e afundamento de trilha de roda.

Em 2012, a Noruega quis acelerar o uso de WMA, e para tanto recompensou os empreiteiros com um bônus de 4 euros/tonelada, quando produzida a temperatura de pelo menos 25°C a menos do que a produção convencional, assumindo os mesmos requisitos de qualidade. Como é possível compreender na Figura 12, esse incentivo alavancou a produção de misturas mornas no país, e ao final de 2013, a Noruega produzia em torno de 350.000 toneladas de WMA.

Assim como todos os países supracitados, muitos outros europeus apostaram nessa nova tecnologia, entre eles, Países Baixos, Suécia, Suíça e Dinamarca. Além de países de outros continentes como Turquia, África do Sul, Japão e Canadá.

Figura 12 - Toneladas de WMA produzidas na Noruega, durante os últimos anos



Fonte: Disponível em: <<http://www.eapa.org/promo.php?c=202>>. Acesso em: 08 fev. 2017

Uma vantagem notória da tecnologia WMA é a oportunidade de fabricar a misturas recicladas, seja modificada com borracha reutilizada de pneus ou de outros polímeros, ou com adição de RAP, para as quais existe a necessidade de diminuir as temperaturas de produção e compactação (AKISETTY *et al.*, 2008, 2009, 2010; KIM *et al.*, 2011; SHIVAPRASAD *et al.*, 2011; LIU *et al.*, 2010; MOREA *et al.*, 2012; WU & ZENG, 2012; FAKHRI *et al.*, 2013; ROSSI *et al.*, 2013; HAJJ *et al.*, 2014; YU *et al.*, 2014).

Aliar o uso de RAP com a técnica de WMA é melhorar a trabalhabilidade da mistura, durante a sua fabricação e processos de compactação, é ajudar a rejuvenescer e suavizar o aglomerante de asfalto envelhecido do RAP, e criar novos métodos de construção cuidando a questão ambiental e econômica (ZHAO *et al.*, 2013). No entanto, a maioria das pesquisas com RAP acabam produzindo misturas que são tão rígidas, que falhas estruturais podem ocorrer em campo, principalmente, trincamento por fadiga (BONAQUIST, 2005; MCDANIEL *et al.*, 2007; BEHNIA *et al.*, 2011; DOYLE & HOWARD, 2013; MOGAWER *et al.*, 2013). Fato que ocorre devido ao aumento da rigidez da mistura asfáltica ocasionada pelo envelhecimento do ligante advindo do material fresado.

Porém, em contrapartida, autores afirmam que rodovias, ou as vias interligadas, construídas com material reciclado têm apresentado uma boa homogeneidade,

qualidade e controle eficaz da construção, demonstrando uma habilidade privilegiada de se utilizar misturas recicladas com elevados percentuais (40%), possibilitando um domínio da técnica de reciclagem (BROSSEAUD, 2011).

Motta (2011a) conclui que a qualidade das misturas asfálticas mornas é similar às das usinadas a quente, e que para grandes quantidades de RAP as misturas mornas necessitam de temperaturas de mistura e compactação entre 100 a 135°C.

Hill *et al.* (2013) investigaram um conjunto de misturas asfálticas mornas que englobam uma série de variáveis, incluindo quatro aditivos WMA (Evotherm® 3G, Rediset LQ, Sasobit, e Advera) e três teores de RAP (0, 15 e 45%). Para caracterizar o desempenho de misturas WMA-RAP, os autores avaliaram a baixa temperatura, o comportamento de trincas destas misturas em relação à umidade e ao afundamento em trilha de roda. Os autores concluíram que todas as misturas apresentam uma maior resistência à fissuração a baixas temperaturas de serviço.

A literatura relata casos bem sucedidos de WMA com inserção de grânulos de borracha de pneu reciclado e com adição de, no máximo, 25% RAP, como afirma Mogawer *et al.* (2011, 2013). Já para Doyle & Howard (2013) um alto índice de RAP (25% e 50%) + WMA gera misturas com resistência a deformação permanente e ao dano por umidade, similar a mistura convencional a quente produzida com baixo conteúdo de RAP (inferior de 25%).

Nejad *et al.* (2013), baseados em ensaios de *creep* dinâmico e testes de resistência à tração indireta, relatam um teor ótimo de RAP de 50%, para misturas mornas com aditivo orgânico. Poucos estudos foram realizados em misturas de WMA com alto teor de RAP (acima de 50%), se comparados a todos os estudos já realizados em misturas de WMA com adição de RAP entre 20% e 50% (Howard *et al.*, 2013).

Entretanto, vem se buscando misturas 100% recicladas, porém, o grande obstáculo ainda é o envelhecimento do ligante contido no RAP, que acaba reduzindo as condições mecânicas da mistura asfáltica produzida, além da técnica de produção dessas misturas, que devido a um super aquecimento do fresado nas usinas, geraria uma quantidade muito grande de poluentes. A quantidade máxima de asfalto recuperado é principalmente limitada

Pela tecnologia de produção disponível, sabe-se que em uma reciclagem convencional, devido ao processo de superaquecimento dos materiais virgens, indiretamente, impõem limitações a quantidade de RAP que ser adicionada na

mistura. A maioria das usinas de tambor pode acomodar até 50% RAP (BONAQUIST, 2007). Porém, uma planta de usina típica, pode utilizar de 10 a 20% de RAP em sua produção de massa asfáltica (KANDHAL & MALLICK, 1997).

A quantidade de RAP em misturas de asfalto pode ser significativamente aumentada com a aplicação de uso de práticas de gestão modernas, usufruindo de tecnologias de produção atuais e conhecimentos avançados sobre a concepção de misturas asfálticas (ZAUMANIS & MALLICK, 2014a). Com domínio do estado da arte, poderia se aumentar a quantidade de RAP em misturas de asfalto para mais de 40%, chegando a 100% de reciclagem de pavimentos. Zaumanis & Mallick (2014b) relatam que misturas com 100% de RAP permitiria economia de custo relacionadas ao material de 50 a 70%, em relação à mistura virgem.

Zaumanis *et al.* (2014) estudaram a influência de seis rejuvenescedores sobre as propriedades de desempenho do RAP e de misturas a quente 100% recicladas. Cinco rejuvenescedores reduziram o Grau de Desempenho Superpave (PG) de 94-12, do aglutinante extraído, para PG 64-22, enquanto um precisa ser adicionado em maior quantidade para atingir esse resultado. Todos os produtos asseguraram uma excelente resistência ao afundamento de trilha de roda, proporcionando maior vida útil à fadiga, quando comparada com as misturas asfálticas virgens e a temperaturas mais críticas de craqueamento. As amostras rejuvenescidas exigiram maior energia de compactação em relação à virgem, e alguns óleos reduziram ligeiramente a resistência à umidade.

Os estudos supracitados servem apenas para engrandecer ainda mais o presente trabalho, frisando a importância que o fio condutor dessa pesquisa representa, e mostrando um pouco das recentes pesquisas que buscam encontrar métodos de se reciclar cada vez mais, inserindo maiores teores de RAP nas misturas, e poder chegar a 100% de reciclagem no ramo da pavimentação. Porém, tais estudos ainda se voltam mais a prática de HMA do que WMA, não sendo o foco principal da atual pesquisa.

A tecnologia WMA pode ser usada com sucesso, de acordo com Rondón-Quintana *et al.* (2015), através da fabricação de misturas que utilizam materiais recicláveis e que respeitam o ambiente, como RAP e misturas modificadas com resíduos. Porém, além disso, as misturas mornas proporcionam substituir grande parte da sua composição granulométrica por agregados, tais como escórias de aço,

cinzas volantes e entre outras, mostrando um novo aspecto de reciclagem no ramo de pavimentação.

Oliveira (2013) avaliou as misturas asfálticas recicladas mornas em relação a trabalhabilidade, a compactabilidade e ao comportamento mecânico das misturas. Foram dosadas e caracterizadas, em laboratório, 14 misturas de concreto asfáltico (CA), quais sejam: (i) duas misturas de referência (uma dosada através da metodologia de dosagem Marshall e outra através da metodologia Superpave), (ii) três misturas asfálticas mornas (dosadas através da metodologia de dosagem Marshall) com, respectivamente, 20, 30 e 40°C de diminuição das temperaturas, utilizadas em todas as etapas do processo de dosagem, (iii) três misturas asfálticas mornas (dosadas através da metodologia de dosagem Superpave), com as mesmas diminuições nas temperaturas já mencionadas, (iv) três misturas asfálticas recicladas a quente (dosadas através da metodologia de dosagem Superpave), com 15, 35 e 50% de fresado em suas composições e (v) três misturas asfálticas recicladas mornas com os mesmos percentuais de fresado utilizados acima e, com a diminuição de temperatura de 40°C, em todas as fases do processo. Além dessas 14 misturas, foram dosadas outras quatro misturas em laboratório e testadas em campo com a construção de trechos experimentais.

Oliveira (2013) concluiu com os resultados encontrados, que as misturas asfálticas recicladas mornas tem um potencial promissor, tendo em vista que as mesmas apresentaram parâmetros volumétricos e comportamento mecânico similares as misturas asfálticas convencionais a quente, alcançados sem a necessidade de mudanças nos equipamentos utilizados para a produção dessas misturas. Através do estudo, foi possível atingir patamares de economia no consumo de CAP virgem de até 45% e de agregados convencionais virgens em até 50%, além de uma possível diminuição do consumo energético durante o processo de produção dessas misturas asfálticas, devido a redução das temperaturas de usinagem e compactação em até 40°C.

Nejad *et al.* (2013) realizaram um estudo experimental para avaliar a deformação permanente de WMAs, contendo 0%, 15%, 30%, 50% e 60% de RAP em sua composição. Para avaliar o impacto do RAP sobre as propriedades de Afundamento de Trilha de Roda (ATR), as misturas foram analisadas usando o Marshall e testes dinâmicos de fluência. Os autores verificaram que a substituição de

até 60% do agregado virgem por RAP melhorou as propriedades de deformação permanente das misturas de asfalto, pois o fresado aumentou a viscosidade do aglutinante de asfalto, e foi fator principal de resistência ao ATR, especialmente em altas temperaturas. Contudo, a substituição de RAP em misturas de asfalto pode aumentar a sensibilidade dos pavimentos. Devido a isso, os autores também realizaram um ensaio de resistência à tração indireta para avaliar o dano por umidade das misturas asfálticas. Os resultados mostraram que a resistência à tração mínima admissível, do inglês *Tensile Strength Ratio* - TSR -, de 70%, foi satisfeita substituindo até 50% do agregado virgem por RAP; já as misturas com 60% de material fresado apresentaram TSR inferior a 70%. Assim, Nejad *et al.* (2013) afirmam que, em sua pesquisa, as misturas asfálticas mornas com 50% de RAP apresentaram-se como o melhor nível de substituição, em relação ao agregado virgem, demonstrando as melhores respostas mecânicas do pavimento a deformação permanente.

Zubaran (2014) avaliou o comportamento de misturas recicladas a quente, em laboratório, e misturas recicladas mornas em uma usina de asfalto, preparada para processar o RAP em módulo especial e promover a espuma asfáltica como técnica de mistura morna. O autor criou projetos em laboratório com diferentes taxas de RAP (0, 30 e 50%) e utilizando agente rejuvenescedor. Foram fabricadas, em usina, duas misturas: uma de referência, sem RAP, e outra com 50% de RAP. Essa pesquisa foi aplicada dentro da Ilha do Fundão, UFRJ, na cidade do Rio de Janeiro, na qual avaliaram-se as condições de contorno durante a usinagem e se monitoraram as temperaturas de usinagem e compactação das misturas recicladas mornas. A avaliação volumétrica, mecânica e do envelhecimento do ligante asfáltico, ao longo da produção das misturas, indicaram viabilidade econômica, ambiental e técnica da reciclagem morna, mediante critérios de seleção de materiais e projetos, e considerando as características dos equipamentos utilizados (ZUBARAN, 2014).

Jair (2015) avaliou duas misturas de asfalto combinando as técnicas WAM-RAP. Uma mistura continha uma taxa de 20% de material reciclado de pavimento, utilizando ligante convencional e modificado, tanto para mistura a quente como morna, além da mistura de referência (sem fresado). O estudo realizado analisou a compactação das misturas asfálticas, e o autor obteve como resultado que a energia necessária para a compactação de misturas com RAP é maior quando utilizado ligante com polímeros modificados, mas pode ser reduzida quando utilizado em misturas

mornas. Quando utilizados asfaltos convencionais e reciclagem a quente, a energia necessária para compactar misturas com RAP foi menor do que a energia necessária para a compactação de misturas contendo granulados virgens. Além de confirmar que a energia foi ainda mais baixa quando utilizada misturas mornas.

Já Lopes *et al.* (2015) apresentam um estudo laboratorial da durabilidade de misturas asfálticas fabricadas usando a combinação de duas técnicas sustentáveis: (i) elevado percentual de pavimento asfáltico reciclado (RAP) e (ii) misturas asfálticas mornas (WMA). Os autores avaliaram os materiais conforme a metodologia francesa de produção de misturas asfálticas, e através dos ensaios mecânicos de afundamento em trilha de roda e vida de fadiga. Foram levados em consideração os problemas associados ao envelhecimento dos materiais a partir do desenvolvido de um protocolo de envelhecimento oxidativo, o qual foi aplicado à metade das misturas, antes dos ensaios mecânicos. Os primeiros resultados mostraram que o uso de WMA e de RAP separadamente, bem como a combinação das técnicas, permitem a obtenção de resultados aceitáveis por norma e equivalentes aos de misturas asfálticas convencionais a quente. Entretanto, a combinação das técnicas WMA e RAP tende a apresentar menores valores de resistência à fadiga quando comparadas ao uso das técnicas em separado.

Em sua tese, Genesseeaux (2015) avaliou a durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. A autora busca compreender o processo de remobilização do ligante envelhecido durante a reciclagem do RAP e, as consequências da magnitude de temperatura empregada no processo de reaquecimento deste material envelhecido. Mesmo com a redução da temperatura de usinagem e compactação das misturas mornas, um dos problemas possíveis da combinação dessas duas técnicas (WMA-RAP) é a ocorrência do fenômeno de recobrimento duplo, que pode impactar na reologia do novo material: o ligante do RAP e o ligante novo não se misturariam totalmente, devido à redução das temperaturas de fabricação, formando camadas superpostas, e ocasionando as falhas mecânicas da mistura asfáltica final.

A qualidade do recobrimento do RAP foi avaliada em escala microscópica e macroscópica. No nível microscópico, a autora utilizou a ferramenta de micro-espectroscopia infravermelha. Em paralelo, no nível macroscópico, desenvolveu um protocolo de ensaio com o objetivo de avaliar a durabilidade das misturas asfálticas

recicladas com taxas elevadas de RAP (50%), cujo objetivo principal foi compreender se há benefícios nas propriedades mecânicas de misturas mornas recicladas. As principais conclusões mostram que uma mistura reciclada morna apresenta resultados satisfatórios de comportamento mecânico que atestam seu uso como camada de revestimento asfáltico, exceto, que ela tem a tendência de ser mais sensível à fadiga que uma mistura com a mesma composição de agregados e de teor de ligante, fabricada a quente ou morna, mas sem a adição de RAP.

Vale salientar, que já existem no mercado usinas propícias a misturas asfálticas recicladas mornas. Somente como exemplo, cita-se a Ciber UAB 18 E, modelo disponível no Brasil. A usina asfáltica tem capacidade de produção de 140 toneladas por hora, conforme relata reportagem publicada pela Revista Manutenção & Tecnologia (2013). Os diferenciais da usina são as tecnologias que permitem reduzir as temperaturas de usinagem e compactação e a utilização de material reciclado.

Essa usina foi instalada na zona portuária do Rio de Janeiro, usufruindo de tecnologia nacional e abastecida com gás natural. Este modelo reduz as temperaturas de usinagem e compactação, misturando água ao ligante, sob determinadas condições. Além da utilização do RAP, também está em estudo a produção de asfalto-borracha, utilizando pneus moídos como insumo. Outro diferencial ainda, a ser implantado, é a fabricação de asfalto colorido, como a pavimentação verde (pavimento que absorve poluentes emitidos pelos veículos).

De acordo com a mesma fonte, a empresa Ciber tem como objetivo, na construção dessa usina, melhorar a massa asfáltica, produzir massas especiais em um tempo mais curto, e com menos desgaste para todos os envolvidos, desde funcionários até moradores do entorno. Além da Ciber, as demais fabricantes, como a BOMAG Marini, Lintec Ixon, Ammann, entre outras, tem ampliado a oferta por modelos apropriados para esse fim, porém são poucas as construtoras/empreiteiras aptas a adotar o RAP.

2.3. ASFALTOS MODIFICADOS POR POLÍMERO

Com o passar dos anos, novos produtos vão sendo descobertos e aos poucos, testados e incorporados ao mercado. Quando se trata de ligante asfáltico essa prática é bastante corrente. A busca por um material pouco suscetível as variações climáticas,

que apresente uma boa flexibilidade a baixas temperaturas e que seja estável a temperaturas elevadas, motivou a modificação dos ligantes por diferentes tipos de polímeros e até mesmo, materiais reaproveitados, como é caso da borracha de pneus (ROSSATO, 2015).

Materiais poliméricos, segundo Morilha Junior (2004) podem ser de origem orgânica, vegetal ou sintética, cuja estrutura molecular consiste na ligação por reação química de pequenas unidades, chamadas monômeros. Esta reação é chamada de polimerização e o tamanho final da molécula, oriunda da reação com os polímeros, é conhecido como macromolécula. Polímeros compostos de monômeros idênticos são denominados homopolímeros. Caso sejam compostos por espécies diferentes de monômeros, são chamados de copolímeros. O polietireno é um exemplo de homopolímero, produto resultante da polimerização de etileno (gás petroquímico). Como exemplos de copolímeros têm-se o SBS (Estireno-Butadieno-Estireno) - polímero mais utilizados nos ligantes asfálticos -, EVA (Polietileno-Vinil-Acetato) e o SBR (Estireno-Butadieno-Rubber).

Ainda, conforme Morilha Junior (2004), os polímeros podem ser divididos em duas categorias: elastômeros e plastômeros. Elastômeros, como o polímero SBS, em geral, tem como principal característica a elevada resposta elástica, apresentando alta resistência à deformação permanente. Plastômeros, como é o caso do EVA, formam uma consistente e rígida rede tridimensional para resistir à deformação plástica.

Dentre uma grande variedade de polímeros, busca-se atingir um produto que apresente propriedades desejáveis à modificação dos ligantes asfálticos, como propriedades de recuperação elástica, elevado ponto de amolecimento, melhoria da suscetibilidade térmica, melhor resistência ao envelhecimento e maior adesão e principalmente coesão das misturas asfálticas. O DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - (1998) e a *Asphalt Academy* (2001) definiram as características, a seguir, como sendo as principais:

- *Adesão*: ligantes modificados aumentam a resistência da película de ligante ao arrancamento da superfície do agregado, principalmente pela ação da água;
- *Coesão*: os ligantes modificados possuem maior capacidade de manter os agregados da mistura unidos;

- *Envelhecimento*: a maior viscosidade dos ligantes modificados incrementa a espessura de película sobre o agregado, esta característica protege o revestimento do envelhecimento acelerado;
- *Recuperação elástica*: o ligante modificado mantém a integridade do revestimento, mesmo quando sujeito a níveis elevados de deformação, ao contrário do comportamento puramente dúctil dos ligantes asfálticos convencionais;
- *Suscetibilidade térmica*: a consistência do ligante asfáltico modificado tende a permanecer inalterada sob uma larga faixa de temperaturas; em climas frios, o ligante permanece mais flexível e aumenta a resistência do revestimento à fadiga e ao trincamento térmico; em climas quentes, o maior ponto de amolecimento e a maior viscosidade do ligante aumentam a resistência à deformação permanente.

Muitos estudos têm indicado a importância do ligante asfáltico no desempenho de misturas. Asfaltos com menor viscosidade tornam as misturas betuminosas menos rígidas e mais susceptíveis às deformações irreversíveis, ou seja, aos afundamentos de trilhas de roda, como reiteram Mahboub & Little (1988).

De acordo com Hunter (2000), a modificação de asfaltos com polímeros faz com que o mesmo tenha menor rigidez em baixas temperaturas e maior rigidez nas temperaturas mais elevadas. Sendo assim, tanto a resistência à fadiga quanto à deformação permanente podem ser melhoradas com a adição de polímeros.

Conforme Nascimento (2008), um parâmetro freqüentemente utilizado para avaliar o efeito da modificação por polímero é o ângulo de fase, o qual indica o grau de elasticidade do ligante, sendo que, menores ângulos de fase indicam maior elasticidade, que se traduz em maior resistência à deformação permanente no pavimento. Em seu estudo, o autor verificou-se que misturas com ligantes asfálticos de maior consistência em temperaturas elevadas e esqueleto pétreo deficiente tiveram desempenho amplamente inferior ao de misturas com ligantes convencionais (de menor consistência) com esqueleto pétreo adequadamente projetado, mostrando a melhora quanto à deformação permanente de ligantes modificados.

No entanto, mesmo com tantas vantagens, a adição de polímeros aos ligantes ainda é restrita, pois implica em aumento significativo do custo do produto. Visando

modificar as propriedades dos ligantes convencionais de forma mais econômica, surgiu a técnica de incorporação de borracha moída de pneus nestes materiais. Esta prática, segundo Specht & Ceratti (2003), apresenta uma série de vantagens técnicas e econômicas em relação aos ligantes tradicionais:

- Ideal para utilização em restauração sobre pavimentos com níveis de trincamento severos, devido a sua capacidade de retardar a reflexão destas;
- Permite a redução da espessura da camada asfáltica projetada;
- Possibilita o reaproveitamento de materiais inservíveis, como é o caso dos pneus velhos;
- Possui uma relação custo benefício vantajosa sobre os ligantes asfálticos convencionais, tendo em vista o baixo custo de manutenção ao longo dos anos;
- Reduz o nível de ruído provocado pelo atrito pneu/pavimento.

A adição de borracha de pneus ao ligante convencional resulta em um produto mais dúctil, mais viscoso e com melhor suscetibilidade térmica, pois faz com que sejam transferidas para o ligante asfálticos algumas características químicas das borrachas vulcanizadas. A capacidade de inibir os raios ultravioletas e antioxidantes garante uma maior vida útil a estes ligantes (SPECHT & CERATTI, 2003).

Há duas formas de modificar os ligantes convencionais pelo uso de borracha de pneus, por via seca ou úmida. No primeiro caso, a borracha moída de pneus é considerada como parte constituinte dos agregados da mistura, sendo adicionada junto com estes na mistura. Por via úmida, a fração borracha é inserida e misturada diretamente ao ligante para posterior incorporação dos agregados.

Specht (2004), em sua pesquisa de análise sobre a incorporação de borracha reciclada de pneus em laboratório e campo, verificou tanto a superioridade dos ligantes modificados, como das misturas asfálticas preparadas com tais ligantes. De acordo com o autor, incorporar 12% a 18% de borracha ao ligante para, ambos os tipos de processo de incorporação da borracha (por via seca ou úmida), leva a produções de misturas com maior resistência à fadiga, às deformações permanentes e maior durabilidade. Atribui-se essas melhoras à menor sensibilidade a variações de temperatura destes ligantes. O percentual ideal, que consta na norma DNIT - EM 111/2009 - Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de

pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending”, é entre 15% a 20%.

Bruxel (2015) analisou misturas asfálticas com ligantes modificados, utilizando agregados de origem vulcânica, com granulometria enquadrada na Faixa C, de acordo com a norma DNIT - ES 031/2006 - Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfáltico. A autora trabalhou com quatro tipos de ligantes asfálticos: CAP 50/70, CAP TLA, CAP 60/85 e CAP TLA Flex. A dosagem e compactação foram feitas segundo a metodologia SUPERPAVE. Os ensaios evidenciaram que as misturas com TLA Flex obtiveram os melhores resultados, quanto a deformabilidade, resistência e desempenho, através de análise a *AASHTOWare*. Para o TDI_m, as misturas avaliadas por Bruxel (2015) atingiram valores maiores que o mínimo aceitável que é 400, sendo que os valores mais elevados foram para as misturas com modificação no ligante asfáltico, CAP 60/85 e TLA Flex, que obtiveram valores acima de 600. Os maiores valores de resistência à tração por compressão diametral, encontrados pela autora, foram para as misturas com TLA Flex, e os menores valores para as misturas com CAP 50/70, em todas as temperaturas estudadas. No ensaio de módulo de resiliência, à temperatura de 25°C, o TLA Flex apresentou o valor mais elevado. Quanto a análise de desempenho, considerando a duração do pavimento a uma vida de projeto de 10 anos, seriam adequadas as misturas com CAP TLA Flex e CAP 60/85, com 18 cm de espessura de revestimento. Comprovando assim, a grande influência do ligante asfáltico modificado por polímero no desempenho de pavimentos.

Almeida Jr. (2016) estudou a influência do ligante modificado em seus ensaios, e obteve melhores resultados para as amostras com esse tipo de ligante se comparado ao convencional. O ligante modificado aumentou a resistência à tração por compressão diametral na ordem de 60% na resistência para a maior diferença encontrada pelo autor, e o menor na ordem de 10%. No ensaio de módulo complexo o tipo de ligante também foi o fator que mais modificou a rigidez das misturas, assim como encontrado no ensaio de módulo de resiliência. Em análise do espaço Cole Cole, o autor concluiu que o ligante modificado conferiu às misturas uma maior capacidade de atenuação dos esforços. Pelo diagrama de Black, pode-se perceber que o mesmo reduziu o ângulo de fase das misturas asfálticas, indicando que a parcela elástica das mesmas é mais influente que a parcela viscosa, o que corrobora com o acima citado por Nascimento (2008). Na análise à deformação permanente,

das amostras do autor, o ensaio de dano das misturas asfálticas, confirmou a melhora no comportamento das misturas com ligante modificado, sendo as únicas indicadas para tráfego pesado, relatando aumento de 429% a 1171% no valor do parâmetro, em suas misturas, em relação ao ligante convencional.

3. METODOLOGIA

No presente capítulo, são apresentados o planejamento da pesquisa, os materiais utilizados, bem como, os ensaios laboratoriais executados, detalhando o número de amostras ensaiadas e quais as normas seguidas para cada ensaio realizado, além dos resultados obtidos para a dosagem Superpave (parâmetros volumétricos e de densificação). Todos os ensaios laboratoriais foram executados no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O planejamento da referida pesquisa segue as seguintes etapas:

- Coleta e caracterização dos agregados em estudo e do material reciclado de pavimento (fresado);
- Caracterização da viscosidade dos ligantes asfálticos, com e sem adição de Evotherm®;
- Encaixe da composição granulométrica das misturas na Faixa C, do DNIT, baseado na norma DNIT - ES 031/2006;
- Utilização do método Bailey para ajuste granulométrico, a fim de escolher uma estrutura adequada para o bom desempenho das misturas asfálticas;
- Realização de ensaios do processo de dosagem Superpave de misturas asfálticas, através da compactação das amostras pelo Compactador Giratório Superpave (CGS), para a obtenção dos teores de projeto de cada mistura estudada, assim como, suas propriedades volumétricas e índices de compactação giratória (CDI e TDIm);
- Aplicação da Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD), para possibilitar a avaliação da estrutura dos agregados com base na granulometria;
- Realização de ensaios para verificação das propriedades de resistências (Resistência à Tração por Compressão Diametral e *Flow Number*), propriedades de deformabilidade (Módulo de Resiliência e Módulo Complexo) e das propriedades de adesão e coesão (*Lottman* Modificado e Resistência ao Desgaste Cântabro) das misturas asfálticas pesquisadas.

Foram estudadas oito misturas asfálticas na presente pesquisa, entre misturas convencionais, assim chamadas as misturas de referência a quente, e mornas com e sem adição de fresado, utilizando ligantes asfálticos CAP 50/70 e CAP 60/85. Foram denominadas da seguinte forma: Mistura Convencional CAP 50/70, Mistura Morna CAP 50/70, Mistura Morna 25% Fresado CAP 50/70, Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70, Mistura Convencional CAP 60/85, Mistura Morna CAP 60/85, Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85 e Mistura Morna 50% Fresado CAP 60/85. A adição de fresado se dá em substituição ao agregado virgem, em massa. Os ensaios e a quantidade de amostras moldadas, para cada mistura, estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 - Número de amostras necessárias, de acordo com os ensaios realizados na pesquisa, para cada mistura asfáltica estudada

Misturas Asfálticas	Dosagem	Número de amostras para cada ensaio						Total
		Rice	MR/RT	E*	FN	Lottman	Cântabro	
Convencional CAP 50/70	15	5	5	3	3	8	5	40
Morna CAP 50/70	15	5	5	3	3	8	5	40
Morna 25% Fresado CAP 50/70	15	5	5	3	3	8	5	40
Morna 50% Fresado CAP 50/70	15	5	5	3	3	8	5	40
Convencional CAP 60/85	15	5	5	3	3	8	5	40
Morna CAP 60/85	15	5	5	3	3	8	5	40
Morna 25% Fresado CAP 60/85	15	5	5	3	3	8	5	40
Morna 50% Fresado CAP 60/85	15	5	5	3	3	8	5	40
Total de amostras								352

Primeiramente, a ideia foi moldar cinco teores, para cada mistura asfáltica, no processo de dosagem. Porém, reduziu-se essa proporção por já haver uma noção de qual seria o teor de projeto, embasado em teores já aplicados em campo, que ocuparam os mesmos agregados e ligantes asfálticos desta pesquisa. Para a dosagem da primeira mistura, a Mistura Convencional CAP 50/70, foram moldados quatro teores, já para as demais, moldaram-se apenas três, a fim de obter os parâmetros de projeto de cada mistura asfáltica.

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS

Além de agregados pétreos virgens, a pesquisa conta com a adição de material reciclado, proveniente da fresagem de pavimentos antigos, e da utilização do aditivo químico Evotherm® M1, misturado aos ligantes asfálticos convencional CAP 50/70 e modificado por polímero CAP 60/85, com o intuito de avaliar e analisar o comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas, objeto de estudo do presente trabalho.

3.2.1. Material fresado

O material reciclado utilizado é proveniente da fresagem de um trecho do pavimento da FreeWay, localizado no km 72+700, BR-290, estado do Rio Grande do Sul. A máquina que realizou os serviços de retirada do pavimento é uma Fresadora modelo PM 102 – CATERPILLAR. O material fresado, apresentado na Figura 13, foi obtido através de uma parceria entre a Concessionária Triunfo Concepa e a UFSM, através do Grupo GEPPASV (Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária), e advém da mesma pedreira que os agregados minerais utilizados na presente pesquisa.

Foram separadas amostras, secas ao ar, para os ensaios de caracterização do RAP, entre eles, análise granulométrica, determinação do teor de ligante, análise granulométrica após extração de ligante e densidade máxima medida.

Figura 13 - Material fresado utilizado na pesquisa



Separaram-se três amostras para realizar a caracterização granulométrica do material reciclado. Importante frisar que se utilizou apenas o material fresado passante na peneira #3/8" nas misturas asfálticas mornas em estudo, sendo o material > #3/8" descartado. Dessa forma, a curva granulométrica do fresado com betume abrange apenas o material passante na referente peneira. Com o material submetido à extração de ligante, pelo equipamento Rotarex, gerou-se a curva granulométrica do fresado sem betume. Ambas as curvas são apresentadas na Figura 14 e seus dados médios compilados na Tabela 6, e seguem o padrão já consolidado pela literatura, de que após a extração de ligante o material apresente uma proporção maior de finos, se comparado ao fresado com betume.

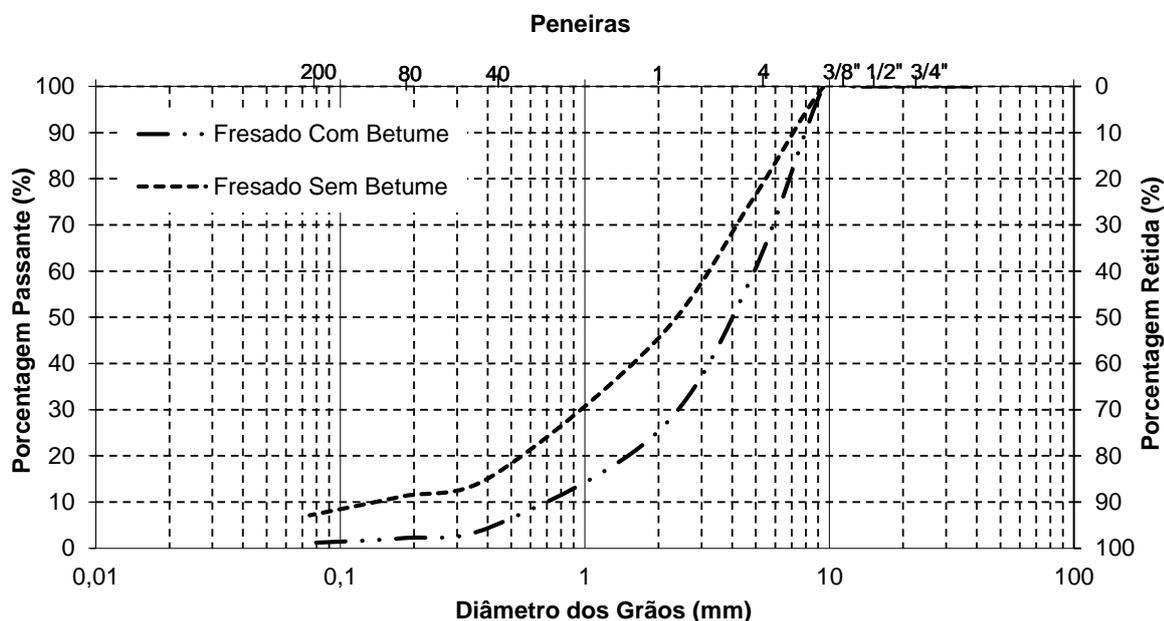
Além de ter sido utilizado apenas o material passante na peneira #3/8", não se separou o RAP nas peneiras menores subsequentes, assim como se sucedeu com os agregados virgens, sendo apenas substituído na proporção de 25% ou 50% nas misturas asfáltica estudadas. Na Europa já é adotada essa prática há algum tempo, com resultados satisfatórios. Também vale salientar que o fresado é constituído de ligante asfáltico modificado por polímero, CAP 60/85.

A proporção de material utilizado (passante na peneira #3/8") por saco de fresado (em média 25Kg), foi de 70%, aproximadamente. Sendo assim, a maior proporção de RAP foi reutilizada nessa pesquisa, deixando os demais 30% para serem utilizados como material reciclado em outras aplicações convenientes, como por exemplo, base negra de pavimento.

Tabela 6 - Resultados da granulometria do fresado com e sem betume

		Porcentagem Média Passante (%)	
Peneira	mm	Fresado Com Betume	Fresado Sem Betume
3/4"	19,1	100,0	100,0
1/2"	12,7	100,0	100,0
3/8"	9,5	100,0	100,0
n 4	4,8	58,6	75,1
n 10	2,0	25,3	45,4
n 40	0,42	4,8	15,7
n 80	0,18	2,2	11,2
n 200	0,075	1,2	7,1

Figura 14 - Curva granulométrica do material fresado, com e sem betume, utilizado na pesquisa



A determinação do teor de ligante do material fresado foi feita através do ensaio de Rotarex elétrico, normatizado pela norma do DNER - ME 053/1994 - Misturas betuminosas - percentagem de betume. A extração de betume do material foi feita em quatro amostras, sendo uma desconsiderada devido a discrepância de valores se comparada às demais, obtendo-se uma média de 5,66% (considerando as três amostras restantes), conforme mostram os dados da Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos através do ensaio de extração de betume

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Teor de Ligante (%)	5,65	5,61	5,71
Teor Médio de Ligante (%)	5,66		

Além disso, também foi realizado o ensaio para determinar a densidade máxima medida (DMM ou *Gmm*) do material reciclado, através do método de Rice, baseado na norma ABNT/NBR 15619:2012 - Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e massa específica máxima teórica em amostras não

compactadas. Realizou-se o ensaio em duas amostras e os resultados são apresentados na Tabela 8.

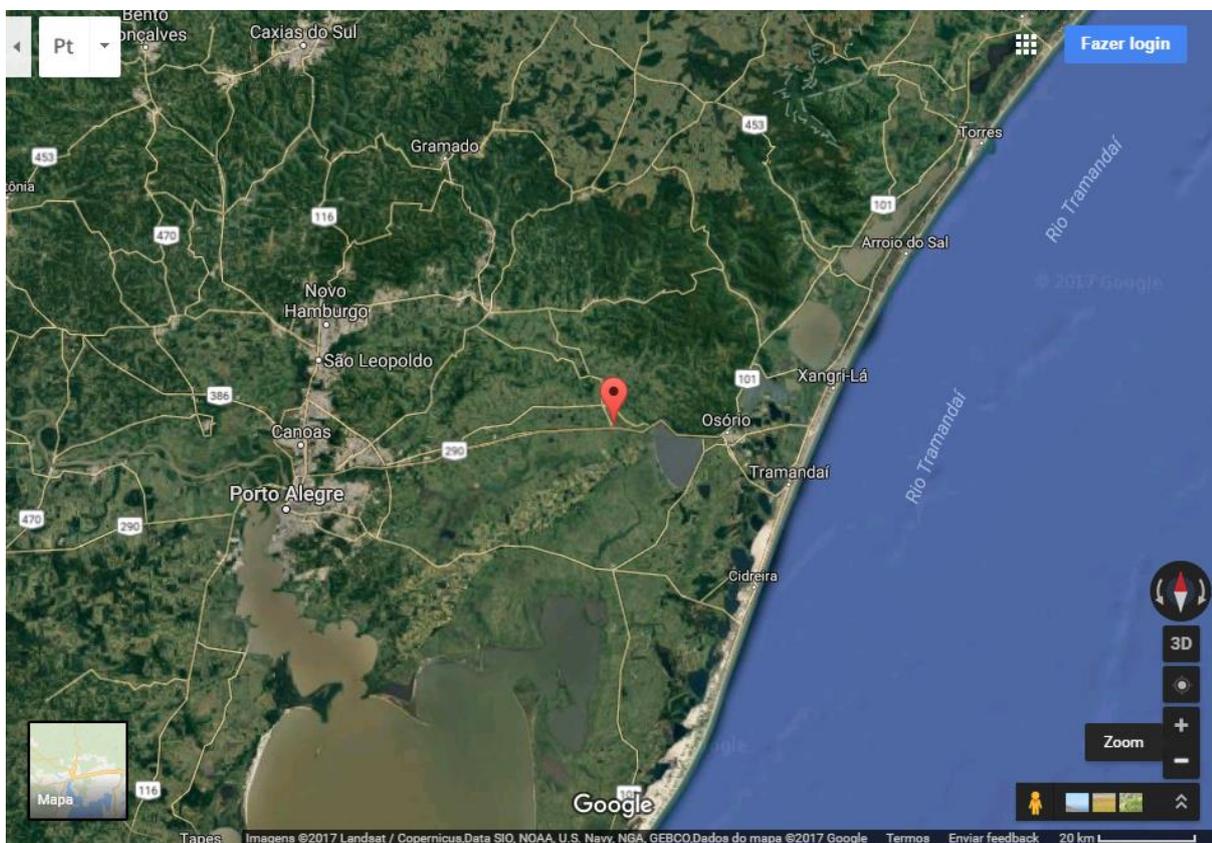
Tabela 8 - Resultado da densidade máxima medida do fresado

	Amostra 1	Amostra 2
Densidade Máxima Medida (g/cm³)	2,599	2,604
Densidade Máxima Medida Média (g/cm³)	2,601	

3.2.2. Agregados Minerais

Os agregados minerais são constituintes essenciais em todos os revestimentos asfálticos e devem apresentar durabilidade adequada, além de propiciar o bom desempenho dos pavimentos, atendendo as solicitações que lhes são impostas. Os materiais granulares da presente pesquisa foram obtidos através do processo de britagem de rocha basáltica, encontrada na região geomorfológica da depressão central (BOEIRA, 2014) e coletados diretamente da unidade de produção, localizada de acordo com a Figura 15, no Km 30, da BR-290 (FreeWay/RS), provenientes da pedreira da Concessionária Triunfo Concepa.

Figura 15 - Localização da pedreira da Concessionária Triunfo Concepa, às margens da BR 290 - Km 30, em Santo Antônio da Patrulha/RS



Fonte: Google Earth

Foram utilizadas as frações brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra, conforme ilustradas na Figura 16. As composições granulométricas das misturas asfálticas foram enquadradas na Faixa C, conforme DNIT - ES 031/2006, que prescreve os mesmos requisitos das normas de reciclagem a quente DNIT - ES 033/2005 e DNIT - ES 034/2005. De forma a atender as especificações do órgão nacional, constantes nessa norma, peneirou-se os agregados em 8 peneiras distintas (3/4", 1/2", 3/8", nº 4, 10, 40 80 e 200), além do fundo (passante na peneira nº 200), separando em cada fração de agregado as peneiras que eram pertinentes.

A granulometria dos materiais pétreos é apresentada na Tabela 9, juntamente com a do material fresado, mostrando assim a distribuição granulométrica média de todos os materiais utilizados na presente pesquisa. Foram peneiradas três amostras de cada fração de agregado mineral, conforme quantidade estipulada na norma DNER

- ME 083/98 - Agregados - Análise granulométrica, após lavados e secos a constância de massa, e por fim, apontado seu peso final.

Figura 16 - Agregados virgens utilizados: a) brita 3/4"; b) brita 3/8"; e, c) pó de pedra

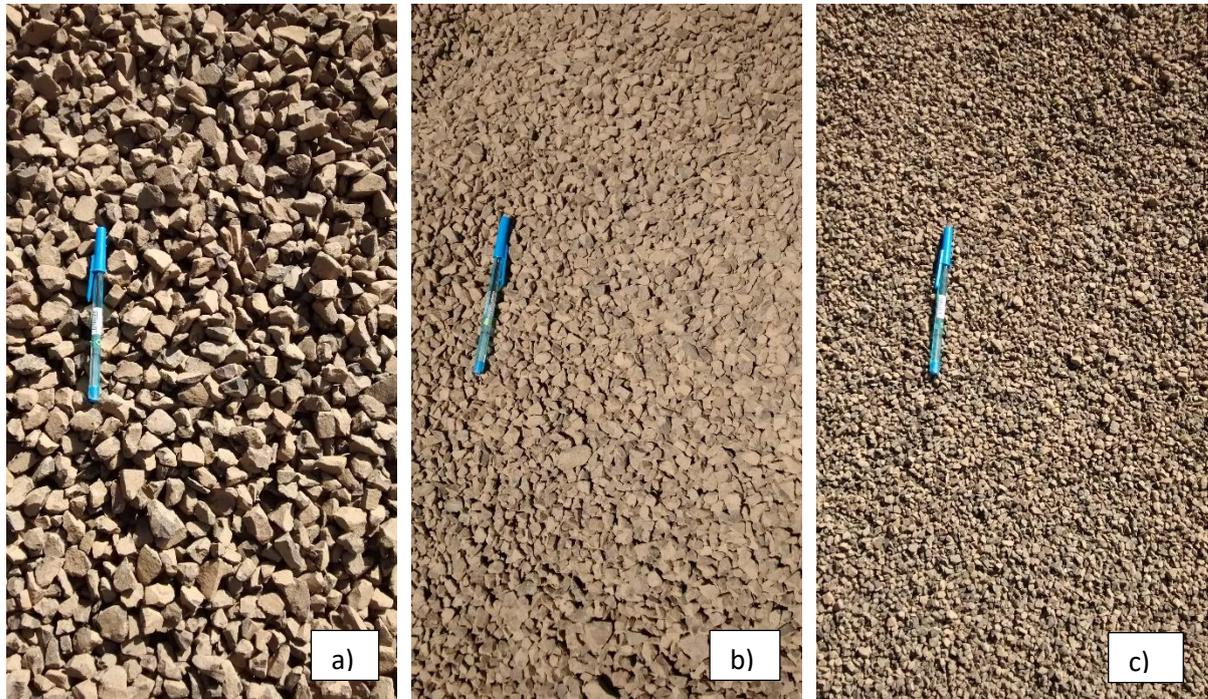


Tabela 9 - Resultados da granulometria dos materiais utilizados na pesquisa, agregados minerais juntamente com o fresado

		Porcentagem Média Passante (%)			
Peneira	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra	Fresado
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	97,9	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,7	48,6	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	7,6	96,1	100,0	100,0
n 4	4,8	1,2	8,8	97,0	58,6
n 10	2,0	1,1	1,4	55,9	25,3
n 40	0,42	1,1	1,4	25,5	4,8
n 80	0,18	1,1	1,4	16,0	2,2
n 200	0,075	1,1	1,4	11,2	1,2

Na Figura 17, foram plotadas as curvas granulométricas dos materiais utilizados na pesquisa, a partir dos dados apresentados. Também foram realizados

ensaios laboratoriais de caracterização dos materiais pétreos e seus resultados estão apresentados na Tabela 10.

Figura 17 - Curvas granulométricas dos materiais pétreos e fresado utilizados na pesquisa

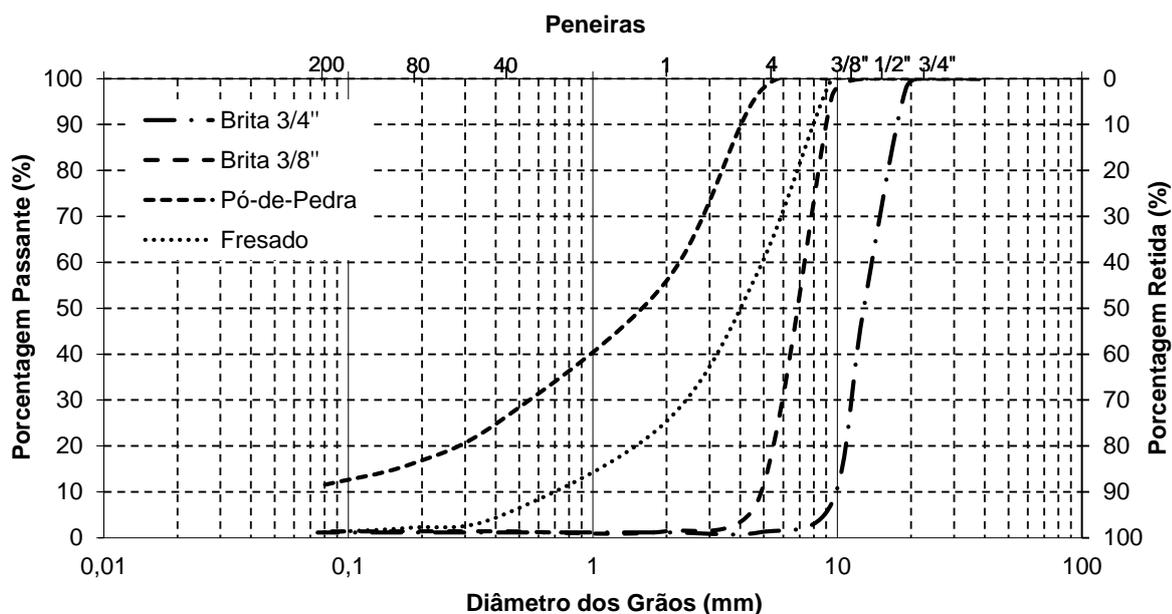


Tabela 10 - Resultado dos ensaios de caracterização do agregado mineral

Ensaio	Norma	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó-de-Pedra
Densidade real/Massa específica real (g/cm ³)	DNER - ME 081/98 - Agregados - Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo e DNER-ME 195/97 - Agregados - Determinação da absorção e da massa específica do agregado graúdo	2,829	2,849	-
Densidade aparente/Massa específica aparente (g/cm ³)		2,769	2,739	-
Absorção (%)		0,773	1,406	-
Massa específica real (g/cm ³)	ABNT/NBR 6508:1984 - Ensaio de Massa Específica dos Grãos	-	-	2,667
	DNER - ME 194-98 - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman	-	-	2,625
Desgaste ou perda a abrasão (%)	DNER - ME 035/98 - Agregados - Determinação da abrasão Los Angeles	8,935		-
Sanidade (%)	DNER - ME 089/94 - Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio	10,357		-

3.2.3. Ligantes asfálticos e aditivo químico

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é o designio do asfalto utilizado em pavimentação, e provém da destilação do petróleo. O revestimento asfáltico herda as propriedades viscoelásticas contidas no ligante, o qual é um material viscoelástico termo suscetível. Dessa forma, quando aplicadas cargas a velocidades maiores, o ligante asfáltico apresenta um comportamento quase elástico, já, quando as cargas apresentam velocidades reduzidas, há a existência predominante de um comportamento viscoso. Sendo assim, entre os dois casos extremos, o comportamento é chamado de viscoelástico, dependente do nível de deformação e da temperatura.

Os ligantes asfálticos utilizados nesta pesquisa foram o convencional CAP 50/70, concedido pela empresa Conpasul, Itaara -RS, e o asfalto modificado por polímero CAP 60/85 STYLINK PG 76-22, fornecido pela Carpenedo e Cia Ltda, de Santa Rosa - RS. O CAP 50/70 teve suas características determinadas em laboratório, conforme mostra a Tabela 11. Já as propriedades do CAP 60/85 são apresentadas na Tabela 12, conforme laudo do fabricante. Comparando as tabelas, nota-se que o ligante modificado mostra ter ponto de amolecimento maior e menor penetração, se comparado ao ligante convencional. Tais constatações indicam que o ligante modificado por polímero apresenta maior viscosidade que o ligante convencional.

Tabela 11 - Especificação do CAP 50/70

Propriedades	Norma	CAP 50/70	
		Especificação	Resultado
Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm	NBR 6576	50 a 70	70
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	Mínimo 46	49
Viscosidade Brookfield a 135°C, cP	NBR 15184	Mínimo 274	333
Viscosidade Brookfield a 150°C, cP	NBR 15184	Mínimo 112	138
Viscosidade Brookfield a 177°C, cP	NBR 15184	Mínimo 57 a 285	68
Temperatura de Mistura, °C	Cálculo	Indicativo	146 a 152 (Média 149)
Temperatura de Compactação, °C	Cálculo	Indicativo	134 a 140 (Média 137)
Ponto de Fulgor °C	NBR 11341	Mínimo 235	334
Densidade Relativa, 20/4°C	NBR 6296	NA/Anotar	0,999

Tabela 12 - Especificação do CAP 60/85 - STYLINK PG 76-22

Propriedades	Norma	CAP 60/85	
		Especificação	Resultado
Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm	NBR 6576	40 a 70	65
Recuperação Elástica Ductilômetro a 25°C, 20 cm, %	NBR 15086	Mínimo 85	86,5
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	Mínimo 60	64
Viscosidade Brookfield a 135°C, cP	NBR 15184	Máximo 3.000	1247
Viscosidade Brookfield a 150°C, cP	NBR 15184	Máximo 2.000	659
Viscosidade Brookfield a 177°C, cP	NBR 15184	Máximo 1.000	240
Temperatura de Mistura, °C	Cálculo	Indicativo	168 a 174
Temperatura de Compactação, °C	Cálculo	Indicativo	148 a 154
Ponto de Fulgor °C	NBR 11341	Mínimo 235	>235
Densidade Relativa, 20/4°C	NBR 6296	NA/Anotar	1,011
Estabilidade na Estocagem - DIF. P. AM., °C	NBR 15166	Máximo 5	2

Fonte: Betunel Indústria e Comércio Ltda

Sendo assim, as temperaturas de mistura e compactação utilizadas na pesquisa para a moldagem dos corpos-de-prova são apresentadas na Tabela 13. Para o ligante convencional CAP 50/70 foi feita a caracterização através do ensaio de Viscosidade Brookfield, utilizando a média do intervalo das temperaturas obtidas, conforme consta na Tabela 11. Para o CAP 60/85 utilizou-se a média das temperaturas de trabalho indicadas pelo fabricante, de acordo com a Tabela 12, devido a não aplicação do método de Viscosidade Brookfield para ligantes modificados.

Tabela 13 - Temperaturas de trabalho dos ligantes asfálticos

Temperaturas de Trabalho	CAP 50/70	CAP 60/85
Mistura (°C)	149	171
Compactação (°C)	137	151

Os aditivos são utilizados nas misturas asfálticas com a finalidade de melhorar suas propriedades e/ou possibilitar a implementação de novas tecnologias no ramo da pavimentação. Nesse objetivo, foi utilizado o aditivo surfactante Evotherm® M1,

ilustrado na Figura 18, para o estudo de misturas asfálticas mornas, possibilitando a redução das temperaturas de mistura e compactação. Através do estudo de Barbosa Jr. (2015), o qual utilizou o mesmo aditivo da presente pesquisa, pode-se constatar que as propriedades mecânicas das misturas não são afetadas pela diminuição da temperatura. O autor seguiu os preceitos estabelecidos pela fabricante, de reduzir até 50°C a temperatura de trabalho, comprovando através da prática de que o aditivo produz o efeito esperado nas misturas asfálticas.

Figura 18 - Aditivo químico surfactante Evotherm® M1



Na Tabela 14 são apresentadas algumas das propriedades físicas e químicas do aditivo em estudo. Esses dados foram retirados da Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ), concedida pela fabricante MeadWeastvaco Corporation (2014), na qual constam mais informações importantes sobre o produto.

Tabela 14 - Propriedades do Evotherm® M1

Propriedades Físicas e Químicas - Evotherm® M1	
Estado Físico	Líquido
Cor	Âmbar (escuro)
Odor	Semelhante a amina
pH	10 a 12 [Conc. (%w/w: 15%)]
Ponto de Fusão	< 25°C
Ponto de Ebulição	> 200°C
Ponto de Fulgor	Taça fechada: >204,4°C [Penski-Martens]
Inflamabilidade	Não é aplicável
Pressão de Vapor	< 1x10 ⁻¹⁰ mmHg a 25°C
Densidade Relativa	0,97 [Água=1]
Solubilidade	Parcialmente solúvel nos seguintes materiais: água fria e água quente

Fonte: Modificado da fabricante MWV (2014)

3.3. PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Após a coleta dos materiais a serem utilizados e sua caracterização, deu-se início a fase de execução das etapas de composição granulométrica das misturas asfálticas e ajuste granulométrico pelo Método Bailey, assim como o processo de dosagem das misturas e determinação dos parâmetros do aditivo químico a ser utilizado para proporcionar o trabalho de misturas asfálticas mornas. Após a dosagem, também foi aplicada a Metodologia Faixa de Agregados Dominantes para análise estrutural das misturas.

3.3.1. Ajuste Bailey e composição granulométrica das misturas asfálticas

É considerável a interferência que diferentes granulometrias emanam nos resultados das misturas asfálticas, dessa forma, é essencial que sejam elaboradas as composições granulométricas com devido cuidado e que atendam aos limites especificados em normas. Nesse sentido, as misturas estudadas foram encaixadas na Faixa C, conforme DNIT - ES 031/2006, e dentro dos parâmetros impostos pela Metodologia SUPERPAVE (entre os pontos de controle para TMN 19 e 12,5 mm - peneiras de controle propostas pela AASHTO M 323-13 - e, fora da zona de restrição

- mesmo em desuso, apenas para mostrar que as misturas se encontram fora dessa zona), além de atender aos preceitos do Método Bailey.

O Método Bailey foi desenvolvido pelo Engenheiro Robert Bailey, no Departamento de Transportes de Illinois (IDOT), através de sua experiência em projetos de misturas asfálticas, com o objetivo de melhorar o desempenho em relação à deformação permanente e apresentar adequada durabilidade. Essa metodologia, acordo com Cunha *et al.* (2004), visa aperfeiçoar a seleção granulométrica por volume dos agregados e, conseqüentemente, o desempenho das misturas asfálticas. Proporciona obter uma mistura asfáltica com esqueleto de agregados bem equilibrado, capaz de resistir à deformação permanente, potencialmente mais resistentes às trincas por fadiga, e com adequado volume de vazios, que permite um maior teor de ligante e aumento da durabilidade da mistura.

Para aplicar esse método, inicialmente, deve ser selecionado o grau de intertravamento dos agregados (que torna a mistura capaz de resistir às deformações permanentes) e deve-se modificar a quantidade de agregado graúdo e miúdo, para garantir que a quantidade de ligante asfáltico seja suficiente, alterando-se os Vazios no Agregado Mineral (VAM). Mendes (2011) define 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 e foram determinadas na pesquisa.

Na presente pesquisa, foram trabalhadas com oito misturas diferentes, porém, com apenas três composições granulométricas distintas: uma referente as misturas convencional e morna, sem adição de material reciclado, e outra à mistura com 25% de fresado e a última à mistura com 50% de RAP em sua composição. Determinaram-se as respectivas porcentagens para cada uma das frações, de modo que fossem satisfeitas as condições impostas acima. Dessa forma, além de enquadrar as misturas asfálticas nos limites da Faixa C, de acordo com DNIT - ES 031/2006, e de respeitar as premissas da Metodologia Superpave (zona de restrição e pontos de controle), visando uma melhor resistência às deformações permanentes, enquadraram-se, dentro do possível, as três misturas aos critérios propostos pelo método Bailey.

A partir da aplicação de todo o processo explicado por Vavrik *et al.* (2002), autor que propôs o método Bailey, pode-se notar que as misturas convencional, morna sem fresado e morna com 25% com fresado apresentam comportamento miúdo, enquanto

que a mistura com 50% de fresado mostra ter comportamento graúdo. Importante frisar também que as misturas convencional, morna sem fresado e morna com 25% fresado apresentam TMN 19 mm, e assim limite de AG entre 0,60 a 1,00, e a mistura com 50% de fresado apresenta TMN de 12,5 mm, e limite de AG entre 0,50 a 0,65. O limite de GAF é de 0,35 a 0,50 e de FAF de 0,35 a 0,50, para todas as misturas estudadas. Os parâmetros obtidos pelo Método Bailey estão prescritos na Tabela 15, onde apresenta-se o fresado como sendo “*black rock*”.

Tabela 15 - Parâmetros das misturas dentro da especificação Bailey, adotando fresado como “*black rock*”

Mistura fresado “Black Rock”	Proporção de Agregados - Especificação Bailey		
	AG	GAF	FAF
Convencional e Morna TMN 19mm	0,73	0,41	0,53
Morna 25% Fresado TMN 19mm	0,97	0,37	0,48
Morna 50% Fresado TMN 12,5mm	1,64	0,34	0,43

Conforme dados da Tabela 15, percebe-se que não foi possível encaixar todos os parâmetros nos limites da especificação Bailey. A grande dificuldade foi quanto as misturas com material fresado. Sua granulometria acabou impossibilitando tal ajuste (pois foi utilizada apenas a fração fina do fresado, passante na peneira #3/8), deixando o parâmetro AG fora do especificado para as misturas com 50% de material reciclado.

Nesse sentido, para verificar a influência que o fresado exerce sobre a mistura, calcularam-se os mesmos parâmetros da especificação Bailey retirando o betume contido no material reciclado, e adotando-o assim como um agregado comum. A Tabela 16 mostra os resultados atingidos, demonstrando que ocorre o mesmo que com as misturas “*black rock*”.

Tabela 16 - Parâmetros das misturas dentro da especificação Bailey, adotando fresado como agregado comum, sem ligante asfáltico

Mistura fresado sem ligante	Proporção de Agregados - Especificação Bailey		
	AG	GAF	FAF
Convencional e Morna TMN 19mm	0,73	0,41	0,53
Morna 25% Fresado TMN 19mm	0,79	0,41	0,50
Morna 50% Fresado TMN 19mm	1,04	0,41	0,48

A proporcionalidade dos agregados de cada mistura foi determinada utilizando o método tradicional de tentativas, para que todos os limites exigidos, acima citados, fossem atendidos. Para as misturas contendo material fresado, primeiramente, foi estipulada e fixada a porcentagem deste material, em 25 ou 50%, conforme a mistura em questão, e após, seguiu-se o método de tentativas. As composições granulométricas das misturas asfálticas estudadas são apresentadas na Tabela 17. A partir das dessas composições, e com a granulometria dos agregados minerais e material fresado, apresentado anteriormente na Tabela 9, pode-se chegar na porcentagem média passante de cada peneira, para as misturas asfálticas pesquisadas, conforme dados da Tabela 18.

Tabela 17 - Composições granulométricas das misturas asfálticas

Mistura	Composições Granulométricas das Misturas Asfálticas			
	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra	Fresado
Convencional e Morna	30%	20%	50%	0%
Morna 25% Fresado	24%	10%	41%	25%
Morna 50% Fresado	15%	0%	35%	50%

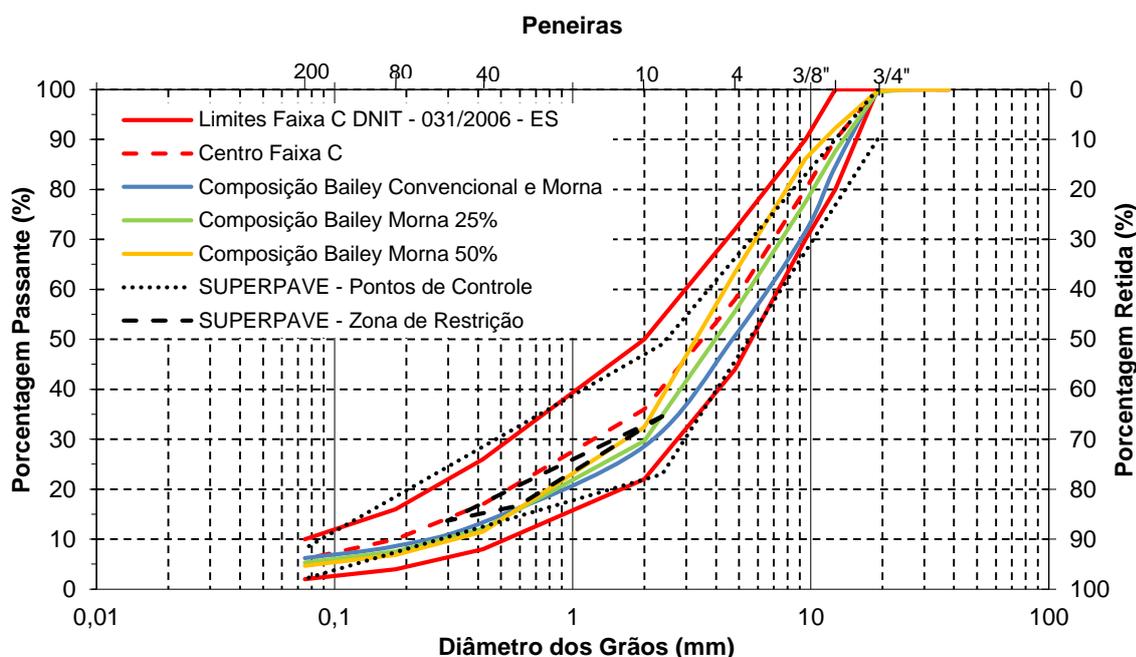
Tabela 18 - Porcentagem média passante (%) das misturas asfálticas, adotando fresado como "black rock"

Porcentagem Média Passante (%)				
Peneira	mm	Convencional e Morna	Morna 25% Fresado	Morna 50% Fresado
1"	25,4	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	99,4	99,5	99,7
1/2"	12,7	84,6	87,7	92,3
3/8"	9,5	71,5	77,4	86,1
n 4	4,8	50,6	55,6	63,4
n 10	2,0	28,6	29,7	32,4
n 40	0,42	13,4	12,1	11,5
n 80	0,18	8,6	7,5	6,9
n 200	0,075	6,2	5,3	4,7

Como pode ser visto, não foi possível manter uma proporção semelhante para todas as misturas devido a inserção de fresado nas mesmas. Para encaixá-las nos limites da Faixa C, atendendo os parâmetros de Bailey e os preceitos da Metodologia

Superpave, como ilustrado na Figura 19, foi necessário alterar as proporções de todas as frações de agregados virgens que compõem as misturas estudadas.

Figura 19 - Composições granulométricas das misturas asfálticas em estudo, adotando fresado como “black rock”



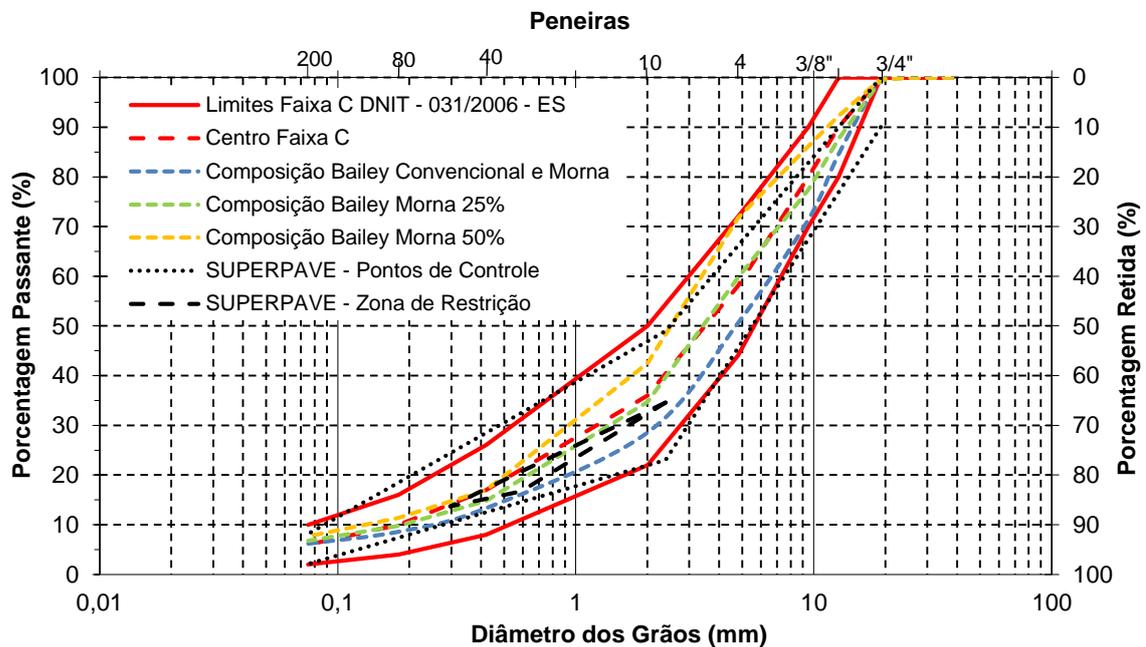
O mesmo processo de adotar o fresado sem betume foi aplicado para analisar como ficariam as composições granulométricas das misturas estudadas. A Tabela 19 compila os dados resultantes, e os mesmos são plotados na Figura 20. É possível notar que há um aumento de finos, o que já era esperado, pois a extração do betume do RAP foi realizada pelo equipamento Rotarex, e ainda, devido a utilização de material < #3/8", apenas há alteração nas peneiras menores que está.

Mesmo com a retirada do ligante asfáltico do material reciclado, e utilizando as mesmas proporções para as frações de materiais listados pela Tabela 17, as misturas ainda atendem aos preceitos da Faixa C, encaixando todos os valores entre os limites estabelecidos pela norma DNIT - ES 031/2006. Vale ressaltar que a mistura com 25% de fresado praticamente se encontra sobre o Centro da Faixa C. Porém, as misturas acabam não respeitando os limites impostos pela Metodologia Superpave, sendo que a mistura com 25% de fresado passa pela zona de restrição, e a mistura com 50% de fresado acaba saindo um pouco da zona delimitada pelos pontos de controle, em certa parte da faixa.

Tabela 19 - Porcentagem média passante (%) das misturas asfálticas, adotando fresado como agregado comum, sem ligante asfáltico

Média Porcentagem Passante (%)				
Peneira	mm	Convencional e Morna	Morna 25% Fresado	Morna 50% Fresado
1"	25,4	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,1	99,4	99,5	99,7
1/2"	12,7	84,6	87,7	92,3
3/8"	9,5	71,5	77,4	86,1
n 4	4,8	50,6	59,7	71,7
n 10	2,0	28,6	34,7	42,5
n 40	0,42	13,4	14,8	16,9
n 80	0,18	8,6	9,8	11,4
n 200	0,075	6,2	6,8	7,7

Figura 20 - Composições granulométricas das misturas asfálticas em estudo, adotando fresado como agregado comum, sem ligante asfáltico



Sendo assim, são mostrados os extremos de comportamento esperado pelo material fresado, sem mobilização nenhuma de ligante envelhecido (*“black rock”*) e com total remobilização do ligante antigo, considerando o fresado como um agregado comum. Sabe-se que as misturas recicladas estudadas trabalham dentro dessa faixa.

3.3.2. Parâmetros de uso do aditivo químico

Para determinar a quantidade de uso do aditivo químico, misturado aos ligantes asfálticos trabalhados na pesquisa, baseou-se nos dados apresentados na Tabela 20, em que a fabricante informa quais porcentagens devem ser utilizadas, de acordo com o tipo de ligante empregado. De acordo com isso, delimitou-se que o aditivo Evotherm® seria acrescido de 0,5% em função do peso do ligante asfáltico, para ambos os ligantes estudados.

Tabela 20 - Parâmetros de uso do Evotherm®

	Ligante não modificado	Ligante modificado por polímero
Dosagem (% em peso pelo total de ligante asfáltico)	0,25 - 0,50	0,30 - 0,75
Faixa de temperatura da mistura	> 104°C	> 118°C
Temperatura inicial de compactação	> 99°C	> 104,4°C
Temperatura final de compactação da camada de rolamento	> 60°C	> 66°C

Fonte: Modificado da fabricante MWV (2015)

O aditivo era adicionado ao ligante pré-aquecido, em aproximadamente 100 e 120°C, para CAP 50/70 e 60/85, respectivamente, em latas de 3,6Kg, para que logo após sua adição pudesse ser feita a mistura homogênea dos materiais. Notou-se que à medida em que era adicionado o aditivo, ambos os ligantes asfálticos, aparentemente, ficavam mais viscosos, porém, não se sabia ao certo se era devido apenas à perda de temperatura para o meio ambiente, ou se havia alguma alteração na viscosidade dos ligantes, quando da inserção do aditivo surfactante Evotherm®.

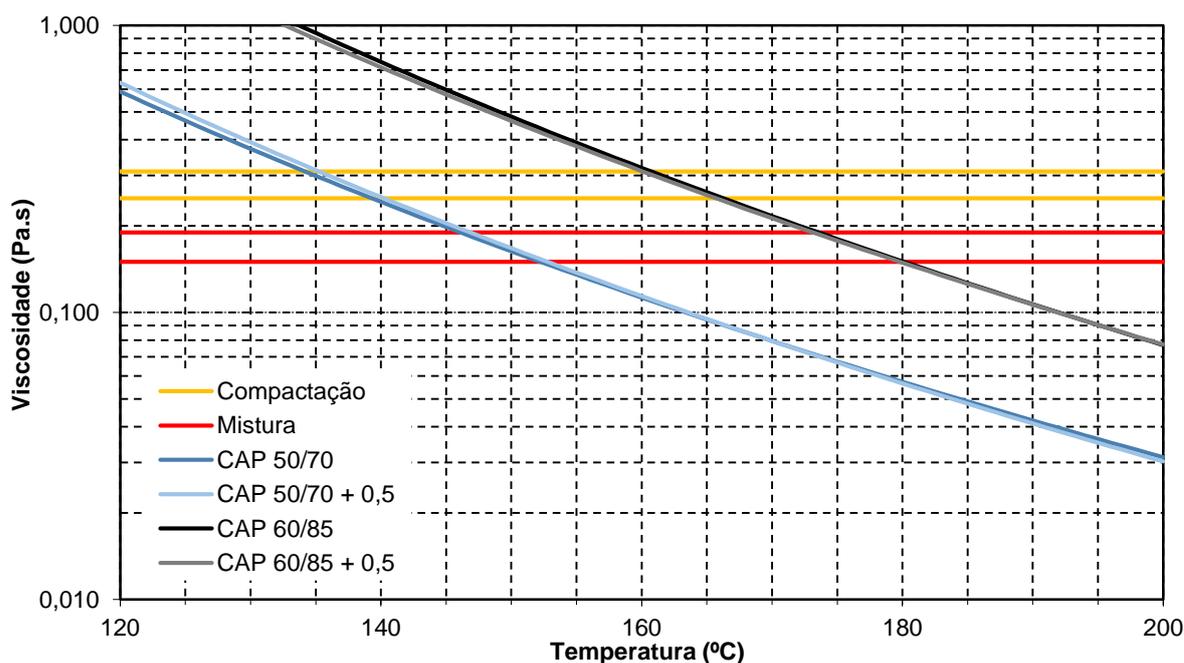
Nesse sentido, apenas para saciar a curiosidade, não sendo de relevância para a presente pesquisa, ensaiou-se uma amostra de CAP 50/70 e uma de CAP 60/85, adicionando 0,5% de Evotherm®, no Viscosímetro Brookfield, além de uma amostra referência para cada ligante asfáltico, obtendo-se os seguintes resultados, conforme Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados do Viscosímetro Brookfield para as amostras de ligantes CAP 50/70 e CAP 60/85 sem e com adição de 0,5% de Evotherm®

Ligante	Atividade	Viscosidade Rotacional (Pa.s)	Temperatura (°C)	Média (°C)
CAP 50/70	Mistura	0,15 - 0,19	146-152	149
	Compactação	0,25 - 0,31	134 -140	137
CAP 50/70 + 0,5% Evotherm	Mistura	0,15 - 0,19	147-153	150
	Compactação	0,25 - 0,31	135 -140	137,5
CAP 60/85	Mistura	0,15 - 0,19	173-181	177
	Compactação	0,25 - 0,31	161-166	163,5
CAP 60/85 + 0,5% Evotherm	Mistura	0,15 - 0,19	173-180	176,5
	Compactação	0,25 - 0,31	160-166	163

De acordo com os dados da Tabela 21, plotados na Figura 21, pode-se notar que a diferença entre as médias das temperaturas obtidas para as amostras de CAP 50/70, com e sem adição de 0,5% do aditivo Evotherm®, é bem pequena, sendo de 1°C na temperatura de mistura e de 0,5°C na de compactação para menos na amostra sem o aditivo. Já nas amostras de CAP 60/85 a diferença é mínima também, de apenas 0,5°C, em ambas as atividades, para menos na amostra com Evotherm®.

Figura 21 - Curvas de viscosidade dos ligantes CAP 50/70 e CAP 60/85 sem e com adição de 0,5% de Evotherm®



Esses resultados mostram que realmente não existe nenhuma alteração na viscosidade dos ligantes, em altas temperaturas, devido a presença de Evotherm®. Evidências que comprovam ser negativa a hipótese acima levantada. Mostrando dessa forma, que o aditivo apenas interage na relação ligante/agregado, alterando a lubrificidade do ligante asfáltico, e assim, aumentando o recobrimento dos agregados, em baixas temperaturas de mistura.

As temperaturas de mistura e compactação adotadas pelo presente trabalho são apresentadas na Tabela 22. Para o ligante convencional CAP 50/70 utilizou-se as temperaturas médias fornecidas pelo ensaio de Viscosímetro Brookfield realizado. Para o ligante CAP 60/85 adotou-se o intervalo de valores estipulado pelo fornecedor, ou seja, o valor médio, tanto para a temperatura de mistura (168-174°C), como de compactação (148-154°C), como já citado no Item 3.2.3.

Para as misturas mornas optou-se por reduzir em 30°C as temperaturas de trabalho em relação às temperaturas de mistura e compactação das misturas convencionais quentes. De acordo com o aditivo utilizado existem parâmetros a cumprir, conforme mostrado acima na Tabela 20, os quais são mencionados novamente na Tabela 22, e a partir deles, pode-se afirmar que as temperaturas escolhidas para a presente pesquisa estão de acordo com as especificações prescritas pela fabricante para o aditivo químico surfactante Evotherm®. A temperatura de aquecimento dos agregados é a soma de 10°C à temperatura de mistura.

Tabela 22 - Temperaturas de mistura e compactação das misturas convencionais e mornas pesquisadas

Temperatura de Trabalho	CAP 50/70			CAP 60/85		
	Mistura Convencional	Mistura Morna	Parâmetros Evotherm®	Mistura Convencional	Mistura Morna	Parâmetros Evotherm®
Mistura (°C)	149	119	> 104	171	141	>118
Compactação (°C)	137	107	>99	151	121	>104,4
Agregados (°C)	159	129	-	181	151	-

3.3.3. Parâmetros da dosagem Superpave e moldagens dos corpos-de-prova de ensaios das misturas asfálticas

Não foram seguidos todos os preceitos que a Metodologia Superpave prescreve em sua norma AASHTO M 323-13. Fez-se uma adaptação dessa metodologia, tendo em comum o cálculo da volumetria e a utilização do Compactador Giratório Superpave. Não foi efetuada a extração e recuperação do ligante do material fresado devido ao laboratório não possuir os equipamentos necessários. Por esse motivo, o RAP foi utilizado como sendo um “*black rock*”. Também não foram adotadas as curvas granulométricas estipuladas pelo método, sendo seguidos, nessa pesquisa, os parâmetros da Faixa C, de acordo com DNIT - ES 031/2006.

Na parte inicial da pesquisa, antes de começar a dosagem das misturas asfálticas, houveram etapas preliminares. Primeiramente, após coletar e caracterizar os materiais pétreos, separou-se os agregados de acordo com as peneiras estipuladas pela Faixa C. Posteriormente, após peneirar a quantidade necessária para moldagem de todos os corpos-de-prova da pesquisa, lavaram-se todos os agregados, da peneira #3/4” à malha nº 200, e foram secos em estufa. Também foi coletado e separado o fundo (passante na peneira nº 200), para ser ocupado na composição das misturas. Já em relação ao material fresado, o mesmo apenas foi peneirado na malha #3/8”, sendo ocupado o passante e descartado o retido. Realizou-se um procedimento padrão de secagem desse material, o qual foi deixado por 4 horas, na estufa, a 60°C. Esse processo foi realizado antes de o material ser utilizado nas moldagens, para fins de eliminar qualquer umidade.

Para a confecção dos corpos-de-prova foi utilizado o misturador da marca InfraTest Testing Systems, modelo Bituminous Laboratory Mixer 30 Liter Special Version 380V 60Hz 3Ph. O misturador era programado para aquecer até a temperatura de mistura de cada mistura asfáltica estudada. Os agregados, já pré-aquecidos, eram previamente misturados por 60 segundos. Após, adicionava-se o ligante asfáltico, e então, a mistura era rotacionada por mais 400 vezes, como pode ser visto na Figura 22. Para as misturas que continham fresado, o mesmo era adicionado junto com os agregados aquecidos, para que atingissem a temperatura média de mistura, visto que o fresado se encontrava aquecido somente a 110°C. Vale destacar que a quantidade máxima misturada foi de 16Kg de massa asfáltica, mesmo

com misturador de capacidade para 30Kg, a fim de cuidar para que houvesse total cobertura ligante/agregado.

Figura 22 - Processo de usinagem das misturas asfálticas estudadas com o InfraTest



Os corpos-de-prova foram moldados no CGS, da IPC Servopac, apresentado na Figura 23. A metodologia SUPERPAVE (Superior PERFORMANCE asphalt PAVements) vêm sendo utilizada pelas universidades e departamentos de transporte norte-americanos, desde 1993. Este método foi desenvolvido nos Estados Unidos pelo programa SHRP (Strategic Highway Research Program). É uma proposta 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 (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A maior diferença entre esse procedimento e o Marshall é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros), conforme também afirma Bernucci *et al.* (2006).

As características de CGS, padronizado pelo Superpave, são utilizar uma pressão vertical no cilindro compactador de 600kPa, diâmetro das amostras de 150 ou 100mm, ângulo de giro de $1,25 \pm 0,02^\circ$ e taxa de 30 rotações por minuto. O número de giros (N projeto) que o compactador giratório aplica nas amostras é dependente do

tipo de tráfego adotado para o projeto de rodovia em estudo, e na presente pesquisa foi adotado um número de giros de 100, correspondente a vias de tráfego médio a alto, que representa um tráfego equivalente à carga de eixo simples entre 1×10^7 e 3×10^7 ESAL (*Equivalent Single Axle Load*) (AASTHO, 1993).

Figura 23 - Compactador Giratório Superpave, equipamento do laboratório LMCC, e amostras dos corpos-de-prova moldados para ensaio



Para o processo de moldagem sucedia-se da seguinte forma, tanto na dosagem, como na produção das amostras a serem ensaiadas: os agregados virgens eram separados no dia anterior, de acordo com a composição granulométrica já apresentada, e ficavam repousando na estufa a noite inteira, a temperatura média de 125°C , e pela manhã, aumentava-se a mesma para a temperatura determinada na Tabela 22; para o aquecimento dos ligantes asfálticos procedia-se da mesma forma, aumentando para a temperatura estipulada pela parte da manhã, após repousar a noite na estufa a 100°C , para que houvesse tempo necessário de o mesmo atingir a temperatura de mistura; o material fresado era apenas colocado em estufa, 2 a 3 horas antes da moldagem, a 110°C , para que não houvesse um grande aquecimento e pudesse causar maior envelhecimento ao ligante asfáltico contido no material.

Os corpos-de-prova moldados para dosagem continham 1200 g (não sendo atentado para a altura do mesmo), sendo elaborados três amostras para cada um dos três teores avaliados, para cada mistura asfáltica, pelo método de tentativa e erro, a

fim de encontrar o teor ótimo de ligante. Mais uma amostra de 1500 g foi separada para a realização do ensaio de determinação da *Gmm*, através do método de Rice, para cada teor testado, o qual obedece a AASHTO T 209-15 - *Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt*, normatizada no Brasil através da NBR 15619:2012 para misturas asfálticas. Através desse parâmetro de densidade, foi possível calcular, em média, o volume de vazios para cada teor, e assim, determinar o teor ótimo de projeto para cada mistura, correspondente a um volume de vazios (Vv) igual a 4%. Todos esses dados são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores de densidade obtidos através do Rice para cada mistura asfáltica estudada

Mistura	Teor de Ligante (%)	Gmm (g/cm³)	Vv(%)
Convencional CAP 50/70	4,5	2,576	5,72
	5,0	2,559	4,19
	5,5	2,529	2,82
	6,0	2,503	1,14
Morna CAP 50/70	4,5	2,583	6,06
	5,0	2,553	3,69
	5,5	2,529	2,10
Morna 25% Fresado CAP 50/70	3,0	2,594	4,79
	3,5	2,574	4,23
	4,0	2,557	3,12
Morna 50% Fresado CAP 50/70	1,5	2,606	8,99
	2,0	2,577	6,01
	2,5	2,557	3,62
Convencional CAP 60/85	4,5	2,568	5,30
	5,0	2,548	4,08
	5,5	2,526	1,93
Morna CAP 60/85	4,5	2,583	5,33
	5,0	2,562	3,38
	5,5	2,539	2,23
Morna 25% Fresado CAP 60/85	3,0	2,593	5,01
	3,5	2,558	2,81
	4,0	2,533	1,21
Morna 50% Fresado CAP 60/85	2,0	2,595	5,80
	2,5	2,571	3,46
	3,0	2,539	1,79

Baseado nas propriedades físicas das misturas e dos agregados, foi possível obter os parâmetros volumétricos das amostras. Na Tabela 24, 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 TMN 19 e 12,5 mm.

Tabela 24 - Requisitos volumétricos para as misturas dosadas pela metodologia Superpave

CAP	Volume de vazios (%)	VAM min (%)	RBV (%)
50/70 ou 60/85	4	13 (TMN 19mm) 14 (TMN 12,5mm)	65-75

Mahmoud & Bahia (2004) propuseram dois índices obtidos a partir da análise das curvas de densificação dos corpos-de-prova das misturas asfálticas compactadas com o compactador giratório do Superpave. A Curva de Densificação é aquela gerada pelo programa de controle do CGS que mostra a porcentagem da densidade máxima teórica conseguida a cada giro da amostra, ou seja, uma avaliação do volume de vazios proporcionado pelos esforços de amassamento acumulados. Segundo estes autores, pode-se fazer uma previsão da trabalhabilidade e do suporte ao tráfego utilizando essas curvas. Estes critérios foram chamados de *Compaction Densification Index* (CDI) e *Traffic Densification Index* (TDI).

O CDI é definido como a área sob a curva de densificação a partir do oitavo giro (N=8) até 92% da densidade máxima teórica (Gmm ou DMT) da mistura. Esta área é proporcional ao trabalho aplicado pelos rolos compactadores para as misturas atingirem a densidade mínima requerida durante a construção, conforme observações dos autores acima citados.

O TDI é definido como a área sob a curva de densificação entre 92% e 98% da Gmm, e baseia-se no princípio de que o revestimento continua a aumentar sua densificação após a construção, devido às cargas do tráfego, admitindo-se que, para um bom desempenho da massa asfáltica no pavimento, esta não deve nunca atingir vazios menores do que 2% (98% da Gmm), de acordo com Budny (2012). Para facilitar o cálculo do TDI, tendo em vista que nem sempre a amostra atinge esse limite, Nascimento (2008) estabeleceu novo índice que chamou de TDI modificado (TDIm). O TDIm considera a área sob a curva de densificação a partir de 92% da Gmm até o

número de giros correspondente ao projeto da mistura (Nproj), definido pelo volume de tráfego, que nessa pesquisa corresponde a 100 giros.

O procedimento de moldagem das demais amostras necessárias para a execução dos ensaios obedeceu aos mesmos princípios da dosagem, sendo os corpos-de-prova misturados no InfraTest e compactados no CGS. Variou-se apenas o número de giros, de acordo com o volume de vazios requerido para cada ensaio, bem como a dimensão da amostra, conforme estipulado nas referentes normas de cada ensaio. A quantidade de massa a ser processada para cada amostra foi calculada de modo a obter a altura desejada do corpo-de-prova, sendo que este não foi um parâmetro controlado na dosagem.

As figuras que detalham os parâmetros volumétricos e os parâmetros de densificação obtidos nas misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa, pela dosagem no CGS, juntamente com os limites prescritos por normas ou autores referência, encontram-se no Apêndice A.

A síntese dos resultados da dosagem obtidos para as misturas, a partir do teor de projeto, estão apresentados na Tabela 25. Devida a inserção do fresado nas misturas, optou-se por mostrar os teores adicionados (ligante virgem), teores antigos (referente a parcela de ligante existente no fresado) e a soma desses dois teores, mostrando a quantidade total de ligante em cada mistura. Na Figura 24, apresenta-se os teores de projeto das misturas estudadas, teor adicionado e teor total, em um gráfico de coluna, para melhor comparação entre misturas, mostrando a perspectiva de fresado como “*black rock*” e de fresado com mobilização total do ligante antigo, respectivamente.

Importante salientar que no processo de dosagem das misturas asfálticas recicladas mornas, devido ao fresado possuir a mesma composição mineralógica dos materiais granulares, adotou-se como densidade teórica da mistura, para o cálculo do VAM e RBV, o valor da densidade obtida pelo RICE, considerando o total de ligante da mistura (teor de ligante utilizado + teor de ligante do fresado). Esse valor de densidade aparente desconsidera a densidade do ligante da mistura, considerando apenas a densidade dos agregados granulares virgens e provenientes do fresado. Para as misturas sem fresado procedeu-se da forma usual, considerando somente as densidades dos agregados virgens, já apresentadas no Item 3.2.2.

Pode-se perceber que existe uma grande redução da quantidade de ligante à medida em que se aumenta o teor de fresado nas misturas, mostrando que o ligante antigo existente no agregado reciclado retorna à vida, independentemente do tipo de ligante utilizado. Dessa forma, não se pode trabalhar considerando o fresado como um “*black rock*”. Por restrições laboratoriais, ainda não é possível determinar as características do ligante proveniente do material reciclado.

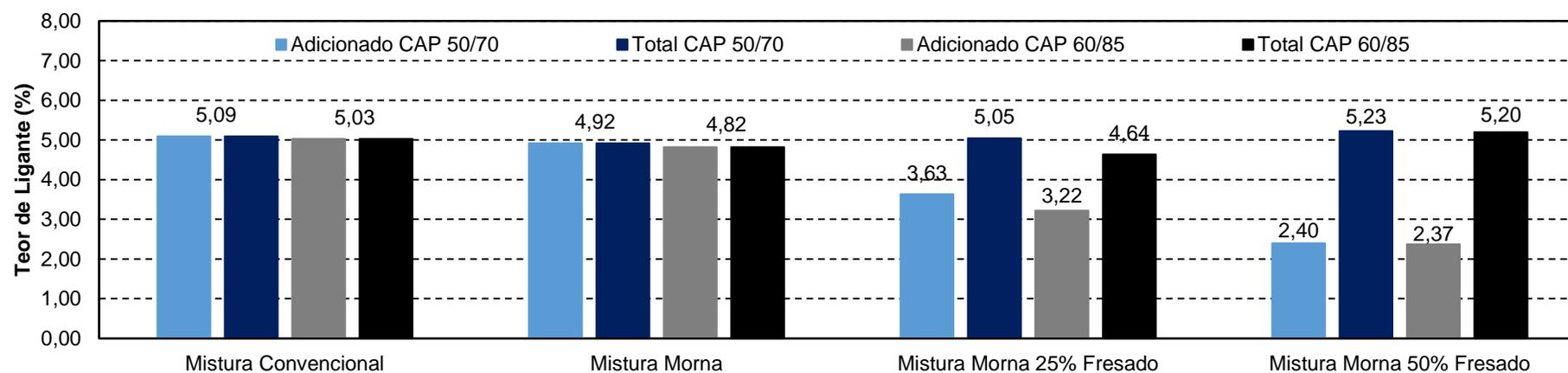
Nesse mesmo pensamento, pesquisas estão sendo desenvolvidas a fim de determinar o grau de ligante que volta à ativa, em dependência da temperatura de mistura (HUANG *et al.*, 2005; SHIRODKAR *et al.*, 2011; GENNESSEAU, 2015). Estudo bastante promissor no sentido de se entender profundamente o comportamento do RAP, e assim, reutilizar 100% de material reciclado em misturas asfálticas novas, reduzindo brutalmente o valor envolvido na obra e preservando o meio ambiente, devido ao depósito desse material, sem utilização, além de não haver necessidade de explorar novas jazidas de material pétreo.

Tabela 25 - Parâmetros volumétricos e de densificação obtidos com as dosagens Superpave

Mistura	Teor de Ligante Adicionado (%)	Teor de Ligante Antigo (%)	Teor de Ligante Total (%)	Proporção Ligante Adicionado e Antigo (%)	VAM (%)	RBV (%)	MEA (g/cm ³)	CDI	TDIm
Mistura Convencional CAP 50/70	5,09	-	5,09	100 - 0	13,42	70,0	2,450	40	462
Mistura Morna CAP 50/70	4,92	-	4,92	100 - 0	13,00	69,0	2,455	66	508
Mistura Morna 25% Fresado CAP 50/70	3,63	1,42	5,05	72 - 28	15,25	73,5	2,466	60	533
Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70	2,40	2,83	5,23	46 - 54	14,75	72,5	2,460	60	560
Mistura Convencional CAP 60/85	5,03	-	5,03	100 - 0	13,48	70,0	2,444	50	510
Mistura Morna CAP 60/85	4,82	-	4,82	100 - 0	12,48	68,5	2,468	55	529
Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85	3,22	1,42	4,64	69 - 31	13,95	72,5	2,474	54	513
Mistura Morna 50% Fresado CAP 60/85	2,37	2,83	5,20	45 - 55	14,05	72,0	2,474	53	550

Nota: Material fresado com ligante modificado com polímero (CAP 60/85)

Figura 24 - Teor de ligante adicionado e total das misturas estudadas, de acordo com as dosagens Superpave



Os teores de projeto ficaram bem parecidos entre as misturas com CAP 50/70 e CAP 60/85, como mostra a Figura 24. A Mistura Morna 25% Fresado é a que apresenta a maior diferença encontrada, em torno de 0,4% a mais no teor de ligante da mistura com CAP 50/70 se comparada a mistura com CAP 60/85.

A partir da análise dos dados da Tabela 25, pode-se perceber que duas misturas tem uma pequena discrepância de valor e ficam um pouco fora do limite necessário para aprovação nos parâmetros volumétricos e de densificação, são elas as misturas Convencional CAP 50/70 e a Morna CAP 60/85, respectivamente, nos parâmetros CDI e VAM. O CDI encontrado é de 40, sendo que seu valor ideal deveria ser superior a 50, de acordo com Nascimento (2008), já o VAM ficou em volta de 12,48%, sendo que o mínimo para misturas dosadas pela metodologia Superpave é de 13%, para revestimentos com TMN de 19 mm. Entretanto, mesmo com essas diferenças as misturas se encaixaram em todas as outras delimitações, e foram validadas.

Quanto aos parâmetros de densificação, vale a pena frisar a importância que Nascimento (2008) ressaltou, dizendo que misturas com valores de CDI maiores que 50 têm melhor compactabilidade e são consideradas ideais, tanto para tráfego médio como para tráfego pesado. Isso é o desejável, ao passo que misturas com valores de CDI baixos têm problemas de estabilidade e devem ser evitadas. Já para Bahia & Faheem (2007), para tráfego médio a pesado o máximo valor de CDI aceito é 300.

Quanto aos valores de TDI, energia oriunda da compactação giratória, Nascimento (2008) afirma que esses valores estão relacionados com a estabilidade da mistura, e para tráfego médio e pesado deveriam ter valor maior que 250 e 400, respectivamente. Valores de TDI mais elevados remetem a uma maior expectativa do revestimento asfáltico resistir aos esforços impostos pelo tráfego, durante sua vida útil. Bahia & Faheem (2007) estipulam valores de TDI maiores que 400, 800 e 1220, para tráfego leve, médio e pesado, respectivamente.

Assim, é possível observar, através dos dados apresentados, que as misturas contendo material fresado em sua composição apresentam igual ou melhor desempenho, quando comparadas às misturas com apenas agregados virgens, conforme mostram as Figuras 25 e 26, respectivamente para os dados de CDI e TDIm. Os valores de CDI e TDIm obedecem aos limites ditados por Nascimento (2008) e os

resultados de TDI_m são maiores que 400, valor mínimo, para tráfego leve, estipulado por Bahia & Faheem (2007).

Figura 25 - Parâmetros de densificação CDI para todas as misturas estudadas

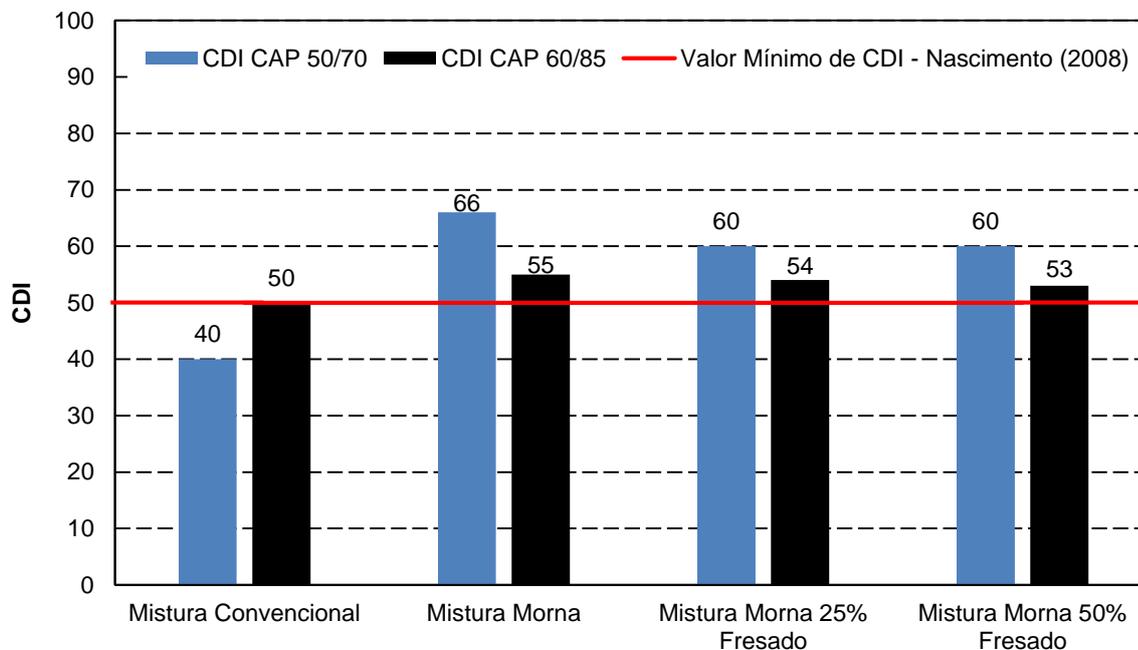
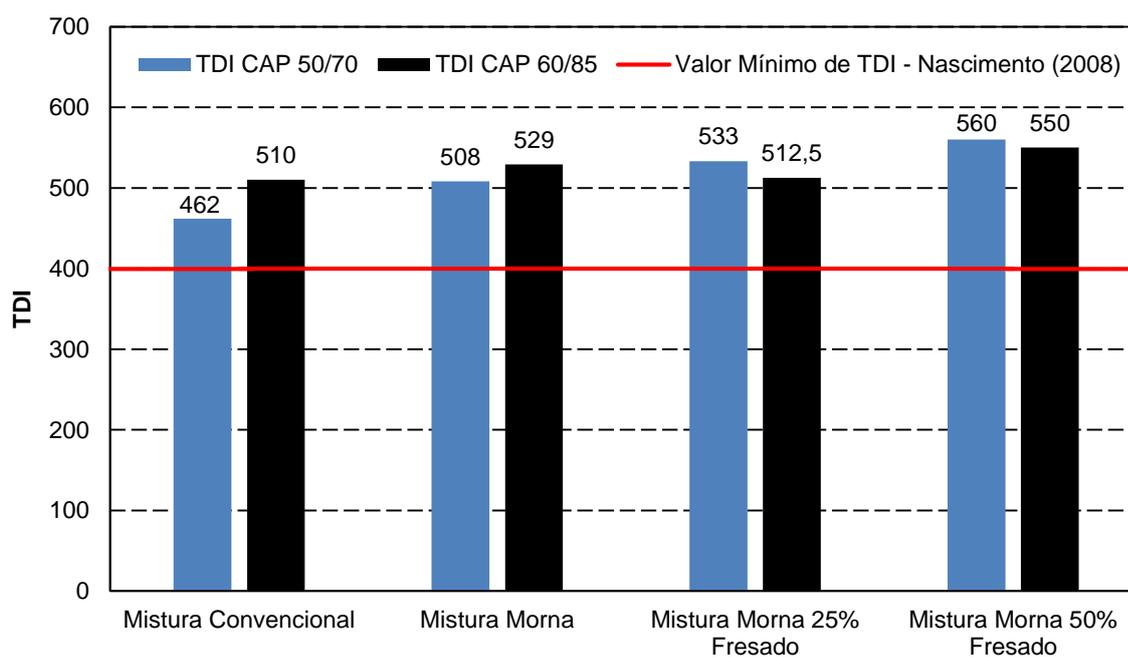


Figura 26 - Parâmetros de densificação TDI_m para todas as misturas estudadas



3.3.4. Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD)

A metodologia FAD propõe uma análise conceitual e teórica para avaliar a estrutura dos agregados, com base na granulometria, conforme Ferreira (2015). Esse método foca apenas na distribuição granulométrica das misturas asfálticas, embora é sabido que outras propriedades dos agregados também são importantes para um melhor desempenho em campo, como reitera o mesmo autor. Em suma, a FAD, proposta na Universidade da Florida, por Kim (2006), é uma característica da curva granulométrica e consiste de um ou mais tamanhos de agregados que interagem entre si para a formação de um esqueleto pétreo resistente na mistura asfálticas. A FAD está diretamente relacionada à resistência permanente (FERREIRA, 2015).

Os agregados de dimensões inferiores a FAD preenchem os espaços entre suas partículas, assim como o ligante asfáltico e os vazios com ar, sendo denominados de Componentes Intersticiais (CI) e, em conjunto, formam o chamado Volume Intersticial (VI). Este VI está fortemente ligado ao trincamento por fadiga, e à energia de ruptura da mistura asfáltica, assim como, em contrapartida, mantém as partículas da FAD unidas, fornecendo adesão e resistência à tração (Kim, 2006; Greene *et al.*, 2014; Roque *et al.*, 2015).

Essa metodologia é uma analogia com a Mecânica dos Solos, e se refere ao conceito de porosidade de um material granular. Esta que é uma propriedade adimensional, e é uma proporção entre o volume de vazios e volume total de um material. No caso da porosidade FAD de misturas asfálticas, o volume de vazios da FAD é composto pelos agregados intersticiais e pelo VAM, e o volume total é igual ao volume total da mistura asfáltica subtraindo-se o volume de agregados flutuantes. A Equação 1 expressa esse cálculo.

$$n_{FAD} = \frac{V_{v(FAD)}}{V_{T(FAD)}} = \frac{V_{IC,ag} + V_{AM}}{V_{TM} - V_{ag>FAD}} \quad (1)$$

Onde:

n_{FAD} = porosidade da FAD (%);

$V_{v(FAD)}$ = volume de vazios dentro da FAD (%);

$V_{T(FAD)}$ = volume total de agregados disponível para a FAD (%);

$V_{IC,ag}$ = volume de agregados intersticiais (menores do que a FAD);

V_{AM} = volume de vazios no agregado mineral;

V_{TM} = volume total da mistura;

$V_{ag>FAD}$ = volume de agregados flutuantes (maiores do que a FAD).

Para Kim (2006) somente as partículas maiores que 1,18mm (peneira Nº 16) são as responsáveis por proporcionar resistência à deformação permanente e à fratura. O FAD considera uma porosidade de 50% como ponto de partida para avaliação da estrutura geométrica de uma mistura asfáltica, conforme Ferreira (2015).

Em sua pesquisa, Kim (2006) percebeu que havia uma faixa de partículas que interagem entre si, e que era necessário saber quais peneiras formavam um esqueleto pétreo resistente, sendo necessário determinar a porosidade total da mistura e não apenas a de uma partícula individual. A proporção entre as partículas que interagem fica em torno de 70/30. Quando essa proporção excede, as partículas em menor proporção passam a flutuar dentro das outras partículas.

Sendo assim, o autor concluiu que atendendo a esse critério e apresentando porosidade inferior a 50%, as misturas seriam resistentes à deformação permanente. Já para Greene *et al.* (2014) para apresentar um bom intertravamento em sua granulometria e uma boa resistência à deformação permanente, as misturas asfálticas deveriam apresentar porosidade FAD entre 38% e 48%. Há também as porosidades classificadas como marginais, segundo os autores acima, que se localizam entre 48% e 52%, e podem ter bom ou mau comportamento, devido ao contato intergranular indefinido.

Dessa forma, as misturas asfálticas estudadas foram submetidas a análise de sua porosidade, e a partir da determinação das proporções relativas do percentual retido entre peneiras consecutivas, entre as proporções 70/30 e 30/70, foi possível determinar qual a peneira ou grupo de peneiras que interagem entre si para compor a FAD de cada mistura analisada. Foi determinada a FAD adotando fresado como “*black rock*” e como agregado comum, sem ligante asfáltico. Obteve-se os resultados apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados da metodologia FAD nas misturas asfálticas estudadas, considerando fresado como “*black rock*” e como agregado comum, sem ligante

Mistura	Peneiras FAD	FAD “ <i>Black Rock</i> ”	FAD Sem ligante
Convencional CAP 50/70	12,5 - 1,18	31,3%	31,3%
Morna CAP 50/70	12,5 - 1,18	31,0%	31,0%
Morna 25% Fresado CAP 50/70	4,75 - 1,18	40,4%	45,5%
Morna 50% Fresado CAP 50/70	4,75 - 1,18	37,3%	46,7%
Convencional CAP 60/85	12,5 - 1,18	31,4%	31,4%
Morna CAP 60/85	12,5 - 1,18	30,6%	30,6%
Morna 25% Fresado CAP 60/85	4,75 - 1,18	39,2%	44,4%
Morna 50% Fresado CAP 60/85	4,75 - 1,18	37,0%	46,4%

Pode-se observar que as misturas asfálticas sem fresado, Misturas Convencional e Morna, de ambos os ligantes estudados, apresentam interação entre as peneiras 12,5 a 1,18 mm (5 peneiras consecutivas), provavelmente, devido a terem a mesma composição granulométrica. Já as misturas com fresado, tanto “*black rock*” como agregado comum, sem ligante, misturas com 25% e 50% de fresado, tem interação apenas entre 3 peneiras consecutivas, da 4,75 a 1,18 mm. As misturas com fresado apresentam FAD também nas peneiras 12,5 a 9,5 mm, porém, entre as peneiras 9,5 e 4,75 mm acabam saindo fora do limite de interação. Dessa forma é considerada apenas a interação de menor porosidade.

Portanto, pode-se concluir que todas as misturas asfálticas dessa pesquisa, tanto se considerar o fresado como “*black rock*” ou como um agregado comum, sem ligante, apresentam porosidade adequada, menor que 50%, de acordo com a literatura apresentada, e provavelmente devem ter um bom comportamento quanto à deformação permanente em campo. A porosidade aumenta à medida em que aumenta a proporção de fresado na mistura e também quando se considera o fresado sem ligante. Importante frisar, que são mostrados os extremos do comportamento esperado pelo fresado, sem mobilização nenhuma de ligante envelhecido (“*black rock*”) e com total mistura, quando o ligante antigo retorna totalmente a ativa. Sabe-se que as misturas trabalham entre esses extremos, pois é notável a mobilização de algum grau de ligante antigo quando da fabricação das misturas recicladas.

3.4. ENSAIOS LABORATORIAIS

Após a confecção dos corpos-de-prova, passou-se para a fase de ensaios laboratoriais, sendo moldadas 192 amostras com a finalidade de avaliar os parâmetros de resistência, deformabilidade e adesão/coesão das misturas asfálticas estudadas. Todos os ensaios desta pesquisa foram realizados nas dependências do LMCC, na Universidade Federal de Santa Maria.

3.4.1. Propriedades de Resistência

São apresentados os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e *Flow Number* (FN), ensaios que indicam as propriedades de resistência mecânica das misturas asfálticas desta pesquisa.

3.4.1.1. Resistência à Tração por Compressão Diametral

A norma que prescreve o ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral é a DNIT - ME 136/2010 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro, o ensaio foi criado para determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, através de solicitação estática. Medina & Motta (2005) dizem que esse ensaio é conhecido, em vários centros de pesquisa no exterior, como “ensaio brasileiro”.

O mesmo consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes 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 repousar em um compartimento com temperatura controlada de 25°C, durante 24 horas. A resultante obtida é a Resistência à Tração (RT). Esse processo pode ser visto na Figura 27.

Foram moldados e ensaiados corpos-de-prova com 6,3cm de altura e 10cm de diâmetro, aproximadamente, com volume de vazios de $4\pm 1\%$, que anteriormente a esse ensaio foram ocupados para realização do Módulo de Resiliência das misturas

asfálticas estudadas. Os resultados da ruptura para determinação da resistência à tração por compressão diametral são obtidos através da Equação 2.

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

Onde:

RT = 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).

Figura 27 - Corpos-de-prova condicionados a 25°C e após ensaiados na prensa RT



3.4.1.2. *Flow Number*

Para avaliar a resistência das misturas asfálticas às deformações permanentes foi realizado o ensaio de *Flow Number* (FN), ou *Creep Dinâmico*, como também pode ser chamado. Os corpos-de-prova moldados para esse ensaio foram fixados em 16cm de altura, 10cm de diâmetro e volume de vazios de $7\pm 0,5\%$. Posteriormente, suas faces foram retificadas para que ficassem planas e que a altura do mesmo se mantivesse em 15 ± 2 cm, conforme solicita a norma AASHTO TP 79-15 - *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. Há poucos

meses, foi normatizado o ensaio de FN por norma brasileira, a ABNT/NBR 16505:2016 - Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida.

De acordo com a NCHRP (2008), o ensaio de *Flow Number* 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. A AASHTO TP 79-15 argumenta que se trata de um teste de desempenho simples, de misturas de concreto asfáltico, para deformação permanente, baseado em cargas repetidas. Número de repetições de ciclos de carga em que a deformação de cisalhamento, a volume constante, é iniciada. Ou ainda, o ponto onde a deformação permanente acumulada na mistura passa a aumentar rapidamente, indicando o colapso da mesma.

A relação do ensaio de FN com a deformação permanente se relaciona ao fato de que quanto maior o número de ciclos e menor a deformação acumulada, menor é a propensão do pavimento à formação de trilhas de roda. Para que uma determinada mistura asfáltica não apresente deformação permanente no campo, espera-se os seguintes valores, para certos volumes de tráfego, conforme proposto por Nascimento (2008): Tráfego Médio - FN @ 60°C (204kPa) > 300 ciclos; e, Tráfego Pesado - FN @ 60°C (204kPa) > 750 ciclos.

As amostras foram submetidas à aplicação de carregamento cíclico uniaxial repetido com frequência de 0,1s e repouso de 0,9s, com condicionamento mínimo, a 60°C, de 12 horas, para execução do ensaio, como ilustrado na Figura 28. As deformações são medidas através de um LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*), ligado a um microcomputador, que coleta e arquiva todas as informações. A curva de deformação plástica vertical uniaxial de cada corpo de prova foi ajustada ao Modelo de Francken, que é uma combinação dos modelos de potência e exponencial, usado para representar o comportamento de ensaios de carga repetida, de modo a reduzir as variabilidades encontradas nos ensaios laboratoriais.

Neste ensaio, utilizaram-se duas membranas de látex, de espessura aproximada de 1mm, em cada extremidade do corpo-de-prova, com a finalidade de evitar o efeito de fricção. Esse procedimento já foi utilizado em outras pesquisas, como

na de Centofante (2016) e de Almeida Jr. (2016). Os critérios adotados para o término do ensaio eram quando a mistura atingisse 10.000 ciclos ou 5% da deformação.

Figura 28 - Condicionamento a 60°C das amostras, na câmara da UTM - 25 e execução do ensaio de FN



3.4.2. Propriedades de Deformabilidade

Demonstrados os procedimentos de execução dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e de Módulo Complexo (E^*), realizados para mensurar as propriedades de deformabilidade das misturas asfálticas pesquisadas.

3.4.2.1. Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) é determinado através das prescrições da norma DNIT - ME 135/2010 - Pavimentação asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência e da norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D 4123:1982 - *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. O intuito do ensaio é determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia, quando solicitado a um carregamento e, após, retornar ao seu estado inicial.

O equipamento utilizado, mostrado na Figura 29, é a *Universal Testing Machine* UTM - 25, a qual utiliza a norma ASTM D 4123:1982 como base para realizar o ensaio de módulo de resiliência. A UTM - 25 é composta por um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante, com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz (BOEIRA, 2014). Devido ao equipamento funcionar dentro de uma câmara com temperatura controlada, permite que sejam realizados ensaios em diversas temperaturas, sendo nessa pesquisa, ensaiadas as amostras a 10°, 25° e 35°C.

Após condicionados a temperatura do ensaio, por no mínimo 12 horas, o corpo-de-prova é colocado no suporte e posiciona-se os LVDTs, na face do mesmo, alinhando-o na vertical, horizontal e centralizado no cilindro de aplicação da carga. O módulo de resiliência é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1 s de duração e 0,9 s de repouso. Dessa forma, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT, ligado a um microcomputador, que coleta e arquiva todas as informações. Os coeficientes de Poisson, para execução do ensaio, foram de 0,15, 0,30 e 0,35 para as temperaturas de 10, 25 e 35°C, respectivamente. A carga de ensaio adotada foi aquela de menor magnitude que mobilizasse a deformação, de modo a não causar dano na amostra.

As dimensões dos corpos-de-prova foram de, aproximadamente, 6,3 cm de altura e 10cm de diâmetro, e deveriam atender primeiramente, a um volume de vazios de 4±1%. As mesmas amostras utilizadas para esse ensaio, foram rompidas, posteriormente, à RT.

A Equação 3 foi utilizada para o cálculo do módulo de resiliência.

$$M_R = \frac{P}{\Delta h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (3)$$

Onde:

M_R = módulo de resiliência (MPa);

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

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

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

μ = o coeficiente de Poisson.

Figura 29 - Ensaio de MR realizado no equipamento UTM-25



3.4.2.2. Módulo Complexo

O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial compressiva senoidal em corpo de prova cilíndrico, confinado ou não. De acordo com Nascimento (2008), a relação tensão-deformação durante o carregamento senoidal contínuo é definida por um número complexo chamado de Módulo Complexo (E^*), e o valor absoluto $|E^*|$ é definido como Módulo Dinâmico. Ou seja, $|E^*|$ é a relação entre a tensão dinâmica máxima e a deformação axial recuperável máxima, sendo a defasagem entre a aplicação de carga e a resposta da amostra definida como ângulo de fase da mistura asfáltica (ϕ). O ângulo de fase indica uma das propriedades viscosas do material, sendo 0° para material elástico e 90° para material viscoso (CAVALCANTI, 2010).

O valor do E^* varia muito em função dos parâmetros de ensaio (temperatura e velocidade de carregamento), e também dos parâmetros da mistura asfáltica (formulação do material betuminoso, natureza e teor do ligante, porcentual granular e de finos), e, a forma de compactação.

O ensaio é baseado na norma AASHTO T 342-11 - *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures*, que prescreve o seguinte:

- temperaturas de ensaios: -10° , 4° , 21° , 37° e 54°C ;

- frequências de carregamento (para cada temperatura): 0,1, 0,5, 1, 5, 10 e 25Hz;
- tamanho do corpo-de-prova: variação do diâmetro entre 100 e 104 mm, altura de 147,5 e 152,5 mm e tamanho máximo nominal de 37,5 mm.

Porém, devido ao *software* UTS006 – *SPT Dynamic Modulus Test* disponibilizar mais frequências, o ensaio foi realizado a 25, 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1 e 0,01 Hz. O condicionamento das amostras era de pelo menos uma noite na câmara da prensa para todas as temperaturas ensaiadas, seguindo os tempos mínimos estipulados pela norma AASHTO T 342-11. A Figura 30 ilustra o processo de execução do ensaio de E^* .

Figura 30 - Condicionamento das amostras, fixação dos pinos, montagem do ensaio e tela do *software* utilizado para o ensaio de E^*



Após a execução do ensaio, os resultados foram analisados de acordo com o protocolo de Di Benedetto & Corté (2005), pelo modelo 2S2P1D, apresentando as isotermas, isócronas, espaços Cole Cole, Diagramas de Black e curvas mestras de $|E^*|$ e ϕ , de todas as misturas asfálticas em estudo. O ensaio uniaxial de Módulo Complexo é, de acordo com Di Benedetto & Corté (2005), um ensaio homogêneo, que não requer nenhuma solução estrutural, não demandando assim nenhuma hipótese complementar, de modo que apresenta resultados mais similares a real propriedade dos materiais testados. Foram desenvolvidos modelos para capturar os efeitos de

carregamento, envelhecimento, umidade, temperatura, estado de tensão, entre outros fatores, sobre o desempenho do concreto asfáltico, segundo Kim (2009).

De acordo com Pagliosa (2004), modelos reológicos para o comportamento viscoelástico linear tradicionalmente são deriváveis de arranjos de molas (elásticos) e amortecedores (viscosos), o que resultam em relações constitutivas tensão-deformação em forma de operadores diferenciais. Estes elementos, molas e amortecedores, quando combinados podem formar um modelo de material com propriedades viscoelásticas. Existem diversos modelos analíticos, entre eles podemos citar os dois mais simples encontrados na literatura: o Modelo de Maxwell e o Modelo de Kelvin-Voigt. Também existe o de Huet-Sayegh e o 2S2P1D, utilizado nesse trabalho.

Di Benedetto *et al.* (2004), desenvolveram um estudo de modelagem resultando no modelo 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot). É um modelo reológico único, 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. O modelo 2S2P1D tem 7 constantes e seu módulo complexo é dado pela Equação 4:

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (4)$$

Onde:

i = número complexo definido por $i^2 = -1$;

ω = pulsação = $2\pi \times fr$ (onde fr é a frequência);

k, h = expoentes tais como $0 < k < h < 1$;

δ = constante;

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

E_∞ = módulo vítreo, quando $\omega \rightarrow \infty$;

τ = tempo característico, cujo valor varia apenas com a temperatura.

Mangiafico (2014) relata que através dessa adaptação o modelo pode ajustar-se muito bem ao comportamento mecânico da maioria das misturas betuminosas, passando a representar bem os intervalos de altas temperaturas e baixas frequências.

3.4.3. Propriedades de Adesão e Coesão

Nessa seção, serão demonstrados os ensaios de *Lottman* Modificado e de Resistência ao Desgaste Cântabro, ensaios esses que avaliam as propriedades de adesão e coesão das misturas asfálticas desta pesquisa.

3.4.3.1. *Lottman* Modificado

As normas que descrevem o ensaio *Lottman* Modificado são: AASHTO T 283-14 - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture - Induced Damage* e a norma brasileira ABNT/NBR 15617:2011 - *Misturas Asfálticas - Determinação do Dano por Umidade Induzida*.

O objetivo do ensaio é avaliar, a longo prazo (4 a 12 anos), a durabilidade das misturas asfálticas, em relação à propriedade da adesividade ligante/agregado, considerando o efeito deletério da água em corpos-de-prova cilíndricos compactados pelos métodos de dosagem Marshall ou Superpave, com volume de vazios entre 6% e 8%. Esta propriedade é de grande importância, pois afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos, uma vez que o dano por umidade evidencia os possíveis problemas de adesividade do agregado com o ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2006). A análise é feita entre a relação da resistência à tração por compressão diametral de amostras com condicionamento prévio e amostras sem condicionamento (BOEIRA, 2014).

Para determinação do dano por umidade induzida, foram preparadas seis amostras por mistura, seguindo a metodologia Superpave, com volume de vazios de $7\pm 1\%$, as quais foram separadas em dois grupos, de três amostras cada. As amostras do primeiro grupo foram, inicialmente saturadas, com grau de saturação entre 70% e 80% (com a finalidade de atender os requisitos das duas normas acima citadas), usado como critério de aceitação e descarte das amostras, sendo essa saturação conseguida através da aplicação de vácuo na faixa de 13 a 67kPa 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 de água destilada, à temperatura de 60°C ,

por um período de 24 horas. Por fim, as mesmas foram submetidas a banho em temperatura de 25°C, por um período de 2 horas, sendo, após, submetidas ao ensaio de resistência à tração (RT'). Processo demonstrado na Figura 31. O segundo grupo foi submetido ao ensaio de resistência à tração (RT), após condicionamento a 25°C, por pelo menos 12 horas.

A relação entre RT'/RT indica a perda de resistência por umidade induzida, que não deve ser inferior a 0,70, ou seja, ter perda maior ou igual a 30%. A análise é feita com a obtenção da relação entre as médias dos valores obtidos na resistência à tração pela compressão diametral de corpos-de-prova, submetidos previamente a condicionamentos, e a resistência à tração pela compressão diametral de corpos-de-prova sem condicionamentos. Esta relação de resistência em porcentagem é denominada de Resistência à Tração Retida (RRt) (MOREIRA, 2009).

Importante analisar neste método se a perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados da mistura deve-se a perda de adesão ou a perda de coesão. Segundo Specht *et al.* (2006), a perda de adesão está ligada à entrada de água entre o ligante e o agregado e ao descolamento do filme asfáltico que cobre a superfície do agregado, e a perda de coesão está relacionada com a redução de rigidez do cimento asfáltico e ao enfraquecimento das ligações ligante e agregado. Estes dois mecanismos estão intimamente relacionados. Sendo assim, os danos causados pela umidade em misturas asfálticas é a combinação desses dois fatores.

Figura 31 - Execução do ensaio de *Lottman* Modificado para o grupo de amostras condicionadas (primeiro grupo)



3.4.3.2. Resistência ao Desgaste Cântabro

O ensaio de Resistência ao Desgaste Cântabro consiste em determinar a resistência à desagregação do pavimento. Desenvolvido no Centro de Estudios Carreteras (CEC), na Espanha, o ensaio é prescrito na norma NLT - 325/86 - *Propuesta de Norma de Ensayo - Determinacion de la perdida por Desgaste de Mezclas Bituminosas mediante el empleo de la Maquina de Los Angeles (Ensayo Cantabro)*, que se baseia na análise das massas submetidas ao aparelho de Abrasão Los Angeles. As normas brasileiras que definem a metodologia, e foram utilizadas na pesquisa, Cântabro são: DNER - ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cântabro, e, DNER - ES 386/99 - Pavimentação - pré-misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito.

A metodologia do ensaio trata de avaliar a perda de massa por desgaste ou abrasão. A massa das amostras é determinada antes e depois do ensaio e é calculada a perda de massa por desgaste. Este ensaio avalia de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas. Visto que o desgaste é uma patologia muito comum nos revestimentos asfálticos, processo pelo qual ocorre arrancamento progressivo de agregados do revestimento causado pelo atrito entre pneu e pavimento, é importante dar devida importância a esse quesito.

Sendo assim, foram ensaiados três corpos-de-prova por mistura, previamente condicionados a 25°C, por no mínimo 12 horas. Cada corpo-de-prova foi submetido a 300 rotações no aparelho Los Angeles, como especificado na norma espanhola e DNER - ME 383/99 e ilustrado pelas imagens da Figura 32.

Figura 32 - Corpos-de-prova submetidos ao equipamento Abrasão Los Angeles, do LMCC, para realização do ensaio de Cântabro



Após submeter o corpo-de-prova ao equipamento Abrasão Los Angeles, quantifica-se a perda de massa sofrida pelo mesmo. O desgaste da mistura betuminosa por abrasão, em porcentagem, é dado pela Equação 5.

$$PM = \frac{P-P'}{P} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

PM = perda no ensaio de desgaste Cantabro (%);

P = peso inicial do corpo-de-prova (g);

P' = peso após a realização do ensaio (g).

Segundo a norma DNER - ES 386/99, o valor máximo de perda de massa aceitável, para misturas asfálticas porosas, com asfalto polímero, é de 25%. Para cada teor de ligante, o desgaste deve ser realizado a partir da média de três corpos-de-prova, no qual o valor individual de cada um não deve ser superior a 20% do valor médio, de acordo com DNER - ME 383/99.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para os ensaios que avaliam as propriedades de resistência, deformabilidade e de adesão e coesão das misturas asfálticas recicladas mornas em estudo na presente pesquisa.

4.1. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA

Este item apresenta os resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e de *Flow Number* (FN), ensaios estes que indicam as propriedades de resistência mecânica das misturas asfálticas desta pesquisa. Para tanto, as amostras foram moldadas nos respectivos teores de projeto, determinados no procedimento de dosagem de cada uma das 8 misturas, com o Vv e dimensões requeridas para cada ensaio, já descritos na metodologia. Vale ressaltar que para o ensaio de RT foram utilizadas as mesmas amostras do ensaio de MR, apresentado no Item 4.3.

4.1.1. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Para realização do ensaio de RT foram utilizados os mesmos corpos-de-prova que no ensaio de MR. A Tabela 27 mostra a média de três corpos-de-prova por mistura ensaiados à compressão diametral, na temperatura de 25°C (condicionados por no mínimo 12 horas), e seus respectivos desvios-padrões e coeficientes de variação.

Tabela 27 - Valores médios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C

Mistura	RT (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Convencional CAP 50/70	1,44	0,16	10,88
Morna CAP 50/70	1,26	0,12	9,4
Morna 25% Fresado CAP 50/70	2,01	0,11	5,62
Morna 50% Fresado CAP 50/70	2,64	0,18	6,97
Convencional CAP 60/85	1,64	0,03	1,71
Morna CAP 60/85	1,78	0,1	5,44
Morna 25% Fresado CAP 60/85	2,32	0,1	4,32
Morna 50% Fresado CAP 60/85	2,99	0,05	1,75

Analisando os resultados obtidos, a partir da Figura 33, é possível dizer que as misturas convencionais e mornas trabalham de forma semelhante, provado pela pouca diferença no seu valor de RT. Dessa forma, comprovam que, mesmo com a diminuição da temperatura de mistura e compactação, as propriedades de resistência sofrem pouca influência. Para as amostras com CAP 50/70, a mistura convencional apresenta maior valor de resistência à tração que a morna, diferindo entre si apenas 0,12MPa. Já nas misturas com ligante modificado por polímero, a diferença é de 0,14MPa a mais para a mistura morna se comparada à convencional quente.

Averiguando as misturas pelo teor de fresado incorporado, pode-se ver claramente a influência do aumento do teor de RAP no valor de RT. À medida em que se aumenta a proporção de material fresado nas misturas, há um aumento do valor da resistência das mesmas, o que era esperado, visto que aumenta a quantidade de ligante antigo, que deixa a mistura mais enrijecida. Isso pode ser notado para ambos os ligantes estudados. Nas misturas com CAP 50/70, existe uma melhora de 60% com adição de 25% de fresado e de 110% para as misturas com 50% de fresado, se comparadas a mistura morna sem material reciclado. Já para as misturas com CAP 60/85, realizando a mesma comparação, existe uma melhora é de 30% para as mornas com 25% de RAP e de 68% para as com 50% de inserção de fresado.

Ao verificar os resultados quanto aos diferentes tipos de ligantes utilizados, é visível a melhora dos valores de RT nas misturas com CAP 60/85 às misturas com CAP 50/70. Esse comportamento era esperado, pois o ligante modificado proporciona maior resistência à tração às misturas.

Os limites para RT são traçados pela norma DNIT - ES 031/2006 na qual diz que se deve ter um valor de resistência à tração maior que 0,65MPa, para ligantes convencionais. Já para os concretos asfálticos com asfalto polímero o valor de RT deve se encaixar dentro da variação de 0,7 a 1,2MPa, conforme norma DNER - ES 385/99 - Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero. Esses valores são plotados, apenas em duas linhas, considerando os limites mínimo para CAP 50/70 e máximo para CAP 60/85, juntamente com os valores de RT das 8 misturas estudadas, na Figura 34. A partir deles pode-se afirmar que todas as misturas estão de acordo com suas respectivas normas, e também salientar que todas apresentam valores maiores que 1,2MPa, o máximo exigido por norma para ligante modificado por polímero. Bernucci *et al.* (2006) afirmam que, para misturas asfálticas a quente, os

valores típicos situam-se na média de 0,5 e 2,0MPa. Valor aumentado, se comparado às normas, dada a consistência mais dura do ligante asfáltico, por exemplo, em misturas de módulo elevado. Todas as misturas pesquisadas se encaixam nesses limites, e é importante frisar que as misturas com inserção de fresado apresentam valores acima de 2,0MPa.

Figura 33 - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C, em função do teor de fresado

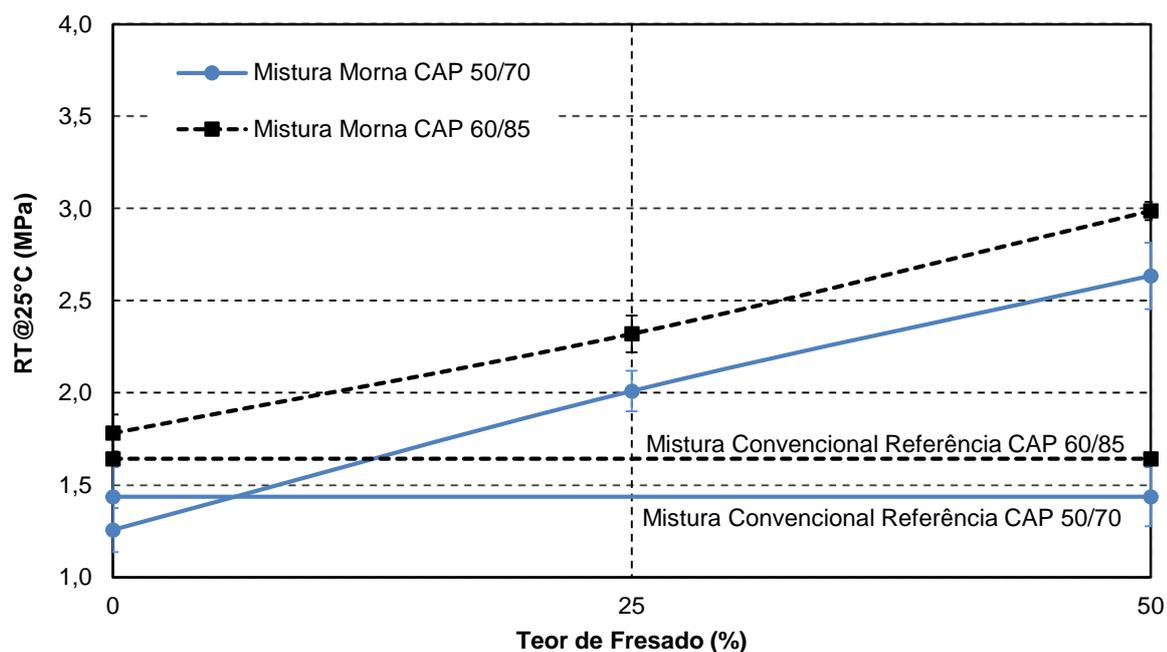
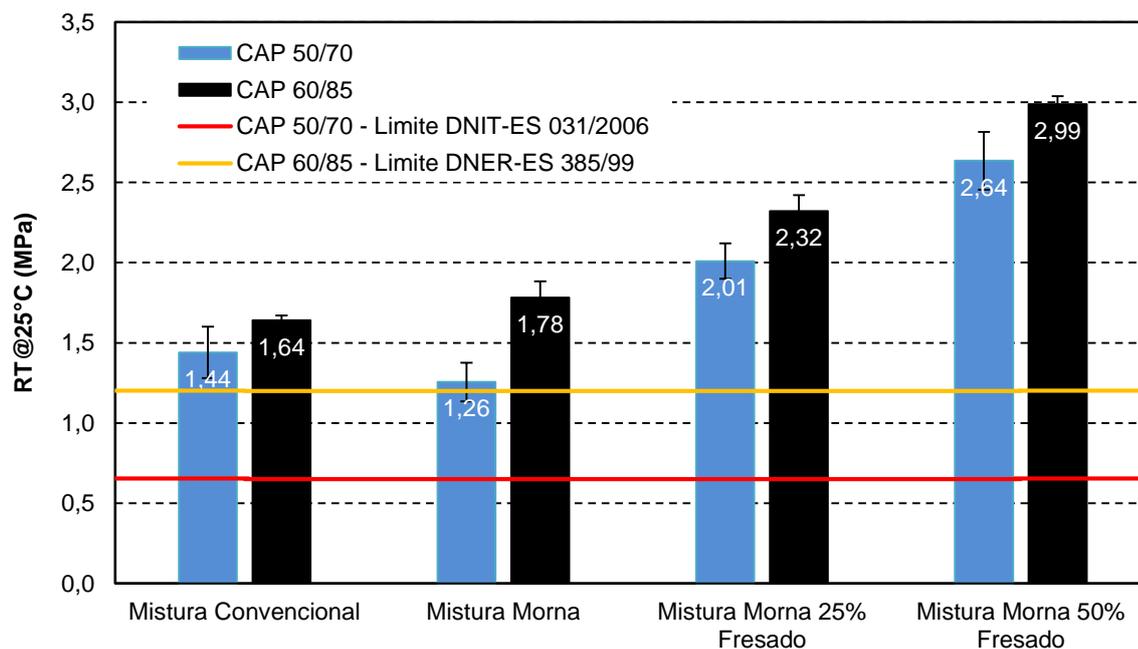


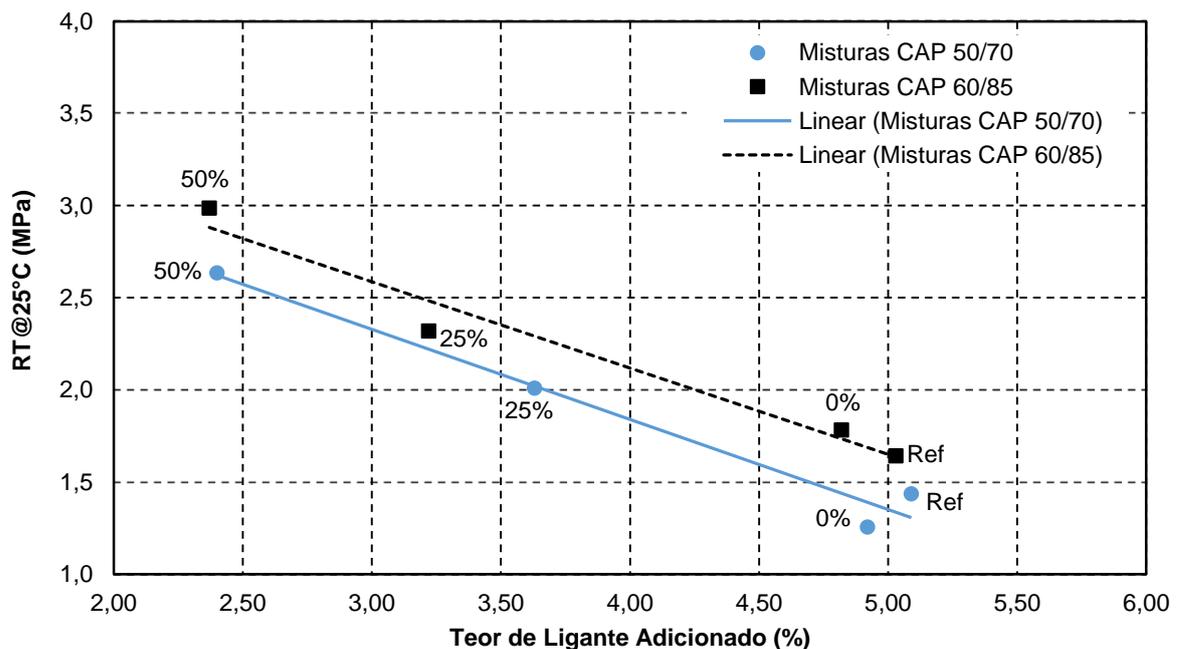
Figura 34 - Resistência à Tração das misturas estudadas com os limites das normas do DNIT e DNER



As Figuras 35 e 36 trazem a quantidade de ligante adicionado e total, respectivamente, comparados com os valores de RT das 8 misturas em estudo. À medida em que se aumenta o teor de fresado nas misturas, reduz-se o valor de ligante adicionado, que é menos rígido e não sofreu processo de envelhecimento como o ligante oriundo do material reciclado. Por isso, as misturas convencionais e mornas sem fresado, que apresentam maiores teores de ligante adicionado, conseqüentemente, têm menores valores de RT, devido seu ligante não enrijecer as misturas da mesma forma como as que contém ligante antigo e já envelhecido, claramente observado na Figura 35.

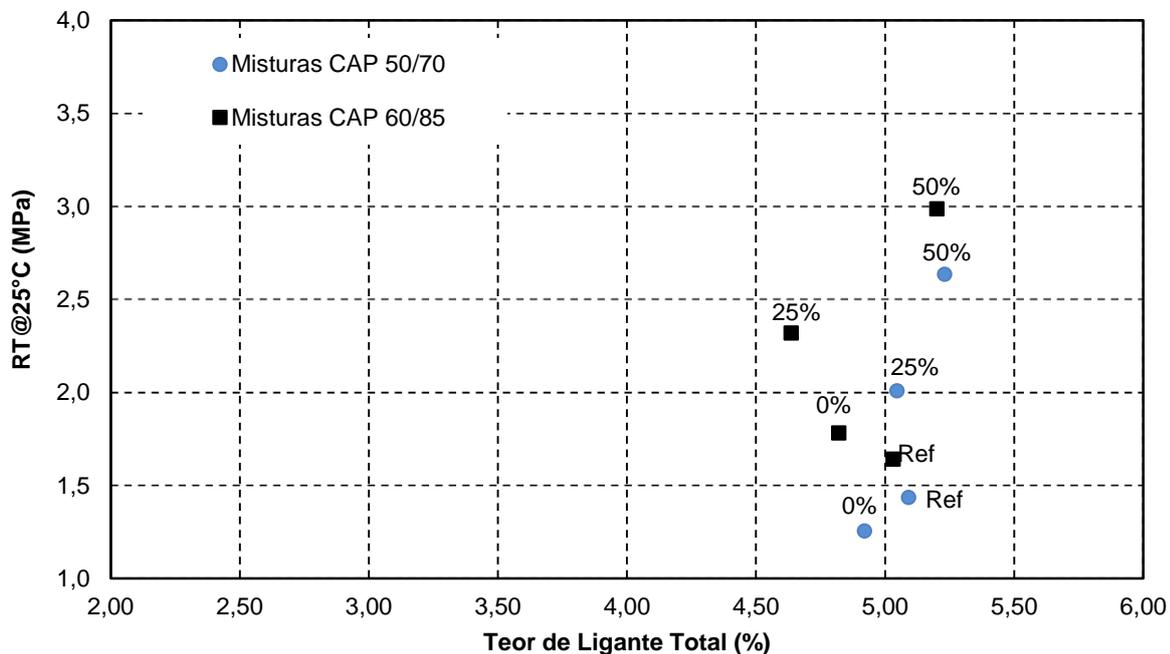
Em relação ao teor total de ligante, Figura 36, não há uma regra clara, que esclareça um aumento ou diminuição do RT de acordo com um acréscimo ou decréscimo do teor de ligante. Pode-se apenas notar que as misturas com 50% de fresado, que apresentam os maiores teores de ligante, têm valor superior de RT se comparado às demais, ressaltando a melhora proporcionada pelo RAP às misturas asfálticas estudadas. Porém, a mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85 desmente essa afirmação, pois é a mistura que apresenta menor teor de ligante, e mesmo assim tem RT maior se comparado com a mesma mistura com CAP 50/70 e todas as demais misturas sem adição de material reciclado.

Figura 35 - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C, em função do teor de ligante adicionado



Nota: Ref - Mistura Convencional; 0% - Mistura Morna, sem fresado; 25% - Mistura Morna 25% Fresado; 50% - Mistura Morna 50% Fresado

Figura 36 - Resultados da Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C, em função do teor de ligante total



Nota: Ref - Mistura Convencional; 0% - Mistura Morna, sem fresado; 25% - Mistura Morna 25% Fresado; 50% - Mistura Morna 50% Fresado

Outros autores, como Oliveira (2013), também estudaram sobre misturas recicladas, tanto quente quentes quanto mornas. Este autor trabalhou com um CAP concedido pela Lubnor – Petrobrás, e encontrou, para as misturas recicladas quentes, valores da ordem de 0,9, 1,4, 1,8 e 2,2MPa, respectivamente, para as misturas de referência, com adição de 15, 35 e 50% de fresado. Já para as misturas recicladas mornas com aditivo Gemul XT-14® obteve como resultados os valores de 0,9, 1,0, 1,5 e 1,5MPa para as misturas de referência, e misturas com adição de 15, 35 e 50% de fresado, respectivamente. Valores estes, que comparados com a presente pesquisa, apresentam-se bem inferiores.

Centofante (2016) estudou sobre misturas com reciclagem a quente e ligante convencional 50/70 (mesmo lote de coleta dessa pesquisa), e encontrou valores de 1,42, 1,79, 2,08 e 2,36 MPa, respectivamente, para as misturas CAref, CAF10, CAF20 e CAF30. Esses valores já apresentam uma maior semelhança com os resultados de RT obtidos para as misturas com CAP 50/70 dessa pesquisa.

Já Bruxel (2015) não estudou sobre misturas recicladas, mas trabalhou com mesmos ligantes e agregados dessa pesquisa. A autora encontrou valores superiores

de RT para as misturas com ligante 60/85 (1,67MPa) em relação a mistura com ligante 50/70 (1,15MPa). Esses resultados convergem da mesma forma como os valores obtidos nas misturas convencionais dessa pesquisa, onde obteve-se 1,44MPa para CAP 50/70 e 1,64MPa para CAP 60/85. Assim como a autora acima, Boeira (2014) também trabalhou com agregado da mesma origem que a presente pesquisa e CAP 50/70, e obteve exatamente o mesmo valor de 1,44MPa, para sua mistura referência que o obtido nessa pesquisa, porém com teor de ligante um pouco superior (5,30% para Boeira (2014) e 5,09% para Mistura Convencional CAP 50/70 dessa pesquisa).

Para Almeida Jr. (2016), que também têm os mesmos ligantes que essa pesquisa, CAP 50/70 (mesmo lote de coleta) e CAP 60/85, nas suas misturas S BAI FXC 50-70 e S BAI FXC 60-85 encontrou, respectivamente, valores de 2,25 e 2,79MPa. É importante frisar que seus teores de ligantes são inferiores aos dessa pesquisa, de 4,00% para a mistura com ligante convencional e 3,92% para com ligante modificado por polímero, por isso acredita-se que tenha valores superiores de RT. Isso também é corroborado nas misturas com 20 e 30% de fresado, de Centofante (2016), onde essas misturas tem o menor teor de ligante e maiores valores de RT. Porém, nesta pesquisa isso só se aplica em algumas misturas, como dito anteriormente.

Vale ressaltar ainda, que através do ensaio de RT é realizada uma inferência de desempenho à fadiga das misturas asfálticas. Dessa forma, quanto maior o valor de RT melhor o desempenho das amostras ao dano por fadiga. Visto que na presente pesquisa as misturas com maiores valores de RT são as que apresentam material reciclado em sua composição, e sabido pela literatura que há uma restrição quanto ao uso de fresado devido a aumentar o trincamento à fadiga dos pavimentos, pode-se dizer que essa pesquisa faz uma crítica a essa inferência, questionando sua veracidade, que somente pode ser sanada com a execução do ensaio de fadiga.

4.1.2. Flow Number

Foram submetidos ao ensaio três corpos-de-prova por mistura, ensaiados a 60°C, após condicionadas as amostras por, no mínimo, 12 horas (pernoite na câmara da prensa). Os resultados de FN obtidos para as 8 misturas estudadas, através do Modelo de Francken, estão apresentados na Tabela 28, com seus respectivos

desvios-padrões e coeficientes de variação, além, dos parâmetros A, B, C e D do modelo trabalhado.

Tabela 28 - *Flow Number*, por corpo-de-prova, obtido pelo Modelo Francken e seus respectivos parâmetros

Mistura	FN (Ciclo)	Média FN (Ciclo)	DP (Ciclo)	CV(%)	Parâmetros Modelo Francken			
					A	B	C	D
Convencional CAP 50/70	46	38	7	17	1260,92	0,71	176,04	0,04
	30				1215,50	0,74	514,60	0,04
	37				1705,04	0,68	306,29	0,05
Morna CAP 50/70	26	28	4	14	1272,84	0,80	153,61	0,07
	25				1211,08	0,80	179,74	0,07
	34				1252,89	0,75	147,82	0,06
Morna 25% Fresado CAP 50/70	118	125	11	9	916,83	0,62	779,62	0,01
	140				1477,95	0,54	1043,88	0,01
	116				1052,34	0,59	988,92	0,01
Morna 50% Fresado CAP 50/70	342	321	23	7	995,36	0,51	1088,92	0,00
	332				1177,79	0,49	1116,09	0,00
	290				1135,87	0,51	860,16	0,00
Convencional CAP 60/85	115	142	30	21	1168,37	0,57	650,09	0,01
	126				1382,92	0,53	900,31	0,01
	184				1067,68	0,54	359,77	0,01
Morna CAP 60/85	159	178	26	15	1222,09	0,55	260,75	0,01
	160				1279,05	0,54	226,15	0,01
	215				1086,03	0,53	378,32	0,01
Morna 25% Fresado CAP 60/85	661	617	49	8	1056,37	0,43	894,84	0,00
	642				940,11	0,46	493,70	0,00
	548				839,01	0,49	548,60	0,00
Morna 50% Fresado CAP 60/85	1207	1320	87	7	1063,67	0,41	1138,01	0,00
	1335				821,26	0,43	950,61	0,00
	1419				1012,04	0,42	802,01	0,00

Os ensaios de todas as amostras foram finalizados quando a mistura atingiu 5% da deformação. Nenhuma amostra suportou aos 10.000 ciclos, chegando ao FN antes de atingir 15% desses ciclos. A Figura 37 ilustra como “embarrigaram” os corpos-de-prova, sendo que houve desprendimento de massa na amostra FN6, referente a Mistura Morna CAP 50/70, logo após a finalização do ensaio e sua retirada

da câmara. Já a amostra FN13 pertence ao grupo ensaiado da Mistura Convencional CAP 60/85.

Figura 37 - Corpos-de-prova sendo ensaiados para determinação do *Flow Number*

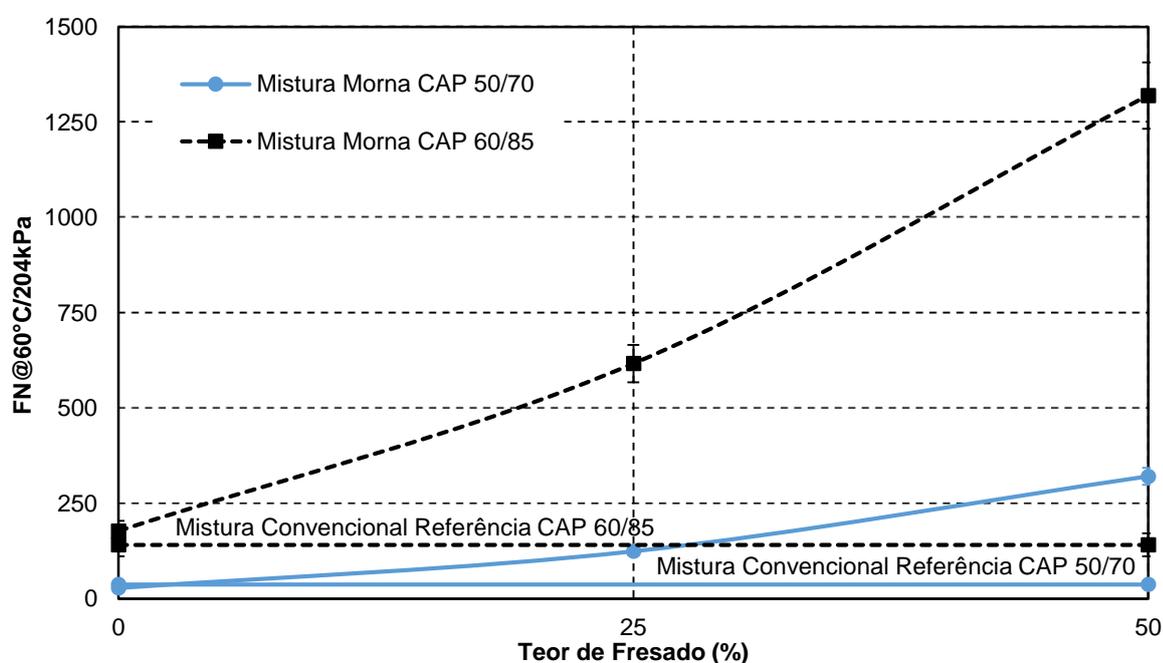


Sobre a análise dos dados de FN, avaliando a Figura 38, é possível afirmar que os resultados obtidos mostram que as misturas se comportam de maneira semelhante, indicando não haver grandes perdas quando trabalhado com temperaturas de mistura e compactação menores que as convencionalmente utilizadas. Para as amostras com CAP 50/70, a mistura convencional apresenta maior valor FN que a morna, com diferença de 10 ciclos, aproximadamente. Já nas misturas com ligante 60/85, a mistura morna resiste 36 ciclos a mais que a convencional.

Quanto à influência do teor de fresado nas misturas, pode-se afirmar que o incremento desse material além de grande economia no valor final dos pavimentos, tem um ganho valioso de resistência à deformação permanente. É importante que seu uso seja mais disseminado na execução das rodovias brasileiras, reduzindo assim a sua deposição sobre o meio ambiente e trazendo inúmeros benefícios às novas misturas asfálticas. É evidente o incremento do valor de FN à medida em que há o aumento da proporção de material fresado nas misturas, para os dois ligantes estudados. Pode-se notar que é possível reduzir o gasto com ligante modificado, em novos pavimentos, utilizando apenas uma mistura com ligante convencional incorporada com 50% de RAP. Claro, que esse ganho pode ter sido maior devido ao fresado utilizado ter CAP 60/85 em sua composição, acarretando tais valores de FN.

Verificando os resultados de FN quanto aos diferentes tipos de ligantes utilizados, é notável a melhora dos valores nas misturas com CAP 60/85 às misturas com CAP 50/70. A proporção de acréscimo é de 276, 528, 395 e 311% para as misturas Convencional, Morna, Morna 25% Fresado e Morna 50% Fresado, respectivamente. Almeida Jr. (2016) relata em sua pesquisa que o aumento de FN é de 1171% a mais para o ligante modificado em relação ao convencional, provando a superioridade do CAP 60/85.

Figura 38 - Resultados do ensaio de *Flow Number* a 60°C em função do teor de fresado



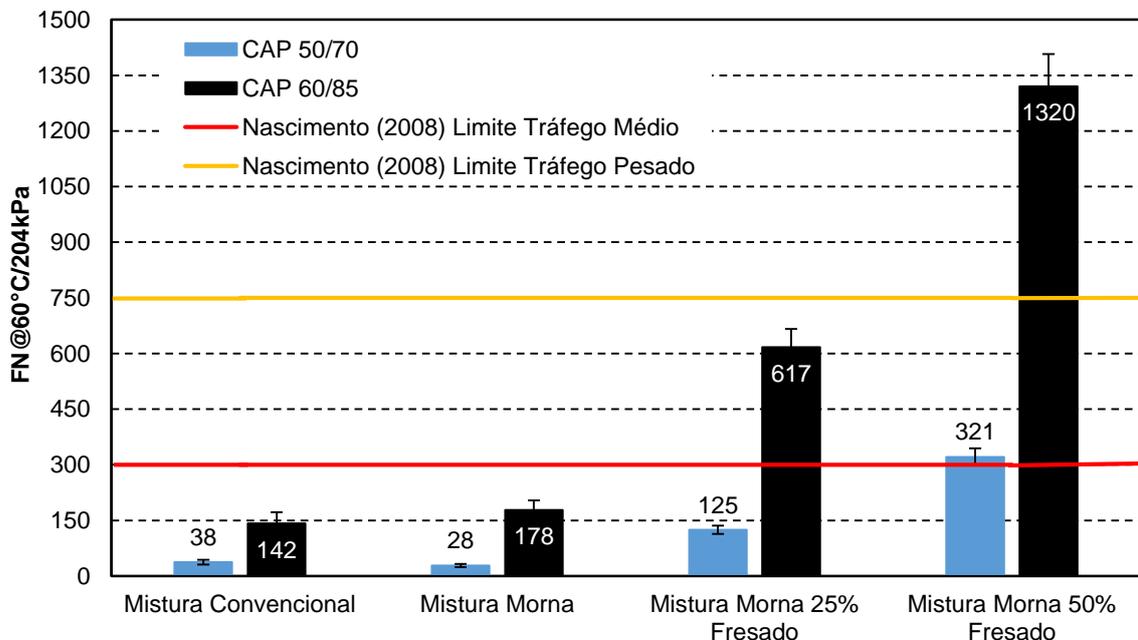
Nascimento (2008) estipulou valores limites para tráfego médio e pesado, através da pesquisa com diferentes TMN de agregado e CAP 20 REVAP, os quais são ilustrados na Figura 39. Para tráfego médio, o valor de FN que a mistura deve apresentar precisa ser maior que 300 ciclos. Já para tráfego pesado, o valor mínimo exigido é de 750 ciclos.

Somente a Mistura Morna 50% Fresado CAP 60/85 apresenta valor superior a 750, e poderia ser utilizada para rodovias com tráfego pesado. Já as Misturas Morna 50% Fresado CAP 50/70 e Morna 25% Fresado CAP 60/85 se encaixam dentro do

limite estipulado para tráfego médio ($300 < FN < 750$). Entretanto, as demais misturas obtiveram valores inferiores a 300 ciclos.

Dessa forma, é possível reiterar a melhora das misturas com a inserção de material fresado, mostrando que o teor antigo de ligante, já envelhecido, atua ativamente no aperfeiçoamento da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas recicladas mornas. Mostrando que não se pode trabalhar considerando o fresado um “*black rock*”, pois há liberação de alguma porcentagem de ligante antigo, presente no material fresado, durante a usinagem das misturas.

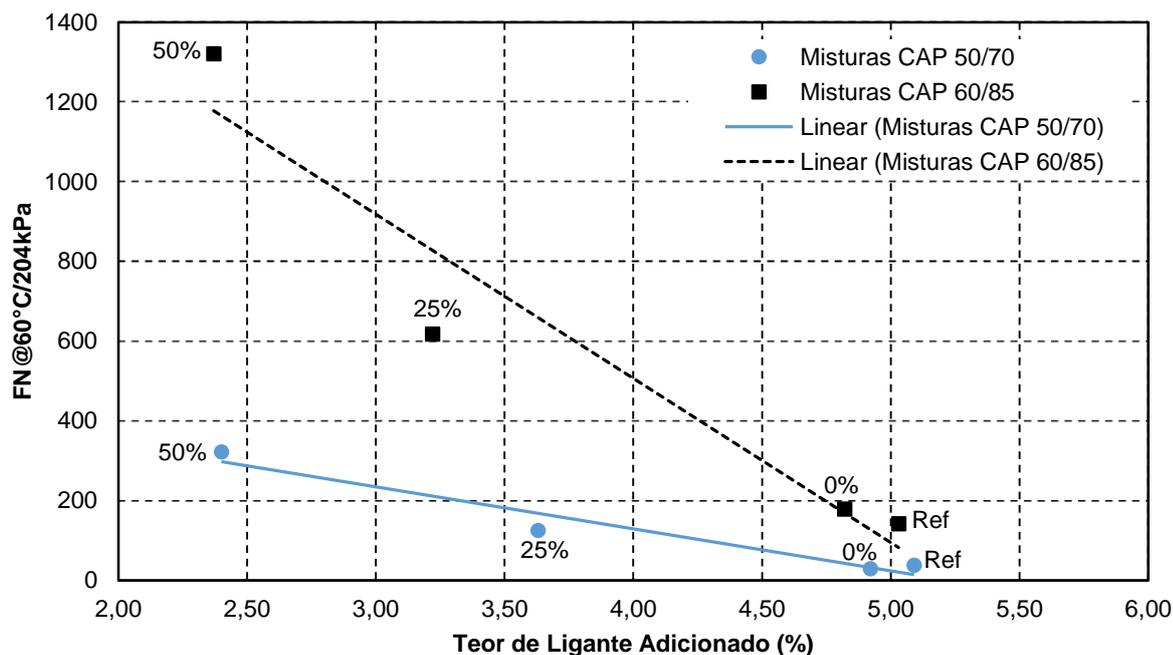
Figura 39 - *Flow Number* das misturas estudadas com os limites mínimos propostos por Nascimento (2008)



Fica evidente a influência do teor de ligante adicionado na resistência à deformação permanente das misturas, conforme Figura 40. A quantidade de ligante envelhecido também afeta diretamente esse parâmetro. Nota-se que o FN aumenta à medida em que o teor de ligante antigo envelhecido é maior e, conseqüentemente, diminui com a adição de ligante novo. Isso se deve ao fato de que quanto mais envelhecido o ligante, maior a sua rigidez, elevando a resistência a deformação permanente das misturas asfálticas.

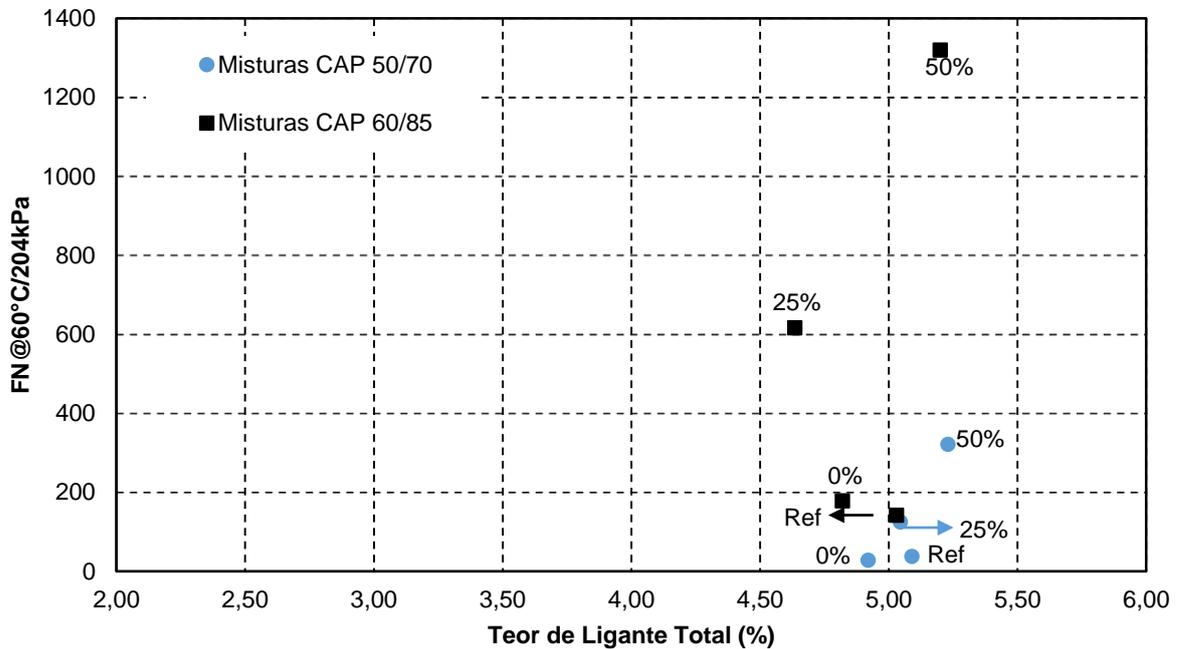
Não existe uma relação clara entre o valor de FN e o teor total de ligante das misturas em estudo, a partir da análise da Figura 41. Acredita-se que em decorrência de um teor de ligante que possa ser julgado alto, para essa granulometria em específico, exista a possibilidade das misturas convencionais e mornas sem fresado apresentarem valores tão reduzidos de FN. Pois já é sabido que o elevado teor de ligante aumenta a espessura do filme asfáltico no entorno do agregado, provocando redução no atrito entre os grãos, em altas temperaturas, o que aumenta a mobilidade das partículas e lubrifica com maior intensidade o contato agregado-agregado. Sendo assim, há a redução da resistência ao cisalhamento que o atrito entre os agregados produz na mistura.

Figura 40 - Resultados do ensaio de *Flow Number*, a 60°C, em função do teor de ligante adicionado



Nota: Ref - Mistura Convencional; 0% - Mistura Morna, sem fresado; 25% - Mistura Morna 25% Fresado; 50% - Mistura Morna 50% Fresado

Figura 41 - Resultados do ensaio de *Flow Number*, a 60°C, em função do teor de ligante total



Nota: Ref - Mistura Convencional; 0% - Mistura Morna, sem fresado; 25% - Mistura Morna 25% Fresado; 50% - Mistura Morna 50% Fresado

Com o intuito de comparar a melhora das misturas à deformação permanente, à medida em que é aumentado o teor de fresado, tanto para as misturas com CAP 50/70, como para as com CAP 60/85, elaborou-se a Tabela 29 como forma de demonstrar a eficiência das misturas asfálticas recicladas mornas. A comparação é feita com as misturas mornas com 0, 25 e 50% de material fresado.

É possível concluir que a maior proporção de melhora acontece nas misturas com CAP 50/70, onde existe um aumento de 4,4 vezes no valor de FN da Mistura Morna 25% Fresado em comparação com a Mistura Morna. Já quando se eleva o teor de fresado em 50% o ganho de resistência à deformação permanente cresce em 11,4 vezes, para as misturas com ligante convencional.

O aprimoramento do valor de FN para as misturas com CAP 60/85 também é de grande relevância. Os resultados progridem na ordem de 3,5 e 7,4 vezes, quando a proporção de fresado aumenta para 25 e 50%, respectivamente. Com isso, é importante salientar a grande evolução das propriedades de resistência quando da inserção de RAP nas misturas mornas, tanto para os valores de RT como para os de FN.

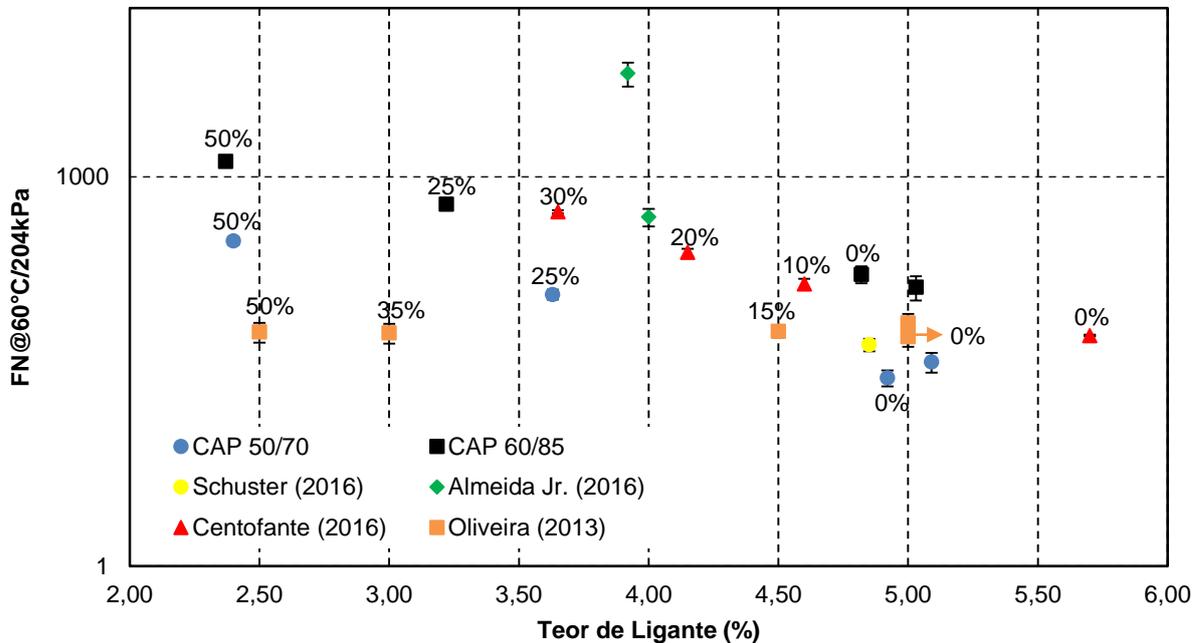
Tabela 29 - Influência do aumento do teor de fresado na melhora à deformação permanente das misturas em estudo

Mistura	FN (Ciclo)	Proporção de Melhora da Mistura (Vezez)
Morna CAP 50/70	28,33	-
Morna 25% Fresado CAP 50/70	124,67	4,4
Morna 50% Fresado CAP 50/70	321,33	11,4
Morna CAP 60/85	178,00	-
Morna 25% Fresado CAP 60/85	617,00	3,5
Morna 50% Fresado CAP 60/85	1320,33	7,4

Contraopondo os resultados obtidos nessa pesquisa com demais autores, apresentados na Figura 42, cita-se os valores de Oliveira (2013), autor que trabalhou com misturas asfálticas recicladas mornas e quentes, porém nessa comparação são mostrados apenas os valores das misturas Referência (mistura quente), MAM (mistura morna) e MARMs (misturas asfálticas recicladas mornas) com adição de 15,35 e 50% de fresado, as quais obtiveram valores de FN na ordem de 75, 59, 65, 63 e 64 ciclos, respectivamente. Oliveira (2013) não obteve valores expressivos de FN e não constatou o aumento da resistência à deformação permanente com o aumento do teor de RAP nas misturas, conforme tendência encontrada na presente pesquisa. Para as misturas com reciclagem a quente de Centofante (2016) é possível constatar o previsto por esse estudo, de que o aumento de material fresado acarreta sim o aumento do parâmetro FN das misturas, pois existe a influência do teor de ligante envelhecido do fresado, que torna as misturas mais enrijecidas, e sendo assim, menos suscetíveis a sofrerem deformação plástica.

Almeida Jr. (2016) não trabalhou com misturas recicladas, mas pesquisou sobre os mesmos tipos de ligantes dessa pesquisa, e obteve valores de FN bem expressivos, de 492 e 6300, respectivamente, para as misturas com ligante 50/70 e 60/85. Já Schuster (2016) trabalhou com mesmo ligante e agregados dessa mistura, e obteve para sua referência quente FN de 51, um pouco superior ao encontrado para a mesma mistura neste trabalho.

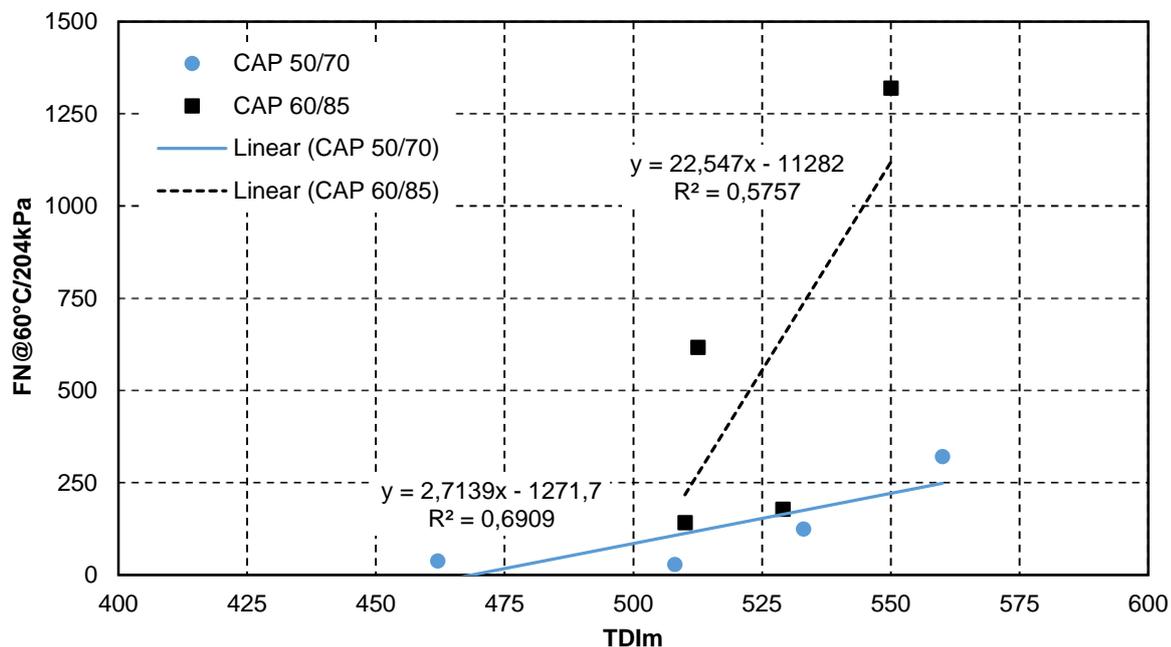
Figura 42 - Comparativo dos resultados do ensaio de *Flow Number* das misturas estudadas com as de Schuster (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Oliveira (2013), em escala log-log



Nota: Legendas apenas para as misturas com porcentagem de fresado em sua composição, e suas referências

Alguns autores costumam correlacionar os dados de *Flow Number* com os resultados encontrados para o TDI/TDI_m, parâmetro oriundo do CGS, conforme apresentado na Figura 43. Os ligantes asfálticos dessa pesquisa apresentaram comportamentos semelhantes, com aumento do FN para o CAP 50/70 e CAP 60/85, à medida que se aumenta o TDI_m. Porém, os R² obtidos mostram que esse parâmetro não mostrou boa correlação com o valor de *Flow Number*.

Nascimento (2008) encontrou boa correlação do FN com o TDI, obtendo valor de R² de 0,8933. Já Onofre (2012) constatou que o TDI pode não ser bom parâmetro para a previsão da resistência à deformação permanente, pois o valor de R² encontrado foi de 0,52. O mesmo foi constatado por Almeida Jr. (2016) que obteve comportamentos distintos para os dois ligantes estudados em sua pesquisa, encontrando R² de 0,9049 e 0,5687, para CAP 50/70 e 60/85, respectivamente.

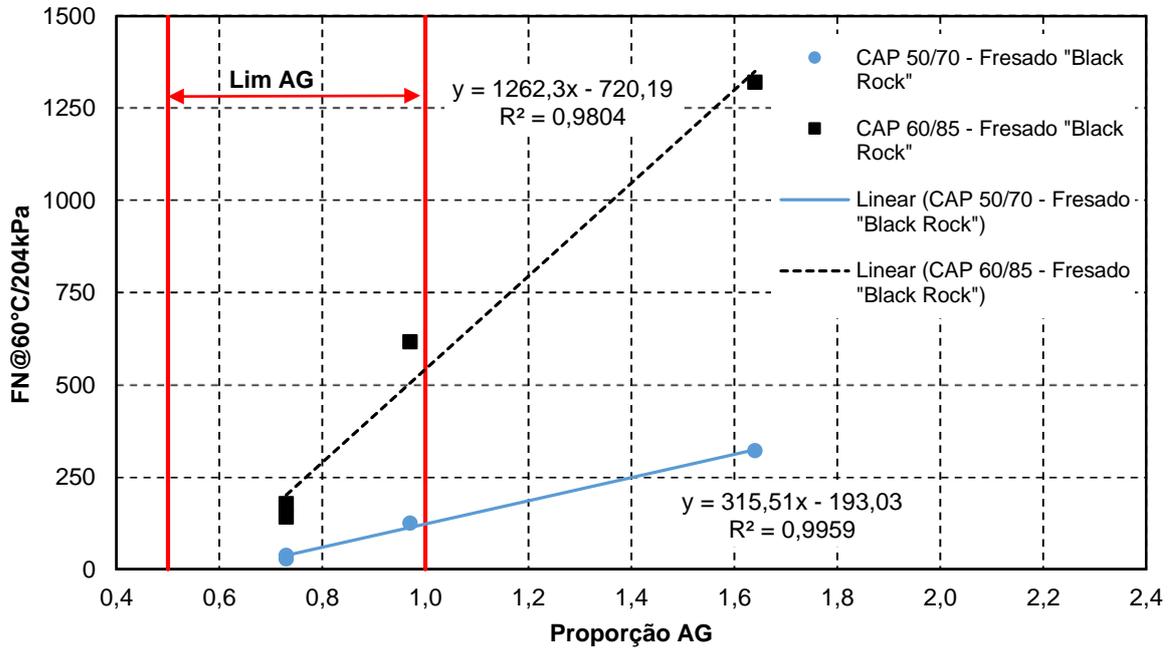
Figura 43 - Correlação de FN, a 60°C, com os resultados de TDI_m

Outra correlação é feita com a proporção AG, da metodologia Bailey, e o valor de FN. As Figuras 44 e 45 mostram as equações encontradas para as misturas considerando-se fresado como “*black rock*” e como agregado comum, sem ligante, respectivamente. Nota-se que as quatro curvas de tendências apresentam o coeficiente angular da reta positivo, indicando que o aumento da proporção AG aumenta o valor do FN. Esse crescimento fica mais acentuado para as misturas com ligante modificado, e também para aquelas com material reciclado incorporado. Para o ligante convencional, essa amplitude não é tão elevada, porém é notável o crescimento à medida em que se aumenta o teor de RAP.

Importante frisar que os R^2 apresentam bons valores, mostrando ser uma boa correlação. As misturas asfálticas que consideram o fresado como “*black rock*” apresentam R^2 superiores as amostras sem ligante, onde o reciclado é considerado como um agregado comum, tanto para as misturas com CAP 50/70 como para as com CAP 60/85.

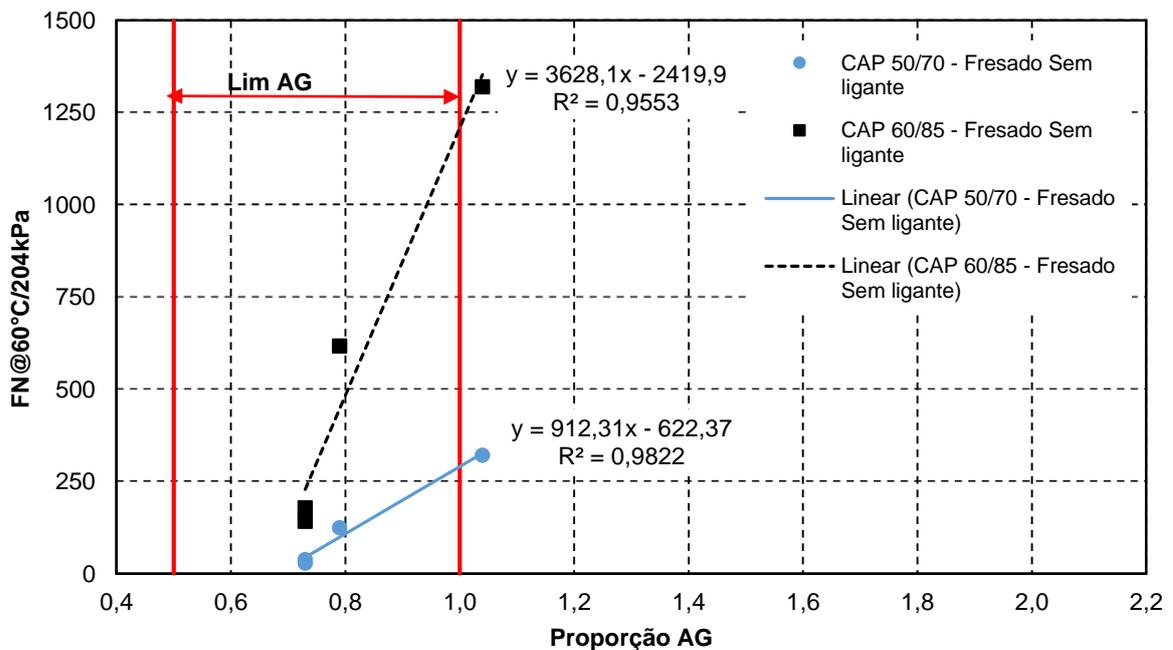
As misturas estudadas por Almeida Jr. (2016) expressam correlação indicando que o aumento da proporção AG reduz o valor do FN. As equações apresentam R^2 muito baixo, com exceção apenas das misturas Marshall com CAP 60/85, que tem valor equivalente aos apresentados pelas misturas dessa pesquisa ($R^2=0,9955$).

Figura 44 - Correlação de FN, a 60°C, com a proporção AG, adotando fresado "black rock"



Nota: AG TMN 19mm Comportamento Miúdo (Limite 0,60 a 1,00) relacionado às misturas Convencional, Morna e Morna 25% Fresado; AG TMN 12,5mm Comportamento Graúdo (Limite 0,50 a 0,65) relacionado à Morna 50% Fresado

Figura 45 - Correlação de FN, a 60°C, com a proporção AG, adotando fresado sem ligante, como agregado comum



Nota: AG TMN 19mm Comportamento Miúdo (Limite 0,60 a 1,00) relacionado às misturas Convencional, Morna e Morna 25% Fresado; AG TMN 12,5mm Comportamento Graúdo (Limite 0,50 a 0,65) relacionado à Morna 50% Fresado

Além das correlações supracitadas, também se correlacionou os resultados obtidos no FN com a porosidade FAD, a qual se apresenta como bom parâmetro para estimar a resistência à deformação. Como todas as porosidades atenderam as especificações de literatura apresentadas, não encaixadas na porosidade marginal e inferiores a 50%, montaram-se gráficos correlacionando a FAD “*black rock*” e a FAD sem ligante, considerando-se o fresado como um agregado comum, ou seja, mistura completa do ligante antigo com o novo.

É possível perceber a baixa relação de R^2 , de 0,3778 e 0,5119, para o CAP 50/70 e CAP 60/85, respectivamente, quando considerado fresado como “*black rock*”, como mostra a Figura 46. Essa correlação aumenta quando se considera o fresado como um agregado comum, sem ligante, conforme Figura 47. Os valores de R^2 chegam a 0,7041 para CAP 50/70 e a 0,8044 para CAP 60/85.

Dos poucos trabalhos dentre a literatura, pode-se citar o de Ferreira (2015), que também correlacionou a porosidade FAD e o FN, e obteve para suas misturas R^2 de 0,14, considerando todas as misturas em estudo, julgando que a baixa correlação foi devido a existência de três misturas, dentre as oito totais, que apresentaram porosidade marginal. Já quando o autor não incluiu essas misturas, obteve R^2 de 0,92.

Ao analisar os resultados dessa correlação, é possível notar que as misturas que apresentam menor porosidade FAD “*black rock*” obtêm um ganho no comportamento mecânico, quando da análise das misturas com fresado e sem fresado em separado, e em particular para ligante asfáltico. A única inversão acontece para as Misturas Convencional e Morna CAP 50/70, nas quais mesmo tendo uma queda da porosidade FAD (%), da convencional para a morna, seu FN não aumenta, e sim, diminui. Já quando adotado fresado como agregado comum, a FAD sem ligante se comporta de modo inverso, na medida em que aumenta a porosidade, também aumenta o valor de FN.

Porém, devido à falta de referências de misturas asfálticas com uso de RAP, a comparação de misturas recicladas com o FN fica restringida, pois existe uma grande diferença granulométrica de agregados virgens e material reciclado. Devido a isso, já são apresentados os extremos de comportamento que o fresado pode desenvolver. Independente do comportamento adotado por esse material, dentre os extremos apresentados, visto que há um grau de remobilização do ligante nas misturas

estudadas, pode-se afirmar que o esqueleto estrutural das amostras é capaz de resistir à deformação permanente.

Figura 46 - Correlação entre a porosidade FAD e o FN, considerando fresado como "black rock"

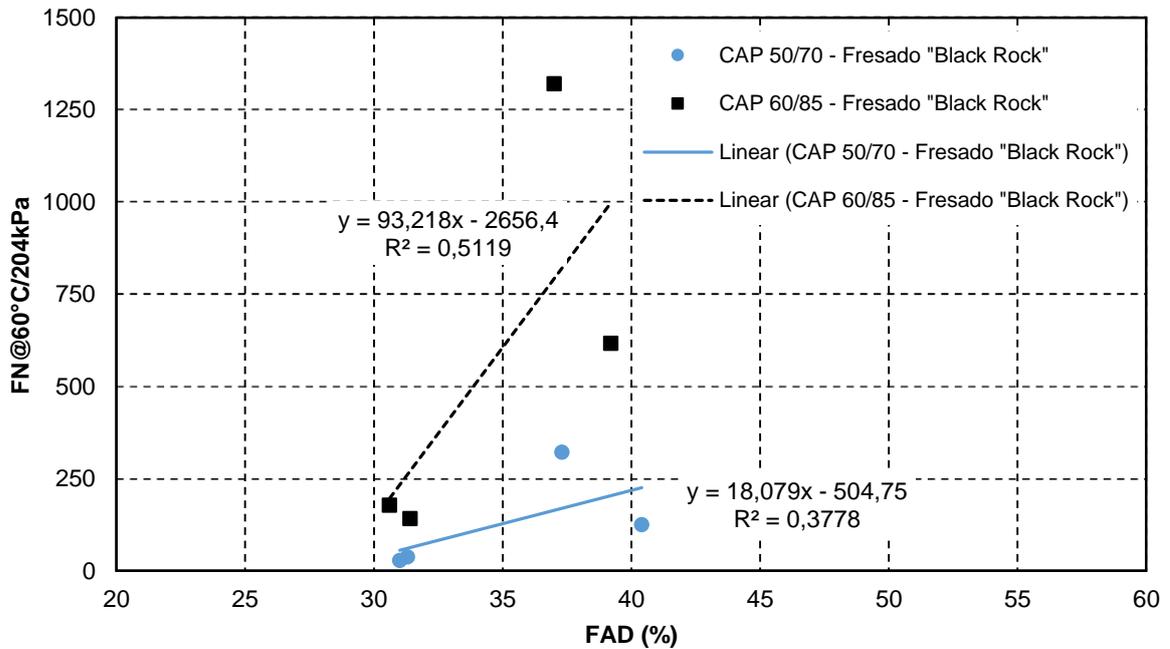
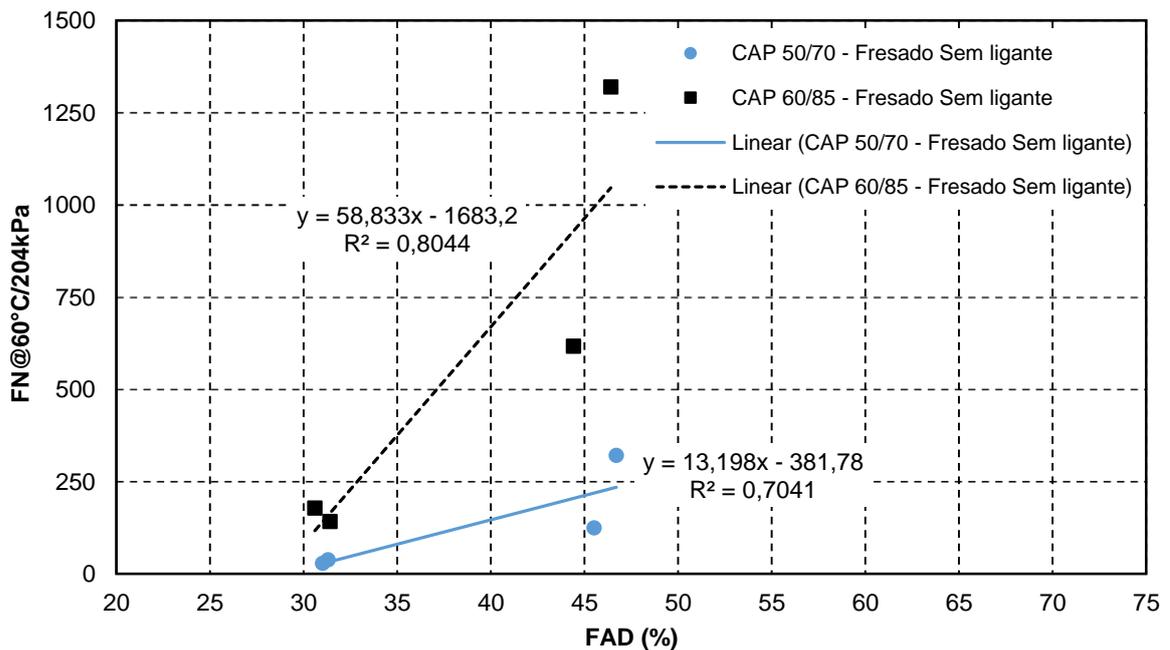


Figura 47 - Correlação entre a porosidade FAD e o FN, considerando fresado sem ligante, como agregado comum



4.2. PROPRIEDADES DE DEFORMABILIDADE

Nesse item são avaliados os resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e de Módulo Complexo (E^*), ensaios estes que demonstram as propriedades de deformabilidade das misturas asfálticas desta pesquisa, este analisado no domínio da viscoelasticidade linear, e, aquele no domínio da elasticidade. Dessa forma, como já descrito na metodologia, moldaram-se amostras nos respectivos teores de projeto, determinados no procedimento de dosagem de cada uma das 8 misturas, com o Vv e dimensões requeridas para cada ensaio.

4.2.1. Módulo de Resiliência

O ensaio de MR foi realizado em três amostras por mistura, a três temperaturas distintas, 10°, 25° e 35°C, em duas posições, 0° e 90°, e em três frequências diferentes, 5, 10 e 25 Hz. Os corpos-de-prova foram condicionados em cada temperatura por no mínimo 12 horas (um pernoite). A ordem dos ensaios foi da menor temperatura para a maior, e da maior frequência para a menor.

A média dos dez valores dados pelo *software* UTS003 (*Indirect Tensile Modulus Test*) para o ensaio de MR (cinco para a posição de 0° e cinco valores para a de 90°), e seu respectivo, desvio-padrão e coeficiente de variação, são apresentados na Tabela 30, para cada mistura estudada.

Os coeficientes de variação, conforme apresentados na Tabela 30, foram maiores se comparados a Almeida Jr. (2016), que obteve valores menores que 10% nas três temperaturas e nas três frequências de carregamento e maiores variações foram encontradas na temperatura de 10°C. Na presente pesquisa, acabou-se aceitando CV maiores devido a não aumentar muito a carga do ensaio, para que não houvesse chance de as amostras deformarem ou romperem, ou saírem fora do domínio da viscoelasticidade linear, para validação do ensaio. Encontrou-se maiores variações de CV na temperatura de 35°C (de maneira geral sobre todas as misturas), porém, houve maiores variações nos valores de DP na temperatura de 10°C, na qual

o valor de carga aplicada para realização do ensaio é superior, devido a rigidez elevada das misturas nessa temperatura.

Nesta linha de pensamento, Marques (2004) esclarece que o sistema de controle e aquisição de dados do equipamento fixa uma sensibilidade mínima dos LVDTs, e para registrar o valor de MR é necessário que o deslocamento dos mesmos, ao longo do diâmetro horizontal, atinja esse valor mínimo. Como na temperatura de 10°C as misturas apresentam uma alta rigidez, é necessário um maior carregamento para obter-se a leitura.

Analisando os valores de MR encontrados, nota-se que à medida em que há aumento da temperatura e redução da frequência de carregamento têm-se um acréscimo da deformabilidade das misturas. Isso ocorre devido às misturas asfálticas apresentarem um comportamento termo susceptível, dependentes da temperatura e da frequência de carregamento.

Tabela 30 - Valores de Módulo de Resiliência a 10°, 25° e 35°C

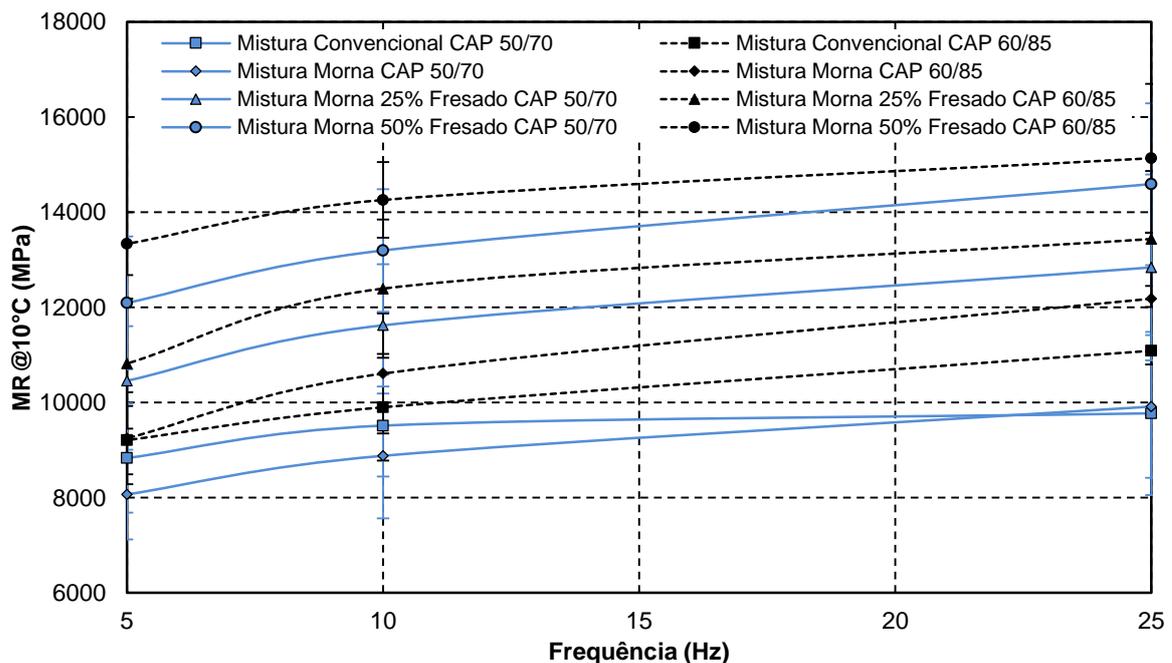
Frequência (Hz)	Mistura	MR @10°C (MPa)	DP @10°C (MPa)	CV @10°C (%)	MR @25°C (MPa)	DP @25°C (MPa)	CV @25°C (%)	MR @35°C (MPa)	DP @35°C (MPa)	CV @35°C (%)
25	Convencional CAP 50/70	9770	1713	17,53	7842	973	12,41	2931	828	28,27
	Morna CAP 50/70	9914	1500	15,13	8096	1214	15,00	2840	959	33,76
	Morna 25% Fresado CAP 50/70	12840	1953	15,21	9012	654	7,26	3643	328	9,02
	Morna 50% Fresado CAP 50/70	14589	1703	11,67	10431	675	6,47	4921	509	10,35
	Convencional CAP 60/85	11090	1360	12,27	7106	900	12,66	2551	475	18,60
	Morna CAP 60/85	12184	1386	11,38	7237	822	11,36	2243	227	10,11
	Morna 25% Fresado CAP 60/85	13435	1431	10,65	8922	618	6,92	4482	940	20,97
	Morna 50% Fresado CAP 60/85	15132	1567	10,36	11074	868	7,84	5213	608	11,67
10	Convencional CAP 50/70	9512	1071	11,26	5685	507	8,91	1489	286	19,17
	Morna CAP 50/70	8877	1312	14,78	5515	561	10,17	1607	478	29,75
	Morna 25% Fresado CAP 50/70	11622	1286	11,07	7417	578	7,79	2287	185	8,08
	Morna 50% Fresado CAP 50/70	13195	1290	9,78	8800	507	5,76	3368	258	7,67
	Convencional CAP 60/85	9899	1122	11,33	5433	496	9,13	1617	233	14,44
	Morna CAP 60/85	10609	1263	11,91	5244	359	6,85	1462	120	8,20
	Morna 25% Fresado CAP 60/85	12391	1455	11,74	6986	415	5,94	2740	493	17,98
	Morna 50% Fresado CAP 60/85	14256	795	5,58	9338	586	6,28	3578	371	10,37
5	Convencional CAP 50/70	8831	1147	12,98	4422	330	7,47	1065	177	16,65
	Morna CAP 50/70	8064	941	11,66	4307	330	7,67	1108	284	25,61
	Morna 25% Fresado CAP 50/70	10456	1148	10,98	6083	511	8,40	1642	138	8,40
	Morna 50% Fresado CAP 50/70	12095	1395	11,53	7329	424	5,79	2515	385	15,31
	Convencional CAP 60/85	9206	718	7,80	4294	459	10,68	1161	168	14,49
	Morna CAP 60/85	9251	967	10,45	4056	292	7,19	1078	79	7,31
	Morna 25% Fresado CAP 60/85	10816	1365	12,62	5611	340	6,06	2005	373	18,62
	Morna 50% Fresado CAP 60/85	13337	661	4,95	7886	498	6,31	2797	264	9,43

Ao avaliar as misturas na temperatura de 10°C, conforme ilustrado na Figura 48, comparando as misturas convencionais quentes com as misturas mornas percebe-se um comportamento com pouca diferença, já por apresentarem mesma composição granulométrica e teores de ligantes parecidos. Para as misturas com CAP 50/70, a convencional apresenta valores superiores de MR se comparada a morna, apenas invertendo essa posição a 25 Hz. Já para as misturas com CAP 60/85 a mistura morna apresenta valores menores de deformabilidade para todas as frequências quando comparada a mistura convencional.

Em relação ao teor de fresado adicionado às misturas, em substituição ao agregado virgem, pode-se afirmar que à medida em que se aumenta a porcentagem de RAP há um acréscimo de rigidez das misturas. Isso acontece para ambos os ligantes estudados.

Verificando os diferentes tipos de ligantes utilizados, é clara a melhora dos valores de MR nas misturas com CAP 60/85 às misturas com CAP 50/70. Isso se deve a maior capacidade que o ligante modificado proporciona às misturas de se deformar e retornar as condições iniciais, apresentando melhor resiliência que o ligante convencional.

Figura 48 - Resultados de Módulo de Resiliência a 10°C em função da frequência de carregamento

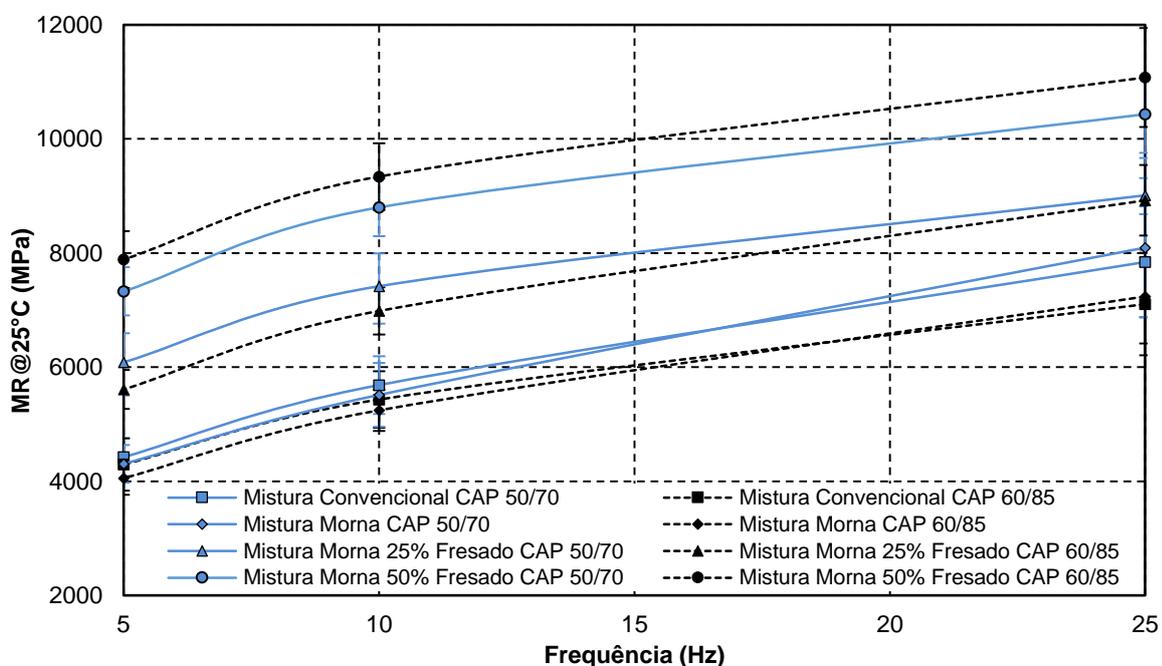


Nos resultados de MR encontrados para a temperatura de 25°C, de acordo com a Figura 49, ocorre um comportamento semelhante entre misturas convencionais e mornas, obtendo valores muito parecidos de módulo. Em ambos os ligantes asfálticos, nota-se uma maior rigidez das misturas convencionais nas frequências de 5 e 10 Hz, e o contrário à 25 Hz, onde os valores de MR das misturas mornas tornam-se um pouco superiores às convencionais.

Comparando as misturas quanto ao teor de RAP adicionado, confirma-se o comportamento já encontrado nas misturas a 10°C. Quanto maior o teor de material reciclado, maior a resistência a resiliência das misturas estudadas.

Verificando os diferentes tipos de ligantes utilizados, não existe uma regra clara, e não se obteve a hegemonia do ligante modificado sobre o convencional. Para as misturas sem fresado e as com adição de 25%, há uma melhora na rigidez das misturas com CAP 50/70 se comparada às com CAP 60/85. Apenas nas misturas com 50% de fresado existe a superioridade dos valores de MR para CAP 60/85.

Figura 49 - Resultados de Módulo de Resiliência a 25°C em função da frequência de carregamento

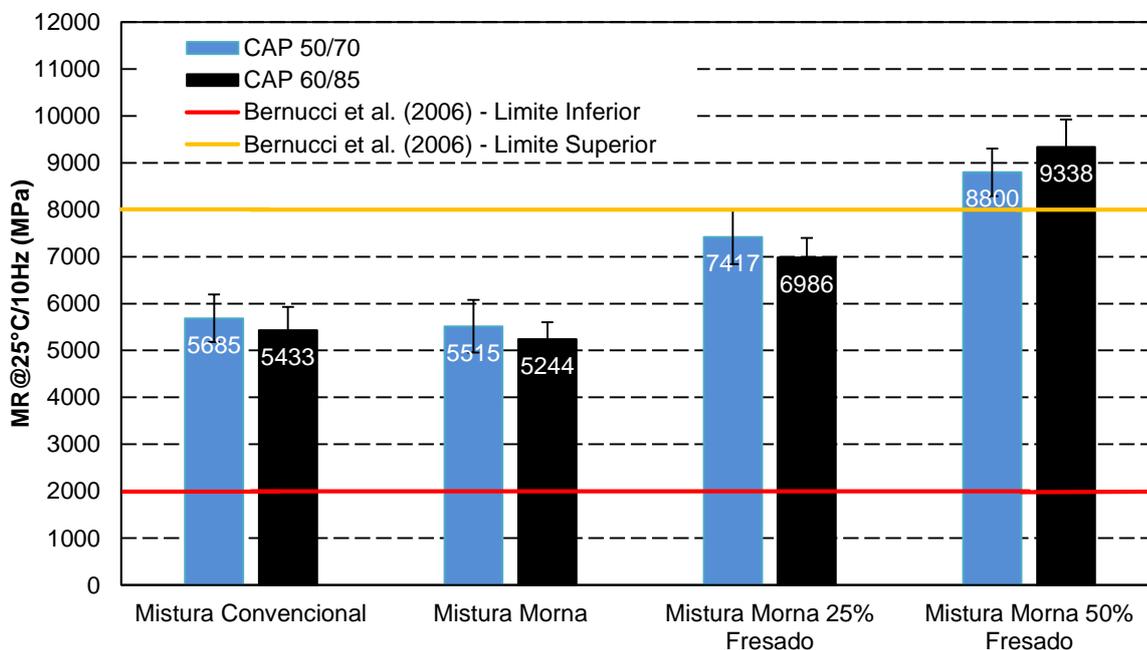


Na Figura 50, podemos ver os resultados de MR para as misturas a 35°C. Analisando as misturas convencionais *versus* mornas, percebe-se que os valores de

A taxa de acréscimo do módulo para misturas com fresado vai decrescendo na medida em que a temperatura de ensaio aumenta, misturas com 35°C aumentam em proporções menores que a 25°C e a 10°C, podendo ser confirmadas nas Figuras 48, 49 e 50.

Bernucci *et al.* (2006) cita que valores típicos de MR a 25°C e 10Hz, para concretos asfálticos, estão na faixa de 2.000 a 8.000MPa. Todas as misturas da referente pesquisa apresentam valores dentro desse limite, conforme pode ser visto na Figura 51. Somente as misturas com 50% de fresado tem resultados de MR acima de 8.000MPa, que pode ser explicado pela influência da distribuição granulométrica e pela maior rigidez do material fresado. Porém, essas misturas não precisam necessariamente ser aplicadas como revestimento asfáltico, mas podem sim, ser utilizadas como uma base negra, por exemplo, desde que se adeque ao projeto estrutural do pavimento.

Figura 51 - Módulo de Resiliência das mistura estudadas, a 25°C e 10Hz, com os limites propostos por Bernucci *et al.* (2006)



Outros autores como Vasconcelos & Soares (2003) estudaram sobre misturas asfálticas recicladas a quente. Porém, encontraram resultados de MR menores que está pesquisa, da ordem de 2.680 e 2.908 MPa para misturas sem adição de agregado

reciclado, 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 material fresado. Importante salientar que os autores observaram uma tendência de crescimento do MR com a adição de fresado, assim como demonstram os resultados da presente pesquisa.

Já Oliveira (2013) estudou sobre misturas recicladas quentes e mornas. Para as misturas recicladas a quente o autor analisou uma mistura de referência e misturas com 15%, 35% e 50% de adição de fresado, obtendo, respectivamente, os valores de 3.809, 6.056, 7.144 e 8.435 MPa. Para as misturas mornas o autor realizou as mesmas misturas, porém reduzindo em 40°C as temperaturas de mistura e compactação, e encontrou valores bem inferiores, respectivamente, de 3.266, 2.672, 3.921 e 4.786 MPa.

Centofante (2016) também verificou o aumento da rigidez ao passo que uma maior quantidade de material fresado é inserida na mistura. À temperatura de 25°C, a autora observou que os resultados de MR variavam de, aproximadamente, 4.000 até 6.900MPa, para a mistura convencional referência, enquanto que para as misturas com adição de fresado, esses valores diferenciavam entre si, aproximadamente, de 5.300 até 9.000MPa. Centofante (2016) trabalhou com o mesmo ligante 50/70 dessa pesquisa (mesmo lote de coleta) porém com agregados de outra região do estado do RS.

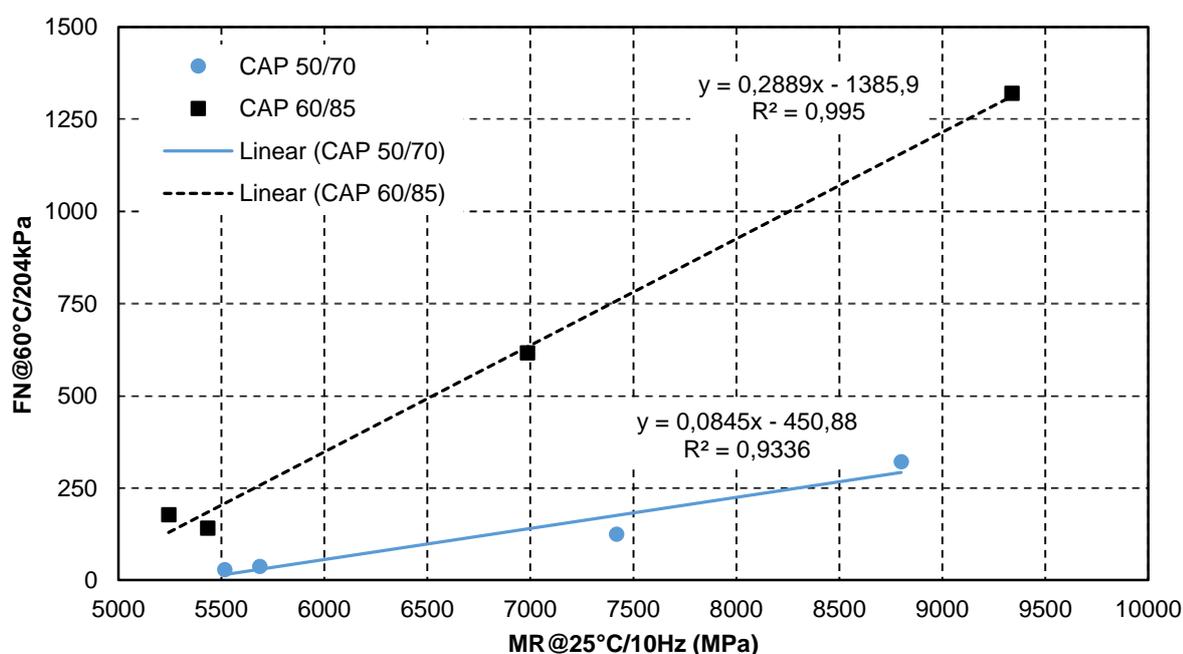
O estudo de Boeira (2014) não investiga misturas recicladas, porém o autor trabalhou com o mesmo agregado desta pesquisa e com ligante convencional, encontrando um valor médio de 5.345MPa para sua mistura referência, a 25°C e a 10Hz. Schuster (2016) trabalhou com materiais agregados e CAP 50/70 de mesmos lotes de coleta dessa pesquisa, e encontrou valor médio de 5.975MPa. Ambos os valores são muito semelhantes ao encontrado para a mistura Convencional CAP 50/70 onde se obteve um valor médio de 5.685MPa.

Tais resultados corroboram com os valores encontrados neste estudo, o que comprova, através da literatura, que a presença de material reciclado aumenta a rigidez das misturas de concreto asfáltico. E, além disso, com os valores obtidos na pesquisa é possível frisar que as misturas mornas trabalham de forma semelhante às misturas quentes, pois seus valores não ficam aquém dos descritos pelos autores que trabalharam com reciclagem a quente.

Na tentativa de correlacionar os resultados de Módulo de Resiliência com os valores *Flow Number*, nota-se que há correlação dos valores obtidos, mesmo analisando diferentes tipos de ligante, conforme demonstra a Figura 52. Importante frisar que essa correlação foge da conceituação da literatura, pois abrange dois domínios de trabalho diferentes, o da elasticidade e do dano, porém serve apenas de correlação visando a prática das obras rodoviárias.

Sendo assim, com o aumento dos resultados de MR constata-se o incremento do valor do FN característico, tanto para as misturas com ligante convencional, quanto para com ligante modificado. A correlação entre as duas propriedades mostra ser coerente, pois os R^2 apresentados pelas equações apresentam ótimos valores, de 0,9336 para misturas com CAP 50/70, e 0,995 para misturas com CAP 60/85. Um aumento no MR de 1000 MPa, nas misturas com ligante modificado, pela correlação, elevaria em 289 ciclos o *Flow Number* da mistura. Esse mesmo aumento de 1000 MPa, nas misturas com ligante convencional aumentaria o FN em 85 ciclos. Esse aumento de 1000 MPa na rigidez das misturas representa um aumento no FN de 240% das misturas com CAP 60/85 em relação as misturas com CAP 50/70.

Figura 52 - Correlação de MR, a 25°C e 10Hz, com os resultados de *Flow Number*



4.2.2. Módulo Complexo

O ensaio para obtenção do Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e Ângulo de Fase (ϕ) foi executado segundo procedimentos da AASHTO T 342-11, porém, realizado em todas as frequências de carregamento que o *software* UTS006 – *SPT Dynamic Modulus Test* disponibiliza (25, 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1 e 0,01Hz). As temperaturas de ensaio foram -10, 4, 21, 37 e 54°C. Foram ensaiadas duas amostras para cada uma das oito misturas estudadas. Os dados experimentais obtidos constam no Apêndice B.

A apresentação dos resultados obtidos no ensaio de Módulo Complexo segue protocolo de análise, segundo orienta Di Benedetto & Corté (2005). Primeiramente, apresentar-se-á as isotermas, seguidas das isócronas, espaços Cole Cole, Diagramas de Black, curvas mestras de $|E^*|$ e ϕ , e por fim as inferências à deformação permanente e à fadiga.

Optou-se por apresentar apenas uma Isoterma e uma Isócrona de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, como forma de ilustrar todos aspectos de análise que a metodologia 2S2P1D estabelece como necessária, porém seus dados serão analisados nos gráficos de curvas mestras, a seguir. Os gráficos de todas as isotermas e isócronas constam no Apêndice C.

As Figuras 53 e 54 apresentam os resultados das Isotermas de Módulo Dinâmico e Isoterma de Ângulo de Fase, respectivamente. Na Figura 53 é apresentada a Isoterma de $|E^*|$ a 21°C, escolhida por ser a média das temperaturas estudadas e ficar mais próxima de 25°C, temperatura padrão dos ensaios brasileiros. Já a Isoterma de ϕ a 37°C, Figura 54, foi escolhida por mostrar a curva que o ângulo de fase faz nessa temperatura. As Figuras 55 e 56 apresentam as Isócronas de Módulo Dinâmico e Isócrona de Ângulo de Fase, respectivamente, para a frequência média de 10Hz. Essas figuras são apenas como ilustração da metodologia 2S2P1D e serão analisadas nos gráficos de curvas mestras, posteriormente.

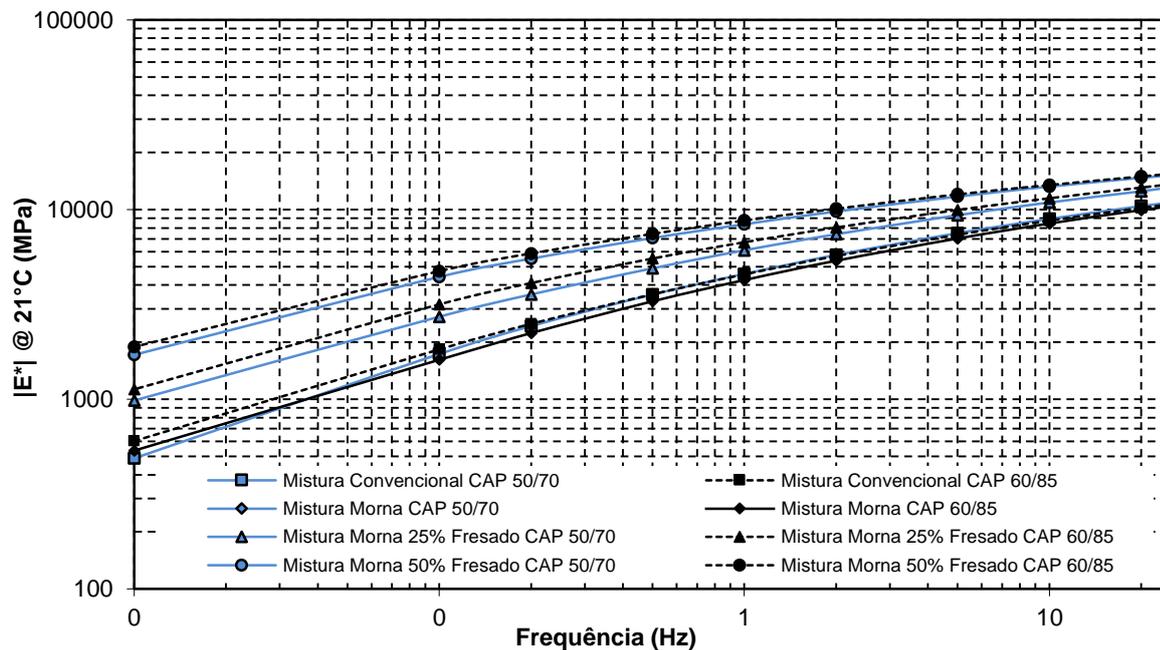
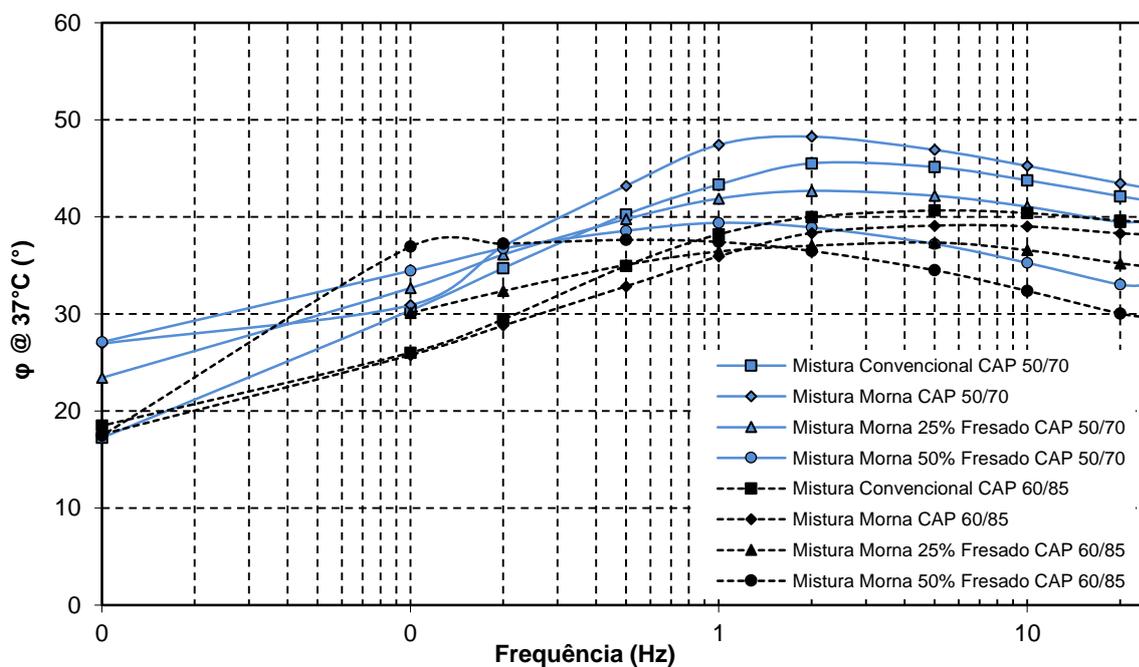
Figura 53 - Isoterma de $|E^*|$ a 21°CFigura 54 - Isoterma de ϕ a 37°C

Figura 55 - Isócrona de $|E^*|$ a 10,0Hz

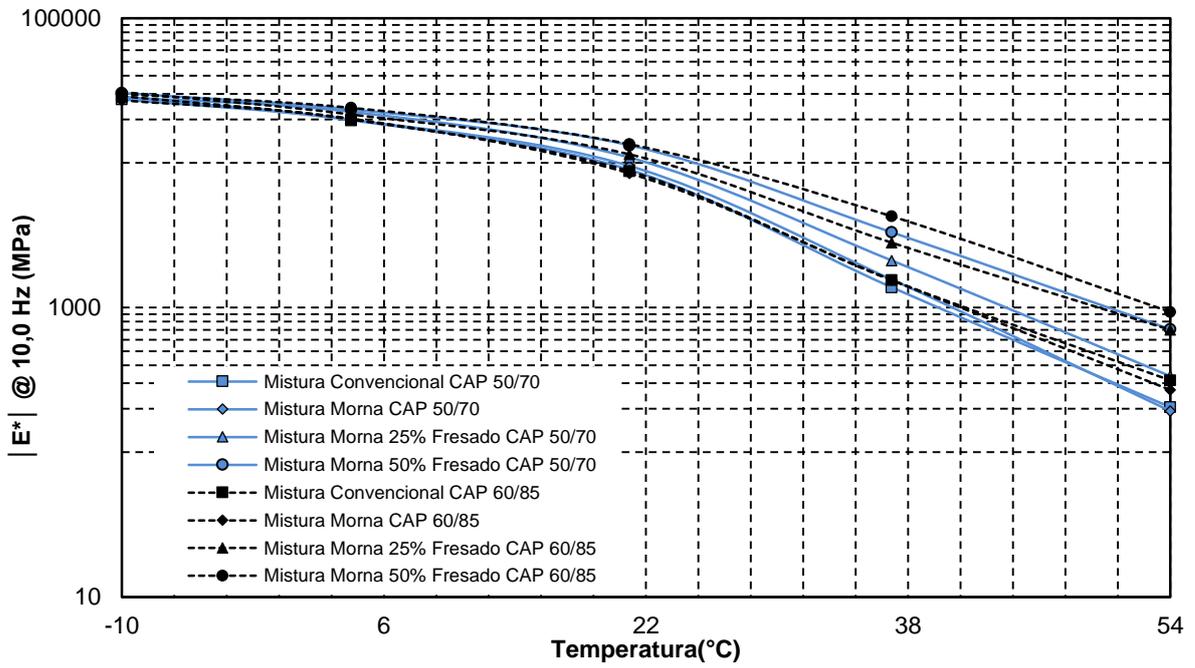
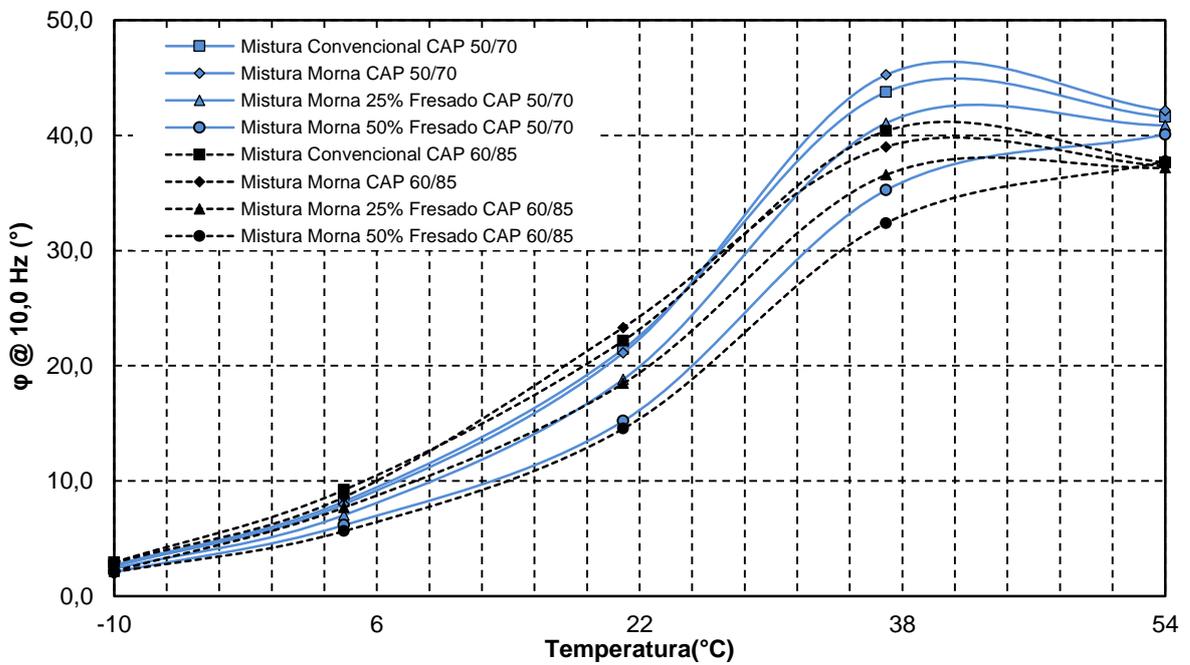


Figura 56 - Isócrona de ϕ a 10,0Hz



As médias dos dados experimentais obtidos foram submetidas ao modelo reológico 2S2P1D para a construção do espaço Cole Cole, Diagrama de Black e das

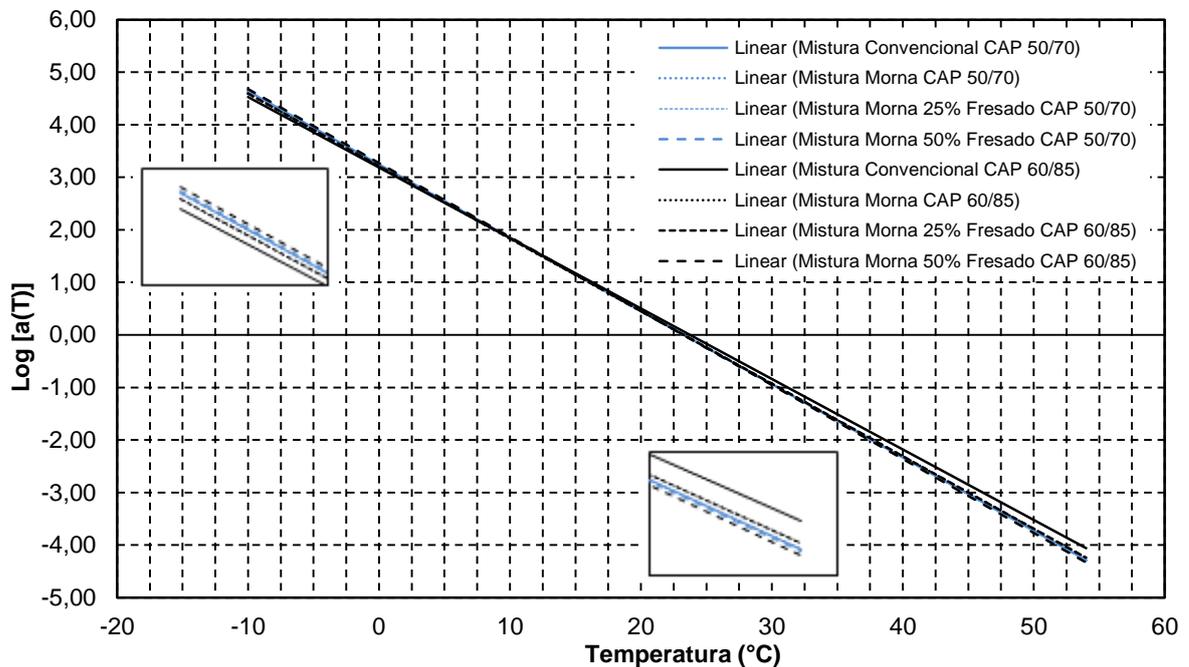
curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase das misturas. Os sete parâmetros do modelo e as constantes C1 e C2, do WLF (William, Landel e Ferry), para cada uma das oito misturas pesquisadas, constam na Tabela 31.

Tabela 31 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura

Mistura	E*							WLF	
	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k	h	δ	τ _E (s)	β	C1	C2
Convencional 50/70	50	31500	0,22	0,6	2,2	0,4	200	31,82	230,12
Morna 50/70	35	32250	0,22	0,6	2,2	0,4	200	31,80	229,98
Morna 25% Fresado 50/70	65	32500	0,224	0,58	2,15	0,6	500	31,74	229,62
Morna 50% Fresado 50/70	110	33500	0,22	0,57	2,4	0,1	200	32,41	233,8
Convencional 60/85	85	33500	0,22	0,569	2,15	0,35	500	25,04	189,35
Morna 60/85	95	31000	0,258	0,6	2,9	0,4	200	31,41	229,67
Morna 25% Fresado 60/85	115	34800	0,195	0,54	1,7	1,5	1500	31,17	227,82
Morna 50% Fresado 60/85	110	34000	0,185	0,525	1,78	1,8	1500	32,39	231,79

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. Através da Figura 57, que apresenta um comparativo das curvas $\log [a(T)]$, a inclinação das curvas permite inferir a respeito da suscetibilidade térmica das misturas, ou seja, quanto menos inclinada a curva melhor é o comportamento da mistura quanto à suscetibilidade térmica, e tende ter maior estabilidade. É possível observar que a Mistura Convencional CAP 60/85 é a mistura que apresenta ser menos suscetível à temperatura, pois a mesma mostra ter a linha de tendência mais na horizontal. Em contrapartida, a mistura mais suscetível à temperatura, que apresenta uma maior inclinação para a vertical, é a Mistura Morna 50% Fresado, do mesmo ligante. Porém, isso apenas serve como modo de primeira análise, o que poderá ser melhor analisado à medida que os ensaios realizados na presente pesquisa forem apresentados.

Figura 57 - Comparação das linhas de tendência lineares das curvas $\log [a(T)]$ para todas as misturas (@20°C)



O espaço Cole Cole apresenta a parte real E_1 , no eixo das abscissas, e a parte imaginária E_2 , no eixo das ordenadas, e é semelhante a um arco de círculo. Com E_1 pode-se avaliar a parte recuperável da energia armazenada, e com E_2 o comportamento viscoso irreversível do material devido a dissipação de energia. O Diagrama de Black permite analisar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase em diferentes temperaturas.

As Figuras 58 e 59 apresentam o espaço Cole Cole e o Diagrama de Black para a Mistura Convencional CAP 50/70, mistura escolhida apenas para exemplificar e mostrar os dados obtidos experimentalmente (amostras 1, 2 e média) com a modelagem 2S2P1S, para cada mistura estudada. Os espaços Cole Cole e Diagrama de Black de todas as misturas constam no Apêndice D.

Vale salientar que a modelagem 2S2P1D foi feita a partir da análise da média dos dados obtidos pelo ensaio. Importante frisar também que houve certo contratempo na obtenção dos resultados a 54°C, devida a dificuldade em medir o Ângulo de Fase em altas temperaturas, principalmente por problemas de fixação dos LVDTs nos corpos-de-prova.

Figura 58 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Convencional CAP 50/70

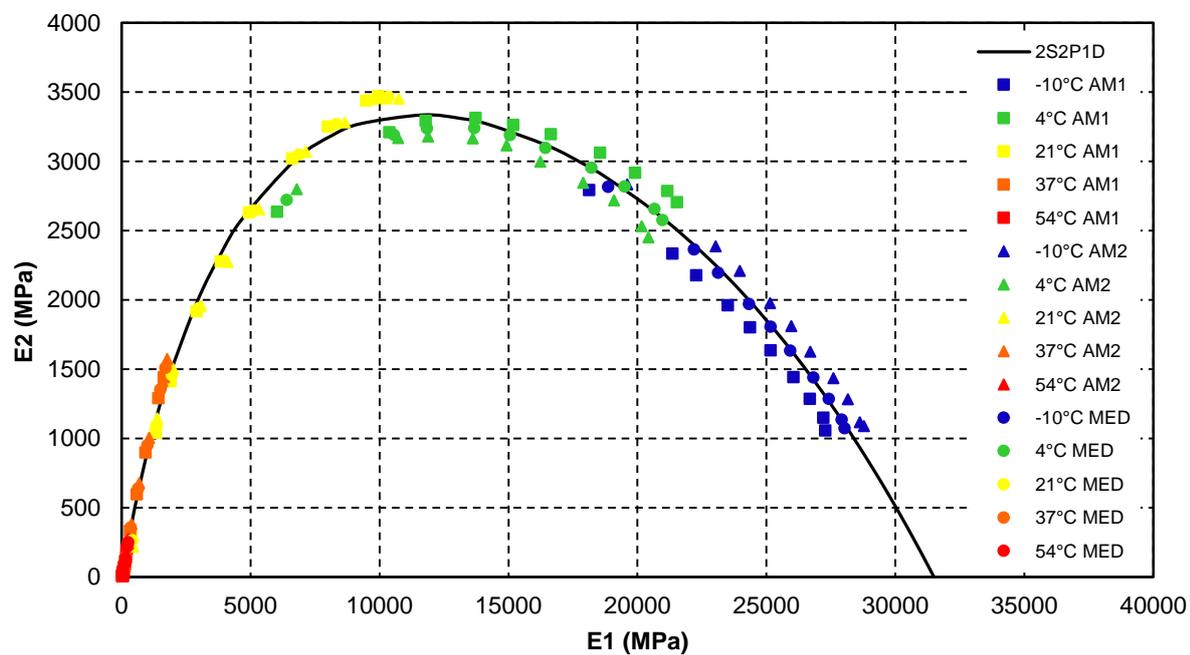
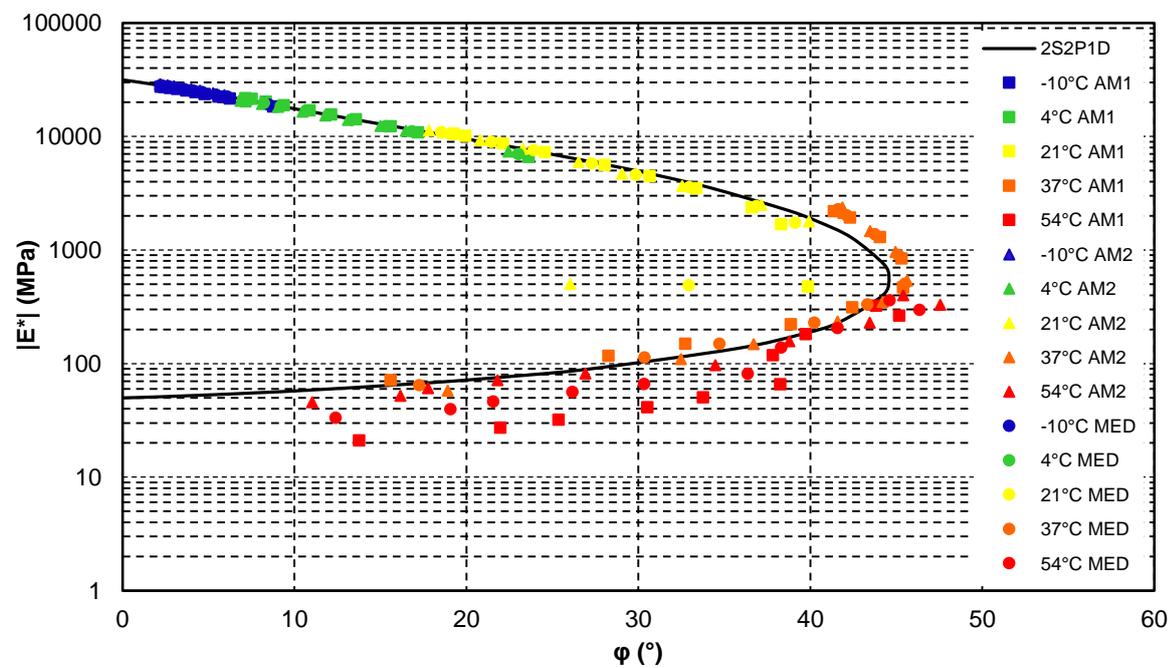


Figura 59 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Convencional CAP 50/70

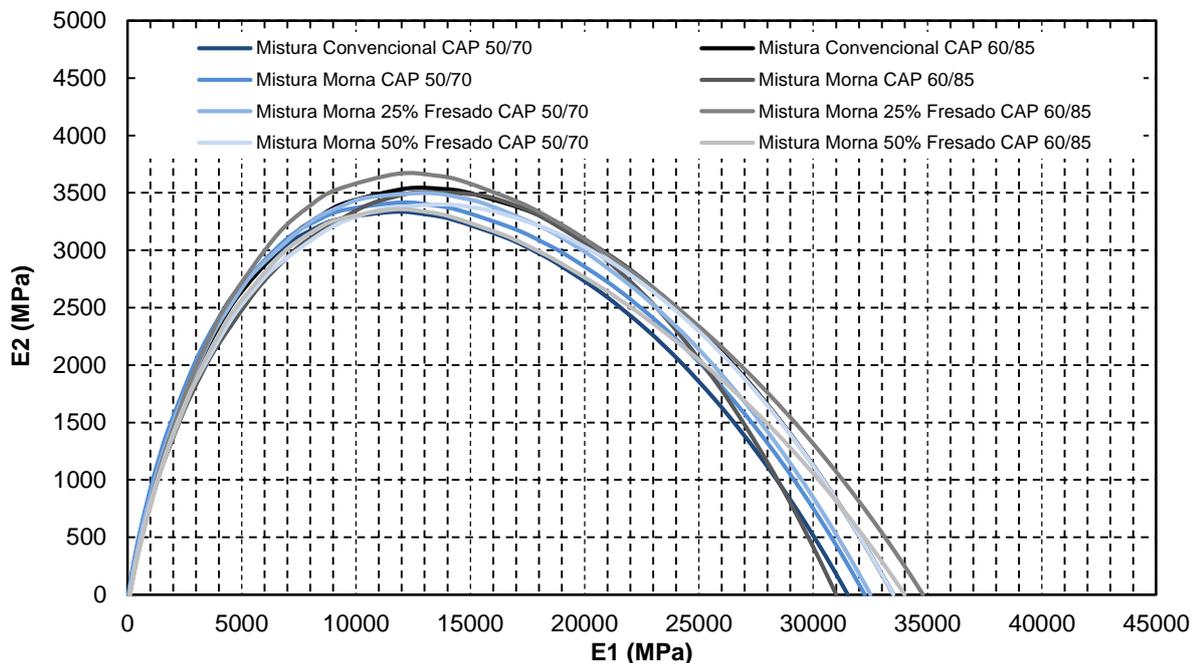


A Figura 60 apresenta de forma gráfica os resultados da modelagem 2S2P1D, das misturas, no espaço Cole Cole. Nota-se que as misturas com CAP 50/70 e CAP 60/85 não apresentam uma regra clara de comportamento. É sabido que as misturas com ligante modificado apresentam um menor comportamento viscoso irreversível que misturas com ligante convencional, ou seja, ao se deformar retornam ao seu estado original com maior facilidade. Sendo assim, nas misturas com ligante convencional o esqueleto mineral é mais solicitado e ocorre uma maior dissipação de energia por atrito interno, o que representa uma situação considerada de maior severidade. Esse comportamento foi confirmado por Almeida Jr. (2016) e Bruxel (2015) em suas pesquisas.

Os valores de E2 das misturas estudadas não mostram com clareza tal aspecto. É notado que, em ordem crescente de valores de E2, tem-se a seguinte sequência das misturas: Convencional CAP 50/70, Morna 50% Fresado CAP 60/85, Morna 50% Fresado CAP 50/70, Morna CAP 50/70, Morna 25% Fresado CAP 50/70, Morna CAP 60/85, Convencional CAP 60/85 e Morna 25% Fresado CAP 60/85. Dessa forma é possível afirmar que as misturas com CAP 50/70 apresentam maior comportamento viscoso reversível, de maneira geral, sendo que a Convencional apresenta os menores valores de E2. Vale salientar que as misturas com 50% de fresado se comportaram muito bem, para ambos os ligantes trabalhados, mas em contrapartida, a Mistura 25% Fresado CAP 60/85 apresentou o pior desempenho dentre todas as misturas, se distanciando um pouco mais das outras, o que indica que essa mistura apresenta mobilização do esqueleto mineral, bem como maior dissipação de energia.

Analisando a parte real E1, percebe-se uma tendência das misturas com ligante modificado apresentarem maiores valores, exceto a mistura Morna CAP 60/85, que apresenta o menor valor dentre todas as oito misturas estudadas. Pode-se notar uma sequência de piora para as misturas com CAP 50/70, à medida que vai aumentando o teor de fresado incorporado nas amostras. A mistura que apresenta o maior comportamento viscoso é a Morna 25% Fresado CAP 60/85, seguida da Morna 50% Fresado do mesmo ligante.

Figura 60 - Espaço Cole Cole, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D



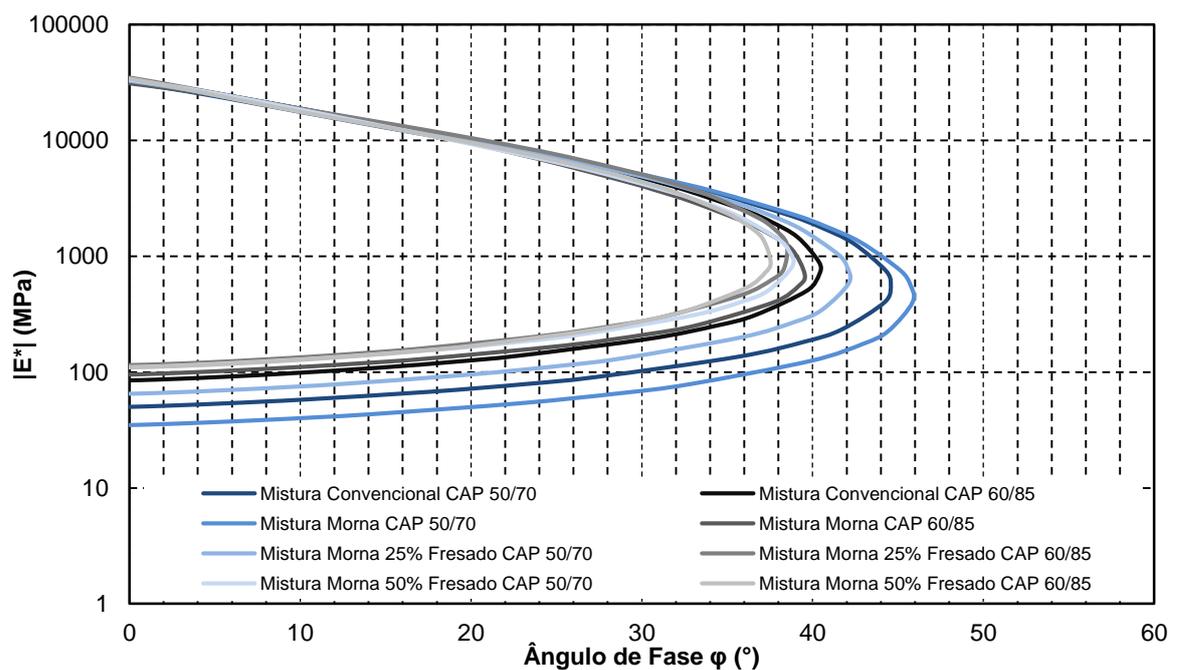
As linhas da modelagem 2S2P1D das misturas pesquisadas, para o Diagrama Black, estão apresentadas na Figura 61. É possível perceber que até 37°C (através da análise das isócronas de ϕ , Apêndice B), a temperatura tem efeito de aumento no ângulo de fase. A partir desse ponto, ou seja, para temperaturas superiores (54°C), o valor do ϕ passa a diminuir. Pode-se compreender também, com análise do gráfico, que com o aumento da temperatura o $|E^*|$ diminui.

Ao analisar o Diagrama de Black, é possível verificar que a Mistura Morna 50% Fresado CAP 60/85 possui o menor valor de ângulo de fase, o que permite inferir que a mistura, possivelmente, possui um maior comportamento elástico quando comparada às demais. Na sequência vem a Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85, seguida da Morna 50% Fresado CAP 50/07, mostrando que o teor de fresado aumentou a rigidez das misturas. Seguindo, tem-se a Mistura Morna CAP 60/85, Convencional CAP 60/85 e Morna 25% Fresado CAP 50/70, na ordem do menor para o maior ângulo de fase, salientando a influência do tipo de ligante nos resultados de ϕ e instigando que as misturas com ligante modificado tendem a apresentar maior resistência à deformação permanente, em campo. Já as Misturas Morna e Convencional CAP 50/70 apresentam os maiores valores de ϕ , mostrando que elas

apresentam uma parcela viscosa mais importante, com relação à parcela elástica, e que representa uma maior dissipação de energia ou maior perda por atrito interno. A partir disso, é possível inferir que estas duas misturas apresentariam, em campo, maiores deformações plásticas quando comparadas às demais misturas.

Comparando as misturas mornas e convencionais, pode-se dizer que para as misturas com CAP 50/70, a mistura morna apresenta maior parcela viscosa, mesmo apresentando menor teor de projeto comparado com a convencional. Contrapondo o dito por Almeida Jr. (2016), que verificou que o excesso de ligante aumenta a película entorno do agregado, reduzindo o atrito entre os grãos, quando da utilização de ligante convencional. Para as misturas com ligante modificado, a convencional apresenta maiores valores de ϕ que a morna.

Figura 61 - Diagrama Black, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D



Assim, tendo em vista o comportamento termo reológico 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*). As curvas foram ajustadas pelo modelo reológico 2S2P1D.

De maneira geral, verifica-se que o módulo dinâmico cresce com o aumento da frequência, independentemente do tipo de mistura asfáltica. Nas altas frequências, ocorre um menor tempo de carregamento, limitando a manifestação de deformações viscoelásticas, ou seja, praticamente só existem deformações elásticas no material. Nas baixas frequências, o tempo de carregamento é maior, e faz revelar deformações viscoelásticas do material. A avaliação do comportamento viscoelástico das misturas é válida para a faixa de temperatura de realização do ensaio, ou seja, de -10 a 54°C.

As análises nas altas frequências correspondem às baixas temperaturas, e nas baixas frequências às altas temperaturas. Às altas frequências estão relacionadas a avaliação do dano por trincamento térmico no revestimento asfáltico, incomum no Brasil devido ao clima tropical. As temperaturas muito baixas podem levar o revestimento asfáltico ao trincamento por retração, e ainda, a um grande enrijecimento, de tal forma que, se a camada asfáltica possui pouca espessura e é construída sobre materiais muito deformáveis, pode acelerar o processo de fadiga do revestimento. Às baixas frequências estão relacionadas a ocorrência de deformação permanente na mistura asfáltica, enquanto nas temperaturas intermediárias, ao dano por fadiga.

Para descrever e representar as características viscoelásticas de ligantes e misturas asfálticas, pesquisadores têm se utilizado das curvas mestras, pois estas permitem que se façam observações de uma ampla faixa de temperaturas e frequências. De acordo com Yusoff *et al.* (2011), as curvas mestras são construídas a partir da seleção de uma temperatura de referência escolhida de forma arbitrária e aplicada para todos os dados reológicos analisados. A temperatura de referência terá o valor igual a um, logo, o $\log [a(T)]$ terá valor igual a zero. Visto isso, é possível perceber que as curvas mestras apresentam uma grande vantagem, pois possibilitam a previsão de valores de uma determinada propriedade reológica ao longo de uma gama de frequências e temperaturas mais ampla do que a utilizada experimentalmente.

A Figura 62 mostra a curva mestra de módulo dinâmico obtida pela modelagem 2S2P1D, para cada uma das oito misturas. A temperatura de referência é 20°C. Ao observar o gráfico, é possível verificar que o módulo dinâmico cresce em função da frequência. Tal crescimento ocorre, devido a menor exposição à carga quando aumentada a frequência, isto é, não há tempo para ocorrerem às manifestações de

deformações viscoelásticas das misturas asfálticas. Ademais, nas altas frequências, só ocorrem deformações elásticas no material, fazendo com que os módulos atinjam seus maiores valores. Nas baixas frequências, as deformações viscoelásticas costumam se manifestar em sua totalidade, já que o tempo de carregamento é maior, acarretando menores valores de módulo dinâmico.

Nas altas frequências, conforme Figura 62, pode-se verificar que as misturas mornas e convencionais se mostram compatíveis. A Mistura Morna CAP 60/85 é a que apresenta menor rigidez entre o grupo de misturas estudadas, seguida pela Convencional e Morna CAP 50/70, nessa ordem.

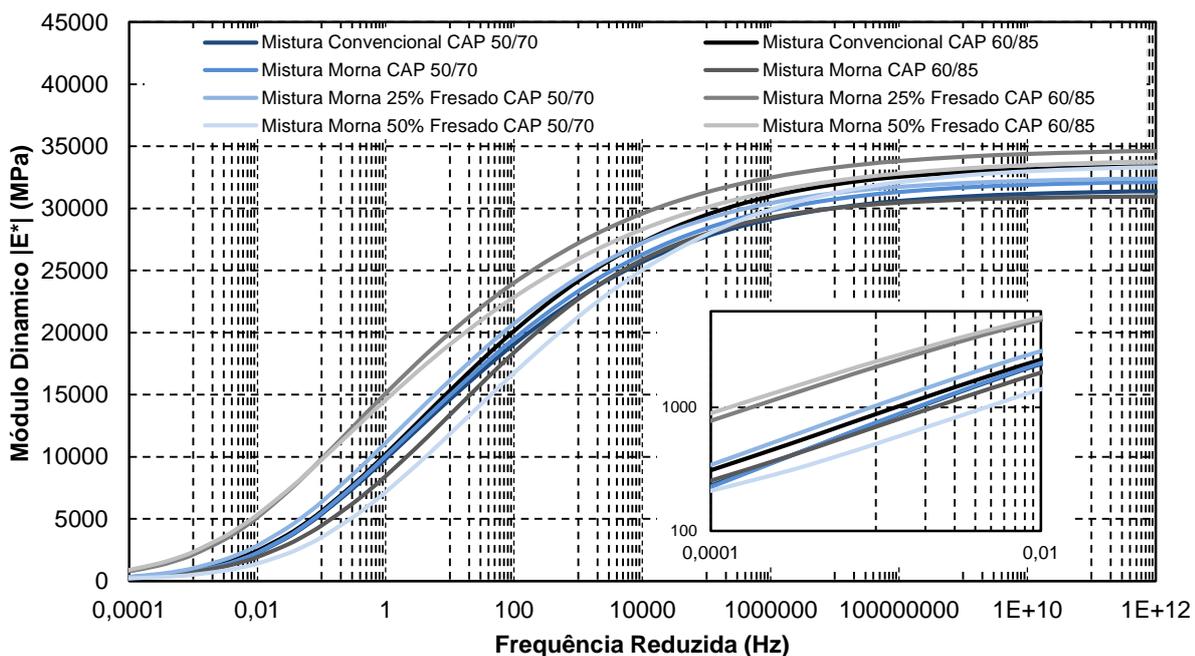
As que apresentam maior rigidez são as Misturas Morna 25% e 50% Fresado CAP 60/85, com pequena superioridade para a mistura com 25% de material reciclado. Seguidas pelas misturas Convencional CAP 60/85 e Morna 50% Fresado CAP 50/70, sobrepostas uma a outra, e Morna 25% Fresado CAP 50/70. Já era esperado uma superioridade das misturas com ligante modificado se comparado com o convencional, e com base nos ensaios de MR, de que com a inserção de fresado a mistura adquirisse maior resistência a deformabilidade.

O aumento do valor de $|E^*|$ das misturas com adição de RAP pode ser explicada pela heterogeneidade do material reciclado, ou, ainda, pelas características do ligante envelhecido presente neste material, pois o ligante asfáltico exerce grande efeito na rigidez das misturas. Além disso, outro fator que poderia explicar a inversão nos resultados, onde a mistura com 25% apresenta maior rigidez que a com 50% de fresado, seria quanto à disposição dos materiais nas amostras, visto que os corpos-de-prova foram moldados em laboratório, com auxílio de misturador e compactador giratório, podendo haver disposições de agregados distintas entre as amostras.

Centofante (2016) também encontrou inversão na ordem das misturas asfálticas recicladas, e comprovou que a mistura CAF10 era mais rígida frente às misturas CAref e CAF20, observando que a mistura com 10% de fresado adquiriu maior rigidez que a mistura com 20% de fresado em sua composição. Basueny *et al.* (2015) também encontraram resultados inesperados, no qual os resultados indicaram uma maior rigidez da mistura contendo 25% de adição de material reciclado em comparação 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 pela mistura com 40% de RAP, 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 fresado 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. Os autores ainda afirmam 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 material fresado, tenha resultado em uma formação de microfissuras, as quais explicam as propriedades de misturas asfálticas em temperaturas baixas.

Figura 62 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico para todas as misturas (@20°C)



Ainda sobre a Figura 62, analisando a baixas frequências, é visível que as misturas apresentam menor módulo dinâmico e, conseqüentemente, sejam menos rígidas, nestas condições de temperatura e frequência abaixo de 0,1Hz. Nessas frequências pode-se perceber que as misturas convencionais e mornas ficam sobrepostas, mostrando ter comportamento semelhante.

Importante salientar que as misturas praticamente seguem a mesma sequência das altas frequências, porém com queda da rigidez da Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70, que tem o desempenho inferior nessas condições. Com exceção da mesma mistura, vale destacar o aumento da rigidez das misturas com acréscimo de fresado, mostrando que seu ligante envelhecido proporciona a melhora da resistência, fato comprovado também por Centofante (2016).

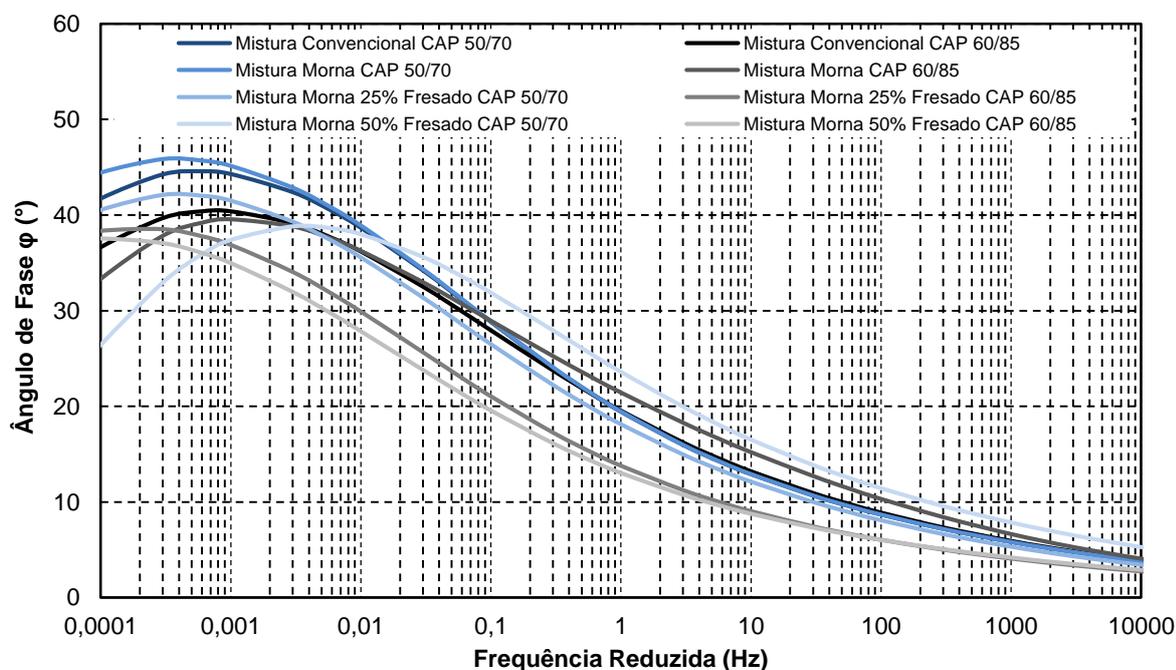
De maneira geral, é perceptível a maior rigidez das misturas com ligante modificado em relação as com ligante convencional, apenas com exceção da Mistura Morna 25% Fresado CAP 50/70, que apresenta melhor comportamento que as Misturas Convencional e Morna CAP 60/85. A melhora da rigidez das misturas com polímero nas altas temperaturas também foi confirmada por Almeida Jr. (2016) e Bruxel (2015). Ressalta-se que quanto maior a rigidez da mistura, melhor a distribuição das tensões que um revestimento transfere para as camadas subjacentes. Por essa razão, o ganho de rigidez proporcionado pela utilização do ligante modificado 60/85 e também pelo uso de fresado, em especial nas temperaturas mais altas, pode aumentar a vida útil da estrutura como um todo.

Já o ângulo de fase está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, sendo um parâmetro frequentemente utilizado para avaliar o efeito da modificação por polímero. Ao se analisar as curvas mestras de ângulo de fase, obtidas na modelagem 2S2P1D, Figura 63, nota-se que os menores valores, em quase todo o espectro de frequência, são para as Misturas Morna 50% e 25% Fresado CAP 60/85, nessa ordem. Misturas estas que já apresentaram ter melhor rigidez pela Figura 62. Porém, a partir da frequência de 0,006 e 0,009Hz, respectivamente, apresentam inversão de comportamento, quando a Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70 passa a apresentar valores menores. Esta última mistura apresenta os maiores valores de ângulo de fase até a frequência de 0,02Hz, quando a superioridade passa a ser da Mistura Morna com mesmo ligante. Além disso, a mesma mistura juntamente com mistura Morna CAP 60/85, mostram uma inversão de comportamento quando analisado todo o espectro de frequências. As demais misturas estudadas, mantêm um mesmo desempenho, das altas às baixas frequências, exceto a mistura Convencional CAP 60/85 que nas frequências inferiores a 0,0002Hz apresenta inversão de comportamento. Tal fato pode estar relacionado ao descolamento dos pinos de

fixação dos LVDTs na temperatura de 54°C, já que este nível de frequência está relacionado às altas temperaturas.

De maneira geral, as misturas com ligante modificado exibem uma maior elasticidade e resistência à deformação permanente. As misturas mornas e convencionais se comportaram de maneira equivalente, sendo que as com CAP 50/70 praticamente ficaram sobrepostas ao longo de todo o espectro de frequências. Quanto ao teor de fresado, não se pode encontrar um comportamento que seja equivalente para todas as misturas, mas existe um visível aumento da parcela elástica quando utilizado o material reciclado em conjunto com ligante modificado por polímero.

Figura 63 - Curvas mestras de Ângulo de Fase para todas as misturas (@20°C)



Os resultados obtidos nessa pesquisa, para as curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, são comparados aos dados de outros autores. Na Tabela 32, estão plotados os valores dos parâmetros da modelagem 2S2P1D encontrados por Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015).

Na Figura 64, foram plotadas as curvas mestras de Módulo Dinâmico das oito misturas desta pesquisa, somadas às de Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015), utilizando apenas as misturas dos autores que tem semelhança com as da referente pesquisa. De maneira geral, o que se pode inferir, a

partir da observação desse gráfico, é o fato de que há um maior agrupamento das misturas desta pesquisa, sinalizando uma sensível influência do ponto de vista da rigidez ao variar a quantidade de fresado adicionado e quanto ao ligante utilizado, mostrando que entre as misturas não houve um distanciamento expressivo, tanto quanto as curvas dos outros autores apresentam.

Tabela 32 - Parâmetros da modelagem 2S2P1D e valores de C1 e C2 das misturas de Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015)

Mistura	E*							WLF	
	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k	h	δ	τ _E (s)	β	C1	C2
Brondani 50/70	48	35000	0,225	0,61	2,25	0,6	450	31,66	230,08
Almeida Jr. S BAI FX C 50-70	140	36000	0,22	0,59	2,4	0,25	200	31,51	230,20
Almeida Jr. S BAI FX C 60-85	130	40500	0,18	0,5	2,3	0,4	6000	25,02	168,22
Centofante CAref	100	25540	0,297	0,695	3,9	0,4	900	52,48	377,24
Centofante CAF10	100	29700	0,26	0,76	3,5	0,5	900	63,51	437,38
Centofante CAF20	100	27000	0,27	0,68	3,45	0,4	900	54,52	420,35
Centofante CAF30	100	30700	0,24	0,705	3,2	0,6	900	53,03	388,21
Bruxel 50-70	75	24000	0,315	0,66	2,7	0,06	100	20,72	151,47
Bruxel 60-85	130	19300	0,29	0,559	2,1	0,08	90	20,86	151,54

Brondani (2016) utilizou o mesmo ligante convencional e mesmo agregado que a presente pesquisa, e encontrou valores semelhantes a Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85, a qual apresentou os melhores resultados desta pesquisa nas altas frequências. A composição utilizada pela autora atende aos limites da Faixa C do DNIT e da Faixa B do DAER-RS, e também aos parâmetros Bailey.

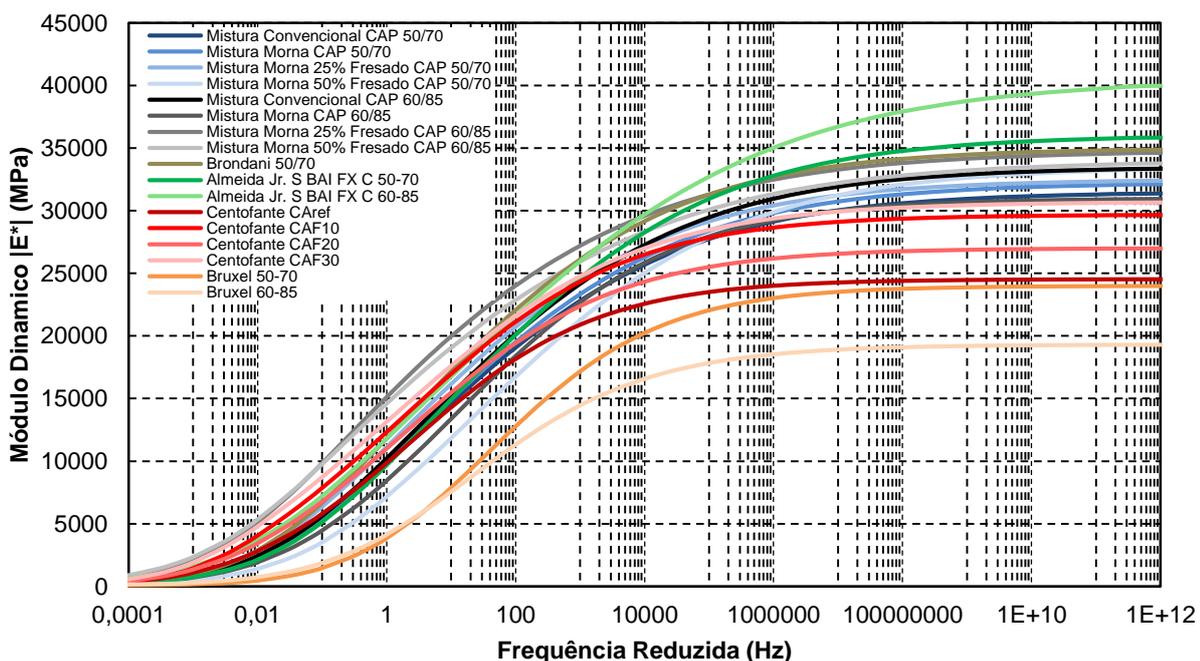
As duas misturas de Almeida Jr. (2016) apresentam resultados superiores as demais misturas citadas nas temperaturas baixas. Porém, nas baixas frequências as misturas em estudo contendo fresado e CAP 60/85 têm melhor desempenho, entretanto, as demais misturas pesquisadas apresentam comportamento semelhante as do autor. A maior rigidez das misturas de Almeida Jr. (2016) pode ser atribuída ao agregado mineral e ao ligante asfáltico, pois trabalhou com ligante convencional e modificado e obteve teores de projeto bem menores que os dessa pesquisa. Outra possibilidade é a presença de cal nas misturas do autor, que não está presente nas misturas dessa pesquisa nem das demais autoras. A literatura indica uma melhora da

adesividade ligante-agregado na presença desse componente, porém, isso deve ser melhor investigado.

Ressalta-se que Centofante (2016) possui as quatro granulometrias de suas misturas enquadradas nos parâmetros Bailey e utilizou o mesmo ligante 50/70 dessa pesquisa, com incorporação de teores de fresado 10, 20 e 30%. A perda de rigidez das misturas de Centofante (2016) é menor que as demais misturas mostradas na Figura 64. Vale destacar o fato da incorporação de fresado reduz a deformabilidade das misturas, em virtude da substituição do ligante novo por um ligante envelhecido. Isso corrobora o encontrado no presente estudo. Importante frisar também que nas baixas temperaturas as misturas pesquisadas apresentam valores superiores de módulo dinâmico que as da autora, todavia, nas temperaturas mais altas há uma sobreposição das misturas com as de Centofante (2016).

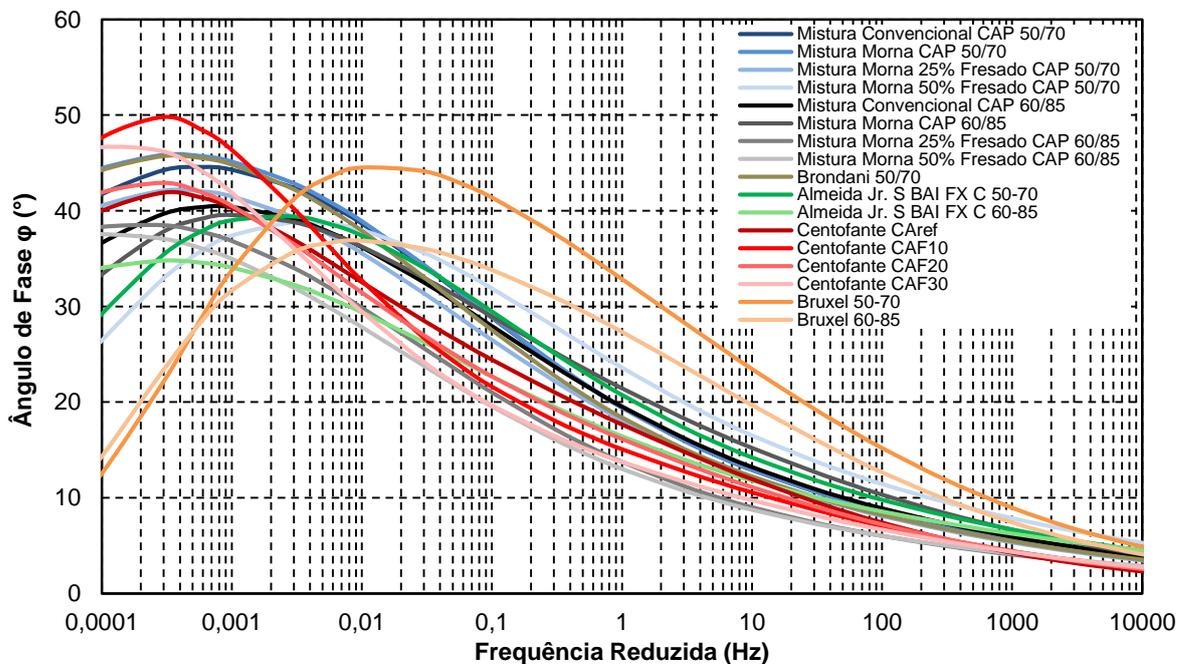
Em relação às misturas de Bruxel (2015), é visível a inferioridade das mesmas em comparação com as demais misturas apresentadas no gráfico. Mesmo com os dois ligantes de especificação semelhante aos utilizados nesta pesquisa (CAP 50/70 e 60/85) e agregados de mesma origem, as rigidezes foram bem menores, tanto nas baixas como nas altas frequências. Além disso, a perda de resistência à deformabilidade foi grande com o aumento da temperatura.

Figura 64 - Comparativo das curvas mestras de Módulo Dinâmico (@20°C) desta pesquisa com Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015)



Na Figura 65, foram plotadas as curvas mestras de Ângulo de Fase das oito misturas desta pesquisa, somadas às de Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015). A mistura de Brondani (2016) se sobrepõem as dessa pesquisa. Almeida Jr. (2016) apresentou misturas com menor ângulo de fase nas baixas frequências, se portando melhor a deformação permanente, se comparado às misturas dessa pesquisa, com exceção da Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70. As curvas obtidas por Centofante (2016) apresentam valores pequenos de ϕ nas baixas temperaturas, assim como as misturas com fresado e ligante modificado da presente pesquisa. Já nas altas temperaturas as misturas com 10 e 30% de fresado de Centofante (2016) apresentaram os maiores valores se comparado a todas as misturas. Sendo assim, pode-se inferir que essas misturas tenham menor resistência ao dano permanente por deformação plástica. Bruxel (2015) têm misturas com bom desempenho frente as baixas frequências (inferiores a 0,001Hz), os melhores dentre todas as misturas dessa comparação. Porém, em contrapartida, às altas frequências apresenta os piores resultados.

Figura 65 - Comparativo das curvas mestras de Ângulo de Fase (@20°C) desta pesquisa com Brondani (2016), Almeida Jr. (2016), Centofante (2016) e Bruxel (2015)



Mangiafico (2014) estudou sobre misturas asfálticas recicladas a quente e realizou o ensaio de E^* . O autor modelou a partir do 2S2P1D, ensaiando amostras cilíndricas (altura de 15cm e diâmetro de 7,5cm), à tração e compressão, de -25 a 40°C, num espectro de frequências de 0,001 a 10Hz, utilizando CAP 35/50 e com diferentes teores de fresado (0, 20, 40, 60 e 100% de RAP). Constatou que a curva mestra de Módulo Dinâmico teve sua rigidez aumentada à medida em que ia crescendo a taxa de material reciclado incorporado nas misturas, tanto nas altas como nas baixas frequências. Já a parcela viscosa, a partir da análise da curva mestra de Ângulo de Fase, ia aumentando à medida em que a mistura asfáltica apresentasse menos teor de fresado.

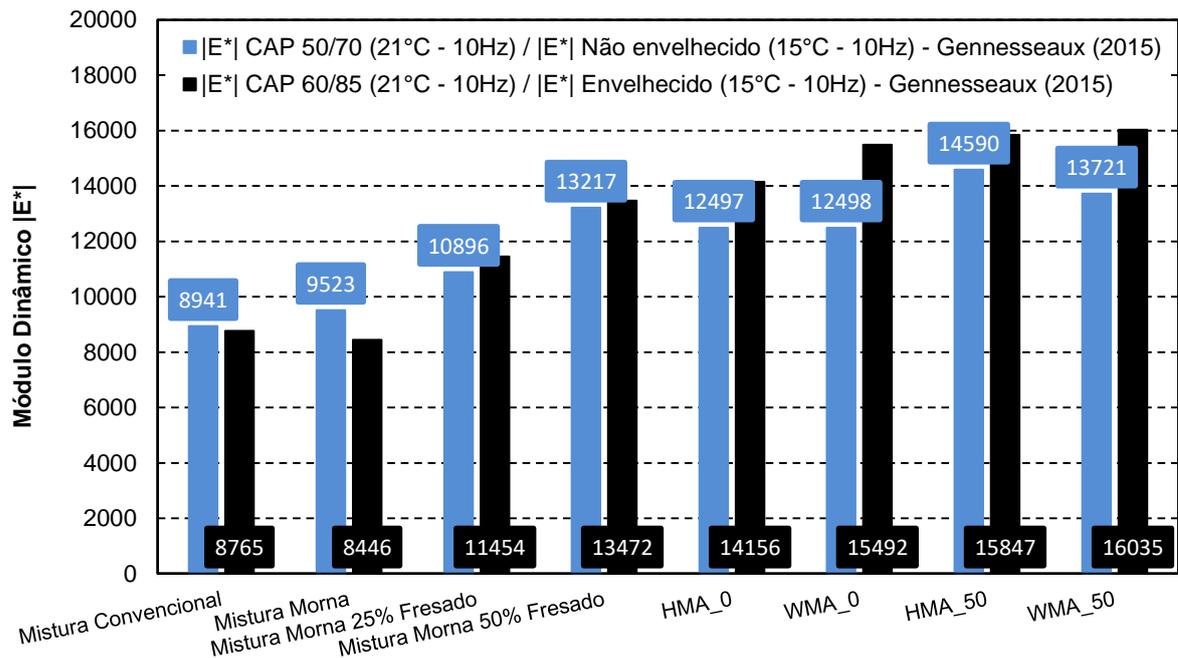
Genesseaux (2015) também realizou ensaio de Módulo Complexo, porém baseado na norma europeia EN 12697-26, *Annexe A: Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26: module de rigidité* (2012). A autora utilizou quatro amostras trapezoidais por mistura estudada, e realizou o ensaio de E^* a temperaturas de -10, 0, 10, 15, 20, 30 e 40°C e a frequências de 1, 3, 10, 25, 30 e 40 Hz. Trabalhou com CAP 35/50 e misturas quentes e mornas (aditivo surfactante CECABASE RT®), com e sem adição de 50% de RAP, além de passarem ou não por um processo de envelhecimento. As misturas não envelhecidas foram nomeadas de HMA_0, HMW_50, WMA_0 e WMA_50 e envelhecidas HMA_0a, HMA_50^a, WMA_0a e WMA_50a.

A autora concluiu, através da curva mestra de módulo dinâmico, que as misturas HMA_0 e WMA_0 têm similares evoluções de comportamento reológico, mas com menores valores de rigidez que as misturas WMA_50 e HMA_50, claramente visíveis em baixas frequências (elevadas temperaturas). Genesseaux (2015) explicou o aumento da rigidez dessas misturas devido ao ligante envelhecido no material contendo RAP, corroborando com os resultados da presente pesquisa. As misturas da autora após envelhecimento apresentaram-se ligeiramente mais rígidas que as demais, em altas temperaturas. Em frequências elevadas, todas as misturas estudadas tiveram valores de rigidez similares.

A Figura 66 apresenta os valores de $|E^*|$ das misturas de Genesseaux (2015), que a autora obteve a partir das amostras trapezoidais, a 15°C e 10Hz, comparadas com os resultados das misturas dessa pesquisa, de amostras cilíndricas, a 21°C (temperatura mais próxima da autora) e 10Hz. É possível perceber que existe

semelhança entre os resultados da Mistura Morna 50% Fresado, tanto para CAP 50/70 como para CAP 60/85, com a mistura WMA_50 (sem envelhecimento). As demais misturas manifestaram-se inferiores as da autora comparada, provavelmente devido a discrepâncias de normas e diferenças de agregados utilizados.

Figura 66 - Comparativo dos resultados de Módulo Dinâmico $|E^*|$ desta pesquisa com Genesseeux (2015)



Nota: Misturas Convencional, Morna, Morna 25% Fresado e Morna 50% Fresado - Misturas da presente pesquisa, dados a 21°C e 10Hz; HMA_0, WMA_0, HMA_50 e WMA_50 - Misturas de Genesseeux (2015), dados a 15°C e 10Hz

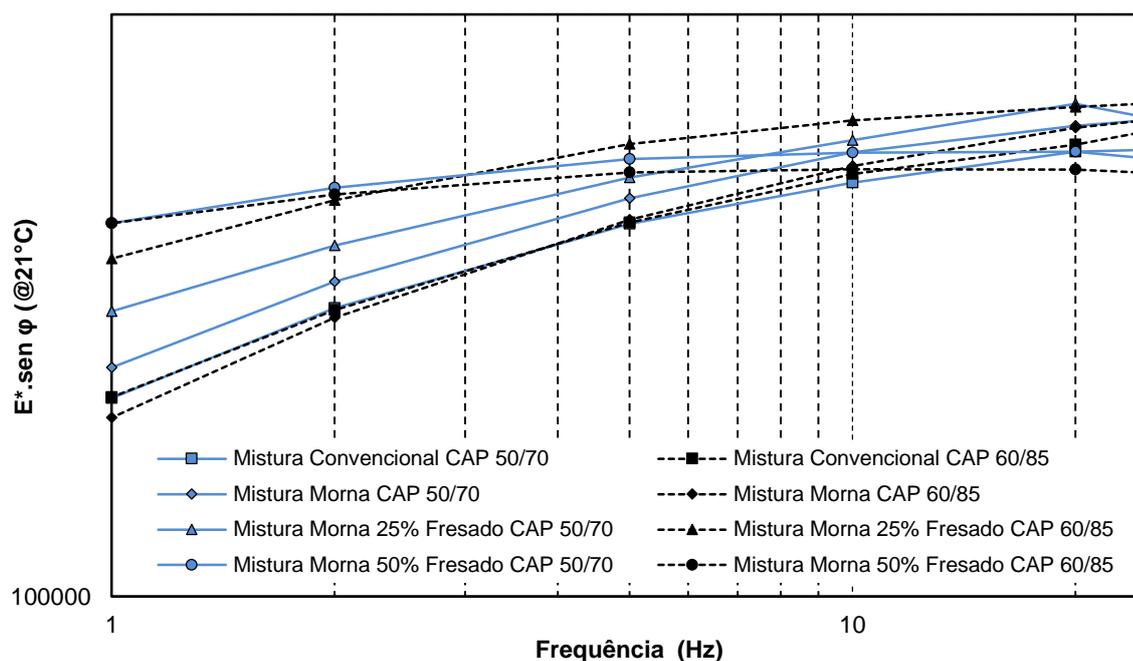
Pode-se utilizar os dados do Módulo Complexo para fazer uma inferência de resistência à fadiga e à deformação permanente, através das relações $E^* \cdot \sin\phi$ e $E^* / \sin\phi$, respectivamente. Essa inferência foge da conceituação científica, porque relaciona viscoelasticidade linear com dano, mas é apenas uma correlação dessas propriedades visando melhorar o ponto de vista prático das misturas asfálticas.

A Figura 67 mostra para a temperatura de 21°C a análise à fadiga das misturas. Essa verificação é realizada nas altas frequências, entre 1 a 25 Hz. Quanto menor o valor $E^* \cdot \sin\phi$ melhor o comportamento da mistura frente à fadiga. Na frequência de 1Hz, nota-se claramente que as misturas com ligante modificado (Convencional e Morna) apresentam valores mais baixos de $E^* \cdot \sin\phi$, indicando que misturas com CAP 60/85 são mais resistentes ao dano por fadiga, condizente com a literatura. As

misturas com inserção de fresado, tanto misturas com CAP 50/70, como CAP 60/85, apresentam os piores valores frente à resistência ao dano por fadiga, a 1Hz. Porém, vale frisar que na medida em que a frequência vai aumentando, as misturas com 50% de fresado, de ambos os ligantes, vão invertendo de comportamento. Sendo assim, a partir de 5Hz começam a decair os valores de $E^* \cdot \text{sen} \phi$ dessas misturas, e chegam a 25Hz com o melhor desempenho frente a fadiga dentre as misturas estudadas.

Essa análise reforça a importância de se realizar um estudo de dano nos materiais, além do estudo sobre rigidez em diversas temperaturas e frequências de carregamento, pois misturas com mesma rigidez podem apresentar resistência diferentes aos tipos de danos. Essa técnica é apenas uma inferência, podendo, ou não, ser considerada coerente apenas com a realização do ensaio.

Figura 67 - Inferência à fadiga à 21°C das misturas, em escala log-log



A Figura 68 demonstra a inferência, das misturas, à deformação permanente para a temperatura de 54°C. A análise para este tipo de dano é nas baixas frequências, de 0,01 a 1Hz. Quanto maior o valor de $E^*/\text{sen} \phi$ melhor o comportamento à deformação permanente. Quanto à deformação permanente, a inferência pode ser validada, pois nesta pesquisa foi realizado ensaio de *Flow Number*, que avalia as

misturas quanto a resistência ao afundamento em trilha de roda, na camada de revestimento asfáltico.

Na frequência de 0,01Hz é perceptível a melhora do desempenho das misturas com teor de fresado incorporado, sendo que o melhor resultado fica para a Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85, seguida pelas misturas com 50% de fresado, dos dois ligantes em estudos, que se sobrepõem nessa parte do gráfico. O pior desempenho é da Mistura Morna CAP 50/70. Comparando com os resultados obtidos no ensaio de *Flow Number*, pode-se notar que houveram inversões de comportamento de algumas misturas, provavelmente devido à dificuldade de leitura do ângulo de fase, em especial, na frequência mais baixa, de 0,01Hz, para a temperatura de ensaio de 54°C.

Porém, esse comportamento é mostrado de maneira coerente quando analisada a inferência a partir da frequência de 0,1Hz. A sequência das misturas se apresenta da seguinte maneira, do melhor desempenho para o pior: Morna 50% 60/85, Morna 25% 60/85, Morna 50% 50/70, Morna 60/85, Morna 25% 50/70, Convencional 60/85, Convencional 50/70 e Morna 50/70. Esses resultados são iguais aos obtidos pelo ensaio de *Flow Number*, com exceção das Misturas Morna 25% 50/70 e Convencional 60/85, que tem posição invertida pelos valores encontrados no ensaio de dano permanente. Todavia, nota-se na Figura 68 que é pequena a diferença entre as misturas, da mesma forma como obtido pelo ensaio de FN, onde a diferença é de 17 ciclos apenas.

No entanto, devido à dificuldade de leitura do ângulo de fase na temperatura de 54°C, e também pela dispersão dos dados obtidos nessa temperatura, já observado no Diagrama de Black e no espaço Cole Cole, foi feita a inferência à deformação permanente também na temperatura de 37°C, apresentada na Figura 69. Através desta, é possível confirmar o que já havia sido evidenciado a 54°C, de que as misturas se comportam de maneira semelhante ao mostrado pelo ensaio de FN, alterando um pouco sua posição, mas mantendo a hegemonia das misturas com adição de fresado e mostrando que o ligante modificado apresenta melhor comportamento frente à deformação permanente se comparado ao convencional.

Figura 68 - Inferência à deformação permanente à 54°C das misturas, em escala log-log

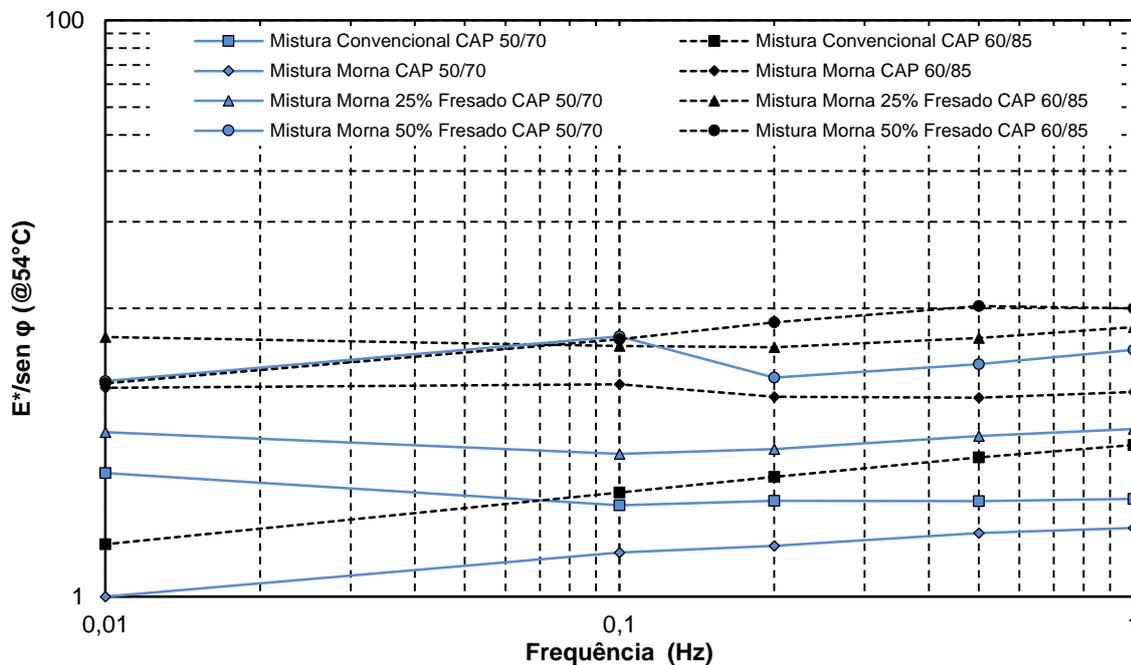
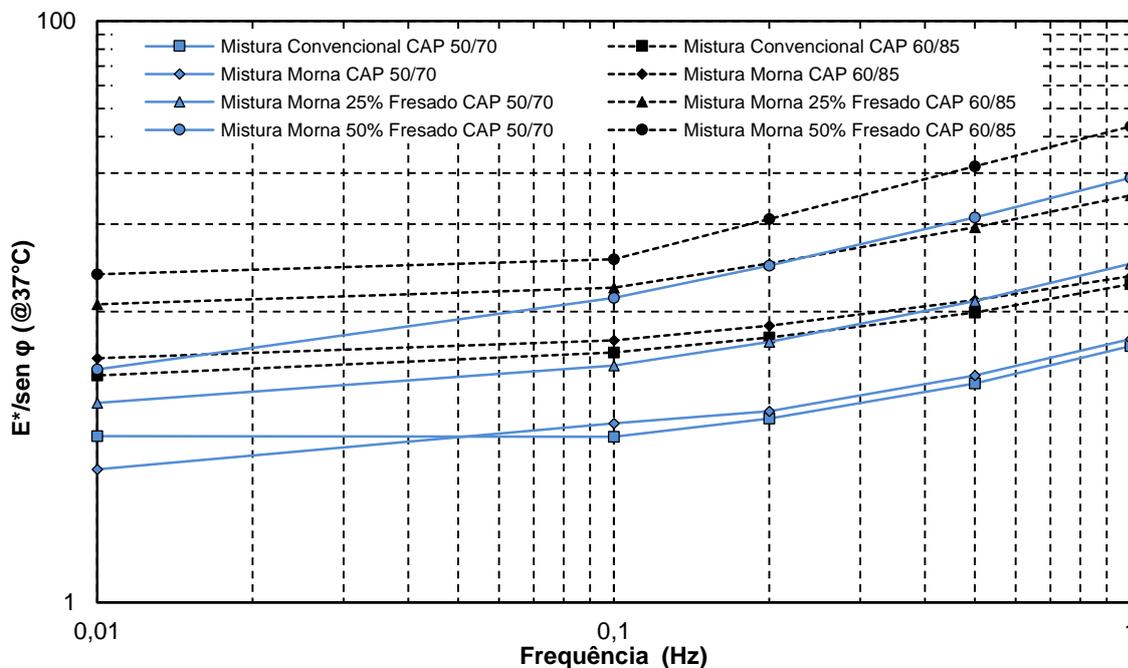


Figura 69 - Inferência à deformação permanente à 37°C das misturas, em escala log-log



Pode-se afirmar então, que a relação $E^*/\text{sen } \phi$, feita a 54°C, permite fazer uma boa inferência e serve como um indicativo de resistência ao dano, visto que apresenta

uma similaridade quando comparada aos dados provenientes do ensaio de FN. Essa boa correlação a 54°C também é ressaltada por Brondani (2016). Já Almeida Jr. (2016) encontra uma melhor correlação na temperatura de 37°C.

A fim de mostrar que essa correlação é coerente com os dados obtidos no ensaio de resistência a deformação permanente, foram montados gráficos para comparar *Flow Number* e a relação $E^*/\sin\phi$, para a temperatura de 54°C. A análise foi feita em três frequências diferentes (0,01Hz, 0,1Hz e 1Hz), e verificou-se que a correlação melhora à medida que aumenta a frequência do ensaio de Módulo Complexo, pois obtém melhor valor de R^2 . Isso pode ser observado nas Figuras 70, 71 e 72. Para ambos os ligantes pesquisados e para as três frequências analisadas, com o aumento da relação $E^*/\sin\phi$ também houve um aumento do valor de *Flow Number* das misturas. Comprova-se então, que a inferência à deformação permanente nessa temperatura é positiva, pois mostra que, assim como no ensaio de *Flow Number*, a resistência é superior para misturas com ligante modificado em relação às misturas com ligante convencional, da mesma forma como é maior para as misturas com adição de fresado. Vale salientar, que segue, praticamente, o mesmo *ranking* das misturas, se comparada a ordem provenientes do ensaio de FN.

Figura 70 - Correlação *Flow Number* com a relação $E^*/\sin\phi$, na frequência de 0,01Hz

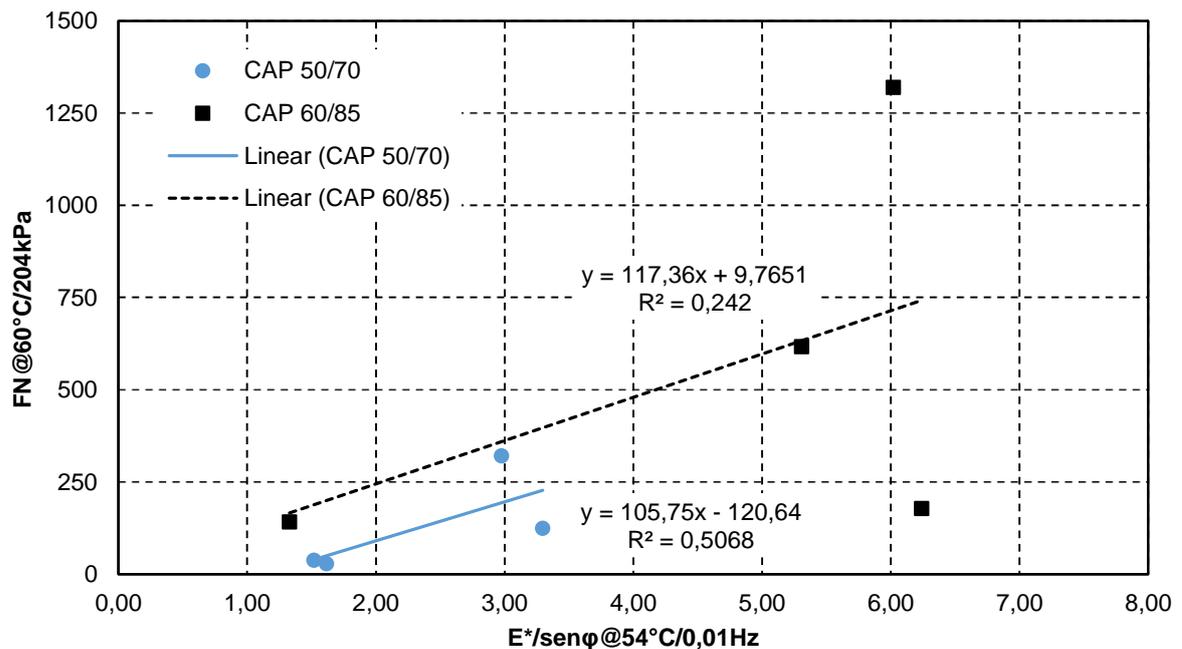
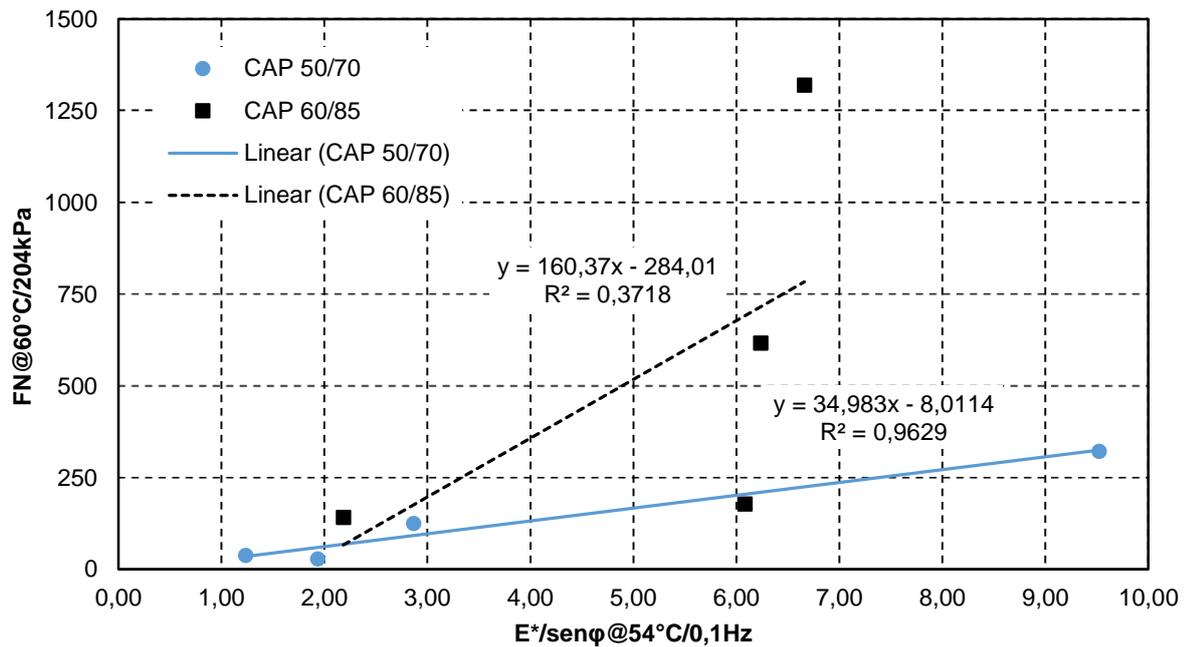
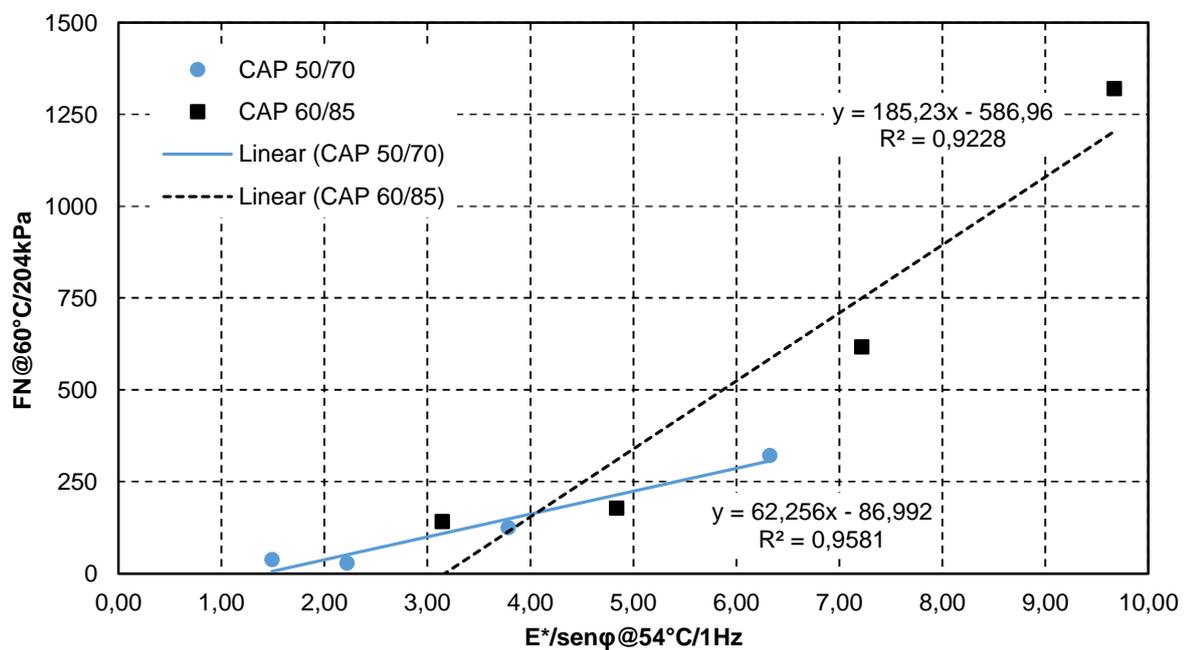


Figura 71 - Correlação *Flow Number* com a relação $E^*/\text{sen } \varphi$, na frequência de 0,1HzFigura 72 - Correlação *Flow Number* com a relação $E^*/\text{sen } \varphi$, na frequência de 1Hz

4.3. PROPRIEDADES DE ADESÃO E COESÃO

No presente item são demonstrados os resultados dos ensaios de *Lottman* Modificado e de Resistência ao Desgaste Cântabro, ensaios que avaliam as propriedades de adesão e coesão das misturas asfálticas desta pesquisa. Para tanto,

moldaram-se amostras nos respectivos teores de projeto, determinados no procedimento de dosagem de cada uma das 8 misturas, com o Vv e dimensões requeridas para cada ensaio, já descritos na metodologia.

4.3.1. *Lottman* Modificado

O ensaio *Lottman* Modificado avaliou a propriedade de adesividade, nas misturas asfálticas desta pesquisa, considerando o efeito deletério da água. As amostras foram separadas em dois grupos, Grupo 1 e Grupo 2, com três corpos-de-prova cada, com e sem condicionamento, respectivamente. Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das amostras, das amostras com e sem condicionamento, são apresentados na Tabela 33, assim como seus desvios-padrões e coeficientes de variação, além da Resistência Retida à Tração (RRT).

Os resultados da média do RT de cada mistura com CAP 50/70 e CAP 60/85, são ilustrados graficamente nas Figuras 73 e 74, respectivamente, como forma de melhor compressão do aumento de valor à medida em que existe o acréscimo de fresado em suas composições. Mostrando novamente o benefício gerado nas misturas com a inserção do RAP, ratificando o já concluído pelos ensaios anteriores. Importante frisar também, que esse ganho de resistência pode estar ligado à presença de ligante modificado por polímero na composição do fresado, e por esse aspecto, resistir de maneira mais efetiva à ação deletéria da água.

Tabela 33 - Valores de Resistência Retida à Tração para o ensaio de *Lottman* Modificado

Mistura	Grupo 1 Com Cond. (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Grupo 2 Sem Cond. (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	RRT (%)
Convencional CAP 50/70	1,00	0,09	8,70	1,18	0,11	9,65	85
Morna CAP 50/70	0,89	0,01	1,45	1,15	0,10	8,40	77
Morna 25% Fresado CAP 50/70	1,61	0,06	3,92	1,77	0,03	1,90	91
Morna 50% Fresado CAP 50/70	2,01	0,05	2,74	2,15	0,12	5,46	94
Convencional CAP 60/85	1,23	0,04	3,09	1,39	0,04	2,72	88
Morna CAP 60/85	1,27	0,04	2,91	1,47	0,08	5,58	86
Morna 25% Fresado CAP 60/85	1,80	0,04	2,04	1,47	0,08	5,58	90
Morna 50% Fresado CAP 60/85	1,80	0,03	1,75	2,00	0,09	4,38	89

Figura 73 - Resultados do ensaio *Lottman* Modificado, realizado a 25°C, das misturas com CAP 50/70

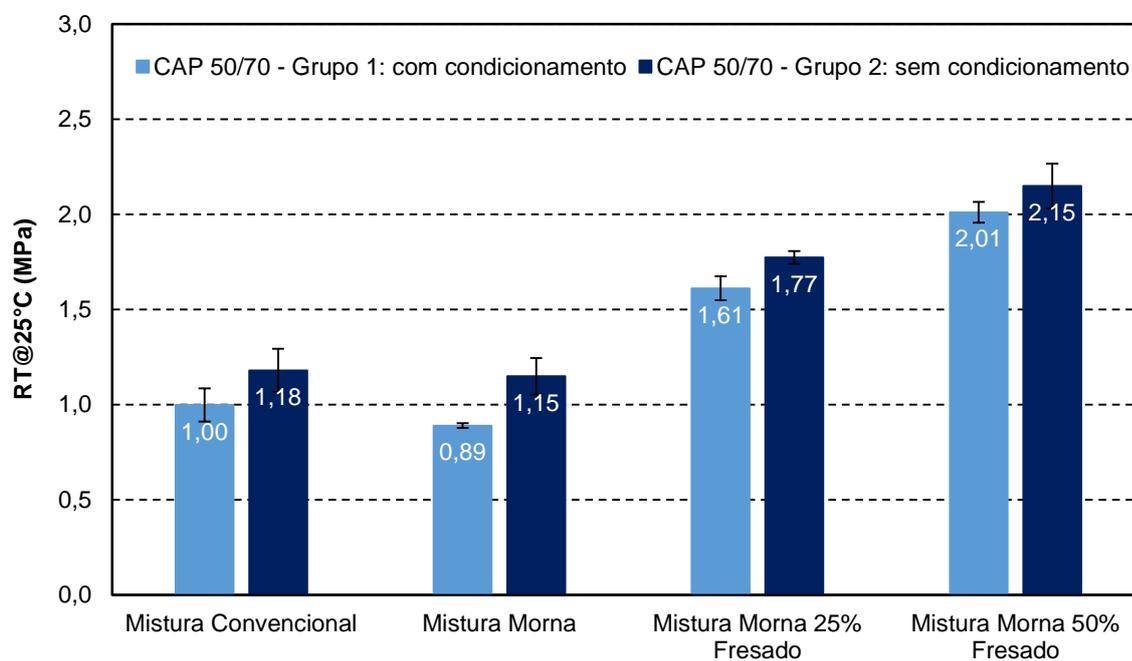
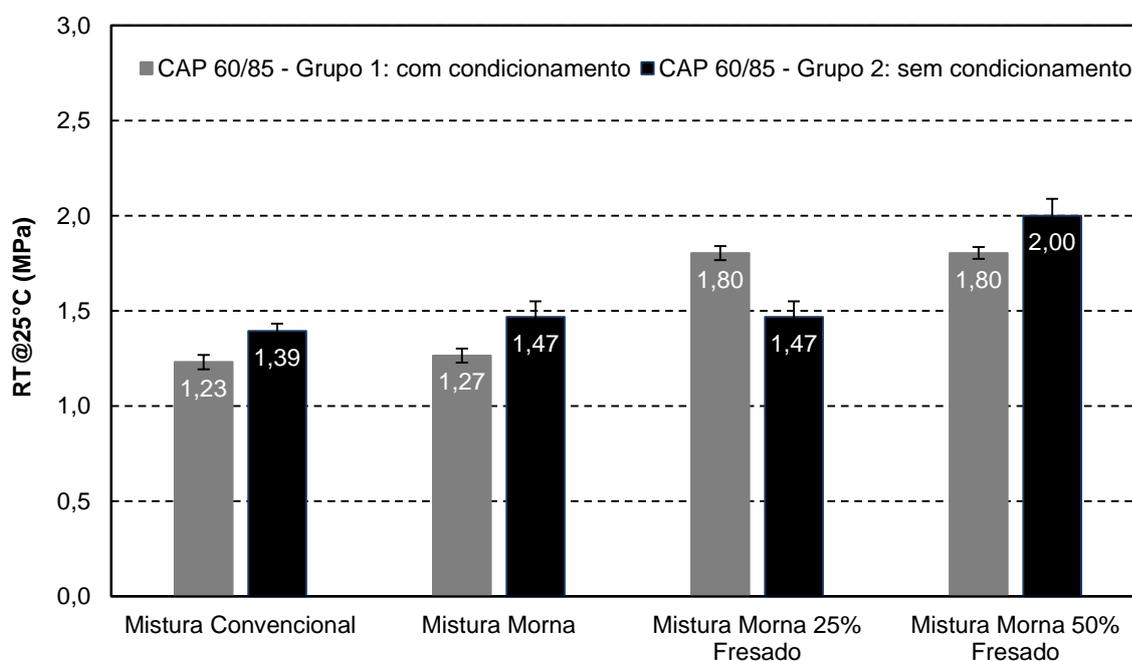


Figura 74 - Resultados do ensaio *Lottman* Modificado, realizado a 25°C, das misturas com CAP 60/85



Porém, a análise do ensaio *Lottman* Modificado se dá pelo RRT, e para tanto, apresenta-se os resultados em função do teor de fresado obtido para as misturas convencionais e mornas com ligantes CAP 50/70 e 60/85, na Figura 75. Avaliando os valores encontrados, é possível afirmar que existe uma grande semelhança entre as misturas convencionais e mornas trabalhadas, todavia com uma pequena superioridade para as misturas convencionais, que apresentam maiores valores de RRT, de grau 8 e 2%, para misturas com ligante convencional e modificado, respectivamente.

Quanto ao teor de fresado incorporado nas misturas, há um aumento da resistência retida à tração na medida em que é aumentado esse teor, porém não na mesma proporção que apresentada nos ensaios de RT e FN. Nas misturas com CAP 50/70, existe uma melhora de 4% para a mistura com adição de 25% de fresado e de 7% para as com 50% de fresado, se comparadas a mistura morna sem material reciclado. Já para as misturas com CAP 60/85, realizando a mesma comparação, existe uma melhora de 4% para as mornas com 25% de RAP e de 3% para as com 50% de inserção de fresado, podendo perceber que há uma pequena queda quando aumentada a fração de fresado na mistura.

Ao verificar os resultados quanto aos diferentes tipos de ligantes utilizados, nota-se um comportamento diferente quanto ao CAP 50/70, o qual apresenta valor de RRT, para as Misturas Morna 25 e 50% Fresado, superior as 4 misturas com ligante modificado com polímero. Se analisados os valores obtidos para as misturas Convencional e Morna CAP 50/70 é visível a superioridade das misturas CAP 60/85, porém, isso inverte quando é adicionado RAP às misturas. Talvez essa melhora se deva ao fato do fresado ter ligante modificado por polímero envelhecido, e a composição com ligante convencional gerar misturas com melhor desempenho quanto à adesividade.

De acordo com a metodologia Superpave, os valores de referência preconizados para RRT são aqueles acima de 80%. Hicks (1991) afirma que a maioria dos departamentos estaduais de transportes norte-americanos utilizam o limite de 70%. Esses limites são apresentados na Figura 76, assim como, os valores de RRT encontrados na presente pesquisa. Através dos resultados apresentados, é possível verificar que todas as misturas atendem o limite estabelecido por Hicks (1991), porém,

os 80% idealizados pela metodologia Superpave, apenas não é atendido pela Mistura Morna CAP 50/70, a qual fica 3% abaixo do estabelecido.

Figura 75 - Resultados da Resistência Retida à Tração do ensaio *Lottman* Modificado, realizado a 25°C, em função do teor de fresado

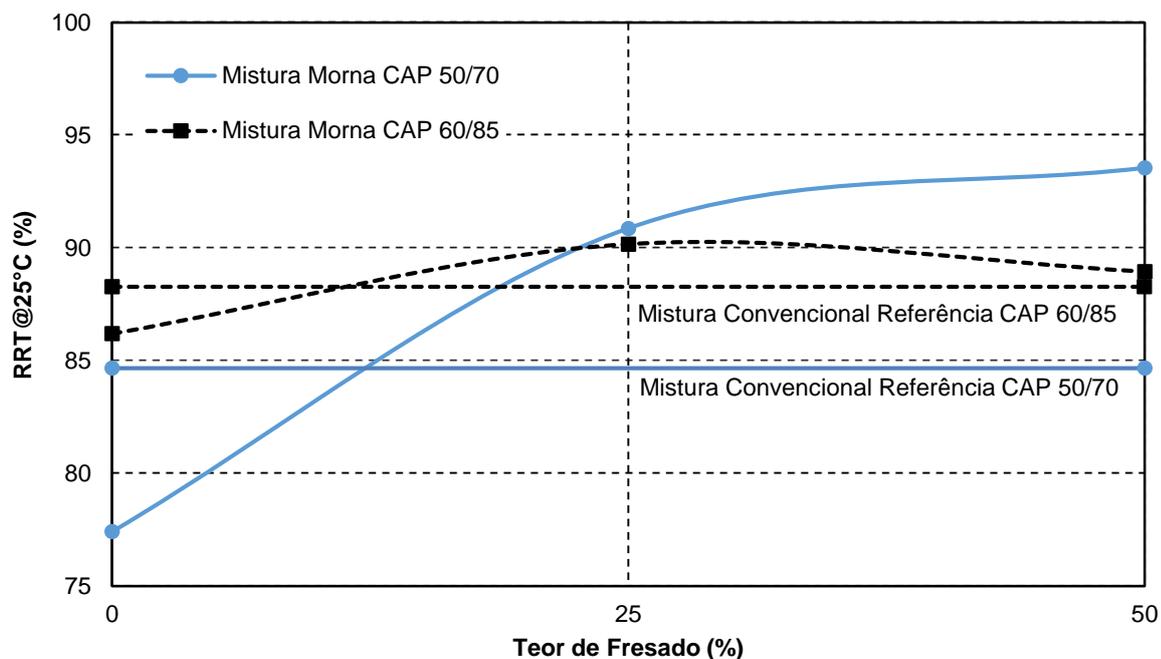
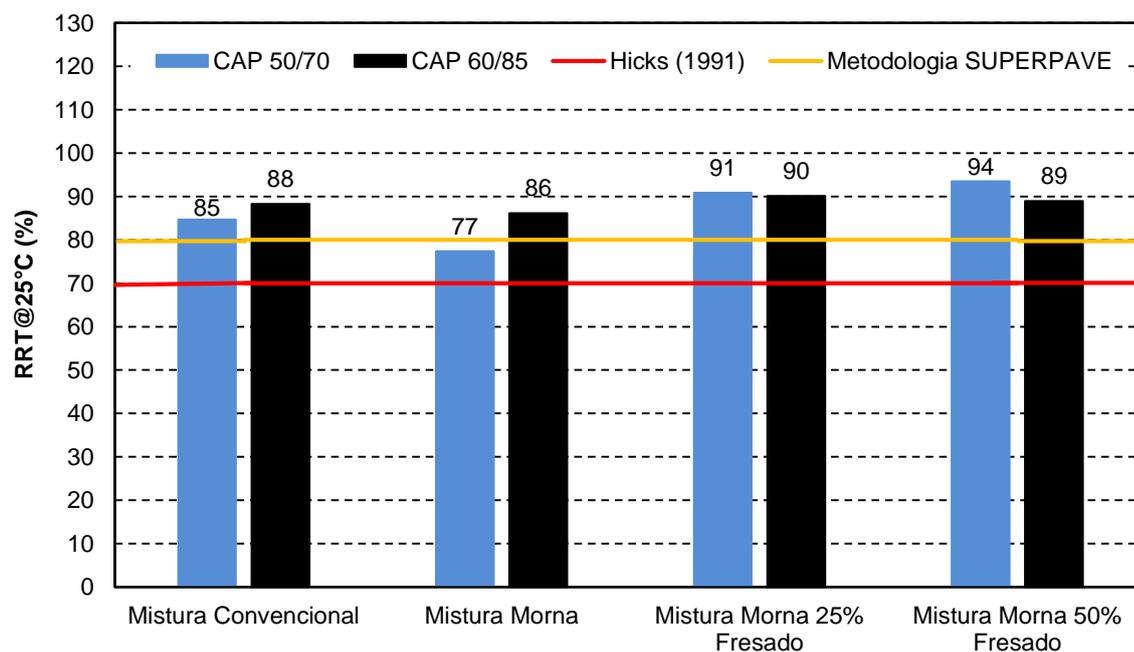


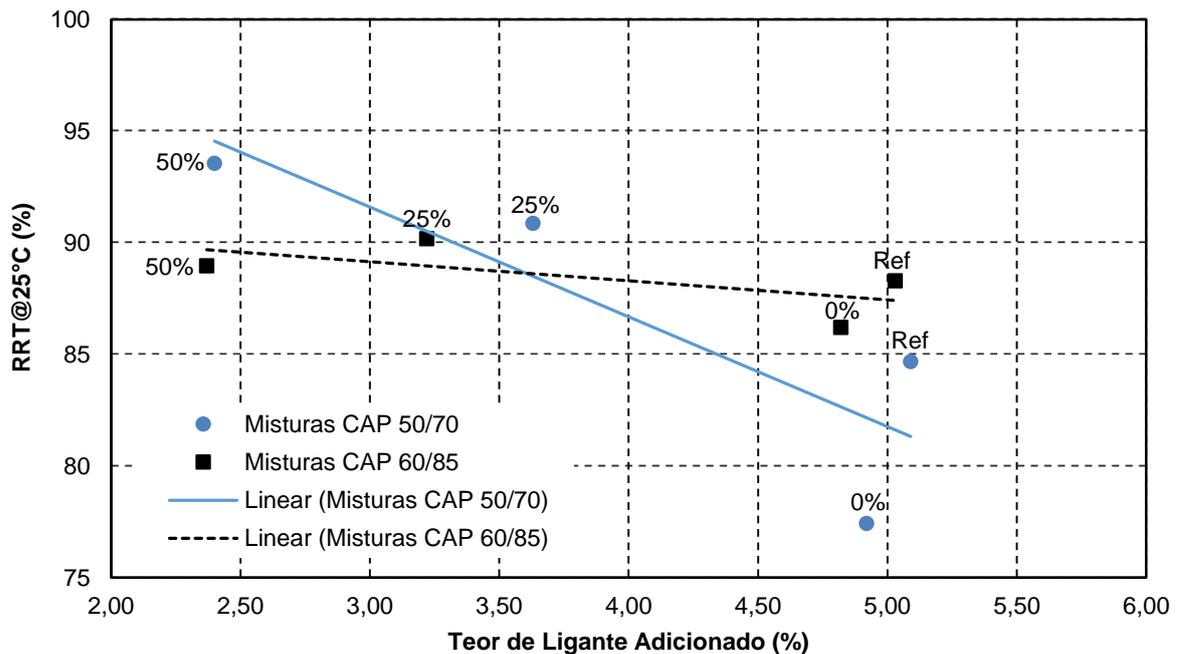
Figura 76 - Resistência Retida à Tração das misturas estudadas com os limites propostos por Hicks (1991) e pela Metodologia Superpave



É possível verificar sobre o teor de ligante adicionado, conforme Figura 77, que de maneira geral, pela linha de tendência, à medida em que se diminui o teor de ligante, aumenta o valor de RRT. Porém isso não ocorre nas misturas convencionais e mornas, sem fresado, de nenhum ligante estudado, por que ambos apresentam maior RRT para misturas com maior teor de ligante. Todavia, o teor de ligante apresentado por essas misturas é muito semelhante, é fica dentro da tolerância estipulada pela norma DNIT - ES 031/2006 ($\pm 0,3\%$), e dessa forma, poderia ser considerado como iguais os teores. A Mistura Morna 50% Fresado CAP 60/85 também não se encaixa nessa tendência, ou seja, a inserção de ligante envelhecido não é favorável à resistência retida à tração nessa mistura, da mesma forma que mostra ser nas outras.

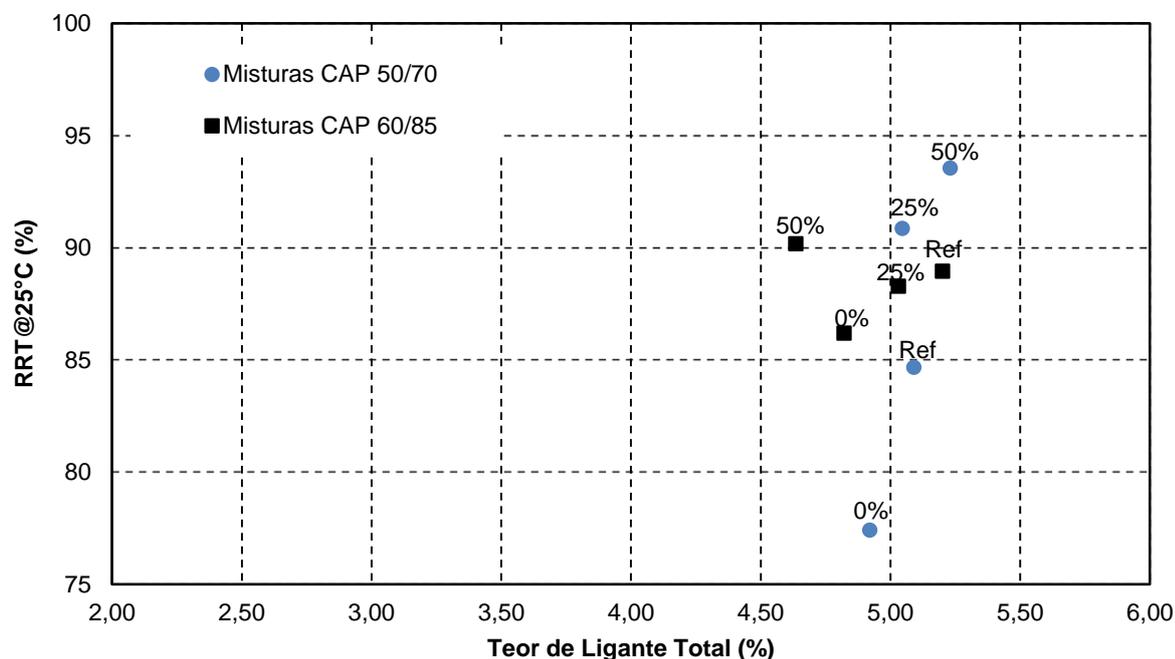
Analisando a Figura 78, percebe-se que há uma relação entre teor total de ligante e a RRT. As misturas apresentam maior valor de resistência ao desgaste por ação da água quanto maior for o teor de ligante total das misturas, apenas com exceção da Mistura Morna 25% CAP 60/85, que manifesta comportamento contrário. Poderia ser citada também a Mistura Morna 25% CAP 50/70, porém sua diferença de teor para a Mistura Convencional é de apenas 0,04%, sendo considerada irrelevante.

Figura 77 - Resultados da Resistência Retida à Tração do ensaio *Lottman* Modificado, realizado a 25°C, em função do teor de ligante adicionado



Nota: Ref - Mistura Convencional; 0% - Mistura Morna, sem fresado; 25% - Mistura Morna 25% Fresado; 50% - Mistura Morna 50% Fresado

Figura 78 - Resultados da Resistência Retida à Tração do ensaio *Lottman* Modificado, realizado a 25°C, em função do teor de ligante total



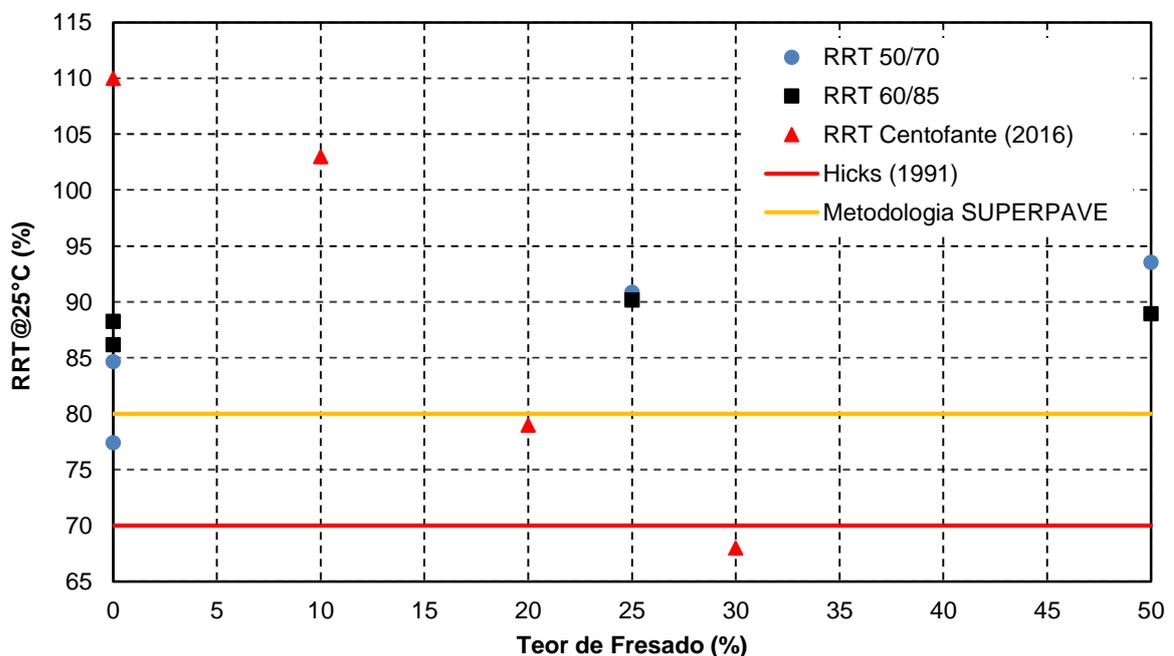
Nota: Ref - Mistura Convencional; 0% - Mistura Morna, sem fresado; 25% - Mistura Morna 25% Fresado; 50% - Mistura Morna 50% Fresado

Centofante (2016) realizou sua pesquisa com misturas recicladas a quente, e encontrou resultados divergentes com o presente trabalho, apresentados na Figura 79. Para Centofante (2016) ao passo em que foi aumentada a quantidade de fresado nas misturas, a autora obteve valores de RRT em escala decrescente. Na presente pesquisa ocorreu o inverso, a RRT aumenta à medida em que o teor de fresado das misturas se eleva, e isso ocorre para ambos os ligantes em estudo.

Pode-se alegar que um dos motivos por esse aumento poderia ser a proveniência do RAP utilizado nas misturas, e, por consequência, seu ligante de composição antigo, já que o material reciclado desse estudo é original da Freeway, rodovia BR-290, km 72+700m, entre Porto Alegre e Santo Antônio da Patrulha, e é composto por ligante modificado, CAP 60/85, conforme projeto antigo executado na rodovia no km onde coletou-se o material. Em contrapartida, o fresado utilizado por Centofante (2016) advém da rodovia BR 392, km 388, entre Santa Maria e São Sepé, onde utiliza-se somente ligante convencional CAP 50/70 nos projetos rodoviários executados.

Essa diferença de ligante antigo das misturas pode ter sido o fator principal do aumento da RRT nas misturas da presente pesquisa, quando em comparação com Centofante (2016), mostrando ter melhores propriedades de adesão e coesão. Porém, podem haver outros fatores, como origem mineralógica distinta dos agregados utilizados nas pesquisas.

Figura 79 - Comparativo dos resultados da Resistência Retida à Tração das misturas estudadas com as de Centofante (2016), com os limites de Hicks (1991) e pela Metodologia Superpave



Outros autores como Specht (2004), que estudou sobre asfalto borracha e utilizou CAP 20, encontrou valores de RRT da ordem de 56 a 90% para suas misturas, um pouco abaixo do intervalo de 77 a 94% obtido na presente pesquisa. Já Bock *et al.* (2009) encontraram, para mistura de referência, um valor de RRT de 85%, sendo este valor aumentado com a adição de cal e outros materiais.

No Ceará, Wargha Filho (2013) estudou sobre misturas mornas com 0,4% de Gemul® adicionado a CAP 50/70, aditivo surfactante como o utilizado nessa pesquisa, com temperaturas de mistura e compactação de 135 e 125°C, respectivamente. O autor obteve RRT de 74% para as misturas com aditivo Gemul®, comparado com 81% para a mistura controle, na qual não ocorreu nenhum tipo de modificação.

Boeira (2014), que trabalhou com o mesmo agregado e tipo de ligante da presente pesquisa, encontrou valor de resistência retida à tração de 98,12% para sua mistura referência, superior ao encontrado nessa pesquisa (85% para a Mistura Convencional CAP 50/70).

Com esses dados, é possível afirmar que todas as misturas dessa pesquisa apresentam valores condizentes à literatura. Sendo que a inserção do material fresado aumentou a propriedade de adesividade das misturas asfálticas perante o dano por umidade induzida, salientando a relevância do seu uso em maior escala nos pavimentos novos, da mesma forma como o emprego de misturas asfálticas mornas agredir menos o meio ambiente, e ser compatível com as misturas convencionais, que se dá a importância de combinar esses dois materiais e implementar no ramo rodoviário brasileiro.

4.3.2. Resistência ao Desgaste Cântabro

Para realização do ensaio de resistência ao desgaste por perda de massa Cântabro, todas as amostras (3 corpos-de-prova por mistura) foram previamente condicionadas à temperatura de 25°C, por no mínimo 12 horas. A Tabela 34 traz os resultados obtidos pelo ensaio e, através dos dados apresentados, pode ser observado que não existe uma regra de aumento de desgaste à medida que aumenta o teor de fresado, como era esperado. Todas as misturas se comportam de maneira particular, não sendo possível prever um comportamento capaz de descrever o conjunto de misturas estudadas. Os corpos-de-prova ensaiados são mostrados na Figura 80.

Conforme a norma DNER - ME 383/99, os resultados não podem diferir mais de 20% (para mais ou para menos) de uma amostra para a sua média, para que o ensaio seja válido. Todas as amostras pesquisadas atenderam a esse limite, sendo a maior diferença apresentada de 3,50% para uma das amostras da Mistura Morna 50% Fresado com CAP 50/70. As demais tiveram diferenças inferiores (para mais ou para menos de 3,50%).

Tabela 34 - Valores do ensaio de Resistência ao Desgaste por perda de massa Cântabro

Mistura	Desgaste Cântabro (%)	Média Desgaste Cântabro (%)	DP (%)	CV (%)
Convencional CAP 50/70	10,56	9,03	1,17	12,91
	8,82			
	7,72			
Morna CAP 50/70	5,86	6,97	1,27	18,20
	8,75			
	6,32			
Morna 25% Fresado CAP 50/70	7,12	6,89	1,00	14,51
	7,98			
	5,56			
Morna 50% Fresado CAP 50/70	8,29	10,58	2,52	23,77
	14,09			
	9,37			
Convencional CAP 60/85	5,76	5,46	0,78	14,33
	4,39			
	6,23			
Morna CAP 60/85	5,06	4,84	0,63	12,99
	3,98			
	5,47			
Morna 25% Fresado CAP 60/85	12,32	9,35	2,16	23,06
	8,45			
	7,27			
Morna 50% Fresado CAP 60/85	7,48	8,16	0,55	6,79
	8,15			
	8,84			

Figura 80 - Corpos-de-prova submetidos ao ensaio de desgaste por perda de massa Cântabro



Com base nos valores obtidos para o ensaio Desgaste Cântabro, a partir da Figura 81, pode-se dizer que os valores obtidos para as misturas convencionais e mornas diferem um pouco entre si. É possível notar que as misturas convencionais a quente perdem maior proporção de massa se comparadas as misturas mornas que apresentam mesma composição granulométrica. Isso ocorre, percentualmente, 2,06 e 0,62%, respectivamente, para as misturas com ligante CAP 50/70 e CAP 60/85. Ou seja, existe esse grau de perda de massa por desgaste Cântabro a mais para as misturas convencionais, ratificando a eficiência das misturas mornas.

Quanto ao teor de fresado, analisando as misturas com CAP 50/70 é possível notar que a Mistura Morna 25% Fresado tem uma perda minimamente inferior a Morna. Já a Morna 50% Fresado tem a maior perda apresentada pelas misturas em estudo, mostrando ser a menos resistente ao atrito pneu/pavimento, na ordem de 10,58%, superior em 3,61% se comparada a mistura sem fresado. Nas misturas com ligante modificado por polímero há um comportamento distinto. A Mistura Morna 25% Fresado apresenta uma maior porcentagem de desgaste se comparada a Mistura Morna referência, na ordem de 4,81%, e essa proporção decai à medida que se aumenta o teor de fresado, pois a mistura com 50% de fresado tem menor desgaste se comparada a com 25% de RAP (-1,19%), porém é superior a Morna sem material reciclado (3,32%).

Verificando o comportamento das misturas ao Desgaste Cântabro através dos tipos de ligantes utilizados, é notada a melhora dos resultados nas misturas com CAP 60/85 se comparadas as com CAP 50/70. A melhor mistura, aquela que apresenta menor desgaste à abrasão, é a Mistura Morna CAP 60/85, com 4,84%.

Com base na DNER - ES 386/99, misturas de pré-misturado a quente, com asfalto polímero, utilizadas como camada porosa de atrito, devem apresentar valor máximo de perda de massa aceitável de 25%. Sendo assim, conforme a Figura 82, pode-se afirmar que todas as misturas atendem a esse limite, e apresentam coesão apropriada para serem utilizadas como misturas asfálticas.

Analisando a Figura 83, é possível verificar que o teor de ligante adicionado, por sua linha de tendência, apresenta um comportamento já esperado, onde à medida em que se diminui o teor de ligante, aumenta o valor de Desgaste Cântabro, mostrando a influência da inserção de fresado na perda de coesão das misturas. Na Figura 84 é apresentado o valor do ensaio pelo teor de ligante total e pode-se averiguar, de uma maneira geral, que na medida em que há um aumento do teor de ligante total, também há um aumento do desgaste das misturas, apenas com exceção da Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85 que apresenta o menor teor de ligante, mas apresenta uma alta proporção de desgaste Cântabro.

Figura 81 - Resultados do ensaio de Resistência ao Desgaste por perda de massa Cântabro, realizado a 25°C, em função do teor de fresado

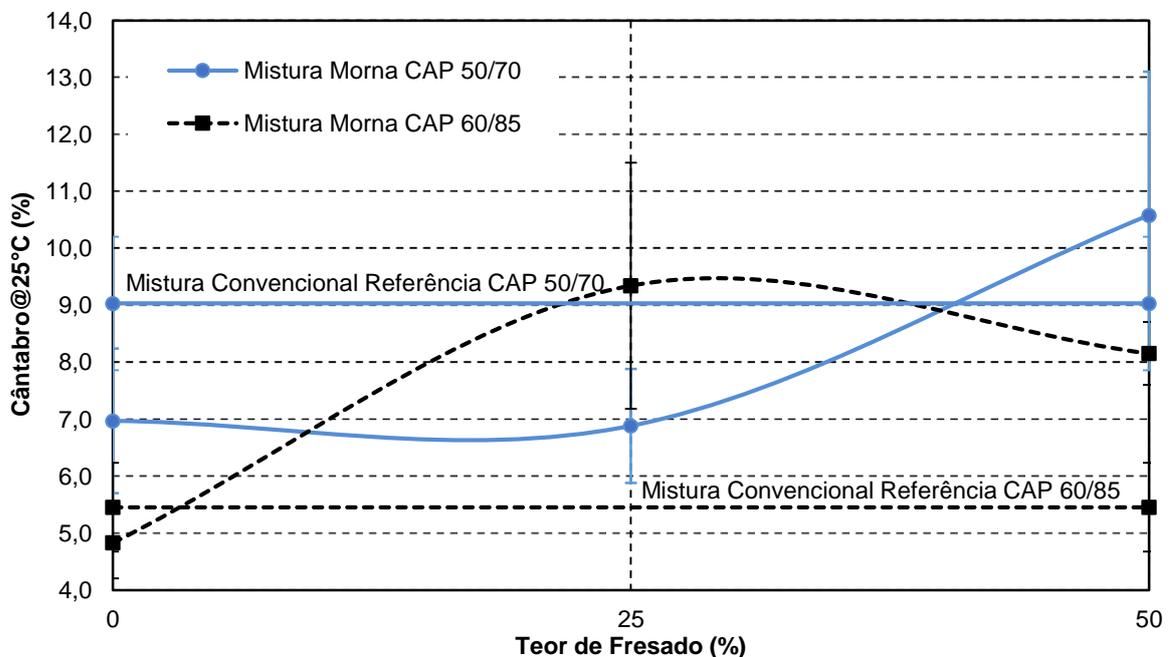


Figura 82 - Resistência ao Desgaste Cântabro das misturas estudadas com o limite da norma DNER - ES 386/99

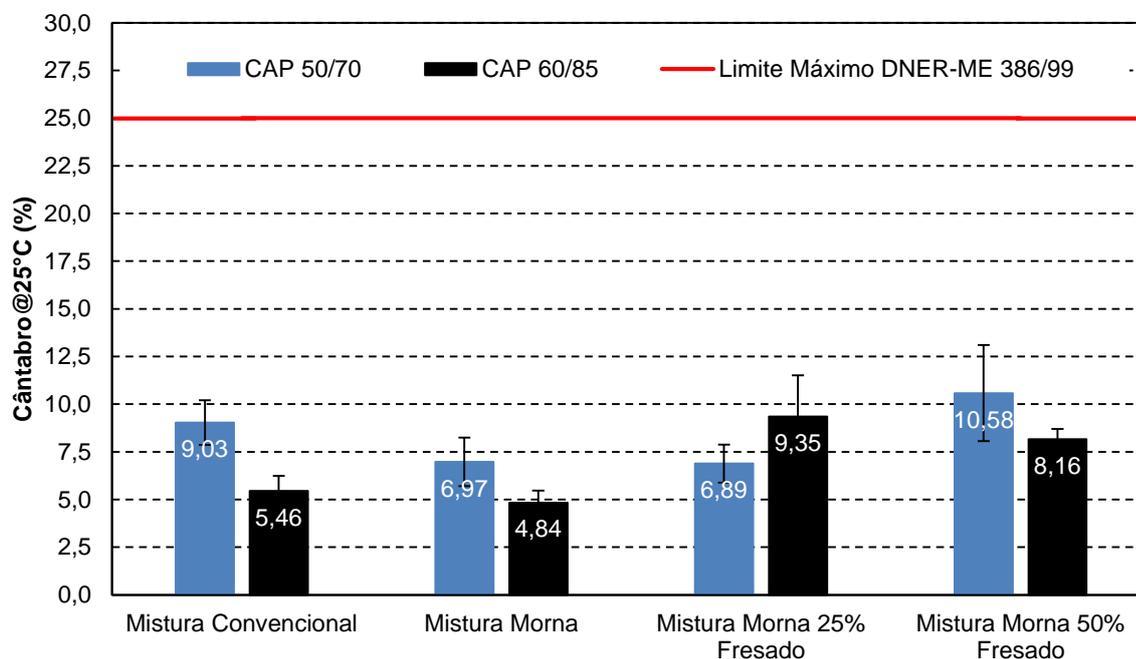
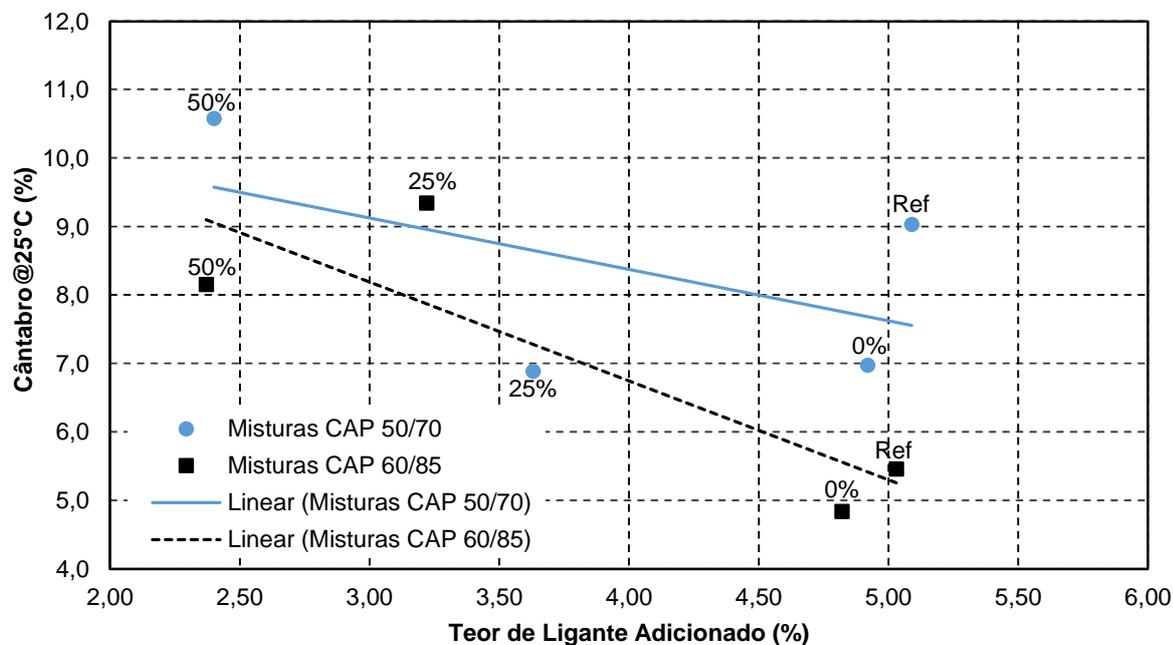
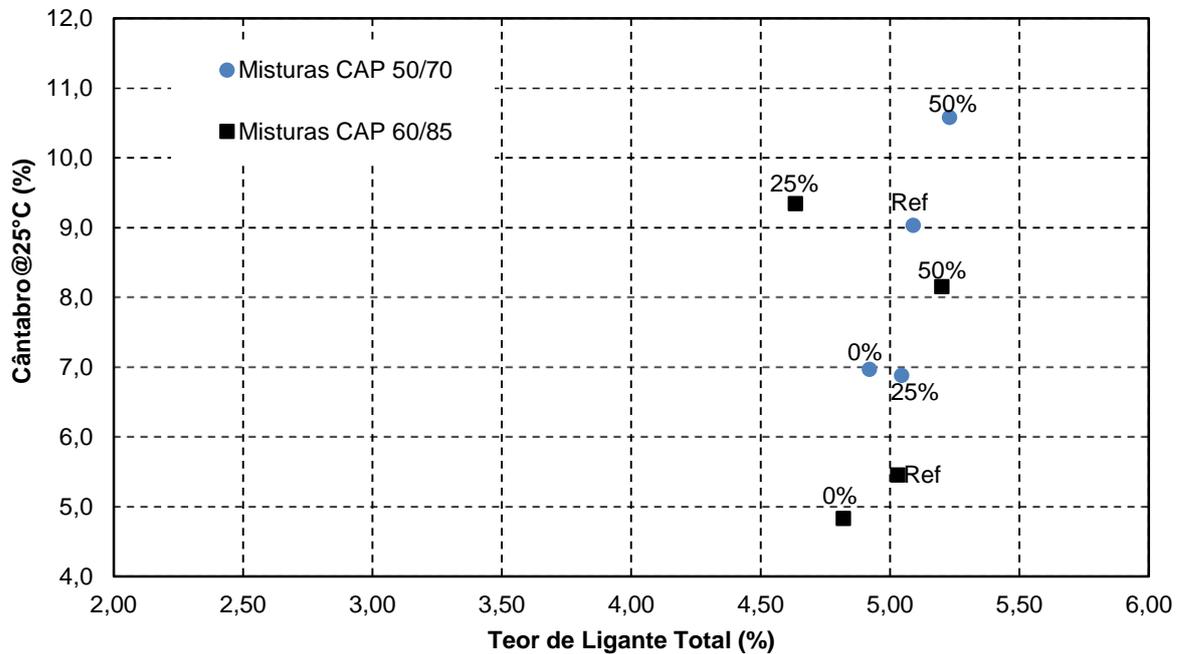


Figura 83 - Resultados do ensaio de Resistência ao Desgaste por perda de massa Cântabro, realizado a 25°C, em função do teor de ligante adicionado



Nota: Ref - Mistura Convencional; 0% - Mistura Morna, sem fresado; 25% - Mistura Morna 25% Fresado; 50% - Mistura Morna 50% Fresado

Figura 84 - Resultados do ensaio de Resistência ao Desgaste por perda de massa Cântabro, realizado a 25°C, em função do teor de ligante total



Nota: Ref - Mistura Convencional; 0% - Mistura Morna, sem fresado; 25% - Mistura Morna 25% Fresado; 50% - Mistura Morna 50% Fresado

Buscando na literatura, Specht (2004) encontrou em média, para sua mistura de referência com CAP 20, 5,91% de perda de massa. Além disso, Bock *et al.* (2009) encontraram valor de perda de massa de 5,71%, para a mistura de referência, sendo que, com a adição de outros materiais (cal e agregados) a perda de massa aumentou, com relação à mistura de referência, de acordo com o tipo de material adicionado.

Boeira (2014) encontrou valor de desgaste por perda de massa Cântabro de 5,90%, para CAP 50/70, a 25°C, em sua mistura referência com o mesmo agregado da presente mistura. Esse valor foi bem menor que o obtido na presente pesquisa, onde foi encontrada desgaste por abrasão de 9,03% para a Mistura Convencional CAP 50/70. Boeira (2014) também executou o ensaio para 5°C, representando a temperatura do pavimento no inverno, e a 45°C, simulando a temperatura sofrida no verão, e encontrou valores de 13,53 e 0,43%, respectivamente. Para a temperatura mais elevada, a amostra teve uma menor perda de massa devido ao fato das misturas se tornarem mais elásticas, sofrendo apenas deformações, e não ocorrendo uma desagregação no mesmo nível do que em amostras submetidas ao ensaio a temperaturas mais baixas.

Centofante (2016) observou que, conforme aumentava o teor de fresado nas misturas, os valores de perda de massa, em média, também cresciam, significando que o fresado aumenta a tendência ao desgaste. Também notou em suas misturas 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, ratificando o encontrado nessa pesquisa, de uma maneira geral, quando analisada a linha de tendência, apresentada na Figura 83.

4.4. RESUMO DOS RESULTADOS

Devido à quantidade de dados encontrados para as misturas asfálticas pesquisadas, julgou-se necessária a confecção de uma tabela resumo. Sendo assim, na Tabela 35, estão demonstradas as porcentagens de ganho ou perda das propriedades (dosagem, resistência, deformabilidade e adesão/coesão) das misturas asfálticas recicladas mornas. A comparação das Misturas Mornas, sem fresado, se dá com a Mistura Convencional referência, de cada ligante em estudo. Já as Misturas Mornas 25 e 50% Fresado são comparadas a sua Mistura Morna referência.

Além da tabela resumo, apresenta-se graficamente os dados na Figura 85, a fim de comparar a melhora ou piora das misturas, analisando todos os ensaios realizados. Vale salientar que o Teor de Ligante Adicionado, quanto mais decresce seu valor, menor o custo necessário para implantar um pavimento com tais características, não significando que necessariamente tenha um comportamento pior que suas misturas referência. Da mesma forma, acontece com a propriedade de adesão/coesão Desgaste Cântabro, para a qual quanto menor o valor, melhor o desempenho, devido ao seu menor desgaste pelo atrito pneu/pavimento sofrido pela mistura. Para as demais misturas, quanto maior a proporção de ganho, melhor o comportamento da mistura. Ao menos, têm-se uma inferência de que na prática a mistura com maior valor se comportaria da melhor forma.

Avaliando a Tabela 35 e Figura 85, é possível averiguar que as misturas mornas perdem em desempenho para as convencionais quentes, de maneira geral. Como comportamento positivo, vale salientar, o menor teor de ligante, menor desgaste Cântabro, para as misturas com ambos os ligantes estudados, e um melhor número

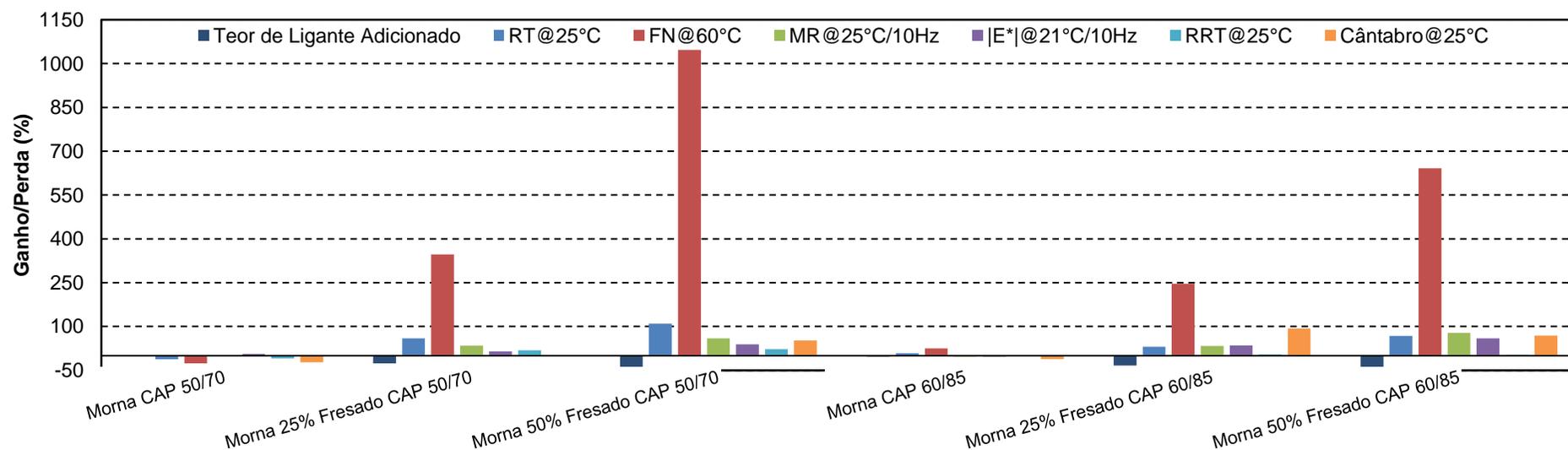
de FN da Mistura Morna CAP 60/85, comparado com a Mistura Convencional do mesmo ligante.

Com o aumento da porcentagem de fresado inserido nas misturas asfálticas mornas, percebe-se a melhora do comportamento frente as propriedades de resistência, deformabilidade e adesão e coesão, com exceção do desempenho das misturas com fresado quando avaliado o ensaio de Desgaste Cântabro. Vale ressaltar o ganho de ciclos perante o ensaio de deformação permanente, mostrando o bom desempenho das misturas recicladas, aliado a melhora das demais propriedades de MR/RT, Módulo Complexo e de RRT. Pode-se notar que quanto maior a proporção de fresado adicionado, melhor o desempenho das misturas, com leve melhora para as misturas que apresentam ligante modificado em sua composição.

Tabela 35 - Resumo do efeito do uso de misturas asfálticas recicladas mornas

Misturas Asfálticas	Ensaio Realizado						
	Teor de Ligante Adicionado	RT@25°C	FN@60°C	MR@25°C/10Hz	E* @21°C/10Hz	RRT@25°C	Cântabro@25°C
Morna CAP 50/70	-3,34%	-12,50%	-26,32%	-2,99%	6,51%	-9,41%	-22,81%
Morna 25% Fresado CAP 50/70	-26,22%	59,52%	346,43%	34,49%	14,42%	18,18%	-1,15%
Morna 50% Fresado CAP 50/70	-51,22%	109,52%	1046,43%	59,56%	38,79%	22,08%	51,79%
Morna CAP 60/85	-4,17%	8,54%	25,35%	-3,48%	-3,64%	-2,27%	-11,36%
Morna 25% Fresado CAP 60/85	-33,20%	30,34%	246,63%	33,22%	35,61%	4,65%	93,18%
Morna 50% Fresado CAP 60/85	-50,83%	67,98%	641,57%	78,07%	59,51%	3,89%	68,60%

Figura 85 - Proporção de efeito do uso de misturas asfálticas recicladas mornas



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas no decorrer da pesquisa, com base nas considerações das dosagens e dos ensaios de resistência, deformabilidade e de adesão e coesão das misturas asfálticas recicladas mornas estudadas. Além disso, apresenta-se ainda algumas sugestões para futuros trabalhos.

5.1. CONCLUSÕES

A necessidade de preservar os recursos disponíveis no meio ambiente induziu o setor rodoviário a buscar novas tecnologias para minimizar os impactos que a implementação e manutenção de uma rodovia causam ao ambiente. Com o objetivo de reaproveitar cada vez mais os materiais disponíveis, surgiu a reciclagem de pavimentos, e estudos para implementar maiores teores de fresado em novos pavimentos foram sendo alvo de pesquisas. Surgiram também, em meio a necessidade de atender aos preceitos da sustentabilidade, as misturas asfálticas mornas, técnica mais ecologicamente adequada, que visa reduzir as emissões de poluentes e amenizar o consumo energético, além de diversos outros benefícios.

A reciclagem aliada a técnica das misturas mornas, proporcionou estudos com maiores porcentagens de fresado incorporado às massas asfálticas, que giravam em torno de 25% a no máximo 40% de fresado em misturas a quente, porém esse último já era considerado um teor altíssimo e pouco utilizado. Devido as temperaturas de usinagem e compactação das misturas mornas serem menores que as convencionalmente utilizadas, é possível trabalhar com proporções mais expressivas de fresado, e assim, reduzir o custo de massas asfálticas, a partir da redução de ligante novo e agregados virgens necessários. Associa-se então, inovação e alta tecnologia para racionalizar gastos e evitar danos ao meio ambiente, adequando a recomposição do revestimento asfáltico ao conceito da sustentabilidade.

Dessa forma, buscou-se, com a presente pesquisa, demonstrar que é possível produzir misturas com material reciclado com as mesmas propriedades e características de misturas convencionais a quente, aliando melhorias e menor impacto ao meio ambiente. As oito misturas asfálticas estudadas avaliaram as propriedades de dosagem, resistência, deformabilidade e adesão e coesão das

misturas asfálticas recicladas mornas, com ligantes convencional e modificado por polímero.

As proporções de fresado estipuladas atenderam as quantidades usualmente empregadas (25%) e, se buscou ir além, incorporando um teor alto de fresado (50%). Constatou-se que as misturas se comportaram de maneira adequada e mostram ter características superiores às sem fresado, reiterando que a técnica de reciclagem é, sem dúvida, uma das mais promissoras do momento, e deve sim ser pesquisada e aplicada em campo, para melhores análises de seu desempenho efetivo.

É notável a redução de ligante asfáltico necessário quando trabalhado com misturas recicladas, tanto quando utilizado CAP 50/70, quanto CAP 60/85, mostrando claramente que o fresado não trabalha como um “*Black Rock*”, e sim, existe certo grau de reativação do ligante antigo durante o processo de fabricação das misturas asfálticas, proporcionando grande economia ao reduzir a quantidade do material com maior valor econômico no processo de construção de uma rodovia. As misturas mornas apresentam teor de ligante um pouco menor (redução de 0,17% para CAP 50/70 e 0,21% para CAP 60/85) que as convencionais a quente referências, promovendo uma economia de ligante asfáltico apenas por se utilizar a técnica de WMA.

Quanto as propriedades de resistência, pode-se concluir que as misturas convencionais e mornas tem comportamento similar, e que o CAP 60/85 aumenta os valores de RT e FN, quando comparado ao CAP 50/70, demonstrando sua superioridade e seu melhor desempenho, principalmente, nos resultados obtidos pelo ensaio de deformação permanente. Todavia, o teor de fresado é o principal fio condutor dos resultados, evidenciando notoriamente que à medida em que se aumenta o teor de reciclado incorporado às misturas, há um aumento dos valores de RT e FN. Vale frisar, que os resultados encontrados para o ensaio de FN apresentam clara dependência com a quantidade de RAP inserida nas misturas, mostrando a grande influência de incorporar fresado com ligante antigo modificado por polímero para aumentar as propriedades de resistência das misturas asfálticas recicladas mornas.

As propriedades de deformabilidade foram avaliadas a partir dos ensaios de MR e E*. Constatou-se, a partir do ensaio de MR, que as misturas convencionais e mornas são muito semelhantes, e que os maiores valores de rigidez foram obtidos

para as misturas com maiores taxas de fresado incorporada, e com leve superioridade para as misturas com ligante modificado com polímero às misturas com ligante convencional. A análise dos dados obtidos para o ensaio de módulo complexo, através das curvas mestras de $|E^*|$ e do ϕ , resultantes da modelagem 2S2P1D, expõem que as misturas com ligante modificado apresentaram uma maior parcela elástica quando comparadas às misturas com ligante convencional, e que o aumento do teor de fresado diminui a parcela viscosa, assim como, maiores proporções de RAP, combinado com CAP 60/85, aumentam a rigidez das misturas asfálticas estudadas, tanto nas baixas como nas altas temperaturas. Misturas convencionais referência e mornas trabalham de forma equivalente.

Quanto aos resultados obtidos com os ensaios de adesão e coesão é possível observar que o uso de fresado com ligante envelhecido modificado por polímero solucionou os problemas encontrados por outros autores quanto a adesão das misturas recicladas. Os dados encontrados para o ensaio de *Lottman* modificado demonstraram com clareza que o efeito do polímero contido no RAP proporcionou melhor desempenho quanto à adesividade, e é perceptível que a combinação com ligante CAP 50/70 apresenta resultados superiores que as misturas com CAP 60/85. O ensaio de resistência ao desgaste Cântabro ratificou o já averiguado pela literatura, de que a inserção de RAP aumenta o desgaste à abrasão das misturas asfálticas. Porém, vale salientar que as misturas recicladas, apesar de terem apresentado maior desgaste, atendem aos valores mínimos de referência, mesmo aquelas com 50% de fresado incorporado, mostrando não ser empecilho para seu emprego, apenas um ponto a ser observado em projetos que irão para aplicação. O uso de ligante modificado por polímero aumenta a resistência ao desgaste, quando comparado com ligante convencional, corroborando com os resultados obtidos nos ensaios de resistência e deformabilidade. As misturas asfálticas mornas tiveram um comportamento minimamente inferior às convencionais a quente, quanto ao ensaio de ação deletéria da água, porém, para o desgaste cântabro as mornas apresentaram melhor desempenho, exibindo menor desgaste, para ambos os ligantes asfálticos estudados.

Concluindo, é notável perceber que a utilização de RAP passante na peneira #3/8 e composto de ligante antigo CAP 60/85 trouxe inúmeros benefícios, através dos resultados apresentados, e é, sem dúvida, uma expressiva contribuição para futuras

pesquisas e aplicações práticas. Dessa forma, reitera-se com a presente pesquisa a necessidade de maiores estudos aliando reciclagem de pavimentos a técnica de misturas asfálticas mornas, pois vêm se mostrando um ramo promissor dentro da pavimentação, apresentando resultados satisfatórios e atendendo as premissas de sustentabilidade, cada vez mais necessárias para que se possa, no futuro, dispor de um meio ambiente habitável e capaz de atender as necessidades das próximas gerações.

5.2. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em função das observações realizadas durante este trabalho sugere-se:

- Realizar ensaio de fadiga, para avaliar a resistência e a influência do teor de fresado na vida de fadiga das misturas asfálticas;
- Utilizar maior proporção de fresado nas misturas asfálticas mornas, e verificar seu comportamento;
- Executar trechos testes para melhor avaliar o desempenho das misturas asfálticas recicladas mornas em campo;
- Investigar métodos de recuperação do ligante envelhecido do material reciclado para que, assim, possa-se tornar ainda mais econômica a utilização do fresado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. **Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures**. AASHTO T 342-11. Washington, D. C., 2011.

_____. **Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. AASHTO T 283-14. Washington, D. C., 2014.

_____. **Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)**. AASHTO TP 79-15. Washington, D. C., 2015.

_____. **Superpave Volumetric Mix Design**. AASHTO M 323-13, Washington, D. C., 2013.

_____. **Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt**. AASHTO ND T 209-15. Washington, D. C., 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Asfalto modificado - Ensaio de separação de fase**. ABNT/NBR 15166:2004. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**. ABNT/NBR 11341:2014. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **Ensaio de Massa Específica dos Grãos**. ABNT/NBR 6508:1984. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **Materiais asfálticos - Determinação da penetração**. ABNT/NBR 6576:2007. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro**. ABNT/NBR 15086:2006. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. ABNT/NBR 15184:2004. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola**. ABNT/NBR 6560:2008. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Misturas Asfálticas – Determinação do Dano por Umidade Induzida**. ABNT/NBR 15617:2011. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas**. ABNT/NBR 15619:2012. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida.** ABNT/NBR 16505:2016. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa.** ABNT/NBR 6296:2012. Rio de Janeiro, 2012.

AGÊNCIA USP DE NOTÍCIAS. **Mistura morna reduz poluição e energia gasta na pavimentação.** Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/?p=76331>>. Acesso em 07 nov. 2015.

AKISETTY, C. K.; LEE, S. J.; AMIRKHANIAN, S. N. 2009. **Effects of compaction temperature on volumetric properties of rubberized mixes containing warm-mix additives.** J. Mater. Civ. Eng., 21(8), 409-415. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:8(409). 2009.

AKISETTY, C. K.; LEE, S. J.; AMIRKHANIAN, S. N. 2010. **Laboratory investigation of the influence of warm asphalt additives on long-term performance properties of CRM binders.** Int. J. Pavement Eng., 11(2), 153-160. DOI: 10.1080/10298430903197225. 2010.

AKISETTY, C. K.; LEE, S. J.; AMIRKHANIAN, S. N. 2008. **Volumetric properties of warm rubberized mixes depending on compaction temperature.** Presented in: Airfield and Highway Pavements 2008, ASCE, Bellevue, p.205-212. Washington, United States, October, 2008.

ALMEIDA Jr., P. O. B. de. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem.** 2016. 217p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

AL-QADI, I.L., ELSEIFI, M., CARPENTER, S.H. **Reclaimed Asphalt Pavement – A literature review.** Project Report FHWA-ICT-07-001. Illinois Center for Transportation. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois, 2007.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas.** Relatório CCR-ND-WMA-RTF-SET/2014. 133p. 2014.

ARRA – Asphalt Recycling and Reclaiming Association. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book.** Department of Transportation. FHWA-SA-98-042. Washington, D.C., 1997.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF 12697 - 26 - Annexe A: Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26: module de rigidité. Annexe A (normative) Essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR) ou sur des Éprouvettes prismatiques (2PB-PR).** 2012.

ASPHALT ACADEMY. **Technical Guideline: Thue Use of Modified Bituminous Binders in Road Construction – TG 1.** Sabita e CSIR, Pretoria/South Africa, 2001.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook.** MS-4. 7th. Asphalt Institute, 2007.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous.** ASTM D4123. USA, 1982.

AUSTROADS. **Review of overseas trials of warm mix asphalt pavements and current usage by Austroads members.** Austroads. Sydney, 2012.

BAHIA, H.U.; FAHEEM, A. **Using the Superpave Gyrotory Compactor to Estimate Rutting Resistance of Hot-Mix Asphalt.** Transportation Research Board. Nº: E-C124 - Practical Approaches to Hot-Mix Asphalt Design and Production Quality Control Testing. Dezembro, 2007.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** 2007. 558p. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARBOSA Jr., V. dos S. **Estudo da resistência mecânica de pavimento asfáltico empregando mistura morna.** 2015. 43p. Trabalho de Conclusão (Obtenção do Título de Engenheiro Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BARROS, L. M. **Deformação permanente de revestimentos asfálticos com diferentes ligantes: comparação de desempenho através do parâmetro *Flow Number*.** 2014. 96p. Trabalho de Conclusão (Obtenção do Título de Engenheiro Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BARTHEL, W.; MARCHAND, J. P.; VON DEVIVERE, M. Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite. 3th. In: Eurasphalt & Eurobitume Congress. **Anais...** Paper 354. Vienna, Austria. 2004.

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

BEHNIA, B.; DAVE, E. V.; AHMED, S.; BUTTLAR, W. G.; REIS, H. 2011. **Effects of recycled asphalt pavement amounts on low-temperature cracking performance of asphalt mixtures using acoustic emissions.** Transp. Res. Rec., 2208, 64-71. DOI: 10.3141/2208-09. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(634). 2011.

BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** 504 f. 1ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006.

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.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales.** 2014. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BONAQUIST, R., 2007. **Can I run more RAP? Hot Mix Asphalt Technology.** National Asphalt Pavement Association, Vol. 12 - No 5, p.11 – 13. 2007.

BONAQUIST, R. **Laboratory evaluation of hot mix asphalt (HMA) mixtures containing recycled or waste product materials using performance testing.** Publication FHWA-2005-006+98-32(19). Pennsylvania Department of Transportation. Office of Planning and Research, 2005.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos.** 3ª ed., São Paulo: Exceção Editorial, 2011.

BRONDANI, C. **Estudo laboratorial da influência da areia natural na viscoelasticidade das misturas asfálticas.** 2016. 115p. Trabalho de conclusão (Obtenção do Título de Engenheiro Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de misturas asfálticas: evolução após 10 anos e a situação atual na França.** 3º Salão de Inovação ABCR - 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Foz do Iguaçu, Outubro, 2011.

BROWN, E. R.; KANDHAL, P. S.; ROBERTS, F. L.; KIM, Y. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. **Hot mix asphalt: materials, mixture design and construction.** 3rd ed. Lanham: NCAT at Auburn University, 2009.

BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios laboratoriais e de análise de desempenho.** 2015. 129 p. Dissertação (Mestrando em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2015.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** 2012. 137p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas.** 2010. 196p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CEC – Centro de Estudios de Carreteras. **Propuesta de Norma de Ensayo – Determinacion de la perdida por Desgaste de Mezclas Bituminosas mediante el empleo de la Maquina de Los Angeles (Ensayo Cantabro).** NLT – 325/86. Madri, 1986.

CECA – ARKEMA GROUP. Cecabase RT®. Disponível em: <<http://www.cecachemicals.com/en/products/ceca-product-finder/range-page/Cecabase-RT/>>. Acesso em: 05 out. 2015.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente**. 2016. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

CERVARICH, M. **Foaming the Asphalt New Warm-mix Technique Challenges Conventional Wisdom**. Hot Mix Asphalt Technology, Volume 12, Number 4, p. 23-24. National Asphalt Pavement Association, Lanham, 2007.

CHOWDHURY, A.; BUTTON, J. W. **A Review of Warm Mix Asphalt**. Texas Transportation Institute. Technical report. Springfield, Virginia: National Technical Information Service, December 2008.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial**. Brasília, 2015, 19. ed., 420 p. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

_____. **Pesquisa CNT de rodovias 2016: relatório gerencial**. Brasília, 2016, 20.ed., 399 p. Disponível em: <[http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20\(2016\)%20-%20LOW.pdf](http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20(2016)%20-%20LOW.pdf)>. Acesso em: 11 fev. 2017.

CROTEAU, J.-M.; TESSIER, B. **Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. 2008.

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. In: XVIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. **Anais...** Florianópolis, Santa Catarina. 2004.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem. **Determinação da Perda por Desgaste de Mistura Betuminosas de Graduação aberta (Ensaio Cantabro)**. DAER/RS – EL 215/01. Porto Alegre, 2001.

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-Mix Asphalt: European practice**. International Technology Scanning Program. Virginia: Federal Highway Administration, 2008.

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **Agregados - análise granulométrica**. DNER – ME 083/98. Rio de Janeiro, 1998.

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

_____. **Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”**. DNER - ME 035/98. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. DNER - ME 081/98. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo**. DNER - ME 195/97. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. DNER - ME 194/98. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com Asfalto-Polímero - Ensaio Cântabro**. DNER - ME 383/99. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **Misturas betuminosas - percentagem de betume**. DNER - ME 053/94. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero**. DNER - ES 385/99. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **Pavimentação - pré-misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito**. DNER - ES 386/99. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **Pesquisas de Asfaltos Modificados por Polímeros - Relatório Final Tomo I e II**. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. DNIT – ME 135/2010. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. DNIT – ME 136/2010. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Pavimentação flexível – Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” – Especificação de material**. DNIT – EM 111/2009. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfáltico - Especificação de Serviço**. DNIT – ES 031/2006. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de serviço**. DNIT – ES 033/2005. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de serviço**. DNIT – ES 034/2005. Rio de Janeiro, 2005.

DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges**. Paris: Hermes-Lavoisier. 2005.

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.

DON BROCK J.; RICHMOND J. L. **Milling and recycling**. Technical Paper T-127, ASTEC. INC., Chatanooga, USA, 2007.

DOYLE, J. D.; HOWARD, I. L. Compactability and bitumen utilization of 100% warm mixed RAP. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 89, 2010, Washington. **Anais...** Washington: TRB, 2010.

DOYLE, J. D.; HOWARD, I. L. 2013. **Rutting and moisture damage resistance of high reclaimed asphalt pavement warm mixed asphalt: loaded wheel tracking vs. Conventional methods**. Road Mater. Pavement Des., 14(S2), 148-172. DOI: 10.1080/14680629.2013.812841. 2013.

EAPA – European Asphalt Pavement Association. **The use of Warm-Mix Asphalt**. 2014.

_____. Asphalt In Figures 2010. Disponível em: <http://www.eapa.org/usr_img/Asphalt%20in%20figures%20Version%2022-12-2011.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2017

_____. Asphalt In Figures 2013. Disponível em: <http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/AIF_2013_Final.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2017

_____. Asphalt In Figures 2015. Disponível em: <http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/2016/AIF_2015_v6.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2017

FAKHRI, F.; GHANIZADEH, A. R.; OMRANI, H. 2013. **Comparison of fatigue resistance of HMA and WMA mixtures modified by SBS**. Procedia Soc. Behav. Sci., 104, p.168-177. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.11.109. 2013.

FERREIRA, C. I. G. **Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas**. 2009. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Área de especialização: Engenharia Rodoviária) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2009.

FERREIRA, J. L. S. **Melhoramento da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas pela escolha granulométrica a partir da metodologia da faixa de agregados dominantes**. 2015. 72f. Projeto de Graduação (Título de Engenheiro Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2015.

FHWA – Federal Highway Administration. **Warm Mix Asphalt Technologies and Research**. Department of Transportation Federal Highway Administration. USA, 2008.

FIEDLER, J.; KASPAR, J.; VALENTIN, J. **WMA specifications and experience with this mix type in the Czech Republic**. HAPA conference, Hungary, 2013.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. 2015. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia – Departamento de Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GREENE, J.; CHUN, S.; CHOUBANE, B. **Enhanced gradation guidelines to improve asphalt mixture performance**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2456. DOI: 10.3141/2456-01. Washington, D.C., 2014.

HAJJ, E. Y.; SOULIMAN, M. I.; CORTEZ, E. M. 2014. **Influence of warm mix additive on mechanistic, economical, and environmental attributes of a polymer-modified asphalt mixture**. Adv. Civ. Eng. Mater., 3(1), p.88-106. DOI: 10.1520/acem20130099. 2014.

HILL, B. *et al.* Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement through Mechanical Performance Tests and an Acoustic Emission Approach. **Journal of Materials in Civil Engineering**. December, 2013. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000757](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000757)>. Acesso em: 15 nov. 2015.

HOWARD, I. L.; DOYLE, J. D.; COX, B. C. 2013. **Merits of reclaimed asphalt pavement-dominated warm mixed flexible pavement base layers**. Road Mater. Pavement Des., 14(S2), p.106-128. DOI: 10.1080/14680629.2013.812834. 2013.

HUANG, B.; LI, G.; VUKOSAVLJEVIC, D.; SHU, X.; EGAN, B.K. 2005. **Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board No. 1929, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 37–45. 2005.

HUNTER, R. N. 2000. Asphalt in road construction. Lanham, Maryland, Thomas Telford. 2000.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. 2005. Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt. NCAT – National Center for Asphalt Technology – Report Nr. 05-06. Alabama, USA: Auburn University, 2005.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. 2006a. Evaluation of Evotherm® for use in warm mix asphalt. NCAT – National Center for Asphalt Technology – Report Nr. 06-02. Alabama, USA: Auburn University, 2006.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. 2006b. Evaluation of Potential Processes for use in Warm Mix. Disponível em:

<http://warmmixasphalt.com/submissions/10_20071127_Evaluation_of_Potential_Processes.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2015.

INIR - Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP. Disposições Normativas: Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos. Lisboa, Portugal. Disponível em: <<http://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgacao%20Tcnica/ConstrucaoReabilitacaoPavimentosReciclagemPavimentos.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

JAIR, M.; MARCOZZI, R.; MOREA, F. Mezclas asfálticas sustentables: la opción WAM-RAP. In: Memorial del XVIII CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO – CILA. 5-126, 2015, Bariloche, Argentina. **Anais...** Argentina: Comisión Permanente del Asfalto, 2015. Disponível em: <<file:///C:/Users/USER/Downloads/CILA%202015.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

KANDHAL, P. M.; MALLICK, R. B. 1997. **Pavement recycling guidelines for state and local governments-participant's reference book**. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, Report Number FHWA-SA-98-042. 1997.

KIM, H.; LEE, S. J.; AMIRKHANIAN, S. N.; PARK, T. S. **Performance evaluation of recycled PMA binders containing warm mix asphalt additives**. J. Test. Eval., 39(4), p.1-7. 2011.

KIM, R. Y. **Modeling of asphalt concrete**. 1º ed. McGraw-Hill. p. 460. New York. 2009.

KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture**. 2006. 142p. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Florida, Gainesville. 2006.

LIU, S.; CAO, W.; FANG, J. **Orthogonal test research of asphalt rubber modified by warm asphalt additive**. Presented in: ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems - 3481, Green Intelligent Reliable, ASCE, p.3480-3492. Beijing, China. August, 2010.

LOPES, M.; GABET, T.; BERNUCCI, L.; MOUILLET, V.; BROSSEAUD, Y. Incorporação de elevado percentual (50%) de material asfáltico fresado a misturas asfálticas mornas. In: Memorial del XVIII CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO – CILA. 5-161, 2015, Bariloche, Argentina. **Anais...** Argentina: Comisión Permanente del Asfalto, 2015. Disponível em: <<file:///C:/Users/USER/Downloads/CILA%202015.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

MAHBOUB, K.; LITTLE, D. N. L. 1988. Improved asphalt concrete design procedure, Research Report 474-IF – Texas Transportation Institute, College Station, Texas, EUA. 1988.

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.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends.** Tese de Doutorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État. 2014.

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.

MCDANIEL, R.; SHAH, A.; HUBER, G.; GALLIVAN, V. 2007. **Investigation of properties of plant-produced RAP mixtures.** Transp. Res. Rec., 1998, p.103-111. DOI: 10.3141/1998-13. 2007.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574p. 2005.

MEJÍAS SANTIAGO, M.; DOYLE, J. D.; HOWARD, I. L.; BROWN, E. R. **Evaluation of Warm Mix Asphalt Technologies for use on Airfield Pavements.** 2012.

MELLO, D. **Avaliação da adição de Evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo.** 2012. 261p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MENDES, L. O. **Utilização do Método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas.** 2011. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Área de concentração: Ambiente Construído) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MERIGUI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos com adição de borracha moída de pneu.** 2014. 201p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

MOGAWER, W. S.; AUSTERMAN, A. J.; MOHAMMAD, L.; KUTAY, M. E. 2013. **Evaluation of high RAP-WMA asphalt rubber mixtures.** Road Material and Pavement Design, 14(S2), p.129-147. DOI: 10.1080/14680629.2013.812846. 2013.

MOGAWER, W. S.; AUSTERMAN, A. J.; ROUSSEL, M. **Performance characteristics of asphalt rubber mixtures containing RAP and warm mix asphalt technology.** Proceedings of the 2nd International WarmMix Conference, St. Louis, MO. October, 2011.

MOTTA(a), R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético.** 2011. 229p. Tese (Doutorado em Engenharia - Área de concentração: Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2011a.

MOTTA(b), R. S. **Misturas Mornas: Redução de Emissão de Poluentes e Economia de Energia.** Workshop de Avaliação dos Objetivos da Produção de Asfaltos – WAOP. São Paulo, 2011b.

MOREA, F.; MARCOZZI, R.; CASTANO, G. 2012. **Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in warm mix asphalts (WMAs).** Constr. Buil. Mater., 29, 135-141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.010. 2012.

MOREIRA, L. S. **Avaliação de mistura asfáltica utilizada na malha rodoviária paraense: estudo de caso.** Trabalho de conclusão (Obtenção do Título de Engenheiro Civil) – Universidade da Amazônia, Belém, 2009.

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

MWV – MeadWestvaco Corporation. **Evotherm Warm Mix Asphalt.** Disponível em: <<http://www.mwv.com/en-us/asphalt-innovations/products/evotherm>>. Acesso em: 9 set. 2015.

_____. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - Evotherm® M1.** MeadWestvaco Corporation, Specialty Chemicals Division. Virginia Avenue, North Charleston, South Carolina – USA. 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente.** 2008. 204p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, 2008.

NAPA - National Asphalt Pavement Association. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2009-2012.** 2013.

NAPA – National Asphalt Pavement Association. **Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2009-2013.** 2014.

NCAT – National Center for Asphalt Technology. Disponível em: <<http://www.ncat.us/info-pubs/technical-reports.html>>. Acesso em 16 de set. 2015.

NCHRP – National Cooperative Highway Research Program. **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual.** Report 452. Transportation Research Board – National Research Council. National Academy Press, Washington, D. C. – 2001.

_____. **Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice.** Transportation Research Board. Washington, D. C. – 2008.

NEJAD, F. M.; AZARHOOSH, A.; HAMED, G. H.; ROSHANI, H. 2013. **Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt**

pavements. Road Materials and Pavement Design, Vol. 15, No. 1, p.207-219. DOI: 10.1080/14680629.2013.868820. 2013.

OLARD, F. **Low energy asphalts.** Routes Roads, n.336-337, p.131-145, 2008. Apresentado na 23ª World Road Congress: General Report and Conclusions: PIARC Prizes, 23. Paris, 2008.

OLIVEIRA, J. A. de. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo.** 2013. 139p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração: Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; ABREU, L. P. F.; PEREIRA, P. A. A. 2012. **Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures.** Procedia - Social and Behavioral Sciences. Vol. 53, N°3, pp. 266–275. DOI:10.1016/j.sbspro.2012.09.879. 2012.

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.

OTTO, G. G. **Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PAGLIOSA, C. **Determinação experimental de propriedades viscoelásticas de material polimérico.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PANIZ, E. **Extração de Hidrocarbonetos Policíclicos aromáticos em diferentes temperaturas de 12 ligantes asfálticos comercializados no Brasil.** 2015. 76p. Trabalho de Conclusão (Obtenção do Título de Engenheiro Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASSAD, E. A. 2008. **Pavement design and materials.** 542p. Hoboken: John Wiley & Sons. 2008.

PAVIA SYSTEMS; NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Warm mix asphalt.** Disponível em: <<http://www.paviasystems.com>>. Acesso em: 15 set. 2015.

PENZ, G. **Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Mornas com Adição de Zeólita Sintetizadas.** 2010. Trabalho de Conclusão (Obtenção do Título de Engenheiro Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PERKINS, S. W. **Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving Strategies for Use in Montana Highway Construction.** Report N° FHWA/MT-09-009/8117-38. The State of Montana Department of Transportation in cooperation with The U.S Department of Transportation Federal Highway Administration. USA, 2009.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 1991. 496f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

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

PROWELL, B. D., HURLEY, G.C.; CREWS, E. Field Performance of Warm Mix Asphalt at the NCAT Test Track. Proceedings (CD), 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington. **Anais...** Washington, D.C., 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Warm-mix asphalt: Best Practices**. Quality Improvement, Series 125. Lanham: NAPA. 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. **Warm-mix asphalt: Best Practices**. Quality Improvement Publication 125, 3^a ed. Lanham: NAPA. 2012.

REVISTA MANUTENÇÃO & TECNOLOGIA. **Usina asfáltica da Ciber com capacidade de produção de 140 toneladas por hora**. Disponível em: <http://www.revistamt.com.br/index.php?option=com_contenido&task=viewNoticia&id=2824>. Acesso em 01 dez. 2015.

RIVOIRE Jr., L. **Avaliação de misturas mornas com emprego de simulador de tráfego linear**. 2014. 249p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ROHDE, L., CERATTI, J. A. P., TREICHEL, D. Estudo laboratorial de misturas asfálticas “mornas”. In: 39^a Reunião Anual de Pavimentação e 13^o Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPV. 2008.

ROQUE, R.; BEKOE, M.; ISOLA, M.; ZOU, J.; LOPP, G. **Validation and refinement of mixture volumetric material properties identified in Superpave monitoring Project II: phase II**. Gainesville, Flórida, 2015.

RONDÓN-QUINTANA, H. A.; HERNÁNDEZ-NOGUERA, J. A.; REYES-LIZCANO, F. A. **A review of warm mix asphalt technology: Technical, economical and environmental aspects**. Ingeniería e Investigación, vol. 35, núm. 3, diciembre, 2015, pp. 5-18. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2015.

ROSSATO, F. P. 2015. 221f. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

ROSSI, D.; FILIPPI, S.; MERUSI, F.; GIULIANI, F.; POLACCO, G. 2013. **Internal structure of bitumen/polymer/wax ternary mixtures for warm mix asphalts**. J. Appl. Polym. Sci., 129(6), p.341-354. DOI: 10.1002/app.39057. 2013.

RUBIO, M. C.; MORENO, F.; MARTINEZ-ECHEVARRIA, M. J.; MARTINEZ, G.; VAZQUEZ, J. M. **Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt.** Journal of Cleaner Production 41- p. 1-6, 2013.

SABITA - Southern African Bitumen Association. **Manual 32: Best practice guideline for warm mix asphalt.** ISBN 978- 1-8974968-55-1. South Africa, 2011.

SCHUSTER, S. L. **Estudo da influência da areia natural nas propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica.** 2016. 90p. Trabalho de conclusão (Obtenção do Título de Engenheiro Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

SHIRODKAR, P.; MEHTA, Y.; NOLAN, A.; SONPAL, K.; NORTON, A.; TOMLINSON, C.; DUBOIS, E.; SULLIVAN, P.; SAUBER, R. 2011. **A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt.** Construction and Building Materials, Vol. 25, N°. 1, p. 150-155. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.045. 2011.

SHIVAPRASAD, P. V.; XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S. N. 2011. **Moisture susceptibility of polymerized stone matrix asphalt mixtures using warm mix asphalt technologies using moist aggregates.** J. ASTM Int., 8(9), p.1-14. DOI: 10.1520/JAI103661. 2011.

SINICESP - Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo. **Emissões de Misturas Asfálticas Mornas e a Quente devido à Temperatura.** Boletim Técnico – Edição n°5, 2013. Disponível em: <<http://www.sinicesp.org.br/materias/2013/bt05a.htm>>. Acesso em 04 set. 2015.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SPECHT, L.P.; CERATTI, J.A.P. **Asfalto borracha e borracha agregado: Possibilidades de Utilização de Borracha Reciclada em Misturas Asfálticas.** Revista Estradas do Daer – n°4/2003, pg. 18-26, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2003.

SPECHT, L. P.; HIRSH, F.; ROZEK, T. M.; CERATTI, J. A. P. **Estudo laboratorial da adesividade de misturas asfálticas preparadas com ligante convencional e modificado considerando o teor de fíler e a forma do agregado.** 37ª Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia, 2006.

SPECHT, L. P.; PIRES, G. M.; VITORELLO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E.; TIEFENSEE, M. D. Utilização de material fresado como camada de pavimento: estudo laboratorial e aplicação em campo. In: 42ª RAPv: Reunião Anual de Pavimentação 2013. **Anais...** Gramado, RS. 2013.

SOUSA FILHO, A. C. **Produção de misturas asfálticas mornas pela inserção de zeólitas**. 2006. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

TONIAL, I. A. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. 2001. 244f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. Projeto de Misturas de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente com Diferentes Teores de Material Fresado. In: Anais do XII CONGRESSO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO – CILA. **Anais...** 2003.

VALDÉS, G.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MIRÓ, R.; MARTÍNEZ, A.; BOTELLA, R. 2011. **Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)**. Construction and Building Materials, Vol. 25, p. 1289-1297. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016. 2011.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. J. **Bailey method for gradation selection in HMA mixture design**. Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, D. C., EUA. Outubro. 2002.

WARGHA FILHO, N. **Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação, no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. 2013. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes – Área de concentração: Infraestrutura de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

WEST, R.; KVASNAK, A.; TRAN, N.; POWELL, B.; TURNER, P. **Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2126. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 2009.

WHITEOAK, D. **The Shell bitumen handbook**. 1 ed. Cambridge, 1990.

WIRTGEN GROUP. **An Innovative Binder with a Proven Track record Worldwide**. Foamed bitumen. 2014. Disponível em: <http://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_02_cold_recyclers_and_soil_stabilizers/media_1_02_cold_recyclers_and_soil_stabilizers_00_general_information/media_1_02_cold_recyclers_and_soil_stabilizers_00_general_information_brochures/media_1_02_cold_recyclers_and_soil_stabilizers_00_general_information_brochures_gb/Brochure_Foamed-bitumen_EN.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2015.

WU, C.; ZENG, M. 2012. **Effects of additives for warm mix asphalt on performance grades of asphalt binders**. J. Test. Eval., 40(2), 265-272. DOI: 10.1520/JTE104279. 2012.

YU, X.; LENG, Z.; WEI, T. 2014. **Investigation of the rheological modification mechanism of warm-mix additives on crumb-rubber-modified asphalt**. J Mater Civ Eng., 26(2), p.312-319. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000808. 2014.

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.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. 2014(a). **Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art.** International Journal of Pavement Engineering, Vol. 16, No. 1, p.39-55. DOI: 10.1080/10298436.2014.893331. January, 2014.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. 2014(b). **100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis.** Resources Conservation and Recycling 92 (2014) p230-245. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.07.007. July, 2014.

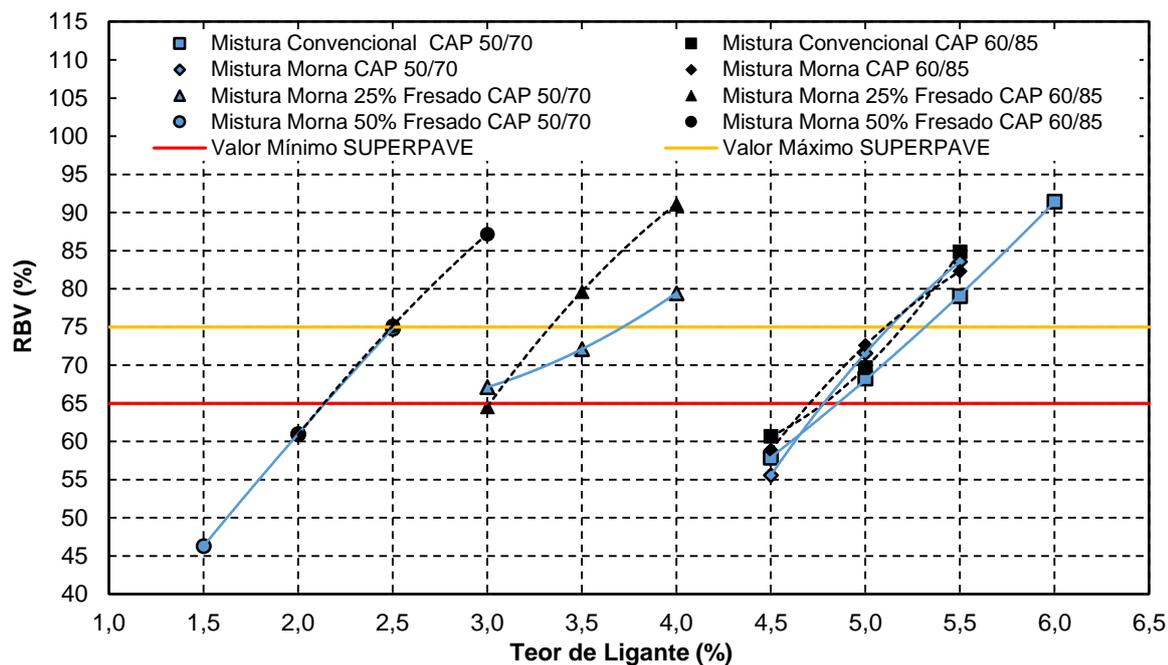
ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; POULIKAKOS, L.; FRANK, R. 2014. **Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures.** Construction and Building Materials 71 (2014) p.538–550. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073 0950-0618/2014. August, 2014.

ZAUMANIS, M. **Warm Mix Asphalt Investigation.** Master of Science Thesis. Kgs. Lyngby, Denmark, 2010.

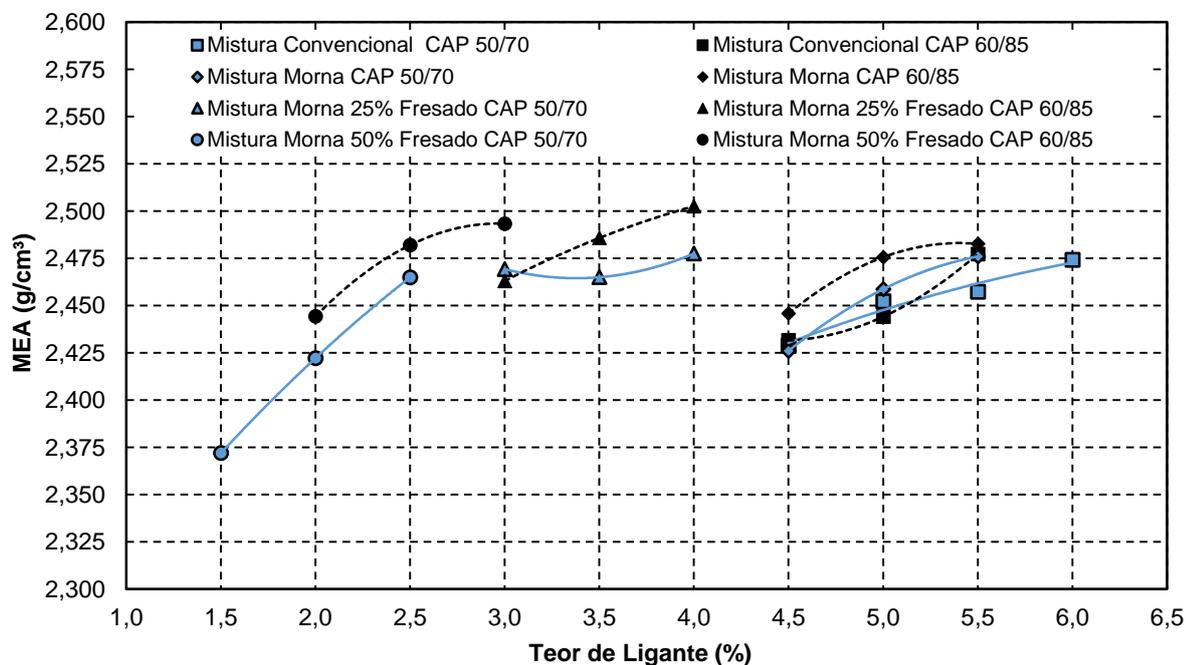
ZHAO, S.; HUANG, B.; SHU, X.; WOODS, M. 2013. **Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement.** Constr. Buil. Mater., 44, p.92-100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010. 2013.

ZUBARAN, M. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.** 2014. 151p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Apêndice A 3 - Relação Betume-Vazios (%) para todas as misturas estudadas



Apêndice A 4 - Massa Específica Aparente (g/cm^3) para todas as misturas estudadas



APÊNDICE B - DADOS GERAIS DO ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

Mistura Convencional CAP 50/70							
Temperatura	Frequência (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28050	744	3	2,20	0,03	1,14
-10	20	27934	704	3	2,33	0,09	3,86
-10	10	27449	740	3	2,69	0,08	2,79
-10	5	26854	774	3	3,08	0,10	3,09
-10	2	25978	771	3	3,61	0,12	3,19
-10	1	25224	798	3	4,11	0,12	2,92
-10	0,5	24399	819	3	4,64	0,14	2,91
-10	0,2	23227	840	4	5,43	0,16	2,86
-10	0,1	22314	836	4	6,08	0,16	2,63
-10	0,01	19067	732	4	8,50	0,27	3,12
4	25	21131	569	3	7,01	0,16	2,21
4	20	20827	513	2	7,33	0,17	2,32
4	10	19699	422	2	8,23	0,12	1,40
4	5	18456	339	2	9,21	0,17	1,85
4	2	16723	224	1	10,67	0,20	1,87
4	1	15387	142	1	11,96	0,17	1,42
4	0,5	14046	76	1	13,34	0,24	1,76
4	0,2	12270	25	0	15,30	0,31	1,99
4	0,1	11020	160	1	16,83	0,36	2,14
4	0,01	6960	378	5	23,03	0,58	2,54
21	25	10905	372	3	18,53	0,71	3,83
21	20	10443	362	3	19,29	0,65	3,37
21	10	8941	305	3	21,46	0,67	3,10
21	5	7518	248	3	23,92	0,64	2,68
21	2	5774	175	3	27,28	0,76	2,77
21	1	4579	110	2	29,85	0,81	2,70
21	0,5	3566	78	2	32,96	0,41	1,24
21	0,2	2432	63	3	36,87	0,28	0,76
21	0,1	1733	52	3	39,11	0,81	2,07
21	0,01	488	13	3	32,94	6,91	20,98
37	25	2272	88	4	41,62	0,24	0,58
37	20	2018	100	5	42,12	0,20	0,46
37	10	1378	84	6	43,76	0,29	0,65
37	5	900	60	7	45,12	0,18	0,40
37	2	502	35	7	45,51	0,11	0,25
37	1	330	17	5	43,32	0,88	2,03
37	0,5	228	7	3	40,23	1,36	3,37
37	0,2	149	0	0	34,72	1,99	5,72
37	0,1	113	4	3	30,36	2,10	6,92
37	0,01	64	7	11	17,25	1,66	9,62
54	25	360	39	11	44,61	0,79	1,76
54	20	296	32	11	46,36	1,19	2,56
54	10	205	23	11	41,59	1,86	4,46
54	5	138	20	14	38,30	0,48	1,27
54	2	81	16	19	36,36	1,89	5,18
54	1	66	16	24	30,34	3,42	11,29
54	0,5	56	15	27	26,17	4,37	16,68
54	0,2	46	14	31	21,56	3,80	17,63
54	0,1	40	12	31	19,07	2,91	15,26
54	0,01	33	12	37	12,40	1,37	11,01

Mistura Morna CAP 50/70							
Temperatura	Frequência (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	29102	518	2	2,14	0,19	8,88
-10	20	29185	416	1	2,18	0,10	4,59
-10	10	28681	449	2	2,58	0,13	4,85
-10	5	28076	465	2	2,97	0,18	5,90
-10	2	27160	506	2	3,56	0,20	5,49
-10	1	26383	514	2	4,02	0,23	5,60
-10	0,5	25544	545	2	4,55	0,23	4,95
-10	0,2	24329	567	2	5,30	0,28	5,19
-10	0,1	23395	563	2	5,90	0,21	3,56
-10	0,01	20121	420	2	8,21	0,02	0,18
4	25	21337	430	2	6,79	0,18	2,58
4	20	21036	480	2	7,02	0,14	1,99
4	10	19925	505	3	7,98	0,21	2,63
4	5	18744	513	3	9,02	0,25	2,77
4	2	17068	527	3	10,57	0,31	2,93
4	1	15740	541	3	11,85	0,38	3,17
4	0,5	14380	552	4	13,25	0,43	3,25
4	0,2	12575	525	4	15,35	0,47	3,03
4	0,1	11342	521	5	16,96	0,49	2,86
4	0,01	7166	310	4	23,83	0,18	0,73
21	25	11625	363	3	18,21	0,04	0,22
21	20	11114	345	3	18,88	0,22	1,14
21	10	9523	261	3	21,13	0,41	1,96
21	5	8005	211	3	23,39	0,51	2,16
21	2	6190	176	3	26,52	0,59	2,22
21	1	4954	147	3	28,95	0,59	2,02
21	0,5	3873	117	3	31,48	0,53	1,68
21	0,2	2661	89	3	34,82	0,22	0,63
21	0,1	1914	59	3	37,15	0,30	0,81
21	0,01	575	28	5	40,41	2,85	7,05
37	25	2576	104	4	42,94	0,23	0,55
37	20	2269	101	4	43,46	0,07	0,16
37	10	1562	76	5	45,25	0,53	1,17
37	5	1032	60	6	46,91	0,95	2,01
37	2	584	42	7	48,27	1,67	3,46
37	1	382	31	8	47,43	2,52	5,31
37	0,5	261	24	9	43,21	1,73	3,99
37	0,2	168	18	11	36,96	0,56	1,52
37	0,1	128	18	14	30,91	1,69	5,45
37	0,01	77	18	23	26,95	8,31	30,86
54	25	363	5	1	43,37	1,44	3,32
54	20	284	6	2	46,76	2,45	5,24
54	10	193	11	6	42,15	2,93	6,95
54	5	131	10	8	38,87	2,88	7,41
54	2	74	9	12	37,72	3,76	9,97
54	1	58	9	15	33,57	3,46	10,29
54	0,5	49	8	17	29,39	3,70	12,57
54	0,2	38	8	20	25,44	2,83	11,12
54	0,1	32	7	21	22,61	2,49	11,04
54	0,01	20	6	32	25,19	8,85	35,13

Mistura Morna 25% Fresado CAP 50/70							
Temperatura	Frequência (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28955	9	0	1,98	0,16	8,08
-10	20	28975	14	0	2,11	0,13	5,94
-10	10	28541	23	0	2,38	0,12	4,84
-10	5	28039	42	0	2,67	0,11	3,94
-10	2	27278	52	0	3,14	0,10	3,18
-10	1	26644	39	0	3,53	0,12	3,40
-10	0,5	25921	33	0	3,92	0,12	3,06
-10	0,2	24884	8	0	4,54	0,17	3,74
-10	0,1	24039	9	0	5,08	0,16	3,15
-10	0,01	21422	251	1	6,80	0,03	0,44
4	25	24085	603	3	5,83	0,11	1,80
4	20	23754	553	2	6,14	0,05	0,81
4	10	22577	487	2	7,04	0,08	1,07
4	5	21309	444	2	7,88	0,05	0,70
4	2	19541	416	2	9,11	0,08	0,88
4	1	18142	383	2	10,14	0,10	0,99
4	0,5	16724	372	2	11,32	0,09	0,84
4	0,2	14834	347	2	13,03	0,15	1,11
4	0,1	13375	364	3	14,48	0,15	1,04
4	0,01	8548	207	2	20,57	0,05	0,27
21	25	13111	393	3	16,22	0,27	1,63
21	20	12478	320	3	17,41	0,36	2,04
21	10	10896	242	2	18,82	0,12	0,64
21	5	9331	176	2	20,72	0,37	1,79
21	2	7409	82	1	23,45	0,57	2,45
21	1	6096	32	1	25,70	0,55	2,14
21	0,5	4900	7	0	28,23	0,46	1,61
21	0,2	3569	24	1	31,56	0,25	0,79
21	0,1	2724	29	1	33,50	0,34	1,00
21	0,01	985	16	2	37,72	1,04	2,74
37	25	3194	76	2	39,74	0,26	0,64
37	20	2928	66	2	39,47	0,01	0,04
37	10	2114	59	3	41,05	0,05	0,13
37	5	1469	52	4	42,17	0,04	0,09
37	2	887	39	4	42,68	0,20	0,46
37	1	613	30	5	41,88	0,69	1,65
37	0,5	433	20	5	39,76	1,07	2,69
37	0,2	285	11	4	36,12	1,41	3,90
37	0,1	214	7	3	32,67	1,41	4,32
37	0,01	114	2	1	23,44	4,29	18,33
54	25	574	30	5	42,09	0,78	1,85
54	20	481	20	4	43,82	0,78	1,78
54	10	335	13	4	40,86	0,47	1,16
54	5	231	9	4	38,72	0,68	1,76
54	2	145	4	3	35,06	0,30	0,86
54	1	115	1	1	30,07	0,59	1,96
54	0,5	95	2	2	26,25	0,69	2,63
54	0,2	75	1	1	23,12	0,72	3,09
54	0,1	63	1	1	20,16	2,09	10,37
54	0,01	47	3	6	12,53	0,73	5,83

Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70							
Temperatura	Frequência (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	30926	72	0	1,74	0,17	9,51
-10	20	30834	81	0	1,83	0,09	4,66
-10	10	30393	74	0	2,09	0,09	4,31
-10	5	29866	100	0	2,34	0,10	4,07
-10	2	29105	126	0	2,72	0,12	4,24
-10	1	28456	168	1	3,08	0,13	4,22
-10	0,5	27778	170	1	3,42	0,13	3,80
-10	0,2	26794	174	1	3,95	0,16	4,05
-10	0,1	26002	148	1	4,32	0,12	2,78
-10	0,01	23474	33	0	5,60	0,02	0,36
4	25	24766	649	3	5,46	0,09	1,56
4	20	24455	596	2	5,63	0,12	2,04
4	10	23374	554	2	6,18	0,04	0,65
4	5	22224	518	2	6,92	0,09	1,23
4	2	20620	476	2	7,98	0,12	1,50
4	1	19347	433	2	8,84	0,11	1,30
4	0,5	18026	389	2	9,79	0,12	1,23
4	0,2	16268	334	2	11,28	0,22	1,91
4	0,1	14918	339	2	12,36	0,16	1,25
4	0,01	10526	187	2	17,19	0,33	1,95
21	25	15142	125	1	13,16	0,01	0,08
21	20	14711	89	1	13,69	0,05	0,37
21	10	13217	98	1	15,22	0,05	0,36
21	5	11710	107	1	17,00	0,03	0,18
21	2	9769	64	1	19,48	0,08	0,44
21	1	8371	76	1	21,50	0,04	0,19
21	0,5	7080	74	1	23,62	0,06	0,28
21	0,2	5511	84	2	26,53	0,09	0,34
21	0,1	4417	67	2	28,80	0,17	0,59
21	0,01	1715	33	2	35,47	0,97	2,75
37	25	4700	5	0	32,98	0,16	0,49
37	20	4342	15	0	33,02	0,26	0,77
37	10	3315	15	0	35,25	0,32	0,91
37	5	2459	12	0	37,21	0,45	1,22
37	2	1597	14	1	38,90	0,77	1,98
37	1	1136	16	1	39,38	1,05	2,65
37	0,5	814	14	2	38,56	1,17	3,03
37	0,2	530	15	3	36,74	1,24	3,36
37	0,1	384	15	4	34,44	1,18	3,43
37	0,01	172	13	7	27,10	0,78	2,86
54	25	1141	12	1	42,26	0,45	1,06
54	20	1012	17	2	41,59	0,81	1,96
54	10	710	16	2	40,08	0,99	2,47
54	5	498	17	3	38,73	1,29	3,33
54	2	318	20	6	36,58	1,49	4,06
54	1	242	19	8	33,65	1,69	5,02
54	0,5	196	16	8	30,71	1,79	5,83
54	0,2	154	14	9	26,84	1,68	6,26
54	0,1	130	15	11	16,29	4,17	25,58
54	0,01	81	26	32	14,56	4,13	28,37

Mistura Convencional CAP 60/85

Temperatura	Frequência (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	29827	674	2	2,31	0,03	1,08
-10	20	29622	618	2	2,52	0,01	0,20
-10	10	28972	563	2	2,94	0,03	1,02
-10	5	28284	540	2	3,34	0,02	0,45
-10	2	27234	518	2	3,93	0,02	0,51
-10	1	26341	512	2	4,44	0,04	0,90
-10	0,5	25370	516	2	4,97	0,04	0,80
-10	0,2	24018	554	2	5,80	0,04	0,78
-10	0,1	22944	527	2	6,46	0,01	0,23
-10	0,01	19509	476	2	8,87	0,17	1,86
4	25	21819	180	1	7,99	0,18	2,19
4	20	21354	134	1	8,24	0,31	3,70
4	10	20007	36	0	9,23	0,35	3,79
4	5	18593	37	0	10,32	0,43	4,12
4	2	16670	132	1	11,92	0,50	4,15
4	1	15172	216	1	13,21	0,56	4,24
4	0,5	13646	308	2	14,69	0,65	4,42
4	0,2	11705	309	3	16,80	0,69	4,08
4	0,1	10230	209	2	18,42	0,65	3,50
4	0,01	6174	125	2	24,60	0,42	1,69
21	25	10697	201	2	19,44	0,41	2,11
21	20	10212	166	2	19,95	0,37	1,83
21	10	8765	119	1	22,18	0,38	1,71
21	5	7373	88	1	24,43	0,34	1,39
21	2	5698	60	1	27,56	0,40	1,43
21	1	4559	61	1	30,03	0,33	1,08
21	0,5	3579	37	1	32,39	0,05	0,17
21	0,2	2500	12	0	35,18	0,23	0,67
21	0,1	1834	3	0	36,94	0,40	1,07
21	0,01	603	8	1	39,44	1,46	3,70
37	25	2409	132	5	39,48	0,68	1,74
37	20	2162	103	5	39,60	0,75	1,89
37	10	1548	80	5	40,39	0,97	2,39
37	5	1085	68	6	40,65	1,19	2,92
37	2	672	53	8	39,97	0,97	2,43
37	1	475	35	7	38,20	0,87	2,26
37	0,5	347	23	7	34,95	0,52	1,47
37	0,2	240	13	6	29,44	1,42	4,81
37	0,1	188	10	5	26,00	0,97	3,73
37	0,01	112	2	2	18,48	1,08	5,84
54	25	522	5	1	40,64	0,64	1,56
54	20	445	24	5	40,76	1,01	2,48
54	10	315	20	6	37,64	1,37	3,64
54	5	215	13	6	35,51	1,38	3,89
54	2	129	7	5	34,09	0,76	2,22
54	1	102	5	4	30,50	0,59	1,93
54	0,5	83	3	4	27,36	0,20	0,71
54	0,2	64	3	5	24,43	0,27	1,08
54	0,1	53	2	3	23,00	0,37	1,59
54	0,01	30	2	7	19,93	1,29	6,47

Mistura Morna CAP 60/85							
Temperatura	Frequência (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	27481	769	3	2,43	0,01	0,21
-10	20	27549	607	2	2,65	0,10	3,77
-10	10	27023	606	2	2,88	0,05	1,74
-10	5	26439	564	2	3,27	0,06	1,99
-10	2	25543	511	2	3,84	0,09	2,22
-10	1	24812	465	2	4,34	0,10	2,30
-10	0,5	23942	386	2	4,88	0,11	2,15
-10	0,2	22757	318	1	5,70	0,10	1,67
-10	0,1	21767	257	1	6,38	0,13	1,96
-10	0,01	18718	320	2	8,60	0,06	0,64
4	25	21758	414	2	7,25	0,04	0,55
4	20	21396	398	2	7,61	0,09	1,12
4	10	20165	398	2	8,60	0,03	0,35
4	5	18851	390	2	9,72	0,01	0,10
4	2	17003	337	2	11,30	0,03	0,22
4	1	15533	312	2	12,68	0,04	0,36
4	0,5	14053	240	2	14,21	0,05	0,39
4	0,2	12084	163	1	16,49	0,04	0,21
4	0,1	10590	122	1	18,33	0,04	0,22
4	0,01	6182	285	5	25,99	0,71	2,73
21	25	10393	20	0	20,37	0,08	0,39
21	20	9938	61	1	21,05	0,13	0,62
21	10	8446	92	1	23,32	0,08	0,36
21	5	7039	96	1	25,71	0,13	0,49
21	2	5375	89	2	28,86	0,23	0,78
21	1	4250	78	2	31,19	0,33	1,04
21	0,5	3284	71	2	33,16	0,46	1,39
21	0,2	2234	64	3	35,38	0,73	2,06
21	0,1	1616	61	4	36,19	0,89	2,46
21	0,01	537	44	8	33,64	0,77	2,27
37	25	2440	189	8	38,20	0,37	0,97
37	20	2191	180	8	38,29	0,67	1,75
37	10	1547	140	9	39,01	0,79	2,04
37	5	1074	104	10	39,09	0,81	2,09
37	2	660	67	10	38,33	0,57	1,47
37	1	476	47	10	35,93	0,17	0,47
37	0,5	360	36	10	32,84	0,05	0,14
37	0,2	258	23	9	28,80	0,26	0,90
37	0,1	205	15	7	25,76	0,66	2,56
37	0,01	122	4	3	17,61	0,95	5,37
54	25	439	2	0	39,06	2,39	6,12
54	20	362	43	12	41,67	0,16	0,38
54	10	270	32	12	37,32	0,66	1,76
54	5	204	23	11	33,79	0,72	2,15
54	2	141	16	11	28,20	0,48	1,72
54	1	120	12	10	23,39	0,95	4,06
54	0,5	104	10	9	21,34	0,11	0,52
54	0,2	89	6	7	18,01	0,01	0,06
54	0,1	78	3	4	14,35	2,00	13,91
54	0,01	58	2	3	10,88	1,33	12,22

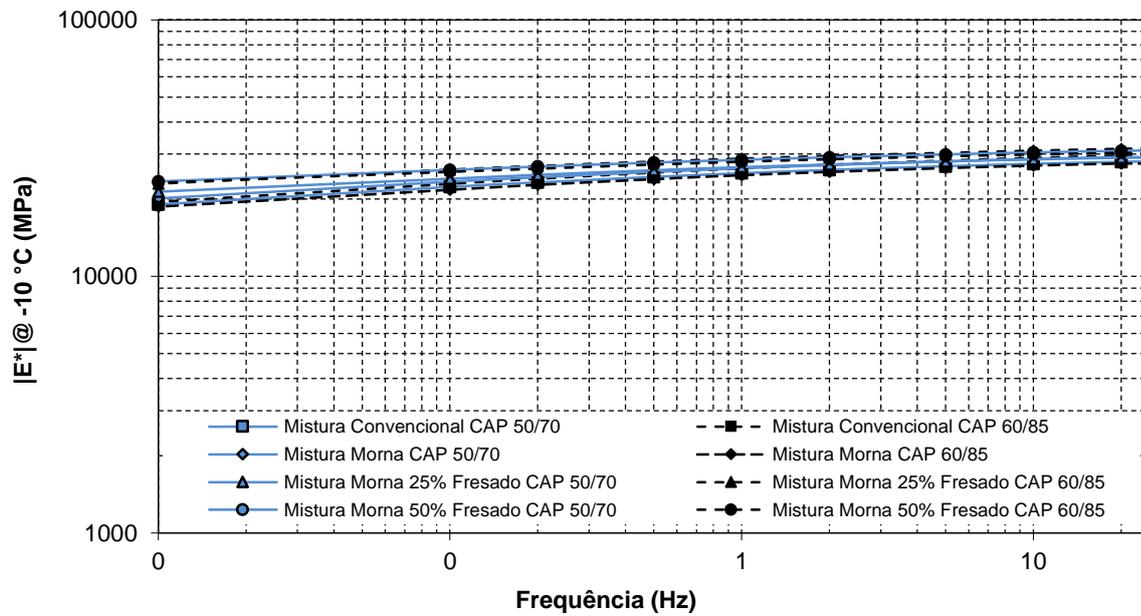
Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85

Temperatura	Frequência (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	31614	379	1	1,01	0,54	53,23
-10	20	31467	298	1	1,61	0,14	8,41
-10	10	30935	366	1	2,18	0,13	5,96
-10	5	30329	375	1	2,49	0,11	4,42
-10	2	29508	414	1	2,97	0,17	5,56
-10	1	28789	412	1	3,30	0,16	4,70
-10	0,5	28050	466	2	3,69	0,18	4,88
-10	0,2	26956	504	2	4,28	0,23	5,37
-10	0,1	26076	528	2	4,76	0,26	5,46
-10	0,01	22982	515	2	6,38	0,42	6,58
4	25	23287	991	4	6,37	0,77	12,18
4	20	22882	906	4	6,94	0,63	9,01
4	10	21620	907	4	7,71	0,79	10,25
4	5	20293	940	5	8,77	0,92	10,55
4	2	18477	952	5	10,23	1,01	9,83
4	1	17103	939	5	11,42	1,18	10,33
4	0,5	15670	973	6	12,67	1,31	10,34
4	0,2	13826	1015	7	14,63	1,61	11,04
4	0,1	12582	922	7	15,95	1,65	10,34
4	0,01	8742	480	5	20,43	1,65	8,05
21	25	13564	246	2	16,02	0,10	0,62
21	20	13044	213	2	16,57	0,09	0,54
21	10	11454	193	2	18,48	0,13	0,68
21	5	9947	196	2	20,49	0,16	0,78
21	2	8038	161	2	23,22	0,23	1,01
21	1	6722	150	2	25,32	0,29	1,15
21	0,5	5518	134	2	27,38	0,33	1,21
21	0,2	4100	115	3	30,09	0,45	1,50
21	0,1	3167	121	4	31,87	0,54	1,68
21	0,01	1131	92	8	35,03	0,79	2,26
37	25	4171	110	3	34,88	0,49	1,40
37	20	3796	93	2	35,21	0,49	1,39
37	10	2806	64	2	36,58	0,85	2,31
37	5	2017	36	2	37,37	1,17	3,13
37	2	1285	14	1	37,05	1,53	4,12
37	1	915	5	1	36,45	1,15	3,14
37	0,5	683	6	1	35,06	1,04	2,95
37	0,2	474	5	1	32,37	1,57	4,84
37	0,1	364	4	1	30,09	2,03	6,75
37	0,01	196	5	3	18,48	2,46	13,31
54	25	1106	55	5	40,86	0,03	0,06
54	20	987	51	5	39,10	0,38	0,97
54	10	700	47	7	37,19	0,61	1,64
54	5	498	43	9	35,58	0,78	2,18
54	2	332	41	12	33,64	1,00	2,96
54	1	263	34	13	30,56	1,25	4,09
54	0,5	217	30	14	27,45	0,93	3,39
54	0,2	172	25	15	23,50	0,89	3,79
54	0,1	148	21	14	19,99	0,33	1,65
54	0,01	98	13	13	12,37	3,70	29,91

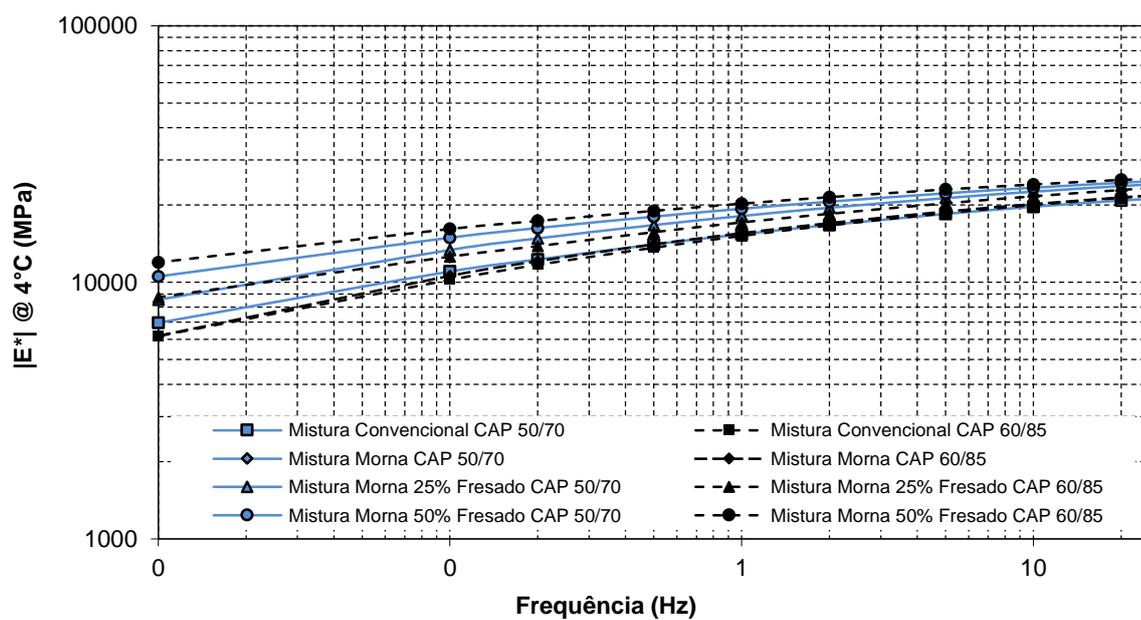
Mistura Morna 50% Fresado CAP 60/85							
Temperatura	Frequência (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	30221	78	0	1,56	0,18	11,90
-10	20	30309	221	1	1,81	0,05	2,49
-10	10	29887	261	1	2,09	0,10	4,56
-10	5	29377	270	1	2,33	0,09	3,66
-10	2	28617	312	1	2,73	0,10	3,66
-10	1	27988	360	1	3,06	0,17	5,56
-10	0,5	27285	390	1	3,41	0,16	4,69
-10	0,2	26298	495	2	3,89	0,21	5,40
-10	0,1	25573	519	2	4,24	0,26	6,02
-10	0,01	23197	144	1	5,54	0,17	3,07
4	25	25264	423	2	4,49	0,59	13,14
4	20	25082	364	1	5,14	0,40	7,78
4	10	24068	361	1	5,66	0,44	7,69
4	5	23012	409	2	6,26	0,41	6,47
4	2	21470	448	2	7,17	0,40	5,58
4	1	20247	484	2	7,91	0,46	5,82
4	0,5	18983	514	3	8,72	0,47	5,39
4	0,2	17337	553	3	9,92	0,48	4,84
4	0,1	16130	526	3	10,90	0,58	5,32
4	0,01	11939	390	3	14,95	0,76	5,05
21	25	15438	168	1	12,62	0,01	0,08
21	20	14946	217	1	13,10	0,08	0,61
21	10	13472	200	1	14,54	0,09	0,62
21	5	12025	181	2	16,22	0,11	0,65
21	2	10104	206	2	18,64	0,13	0,67
21	1	8753	163	2	20,56	0,07	0,36
21	0,5	7443	163	2	22,62	0,09	0,40
21	0,2	5869	133	2	25,42	0,21	0,83
21	0,1	4736	109	2	27,56	0,25	0,89
21	0,01	1889	52	3	34,07	0,73	2,16
37	25	5801	30	1	29,63	0,18	0,59
37	20	5411	16	0	30,05	0,33	1,08
37	10	4279	5	0	32,38	0,34	1,05
37	5	3286	11	0	34,51	0,42	1,22
37	2	2235	14	1	36,50	0,50	1,36
37	1	1626	11	1	37,43	0,70	1,86
37	0,5	1191	17	1	37,64	1,11	2,95
37	0,2	777	14	2	37,23	1,75	4,70
37	0,1	559	10	2	36,93	3,03	8,20
37	0,01	235	12	5	17,47	10,57	60,50
54	25	1425	71	5	40,51	0,60	1,47
54	20	1305	57	4	38,97	0,29	0,74
54	10	933	44	5	37,74	0,18	0,48
54	5	662	32	5	36,62	0,09	0,23
54	2	425	21	5	35,05	0,00	0,00
54	1	325	14	4	32,46	0,25	0,75
54	0,5	259	11	4	25,47	0,37	1,45
54	0,2	198	7	4	22,18	0,29	1,31
54	0,1	165	7	4	21,12	0,08	0,36
54	0,01	104	0	0	18,94	2,30	12,12

APÊNDICE C - ISOTERMAS E ISÓCRONAS DE $|E^*|$ E ϕ DO ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

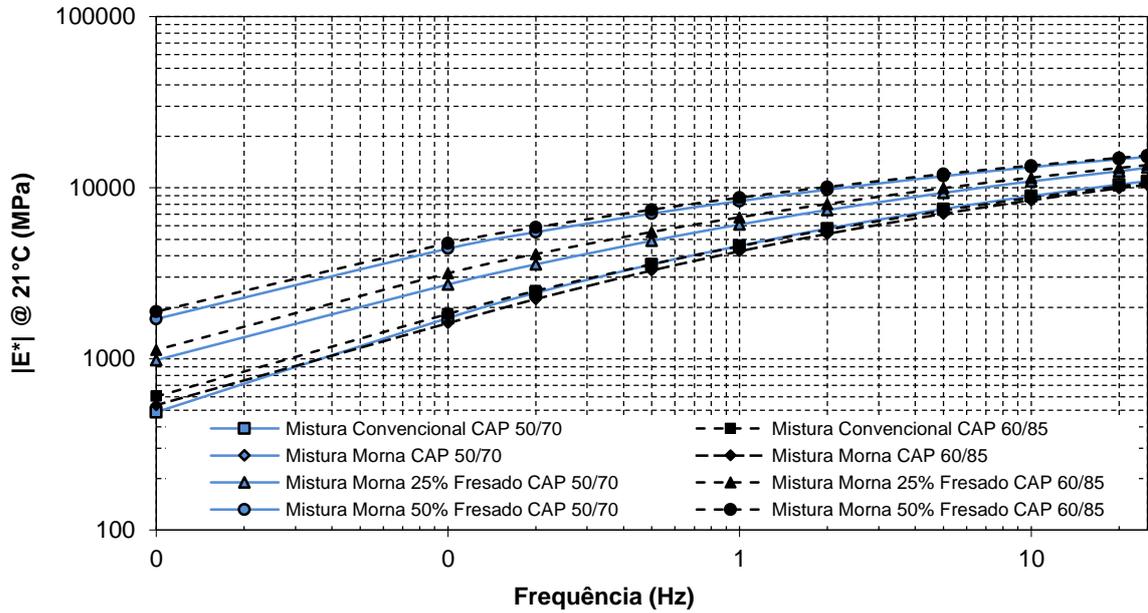
Apêndice C 1 - Isoterma de $|E^*|$ a -10°C



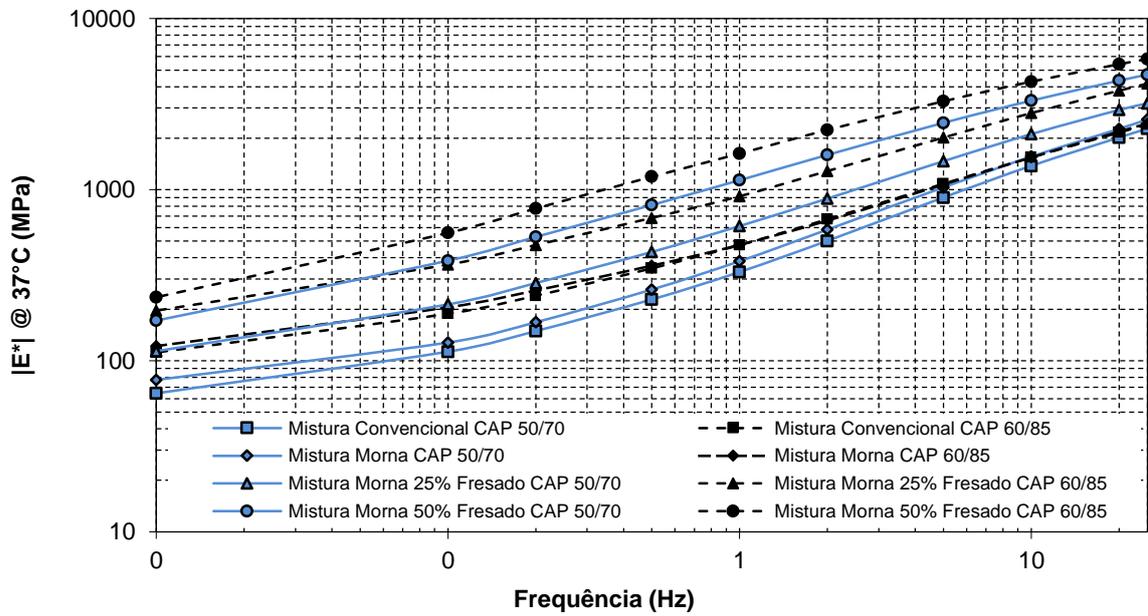
Apêndice C 2 - Isoterma de $|E^*|$ a 4°C



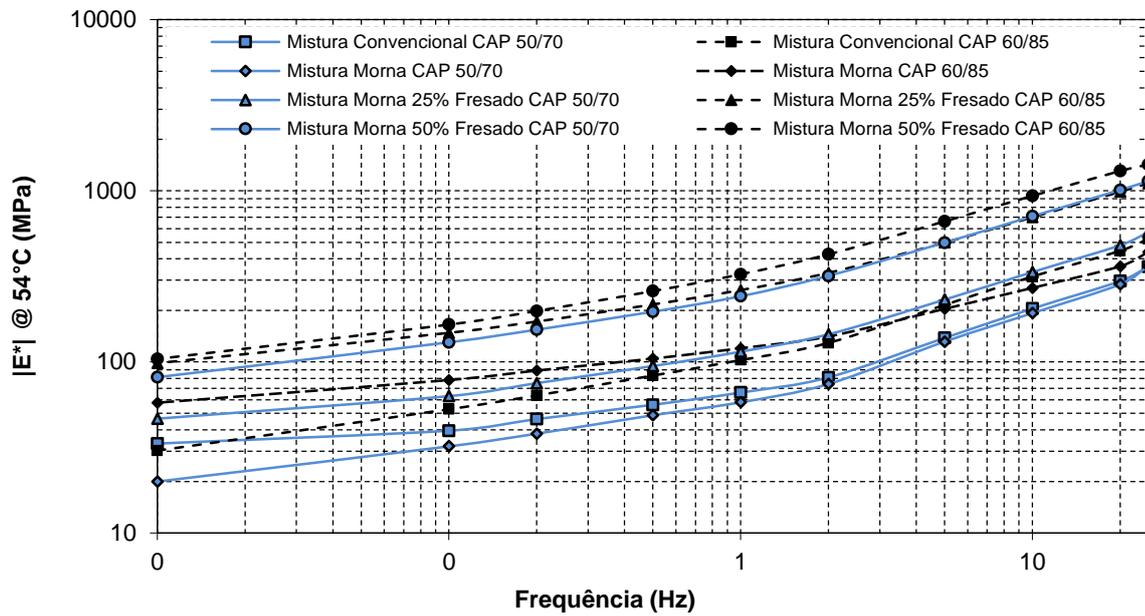
Apêndice C 3 - Isoterma de $|E^*|$ a 21°C



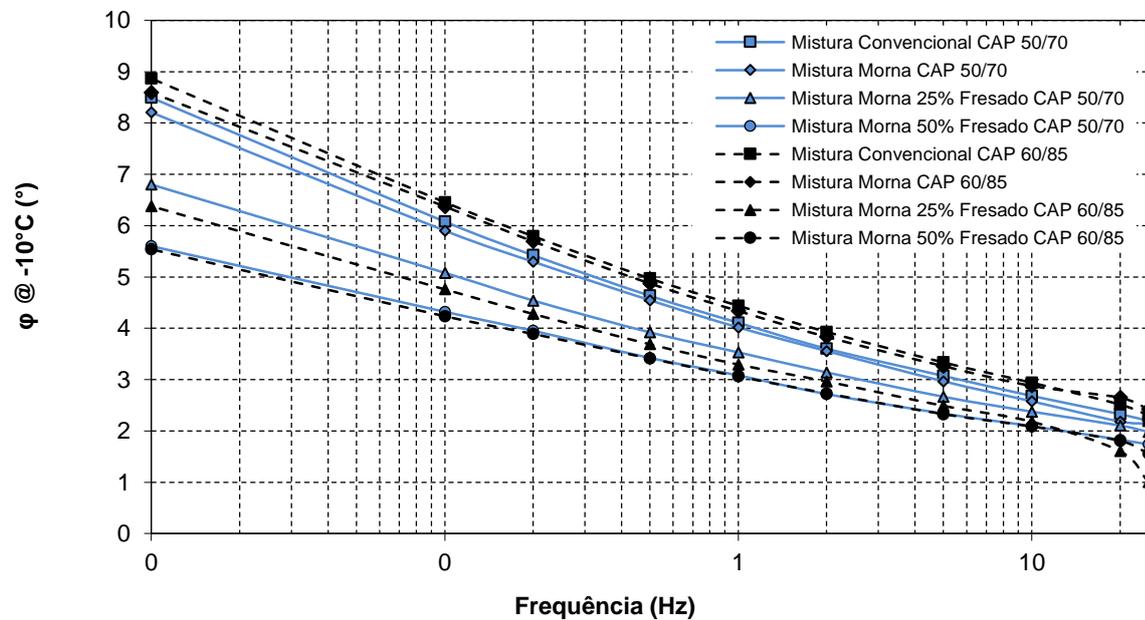
Apêndice C 4 - Isoterma de $|E^*|$ a 37°C



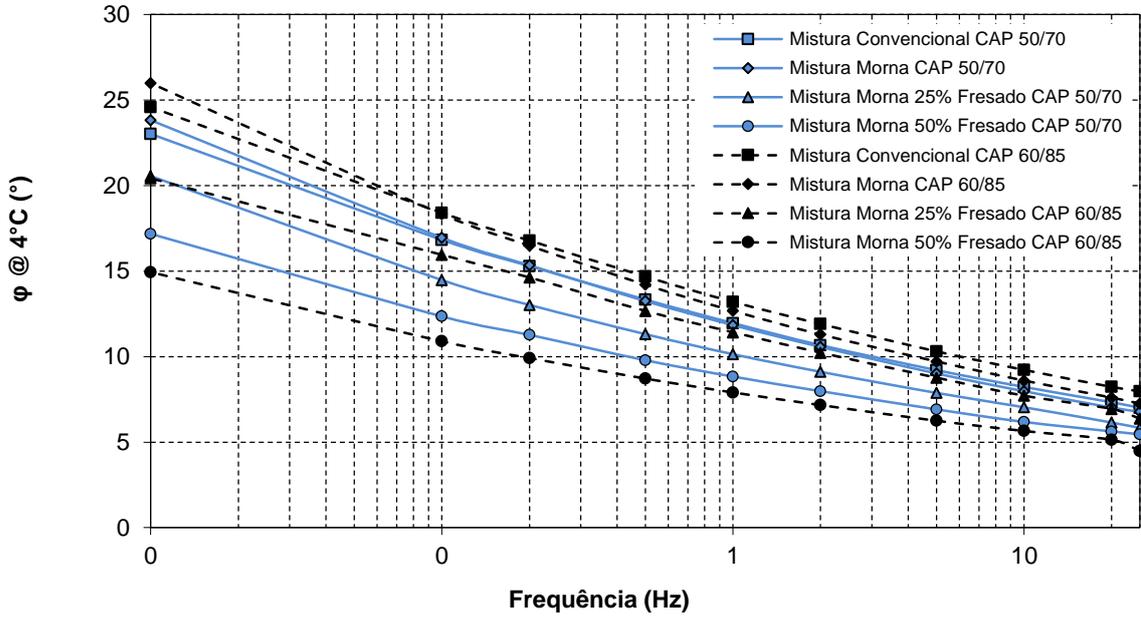
Apêndice C 5 - Isoterma de $|E^*|$ a 54°C



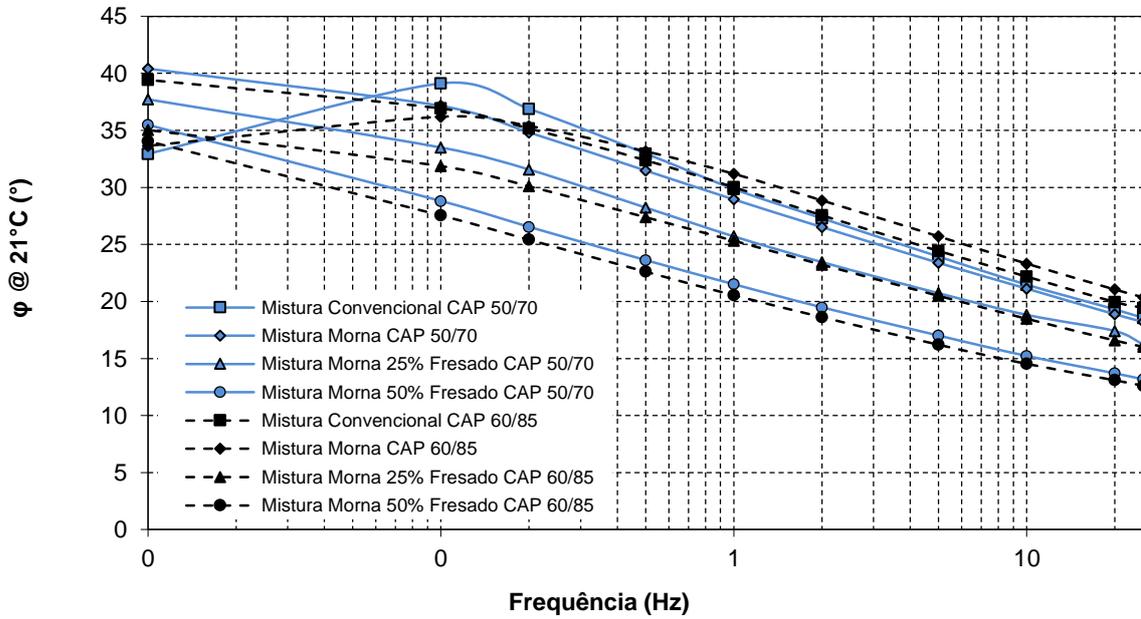
Apêndice C 6 - Isoterma de ϕ a -10°C

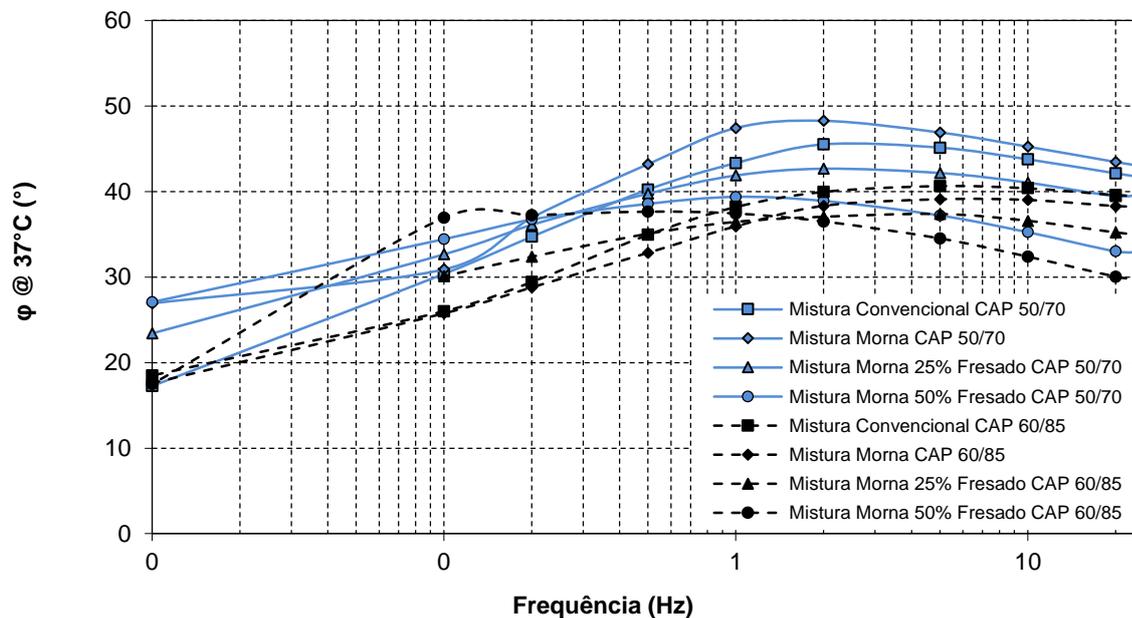
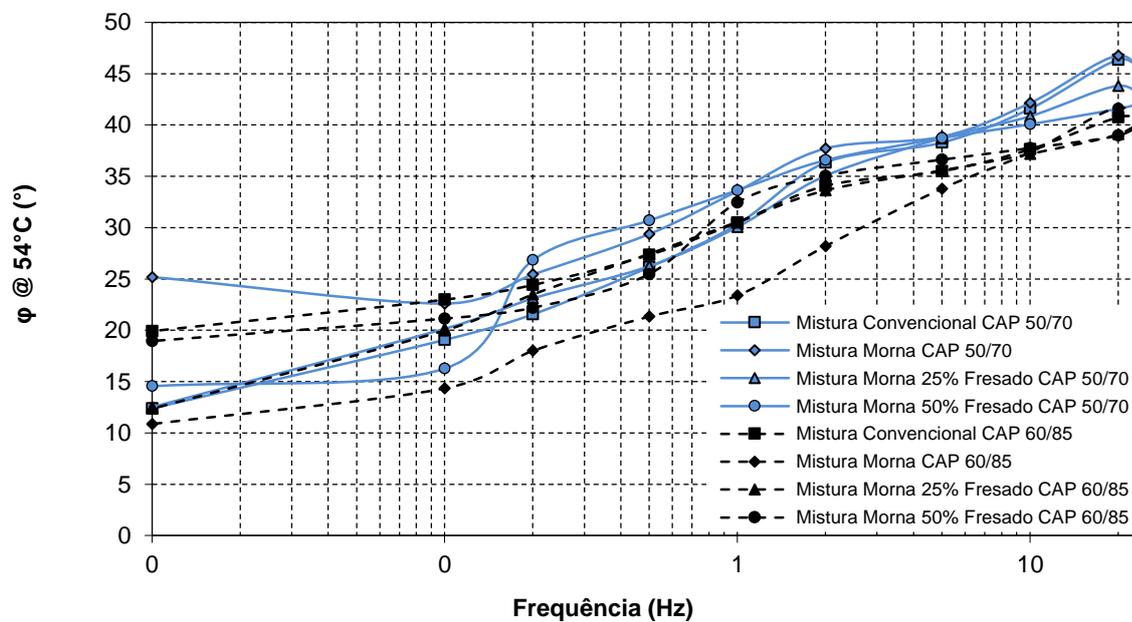


Apêndice C 7 - Isoterma de ϕ a 4°C

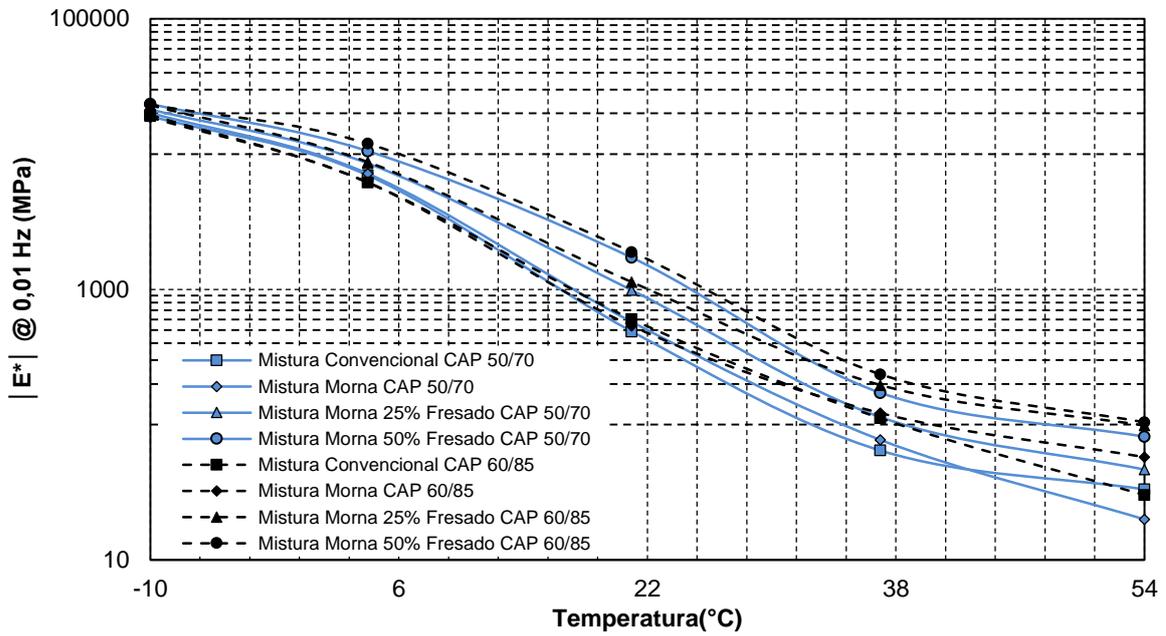


Apêndice C 8 - Isoterma de ϕ a 21°C

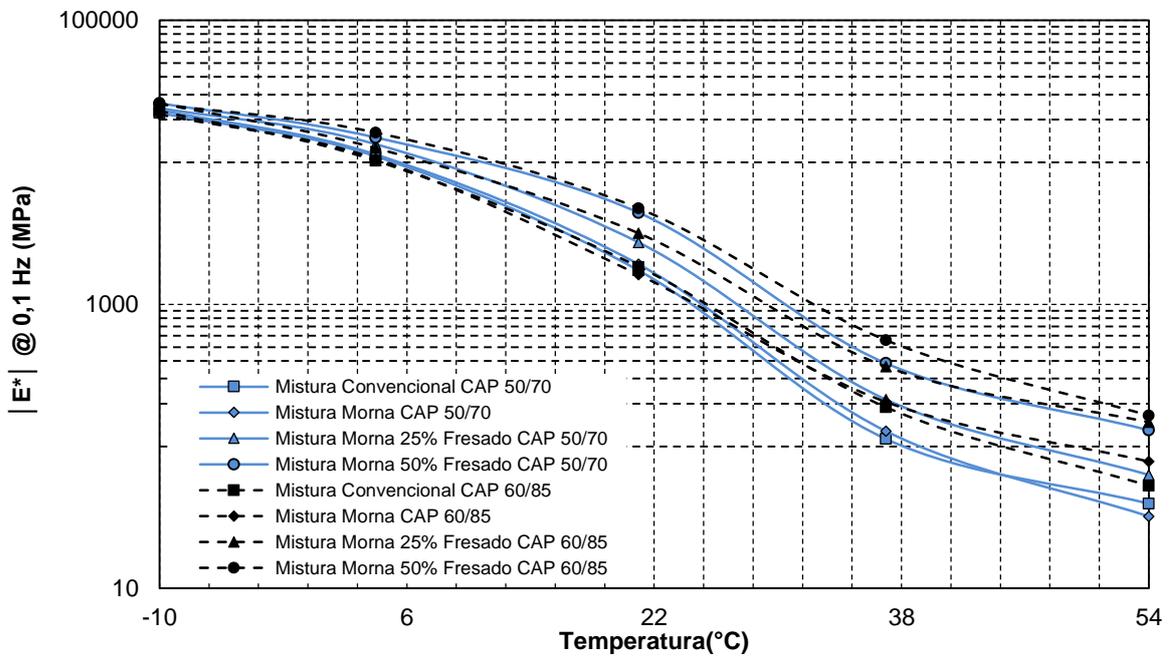


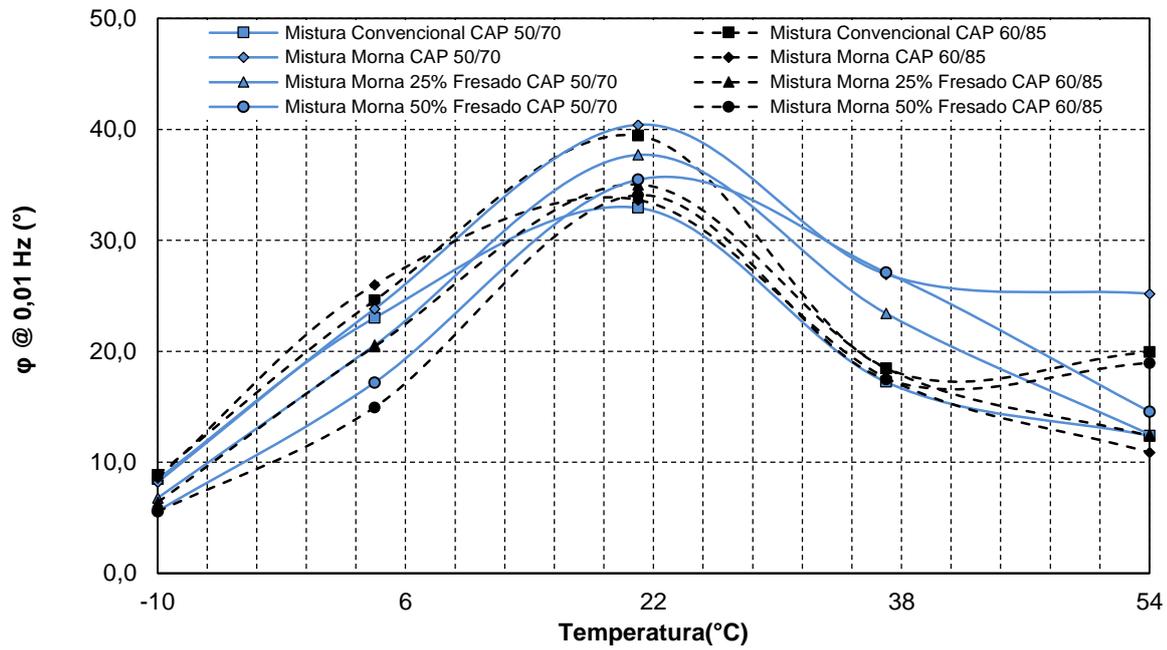
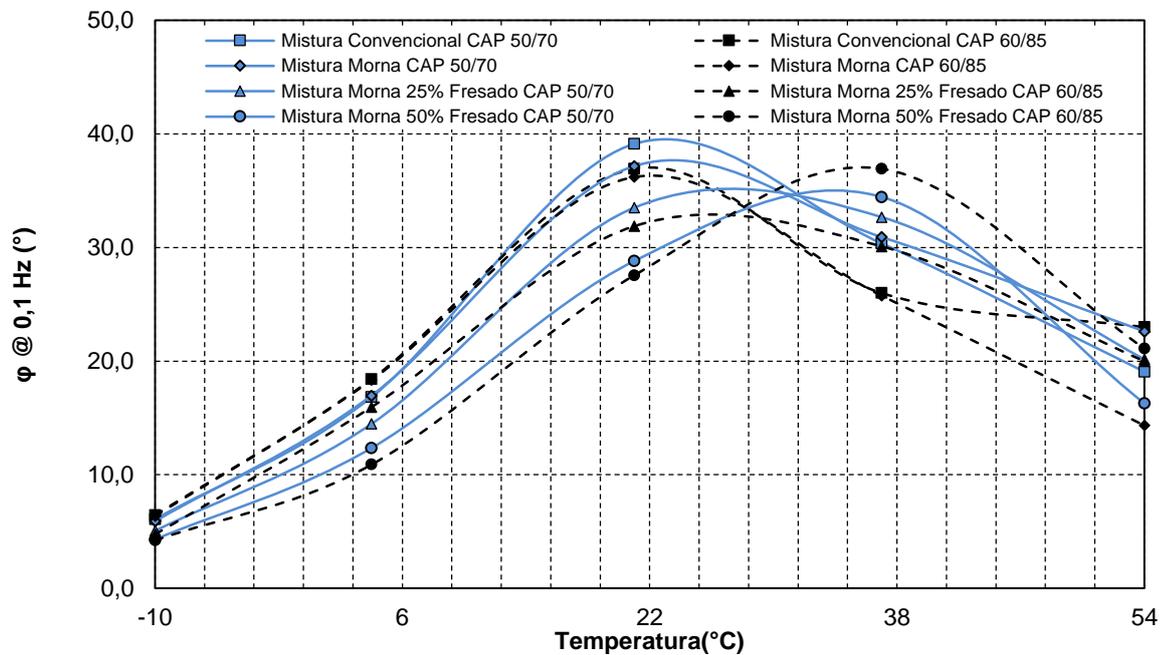
Apêndice C 9 - Isoterma de ϕ a 37°CApêndice C 10 - Isoterma de ϕ a 54°C

Apêndice C 11 - Isócrona de $|E^*|$ a 0,01Hz

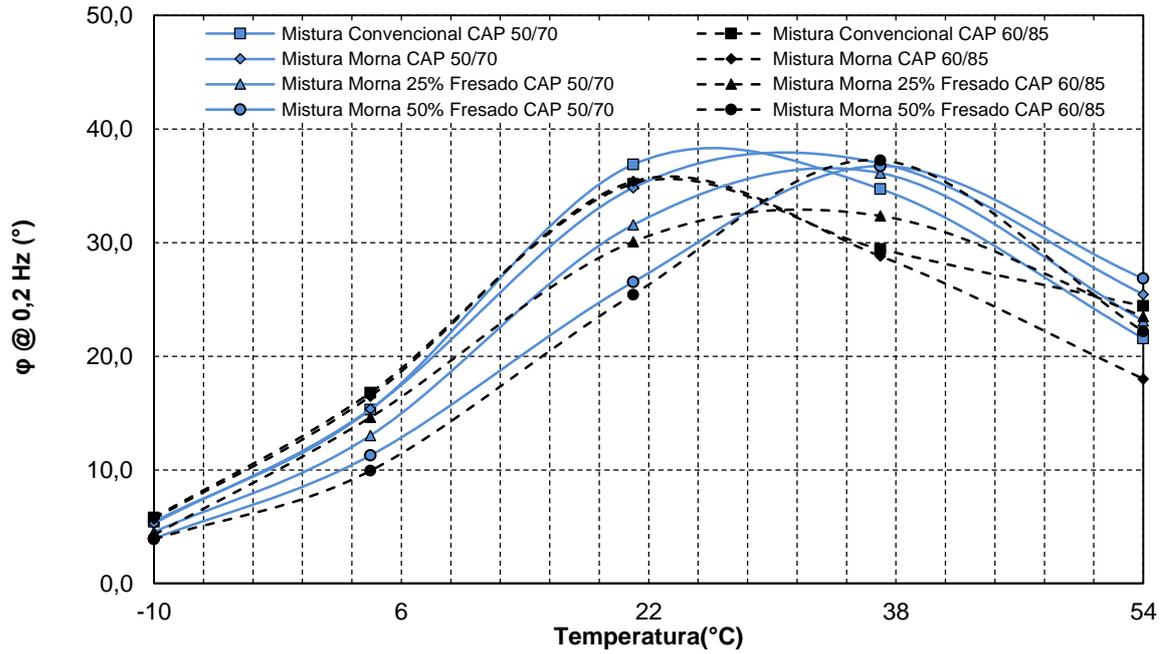


Apêndice C 12 - Isócrona de $|E^*|$ a 0,1Hz

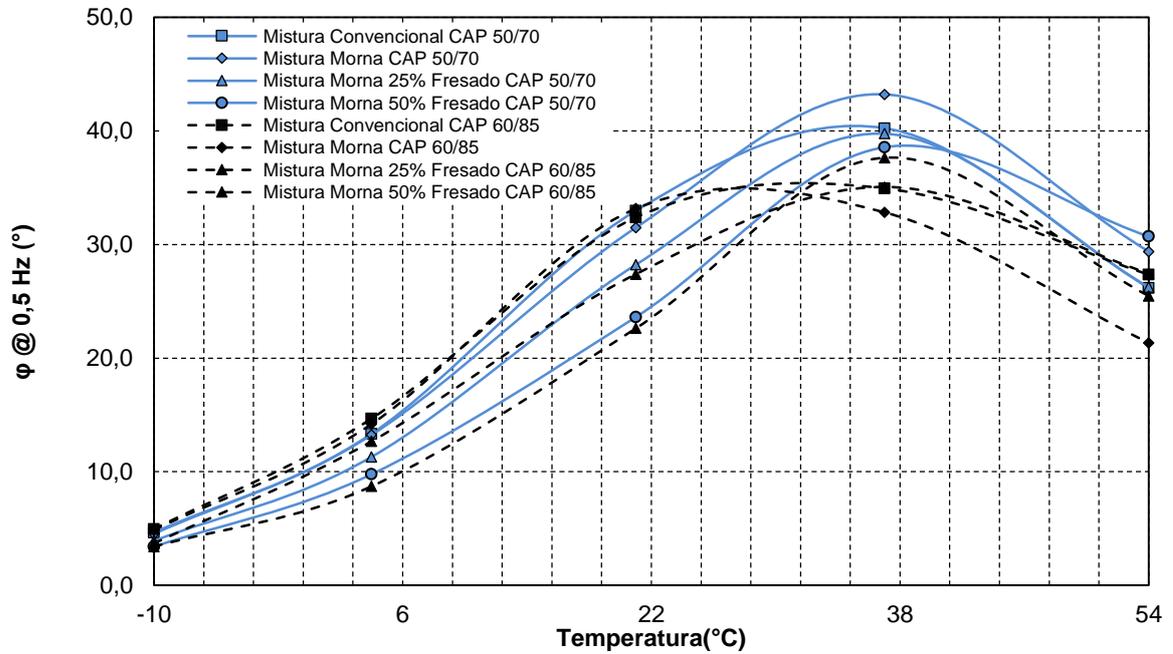


Apêndice C 21 - Isócrona de φ a 0,01HzApêndice C 22 - Isócrona de φ a 0,1Hz

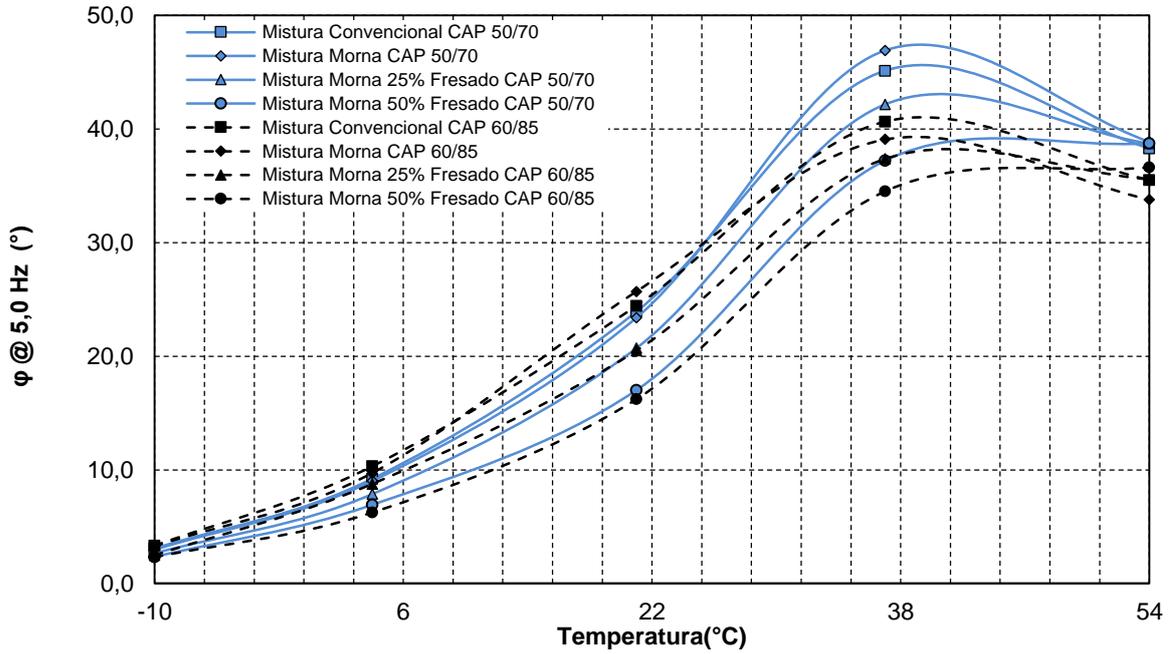
Apêndice C 23 - Isócrona de ϕ a 0,2Hz



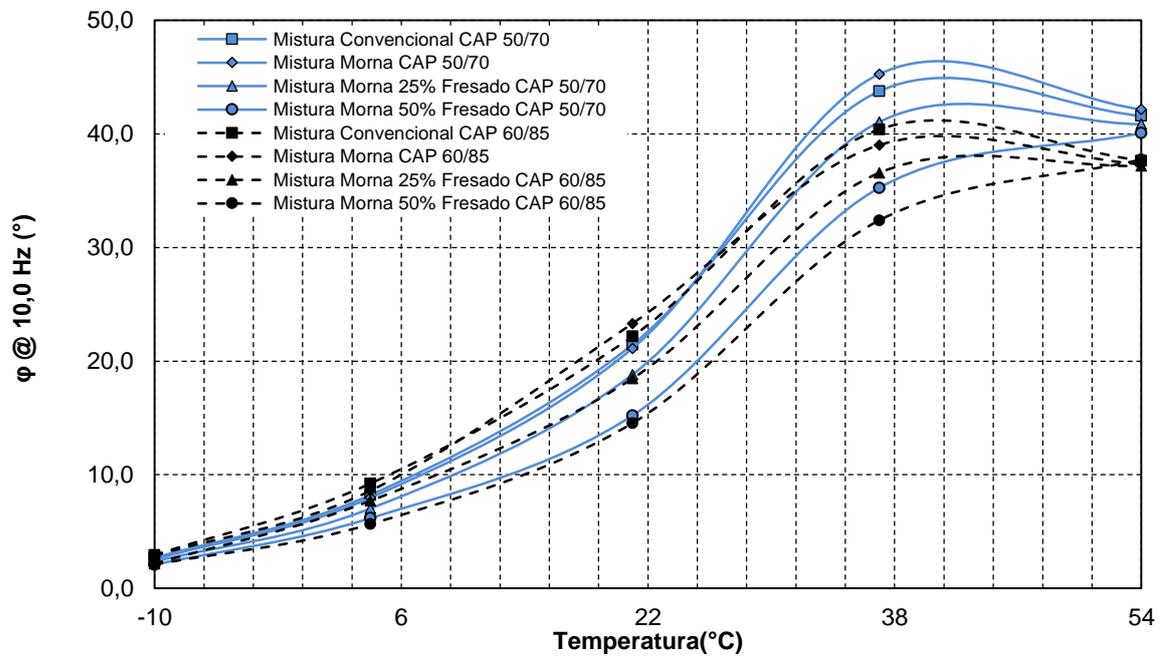
Apêndice C 24 - Isócrona de ϕ a 0,5Hz



Apêndice C 27 - Isócrona de ϕ a 5,0Hz

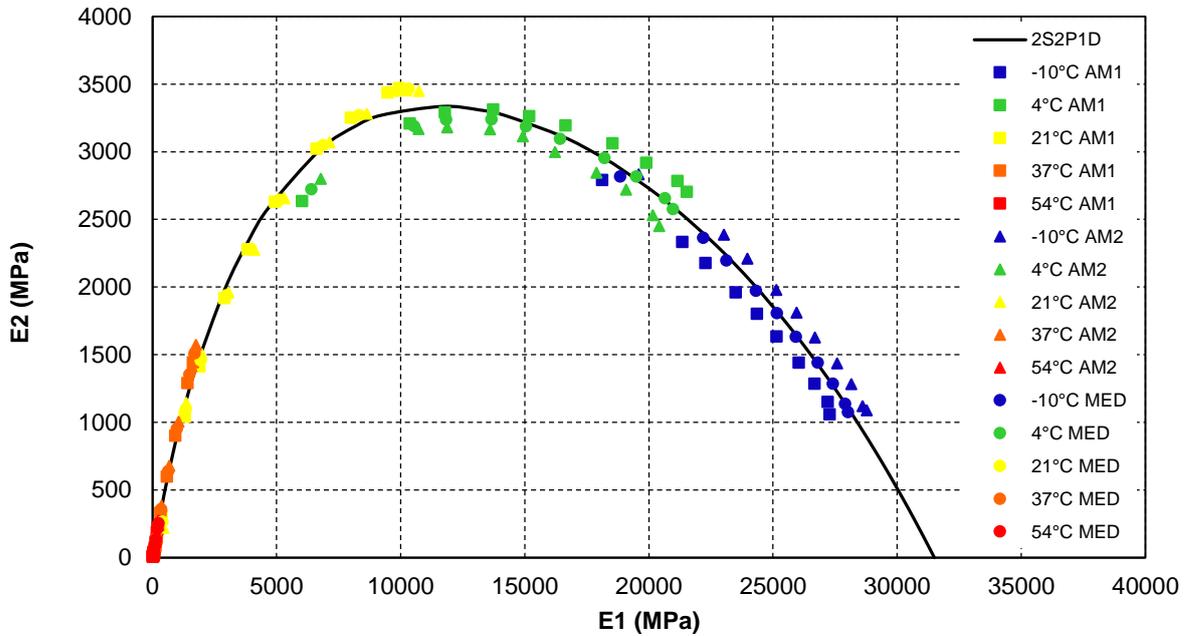


Apêndice C 28 - Isócrona de ϕ a 10,0Hz

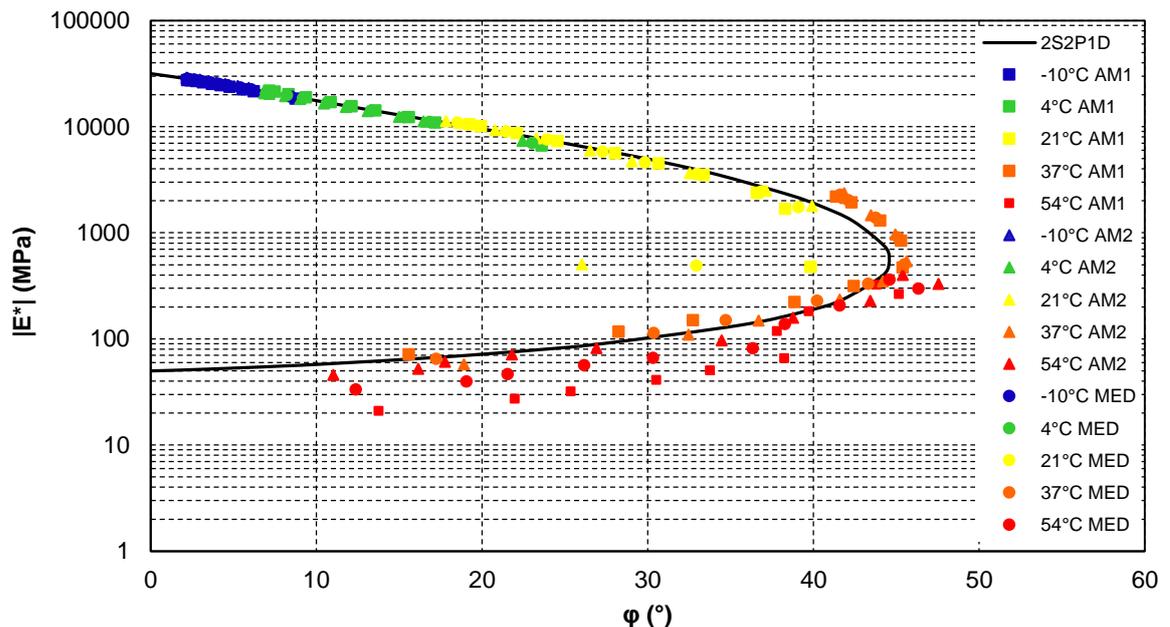


APÊNDICE D - ESPAÇOS COLE COLE E DIAGRAMA DE BLACK DO ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO PARA TODAS AS MISTURAS ESTUDADAS

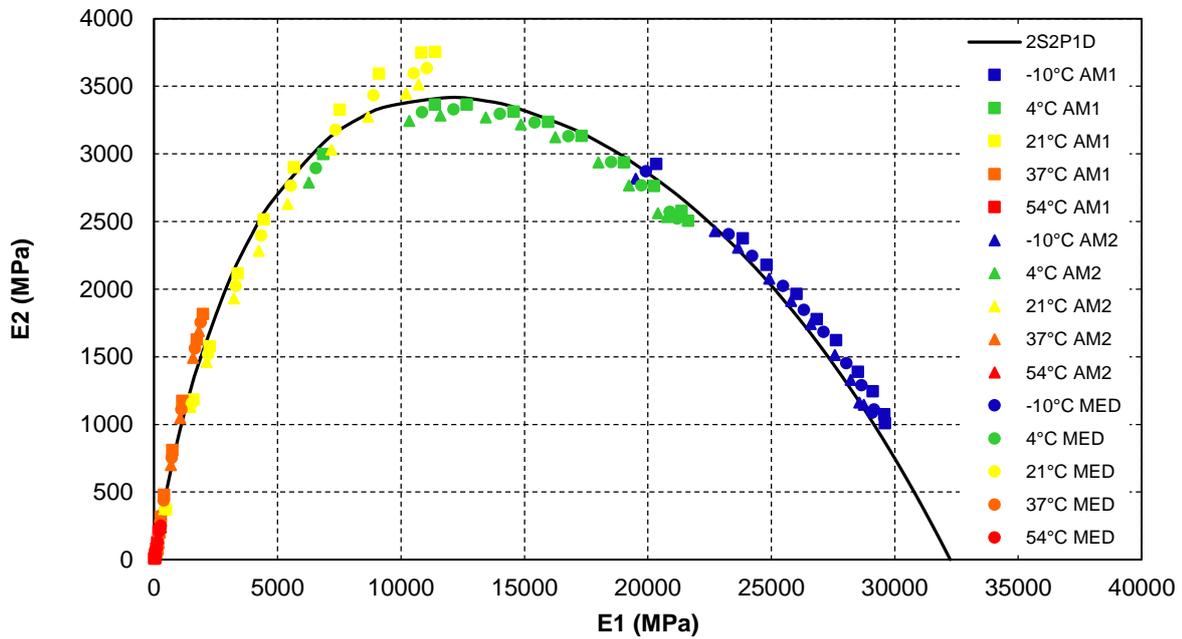
Apêndice D 1 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Convencional CAP 50/70



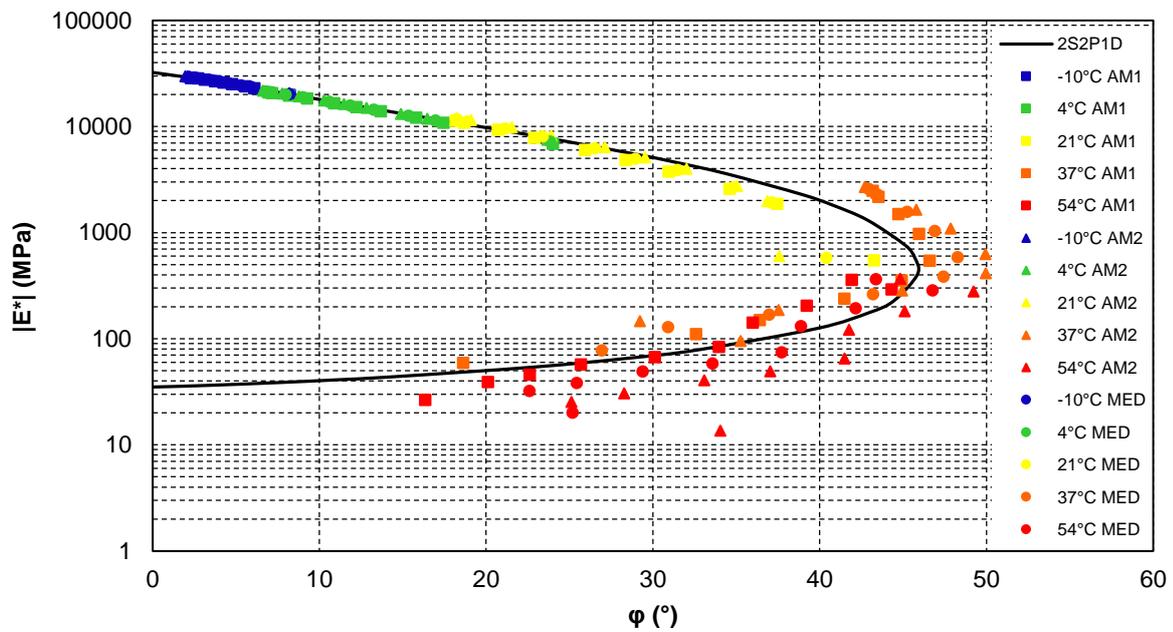
Apêndice D 2 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Convencional CAP 50/70



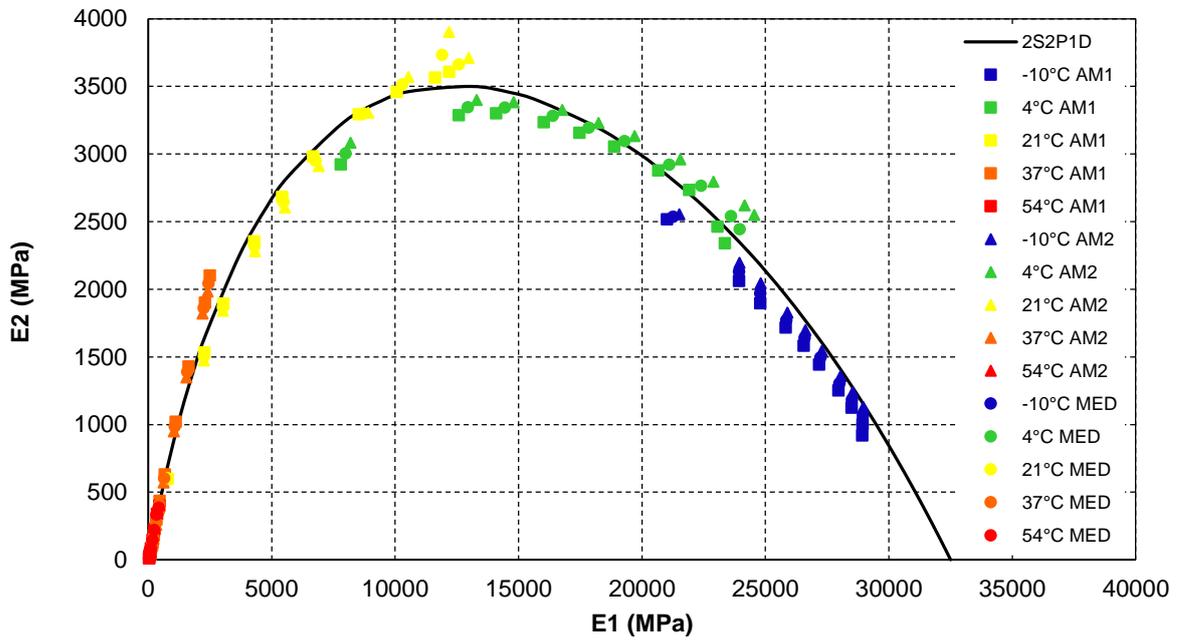
Apêndice D 3 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna CAP 50/70



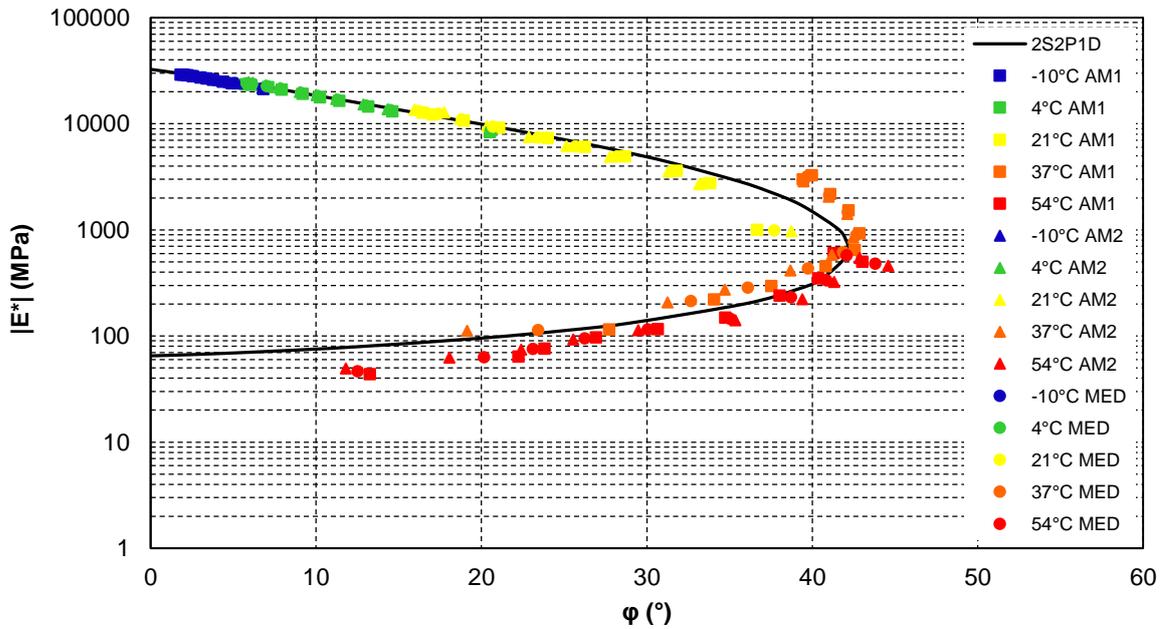
Apêndice D 4 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna CAP 50/70



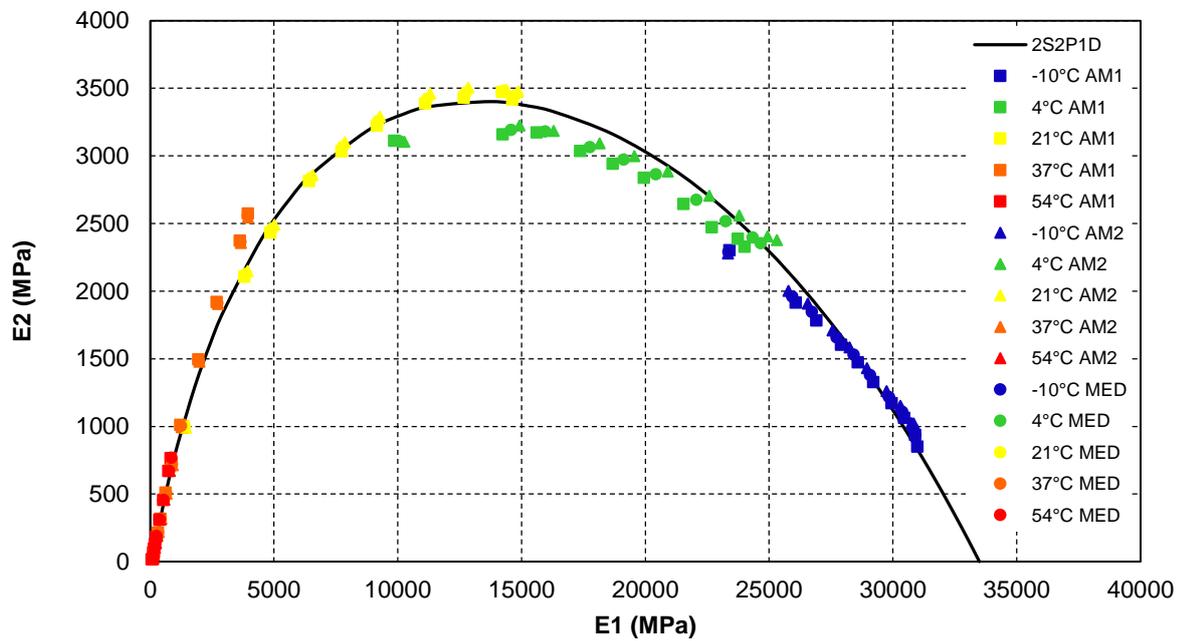
Apêndice D 5 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna 25% Fresado CAP 50/70



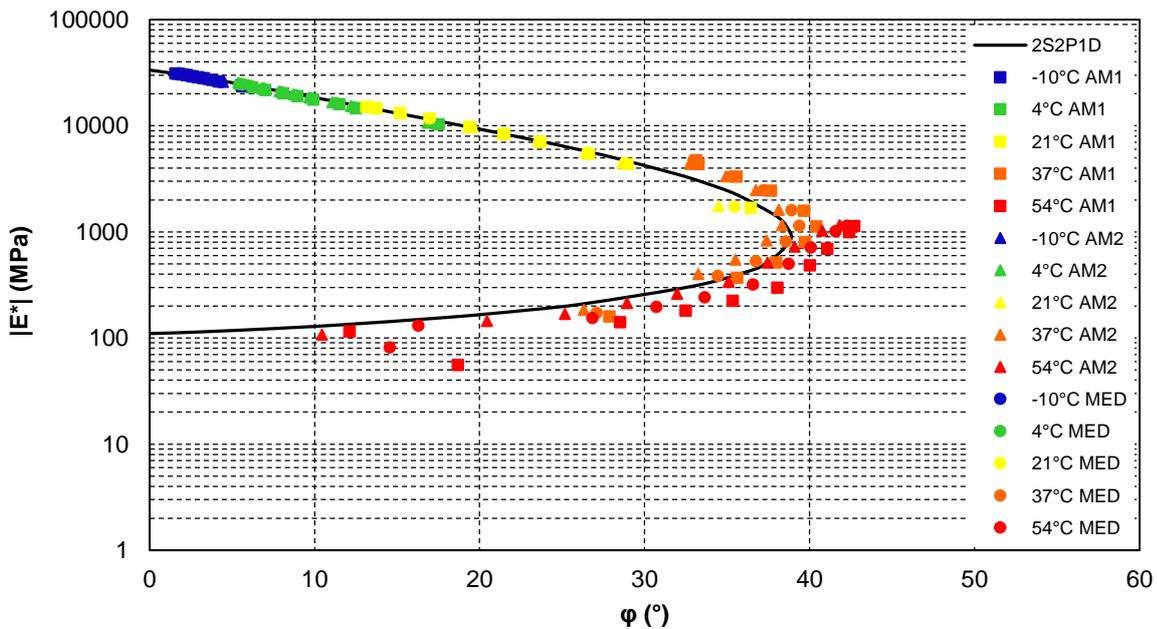
Apêndice D 6 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna 25% Fresado CAP 50/70



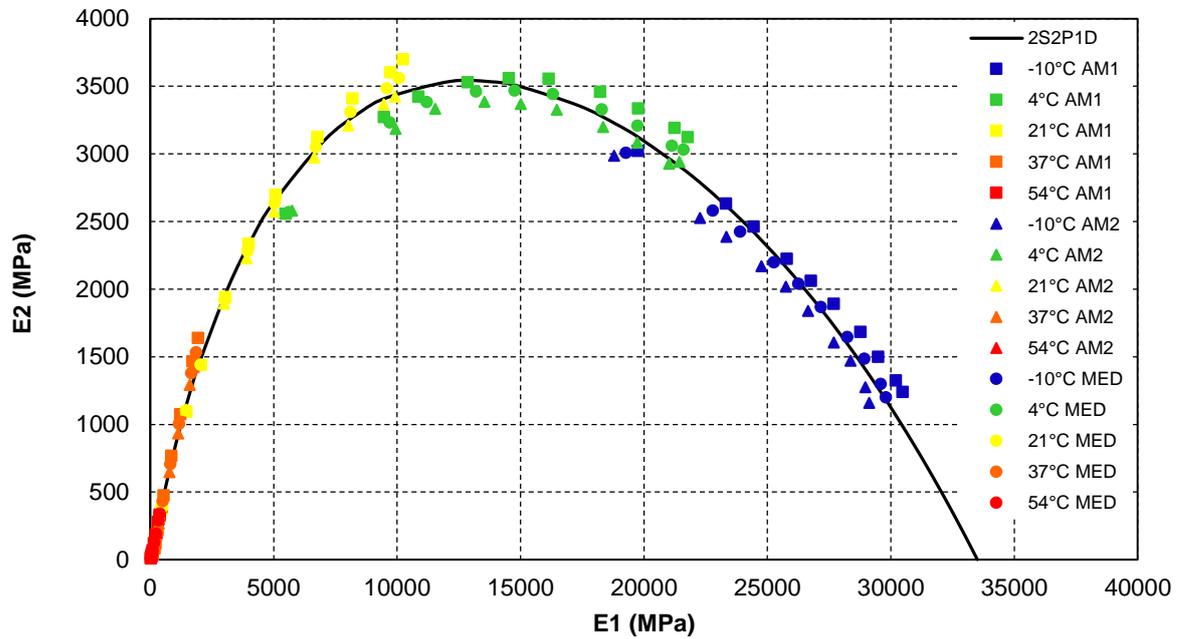
Apêndice D 7 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70



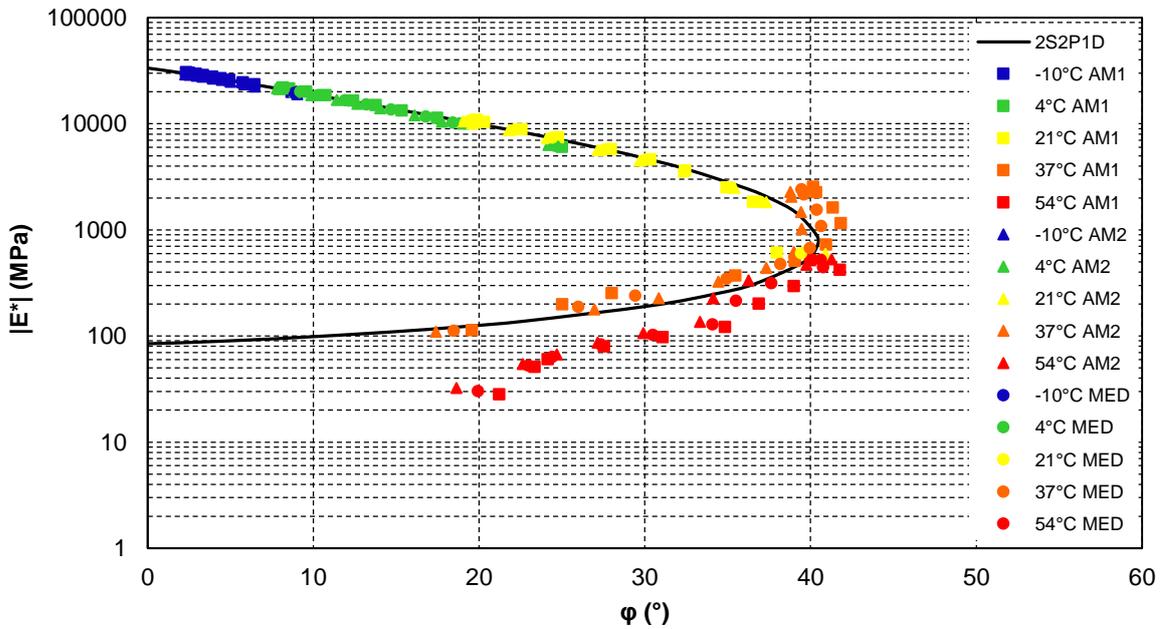
Apêndice D 8 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna 50% Fresado CAP 50/70



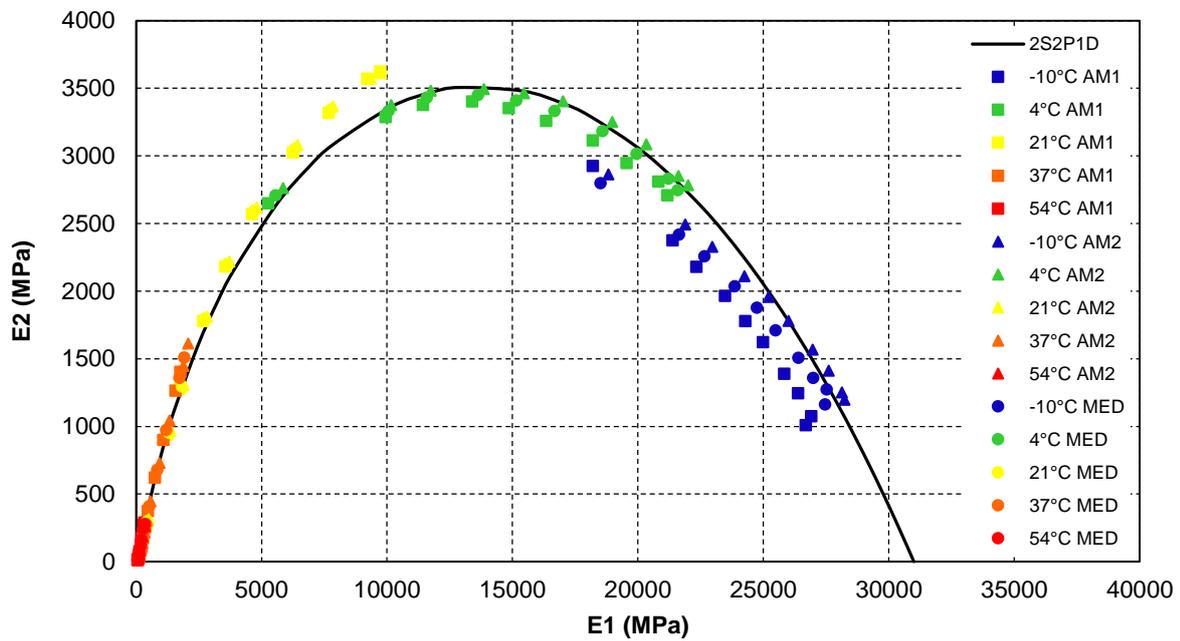
Apêndice D 9 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Convencional CAP 60/85



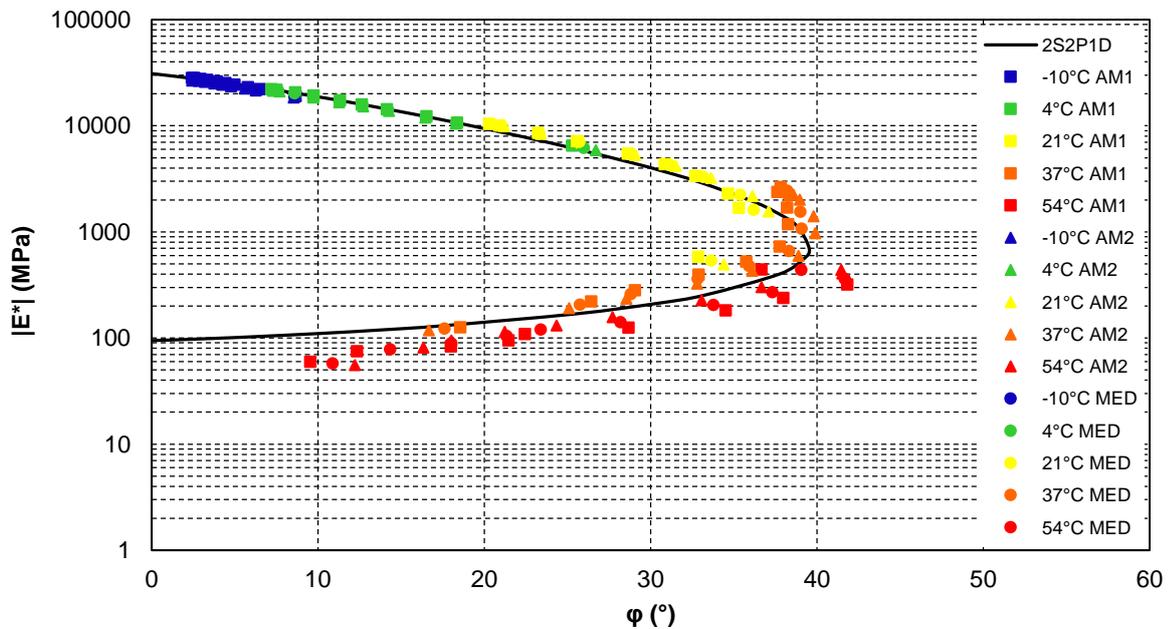
Apêndice D 10 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Convencional CAP 60/85



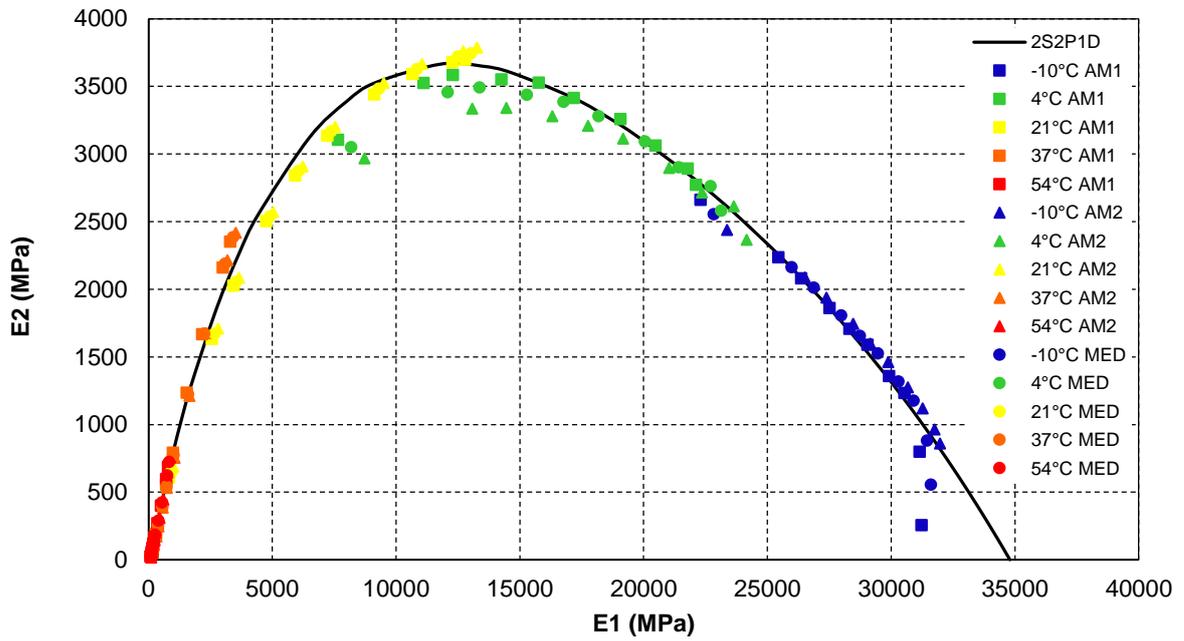
Apêndice D 11 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna CAP 60/85



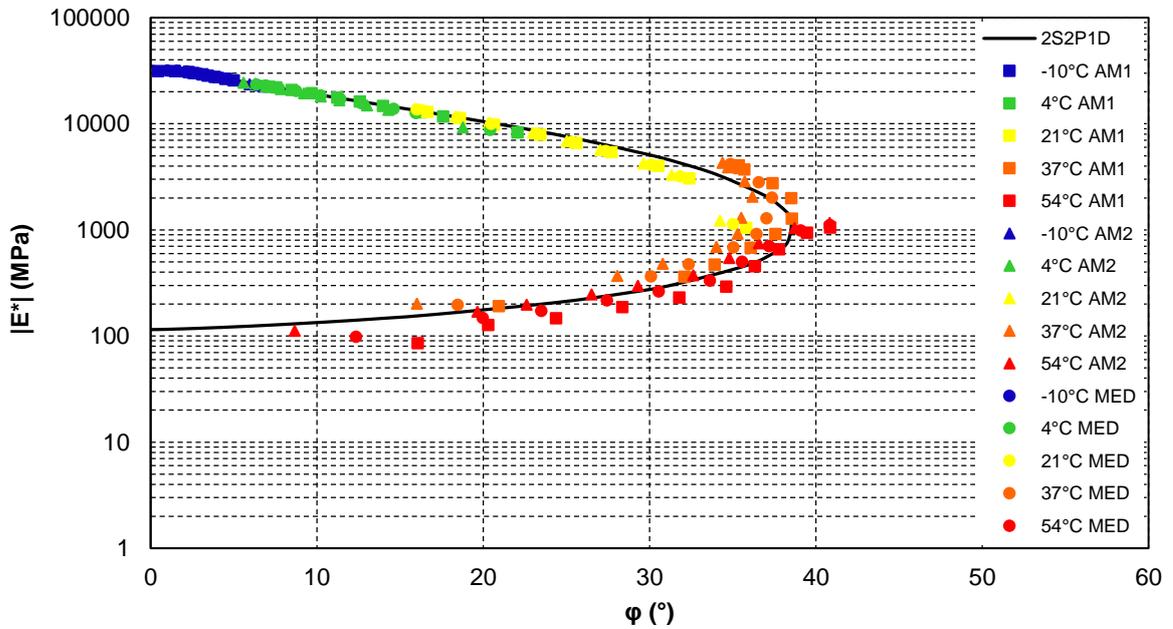
Apêndice D 12 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna CAP 60/85



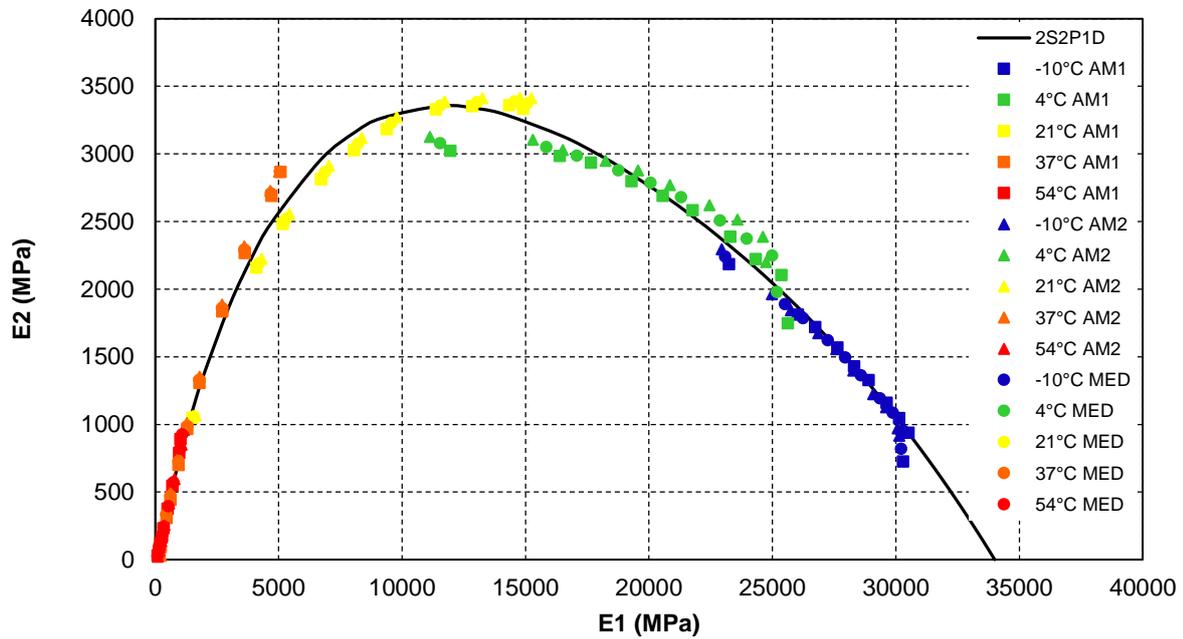
Apêndice D 13 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85



Apêndice D 14 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna 25% Fresado CAP 60/85



Apêndice D 15 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna 50% Fresado CAP 60/85



Apêndice D 16 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura Morna 50% Fresado CAP 60/85

