



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**CENTRO DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**NELSON WARGHA FILHO**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DAS TEMPERATURAS DE  
USINAGEM E DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS**

**FORTALEZA**

**2013**

**NELSON WARGHA FILHO**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DAS TEMPERATURAS DE  
USINAGEM E DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS**

Dissertação submetida à  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Transportes da  
Universidade Federal do Ceará, como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia de Transportes.  
Área de concentração: Infraestrutura de  
Transportes

Orientador: Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

**FORTALEZA**  
**2013**

**NELSON WARGHA FILHO**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DAS TEMPERATURAS DE  
USINAGEM E DE COMPACTAÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS**

Dissertação submetida à  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Transportes da  
Universidade Federal do Ceará, como parte  
dos requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia de Transportes. Área de  
concentração: Infraestrutura de Transportes

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Banca Examinadora

---

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.  
Universidade Federal Do Ceará (UFC)

---

Profª Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.  
Universidade Federal Do Ceará (UFC)

---

Profª Rosângela Dos Santos Motta, D.Sc.  
Universidade de São Paulo (USP)

## DEDICATÓRIA

*Ao meu pai e amigo eterno Nelson Wargha (in memorian), à minha esposa Anemery, aos meus filhos Lucas e Gabriel e ao meu Pai Celestial e Seu Filho Jesus Cristo, que juntos me deram forças para que eu concluisse esta pesquisa.*

*Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine. E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria. E ainda que distribuísse toda a minha fortuna para sustento dos pobres, e ainda que entregasse o meu corpo para ser queimado, e não tivesse amor, nada disso me aproveitaria. O amor é sofredor, é benigno; o amor não é invejoso; o amor não trata com leviandade, não se ensoberbece. Não se porta com indecência, não busca os seus interesses, não se irrita, não suspeita mal; Não folga com a injustiça, mas folga com a verdade; Tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta. O amor nunca falha; mas havendo profecias, serão aniquiladas; havendo línguas, cessarão; havendo ciência, desaparecerá; Porque, em parte, conhecemos, e em parte profetizamos; Mas, quando vier o que é perfeito, então o que o é em parte será aniquilado. (1 Coríntios 13:1-10)*

## AGRADECIMENTOS

Ao olhar dois anos atrás em minha vida percebo quantas mudanças ocorreram durante este período. Quando cheguei a Fortaleza recebi o apoio e o carinho de pessoas até então desconhecidas, o que tornou a minha adaptação e a de minha família mais tranquila do que eu esperava. Ainda que não consiga retratar em palavras o que algumas destas pessoas fizeram por mim, gostaria de expressar meu profundo agradecimento por ter chegado ao final desta fase especial de minha vida:

A Deus que me fez sentir Sua presença constante, e que me ensinou que o real aprendizado provém dos desafios que a vida nos traz;

Ao meu querido pai e grande amigo, que em todos os momentos deste caminho chamado “vida”, me incentivou e me fez tentar ser uma pessoa melhor e que, apesar de já estar do outro lado do véu deixou uma marca profunda de amor e de servir a todos que tiveram a alegria de tê-lo conhecido;

À minha querida esposa Anemery que, apesar de minha ausência quase constante durante estes dois anos, sempre esteve ao meu lado me apoiando e que teve a coragem de vir a um local distante de seus pais, familiares e amigos;

Aos nossos maiores tesouros a quem o Pai Celestial nos confiou para que pudéssemos ensinar: nossos filhos amados Lucas e Gabriel;

Ao meu sogro e amigo Wilson, que sempre foi um exemplo de retidão e que partiu também tão cedo desta vida;

Ao meu irmão Luiz Augusto, meu grande amigo que apesar da distância geográfica em que nos encontramos atualmente, sempre esteve junto, me dando forças;

Ao DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes especialmente nas pessoas dos engenheiros José Abner de Oliveira e José Luis Viana que não mediram esforços para que eu pudesse participar das aulas e elaborar esta dissertação e a todos os amigos do departamento, especialmente aqueles que estiveram comigo no Serviço de Engenharia da Superintendência Regional do Ceará: Lívia, Beatriz, Marcelo, Henrique, Tatiana, Maria do Céu, Francisco Rafael, Wilson, Assis, Bruna, Jessica, Rodney e a todos que também torceram por mim;

Aos amigos Engº Paulo Peterlini e Adão Maciel do DNIT do Paraná que me fizeram ter o desejo de realizar este Mestrado, e que me ensinaram os primeiros passos no laboratório de solos e de pavimentação;

Ao amigo Engº Paulo Domingos Danova, engenheiro supervisor em meu primeiro trabalho como engenheiro residente na rodovia na SC-303 no segmento Joaçaba – Piratuba, que sempre me ensinou a importância da ética na profissão e na vida;

Ao meu Orientador e Professor Jorge Soares que sempre me incentivou a buscar aquilo que para muitos seria considerado inatingível e que me fez sentir alegria ao estudar as misturas asfálticas;

À Professora Verônica Castelo Branco por suas aulas, orientação, carinho e principalmente, por estar sempre pronta a ajudar e animar quando nos via tristes e cansados;

À Professora Suelly Barroso por além de nos ensinar, trazer sempre uma mensagem relacionada à nossa vida e daqueles que nos cercam;

À Professora Sandra de Aguiar Soares pelo apoio em relação aos ensaios dos ligantes modificados e pelas sugestões apresentadas na qualificação e durante a elaboração deste documento;

À Professora Rosângela dos Santos Motta, por ter gentilmente aceitado o convite em participar da banca da defesa;

À Manuela Lopes pela participação e sugestões apresentadas durante minha qualificação;

À UFC – Universidade Federal do Ceará e a todos os professores da Pós Graduação em Engenharia de Transportes e que fazem deste, um programa de excelência na área rodoviária brasileira;

À Annie, Dona Goreti, Iolanda, Ivone, Telma e Zacarias por toda ajuda e carinho;

Aos amigos da turma de Mestrado, Alessandra, Amanda, Isael, Jardel, Juceline, Junior, Lucimar, Marcio e Synardo pelas experiências compartilhadas;

Aos amigos Felipe Onofre e Iuri Bessa pelo apoio e orientação nos ensaios mecânicos;

Aos amigos do LMP – Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, especialmente nas pessoas dos Laboratoristas Rômulo e Daniel que me deram todo apoio, para que os ensaios pudessem ser concluídos no prazo;

Aos bolsistas do LMP: Iran no início do trabalho e Henrique por seu grande apoio durante quase toda a pesquisa, desde o fracionamento do material até os ensaios de infravermelho para caracterização dos ligantes asfálticos;

Aos bolsistas do Laboratório de Ligantes, Rodolfo e Ana Alice pelo apoio e companheirismo na elaboração dos ensaios de caracterização dos ligantes;

Aos pesquisadores da Química de Ligantes, Ana Ellen, Aurélio, Janaína, Gardênia, Johnny pelo apoio e orientação;

E a todos aqueles que neste momento possa ter deixado de mencionar, mas que contribuíram para que eu pudesse concluir esta pesquisa;

Muito obrigado!!!

## RESUMO

A redução das temperaturas de usinagem e de compactação de misturas asfálticas é considerada uma alternativa na produção de revestimentos asfálticos, podendo proporcionar vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Diversas tecnologias são utilizadas na produção dessas misturas denominadas usualmente de misturas asfálticas mornas. Esta pesquisa se propôs a comparar algumas destas tecnologias com uma mistura asfáltica que foi produzida na temperatura obtida através da curva de viscosidade *versus* temperatura para o ligante asfáltico, a qual é comumente utilizada na produção de misturas asfálticas a quente. O ligante utilizado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo classificado por penetração como CAP 50-70. A mistura denominada “Controle” refere-se àquela em que não ocorreu nenhum tipo de modificação (ligante e/ou processo de produção) enquanto que outros dois tipos de misturas estudadas foram produzidas modificando-se o CAP 50-70 original com dois aditivos diferentes. Uma quarta mistura foi produzida com agregado úmido com 2%. As misturas avaliadas foram elaboradas contendo em sua composição: (i) CAP puro; (ii) CAP c/ um aditivo surfactante comercial denominado Gemul®; (iii) CAP com cera de carnaúba do tipo CT4; (iv) CAP puro com a inserção de agregado miúdo úmido. Os ligantes e os agregados foram caracterizados de acordo com as especificações vigentes. Para proporcionar uma maior resistência à deformação permanente, especialmente na fase de compactação da mistura optou-se por utilizar a metodologia Bailey para gerar uma curva granulométrica com maior intertravamento entre os agregados. A definição da temperatura de compactação dos corpos de prova se deu pelos parâmetros CDI e TDI<sub>m</sub> procurando-se obter valores de trabalhabilidade semelhantes àqueles encontrados na mistura de controle e que, simultaneamente, se mostrassem em condições adequadas para resistir à deformação permanente. Estes parâmetros (CDI e TDI<sub>m</sub>) são calculados por meio da saída de dados do compactador giratório Superpave, tendo sido escolhido por este motivo, o método de dosagem Superpave. Com o intuito de se avaliar o efeito da redução de temperatura e a influência dos aditivos no comportamento mecânico das misturas asfálticas, as mesmas foram submetidas a ensaios relacionados à resistência a deformação permanente, fadiga, rigidez e sensibilidade ao dano por umidade. 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 compactação. Buscou-se também avaliar os custos de cada mistura com o intuito de se verificar a

viabilidade econômica das amostras estudadas. Como já era esperado, a mistura com agregado úmido gerou o menor custo, por não ter utilizado aditivo e pela redução das temperaturas. A mistura com o aditivo Gemul® gerou um custo praticamente igual aquele encontrado para a mistura de Controle, enquanto que a mistura com a Cera CT4 sofreu um acréscimo de custo em cerca de 6% se comparado com a mistura de Controle. Espera-se que esta pesquisa juntamente com outras já publicadas no Brasil possam demonstrar que as misturas mornas podem não somente contribuir para mitigação de danos ambientais, mas também que apresentam viabilidade técnica e econômica para serem produzidas no país.

**Palavras-Chave:** Misturas Asfálticas Mornas, Temperaturas de Usinagem e de Compactação, CDI, Caracterização Mecânica, Aditivos.

## ABSTRACT

The reduction in mixing and compaction temperatures of asphalt mixtures is considered an alternative for the production of asphalt pavements and can offer technical economical and environmental advantages. Several technologies are used in the production of these mixtures usually called warm mix asphalt (WMA). This research aimed to compare some of these technologies with a hot mix asphalt produced at the temperature obtained from the commonly used viscosity *versus* temperature curve. The binder used was the AC classified by penetration as AC 50-70. The so called "Control mix" refers to the mix that was no was (binder and / or production process) while the other two mixtures studied were produced by modifying the original AC 50-70 with two different additives. A 4th mixture was produced with 2% moisture. Thus, the mixtures studied were distributed as follows: (i) Pure AC; (ii) AC with commercial surfactant additive known as Gemul®; (iii) AC with carnauba wax CT4; (iv) Pure AC with moist aggregates. The binders and the aggregates were characterized according to current Brazilian specifications. To provide greater resistance to permanent deformation especially during compaction the Bailey methodology was used to generate the gradation curve. Thus, more interlocking between the aggregates was expected. The compaction temperature of the specimens was determined by CDI and TDI<sub>m</sub> parameters, seeking to obtain similar workability to the control mixture and that simultaneously show themselves in appropriate conditions to resist permanent deformation. These parameters (CDI and TDI<sub>m</sub>) are calculated from output data from the gyratory compactor, and for this reason the Superpave design method was used. To evaluate the effect of temperature reduction and different additives on mechanical properties, tests related to mixture permanent deformation, stiffness and sensitivity to moisture damage were performed. After comparison and analysis of the mechanical tests, an assessment of costs of each mixture was performed to evaluate the economic viability of the studied samples. It can be said that all modified mixtures behaved in a similar manner to the mixture produced with no modification in the binder or in mix/compaction temperature. It is attempted to perform a cost assessment of each mixture in order to evaluate the economic viability. As expected, the mixture with moist aggregate had the lowest value, for not having used additive and due to temperature reduction. The mixture with the additive Gemul® had almost the same cost of the control mixture, while the mixture with wax CT4 had the cost increased by about 6% compared to the Control mixture. It is expected this research along with others already published in Brazil can demonstrate that WMA not only contributes to the environmental damage mitigation, but also presents

technical and economic advantages and, therefore it is a technique that can be used in this country to be produced..

Keywords: Binder modification, Warm Mix Asphalt, Additives, Mechanical Characterization, Moisture Damage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas de usinagem .....	13
Figura 2.2 - Consumo de energia e de emissão de gases durante a produção de misturas asfálticas .....	14
Figura 2.3 - Estrutura molecular de uma zeólita .....	16
Figura 2.4 - Detalhe da tubulação para entrada do CAP e do aditivo na usina .....	18
Figura 2.5 - Imagens térmicas tiradas imediatamente após a pavimentação .....	19
Figura 2.6 - Representação esquemática da aplicação de água diretamente no ligante .....	21
Figura 2.7 - Representação esquemática da mistura do ligante com o agregado e posterior compactação .....	22
Figura 2.8 - Representação esquemática do surfactante .....	23
Figura 2.9 - Atuação do surfactante no ligante e no agregado .....	23
Figura 2.10 - Exemplo de cadeia de carbono da parafina .....	27
Figura 2.11 - Imagens da carnaúba .....	28
Figura 2.12 - Tipos de cera proveniente do “olho” e da “palha” da carnaúba .....	29
Figura 2.13 - Influência do agregado e do ligante nos principais defeitos em pavimentos ....	31
Figura 2.14 - Gráfico demonstrativo da taxa de deformação mínima e obtenção do FN .....	34
Figura 2.15 - Divisão da curva de fadiga em regiões .....	35
Figura 2.16 - Representação gráfica do CDI e do TDI .....	40
Figura 2.17 - Curva de densificação com os parâmetros CDI e $TDI_m$ .....	42
Figura 2.18 - Verificação dos vazios deixados pelos agregados de acordo com a angularidade das partículas.....	44
Figura 2.19 - Representação das peneiras de controle para uma mistura com DMN de 19mm.....	45
Figura 2.20 - Método de seleção da massa específica escolhida para os agregados graúdos ..	47
Figura 2.21 - Desenho esquemático dos parâmetros da metodologia Bailey .....	48
Figura 3.1 - Granulometria individual dos agregados .....	52

Figura 3.2 - Representação das fases do ensaio para determinação da massa específica solta e compactada .....	53
Figura 3.3 - Curva de projeto .....	55
Figura 3.4 - Aditivos utilizados na pesquisa.....	57
Figura 3.5 - Visualização do equipamento Silverson, no momento da mistura para modificação do ligante .....	58
Figura 3.6 - Equipamento e acessórios utilizados para os ensaios de (a) penetração e (b) ponto de amolecimento .....	59
Figura 3.7 - Equipamento utilizado para o ensaio de viscosidade .....	59
Figura 3.8 - Equipamento utilizado para o ensaio de infravermelho .....	61
Figura 3.9 - Sistemática utilizada na elaboração das misturas com agregado úmido .....	64
Figura 3.10 - Prensa utilizada para o ensaio de RT .....	68
Figura 3.11 - Visualização do ensaio de fadiga em andamento e do equipamento utilizado no ensaio .....	69
Figura 3.12 - Sequência de procedimentos utilizados no ensaio Lotmann modificado .....	70
Figura 3.13 – Visualização do CGS, CPs e equipamento UTM utilizados no ensaio de Creep dinâmico .....	71
Figura 4.1 - Penetração antes e após o envelhecimento no RTFOT .....	73
Figura 4.2 - Ponto de amolecimento antes e após o envelhecimento no RTFOT .....	73
Figura 4.3 - Viscosidades obtidas nos ligantes antes do RTFOT .....	75
Figura 4.4 - Viscosidades obtidas nos ligantes estudados após RTFOT .....	75
Figura 4.5 - Gráfico de Arrhenius para CAP puro e modificado com Gemul® e com Cera CT4 antes do RTFOT .....	77
Figura 4.6 - Gráfico de Arrhenius para CAP puro e modificado com Gemul® e com Cera CT4 após o RTFOT .....	77
Figura 4.7 - Espectro na região do infravermelho para o CAP puro, CAP + Gemul® e CAP + Cera CT4 antes do RTFOT .....	79

Figura 4.8 - Espectro na região do infravermelho para o CAP puro, CAP + Gemul® e CAP + Cera CT4 após RTFOT .....	79
Figura 4.9 - Imagens obtidas após o ensaio de adesividade .....	81
Figura 4.10 - Valores de CDI obtidos para as misturas modificadas nas temperaturas de 105°, 115° e 125°C e na mistura de controle à 150°C .....	82
Figura 4.11 - Valores de TDI <sub>m</sub> obtidos para as misturas modificadas nas temperaturas de 105°, 115° e 125°C e para a mistura de controle à 150°C .....	83
Figura 4.12 - Valores de RT das misturas estudadas.....	85
Figura 4.13 - Valores de MR a 25°C das misturas estudadas .....	86
Figura 4.14 - Curvas de fadiga obtidas com as misturas estudadas .....	87
Figura 4.15 - Valores de RRT obtidos nas misturas estudadas .....	91
Figura 4.16 - Curvas de <i>Flow Number</i> encontradas nas misturas estudadas .....	94
Figura 4.17 - Correlação gráfica para os parâmetros TDI <sub>m</sub> e <i>Flow Number</i> .....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Possíveis benefícios ou vantagens esperadas para as misturas mornas.....	12
Tabela 2.2 - Exemplo de aditivos utilizados em misturas mornas .....	15
Tabela 2.3 - Produção de cera de carnaúba no Brasil, extração vegetal (2011).....	29
Tabela 2.4 - Valores de $N_{ini}$ , $N_{des}$ e $N_{max}$ para diferentes níveis de tráfego, de acordo com a AASHTO R 35 - 04 .....	39
Tabela 2.5 - Valores sugeridos de CDI e TDI .....	40
Tabela 2.6 - Peneiras de controle utilizadas na Metodologia Bailey .....	46
Tabela 2.7 - Valores sugeridos pelo método Bailey para as porções dos agregados .....	49
Tabela 3.1 - Granulometria dos agregados (série de peneiras norte-americana).....	52
Tabela 3.2 - Resultado do ensaio de massa específica solta e compactada .....	53
Tabela 3.3 - Granulometria de projeto obtida pela Metodologia Bailey .....	54
Tabela 3.4 - Peneiras de controle da curva de projeto .....	56
Tabela 3.5 - Parâmetros obtidos com a curva granulométrica da mistura .....	56
Tabela 3.6 - Ensaios de caracterização dos agregados .....	57
Tabela 3.7 - Dados da mistura do CAP com os aditivos utilizados .....	58
Tabela 3.8 - Parâmetros volumétricos obtidos com para a mistura de controle .....	62
Tabela 3.9 - Plano de temperaturas “teste” dos insumos e misturas para obtenção do CDI e do TDI <sub>m</sub> .....	65
Tabela 3.10 - Temperaturas de usinagem e de compactação escolhidas para as amostras .....	66
Tabela 3.11 - Número de giros no CGS para obtenção do Volume de vazios de 4% .....	67
Tabela 4.1 - Caracterização do ligante puro e modificado antes do RTFOT .....	72
Tabela 4.2 - Caracterização do ligante puro e modificado após o RTFOT .....	72
Tabela 4.3 - Temperaturas de usinagem e compactação baseadas na curva de viscosidade × temperatura dos ligantes asfálticos .....	76
Tabela 4.4 - Energia de ativação de fluxo antes e após o RTFOT .....	77
Tabela 4.5 - Comparaçāo no nível de oxidação obtido após o RTFOT .....	78

Tabela 4.6 - Valores obtidos de CDI para as temperaturas teste .....	82
Tabela 4.7 - Valores obtidos de TDI <sub>m</sub> para as temperaturas teste .....	82
Tabela 4.8 - Temperaturas definitivas de produção e compactação das misturas .....	84
Tabela 4.9 - Resultados de RT .....	85
Tabela 4.10 - Valores de Módulo de Resiliência (MR).....	86
Tabela 4.11 - Parâmetros das curvas de fadiga das misturas estudadas .....	88
Tabela 4.12 - Valores de RT (MPa) e RRT(%) para as misturas com agregado úmido e Gemul® .....	89
Tabela 4.13 - Valores de RT (MPa) e RRT (%) para as misturas com Cera CT4 e Controle .....	89
Tabela 4.14 - Valores de <i>Flow Number</i> obtidos (FN) .....	92
Tabela 4.15 - Resultados de <i>Flow Number</i> em pesquisas recentes .....	92
Tabela 4.16 - Correlação entre os valores encontrados para os parâmetros TDI <sub>m</sub> e <i>Flow Number</i> .....	94
Tabela 4.17 - Calor específico médio (kcal/kg °C) de algumas substâncias .....	97
Tabela 4.18 - Dados para obtenção da quantidade de energia utilizada durante a usinagem ..	97
Tabela 4.19 - Consumo de combustível estimado para as misturas estudadas .....	98
Tabela 4.20 - Custos unitários baseados no SICRO II – DNIT (nov/2012) .....	99
Tabela 4.21 - Custos dos materiais obtidos para cada mistura .....	99

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials  
APA - Asphalt Pavement Analyzer  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ASTM - American Society for Testing and Materials  
ATR - Attenuated Total Reflectance  
CA - Coarse Aggregate  
CALTRANS - California Department of Transportation  
CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo  
CERA CT4 - Cera de Carnaúba tipo 4  
CDI - Compaction Densification Index  
CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello/Petrobras  
CH-I - Cal Hidratada (tipo) I  
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
COPPE-UFRJ - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro  
CP - Corpo-de-Prova  
cP - Centipoise  
 $\Delta\sigma$  - Diferença de Tensões de Compressão e de Tração  
dmm - Décimo de Milímetro  
DMN - Diâmetro Máximo Nominal  
DER - Departamento de Estradas e Rodagem do Ceará  
DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem  
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
DSR - *Dynamic Shear Rheometer* (Reômetro de Cisalhamento Dinâmico)  
Eaf - Energia de Ativação de Fluxo  
EBE - Enrobé à Basse Energie  
EBT - Enrobé à Basse Température  
EPI's - Equipamentos de Proteção Individual  
ES - Especificação de Serviço  
EUA - Estados Unidos da América  
FA<sub>c</sub> - Fine Aggregate Coarse Ratio

- FA<sub>f</sub> - Fine Aggregate Fine Ratio  
FHWA - Federal Highway Administration  
FN - Flow Number  
FTIR - Fourier Transform Infrared  
G<sub>mm</sub> - Densidade Máxima da Mistura  
HS - Half Sieve  
HMA - Hot Mix Asphalt  
HWMA - Half Warm Mix Asphalt  
LAPAV/UFRGS - Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
LEA - Low Emission Asphalt  
LMP/UFC - Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará  
LTP/EPUSP - Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
LVDT - Linear Variable Differential Transducer  
ME - Método de Ensaio  
MEPDG - Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide  
MR - Módulo de Resiliência  
N - Vida de Fadiga  
NAPA - National Asphalt Pavement Association  
NBR - Norma Brasileira Regulamentadora  
NCAT - National Center for Asphalt Technology  
NCHRP - National Cooperative Highway Research Program  
NMPS - Nominal Maximum Particle Size  
Nproj - Número de Giros de Projeto  
PCS - Primary Control Sieve  
PG - Performance Grade  
PM - Peneira Média  
RBV - Relação Betume × Vazios  
RRT - Resistência Retida à Tração  
RT - Resistência à Tração por Compressão Diametral  
RTc - Resistência à Tração média dos CPs condicionados à água  
RTFOT - Rolling Thin Film Oven Test  
RTnc - Resistência à Tração média dos CPs não condicionados à água

- SCS - Secondary Control Sieve  
SHRP - Strategic Highway Research Program  
SMA - Stone Matrix Asphalt  
Superpave - Superior Performing Pavements  
TMN - Tamanho Máximo Nominal  
TCS - Tertiary Control Sieve  
TDI - Traffic Densification Index  
 $TDI_m$  - TDI modificado  
VAM - Vazios do Agregado Mineral  
Vv - Volume de Vazios  
Vvc - Volume de vazios dos CPs condicionados à água  
WMA - Warm Mix Asphalt  
WMA TWG - Warm Mix Asphalt Technical Working Group

## SUMÁRIO

### **1 INTRODUÇÃO**

1.1	Considerações iniciais .....	1
1.2	Pesquisas na área de pavimentação .....	3
1.3	Problema de pesquisa .....	4
1.4	Objetivo geral .....	5
1.5	Objetivos específicos .....	5
1.6	Organização da dissertação.....	5

### **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

2.1	Misturas Mornas	
2.1.1	Histórico .....	7
2.1.2	Relatório NCHRP 691 (2011) .....	9
2.1.3	Possíveis vantagens da mistura morna .....	12
2.1.4	Classificação das misturas em função da temperatura de produção .....	13
2.1.5	Tecnologias utilizadas na produção das misturas mornas e semimornas .....	14
	Tecnologia a partir da formação de espuma .....	15
	Tecnologia a partir do uso de aditivos surfactantes .....	22
	Tecnologia a partir do uso de ceras .....	26
2.1.6	Pontos a serem observados nas misturas mornas .....	30
	Envelhecimento .....	30
	Deformação Permanente.....	30
	Fadiga .....	34
	Dano por umidade.....	36
2.2	Modelo de compactação utilizado na metodologia Superpave.....	38
2.2.1	Parâmetros CDI, TDI e TDI <sub>m</sub> .....	39
2.3	Metodologia Bailey .....	42
2.3.1	Agregado graúdo e agregado miúdo.....	43
2.3.2	Massa específica solta, compactada e escolhida.....	46
2.3.3	Parâmetros da metodologia Bailey .....	47
2.3.4	Porção do agregado graúdo (CA) .....	48
2.3.5	Porção Graúda (FAC) e Porção Fina do Agregado Miúdo (FAF).....	49

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

3.1	Visão Geral .....	50
3.2	Agregados .....	50
3.2.1	Curva granulométrica e caracterização dos agregados .....	51
3.2.2	Caracterização dos agregados.....	56
3.3	Caracterização dos ligantes .....	57
3.3.1	Modificação do ligante .....	57
3.3.2	Energia de ativação de fluxo.....	59
3.3.3	Espectrometria vibracional de absorção no infravermelho .....	60
3.4	Misturas asfálticas .....	61
3.4.1	Elaboração da mistura com agregado úmido .....	63
3.4.2	CDI, TDI e TDI <sub>m</sub> .....	64
3.4.3	Resistência a Tração por compressão diametral (RT) .....	67
3.4.4	Módulo de Resiliência (MR) .....	68
3.4.5	Fadiga .....	70
3.4.6	Dano por umidade induzida .....	69
3.4.6	<i>Flow Number</i> .....	70

### **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS**

4.1	Ligante e aditivos.....	72
4.1.1	Penetração e ponto de amolecimento .....	72
4.1.2	Viscosidade.....	74
4.1.3	Energia de ativação de fluxo.....	76
4.1.4	Espectrometria vibracional de absorção no infravermelho.....	78
4.1.5	Adesividade .....	80
4.2	Misturas asfálticas .....	81
4.2.1	Dosagens das misturas .....	81
4.2.2	CDI, TDI e TDI <sub>m</sub> .....	81
4.2.3	Resistência a Tração por compressão diametral (RT) .....	84
4.2.4	Módulo de Resiliência (MR) .....	85
4.2.5	Fadiga .....	87
4.2.6	Dano por umidade induzida .....	88
4.2.7	<i>Flow Number</i> .....	91

4.2.8	Custos de produção.....	95
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	
5.1	Considerações finais .....	100
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	103
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	105

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações Iniciais**

O longo período de estagnação econômica ocorrido no Brasil provocou a redução de investimentos, tanto públicos quanto privados, em diversos setores produtivos. A área de infraestrutura de transportes foi uma das mais afetadas, prejudicando especialmente o setor rodoviário do país que já se encontrava comprometido, elevando o chamado “Custo Brasil”. Esta situação começou a mudar gradativamente especialmente a partir do ano de 2000 com: (i) a melhoria da situação econômica do país; (ii) as concessões à iniciativa privada de diversas rodovias federais e (iii) novos investimentos em rodovias realizados pelo setor público.

As obras do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), um dos principais planos do governo federal, iniciado em fevereiro de 2007, continham previsão de investimentos da ordem de R\$ 550 bilhões em diversas áreas estratégicas do país, no quadriênio 2007-2010. Este programa foi renovado para o quadriênio seguinte (2011-2014), e constitui-se um dos exemplos do investimento público citado ([www.brasil.gov.br/pac/relatorios/nacionais](http://www.brasil.gov.br/pac/relatorios/nacionais)).

Além disso, as descobertas de reservas de petróleo na camada do pré-sal, os preparativos para a Copa do Mundo em 2014 e as Olimpíadas em 2016, ao lado de outros resultados positivos que o país vem obtendo, estão proporcionando uma melhora significativa na infraestrutura nacional. A crise econômica europeia, que se acentuou em 2012, prejudicou o andamento dos investimentos no país. Apesar disso, espera-se que o Brasil volte a retomar o ritmo obtido há três anos.

Em meados de agosto de 2012, o governo federal anunciou um novo programa de concessões a ser realizado com aproximadamente 7.000km de rodovias que terão administração do setor privado para os próximos 25 anos. Com esta medida o governo pretende alavancar, de forma mais rápida, os investimentos e garantir o crescimento econômico do país.

Existe um grande potencial de obras de pavimentação em relação às rodovias brasileiras. De acordo com o Relatório de Extensões do Sistema Rodoviário Nacional, elaborado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em abril de 2011, a extensão não pavimentada era de 1.367.382km, enquanto que a pavimentada respondia pelo número de 213.722km, ou seja, pouco mais de 13%. Estes números são

bastante tímidos se comparados com aqueles encontrados na Europa e nos Estados Unidos, onde valores superiores a 60% de rodovias pavimentadas são encontrados ([www.abcr.org.br](http://www.abcr.org.br)).

Se de um lado existe o potencial de crescimento observado no modal rodoviário e a perspectiva de continuidade e/ou ampliação de investimentos na área, por outro, há que se observar a necessidade de se executar pavimentos mais duráveis e que consigam proporcionar, ao mesmo tempo, uma redução nos danos ao meio ambiente. Este último fator tem levado diversos países no mundo a adotar medidas restritivas à elaboração de produtos que causem danos ambientais elevados.

Atualmente, boa parte da malha rodoviária nacional encontra-se em situação crítica. Em uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) no ano de 2011 foram avaliados 92.747km da malha nacional, sendo que destes, 77.373km encontram-se sob gestão pública. Em relação ao último valor, verificou-se que apenas 5,6% estão em situação ótima e que 66,2% dos segmentos tem condição regular, ruim ou péssima (<http://www.cnt.org.br>). Verifica-se, no entanto, que a reestruturação que está sendo realizada de forma gradativa mas, contínua no DNIT, aliada a um planejamento mais ousado de investimentos tem refletido em uma melhora das rodovias federais administradas pelo órgão federal executivo de transportes.

Entre as principais causas para uma condição não favorável das rodovias brasileiras, pode-se elencar entre outros, as solicitações de carga acima das previstas em projeto; as falhas, durante a produção, a aplicação e a compactação do revestimento; e o envelhecimento, por vezes precocemente acelerado das misturas asfálticas. Algumas dessas causas serão tratadas em maior detalhe mais adiante neste trabalho.

Ao lado de problemas encontrados nos revestimentos, verifica-se que a utilização desordenada dos recursos naturais passou a ser mais atentamente observada, especialmente, nos últimos 30 anos. Notou-se, assim, uma redução de diversos destes recursos além de alterações climatológicas que podem ser sentidas a nível mundial. Questões como o risco da falta de água potável, a escassez de outras riquezas naturais e o aquecimento global são assuntos amplamente debatidos. Protocolos de intenções foram elaborados no sentido de prover medidas mitigatórias aos danos ao meio ambiente.

O Protocolo de Kyoto, elaborado em 1997 em uma das Conferências para o Meio Ambiente, tem como uma de suas metas, a redução de emissão de gases do efeito estufa. Acredita-se que estes gases são os grandes responsáveis pelo aquecimento global. Apesar de não ter sido ratificado pelos Estados Unidos, foi aceito em diversos países, que tem tomado medidas para atingir as metas estabelecidas (CASTRO NETO, 2007). A Austrália, por

exemplo, tem por objetivo uma redução de 80% até 2050 no lançamento de gases causadores do efeito estufa baseado nos níveis de 2000 (*AUSTROADS TECHNICAL REPORT, AP-T214-2012*).

Uma tabela com as emissões de CO<sub>2</sub> derivadas do consumo de combustíveis fósseis e da produção de cimento elaborada pela *United Nations Development Program* (UNDP), em 2007, foi apresentada em Henriques (2010). Nesta tabela verifica-se que os Estados Unidos são responsáveis por 20,9% das emissões, seguidos pela China, com 17,3%. Observa-se, no entanto, que, países em desenvolvimento já representam 42,5% destas emissões.

O uso de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) amplia a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Ao lado disso há que se considerar o modelo energético baseado no petróleo que ocupa destaque no cenário mundial. Este modelo tem passado por crises com relativa frequência, e tem provocado oscilações nos preços internacionais dos combustíveis, prejudicando a economia global. Sabe-se que o petróleo é um recurso não renovável e finito. Diversos estudos demonstram que as reservas mundiais atualmente provadas de petróleo convencional, considerando-se o consumo existente poderiam ser suficientes para aproximadamente 30 anos (OLIVEIRA, 2007).

Mesmo considerando-se a descoberta de novas reservas, como foi o caso da camada pré-sal no território brasileiro, as perspectivas dos pesquisadores não são muito otimistas, uma vez que a demanda é igualmente crescente. Durante a produção de misturas asfálticas, o consumo de combustível utilizado para o aquecimento dos agregados e do ligante é elevado e, desta forma, novas tecnologias que visem à redução deste consumo seriam bem recebidas pelo setor produtivo.

## **1.2 Pesquisas na Área de Pavimentação**

De forma crescente, pesquisas na área de pavimentação estão sendo implementadas em diversos países buscando-se uma minoração de danos ambientais através da redução de emissões de gases de efeito estufa e da utilização de recursos naturais. Com este foco ambiental e procurando-se ao menos, manter a mesma durabilidade dos revestimentos, surgiu na Europa uma tecnologia capaz de reduzir a temperatura de fabricação das misturas asfálticas, as quais são mais conhecidas como Misturas Mornas (PROWELL, 2007; CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Alguns dos benefícios verificados ao se produzir este tipo de mistura estão ligados à redução do consumo de energia, a redução nas emissões de gases de efeito estufa e a melhoria da saúde dos trabalhadores envolvidos no processo

(PROWELL, 2007). As misturas mornas são executadas através de diferentes técnicas e aditivos

Avaliações começaram a ser realizadas e pesquisadores apontam reduções expressivas no consumo de energia em trabalhos realizados com algumas destas técnicas e aditivos utilizados para este novo tipo de mistura. Em uma destas pesquisas, por exemplo, cita-se que a economia de energia gerada pode variar de 20% a 75% dependendo da técnica aplicada, do tipo de usina e dos materiais empregados (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Nas misturas produzidas em temperatura inferior a 100°C, por exemplo, denominadas como misturas semimornas, a economia de energia pode ser da ordem de até 75%. No que se refere às emissões de gases poluentes, uma comparação da concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) entre misturas a quente e misturas mornas foi realizada por Motta (2011). A pesquisadora observou que concentração dos HPAs para as misturas mornas em seu estudo foi cerca de três vezes menor que a mistura a quente. Em virtude das vantagens elencadas, esta nova tecnologia tem se apresentado como uma alternativa interessante frente ao uso de misturas convencionais.

Pesquisas estão sendo aprofundadas, tanto a nível laboratorial, como em análises de trechos já executados, principalmente na Europa e nos Estados Unidos. Com base nessas pesquisas verifica-se que a avaliação mecânica em laboratório e o desempenho em campo estão se mostrando similares e em algumas vezes superiores, quando comparadas às misturas convencionais, produzidas a temperaturas usualmente mais elevadas.

Um estudo realizado por Wall (2012) aponta que apesar de possuir muitos pontos positivos a mistura morna por si só não pode ser considerada a resposta para todos os problemas ligados à sustentabilidade na produção de misturas asfálticas. A reciclagem de revestimentos envelhecidos, que utilizaria parte de agregados outrora descartados, poderia também trazer resultados ambientais expressivos. Verifica-se assim que, seja através da redução do consumo de energia utilizado na produção, da reutilização de matéria prima ou da redução de emissão de gases de efeito estufa, estão sendo estudadas formas para se atingir o objetivo comum, que é de minimizar os impactos ao meio ambiente sem que isso represente a perda da durabilidade ou do produto final.

### **1.3 Problema de Pesquisa**

Questões ligadas à sustentabilidade têm mobilizado o setor rodoviário mundial. Sabe-se que a produção de misturas asfálticas pode causar diversos danos ao meio ambiente e aos trabalhadores envolvidos no processo. Há necessidade de que modificações no processo

sejam implementadas no sentido de minimizar os danos citados sem afetar o desempenho destas misturas. A redução na temperatura de produção das misturas poderia ser uma dessas modificações a trazer benefícios relacionados não somente a questões ambientais, mas também, ao desempenho dos revestimentos asfálticos. Poucos são os estudos realizados no Brasil até o momento. Existe uma resistência natural em relação à mudança na forma de se produzir misturas asfálticas, principalmente por receios quanto ao desempenho que este tipo de mistura apresentaria em campo.

#### **1.4 Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar três diferentes técnicas de produção de misturas asfálticas a temperaturas reduzidas, sendo duas delas a partir de aditivos e uma com a utilização de agregado miúdo úmido para que, a nível laboratorial, possa ser realizada a comparação com uma mistura asfáltica produzida à temperatura normalmente utilizada neste tipo de mistura, contribuindo para um maior conhecimento das misturas asfálticas mornas.

#### **1.5 Objetivos Específicos**

- I. Definir uma metodologia de dosagem para obtenção da redução de temperatura durante a produção de misturas asfálticas mornas;
- II. Comparar os parâmetros volumétricos e as propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas dosadas utilizando diferentes aditivos/técnicas;
- III. Verificar a influência da redução de temperatura no comportamento das misturas por meio de ensaios mecânicos;
- IV. Avaliar, através de ensaios de caracterização dos ligantes, a influência dos aditivos e da redução de temperatura nas propriedades destes materiais;
- V. Comparar de forma sucinta os custos envolvidos em cada mistura;
- VI. Colaborar na ampliação do conhecimento científico de misturas mornas e verificar a sua viabilidade técnica e econômica.

#### **1.6 Organização da Dissertação**

Neste capítulo, denominado Capítulo 1, procurou-se abordar algumas considerações iniciais em relação ao tema estudado, o problema de pesquisa e a apresentação dos objetivos a serem obtidos no presente estudo.

No Capítulo 2 é descrito um breve histórico do desenvolvimento da técnica de mistura morna. A metodologia Bailey é abordada de forma mais detalhada uma vez que foi a

técnica escolhida para elaboração da curva granulométrica. Os estudos relacionados à metodologia de dosagem utilizada, além das questões ligadas à resistência à deformação permanente, compactabilidade, trabalhabilidade e dano por umidade induzida das misturas, são objetos deste capítulo, assim como as recomendações atualmente empregadas quando se refere às misturas mornas.

No Capítulo 3 são relacionados os materiais e métodos aplicados nesta pesquisa para que se pudesse obter a redução da temperatura de usinagem e de compactação das misturas asfálticas.

No Capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos tanto para os insumos como para as misturas estudadas. A comparação entre as técnicas foi realizada por meio de ensaios mecânicos de laboratório. Os custos envolvidos para elaboração de todas as misturas foram estimados, obtendo-se, desta forma, ainda que de maneira sucinta, uma análise quanto à viabilidade econômica das misturas mornas utilizadas nesta pesquisa.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões encontradas na presente dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Misturas Mornas

#### 2.1.1 Histórico

Para facilitar a visualização do histórico do uso de mistura morna, optou-se pela cronologia anual de alguns dos principais acontecimentos relacionados ao tema, os quais foram relacionados a seguir:

1956 – O professor Csanvi, da Universidade do Iowa, avalia o potencial da espuma de betume, formada através da introdução de vapor de água no betume quente e que poderia ser utilizada como um ligante para solos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1968 – A empresa Mobil Oil na Austrália, detentora da patente da descoberta de Csanyi, passa a injetar água fria no lugar do vapor d'água dando uma agilidade maior ao processo de produção do betume-espuma (KRISTJANSOTTIR *et al.*, 2007);

1977 – A empresa Chevron publica o manual *Bituminous Mix*, com informações sobre a metodologia de dimensionamento, a formulação e a produção de misturas betuminosas estabilizadas com emulsões (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1979 e 1981 – A *Federal Highway Administration* (FHWA) e a *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA) publicam manuais sobre o assunto (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1994 – Maccarone *et al.* (1994) estudam as misturas betuminosas (asfálticas) a frio com betume espuma como ligante, e as misturas betuminosas com elevado conteúdo de emulsão, concluindo que a grande aceitação mundial deste tipo de mistura, é devido à eficiência energética e às baixas emissões geradas, afirmando ainda que “... as *tecnologias a frio representam o futuro nos revestimentos rodoviários*” (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1995 – A empresa Shell patenteia uma técnica que utiliza dois componentes, a qual resultaria anos mais tarde no desenvolvimento da tecnologia *WAM-Foam* (HARRISON e CHRISTODULAKI, 2000 *apud* CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1995 – Na Alemanha, são executadas as primeiras rodovias com revestimento composto por mistura morna, através da adição de Aspha-Min®, um zeólito sintético. Posteriormente esta tecnologia é aplicada também na Noruega e na Dinamarca (PROWELL e HURLEY, 2007);

1996 – A União Européia inicia estudos no sentido de buscar formas para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, e o Ministério do Trabalho e

das Relações Sociais alemão determina limites de exposição para os trabalhadores expostos a fumos de asfalto (MOTTA, 2011);

1997 – Tem início a comercialização do aditivo Sasobit® na Europa, pela empresa *Sasol Wax International AG* (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Um programa denominado Low Temperature Asphalt é iniciado na Alemanha com a missão de investigar métodos para produção de misturas asfálticas à temperaturas mais baixas que aquelas produzidas a temperaturas convencionais a quente (BARTHEL *et al.*, 2004);

1999 – Jenkins *et al.* (1999) verificam os benefícios do aquecimento do agregado a temperaturas abaixo de 100°C, antes da aplicação da espuma de asfalto. De acordo com os pesquisadores, o pré-aquecimento dos agregados eleva o recobrimento, a coesão da mistura, a resistência à tração e à compactação. Ainda de acordo com estes pesquisadores, isto pode ser especialmente benéfico para aquelas misturas contendo agregados reciclados (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

2000 – Em uma Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidney, Austrália, o processo de produção das misturas mornas é apresentado por Harrison e Christodulaki (OTTO, 2009). Ainda neste ano, o desempenho da mistura morna é avaliado através de testes laboratoriais e em campo na Noruega, no Reino Unido e na Holanda, resultando em um artigo elaborado por Koenders *et al.*(2000);

2006 – Um dos primeiros trabalhos a respeito de misturas mornas é publicado no Brasil por Souza Filho (2006), através de dissertação de Mestrado deste autor na Universidade Federal do Ceará (UFC), tendo como título “Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas”;

2007 – Os Estados Unidos enviam à Europa uma equipe de especialistas para avaliação da tecnologia de Misturas Mornas já há algum tempo utilizada naquele continente. Entre estes especialistas, representantes da AASHTO e da FHWA se fizeram presentes. Ceratti *et al.* (2007) elaboraram uma pesquisa a nível laboratorial sobre a redução das temperaturas de produção e compactação em misturas que sofrem a inserção de água no agregado miúdo;

2009 – Otto (2009) realiza estudo para verificar a fadiga e o módulo complexo em misturas asfálticas mornas;

2010 – Um estudo com diversos aditivos em misturas asfálticas, inclusive àqueles que possibilitam a redução de temperatura de produção e compactação é realizado por Cavalcanti (2010) que avaliou o efeito destes aditivos na vida de fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas;

2011 – O relatório NCHRP 691 (2011) com o objetivo de apresentar métodos e procedimentos a serem utilizados em misturas mornas é concluído. Com base neste relatório novas pesquisas estão sendo realizadas, de modo a difundir a utilização da redução de temperaturas na produção de misturas asfálticas. Motta (2011) elabora um estudo visando avaliar a diminuição do consumo energético e da emissão de poluentes gerados pela mistura morna em comparação com as misturas produzidas a temperaturas convencionais (elevadas);

2012 – Budny (2012) realiza estudo para avaliar o comportamento mecânico das misturas mornas.

### **2.1.2 Relatório NCHRP 691**

Em 2011 foi apresentado pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), o relatório NCHRP 691 – *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt* com o objetivo de desenvolver um método para dosagem e para avaliação de misturas asfálticas mornas. O método proposto baseou-se na especificação Superpave e suas metas incluíam testes de desempenho para verificar o comportamento das misturas em campo de maneira que qualquer tecnologia para produção de misturas asfálticas mornas pudesse ser utilizada.

Apesar de inúmeras experiências de campo executadas nos Estados Unidos, não havia, até o momento, um procedimento formal para a produção destas misturas e este fato poderia retardar a utilização das mesmas. Espera-se, no entanto, que, à medida que as avaliações do desempenho deste tipo de mistura apresentem resultados compatíveis ou mesmo superiores às misturas convencionais, a sua aplicação possa ser mais amplamente difundida.

O relatório NCHRP 691 (2011) utilizou como base, principalmente, os quatro anos de estudos e de pesquisas realizados pelo Projeto NCHRP 09-43. A meta deste último projeto era desenvolver uma metodologia de dosagem e procedimentos, que pudessem ser usados em diversas técnicas de misturas mornas já aplicadas, e também, em processos que poderiam tornar-se disponíveis no futuro. Outras pesquisas foram também utilizadas como referências para o relatório em questão, inclusive aquelas que tratavam da elaboração de misturas a quente. Os resultados obtidos com o relatório NCHRP 691 (2011) levaram a novas pesquisas que se encontram em andamento sob a denominação NCHRP 9-47 – Propriedades e Desempenho de Tecnologias de Mistura Morna e NCHRP 9-49 – Desempenho de Tecnologias de Mistura: Estágio 1 – Susceptibilidade a Umidade.

O Projeto 09-43 procurou, quando possível, usar os procedimentos tradicionalmente utilizados em misturas a quente, e desta forma, concentrou os esforços em áreas onde estas misturas (quentes e mornas) diferiam de forma substancial. Este projeto do

NCHRP foi dividido em duas fases, cabendo à primeira, a elaboração de procedimentos baseados na revisão de literatura e pesquisas em andamento e à segunda, as avaliações das misturas mornas elaboradas em campo e em laboratório.

Algumas conclusões obtidas no relatório NCHRP 691 (2011) são apresentadas a seguir:

- I. Propriedades Volumétricas – constatou-se que para misturas com absorção de ligante  $\leq 1\%$ , os parâmetros volumétricos entre as misturas elaboradas à temperatura convencional e as misturas mornas são bastante similares. Este fato suporta a prática corrente de utilização das mesmas dosagens das misturas convencionais nas misturas mornas, diferenciando-se apenas o aditivo que traria a redução da temperatura;
- II. Seleção do grau de desempenho do ligante – o mesmo grau de desempenho deve ser usado tanto para misturas mornas como para misturas produzidas a temperatura convencional. Apenas para temperaturas de produção muito baixas, que poderiam proporcionar uma redução significativa na rigidez do ligante (diminuição da oxidação) poderia haver necessidade de uma elevação do grau de temperatura positivo;
- III. Utilização de fresado – percebeu-se que após a mistura do ligante, agregado e fresado, parte do ligante existente no fresado continua a se misturar com o novo CAP. Para que isso ocorra a temperatura de compactação deverá exceder o PG superior (grau de desempenho) do ligante do fresado;
- IV. Condicionamento de curto prazo – o mesmo tempo de 2 horas utilizado para misturas convencionais deve ser usado nas misturas asfálticas mornas.
- V. Envolvimento do agregado, trabalhabilidade e compactabilidade – o critério de viscosidade utilizado para a definição da temperatura para envolvimento do agregado, trabalhabilidade e compactabilidade não pode ser utilizado em diversos processos de misturas asfálticas mornas. O grau de recobrimento em laboratório depende do tipo de misturador utilizado assim como do tempo de mistura. No que se refere a trabalhabilidade, foram usados quatro diferentes tipos de equipamentos: (i) *UMass workability device*, (ii) *Nynäs workability device*, (iii) *University of New Hampshire workability device*, (iv) *Gyratory Compactor with Shear Stress Measurement*. Para avaliar a sensibilidade à temperatura de compactação da mistura morna foram verificadas mudanças no número de giros

- para obtenção de 92% da densidade relativa quando esta temperatura decrescia em 30°C. Caso o aumento do número de giros fosse superior a 25% poderia ser um indicativo que a técnica de mistura morna estudada seria mais sensível a mudanças de temperatura se comparado a misturas similares a quente;
- VI. Avaliação da sensibilidade à umidade – apesar de ser uma das grandes preocupações relacionadas a este tipo de mistura, observa-se que os procedimentos já utilizados para as misturas convencionais através da norma AASHTO T 283 (2007) são indicadores confiáveis para expressar este tipo de falha quando se refere às misturas produzidas a temperaturas reduzidas. A mínima relação entre a resistência antes e depois do condicionamento deverá ser igualmente mantida em 80%, conforme indicado na norma AASHTO 323 (2004). Verifica-se que o valor desta relação, utilizado no Brasil através da especificação 031/2006 do DNIT é de 70%. Foi observado que os valores obtidos com as amostras ensaiadas foram significativamente menores para a maioria dos processos de misturas mornas avaliados. Para misturas com melhoradores de adesividade (*anti-stripping additives*) verificou-se que a resistência à tração retida permaneceu a mesma ou melhorou em 67% dos casos. Já para misturas que não utilizaram os melhoradores de adesividade este fator não melhorou em nenhum dos casos e reduziu em 79% das misturas;
- VII. Deformação Permanente – a resistência à deformação permanente foi verificada através do parâmetro *Flow Number*. Observou-se que para as misturas estudadas a resistência a deformação para as misturas mornas foi menor que para as misturas a quente com exceção da mistura produzida com o aditivo Sasobit, o qual é uma cera sintética. O decréscimo da resistência foi de 6% a cada 5,5°C de redução na temperatura de compactação.
- VIII. Avaliação de desempenho – a pesquisa mostrou que para os mesmos agregados e ligantes, a mistura produzida a temperaturas menores apresentará propriedades similares às da mistura convencional, principalmente no que se refere a parâmetros volumétricos. A rigidez, porém, tende a apresentar valores menores. Tendo em vista a similaridade das propriedades é possível que o desempenho dos pavimentos construídos com misturas mornas possa ser realizado através do método empírico-mecânístico (*MEPDG*) elaborado nos Estados Unidos.

### 2.1.3 Possíveis Vantagens das Misturas Mornas

Prowell (2007) apresenta em seu artigo dados fornecidos pelos distribuidores dos aditivos e/ou tecnologias, contendo possíveis benefícios em relação ao uso de misturas mornas. Entre os benefícios apontados, estão justamente as respostas aos graves problemas, especialmente ambientais, enfrentados pelos governos e pela população de forma geral, já citados no Capítulo 1. Algumas destas vantagens são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Possíveis benefícios ou vantagens esperados com o uso de misturas mornas

Benefícios	Dados Esperados
Redução das emissões (%)	CO <sub>2</sub> 30 - 40
	SO <sub>2</sub> 35
	VOC 50
	NO <sub>x</sub> 60 - 70
	POEIRA 20 - 25
	CO 10 - 30
Redução do consumo de combustível (%)	20-35%, podendo chegar a 50% ou mais no caso da técnica utilizando agregado úmido
No pavimento	Melhoria da trabalhabilidade para maiores distâncias de aplicação. Menor esforço de compactação
Saúde dos trabalhadores envolvidos	30 - 50% de redução na exposição aos fumos do asfalto em comparação com a mistura a quente

Fonte: Prowell (2007)

Outra vantagem obtida é a significativa redução do odor da mistura morna quando comparado àquele verificado na mistura convencional. Barthel *et al.* (2004) mencionam que foram encontradas reduções expressivas do odor em avaliações realizadas em campo em obras com misturas mornas (tipo Aspha-Min®).

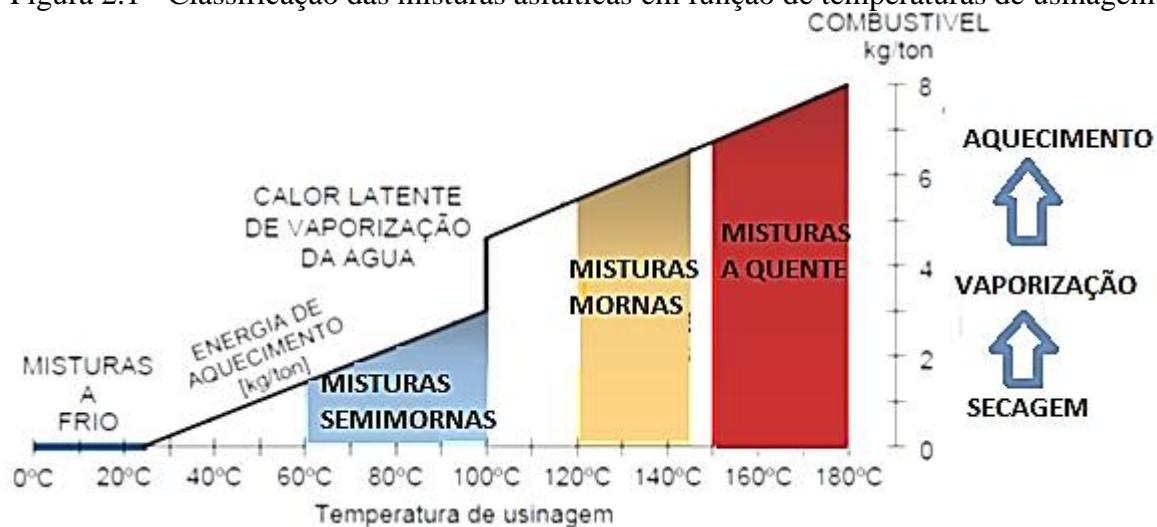
Se por um lado as vantagens estão sendo pouco a pouco comprovadas, por outro não se tem ainda resultados do desempenho a longo prazo destas misturas, justamente por ser relativamente cedo para se fazer a referida avaliação. Desta forma, estudos e pesquisas são necessários para obter os resultados, tanto em laboratório como em campo para se comprovar a eficácia de misturas usinadas a temperaturas moderadas, com os agregados disponíveis no Brasil.

#### 2.1.4 Classificação das misturas em função da temperatura de produção

As misturas a quente são aquelas em que a temperatura de usinagem varia entre 150° e 180°C, dependendo especialmente do tipo de ligante usado. As misturas a frio são produzidas à temperatura ambiente onde a emulsão utilizada e os agregados não passam pelo processo de aquecimento. Entre a temperatura de produção de misturas a quente e a temperatura utilizada nas misturas a frio, são produzidas as misturas mornas e semimornas. A diferença entre estas duas misturas é que esta última é produzida a temperatura menor ou igual a 100°C (PROWELL, 2007).

Em Motta (2011) é apresentada uma figura esquemática adaptada de Prowell (2007) que denomina a mistura de acordo com a temperatura de produção utilizada conforme reproduzido na Figura 2.1.

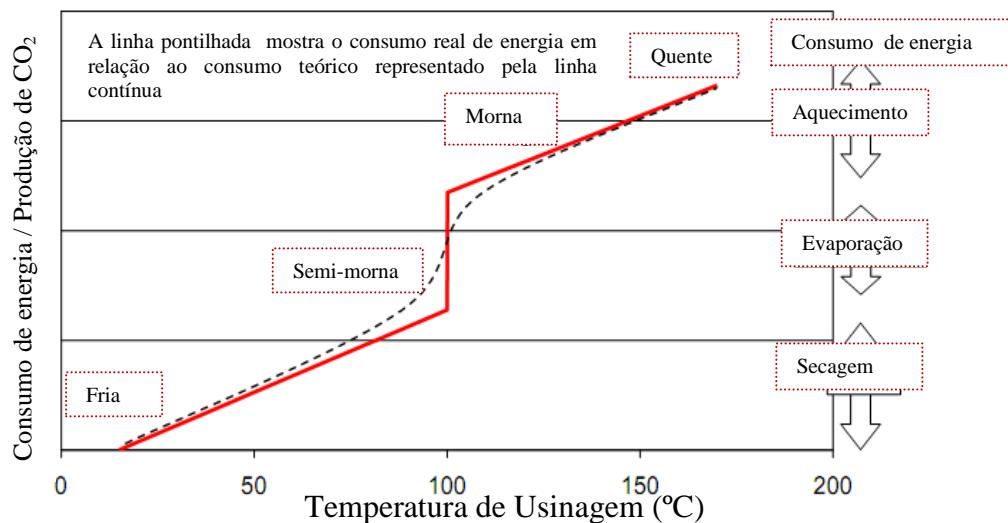
Figura 2.1 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas de usinagem



Fonte: Prowell (2007) adaptado por Motta (2011)

Em outro estudo é apresentado um quadro esquemático semelhante, porém diferindo no que se refere à energia consumida na transição da mistura semimorna para a morna, conforme apresentado na Figura 2.2. De acordo com o quadro, a queda no consumo de combustível na transição citada (linha pontilhada) é menos abrupta do que aquele apresentado pela linha sólida. Wall (2012) não apresentou dados referente a redução na emissão de CO<sub>2</sub>, apenas inferiu que a redução da energia resulta também em diminuição de gás carbônico e cita que pesquisas realizadas pela Associação Europeia de Pavimentação (EAPA), mostram que a diminuição de 10°C na temperatura de produção das misturas pode cortar a emissão de aerossóis pela metade.

Figura 2.2 - Consumo de energia e de emissão de gases durante a produção de misturas asfálticas



Fonte: Adaptado de Wall (2012)

### 2.1.5 Tecnologias utilizadas na produção das misturas mornas e semimornas

As misturas mornas e semimornas são basicamente produzidas a partir de três tecnologias distintas:

- Formação de Espuma
- Aditivos Surfactantes
- Aditivos Orgânicos/Ceras

Ferreira (2009) elaborou um quadro com as principais tecnologias existentes, no qual foram inseridos os principais produtos disponíveis, a temperatura de usinagem e as empresas detentoras das patentes dos referidos produtos. Sabe-se que atualmente já existem outros produtos que foram lançados com o objetivo de proporcionar a redução da temperatura de produção e de compactação das misturas asfálticas. Estudos com aditivos naturais também estão sendo realizados em diversas universidades brasileiras e do exterior. Na Tabela 2.2 é apresentado o quadro citado em Ferreira (2009) e em seguida são fornecidos maiores detalhes relativos a alguns produtos ligados às tecnologias citadas.

**Tabela 2.2 – Exemplo de aditivos utilizados em misturas mornas**

Aditivo	Produto	Temperatura de produção (°C)
Ceras	Sasobit	130 a 170 (dependendo da consistência do ligante)
	Asphaltan B	
	Licomout BS 100	
Surfactantes	Rediset	Redução de 15
	Cecabase	120 a 140
	Revix	130 a 140
	Evotherm	130 a 140
Asfalto Espuma minerais sintét. ou naturais	Zeólita natural	130 a 170 (dependendo da consistência do ligante)
	Aspha-Min®	
	Advera	
Asfalto Espuma injeção de água	WAM Foam	110 a 120
	Terex WMA System	130
	Double-Barrel Green	121 a 135
	LEA - Low Energy Asphalt	<100
	Ultrafoam GX	110 a 115

Fonte: Adaptado de Ferreira (2009)

#### ▪ **Tecnologia a partir da formação de espuma**

A técnica da formação de espuma pode ser elaborada de diferentes maneiras. O objetivo, no entanto, é o mesmo, fazer com que ocorra uma reação térmica entre a água (temperatura ambiente) e o CAP (quente), produzindo a espuma de asfalto que irá auxiliar no recobrimento do agregado e favorecer a trabalhabilidade da massa asfáltica. A reação ligante/água altera a viscosidade do CAP, permitindo desta forma a redução da temperatura de usinagem e facilitando a compactação em campo (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Poderá haver a necessidade de executar alterações na usina de asfalto. Entre estas alterações pode-se citar a implantação de tubulação para injeção de água ou aditivo como ocorreu no estudo elaborado por Neitzke e Wasill (2009).

Alguns métodos baseados nesta técnica são apresentados a seguir:

- ✓ Espuma pela inserção de zeólitas

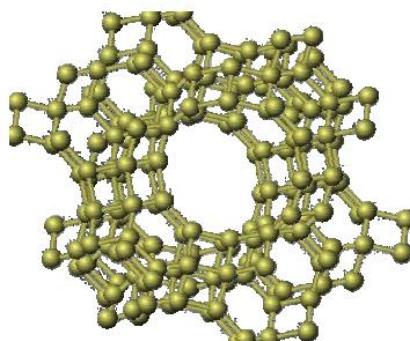
O termo zeólita, do grego zein + lithos, significa “pedra que ferve”. As zeólitas englobam um grande número de minerais naturais e sintéticos que apresentam características

comuns. Em virtude de sua estrutura, a zeólita apresenta: alto grau de hidratação; baixa densidade; grande volume de espaços vazios quando desidratada; alta estabilidade da estrutura cristalina, mesmo quando desidratada; propriedades de troca catiônica; canais de dimensões uniformes nos cristais desidratados; propriedades catalíticas; adsorção seletiva de gases e vapores (SOUZA FILHO, 2006).

Existem diversos usos para este material. Os tufos zeolíticos, por exemplo, (blocos de rocha), tem baixa densidade aparente, alta porosidade e podem ser cortados ou serrados facilmente. Muitas catedrais e prédios públicos foram construídos na Europa usando este material. Um alto percentual de zeólitas naturais (95%) podem ser usados como material ativo na produção de cimento pozolânico com 5 a 20% de zeólitas (LUZ, 1995). As zeólitas também são comumente utilizadas como amaciante de roupas, tendo como característica a propriedade de perder e adsorver água sem causar danos à sua estrutura cristalizada (GOH *et al.*, 2007). Apesar de existirem outros produtos baseados em zeólitas sintéticas capazes de reduzirem a temperatura de usinagem, os produtos Advera® e Aspha-Min® são aqueles com maior destaque no mercado Europeu e nos Estados Unidos.

Estes produtos trabalham de forma similar. A zeólita sintética (Silicato de Sódio e Alumínio), pela qual é produzido o Aspha-Min®, foi cristalizada hidrotermicamente possuindo em torno de 20% de água, que é liberada à temperatura de 85° a 182°C. A estrutura das zeólitas tem grandes espaços vagos que são interconectados formando largos canais, dependendo do tipo de mineral. Os canais facilitam o movimento de íons e de moléculas, interna e externamente às zeólitas (GOH *et al.*, 2007). A Figura 2.3 apresenta os canais e as cavidades moleculares existentes em uma zeólita.

Figura 2.3 - Estrutura molecular de uma zeólita



Fonte: Sousa Filho (2006)

Ao adicionar Aspha-Min® na usinagem de misturas asfálticas juntamente com o ligante, a água é liberada em forma de vapor, proporcionando uma expansão no volume do

CAP e resultando em uma espuma que permitirá que os agregados possam ser totalmente recobertos pelo ligante (GOH *et al.*, 2007). Desta forma o produto obtido é uma mistura flexível e com boa trabalhabilidade por várias horas, mesmo a baixas temperaturas. Após o resfriamento da mistura ocorre o retorno às propriedades originais da mesma. O que permanece no concreto asfáltico é um tipo de areia sintética ([www.aspha-min.com](http://www.aspha-min.com)).

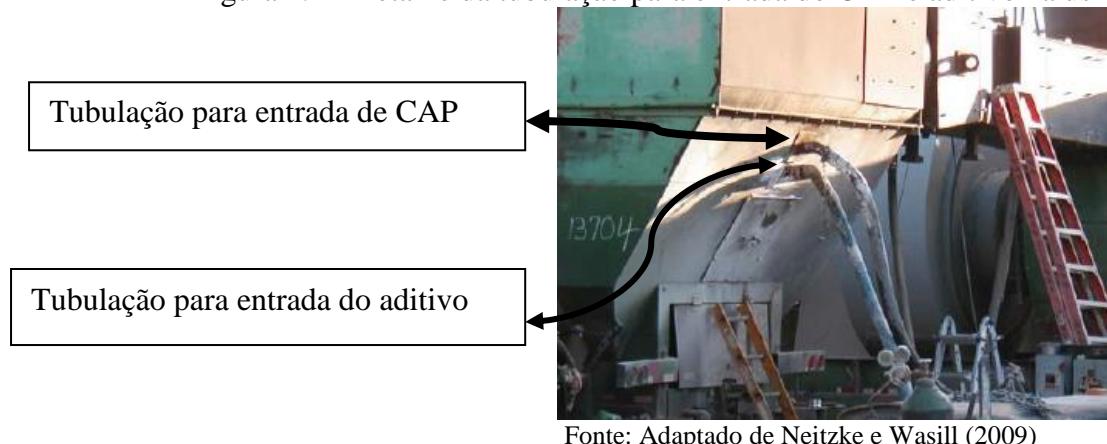
Conforme apresentado na Tabela 2.2, a temperatura de usinagem pode ser reduzida a até 130°C. A taxa de aplicação do Aspha-Min® é da ordem de 0,3% do peso total da mistura (BUTTON *et al.*, 2007).

O produto pode ser utilizado com o ligante convencional ou com o ligante com polímero. O Aspha-Min® e o Advera® podem ser misturados no processo de usinagem, quando ocorre a entrada do CAP. Porém, no caso do Advera®, verifica-se que a mistura prévia deste aditivo com o ligante, seguido de forte agitação, permite uma melhor dispersão das zeólitas proporcionando resultados mais eficazes. Ambos os produtos podem ser utilizados tanto em usinas gravimétricas quanto em usinas volumétricas (PROWELL e HURLEY, 2007).

Um projeto com o objetivo de utilizar misturas mornas em estradas de Parques Federais (*Federal Lands Highway*) nos Estados Unidos foi realizado no *Yellowstone National Park*. Para este projeto foram utilizadas duas diferentes tecnologias de mistura morna que foram comparadas com uma mistura convencional denominada “Controle”. Uma das misturas mornas foi produzida a partir do produto Advera® e a outra foi modificada com uma cera sintética denominada Sasobit® (NEITZKE e WASILL, 2009).

Para a obra, estava prevista a reconstrução da Entrada Leste do parque com 11,5km de extensão. O carregamento previsto para 20 anos de projeto foi estimado em  $1 \times 10^6$  ESALS (*equivalent single axle loads*), ou, no Brasil, carregamento equivalente de eixos simples de roda dupla, o nosso número *N* (NEITZKE e WASILL, 2009). Foi solicitado pelos projetistas que se fizesse o menor número de modificações na usina para permitir a inserção do aditivo na mistura (FIGURA 2.4). Utilizaram-se os mesmos equipamentos para o espalhamento e a compactação tanto na mistura de controle como para as misturas mornas.

Figura 2.4 - Detalhe da tubulação para entrada do CAP e aditivo na usina



Fonte: Adaptado de Neitzke e Wasill (2009)

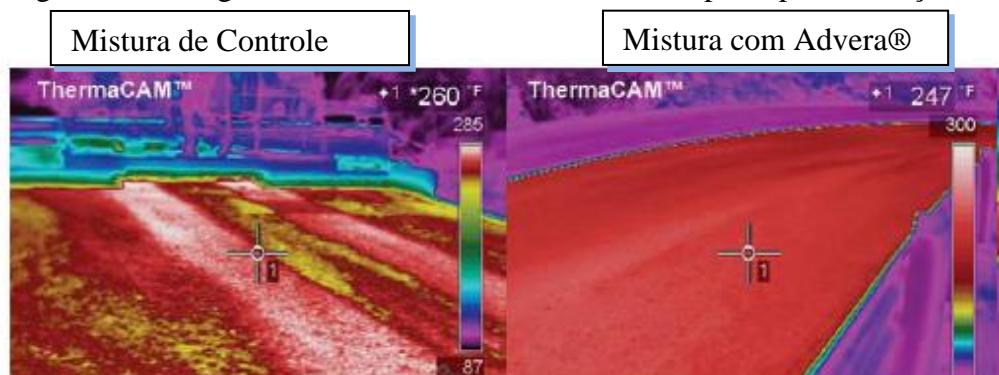
O produto Advera® foi aplicado como recomendado pelo fabricante a uma taxa de 0,3%. A temperatura de usinagem inicialmente foi de 135°C. Em virtude do sucesso obtido com esta temperatura, especialmente no que se refere à compactação e a trabalhabilidade da mistura, optou-se pela redução gradual da temperatura nos três dias seguintes em que a mistura foi elaborada, até que se chegou a uma temperatura final de 121°C.

Entre os principais achados de Neitzke e Wasill (2009), citam-se:

- I. Os trabalhadores envolvidos não sentiram diferenças entre a mistura controle e a mistura com Advera®, a não ser em relação a compactação que foi mais facilmente obtida para a mistura com o aditivo. A ausência da fumaça visível e dos fumos de asfalto, talvez tenha sido a maior diferença percebida. Foram aplicadas 9.650 toneladas de mistura com Advera®;
- II. Foram tiradas imagens térmicas das misturas logo após a pavimentação para verificar a segregação térmica ocorrida (FIGURA 2.5). Percebeu-se que a mistura morna exibiu uma temperatura mais similar em vários pontos, provendo uma massa mais uniforme no que se refere à temperatura;
- III. O controle da temperatura na usina foi dificultado em virtude, provavelmente, da umidade do agregado ou do ajuste apropriado do queimador;
- IV. Nenhuma das misturas apresentou problemas de adesividade (controle e com aditivo);
- V. Os resultados dos testes *Hamburg* e *Asphalt Pavement Analyzer* (APA), mostraram que as misturas apresentaram boa resistência à deformação permanente;

VI. Houve uma substancial economia no consumo de combustível em virtude da redução das temperaturas de usinagem.

Figura 2.5 - Imagens térmicas tiradas imediatamente após a pavimentação



Fonte: Neitzke e Wasill (2009)

- ✓ Espuma pela inserção de água

Em 2007, a equipe do Laboratório de Pavimentação da UFRGS realizou uma pesquisa encomendada por uma concessionária de rodovias local com o objetivo de avaliar a redução das temperaturas de usinagem e de compactação em misturas asfálticas. A técnica empregada neste estudo foi a proposta pela empresa francesa Fairco denominada EBE (*Enrobés à Basse Énergie*). A EBE consiste em secar os agregados graúdos (retidos na #4) e deixar os agregados miúdos com umidade determinada em projeto. Posteriormente, é realizada a mistura do ligante e do agregado graúdo a temperatura convencional e o agregado miúdo úmido é então adicionado, provocando a expansão do ligante e permitindo a homogeneidade da mistura a uma temperatura de aproximadamente 100°C (CERATTI *et al.*, 2007).

Os resultados mecânicos obtidos nessa pesquisa demonstraram que os valores entre a mistura de referência e as misturas mornas com três diferentes teores de água (5%, 8% e 10%) ficaram bastante próximos, sendo que a mistura com 10% de água obteve uma RT em torno de 9% superior àquela encontrada para a mistura de referência elaborada pelo Laboratório da UFRGS. No que se refere à verificação do dano por umidade induzida, o teste foi realizado apenas com a mistura contendo 8% de água e com a mistura de referência. O ensaio utilizado foi o preconizado na norma AASHTO T283 (2007), também conhecido como ensaio de Lottman modificado.

O resultado da Resistência Retida à Tração (RRT), que representa a relação entre a RT da amostra após o condicionamento e a RT da amostra não condicionada, foi de 70%

para a mistura morna. Desta forma, a mistura se enquadrou nas especificações brasileiras. Com relação à mistura de referência, obteve-se um resultado superior com RRT atingindo o valor de 82% (CERATTI *et al.*, 2007).

Um processo semelhante denominado de LEA - *Low Energy Asphalt* foi avaliado por Olard e Gaudefroy (2011). Comparou-se o desempenho entre uma mistura convencional e três misturas produzidas em temperaturas reduzidas, as quais foram denominadas LEA1, LEA2 e LEA3. Com o objetivo de se obter o melhor envolvimento do agregado pelo ligante, além de uma formação de espuma mais adequada, foi utilizado um aditivo no CAP com uma taxa de 0,5% do peso do ligante. A quantidade inicialmente prevista de água presente no agregado foi de 1,5% em relação ao seu peso seco. O ligante foi aquecido a 160°C em todas as misturas estudadas.

As variações utilizadas para a mistura morna são descritas abaixo:

- I. Parte do agregado utilizado na mistura (75%) foi aquecido a 140°C e misturado ao ligante a 160°C, e em virtude deste fato o agregado ficou envolvido por uma espessa camada de CAP. Posteriormente, o agregado restante (25%), que se encontra úmido foi adicionado e misturado com todo material provocando uma redução na temperatura que atinge os 95°C (LEA1);
- II. Parte do agregado utilizado na mistura (75%) foi aquecido a 140°C e posteriormente é adicionado o agregado úmido. O CAP a 170°C foi inserido e realizou-se a mistura que atingiu a temperatura final de 95°C (LEA2);
- III. Todos os agregados foram secos a uma temperatura de 100°C e posteriormente foi realizada uma adição controlada de água seguindo-se a mistura dos agregados pelo ligante que se encontrava a 170°C. Esta mistura fez com que a temperatura final seja de 95°C (LEA3).

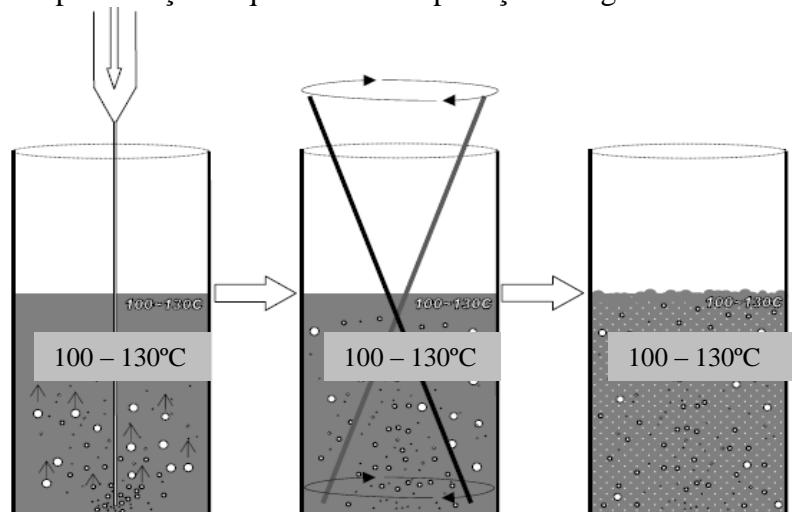
As misturas foram condicionadas em estufa por duas horas sendo que a mistura de referência foi colocada a 110°C e a mistura com umidade a 75°C. Em duas das misturas com água (LEA2 e LEA3) foi adicionado um aditivo para aumentar a adesividade e melhorar a trabalhabilidade.

Foram verificados o comportamento mecânico de cada uma das misturas e as emissões dos fumos de asfalto. Algumas conclusões obtidas pelos pesquisadores com o trabalho foram:

- I. Os valores de rigidez e de resistência à fadiga foram similares àqueles obtidos para a mistura de referência;
- II. A redução de temperatura levou a uma menor emissão de gases de forma geral nas misturas. Uma das misturas mornas estudadas promoveu uma redução de cerca de 45% nestes gases;
- III. Os ligantes recuperados durante o processo LEA sofreram menos modificação nos resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento (anel e bola) se comparado ao ligante recuperado da mistura de referência, o que indica um menor envelhecimento para o caso das misturas mornas.

Goh e You (2011) apresentaram um estudo em que a água foi inserida diretamente no ligante com percentuais de 1,0; 1,5 e 2,0% em relação ao peso do CAP. As amostras de mistura morna foram moldadas e compactadas em três temperaturas distintas (100°, 115° e 130°C), enquanto que a mistura de controle (sem água) foi produzida com a temperatura de 165° e compactada a 153°C. A inserção de água foi realizada através de uma seringa no CAP, este tendo sido aquecido na temperatura determinada para cada mistura. Após a inserção, que deve ser realizada de forma bastante rápida (menos de 1 segundo de acordo com os autores da referida pesquisa), ocorre uma volatilização das moléculas de água face a alta temperatura do ligante. Uma espátula então realiza a agitação para que o vapor possa dispersar de maneira a formar uma espuma de asfalto em toda a amostra, conforme apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Representação esquemática da aplicação de água diretamente no ligante



a) Injeção de água no fundo da amostra

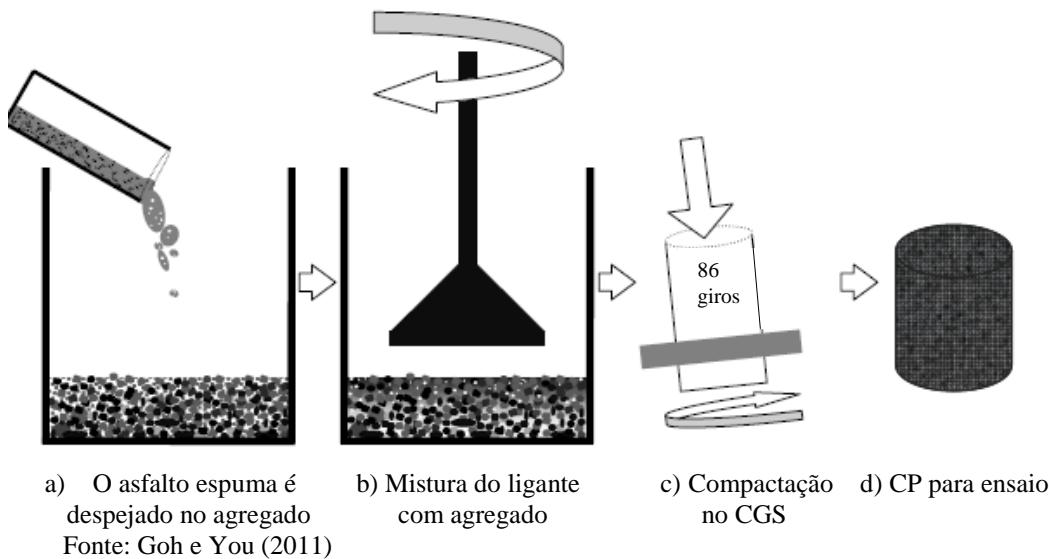
b) Agitação da mistura para formação da espuma

c) Estágio final - asfalto espuma formado

Fonte: Goh e You (2011)

O asfalto espuma então é imediatamente misturado ao agregado aquecido à mesma temperatura do ligante e compactado no Compactador Giratório Superpave (CGS) conforme pode ser visualizado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Representação esquemática da mistura do ligante com o agregado e posterior compactação

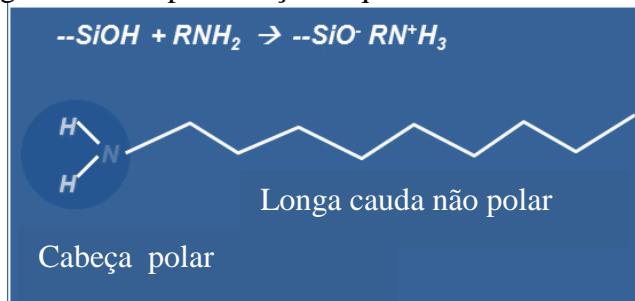


Para avaliar a susceptibilidade à umidade foram realizados ensaios de Resistência à Tração (RT), antes e depois do condicionamento das amostras. Foi observado que apesar das misturas mornas apresentarem valores inferiores no ensaio de RT, estas se comportaram melhor quando se fez a relação das amostras condicionadas com aquelas não condicionadas (RRT), obtendo valores superiores daqueles atingidos pela mistura de controle. A RRT pode indicar o quanto a água inserida que permaneceu na amostra, ou, a secagem incompleta do agregado afetaram a adesividade entre o ligante e o agregado. Entre as misturas mornas, a que apresentou melhores resultados foi àquela produzida a 115°C (GOH e YOU, 2011).

#### • Tecnologia a partir do uso de aditivos surfactantes

Ao contrário do que ocorre em outras técnicas de produção de misturas mornas, a utilização de aditivos surfactantes, de forma geral, não está relacionada com a alteração da viscosidade do ligante, mas sim com a obtenção de um melhor envolvimento entre o ligante e o agregado mesmo a baixas temperaturas. Estes aditivos são mais conhecidos como agentes ativos de superfície ou surfactantes e tem a característica de reagir simultaneamente com o ligante e com o agregado. Os surfactantes são compostos químicos com uma cabeça polar e uma longa cauda não polar (FIGURA 2.8).

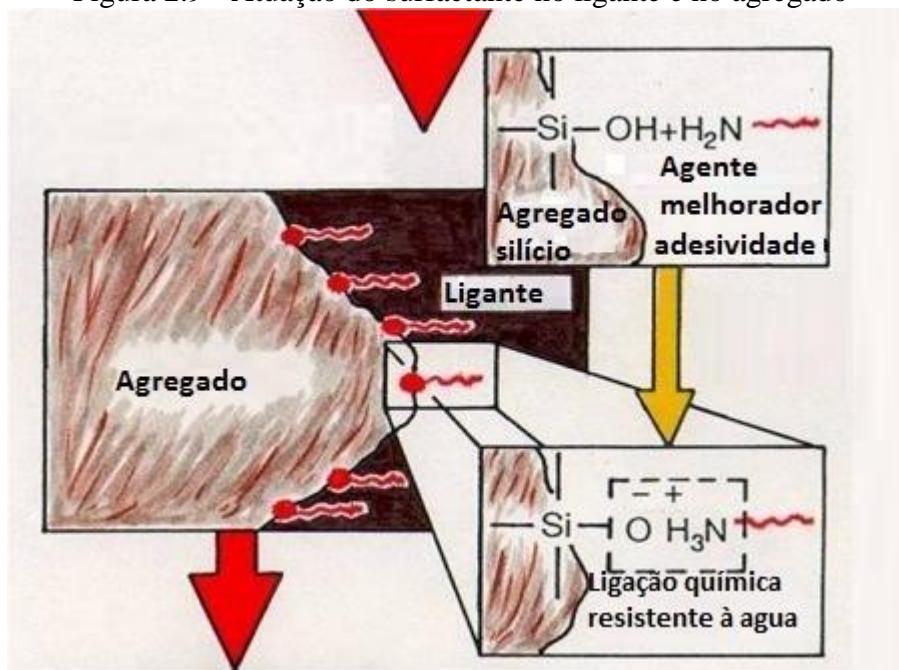
Figura 2.8 - Representação esquemática do surfactante



Fonte: Adaptado da apresentação da Akzo Nobel (2012)

Os elementos polares e não polares tendem a atrair para si materiais semelhantes. Um exemplo de surfactante é o detergente, que reage com o óleo de cozinha, permitindo assim, a limpeza que seria impossível apenas com a água. De forma análoga, o processo que ocorre com o aditivo surfactante utilizado em misturas asfálticas se realizará da seguinte maneira: o ligante, que tem uma característica predominantemente não polar, atraírá para si e será atraído pela parte não polar do elemento surfactante, enquanto que o agregado que tem uma característica mais polar será ligado à parte também polar do aditivo. Com esta reação é estabelecida uma forte interação entre o ligante e o agregado (FIGURA 2.9).

Figura 2.9 - Atuação do surfactante no ligante e no agregado



Fonte: Adaptado da apresentação Akzo Nobel (2012)

Diversos são os aditivos pertencentes a esta classe dentre os quais destacam-se Evotherm®, Rediset®, Cecabase® já relacionados na Tabela 2.2. Outro aditivo químico surfactante é denominado Gemul®, sendo produzido pela empresa brasileira Quimigel.

Alguns trabalhos realizados com o uso desses aditivos apresentaram, de forma geral, desempenho satisfatório em laboratório e também em campo. Ferreira (2009) utilizou em uma de suas amostras o produto Cecabase®, em um percentual de 0,3% do peso do ligante, conforme recomendado pelo fabricante, e verificou que a viscosidade dinâmica do ligante praticamente não foi alterada com a inserção do aditivo. A temperatura de produção utilizada em campo e em laboratório foi da ordem de 120° a 140°C para as misturas mornas enquanto que as misturas de referência foram produzidas entre 150° e 170°C. Foram verificados aspectos relacionados à sensibilidade a água e ensaios mecânicos (módulo de rigidez, resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga). A sensibilidade a água apresentou resultados semelhantes em todas as misturas. O ensaio do módulo de rigidez, de acordo com a norma europeia EN 13108-20, é realizado a uma temperatura de 20°C. Foram aplicadas cargas senoidais com frequências de 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8 e 10Hz. Os valores alcançados foram equivalentes sendo que a para a frequência de 10Hz mistura com Cecabase® em sua composição obteve o módulo de rigidez de 6900MPa enquanto que a mistura de referência (sem modificação) atingiu um valor ligeiramente inferior de 6600Mpa. No que se refere à estabilidade, as misturas mornas tiveram comportamento similar. A avaliação da resistência ao trincamento por fadiga foi realizada através do ensaio de flexão em viga apoiada em quatro pontos e novamente se constatou que o desempenho de todas as misturas estudadas foi semelhante (FERREIRA, 2009).

Uma pesquisa realizada por Kuang (2012) avaliou o produto Evotherm® como aditivo para mistura morna e melhorador de adesividade. Para avaliar a estabilidade das misturas utilizadas na pesquisa, Kuang (2012) utilizou parâmetros obtidos no CGS acrescidos de um acessório que verifica a força resistiva utilizada. Estes parâmetros são chamados de *Compaction Force Index* (CFI) e *Traffic Force Index* (TFI) e são explicados mais adiante nesta dissertação.

Na pesquisa em questão, foram utilizados dois tipos do aditivo Evotherm®, ambos da tecnologia 3G. Um denominado J1 que pode ser usado largamente e misturado de forma eficiente com o agregado mineral, e outro conhecido como M1 que fortalece aspectos ligados a resistência ao dano por umidade, apresentando valores elevados de RRT. Os teores utilizados foram 0,5% e 1,0% em peso do ligante (KUANG, 2012). Após a análise dos resultados obtidos as seguintes observações foram feitas:

- I. Os parâmetros CFI e TFI não foram afetados pelo teor de aditivo utilizado, mas sim pela variação na temperatura;
- II. Ao utilizar o aditivo M1 não foi notada variação nos valores de RT para as amostras não condicionadas. De maneira inversa, a mistura com aditivo J1 apresentou desempenho inferior para este parâmetro. Para a relação entre as RTs (condicionada e não condicionada) observou-se que a mistura com M1 e a mistura de referência se comportaram melhor se comparadas a mistura com J1;
- III. Comparando os teores de aditivo J1 utilizados (0,5% e 1,0%) observou-se que o primeiro teor foi o mais adequado para as misturas estudadas, apresentando um bom comportamento no que se refere à susceptibilidade a umidade;
- IV. No que se refere ao parâmetro ligado à rigidez da mistura ( $E^*$ ), os valores obtidos para a mistura com M1 foram semelhantes àqueles encontrados para a mistura com J1;
- V. A análise da resistência à deformação permanente foi realizada no equipamento Hamburg Wheel Track Devices (HWTD) que também avaliou a resistência a degradação das misturas. O teste é interrompido quando a amostra atinge uma espessura de deformação de 50mm ou no momento em que o equipamento realiza 20.000 passadas pelas amostras. Verificou-se que, tanto as misturas com M1 quanto com J1 se mostraram mais resistentes à deformação com afundamentos médios na ordem de 3,4mm enquanto que a mistura de controle apresentou afundamento médio de 4,96mm.

Uma avaliação da resistência à deformação permanente em misturas contendo aditivos para mistura morna foi avaliada por Zhao *et al.* (2011). Para verificar o desempenho das misturas estudadas, foi utilizado o equipamento APA. Três diferentes ligantes, uma mesma fonte de agregado e quatro aditivos para mistura morna (duas ceras e dois surfactantes) foram usados na elaboração da pesquisa.

Foram produzidas misturas nas temperaturas de 150°C, 135°C e 120°C e, todas elas foram compactadas com um decréscimo de 15°C em relação às temperaturas de mistura, ou seja, 135°C, 120°C e 105°C, respectivamente. Os pesquisadores constataram que as misturas com aditivo químico apresentaram similaridade no que se refere a aspectos ligados a

resistência à deformação permanente. Foi verificado também que os aditivos químicos surfactantes não alteram as propriedades reológicas do ligante (ZHAO *et al.*, 2011), como já se era esperado devido às informações de fornecedores e constatações de outras pesquisas.

No trabalho realizado por Motta (2011) foram avaliadas misturas mornas com o intuito de verificar a diminuição do consumo energético e da emissão de poluentes gerados por este tipo de mistura. Os ligantes classificados como CAP 50/70 e CAP 30/45 foram modificados através da adição de dois aditivos químicos surfactantes (Cecabase® RT e Gemul® XT14). Durante a pesquisa, por dificuldades no fornecimento de um dos aditivos, optou-se pela continuidade apenas com o aditivo Gemul®, o qual é produzido no Brasil. As consistências encontradas para o ligante puro e para o modificado, verificadas pelos ensaios de penetração e viscosidade foram semelhantes, reforçando o conceito que o aditivo surfactante não age nas propriedades de consistência do CAP.

A pesquisadora promoveu um estudo laboratorial e de campo através da aplicação das misturas em trechos experimentais em duas importantes rodovias no estado de São Paulo (Rodovia Presidente Dutra e Rodovia dos Bandeirantes) (MOTTA, 2011). Em uma das misturas modificadas com Gemul® foi adotada uma redução de 25°C em laboratório tanto para a temperatura de usinagem como para a temperatura de compactação. A temperatura do ligante foi mantida igual àquela utilizada para a mistura a quente tendo sido reduzida a temperatura do agregado. Foram executadas amostras em laboratório em que os teores de CAP das misturas de referência foram replicados às misturas mornas e amostras em que estes teores sofreram acréscimos de 0,2% a 0,4%. A curva granulométrica, no entanto, foi mantida constante. Foram comparados três tipos diferentes de compactação: Marshall, mesa compactadora e prensa de cisalhamento giratório (compactador giratório francês). Tanto em laboratório quanto nas pistas experimentais foi observado uma similaridade nos resultados dos ensaios mecânicos (RT, MR, dano por umidade induzida, resistência à deformação permanente) das misturas mornas e misturas de referência. Assim, de forma geral, a autora observou que a qualidade das misturas mornas produzidas a partir do uso do aditivo surfactante utilizado é semelhante àquelas usinadas a quente, tendo porém, a vantagem das reduções substanciais na emissão de poluentes e no consumo de combustível usado para secagem e mistura dos insumos que compõem a massa asfáltica (MOTTA, 2011).

#### ▪ **Tecnologia a partir do uso de ceras**

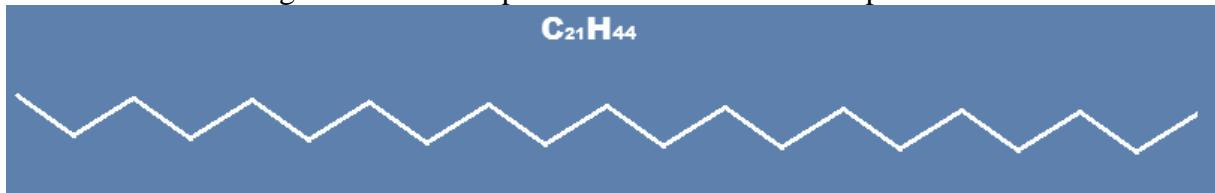
O uso de aditivos orgânicos em forma de cera em misturas asfálticas têm bons resultados em programas experimentais e aplicações de campo em diversos locais. Estes

aditivos permitem a produção e a compactação de misturas asfálticas a temperaturas reduzidas. São também conhecidos como fíleres inteligentes, pois 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. Este fato é um benefício adicional, pois, poderia proporcionar uma maior resistência à deformação permanente das misturas asfálticas, especialmente quando aplicadas em locais em que a temperatura de serviço é elevada (CROTEAU e BERNARD, 2008).

Um dos produtos desta tecnologia mais conhecidos no mercado é o aditivo Sasobit® (cera sintética) preparado através da síntese tipo Fischer-Tropsch (F-T), o qual é oriundo do processo de gaseificação do carvão. Possui uma longa cadeia de carbono que varia de C<sub>45</sub> a C<sub>100</sub> e possui ponto de amolecimento entre 90° e 100°C. Esta cadeia mais longa de carbono no processo da cera do tipo F-T eleva o ponto de amolecimento do material.

As ceras sintéticas diferem da parafina as quais são incluídas naturalmente no ligante asfáltico e possuem cadeias de carbono menores variando de C<sub>21</sub> a C<sub>50</sub> (FIGURA 2.10). Cadeias mais curtas geram um menor ponto de amolecimento que fica entre 45° e 70°C (PETIT *et al.*, 2012).

Figura 2.10 - Exemplo de cadeia de carbono da parafina



Entre 120° e 130°C as ceras sintéticas tendem a diminuir a viscosidade dinâmica do ligante asfáltico permitindo o completo recobrimento do agregado. O CAP é modificado com este aditivo em uma taxa que varia de 0,8 a 3,0% (PETIT *et al.*, 2012). No referido estudo elaborado por Petit e seus colaboradores, procurou-se verificar o comportamento à fadiga bem como a rigidez das misturas. Foram produzidos dois tipos de misturas (quente e morna) com temperaturas de usinagem e de compactação, respectivamente, de 160° e 150°C, para misturas a quente, e, 130° e 120°C, no caso de misturas mornas. Utilizou-se uma taxa de 3% do aditivo Sasobit® em relação ao peso do ligante.

Foi realizada a comparação da mistura pura com a modificada no parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga. Observou-se que a cera sintética promoveu uma melhoria no comportamento de fadiga da mistura (PETIT *et al.*, 2012).

Uma cera natural, proveniente da carnaúba, está sendo avaliada já há algum tempo na UFC para utilização como aditivo para misturas asfálticas. A carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma palmeira nativa da região semiárida do Nordeste brasileiro. Tem um papel importante no equilíbrio ecológico regional, especialmente no que se refere a conservação dos solos e a proteção dos rios contra a formação de processos de erosão e de assoreamento. É encontrada em grande quantidade no estado do Ceará sendo considerada uma planta xerófila, ou seja, capaz de resistir às secas. É interessante notar que justamente para se adaptar ao clima, a carnaúba desenvolveu uma característica peculiar: a secreção de cera em grandes quantidades, como forma de reduzir a transpiração foliar. A carnaúba tem inúmeras utilidades que vão de uso medicinal (raiz), construção civil (madeira), alimentação humana e animal (fruto) até velas, polidores para automóveis, equipamentos eletrônicos e outros (cera). Em função deste fato é conhecida como “árvore da vida”, “boi vegetal”, etc. A Carnaúba tem folhas em forma de leque, cobertas em ambas as superfícies, por uma camada cerosa. Os sertanejos têm diferentes denominações para as folhas da carnaúba: as folhas novas que ainda não abriram são os “olhos”, as folhas verdes maduras são as “palhas”, as folhas intermediárias ou olhos recém-abertos são as “medianas ou bandeiras” e as folhas velhas secas aderidas à carnaúba são as “palhas bravas” (D’ALVA, 2004).

Figura 2.11 - Imagens da carnaúba

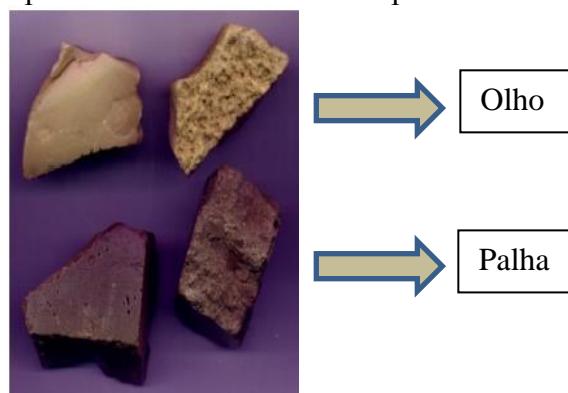


Fonte: portalopovo.com.br/noticia (2013) Fonte: Soares (2013)

De acordo com a denominação da folha em que a cera é produzida e do processo de refino há uma subdivisão na sua nomenclatura. Assim a cera tipo 1 (CT1) de coloração clara, é obtida pela filtragem da cera “olho”, enquanto que a partir da filtragem da cera “palha” são obtidas as ceras CT3 (filtrada e clareada), a CT4 (filtrada) e a CT4 obtida pelo processo de centrifugação (D’ALVA, 2004).

Na presente dissertação utilizou-se a cera CT4 por ser a que apresenta menor custo e porque suas propriedades não diferem muito das demais em sua utilização como aditivo. Esta cera possui ponto de fusão em torno de 86°C podendo desta forma, reduzir a viscosidade do CAP no momento da produção e da compactação e aumentando a rigidez da mistura asfáltica nas temperaturas de serviço. Na Figura 2.12 é possível verificar a diferença de coloração entre a cera proveniente do “olho” e a cera oriunda da “palha”.

Figura 2.12 - Tipos de cera proveniente do “olho” e da “palha” da carnaúba



Fonte: D’Alva (2004)

Os dados referentes a produção de cera e valores foram levantados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) conforme mostrado na Tabela 2.3. De acordo com este Instituto, a produção da carnaúba se concentra na região Nordeste, sendo que o estado do Ceará representa um volume em torno de 80% da produção nacional.

Tabela 2.3 - Produção de cera de carnaúba no Brasil, extração vegetal (2011)

Ceras	Quantidade (ton)	Valor R\$ (1.000 )
Carnaúba (cera)	2.638	18.015,00
Carnaúba (pó)	18.636	90.253,00

Fonte: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)

### **2.1.6 Pontos a serem observados nas Misturas Mornas**

#### **▪ Envelhecimento**

Em relação ao envelhecimento de misturas asfálticas durante sua vida útil, pode-se dizer que o mesmo ocorre em três etapas principais. A primeira etapa refere-se à mistura em usina do ligante com o agregado. A segunda etapa se dá no transporte e na compactação da mistura, enquanto que a terceira etapa ocorre durante a vida útil do revestimento. Estudos mostram que o aumento da viscosidade ou o endurecimento da mistura, ocorrem com mais intensidade nas duas primeiras fases. Este envelhecimento, mais conhecido como envelhecimento de curto prazo é promovido em virtude dos seguintes fatores: (i) altas temperaturas a que são submetidos tanto o ligante como os agregados; (ii) elevada relação da área superficial de agregados pelo volume do ligante e (iii) exposição ao ar (TONIAL, 2001). A terceira etapa, reconhecida como envelhecimento a longo prazo, refere-se a exposição da mistura às intempéries durante a vida de serviço do revestimento.

Uma vez que, ao se produzir misturas mornas, a temperatura é reduzida de forma expressiva, é intuitivo dizer que o envelhecimento do ligante, e consequentemente da mistura ocorra em menor escala. Isso poderia se refletir em um benefício importante para a mistura que teria menos propensão a sofrer trincamentos precoces no revestimento.

#### **▪ Deformação Permanente**

A deformação permanente localizada principalmente nas trilhas de roda é uma das principais formas de deterioração dos pavimentos asfálticos e diversos são os problemas associados a este defeito em rodovias brasileiras. Há comprometimento na serventia, além de prejuízos à estrutura do pavimento. A segurança do usuário é afetada, especialmente em períodos chuvosos, pois a água tende a acumular-se nas trilhas de roda podendo reduzir, de forma significativa, o atrito entre o pavimento e o pneu.

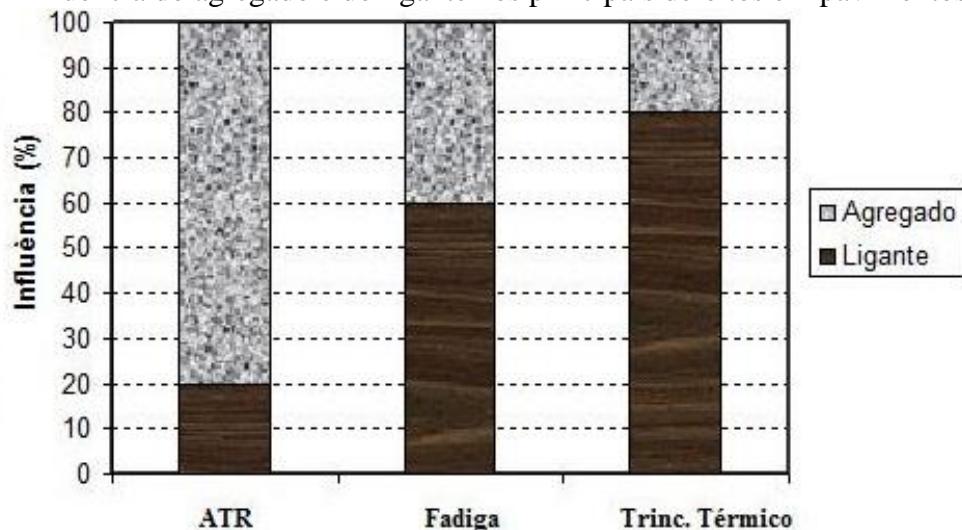
Este tipo de dano na pista pode ser definido como um desenvolvimento gradual de depressões longitudinais que ocorrem geralmente nas trilhas de roda em virtude do aumento de repetições do carregamento. A deformação pode ocorrer não somente nas camadas do pavimento, mas também no subleito e é causada por uma combinação da densificação e da deformação cisalhante, sendo que a primeira origina-se principalmente em virtude da compactação inadequada. Neste caso, os vazios deixados após a execução dos serviços, não previstos em projeto, serão preenchidos pela passagem das cargas impostas pelos veículos comerciais. Este defeito pode também ocorrer quando camadas com espessura reduzida são consolidadas pelo tráfego. A deformação permanente pode ter seu impacto minimizado pela

utilização de agregados que permitam o intertravamento da estrutura do revestimento e também pela correta compactação durante a construção (ROBERTS *et al.*, 1996).

Alguns fatores ligados à resistência à deformação permanente são: (i) percentual de ligante asfáltico elevado, (ii) granulometria com alto teor de finos, (iii) ligante asfáltico com consistência baixa para a temperatura da região, (iv) agregados com baixa angularidade, baixa rugosidade e forma esférica, (v) temperaturas elevadas e (vi) compactação insuficiente.

Apesar de todos os fatores citados contribuírem para a deformação permanente, a FHWA cita que o agregado responde por aproximadamente 80% quando se faz referência ao afundamento de trilha de roda (ATR) a este tipo de defeito conforme pode ser verificado no esquema apresentado na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Influência do agregado e do ligante nos principais defeitos em pavimentos



Fonte: Adaptado de FHWA

Bessa (2012) realizou um estudo de caracterização de agregados através do processamento digital de imagens. Na pesquisa o autor descreveu a influência das propriedades dos agregados no comportamento de misturas asfálticas. Agregados mais angulares, por exemplo, promovem um maior intertravamento e atrito interno, o que pode diminuir a trabalhabilidade da mistura, no entanto, estes agregados proporcionarão maior resistência a deformação permanente. No que se refere à textura superficial foi verificado que agregados mais lisos podem facilitar a compactação por gerar menos atrito entre as partículas, porém estes tendem a reduzir a resistência à deformação permanente, especialmente em camadas mais espessas de revestimento e com temperaturas de serviço elevadas.

Embora o desempenho em campo das misturas mornas tenha apresentado resultados compatíveis com aqueles encontrados para misturas convencionais, de acordo com diversos estudos realizados até o momento, alguns pesquisadores mostram-se preocupados com o desempenho de longo prazo das mesmas. Isto ocorre em função de que a maioria dos trechos executados nos Estados Unidos tem em torno de 5 anos. Até o momento, porém, os resultados têm se mostrado positivos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

O *National Center Asphalt Technology* (NCAT), nos Estados Unidos conduziu alguns estudos com diferentes técnicas de mistura morna. Ficou demonstrado uma melhora na densificação no CGS e uma redução do Volume de vazios (Vv). Conforme já relatado, a redução da temperatura na fabricação das misturas promove uma mitigação do envelhecimento de curto prazo, o que significa redução na rigidez, como se tem observado pelos resultados do ensaio de RT (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

Se por um lado a mistura se apresenta com maior trabalhabilidade, facilitando a compactação, por outro, este fato pode provocar uma redução da resistência à deformação permanente da mesma. É primordial que após a compactação, a mistura obtenha uma rigidez inicial suficiente com o intuito de resistir à deformação provocada pelo carregamento.

Para aumentar a resistência à deformação permanente, uma das formas seria a elaboração de mistura com uma granulometria que promovesse um maior intertravamento das partículas. Além disso, agregados mais rugosos e angulares, conforme já citado, podem afetar positivamente o desempenho das misturas asfálticas.

Existem alguns métodos adotados para selecionar uma granulometria mais adequada à situações as quais o pavimento está sujeito. O Método Bailey, é um destes métodos, o qual foi desenvolvido no Departamento de Transportes de Illinois (IDOT) e é utilizado desde 1980. Cunha *et al.* (2004) citam que o Método Bailey visa suprir a necessidade de um método sistemático de seleção granulométrica para misturas asfálticas, capaz de proporcionar um revestimento com resistência às deformações permanentes, às trincas por fadiga e ao desgaste.

O trabalho apresentado por Cunha *et al.* (2004) aplicou o Método Bailey a um conjunto de misturas asfálticas preparadas em laboratório com dois tipos de agregados (basáltico e gábro) e um ligante asfáltico (CAP 20), onde foram avaliadas as proporções volumétricas tradicionais: volume de vazios (Vv), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume vazios (RBV) e de ensaios mecânicos de resistência a tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR) e compressão uniaxial estática. Os resultados

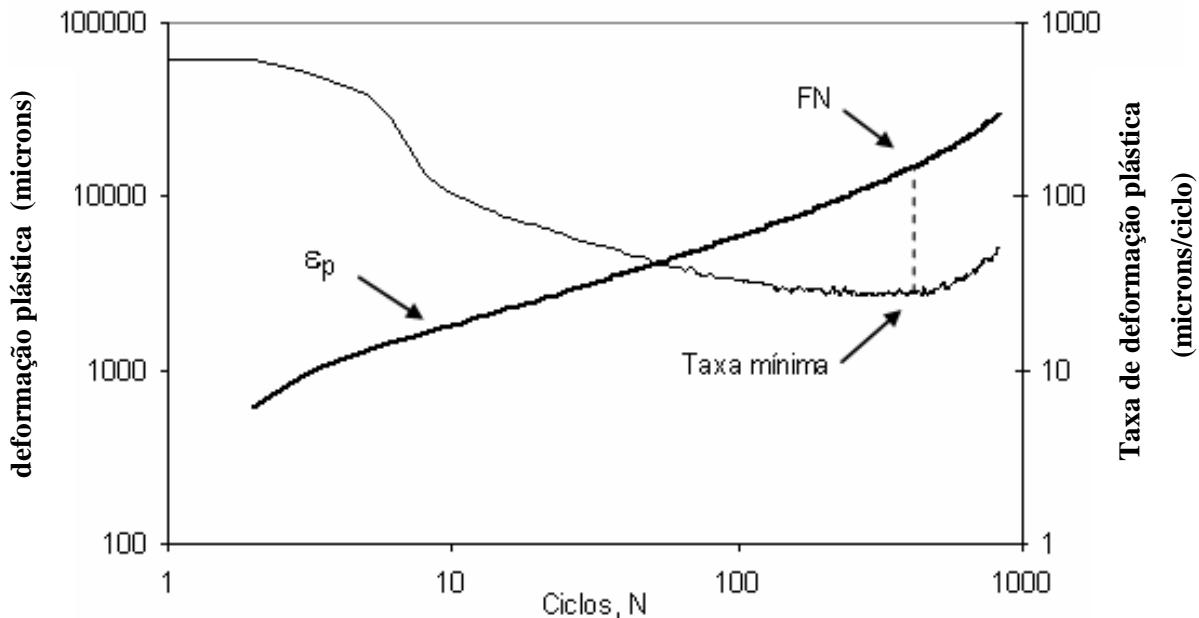
foram promissores notando-se melhorias expressivas em relação ao intertravamento do agregado quando se compara o método das tentativas e o Método Bailey.

A metodologia Superpave estabelece uma série de critérios para a seleção do tipo de agregado e da granulometria a ser utilizada, tendo pontos de controle para algumas peneiras em que a mistura dos agregados deverá passar, e também uma zona de restrição. Acreditava-se que ao se deixar de passar na zona de restrição, evitar-se-ia a linha de densidade máxima que poderia apresentar valores não desejados de Vazios do Agregado Mineral (VAM). Desta forma, com o objetivo de se obter uma mistura com um melhor esqueleto mineral, a mistura mais adequada seria aquela que passasse abaixo da zona de restrição. Este fato tem causado controvérsias, pois alguns estudos que avaliaram misturas que passam dentro da zona de restrição ou acima desta obtiveram resultados mais favoráveis se comparados àquelas que seguiram a recomendação Superpave. Em razão disso, a zona de restrição foi retirada da publicação da especificação AASHTO M 323 (GOUVEIA, 2006).

Para as misturas mornas, que podem apresentar alguma redução na resistência a deformação permanente, conforme já citado, acredita-se ser fundamental uma adequada composição granulométrica. Um dos parâmetros mais utilizados atualmente para avaliação da resistência da mistura a este tipo de defeito é conhecido como *Flow Number* (FN), o qual é obtido através do ensaio conhecido por *Creep* Dinâmico ou por fluênci a uniaxial de carga repetida. As amostras, estabilizadas a uma temperatura de 60°C, são submetidas a um carregamento cíclico de compressão com frequência de 0,1s de carga e 0,9s de descanso. A tensão aplicada em cada ciclo é de 204kPa no período de 0,1 s e 10,2kPa (5%) no período de 0,9s (descanso). A deformação plástica ( $\varepsilon_p$ ) vai aumentando com a aplicação de carga enquanto que a taxa de deformação decresce até atingir um valor mínimo para posteriormente começar a crescer.

O *Flow Number* representa o número de ciclos em que a taxa de deformação plástica é mínima (FIGURA 2.14). Considera-se o ensaio como encerrado quando: (i) o FN é atingido, (ii) o ciclo de número 10.000 é atingido ou (iii) a mistura alcança 5% de deformação (DONGRE *et al.*, 2009 *apud* ONOFRE, 2012).

Figura 2.14 - Gráfico demonstrativo da taxa de deformação mínima e obtenção do FN



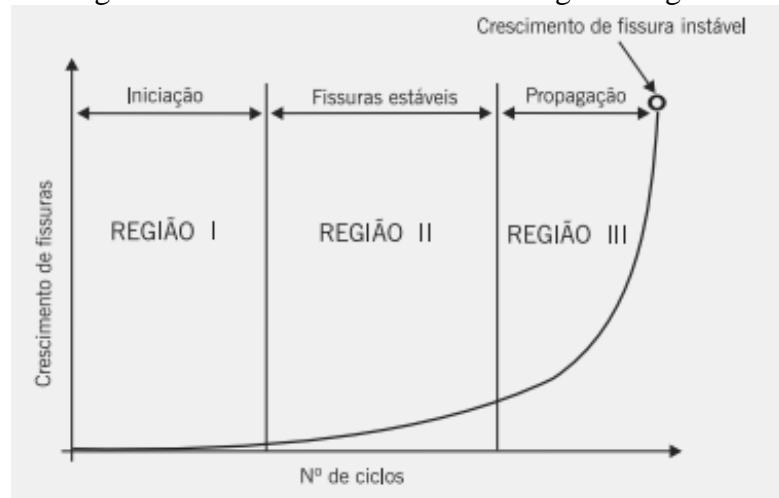
Fonte: Onofre (2012)

#### ■ Fadiga

A passagem de veículos sobre as rodovias produz danos contínuos nos pavimentos ainda que estes possam ser imperceptíveis no início. Estas cargas não causam a ruptura por serem inferiores àquelas que trariam o colapso da estrutura. A medida, porém, que a repetição da passagem dos veículos ocorre, haverá um momento em que o pavimento estará comprometido sendo necessária a execução de uma intervenção no mesmo.

Este fenômeno ocasionado pelo carregamento cíclico é denominado de fadiga e pode ser dividido em três regiões conforme apresentado na Figura 2.15. Na região I são formadas as microfissuras e os danos irreversíveis, enquanto que na região II as microfissuras se ligam formando macrofissuras. Na região III as macrofissuras crescem produzindo a deterioração total do revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2008). Em laboratório a verificação deste tipo de dano é realizada à Tensão Controlada (TC), Deformação Controlada (DC) ou intermediária. No ensaio de TC, a tensão é constante e a deformação cresce até atingir a ruptura. Já o modo a DC, a deformação é constante e a tensão vai diminuindo evitando assim que haja uma elevação do nível de deformação. Em virtude deste fato, para se avaliar o limite de ruptura do material, é comum admitir-se que o mesmo é atingido quando este sofre uma redução de 50% de sua rigidez inicial (LOUREIRO, 2003).

Figura 2.15 - Divisão da curva de fadiga em regiões



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

No Brasil, o ensaio para verificação de fadiga, apesar de não ter sido normatizado é geralmente realizado por compressão diametral à TC e consiste na aplicação de carregamento com frequência de 1Hz, sendo 0,1segundo de aplicação e 0,9segundo de intervalo. Este período simula o intervalo de aplicação de carga entre uma roda e outra do veículo. As tensões utilizadas variam geralmente de 10% a 50% de RT, sendo importante a obtenção de um aspecto amplo de tensões.

A diferença entre a tensão de compressão e a tensão de tração ( $\Delta\sigma$ ), ou somente a tensão de tração repetida solicitante ( $\sigma_t$ ), e o número de repetições de carga até a ruptura da amostra (N) são utilizados para a determinação do modelo de fadiga da mistura conforme verificado pelas equações 2.1 e 2.2:

$$N = k_1 \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad (2.1)$$

$$N = k_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (2.2)$$

Onde:

$K_1, K_2, n_1$  e  $n_2$  - constantes obtidas na regressão linear do gráfico bi-log ( $N \times \Delta\sigma$ )

ou ( $N \times \sigma_t$ )

#### ▪ Dano por umidade

As rodovias são diretamente afetadas pela presença de água e diversos são os defeitos existentes nos pavimentos que têm origem ou são agravados em virtude da existência de água. Entre estes defeitos mais comuns podem-se citar os afundamentos, as trincas, as panelas, e o bombeamento de finos das camadas inferiores, entre outros.

Em relação às misturas asfálticas sabe-se que estas são sensíveis à presença de água, pois este elemento pode dificultar a ligação entre o agregado e o ligante. De acordo com a norma AASHTO T283 (2007) o ligante asfáltico funciona como uma cola que mantém o revestimento unido. Sem uma adequada adesividade entre os dois componentes principais da mistura (ligante e agregado), o revestimento asfáltico tende a não resistir ao carregamento que o mesmo será submetido.

Nas misturas mornas, as menores temperaturas utilizadas no processo de usinagem e de compactação podem resultar em uma secagem incompleta dos agregados, comprometendo assim a adesividade destes materiais com o ligante. Diversos estudos têm sido realizados no sentido de identificar a susceptibilidade de misturas asfálticas ao dano por umidade independente das temperaturas utilizadas para a produção e para a compactação das mesmas (KIM *et al.*, 2012).

Para avaliação deste tipo de dano, a metodologia Superpave recomenda a norma AASHTO T283 (2007) chamada também de Lottman modificado, que é utilizada para misturas produzidas a temperaturas convencionais. Esta norma determina que os Corpos de Prova (CPs) sejam moldados com um Vv entre 6% e 8%. Alguns destes CPs passam por um ciclo de condicionamento de congelamento e posteriormente em banho quente até irem para um banho à temperatura ambiente. Após estas fases os CPs são submetidos ao ensaio de RT. Os CPs não condicionados passarão também pelo mesmo ensaio de ruptura. A relação entre os resultados de amostras condicionadas e não condicionadas (EQUAÇÃO 2.3), também chamada de RRT, pode representar o quanto a água, que permaneceu em seu interior, afetou a mistura.

$$RRT = \frac{RT_C}{RT_{NC}} \quad (2.3)$$

Onde:

$RRT$  - resistência retida à tração (%)

$RT_C$  - resistência à tração da amostra condicionada

### $RT_{NC}$ - resistência à tração da amostra não condicionada

A versão anterior da norma americana AASHTO T283 (1989) estabelecia um valor mínimo de RRT de 70%. A partir de 1999 o valor mínimo passou a ser de 80%. Budny (2012) citando um estudo realizado por Specht (2004), descreve que o resultado de RRT pode ser utilizado para prever o desempenho de misturas asfálticas, em campo por um período de 4 a 12 anos em relação à adesividade entre ligante e agregado.

Em um estudo elaborado por Airey *et al.* (2007) foi verificada a influência do agregado, do fíler e do ligante no dano por umidade da mistura. Nessa pesquisa foi realizado um teste denominado SATS (*Saturation Aging Tensile Stiffness*), que combina o envelhecimento e o dano por umidade para prever o desempenho da mistura. As amostras foram submetidas à temperatura de 85°C, 2,1MPa de pressão na presença de umidade por 65 horas. Foram utilizadas misturas com agregados ácidos, misturas com agregados básicos e em algumas destas foi incorporado fíler de cal hidratada. No que se refere ao CAP, sete diferentes tipos de ligantes foram usados na pesquisa. Verificou-se que as misturas com os agregados básicos foram mais resistentes ao dano por umidade se comparadas com as misturas produzidas com agregados ácidos, o que de certa forma já era esperado. Também, observou-se que a cal hidratada melhorou substancialmente os resultados de resistência a este tipo de problema, reduzindo a perda de rigidez de forma consistente, especialmente quando utilizado com agregados ácidos.

Ribeiro (2011) realizou um estudo para verificar a influência do Líquido da Castanha do Caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas. Este aditivo é extraído da casca da castanha de caju durante o beneficiamento do produto e conseguiu promover uma leve diminuição da temperatura de usinagem e de compactação das misturas estudadas em virtude da redução da viscosidade da modificação do CAP com LCC quando comparado ao CAP puro. Na pesquisa apresentada, a avaliação ao dano por umidade foi verificada pela norma AASHTO T283 (2007). De forma geral, os valores de RRT das misturas produzidas com um teor de CAP em torno de 6% foram superiores ao preconizado por norma, ou seja, RRT's maiores do que 80%. Estes resultados indicariam que, as misturas apesar da severidade do ensaio, não foram tão afetadas pela água inserida através do processo de saturação. Tanto a mistura produzida com a adição de 2% cal como aquela produzida com 2% de LCC demonstraram serem mais resistentes ao dano por umidade induzida que as misturas elaboradas sem estes aditivos. Naquelas duas misturas os valores de RRT foram superiores aos encontrados na mistura preparada com o CAP puro.

Tendo estes dados em foco, e buscando-se atenuar os problemas relacionados ao dano por umidade induzida (perda de adesividade entre ligante e agregado), é recomendado que o filer de cal hidratada seja utilizado, proporcionando a mitigação dos efeitos provocados pela reduzida temperatura de produção. Algumas pesquisas têm apresentado novos conceitos ligados às propriedades dos materiais tentando avaliar o risco deste tipo de dano tais como: parâmetros de fratura, energia de superfície, coeficientes de difusão e adesividade. O dano por umidade também tem sido verificado por meio de testes que medem a deformação em trilhas de roda como *Hamburg Test* e *Asphalt Pavement Analyzer* (APA) (KIM *et al.*, 2012). Os pesquisadores, no entanto, observaram uma considerável variabilidade nos resultados obtidos nos diversos estudos. Este fato pode ocorrer em virtude do caráter empírico das avaliações citadas.

## **2.2 Modelo de Compactação Utilizado na Metodologia Superpave**

Um dos principais objetivos dos processos de compactação utilizados em laboratório é a obtenção de resultados similares ao que se verifica em campo. Entretanto, com a variedade de equipamentos usados para compactação, isto se torna uma tarefa por vezes difícil de atingir.

Nascimento (2008) cita um estudo elaborado por Harman *et al.* (2002), no qual é relatado que nos anos 50 John L. McRae desenvolveu o compactador por amassamento giratório, tendo em vista que, pesquisas realizadas na época com o compactador de impacto Marshall, indicavam que este equipamento não simulava de forma adequada o que ocorria nas obras. Após testar alguns equipamentos, os pesquisadores do programa SHRP adotaram para a metodologia Superpave, o compactador do tipo giratório, tendo as seguintes especificações a serem obedecidas: (i) velocidade - 30rpm, (ii) pressão vertical de 600kPa, (iii) ângulo de giro de 1,25°. Em um estudo realizado por Moultier (1977) foi encontrada uma correlação entre o número de passadas de rolo pneumático e o número de giros do compactador. O fator de proporcionalidade ( $k$ ), que é a relação entre os dois fatores, foi de 2,2 de giros para cada passada do rolo (NASCIMENTO, 2008).

O número de giros a ser utilizado durante a moldagem dos CP's é definido em função do tráfego estimado de projeto, conforme Tabela 2.4. Assim o número de giros de projeto ( $N_{des}$ ) é aquele no qual se obteve 4% de vazios, ou 96% da densidade máxima ( $G_{mm}$ ). Já o número de giros inicial ( $N_{ini}$ ), representa o total de giros para que o valor de 89% da  $G_{mm}$  seja atingido, garantindo assim um esqueleto mineral adequado da mistura. O número de giros máximo ( $N_{max}$ ) refere-se a densidade  $\leq 98\%$  da  $G_{mm}$ , o qual assegura que a mistura não será

compactada de forma excessiva pelo tráfego previsto em projeto e que assim venha a ter um comportamento plástico que poderia levar à deformações permanentes.

Para os procedimentos de dosagem, as amostras são compactadas pelo  $N_{des}$  e, após definido o teor, realiza-se a compactação com  $N_{max}$  verificando-se a obtenção ou não de 98% da  $G_{mm}$ , conforme AASHTO M323-04 e R 35-04 (NASCIMENTO, 2008).

Tabela 2.4 - Valores de  $N_{ini}$ ,  $N_{des}$  e  $N_{max}$  para diferentes níveis de tráfego, de acordo com AASHTO R 35-04

Tráfego de projeto $ESALS \times 10^6$	Parâmetros de Compactação		
	$N_{ini}$	$N_{des}$	$N_{max}$
< 0,3	6	50	75
0,3 - 3,0	7	75	115
3 a 30	8	100	160
$\geq 30$	9	125	205

Fonte: Nascimento (2008)

### 2.2.1 Parâmetros CDI e TDI e $TDI_m$

Bahia e Mahmoud (2004) constataram em seus estudos que os dados obtidos no (CGS) estavam sendo subutilizados, e por isso fizeram uma reavaliação do procedimento com a finalidade de otimizar as características de densificação tanto na construção como sob as cargas de tráfego. Desta forma foram obtidos parâmetros conhecidos como CEI (*Contact Energy Index*) ou CDI (*Compaction Densification Index*) o qual representa a energia de compactação e TDI (*Traffic Densification Index*) que representa o índice de densificação pelo tráfego.

O parâmetro CDI refere-se a área formada na compactação, que vai do 8º giro até atingir o número de giros necessários para se obter 92% da  $G_{mm}$ . Este índice representa o trabalho realizado pelo rolo durante o processo de compactação da mistura, até que a densidade requerida para a fase de construção seja atingida. Quando as misturas apresentam baixos valores de CDI significa que estas possuem melhor trabalhabilidade, o que de certa forma é uma vantagem do projeto. Valores, porém, muito baixos para este índice, indicam que a mistura é pouco rígida e deve ser evitada (BAHIA e MAHMOUD, 2004).

O parâmetro TDI representa a área obtida pelos pontos obtidos para se atingir 92% da  $G_{mm}$  até 98% da mesma densidade. Este percentual de 98% da densidade é considerado crítico, uma vez que após este valor a mistura entraria em uma zona plástica, ou

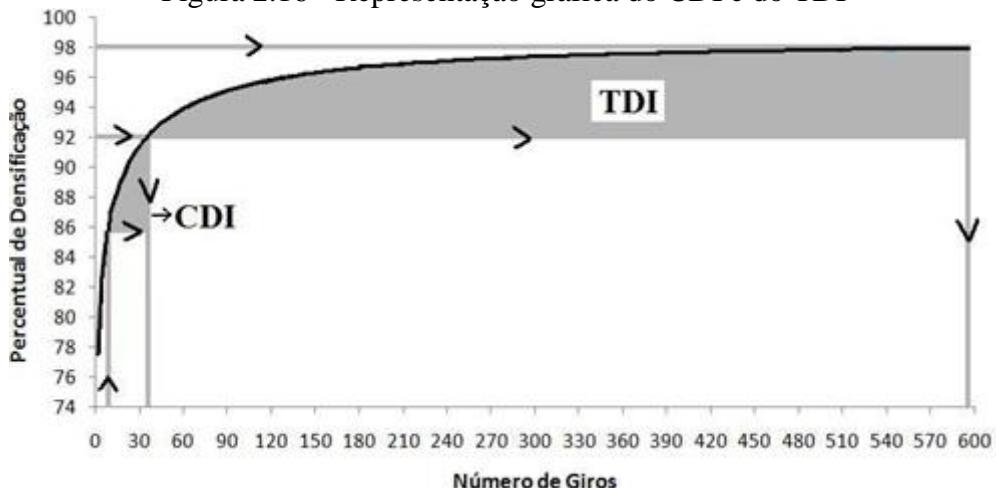
seja, as deformações não seriam mais retornáveis. Desta forma, é preferível que o parâmetro TDI seja o mais elevado possível, pois significa que a mistura levaria um tempo maior para chegar naquela densidade crítica, podendo assim receber um maior volume de tráfego durante sua vida útil (BAHIA e MAHMOUD, 2004). Bahia e Fahemm (2007) sugeriram valores para os parâmetros CDI e TDI conforme indicado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Valores sugeridos de CDI e TDI

Tráfego (ESAL)	CDI máximo	TDI mínimo
Leve ( $< 3,0 \times 10^6$ )	100	400
Médio ( $< 1,0 \times 10^7$ )	200	800
Médio a Pesado ( $< 3,0 \times 10^7$ )	300	1200

Fonte: Bahia e Fahemm (2007)

Figura 2.16 - Representação gráfica do CDI e do TDI



Fonte: Onofre (2012)

Durante o desenvolvimento do estudo elaborado por Bahia e Mahmoud, surgiram dúvidas em relação ao uso de medidas volumétricas como no caso do percentual da  $G_{mm}$ , sem a determinação das forças ou tensões nas amostras para avaliar o comportamento das mesmas durante o processo de compactação no equipamento CGS (BAHIA e MAHMOUD, 2004).

Desta forma, desenvolveu-se um dispositivo que poderia ser inserido na parte superior do CP e que geraria informações em relação a distribuição de tensões durante o processo de compactação. O dispositivo foi denominado *Load Cell Plate Assembly* (GLPA) que é traduzido no Brasil como Prato de Célula de Carga Giratória. Os dados obtidos neste

equipamento podem ser utilizados para calcular o esforço resistivo ( $w$ ), que refere-se a resistência da mistura à compactação (BAHIA MAHMOUD, 2004).

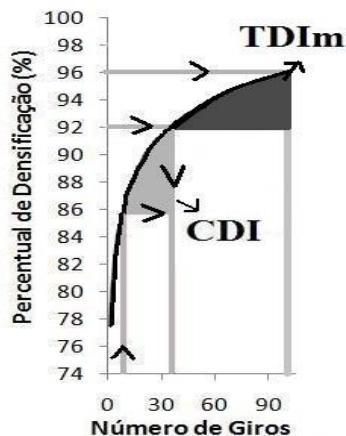
Bahia e Mahmoud (2004) e Nascimento (2008) citam o trabalho desenvolvido por Delage (2000), no qual foi proposto, a análise dos dados do CGS com o GLPA.

Dois novos parâmetros, *Compaction Force Index* (CFI) e *Traffic Force Index* (TFI), foram criados e relacionados estatisticamente com os valores de CDI e TDI. Desta forma, a principal diferença entre os parâmetros CFI/TFI e CDI/TDI é que os primeiros estariam relacionados à curva de esforço resistivo enquanto que os últimos à curva de densificação (BAHIA e MAHMOUD, 2004).

De maneira análoga, porém ao CDI e TDI, é desejável que a mistura apresente baixo esforço resistivo (CFI) do 8º giro até atingir 92% da  $G_{mm}$  o que representaria uma maior facilidade para a compactação. Já para valores de  $G_{mm}$  superiores à 92% até 98% (CFI) é importante que a mistura apresente alto nível de esforço resistivo o que representaria para a vida de serviço do revestimento, um indicativo de maior resistência à deformação permanente. Na pesquisa elaborada por Bahia e Mahmoud verificou-se que o CGS, mesmo sem o uso do GLPA, traria um bom indicativo da resistência à deformação permanente durante a vida de serviço da mistura. Esta constatação ocorreu em virtude da boa correlação alcançada entre o parâmetro TDI e o TFI (BAHIA e MAHMOUD, 2004).

Em 2008, Nascimento propôs a partir das curvas de compactação obtidas no CGS uma forma simplificada de aplicação do TDI, estabelecendo um novo parâmetro denominado  $TDI_m$  (TDI modificado). Este parâmetro ao invés de considerar a área sob a curva de densificação de 92% a 98% da  $G_{mm}$  prevista para o TDI utiliza a mesma curva, porém com a área indo de 92% ao  $N_{des}$  (número de giros de projeto previsto na especificação Superpave). Este novo parâmetro além de proporcionar uma maior rapidez na compactação, permite que os CP's possam ser utilizados nos ensaios mecânicos. Na Figura 2.14 é apresentada uma curva de densificação e a área prevista para obtenção dos parâmetros CDI e  $TDI_m$ .

Figura 2.17 - Curva de densificação com os parâmetros CDI e TDI<sub>m</sub>



Fonte: Onofre (2012)

### 2.3 Metodologia Bailey

Tendo em vista a escolha da metodologia Bailey nesta dissertação para obtenção da curva granulométrica considerou-se necessária a apresentação da revisão desta técnica, uma vez que, a mesma é ainda pouco utilizada no Brasil.

De acordo com Vavrik *et al.* (2002), a busca pela verificação do “empacotamento” de partículas em um volume confinado não é recente. Cientistas realizaram experimentos do sentido de obter a máxima densidade possível. Entre estes, encontra-se Isaac Newton que, apesar de suas tentativas, foi incapaz de determiná-la usando esferas de mesma dimensão. Outros pesquisadores procuraram obter a linha de densidade máxima utilizando ao invés de esferas, partículas de agregados. Algumas destas pesquisas utilizavam diferentes tamanhos de agregados em diferentes proporções verificando-se qual destas proporções seria aquela que apresentaria a maior densidade.

Nas pesquisas citadas por Vavrik, tais como, Weymouth no início do século XX, Nijboer (1930), Goode and Lufsey (1962), verificou-se que a densidade máxima de diversos agregados plotados em um gráfico bi-logarítmico ocorria quando a inclinação da linha obtida era de 0,45, tendo nas ordenadas e nas abscissas respectivamente, o percentual passante nas peneiras e a malha das diversas peneiras (VAVRIK *et al.*, 2002).

Huber e Shuler utilizaram o conceito do diâmetro máximo nominal (DMN) determinado pelo pesquisador Norman McLeod e verificaram que a maior densidade obtida seria representada por uma reta partindo da origem ao DMN. O Diâmetro Máximo Nominal utilizado seria a primeira peneira superior àquela que retivesse mais de 10% da amostra (VAVRIK *et al.*, 2002).

No que se refere à dosagem de uma mistura asfáltica, sabe-se que esta, quando aplicada no pavimento, deve resistir às solicitações do carregamento e da temperatura, que alteram especialmente a viscosidade do ligante. Esta alteração pode, por um lado, promover uma redução da estabilidade ou, de outro, elevar a rigidez que poderia trazer situações indesejadas relacionadas ao trincamento do revestimento.

Os problemas relacionados à falta de estabilidade ou a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas podem ser minimizadas pela utilização de agregados que promovam um maior intertravamento entre os mesmos e também pela correta compactação da camada de revestimento durante a construção (ROBERTS *et al.*, 1996).

Assim, devem ser escolhidos agregados com propriedades de angularidade, textura superficial e curva granulométrica que promoverão um bom intertravamento. Além disso, é necessário que o conjunto de agregados da mistura permita a existência de uma quantidade de vazios suficientes para que se possa usar um teor de ligante asfáltico que promova resistência ao desgaste elevando desta forma a durabilidade da mistura (CUNHA, 2004; BESSA, 2012).

O VAM é influenciado pela forma, textura superficial e graduação das partículas, reproduzindo assim um maior ou menor empacotamento dos agregados (VAVRIK *et al.*, 2002).

O Eng. Robert Bailey do DOT (*Department of Transportation*) de Illinois desenvolveu uma metodologia após anos de pesquisa e análises supervisionando os projetos de mistura no laboratório. A busca deste pesquisador era justamente proporcionar um melhor intertravamento entre os agregados na massa asfáltica. Esta metodologia ficou conhecida pelo nome de seu criador, porém sabe-se que pesquisadores como Vavrik e Pine, entre outros, têm avançado nas pesquisas iniciadas pelo citado engenheiro. O Método Bailey define, de forma diferenciada, o agregado graúdo e o miúdo, avaliando o intertravamento destes agregados e também as taxas de diferentes tamanhos de partículas, verificando a contribuição de cada agregado na mistura em termos de volume (VAVRIK *et al.*, 2002).

### **2.3.1 Agregado Graúdo e Agregado Miúdo**

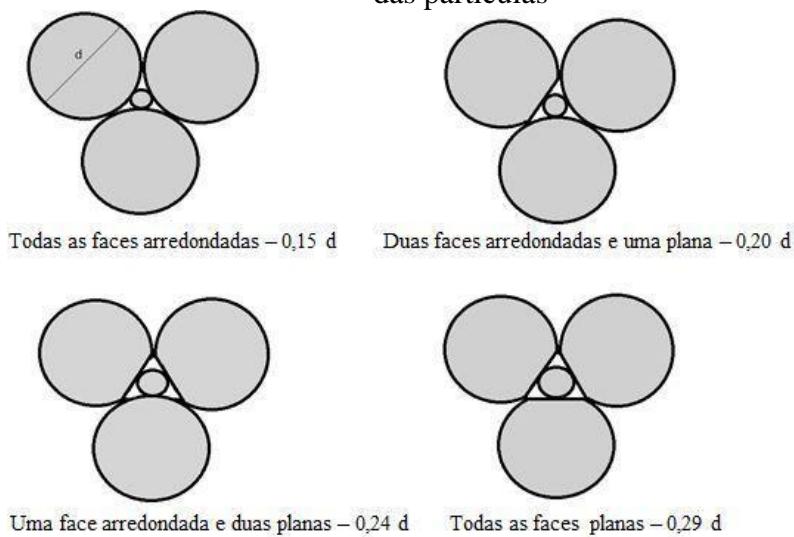
No Brasil, de forma geral, se utiliza uma peneira de corte para definição de agregado graúdo e miúdo. Todo material retido nesta peneira é considerado graúdo e o material passante é definido como agregado miúdo. O DNIT, por exemplo, utiliza a peneira nº 10 (2mm) para diferenciar o agregado graúdo do miúdo (MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2006).

Na metodologia Bailey considera-se agregado graúdo como as partículas de agregado que ao serem colocadas em determinado volume criam vazios. Já os agregados miúdos são aquelas partículas capazes de preencher os vazios deixados pelo material graúdo (TRC EC-044, 2002).

Para esta separação utiliza-se uma peneira de controle definida como *Primary Control Sieve* (PCS) ou Peneira de Controle Primário. Para se identificar a referida peneira, é realizado o produto de um parâmetro denominado “fator de compactação” pelo Diâmetro ou Tamanho Máximo Nominal (DMN ou TMN). Conforme já citado anteriormente, o TMN ou DMN refere-se à primeira peneira superior àquela que retém mais do que 10% de material. Em relação a este valor, pesquisas mais recentes, como a de Pine em 2011, têm apresentado um valor de 15% e não mais 10%. No entanto, este mesmo pesquisador relata que para determinadas misturas densas graúdas o valor mais adequado pode ser mantido em 10% (PINE, 2011).

O fator de compactação foi estabelecido em virtude da angularidade dos agregados e refere-se à relação de vazios deixados entre as partículas. No caso de agregados com todas as faces arredondadas o vazio entre os agregados tende a ser menor ( $0,15d$ ) do que agregados com todas as faces planas ( $0,29d$ ), onde “ $d$ ” neste caso é o diâmetro da partícula. Para facilitar o cálculo estabeleceu-se um fator médio de 0,22. Na Figura 2.19 pode ser observada esta relação dos vazios dependendo da angularidade do agregado.

Figura 2.18 - Verificação dos vazios deixados pelos agregados de acordo com a angularidade das partículas



Fonte: Adaptado de Pine (2011)

Desta forma a PCS é definida pela Equação 2.4:

$$\text{PCS} = \text{DMN} \times 0,22 \quad (2.4)$$

Além da PCS, estabeleceram-se outras peneiras denominadas como *Secondary Control Sieve* (SCS) ou Peneira de Controle Secundário, *Tertiary Control Sieve* (TCS) ou Peneira de Controle Terciário (TCS) e *Half Sieve* (HS) ou Peneira Média.

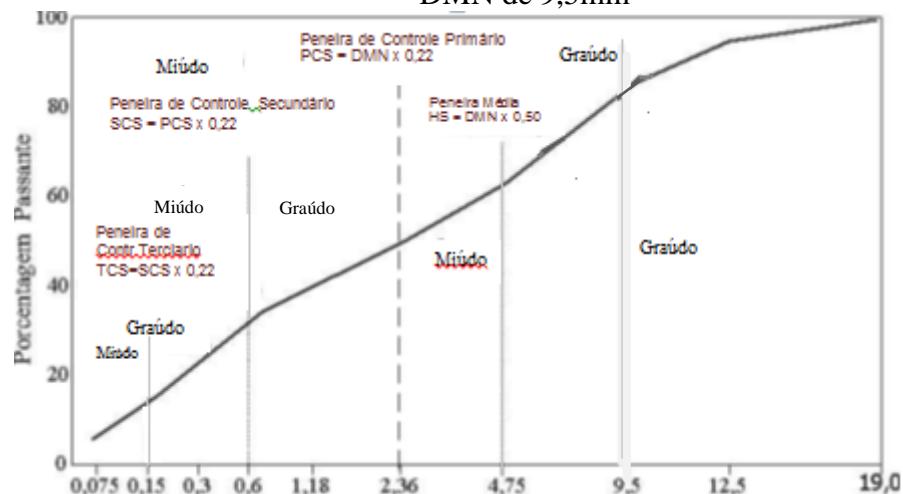
Todo agregado que ficar retido na PCS é considerado como agregado graúdo e esta fração irá influenciar o intertravamento tanto do agregado graúdo como do agregado miúdo da mistura. A peneira média divide a porção graúda da porção miúda deste agregado maior.

O material que passou pela PCS é chamado de agregado miúdo ou fino e da mesma forma que ocorre com o agregado graúdo, existe uma peneira “média” conhecida como Peneira de Controle Secundário (SCS), que divide a porção graúda e miúda do agregado miúdo.

A Peneira de Controle Terciário (TCS) controla a porção fina do miúdo, subdividindo-se novamente em uma fração graúda e uma fração miúda.

Para uma melhor visualização, apresenta-se na Figura 2.20 a representação de todas as peneiras citadas para uma mistura com DMN de 9,5mm (3/8").

Figura 2.19 - Representação das peneiras de controle para uma mistura com DMN de 9,5mm



Fonte: Adaptado de Gouveia (2006)

As três peneiras de controle já citadas são obtidas pelas equações 2.5, 2.6 e 2.7:

$$SCS = PCS \times 0,22 \quad (2.5)$$

$$TCS = SCS \times 0,22 \quad (2.6)$$

$$HS = DMN \times 0,50 \quad (2.7)$$

Deve ser observado que o resultado obtido pelas equações será um valor aproximado da peneira mais próxima encontrada. No sentido de facilitar a determinação das peneiras foi elaborada uma tabela que apresenta as peneiras de controle utilizadas na metodologia Bailey conforme verificado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Peneiras de controle utilizadas na Metodologia Bailey

Diâmetro Máximo Nominal (DMN) (mm)	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
Peneira média - HS (mm)	19,00	12,50	9,50	**	4,75	2,36
Peneira de controle primário - PCS (mm)	9,50	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
Peneira de controle secundário - SCS (mm)	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,30
Peneira de controle terciário - TCS (mm)	0,60	0,30	0,30	0,15	0,15	0,08

Fonte: TRC E-C 044 (2002)

\*\* A peneira de 4,75mm é normalmente usada como HS para um DMN de 12,5mm uma vez que a peneira de 6,25mm não faz parte das peneiras utilizadas. Entretanto, a interpolação da porcentagem passante na peneira de 6,25mm, para o uso na Proporção *Coarse Aggregate* (CA) ou Agregado Graúdo, a ser visto mais adiante resulta em um valor mais representativo (VAVRIK *et al.*, 2002).

Uma diferença acentuada na Metodologia Bailey, quando comparada com os métodos tradicionais, é a combinação de agregados por volume e não por massa como é o padrão usual. Quando se utiliza a combinação por volume é possível verificar-se a quantidade de vazios deixados pelo agregado graúdo e assim preenchê-los com os agregados miúdos. Desta forma, o método utilizou a norma AASHTO T-19/M/T 19-09 (1997) para verificação da massa específica solta e compactada de cada agregado da mistura, a qual fornecerá subsídios para o cálculo do Vv do agregado graúdo (VAVRIK *et al.*, 2002).

### 2.3.2 Massa Específica Solta, Compactada e Escolhida

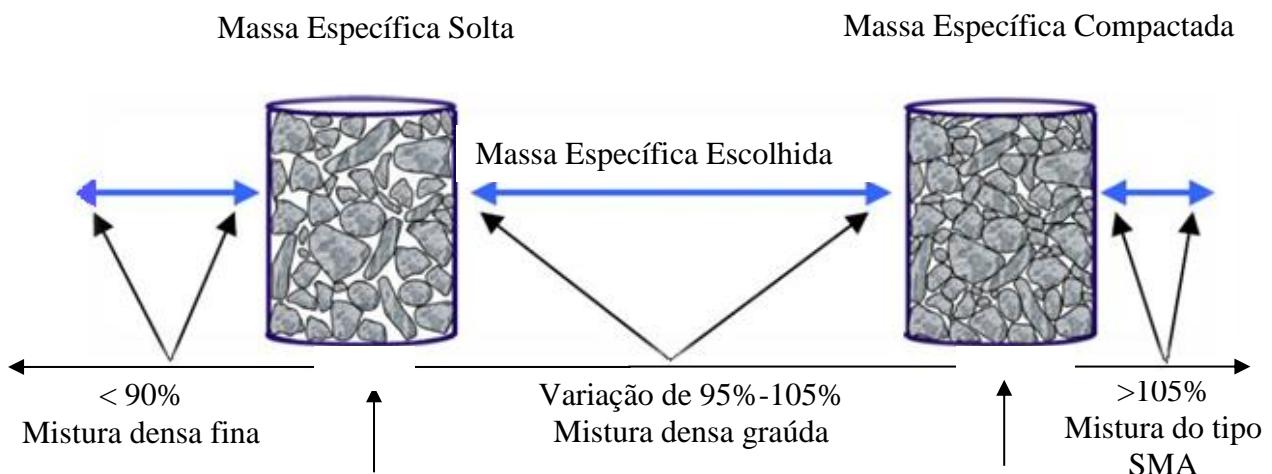
Utilizando-se a norma da AASHTO T-19/M/T 19-09 (1997) executam-se os ensaios para determinação da Massa Especifica Solta e da Massa Especifica Compactada. A massa solta é a relação entre a quantidade de agregados necessária para preencher um cilindro sem que seja aplicado qualquer tipo de esforço de compactação proporcionando um mínimo contato entre as partículas e o volume deste cilindro. As dimensões deste cilindro podem variar de acordo com o DMN da curva granulométrica da mistura asfáltica a ser elaborada.

Assim, o diâmetro do cilindro deverá ter pelo menos 10 vezes o DMN do agregado para minimizar um possível empacotamento das partículas.

A determinação da massa específica compactada é realizada com o mesmo cilindro, porém dividindo-se o preenchimento do mesmo em três etapas equivalentes a 1/3 do volume do cilindro. Em cada etapa é executada uma compactação com 25 golpes com uma haste metálica. Ressalta-se que tanto para a massa específica solta como para a compactada, verificou-se que os agregados devem ser colocados cuidadosamente no cilindro para evitar algum tipo de compactação durante a queda.

A massa específica escolhida relaciona-se a um percentual da massa específica solta. A seleção da massa específica escolhida, para misturas de graduação densa, é feita a partir de uma porcentagem da massa específica solta do agregado graúdo. Quando se quer obter um certo grau de intertravamento do agregado graúdo a porcentagem deve ficar entre 95% e 105% da massa específica solta. Para evitar problemas relacionados a trabalhabilidade e a consequente dificuldade na compactação, valores acima de 105% devem ser evitados quando se deseja uma mistura densa. Por outro lado, valores inferiores a 95% podem não proporcionar um intertravamento adequado do agregado graúdo e a mistura será mais dependente do agregado miúdo conforme esquema elaborado por Vavrik *et al.* (2002) (FIGURA 2.20).

Figura 2.20 - Método de seleção da massa específica escolhida para os agregados graúdos



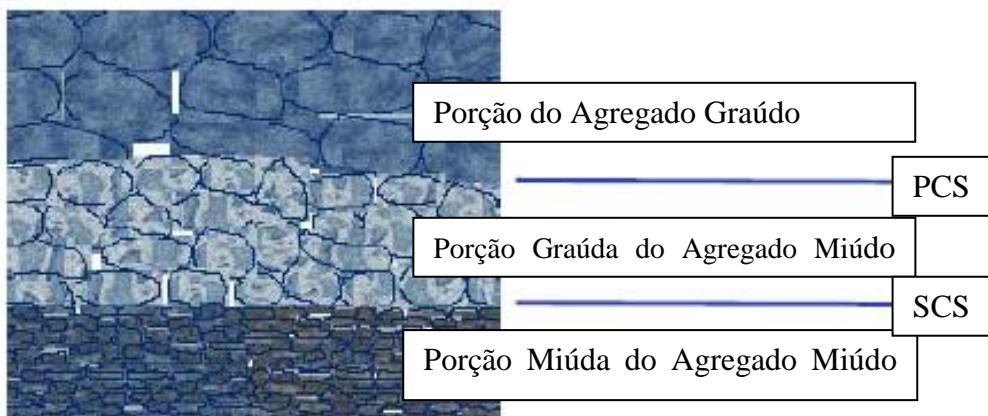
Fonte: Adaptado de Vavrik *et al.* (2002)

### 2.3.3 Parâmetros da Metodologia Bailey

Os parâmetros utilizados pela metodologia Bailey tem a finalidade principal de verificar a compactação de três porções da mistura. Estas porções foram denominadas *Coarse Aggregate*

*Ratio* (CA) ou Porção do Agregado Graúdo,  $FA_c$  - *Fine Aggregate Coarse Ratio* ou Porção Graúda do Agregado Miúdo e  $FA_f$  – *Fine Aggregate Fine Ratio* ou Porção Miúda do Agregado Miúdo. Vavrik *et al.* (2002) elaboraram a desenho esquemático a qual é apresentado na Figura 2.22 com as porções citadas.

Figura 2.21 - Desenho esquemático dos parâmetros da metodologia Bailey



Fonte: Vavrik *et al.* (2002)

### 2.3.4 Porção do Agregado Graúdo (CA)

Todo o material graúdo que passa pela peneira média (HS) é chamado de interceptor. Sabe-se que o agregado graúdo não preenche vazios, por isso apesar de ter uma granulometria menor, os interceptores além de não preencherem os vazios deixados pelo material retido na peneira média irão afastar as partículas retidas naquela peneira. Todo o material retido na HS é denominado de *plugger* e há necessidade de haver um equilíbrio entre estas duas frações para que a mistura possa ser adequada.

O fator CA avalia a compactação da porção graúda e os vazios resultantes da mistura e é considerado pelo método como o fator mais importante para a seleção da mistura (CUNHA, 2004). Para o cálculo deste parâmetro utiliza-se também a peneira média já citada anteriormente, conforme Equação 2.7.

$$\text{Porção CA} = \frac{(\% \text{ passante na HS} - \% \text{ passante na PCS})}{(100\% - \% \text{ passante na HS})} \quad (2.7)$$

A diminuição da porção do agregado graúdo (CA) aumenta a compactação do agregado miúdo porque existem menos partículas que passam na peneira média. Existe uma faixa recomendada pelo método para esta porção e sabe-se que misturas que apresentem valores abaixo do recomendado têm maior susceptibilidade à segregação e podem ser

consideradas misturas controladas pelos agregados miúdos. Para valores superiores ao especificado poderiam ocorrer dificuldades de compactação em campo (CUNHA, 2004).

### **2.3.5 Porção Graúda do agregado Miúdo ( $FA_c$ ) e Porção Miúda do Agregado Miúdo ( $FA_f$ )**

Todo agregado miúdo, de acordo com o método é aquele que passa na PCS. Esta fração pode ser também considerada uma mistura, já que existe a porção graúda e a porção miúda deste agregado miúdo. Parte da porção miúda preenche os vazios deixados pela porção graúda. Porém há necessidade que vazios sejam mantidos para serem posteriormente preenchidos pelo ligante e permitirem a manutenção dos vazios previstos nas especificações que promovem o desempenho adequado da mistura. Se o valor de  $FA_c$  for elevado ou superior ao descrito na Tabela 2.7, pode ser um indicativo de excesso da porção miúda do agregado miúdo diminuindo-se o VAM, porém, se este fator ficar abaixo do que for especificado, pode caracterizar misturas com baixa compactabilidade.

No que se refere ao  $FA_f$  (*Fine aggregate fine ratio*), pode-se seguir as mesmas considerações da porção graúda, o que significa que valores elevados desta porção reduzem o VAM, enquanto que baixos valores elevam os vazios do agregado mineral.

As equações para o cálculo da proporção graúda e miúda dos agregados miúdos são apresentadas a seguir:

$$\text{Porção } FA_c = \frac{(\% \text{ passante na SCS})}{(\% \text{ passante na PCS})} \quad (2.8)$$

$$\text{Porção } FA_f = \frac{(\% \text{ passante na TCS})}{(\% \text{ passante na SCS})} \quad (2.9)$$

Os valores recomendados na metodologia para serem utilizados nas porções são apresentados a seguir na Tabela 2.7.

**Tabela 2.7 - Valores sugeridos pelo método Bailey para as porções dos agregados**

DMN (mm)	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
Porção CA	0,80 - 0,95	0,70 - 0,85	0,60 - 0,75	0,50 - 0,65	0,40 - 0,55	0,30 - 0,45
$FA_c$	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
$FA_f$	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50

Fonte: Cunha (2004)

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Visão Geral**

O objetivo maior desta pesquisa foi investigar diferentes técnicas para produção de misturas asfálticas mornas que promovessem a redução das temperaturas de usinagem e de compactação. Com este fim, procurou-se analisar a influência de cada um dos aditivos e da água na trabalhabilidade e no comportamento mecânico das amostras avaliadas e assim compará-las entre si.

Devido, principalmente, aos aspectos relacionados à redução de temperaturas na produção das amostras, sabia-se pelas análises verificadas em algumas pesquisas que cuidados deveriam ser tomados para proporcionar um produto em condições adequadas às especificações vigentes. Um desses cuidados foi a utilização de um percentual fixo de cal hidratada como parcela de fíler que funcionaria como um melhorador de adesividade entre o ligante e os agregados. Conforme relatado no capítulo anterior, as menores temperaturas utilizadas no processo podem resultar em uma secagem incompleta dos agregados comprometendo a adesividade destes materiais com o ligante. Além disso, uma técnica utilizada nesta pesquisa fez uso de água de forma indireta (agregado úmido) no processo de produção das misturas asfálticas mornas, o que poderia contribuir para uma menor adesão entre o ligante e os agregados.

#### **3.2 Agregados**

Em janeiro de 2011 foi realizada a coleta de todos os agregados previstos para serem utilizados nesta pesquisa. Estes agregados foram cedidos pela empresa Installe Engenharia Ltda. A brita de 1/2" e 3/8" são provenientes da pedreira OCS, localizada em Eusébio, na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e têm origem fonolítica. O pó de pedra de origem granítica foi extraído na pedreira MFT, localizada também na RMF no município de Itaitinga. A cal hidratada (CH-I) utilizada como fíler com o intuito de fortalecer a adesividade do ligante com os agregados foi cedida pela empresa Carbomil. Cabe a ressalva que, optou-se pela não utilização da areia como agregado em virtude do arredondamento das partículas deste material, o que poderia comprometer aspectos relacionados à resistência a deformação permanente das misturas.

Além do cálculo das densidades real e aparente, os agregados foram submetidos aos seguintes ensaios:

- Adesividade (DNER 078/94) - para verificação da capacidade dos agregados em permanecer recobertos pelo ligante após terem sido imersos em água por 72 horas a uma temperatura de 40°C;
- Sanidade ou Durabilidade (DNER 89/94) - que verifica a resistência do agregado à desintegração quando submetido a 5 ciclos de imersão em sulfato de sódio ou magnésio por um período de 16 a 18 horas em cada ciclo;
- Resistência à abrasão (DNER 035/98) - que avalia a resistência dos agregados ao esmagamento, especialmente durante o espalhamento e a compactação das misturas asfálticas. Esta característica é comprovada pela análise da perda de massa do agregado que é colocado em um cilindro Los Angeles tendo sido submetido a cargas abrasivas (esferas de aço) durante um determinado número de revoluções, sendo que este valor deverá ser igual ou inferior a 50% para misturas asfálticas densas;
- Equivalente de areia (DNER 054/97) - através deste ensaio é possível verificar o teor de argila ou matéria orgânica existente no material a ser utilizado na mistura asfáltica. O teor máximo deste material permitido pela especificação brasileira é de 55%;
- Índice de forma (DNER 086/94) - as misturas asfálticas são influenciadas pela forma dos agregados uma vez que esta propriedade afetará a trabalhabilidade, elevando ou reduzindo a energia utilizada para a compactação; a resistência ao cisalhamento; a deformação permanente e outras propriedades do revestimento. Deseja-se, conforme já citado, utilizar agregados mais cúbicos e angulares. Na especificação do DNIT, o valor deste índice deve variar entre 0,5 e 1,0, sendo que quanto mais próximo do valor superior mais cúbico é o agregado.

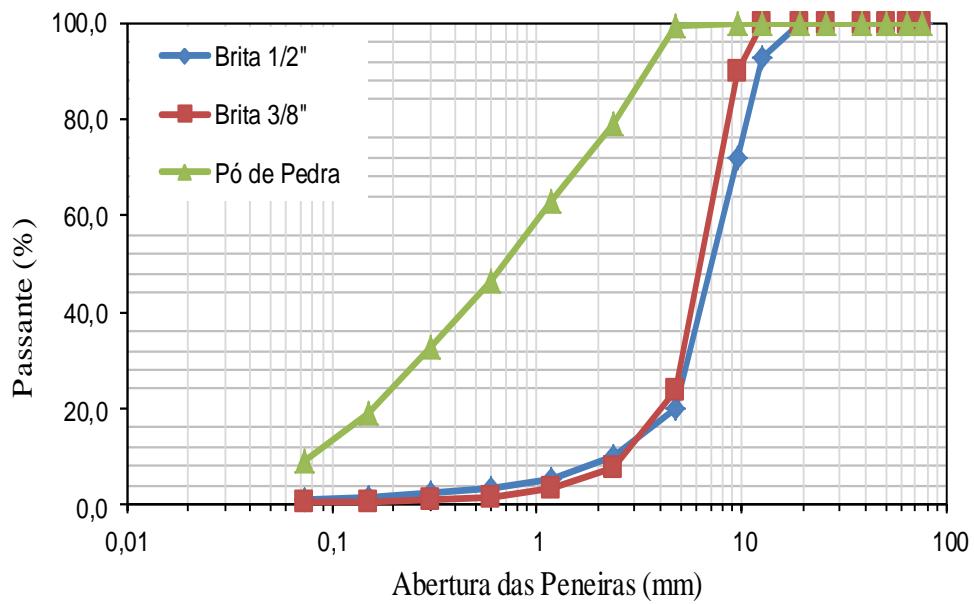
### **3.2.1 Curva granulométrica e caracterização dos agregados**

Na Tabela 3.1 apresentam-se as granulometrias dos agregados obtidas a partir do peneiramento com a série de peneiras norte-americanas, a qual é usada na metodologia Bailey. Representou-se também graficamente as granulometrias dos agregados na Figura 3.1.

Tabela 3.1 - Granulometria dos agregados (série de peneiras norte-americana)

Peneiras Peneiras (mm)	Brita 1/2" (%)	Brita 3/8" (%)	Pó de Pedra (%)	Fíler (%)
3/4"	19,10	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,50	92,6	99,8	100,0
3/8"	9,50	72,2	90,1	100,0
N.º 4	4,76	20,0	23,6	99,5
N.º 8	2,36	10,0	7,9	79,3
N.º 16	1,18	5,3	3,4	62,9
N.º 30	0,60	3,2	1,7	46,2
N.º 50	0,30	2,3	1,0	32,5
N.º 100	0,15	1,7	0,6	19,0
N.º 200	0,074	1,2	0,4	9,1

Figura 3.1 - Granulometria individual dos agregados

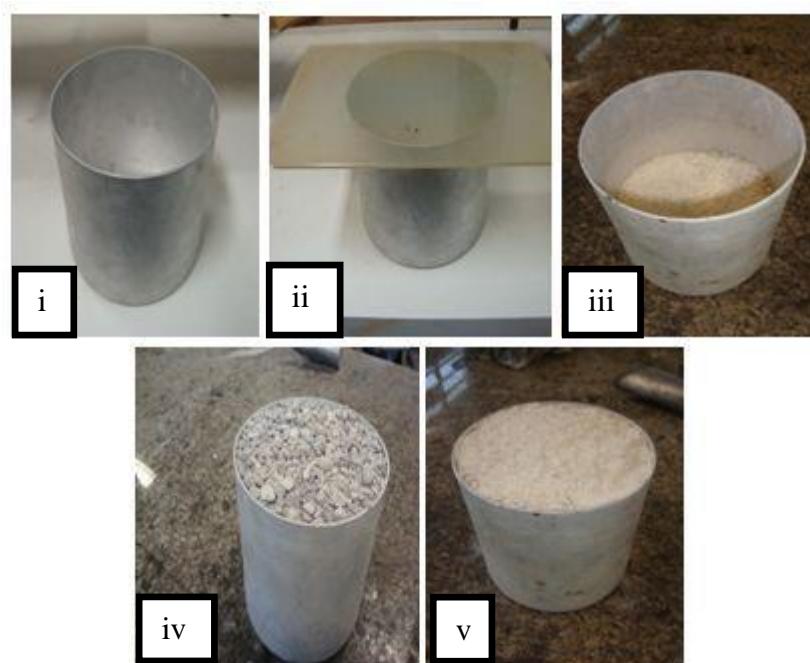


Com a granulometria individual dos agregados e uma pré-dosagem da mistura passou-se a fase de elaboração do ensaio de massa específica solta e compactada utilizando-se a norma AASHTO T-19/M/T 19-09. Este ensaio é requerido pela metodologia Bailey.

A Figura 3.2 mostra o cilindro utilizado para a elaboração do ensaio de massa específica solta e compactada nesta dissertação e o preenchimento com os agregados

utilizados na pesquisa. A placa de acrílico é sugerida pela norma norte americana para verificação do completo preenchimento do recipiente.

Figura 3.2 - Representação das fases do ensaio para determinação da massa específica solta e compactada



(i) Cilindro utilizado; (ii) Cilindro preenchido c/ água e colocação da placa de acrílico na parte superior (verificação do volume do cilindro); (iii) 1<sup>a</sup> camada compactada de um total de três camadas (25 golpes/camada); (iv) Agregado graúdo: preenchimento do volume solto ou com 3 camadas compactadas; (v) Agregado miúdo: preenchimento com três camadas compactadas

Os resultados obtidos em relação aos parâmetros de massa específica solta e compactada podem ser verificados na Tabela 3.2. Ressalta-se que em relação ao pó de pedra é obtida apenas a massa específica compactada.

Tabela 3.2 - Resultado do Ensaio de Massa Específica Solta e Compactada

Ensaio	Especificação	Brita 1/2" (kg/m <sup>3</sup> )	Brita 3/8" (kg/m <sup>3</sup> )	pó de pedra (kg/m <sup>3</sup> )
Massa Específica Solta	AASHTO T19 M/T 19-09/97	1.372,74	1.367,51	-
Massa Específica Compactada	AASHTO T19 M/T 19-09/97	1.512,20	1.470,49	1.773,13

Tendo-se os valores das massas específicas soltas dos agregados graúdos e sabendo-se que, para obtenção de um intertravamento adequado entre agregados de uma mistura densa graúda, o percentual da massa escolhida deveria ficar entre 95% - 105%, optou-se pelo valor de 103%. Este valor deveria proporcionar o intertravamento esperado sem dificultar de forma expressiva a trabalhabilidade da mistura. Constatou-se que, com a massa

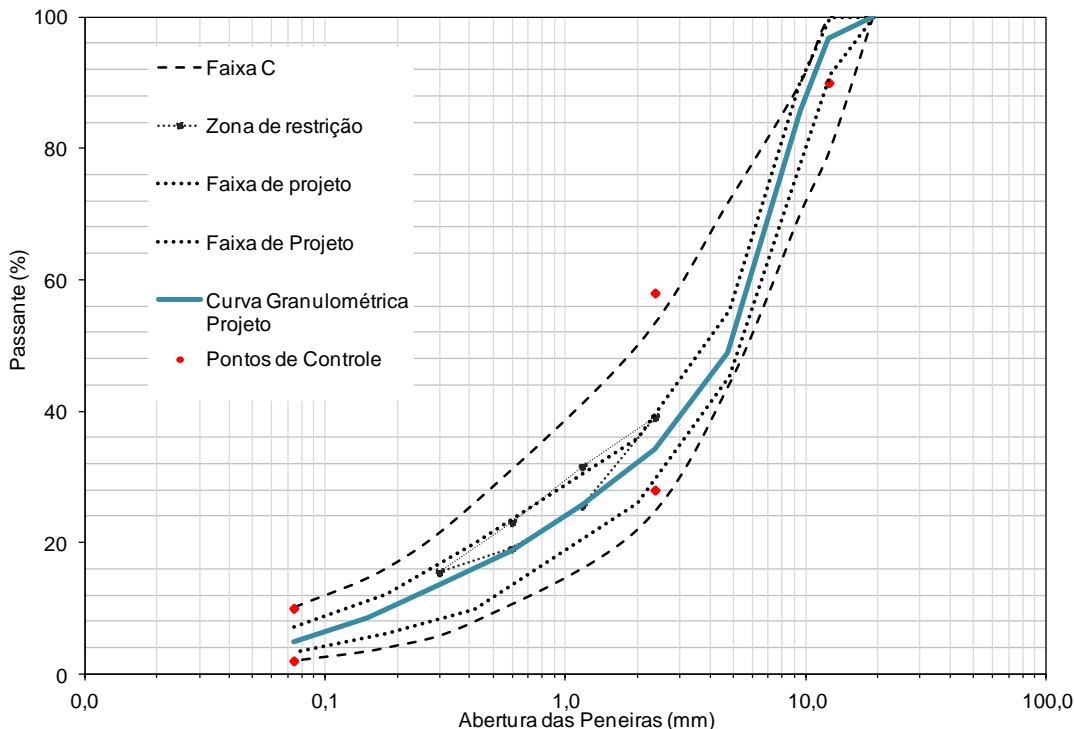
específica escolhida aplicada aos agregados graúdos, obteve-se um Vv de aproximadamente 42%, o qual foi, em sua maior parte preenchido pelos agregados miúdos. Após os ajustes realizados de acordo com a metodologia Bailey chegou-se aos percentuais finais da curva granulométrica a ser elaborada e assim, partiu-se então para a avaliação dos parâmetros obtidos com esta distribuição de agregados.

Os percentuais obtidos das frações foram: (i) brita 1/2" - 43,5%, (ii) brita 3/8" - 21,2%, pó de pedra - 34,1% e fíler - 1,2%. A Tabela 3.3 apresenta as frações de cada agregado nas peneiras utilizadas. Na Figura 3.3 é apresentada a curva granulométrica obtida. Quanto à curva citada, ressalta-se que apesar deste método utilizar outras peneiras, procurou-se também verificar o enquadramento da mesma na faixa C do DNIT e também a zona de restrição e pontos de controle adotados pela metodologia Superpave.

Tabela 3.3 - Granulometria de projeto obtida pela Metodologia Bailey

Peneiras	Peneiras (mm)	Brita 1/2"	Brita 3/8"	Pó-de-pedra (%)	Fíler (%)	Curva de Projeto (%)
3/4"	19,10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,50	92,6	99,8	100,0	100,0	96,7
3/8"	9,50	72,2	90,1	100,0	100,0	85,8
N.º 4	4,76	20,0	23,6	99,5	100,0	48,9
N.º 8	2,36	10,0	7,9	79,3	100,0	34,3
N.º 16	1,18	5,3	3,4	62,9	100,0	25,7
N.º 30	0,60	3,2	1,7	46,2	100,0	18,8
N.º 50	0,30	2,3	1,0	32,5	100,0	13,5
N.º 100	0,15	1,7	0,6	19,0	100,0	8,6
N.º 200	0,074	1,2	0,4	9,1	98,4	4,9

Figura 3.3 - Curva de Projeto



Pela curva encontrada e de acordo com o conceito de DMN, já apresentado anteriormente, verificou-se que o DMN da mistura foi de 12,5mm. A partir deste dado foram obtidas as peneiras de controle primário (PCS), secundário (SCS), terciário (TCS) e a peneira média (HS) conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Peneiras de controle da curva de projeto

	Peneira	Peneira (mm)	% passante
DMN	1/2"	12,5	96,7
HS	1/4"	6,25	59,9
PCS	N.º 8	2,36	34,3
SCS	N.º 30	0,60	18,8
TCS	N.º 100	0,15	8,6

Se o percentual passante na peneira de controle primário (PCS) é maior ou igual a 50% considera-se que a mistura terá comportamento fino. Se este valor for menor do que 49,9%, a mistura apresentará comportamento graúdo. Pelo que se pode observar na Tabela 3.4 a mistura terá comportamento graúdo, uma vez que o percentual passante na PCS foi de 34,3%. Tendo-se as peneiras de controle foi possível chegar-se aos parâmetros das frações que são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Parâmetros obtidos com a curva granulométrica da mistura

Especificação Bailey	Resultado	Faixa
Proporção de CA	0,63	0,50-0,65
Proporção de FA <sub>c</sub>	0,56	0,35-0,50
Proporção de FA <sub>f</sub>	0,49	0,35-0,50

Notou-se pelos parâmetros obtidos que tanto a proporção CA (agregado graúdo) como a FA<sub>f</sub> (fina do agregado miúdo) ficaram dentro da faixa recomendada. No entanto, a proporção graúda do agregado miúdo (FA<sub>c</sub>) ficou ligeiramente acima do que é preconizado pelo método Bailey. Este fato poderia indicar um excesso da porção fina no agregado miúdo, diminuindo-se assim o VAM. Entende-se, porém que, desde que na mistura proposta, o valor do VAM esteja acima do valor mínimo previsto na especificação, o qual no caso é de 14%, a diminuição deste fator promoveria um arranjo estrutural mais denso, o que seria interessante quando se refere à resistência a deformação permanente.

Apesar disso, procurou-se realizar alguns ajustes na granulometria modificando-se os percentuais das frações, mas esta porção não se mostrou sensível. Desta forma, para que a granulometria não fosse totalmente alterada, manteve-se a mesma como previsto inicialmente uma vez que a variação da proporção graúda não foi elevada. Além disso, encontraram-se outros estudos na literatura, como por exemplo, em Budny (2012), que alcançou valores ligeiramente superiores aos previstos sem que tenham sido relatados problemas em consequência deste fato.

### 3.2.2 Caracterização dos agregados

Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC). A densidade real, a densidade aparente e a absorção dos agregados brita de 1/2" e brita 3/8" foram verificadas de acordo com a norma DNER ME 81/98. Para caracterização do pó de pedra foi utilizada a norma DNER ME 084/95 que avaliou a densidade real deste agregado. Os valores obtidos foram inseridos na Tabela 3.6 juntamente com os outros ensaios realizados para atendimento às especificações brasileiras.

Tabela 3.6 - Ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Especificação	Brita (1/2")	Brita (3/8")	Pó de pedra	Fíler	Valores Especificados
Absorção Graúdo (%)	DNER 081/98	1,18	1,29	-	-	
Densidade Real - Graúdo	DNER 081/98	2,50	2,47	-	-	
Densidade Aparente - Graúdo	DNER 081/98	2,43	2,40	-	-	
Densidade Real - Miúdo	DNER 084/95	-	-	2,59		
Abrasão Los Angeles (%)	DNER 035/98		20	-	-	$\leq 50$
Adesividade	DNER 078/94		Não satisfatório	-	-	Satisfatório
Durabilidade	DNER 089/94			-	-	$< 12$
Equivalente de Areia (%)	DNER 054/97		-	92	-	$> 55$
Índice de Forma	DNER 086/94	0,88		-	-	0,5 -1,0

### 3.3 Caracterização dos Ligantes

#### 3.3.1 Modificação do ligante

O CAP utilizado é classificado por penetração como CAP 50/70 e tem um PG 70-22, tendo sido produzido na Refinaria de Petróleo da Petrobras - Lubnor. Dois aditivos foram aplicados sendo um comercial e outro proveniente da cera da carnaúba. O primeiro aditivo é um surfactante na forma líquida e comercialmente conhecido como Gemul® e o segundo é denominado Cera CT4 que objetiva reduzir a viscosidade do ligante durante a usinagem permitindo a produção de misturas asfálticas a temperaturas menores. A Cera CT4 é apresentada na forma sólida e foi moída no laboratório com o auxílio da mão de gral para facilitar a fusão do CAP com este produto. Os dois aditivos são representados na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Aditivos utilizados na pesquisa



Gemul®



Cera CT4

As misturas foram realizadas conforme descrito na Tabela 3.7 em um misturador Silverson® L4R de alto cisalhamento (FIGURA 3.5). A escolha do teor de Cera CT4 utilizado refere-se à quantidade já aplicada em alguns estudos experimentais (GUERRA *et al.*, 2012), enquanto que o teor de Gemul® foi adotado levando-se em consideração que os percentuais geralmente utilizados em aditivos surfactantes líquidos ficam em torno de 0,2% a 0,5% (FERREIRA, 2009; MOTTA, 2011). A temperatura utilizada para a mistura ligante/aditivo foi recomendada pelo fornecedor de outro aditivo da mesma linha que o Gemul®. De acordo com a recomendação, temperaturas superiores a 150°C poderiam comprometer a qualidade do aditivo surfactante. Em relação ao aditivo Cera CT4, uma vez que o mesmo tem ponto de amolecimento abaixo dos 130°C, permitindo já nesta temperatura uma fusão com o CAP optou-se por manter a mesma temperatura que foi utilizada para a mistura com o aditivo Gemul®.

Tabela 3.7 - Dados da mistura do CAP com os aditivos utilizados

Aditivo	Temperatura de mistura (°C)	Velocidade de mistura (RPM)
Cera CT4	130 - 132	1400 - 1500
Gemul®	130 - 132	1400 - 1500

Figura 3.5 - Visualização do equipamento Silverson®, no momento da mistura para modificação do ligante



Nos ligantes (puro e modificados) foram recolhidas amostras para utilização nos ensaios de caracterização. Executaram-se os seguintes ensaios: (i) Penetração (DNIT 155/2010 – ME); (ii) Ponto de Amolecimento (DNIT 131/2010 - ME); (iii) Adesividade ao

ligante betuminoso (DNER - ME 078/1994); (iv) Viscosidade no Viscosímetro Rotacional Brookfield (ASTM 4402, 2007); (v) Envelhecimento de curto prazo no teste RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) (ASTM 2872, 2004). Ressalta-se que a temperatura prevista no ensaio de 163°C de acordo com a ASTM 2872 foi alterada para 145°C uma vez que para as misturas mornas com aditivos, esta foi a temperatura utilizada pelo ligante; (vi) Espectrometria no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). O CAP puro também foi envelhecido à 145°C no ensaio do RTFOT para que fosse possível realizar a comparação entre as amostras estudadas.

Figura 3.6 - Equipamento e acessórios utilizados para os ensaios de (a) penetração e (b) ponto de amolecimento

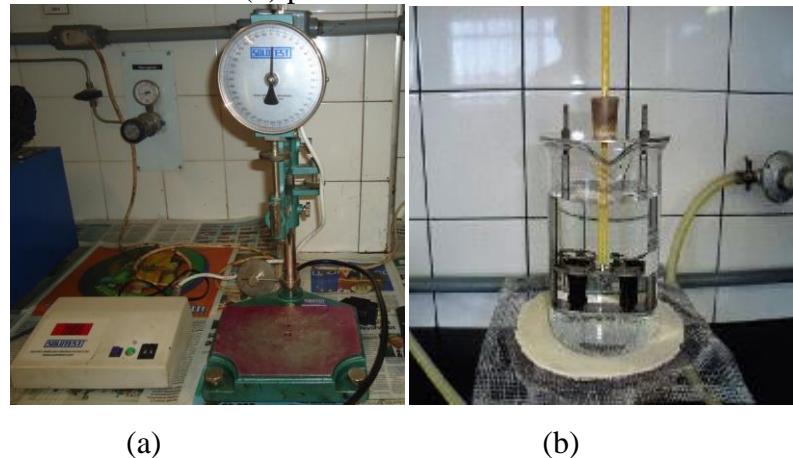


Figura 3.7 - Equipamento utilizado para o ensaio de viscosidade



### 3.3.2 Energia de Ativação de Fluxo

Com os dados de viscosidade obtidos no equipamento Brookfield é possível a determinação da Energia de Ativação de Fluxo ( $E_{af}$ ), que pode ser utilizado para diferenciar

ligantes asfálticos. Este parâmetro é relacionado com a susceptibilidade térmica destes materiais dando informações úteis acerca do desempenho dos mesmos durante a usinagem e a compactação das misturas em serviço. Asfaltos de diferentes fontes ou modificados podem resultar em diferentes energias de ativação de fluxo. Uma energia de ativação de fluxo mais elevada pode significar uma maior susceptibilidade do ligante a variações de temperatura o que pode não ser adequado para misturas asfálticas. Ligantes envelhecidos apresentam maiores valores para  $E_{af}$  devido ao endurecimento do ligante durante o processo de oxidação (NASCIMENTO *et al.*, 2008). A  $E_{af}$  é obtida através da equação de Arrhenius modificada conforme Equação 3.1.

$$\ln \eta = \ln A + E_{af}/RT \quad (3.1)$$

onde:

$\eta$  - viscosidade dinâmica do líquido em cP

$E_{af}$  - a energia de ativação de fluxo em J/mol

R - constante universal dos gases (8,314 J/mol × k)

T - temperatura em K

A - constante que depende da natureza de cada fluido

Quando se constrói um gráfico com o  $\ln \eta$  versus  $1/T(K)$  é gerada uma reta com um coeficiente angular  $\alpha = E_{af}/R$  e assim é possível determinar a energia de ativação de fluxo por meio da Equação 3.2:

$$E_{af} = \alpha R \quad (3.2)$$

Nesta pesquisa procurou-se obter a  $E_{af}$  através dos dados de viscosidade encontrados no viscosímetro rotacional Brookfield para o ligante puro e para os ligantes modificados.

### 3.3.3 Espectrometria Vibracional de absorção no infravermelho

A espectroscopia na região do infravermelho é largamente utilizada na identificação de compostos. As análises podem ser qualitativas ou quantitativas. Esta é uma técnica considerada eficaz para a determinação dos grupos funcionais. Essa técnica é baseada

na emissão de radiação eletromagnética na região do infravermelho que interage com a matéria proporcionando os seguintes fenômenos: (i) mudança do estado de vibração das ligações químicas das substâncias, (ii) alteração nos vetores de momento dipolo e (iii) alteração nos modos de vibração da moléculas. Esta técnica pode ser útil também para o estudo dos grupamentos que se formam ou se alteram durante o processo de oxidação. A espectroscopia no infravermelho é rápida, utiliza pequena quantidade de material podendo ser aplicada em amostras sólidas, líquidas ou gasosas (RIBEIRO, 2011).

A razão da utilização do ensaio de espectrometria nesta pesquisa foi avaliar se os aditivos inseridos no ligante puro iriam proporcionar alteração no processo de envelhecimento do ligante modificado. Este dado pode ser constatado através do aumento ou da redução da concentração de carbonila e sulfóxidos quando comparados ao CAP puro.

Os espectros das amostras de CAP puro, CAP + Gemul®, CAP + Cera CT4, além de amostras dos aditivos puros (sem CAP) foram realizados no espetrômetro da Shimadzu® modelo FTIR – 21 (Figura 3.8), na faixa de 400 a 4000cm<sup>-1</sup>, no módulo ATR - *Attenuated Total Reflectance* (Reflectância Total Atenuada).

Figura 3.8 - Equipamento utilizado para o ensaio de infravermelho



Utilizou-se 0,5g de material para cada amostra de CAP puro ou modificado, as quais foram dissolvidas em 10ml de bisulfeto de carbono. Em cada solução obtida foram avaliadas as alterações nos espectros antes e após o RTFOT na faixa do grupo das carbonilas e dos sulfóxidos.

### **3.4 Misturas Asfálticas**

Durante a elaboração das misturas constatou-se variabilidade elevada na granulometria o que poderia levar a incoerências nos ensaios a serem realizados. Tendo em

vista a variação citada, optou-se pelo fracionamento de todo o agregado de modo a reduzir possíveis alterações nos resultados dos ensaios mecânicos.

Quatro diferentes tipos de misturas asfálticas foram avaliadas, contendo: (i) CAP 50-70, (ii) CAP 50-70 + 0,4% de aditivo Gemul®, (iii) CAP 50-70 + 5% de aditivo Cera CT4 e (iv) CAP 50-70 e agregado úmido. No que se refere à mistura com agregado úmido testouse inicialmente dois teores de água (2% e 3%), sendo porém, dado continuidade somente a um destes teores.

Realizou-se a dosagem da mistura de referência, denominada como “Controle” utilizando-se quatro diferentes teores de ligante a partir de 5,5%, com redução de 0,5% até o mínimo de 4,0%. Com o objetivo de atingir um (Vv) de 4,0%, de acordo com orientações da metodologia Superpave, verificou-se que a quantidade de CAP deveria ficar entre 4,5% e 5,0%. Elaborou-se assim, uma nova dosagem com 4,6% e 4,8% chegando-se então ao teor de projeto com este último valor. Os parâmetros volumétricos obtidos com a mistura de Controle, tendo um teor de ligante de 4,8% são mostrados na Tabela 3.8 e encontram-se de acordo com a especificação AASHTO 323-04 (2006).

**Tabela 3.8 - Parâmetros Volumétricos obtidos para a mistura de Controle**

Mistura de Controle	Teor de ligante (%)	Gmb	Gmm	Vv (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
CP1	4,8	2,248	2,346	4,2	10,6	14,8	71,7
CP2	4,8	2,254	2,346	3,9	10,6	14,5	73,0
CP3	4,8	2,250	2,346	4,1	10,6	14,7	72,1
Média	4,8	2,251	2,346	4,1	10,6	14,7	72,3

Definida a curva granulométrica para a mistura de Controle, optou-se por replicá-la em todas as outras misturas investigadas. Procedeu-se da mesma forma com o teor de ligante encontrado para a esta mistura, o qual foi utilizado em todas as outras amostras modificadas..

Em ambos os casos o objetivo foi de promover uma redução das variáveis a serem analisadas e concentrar-se mais especificamente nas questões ligadas à redução das temperaturas e nos efeitos proporcionados por esta medida, especificamente no comportamento mecânico das misturas avaliadas. Em relação à compactação dos CPs optou-se pela utilização do CGS, a partir do qual foram obtidos parâmetros que tiveram influência na decisão de escolha das temperaturas de usinagem e de compactação das misturas. Estes

parâmetros foram o CDI e o TDI<sub>m</sub> que são usados para se conceituar uma mistura com relação à trabalhabilidade durante o espalhamento e à estabilidade da mesma durante a vida de serviço, conforme já citado no capítulo anterior.

Tendo sido elaborada a mistura de Controle, a qual foi executada à temperatura convencional, obtida pela curva de viscosidade *versus* temperatura do ligante asfáltico, e, sem nenhuma modificação no ligante, partiu-se para definição das temperaturas de usinagem e de compactação de cada mistura asfáltica morna.

Nos estudos observados durante a revisão bibliográfica, alguns pesquisadores adotaram uma redução da temperatura em relação à mistura convencional enquanto outros buscaram questões ligadas à trabalhabilidade ou à compactabilidade da massa asfáltica. Nas pesquisas do NCHRP, uma forma de redução de temperatura seria simplesmente a verificação do recobrimento do agregado pelo ligante. Outra forma apontada no relatório seria a avaliação do número de giros quando a mistura atingisse 92% da G<sub>mm</sub>, ou seja, 8% de Vv. De acordo com esse estudo, poderia ser considerado diferença na trabalhabilidade entre uma mistura e outra produzida em temperaturas menores somente quando o acréscimo de giros fosse superior a 25% para uma temperatura 30°C inferior à temperatura de compactação utilizada para a mistura convencional.

### **3.4.1 Elaboração da Mistura com agregado úmido**

Diferentemente da elaboração das outras misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa, em que todo o agregado utilizado era colocado no misturador e posteriormente adicionava-se o ligante, a técnica com agregado úmido foi preparada em duas fases conforme verificado na revisão bibliográfica. Na primeira fase, os agregados passantes na peneira de  $\frac{1}{2}$ " (12,7mm) até aqueles retidos na peneira 16 (1,18mm), além da cal hidratada foram separados dos materiais passantes na peneira 30 (0,6mm) e retidos na peneira 200 (0,074mm). Os agregados maiores, após o aquecimento em estufa a 160°C, eram misturados ao CAP também a 160°C ficando com uma espessura de recobrimento maior de ligante face a ausência dos agregados miúdos. Na segunda fase, o percentual em peso de água em relação à toda a quantidade de agregado (2% ou 3%) foi inserido no agregado miúdo, sendo realizada a homogeneização deste material. Após isso, este agregado foi então adicionado na temperatura ambiente (25°C a 30°C) à mistura agregado graúdo com ligante. Este passo proporcionou uma queda brusca de temperatura chegando-se a valores em torno de 90°C a 100°C. A mistura só era interrompida quando todos os agregados estivessem recobertos pelo ligante. A queda da temperatura já era esperada, porém para que o procedimento de envelhecimento fosse

semelhante ao das outras misturas, a mistura com agregado úmido foi colocada em estufa por duas horas a 105°C, 115°C e 125°C (mesmas temperaturas “teste” utilizadas em todas misturas) e posteriormente cada uma das amostras foi compactada. A Figura 3.9 mostra a sistemática utilizada na produção deste tipo de mistura.

Figura 3.9 - Sistemática utilizada na elaboração das misturas com agregado úmido



(i) O material “A” é colocado em estufa enquanto que o material “B” é mantido à temperatura ambiente; (ii) O material “A” é misturado ao ligante asfáltico; (iii) A água é inserida no material “B”; (iv) É realizada a homogeneização da água com material “B”; (v) É realizada a mistura do material “B” com o restante do material; (vi) A mistura só é interrompida quando agregado for totalmente coberto pelo ligante sendo então levada à estufa por duas horas para envelhecimento e compactação a 105°C, 115°C e 125°C.

### 3.4.2 CDI, TDI e $TDI_m$

Objetivou-se utilizar os parâmetros CDI e TDI, na determinação da redução das temperaturas. Esta redução foi obtida através da comparação entre os valores de trabalhabilidade com aqueles resultados encontrados para a mistura de Controle.

Iniciou-se a realização da moldagem dos CPs para determinação dos parâmetros CDI e TDI para todas as misturas elaboradas. Antes, porém, adotaram-se três temperaturas que seriam utilizadas como “teste” para se chegar àquelas que seriam aplicadas para cada tipo de técnica ou aditivo. Inicialmente as compactações foram realizadas até os 999 giros no

CGS. Tendo em vista, porém a grande quantidade de tempo demandada para se completar a compactação e também a verificação que algumas misturas não atingiam os 98% previstos para o cálculo do parâmetro TDI, optou-se pela utilização do  $TDI_m$ . Este parâmetro, já citado no Capítulo 2, foi proposto por Nascimento (2008) e refere-se a área sob a curva de densificação que vai de 92% da  $G_{mm}$  até atingir o  $N_{des}$ . Esta simplificação trouxe agilidade ao processo, proporcionando maior rapidez para a definição das temperaturas. Observou-se que de forma contrária ao relatado no NCHRP 691 (2011), mesmo com diferenças de 10°C entre as temperaturas “teste” utilizadas foram encontradas mudanças na trabalhabilidade das amostras.

A Tabela 3.9 apresenta o plano de temperaturas “teste” de usinagem/compactação além das temperaturas utilizadas nos agregados e nos ligantes puro e modificados para obtenção dos parâmetros CDI e do  $TDI_m$ .

Tabela 3.9 - Plano de temperaturas “testes” dos insumos, mistura e compactação para obtenção do CDI e do  $TDI_m$

Misturas	Controle	Gemul®	Cera CT4	Agregado Úmido
Temp. Ligante (°C)	160	145	145	160
Temp. Agregado (°C)	175	115-125-135	115-125-135	a) 160 (graúdo) b) 25 - 30 (miúdo)
Temp. Mistura (°C)	155-165	115-125-135	105-115-125	90-100
Temp. Compactação (°C)	150	105-115-125	105-115-125	105-115-125

Os resultados do CDI e do  $TDI_m$  serão apresentados no Capítulo 4. Ressalta-se que em virtude da proximidade nos resultados de CDI e  $TDI_m$  encontrados nas misturas com agregado miúdo úmido (2% e 3%) optou-se pela utilização apenas daquela com o menor percentual de umidade para a realização dos ensaios mecânicos. São relacionadas neste momento, as temperaturas escolhidas em função do critério de trabalhabilidade, para elaboração dos CPs a serem utilizados nos ensaios mecânicos. A Tabela 3.10 apresenta o plano de temperaturas de usinagem/compactação inicialmente previsto e aplicado, nas misturas que fizeram parte da presente pesquisa. Ressalta-se que a definição da temperatura utilizada para o ligante, na mistura de Controle e na mistura com agregado úmido, foi baseada na curva de viscosidade *versus* temperatura. Nas misturas com aditivo Gemul®, pelo conhecimento de que temperaturas acima de 150°C poderiam comprometer a qualidade do surfactante, optou-se pela temperatura de 145°C. No caso da mistura com Cera CT4 adotou-se

a mesma temperatura do ligante com aditivo surfactante. Importante salientar também que a trabalhabilidade das misturas, através dos parâmetros CDI e TDI<sub>m</sub>, era avaliada na temperatura de compactação das mesmas. Para a temperatura de usinagem utilizou-se o valor de 10°C acima da temperatura de compactação com exceção da mistura com agregado úmido, na qual a temperatura durante a usinagem sofria uma queda brusca de temperatura, sendo assim produzida entre 90°C e 100°C. Com o objetivo, porém, de manter o critério do CDI e TDI<sub>m</sub>, no caso da mistura com agregado úmido, manteve-se a temperatura de compactação encontrada nestes parâmetros, a qual representaria a trabalhabilidade mais próxima da mistura de Controle. Esta opção fez com que este tipo de mistura fosse envelhecida e compactada inicialmente, em temperatura superior em que a mesma foi produzida.

Tabela 3.10 - Temperaturas de usinagem e de compactação escolhidas para as amostras

Misturas	Controle	Adit. Gemul®	Adit.Cera CT4	Agreg. Úmido
Temp. ligante (°C)	160	145	145	160 a)160 (graúdo) b)20-25 (miúdo)
Temp. agregado (°C)	175	135	125	
Temp. usinagem (°C)	155-165	135	125	90-100
Temp. compactação (°C)	150	125	115	115

Após a definição das temperaturas passou-se à moldagem dos CPs de cada uma das misturas tendo como parâmetro fixo o Vv de 4% conforme determinado pela metodologia Superpave.

Para as misturas que utilizaram o agregado úmido, observou-se que o Vv havia ficado abaixo de 4% com 100 giros enquanto que para as misturas com Gemul® e Cera CT4 o Vv havia ficado acima deste valor. Desta forma para as misturas com ligantes modificados com aditivos foi utilizado um número de giros maior para que estas pudessem atingir o Vv estabelecido. Para as misturas com o agregado úmido, uma vez que a usinagem era realizada em torno de 100°C e que, estava-se elevando a temperatura para 115°C para o envelhecimento em estufa, alterou-se a temperatura de compactação, mantendo-se a temperatura de usinagem para o envelhecimento e também para a compactação, ou seja, 100°C. Esta opção trouxe uma simulação mais prática do que ocorreria em campo tendo esta sido adotada para todos os CPs moldados com agregado úmido, não mais sendo então utilizada a temperatura de 115°C.

Para cada mistura foi estabelecido um número de giros diferente no compactador CGS conforme apresentado na Tabela 3.11, de forma que todas as misturas obtivessem um Vv de 4%.

Tabela 3.11 - Número de giros no CGS para obtenção do Vv de 4%

Mistura	Controle	Gemul®	Cera CT4	Agregado Úmido
Número de giros	100	110	120	88
Temp. compactação (°C)	150	125	115	100

Nota-se pelos números de giros apresentados que, em relação à mistura de Controle, as misturas modificadas com aditivos tiveram uma necessidade de maior compactação enquanto que a mistura com agregado úmido caminhou no sentido oposto, ou seja, apresentou maior facilidade para obtenção do Vv desejado, apesar da redução da temperatura utilizada tanto na produção como na compactação. Este fato pode mostrar que ainda que apenas uma pequena parcela de água tenha permanecido na mistura, esta pode ter proporcionado uma maior facilidade na compactação dos CPs até que estes pudessem atingir um Vv de 4%. Com exceção da mistura com agregado úmido que foi compactada na mesma temperatura de produção, as misturas modificadas foram produzidas com 10°C acima da temperatura em que as mesmas foram compactadas, conforme já citado.

### 3.4.3 Resistência a Tração por Compressão Diametral (RT)

A elaboração do ensaio de RT baseou-se no método de ensaio do DNIT ME 136/2010. O CP foi estabilizado a uma temperatura de 25°C por um período mínimo de duas horas tendo sido posteriormente colocado em um molde com dois frisos metálicos e levado a uma prensa conforme é apresentado na Figura 3.10. A carga foi aplicada a uma taxa de 0,8 ± 0,1mm/s até que ocorresse a ruptura da amostra. Calculou-se a RT pela Equação 3.3.

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (3.3)$$

Onde:

RT - resistência à tração (MPa)

F - carga de ruptura (N)

D - média das medidas do diâmetro do CP

H - média das medidas da altura do CP

Figura 3.10 - Prensa utilizada para o ensaio de RT



#### 3.4.4 Módulo de Resiliência (MR)

O MR foi realizado a uma temperatura de 25°C em equipamento pneumático da marca SIGEO apresentado na Figura 3.11. São utilizados três ciclos de condicionamento e os LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) medem a deformação elástica do CP durante o carregamento cíclico com frequência de 1Hz, sendo que 0,1segundo é utilizado para aplicação de carga e 0,9segundo para descanso. O equipamento é automatizado e um *software* é utilizado para cálculo do MR, sendo que este valor é uma média dos resultados obtidos nos três ciclos de condicionamento a que o CP é submetido.

#### 3.4.5 Fadiga

O ensaio de fadiga foi executado com três níveis de tensão variando de 50% a 30% dos valores obtidos no ensaio de RT por compressão diametral. Para cada nível de tensão foram moldados três CPs para as quatro misturas. O ensaio é realizado em equipamento pneumático da marca SIGEO, sendo o mesmo utilizado no ensaio de MR. Não foi possível a realização do ensaio com menores níveis de tensão em virtude da limitação do equipamento utilizado. O ensaio de fadiga é realizado a uma temperatura de 25°C por tensão controlada proporcionando assim uma elevação das deformações e a posterior ruptura do CP. São aplicados ciclos de carregamento de compressão diametral em uma frequência de 1Hz. O número de ciclos obtido até a ruptura e o  $\Delta\sigma$ , que é a diferença entre as tensões de compressão

e de tração, são plotados em um gráfico bi-logarítmico obtendo-se assim os parâmetros a serem utilizados no modelo de fadiga.

Figura 3.11 - Visualização do ensaio de fadiga em andamento e do equipamento utilizado no ensaio



### 3.4.6 Dano por umidade induzida

A verificação do dano por umidade induzida foi realizada através do ensaio Lotmann modificado, o qual é descrito na norma AASHTO T283 (2007). Moldaram-se quatro CPs para o grupo não condicionado e quatro para o grupo condicionado, ambos com Vv variando de 6 a 8%. Os procedimentos para o ensaio são divididos conforme descrito a seguir:

- Grupo condicionado - as amostras foram colocadas no equipamento Rice (o mesmo utilizado para determinação da  $G_{mm}$ ) e submetidas ao vácuo sob uma pressão de 250- 650mm Hg de forma a obter 70-80% de saturação. Em seguida cada CP foi envolvido com filme plástico e colocado em um saco plástico contendo 10ml de água separadamente. Estas amostras foram então colocadas no congelador sob uma temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$  por um período de  $24 \pm 1$  horas. Após o ciclo de congelamento, as amostras passaram por mais  $24 \pm 1$  horas imersas em banho de água a  $60^{\circ}\text{C}$  para em seguida passarem por outro banho com temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  em um período de  $2\text{h} \pm 10$  minutos. Concluídos estes três ciclos de condicionamento os CPs são levados à prensa RT para serem rompidos. A Figura 3.12 apresenta a sequência dos procedimentos realizados para este grupo condicionado.

Figura 3.12 - Sequência de procedimentos para o ensaio Lotmann modificado



- Grupo não condicionado - as amostras foram colocadas em um saco plástico à prova d'água e colocadas em banho de água a 25°C por 2h  $\pm$  10 minutos e em seguida levadas à prensa de RT.

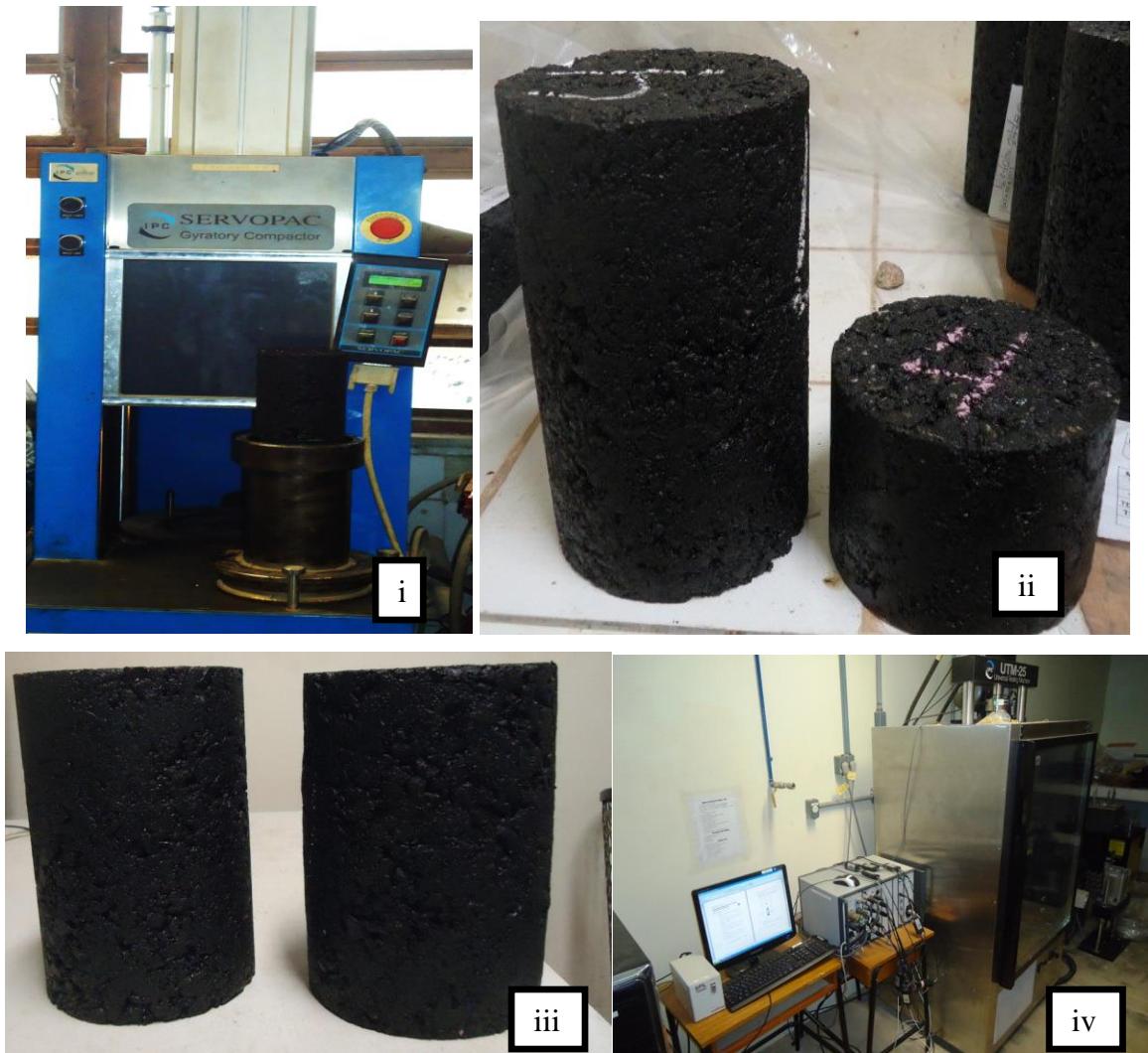
### 3.4.7 Flow Number

O *Flow Number* foi obtido através do ensaio de *Creep Dinâmico* de acordo com as orientações contidas no Report 465 do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (WITCZAK *et al.*, 2002).

Os CPs foram moldados com um Vv de  $7 \pm 1\%$ . Foi utilizado outro compactador giratório conforme mostrado na Figura 3.13 que possibilitou a moldagem dos CPs com 15cm de altura e 10cm de diâmetro. A temperatura utilizada no ensaio foi de 60°C e as quatro amostras moldadas para cada mistura foram submetidas a um carregamento cíclico com frequência de 1Hz, sendo 0,1segundo de aplicação de carga com uma tensão de 204kPa e

0,9segundo considerados como repouso em virtude da aplicação de apenas 5% da carga inicial, ou seja, 10,2kPa.

Figura 3.13 – Visualização do CGS, CPs e equipamento UTM utilizados no ensaio de *Creep* dinâmico



(i) compactador giratório utilizado para as amostras avaliadas no ensaio de *Creep* dinâmico no momento da retirada do CP; (ii) diferença entre as dimensões do CP maior utilizado no ensaio de *Creep* dinâmico e do menor usado nos demais ensaios mecânicos realizados; (iii) comparação entre os CPs antes e após o ensaio de *Creep* dinâmico; (iv) equipamento UTM utilizado para o ensaio

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 Ligante e Aditivos

#### 4.1.1 Penetração e Ponto de Amolecimento

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados obtidos com os ensaios de caracterização realizados no ligante puro e em suas modificações com os aditivos antes do processo de envelhecimento. Na Tabela 4.2 o ligante havia passado pelo envelhecimento de curto prazo no RTFOT. Ressalta-se que em virtude dos ligantes modificados terem sido aquecidos a 145°C durante a mistura com os agregados, o envelhecimento foi realizado a 145°C e não a 163°C como preconiza a norma AASHTO T 240-09.

Tabela 4.1 - Caracterização do ligante puro e modificado antes do RTFOT

Ligante não envelhecido	Penetração (0,1mm)	Ponto Amolec.(°C)	120°C	135°C	150°C	175°C
CAP PURO	61	50	1098	533	258	98
CAP + 0,4% Gemul®	60	50	1198	520	254	98
CAP + 5% Cera CT4	56	54	613	286	152	66

Tabela 4.2 - Caracterização do ligante puro e modificado após o (RTFOT)

Ligante após RTFOT (145°C)	Penetração (0,1mm)	Ponto Amolec.(°C)	120°C	135°C	150°C	175°C
CAP PURO	55	52	1714	614	283	106
CAP + 0,4% Gemul®	35	53	1818	728	344	125
CAP + 5% Cera CT4	28	61	853	395	198	81

Para facilitar a visualização dos ensaios, são apresentados a seguir, os gráficos correspondentes aos ensaios de penetração e de ponto de amolecimento antes e após o envelhecimento de curto prazo conforme indicam as Figuras 4.1 e 4.2.

Figura 4.1 - Penetração antes e após o envelhecimento no RTFOT

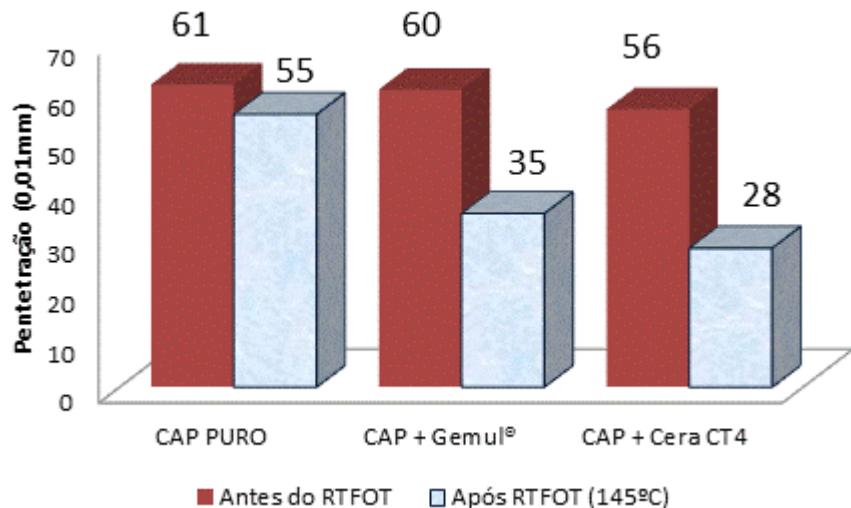
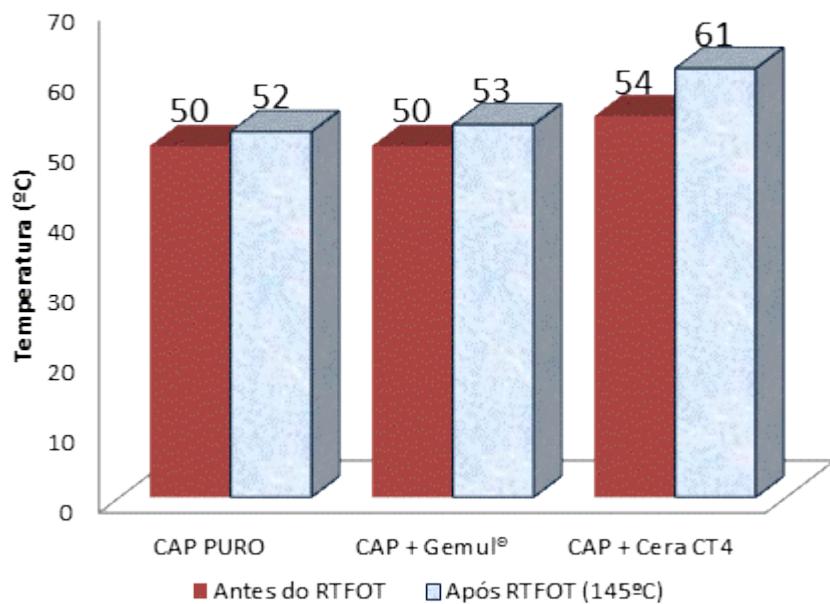


Figura 4.2 - Ponto de amolecimento antes e após o envelhecimento no RTFOT



Sabe-se que os ensaios de penetração e de ponto de amolecimento são ensaios empíricos e que variações podem ocorrer nos resultados obtidos para um mesmo ligante. O método de ensaio estabelecido pelo DNIT para a determinação do ponto de amolecimento (ME 131/2010) permite uma diferença de 1°C entre os resultados das duas amostras, enquanto que a norma ME 155/2010 que refere-se a penetração, estabelece uma diferença máxima de 4 (0,1mm) para penetrações entre 49 e 150 (0,1mm) e 2 (0,1mm) para penetrações entre 0 e 49

(0,1mm). Considerando essas variações verifica-se que as amostras estudadas podem ser consideradas diferentes, especialmente após o RTFOT.

Pelo gráfico pode-se observar que o ligante modificado com o aditivo Gemul® obteve valores de penetração e de ponto de amolecimento muito próximos àqueles encontrados para o CAP puro antes do RTFOT. O CAP modificado pela Cera CT4 teve um valor de penetração menor e um valor de ponto de amolecimento maior tanto antes como após o envelhecimento se comparado com os outros dois ligantes estudados. Observou-se que apesar do envelhecimento ter sido realizado a uma temperatura menor do que a preconizada em norma (145°C ao invés de 163°C) ocorreu uma elevada variação, especialmente na penetração nos ligantes modificados, que atingiram valores na ordem de 50% inferiores àqueles obtidos no ensaio antes do envelhecimento. Já com o CAP puro este fato não ocorreu de forma tão significativa e a redução ficou em torno de 10% da penetração antes do envelhecimento.

Em relação ao ponto de amolecimento, notou-se que o CAP puro e aquele modificado com o Gemul® obtiveram praticamente a mesma temperatura tanto antes quanto após o envelhecimento. Este fato já era esperado uma vez que o Gemul® é um aditivo com característica surfactante, que de acordo com diversos estudos, não altera a consistência ou a viscosidade do ligante.

#### **4.1.2 Viscosidade**

Os ensaios de viscosidade foram realizados nas temperaturas de 120°C, 135°C, 150°C e 175°C, utilizando-se velocidades de 20, 30, 40, 50 e 60RPM. Pelos valores apresentados verifica-se que novamente no caso do CAP modificado com o aditivo Gemul®, os valores de viscosidade estão bastante próximos àqueles encontrados para o CAP puro. Isso mostra que a redução da temperatura de mistura e de compactação, no caso do uso de um aditivo surfactante, ocorre pela forte interação entre o ligante e agregado. Esta, por sua vez, foi gerada pelo aditivo, permitindo assim uma boa trabalhabilidade mesmo a temperaturas reduzidas não sendo baseada, portanto, na curva de viscosidade *versus* temperatura do ligante asfáltico. Em relação à cera observa-se uma redução expressiva na viscosidade em todas as temperaturas se comparado tanto ao CAP puro quanto ao CAP modificado com Gemul®. Isto poderia representar uma menor temperatura de produção e de compactação das misturas asfálticas. Nas Figuras 4.3 e 4.4 são mostrados os gráficos correspondentes aos ensaios de viscosidade antes e após o RTFOT.

Constata-se que, caso a definição das temperaturas de usinagem e de compactação tivesse sido realizada a partir da curva de viscosidade *versus* temperatura do ligante asfáltico que define os valores de  $170 \pm 20$ cPs para a usinagem e  $280 \pm 30$ cPs para a compactação, as temperaturas a serem utilizadas seriam aquelas apresentadas na Tabela 4.3. Verificou-se, no entanto, que para as misturas mornas estudadas pôde-se alcançar uma redução maior através do uso dos parâmetros obtidos com o uso do CGS que baseiam-se principalmente na trabalhabilidade e/ou na compactabilidade da massa asfáltica como será visto mais adiante nos resultados de CDI e de TDI<sub>m</sub>.

Figura 4.3 - Viscosidades obtidas para os ligantes antes do RTFOT

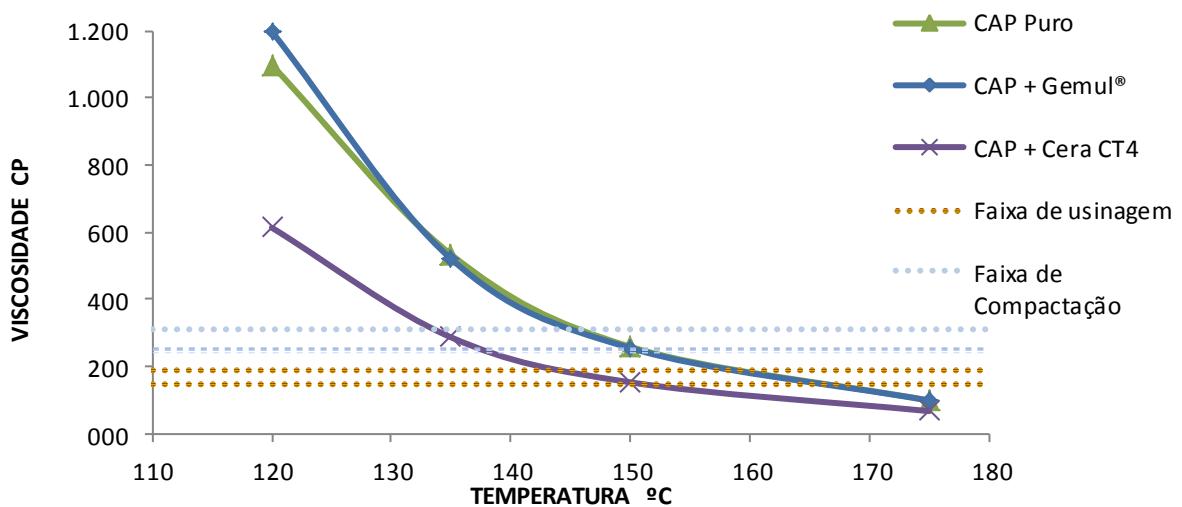


Figura 4.4 - Viscosidades obtidas para os ligantes após RTFOT

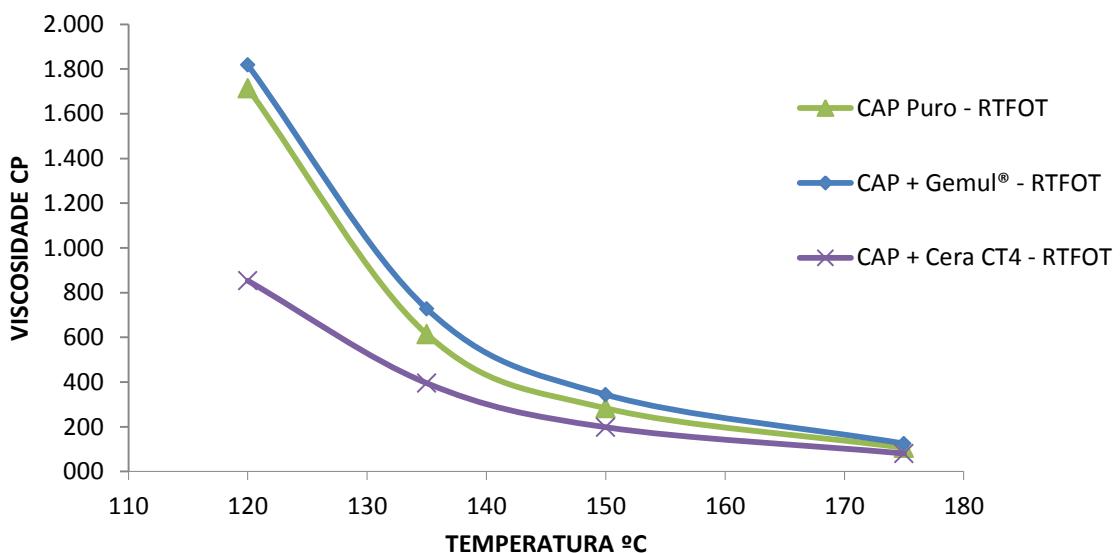


Tabela 4.3 - Temperaturas de usinagem e compactação baseadas na curva de viscosidade  $\times$  temperatura dos ligantes asfálticos

Ligante	Usinagem (°C)	Compactação (°C)
CAP Puro	159 - 165	148 - 150
CAP + 0,4% Gemul®	159 - 165	147 - 150
<u>CAP + 5% Cera CT4</u>	<u>146 - 151</u>	<u>134 - 138</u>

Pelo que pode ser verificado na Tabela 4.3, caso as temperaturas de usinagem e de compactação tivessem sido selecionadas pela curva de viscosidade *versus* temperatura, as misturas com o CAP puro e com o CAP modificado com o aditivo Gemul® seriam produzidas e compactadas à mesma temperatura, enquanto que no caso do CAP modificado com a Cera CT4 estes valores poderiam ser reduzidos para valores próximos de 148°C e 136°C, respectivamente. Como será visto mais adiante, utilizando-se o critério de trabalhabilidade através do parâmetro CDI, foram alcançadas reduções de temperaturas superiores às apresentadas na Tabela 4.3.

#### 4.1.3 Energia de ativação de Fluxo ( $E_{af}$ )

Utilizando os valores de viscosidade encontrados antes e após o RTFOT (Tabelas 4.1 e 4.2) foram plotados dois gráficos os quais foram utilizados para obtenção da  $E_{af}$  antes e após o envelhecimento de curto prazo (FIGURAS 4.5 e 4.6). A inclinação da reta formada pelo gráfico que tem em sua ordenada o  $\ln \eta$  em centipoises (cP) e como abscissa o inverso da temperatura em K multiplicado por 1000 foi usada para o cálculo da  $E_{af}$ . O produto desta inclinação pela constante universal dos gases (R) representa a energia de ativação de fluxo.

Figura 4.5 - Gráfico de Arrhenius para CAP puro e modificado com Gemul® e com Cera CT4 antes do RTFOT

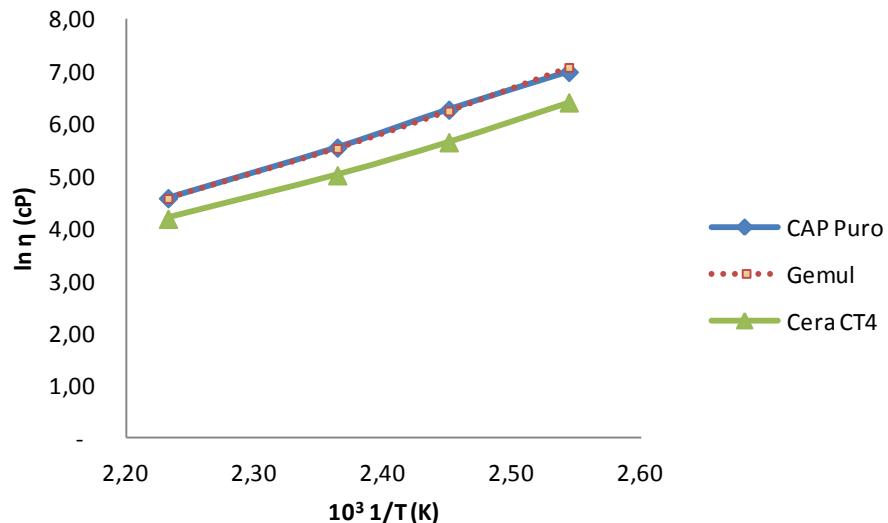
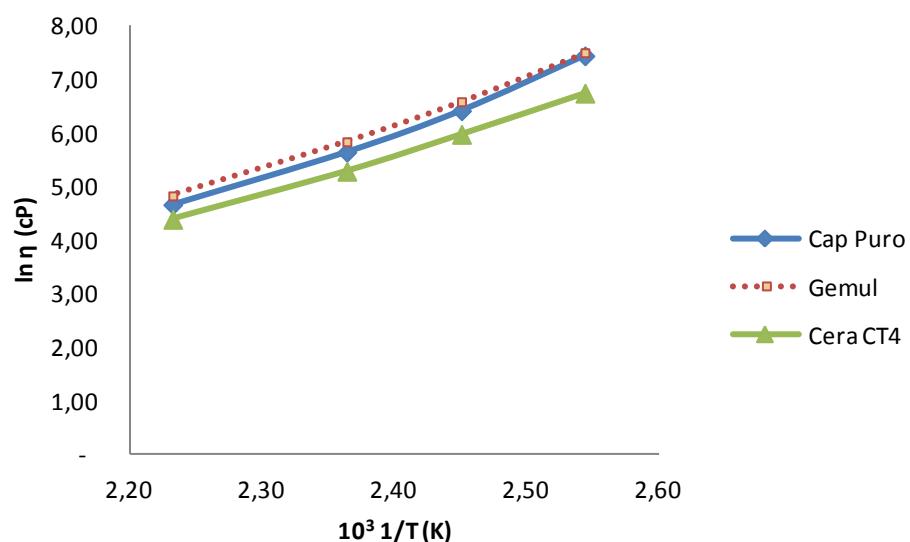


Figura 4.6 - Gráfico de Arrhenius para CAP puro e modificado com Gemul® e Cera CT4 após o RTFOT



A Tabela 4.4 apresenta os resultados de  $E_{af}$  antes e após o envelhecimento de curto prazo.

Tabela 4.4 - Energia de Ativação de Fluxo obtida antes e após o RTFOT

Amostra	$E_{af}$ (kJ/mol)	$E_{af}$ (kJ/mol)
	Antes do RTFOT	Após o RTFOT
CAP puro	64	74
CAP + 0,4% Gemul®	67	71
CAP + 5% Cera CT4	59	63

Observa-se que o CAP modificado com o aditivo Cera CT4 foi o que apresentou a menor energia de ativação de fluxo, ou seja, o ligante modificado que nos ensaios obteve a menor susceptibilidade térmica, o que poderia ser considerado um ponto positivo. Já o CAP modificado com o aditivo Gemul® obteve valores próximos àqueles encontrados para o CAP puro como pode ser verificado tanto nos resultados da Tabela 4.4 como nas Figuras 4.5 e 4.6, demonstrando assim que ambos são mais susceptíveis a alteração da temperatura se comparados com o CAP modificado com a Cera CT4. Após o envelhecimento, como já era esperado, todas as misturas apresentaram valores mais elevados de  $E_{af}$ . Porém neste caso o ligante modificado com Gemul® ficou com valores menores se comparado com o CAP puro, o que também é algo importante, pois representa que após a usinagem e a compactação, o ligante modificado teria uma menor suscetibilidade se comparado com o ligante puro.

#### **4.1.4 Espectroscopia Vibracional de Absorção no Infravermelho**

Os espectros obtidos no ensaio de absorção no infravermelho antes e após o RTFOT são mostrados nas Figuras 4.7 e 4.8 respectivamente. Nesta dissertação considerou-se a faixa de carbonila entre 1.650 e 1.780, enquanto que a faixa de sulfóxido ficou entre 1.007 e 1.065 conforme estabelecido em Siddiqui e Ali (1999). De acordo com as figuras citadas observa-se que a absorbância tanto na faixa da carbonila quanto nos sulfóxidos foi superior para a mistura com CAP modificado com Cera CT4, enquanto que para a mistura com o CAP modificado com Gemul® e com o CAP puro, os espectros se posicionaram próximos. Levando-se em conta as áreas formadas por cada ligante estudado (puro e modificados), antes e após o RTFOT nas faixas citadas anteriormente verifica-se que a variação percentual destas áreas pode determinar o nível de oxidação de cada amostra. Com o cálculo das áreas encontrou-se a oxidação das amostras estudadas (TABELA 4.5).

Tabela 4.5 Comparação no nível de oxidação obtido após o RTFOT

Amostra	Oxidação (%)
CAP puro	74
CAP + 0,4% Gemul®	89
<u>CAP + 5% Cera CT4</u>	<u>46</u>

Figura 4.7 - Espectro na região do infravermelho para o CAP puro, CAP + Gemul® e CAP + Cera CT4 antes do RTFOT

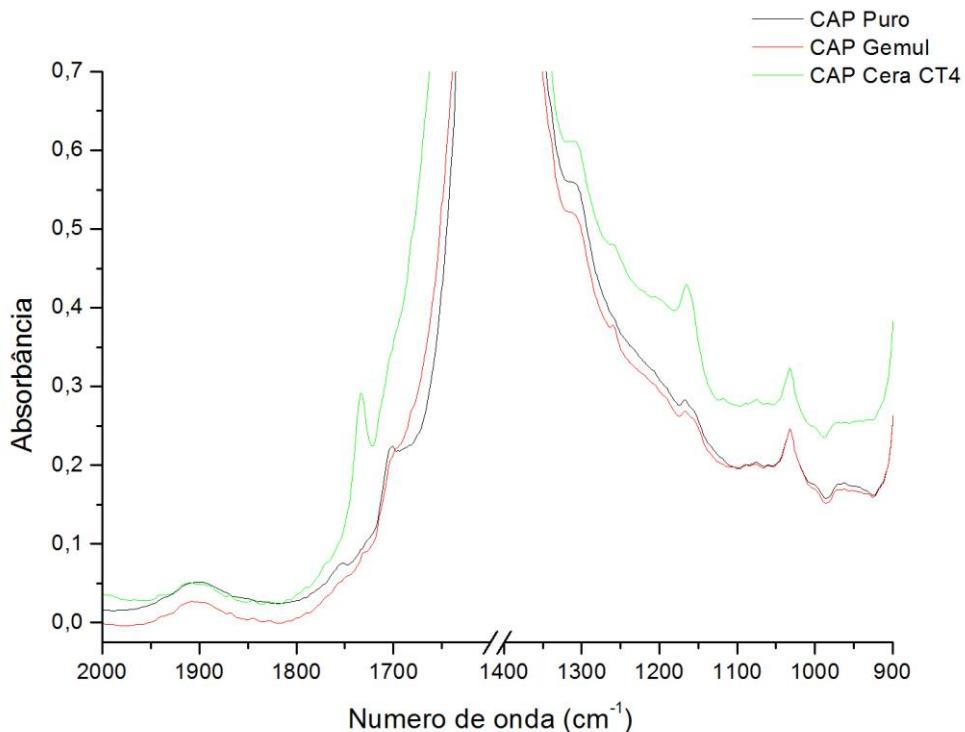
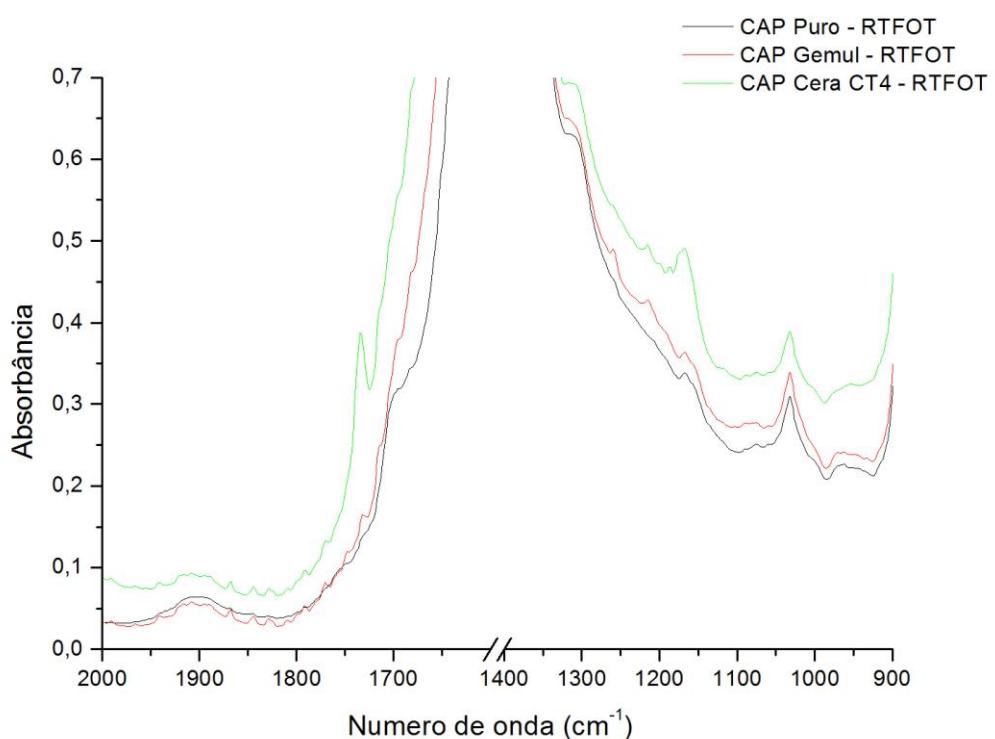


Figura 4.8 - Espectro na região do infravermelho para o CAP puro, CAP + Gemul® e CAP + Cera CT4 após o RTFOT

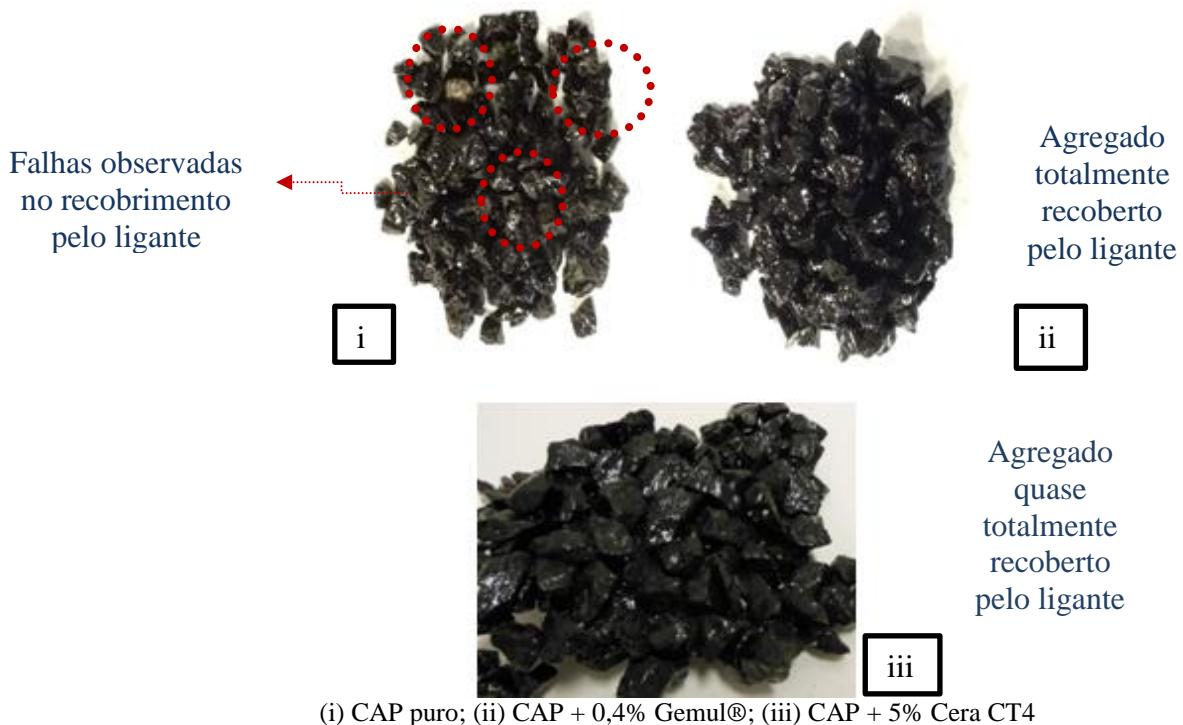


Pelo que pode ser observado a Cera CT4 promoveu uma redução de 28% no nível de oxidação do ligante se comparado com o CAP puro. Por outro lado, o CAP modificado com Gemul® passou por uma oxidação em torno de 15% superior aquela encontrada para o ligante puro. Este fato não era esperado, uma vez que o aditivo surfactante tem uma característica antioxidante. Se por um lado é interessante que a mistura asfáltica sofra menos oxidação evitando-se a formação de trincas precoces, por outro lado, esta deve apresentar certo grau de rigidez, promovendo uma maior resistência à deformação permanente, especialmente no início da vida de serviço do revestimento e por isso cada caso deve ser adequadamente analisado.

#### **4.1.5 Adesividade**

O ensaio de adesividade foi executado com CAP puro e também com os dois ligantes modificados (Gemul® e Cera CT4). Objetivou-se avaliar o comportamento em relação aos agregados utilizados na pesquisa e especialmente comprovar a melhoria da ligação entre os agregados e o ligante quando da utilização do aditivo surfactante. Observou-se na realização do ensaio com o CAP puro que diversas partes dos agregados utilizados ficaram expostas, considerando-se desta forma uma adesividade insatisfatória. Na elaboração do ensaio, porém, com os ligantes modificados, constatou-se que tanto o ligante modificado com a Cera CT4 como com o Gemul® proporcionaram uma melhora significativa na adesividade, o que pode ser considerado um resultado positivo para utilização destes aditivos em misturas, já que, além de proporcionarem uma redução na temperatura de produção e de compactação, estariam eliminando ou diminuindo um possível uso de aditivos melhoradores de adesividade, usualmente conhecidos como dopes. Nos agregados utilizados nesta pesquisa observou-se que a adição do dope seria necessária para a mistura de Controle (sem modificação) tendo em vista que a combinação dos mesmos com o CAP puro se mostrou insatisfatória.

Figura 4.9 - Imagens obtidas após o ensaio de adesividade



## 4.2 Misturas Asfálticas

### 4.2.1 Dosagens das misturas

Uma vez que se optou pelo método de dosagem Superpave para a mistura de controle, observou-se nos parâmetros volumétricos desta mistura se os mesmos atendiam à especificação AASHTO 323-04 (2006). Esta norma estabeleceu além do Vv de 4%, um RBV variando de 65% a 75% e um VAM mínimo de 14%. Como verificado na Tabela 3.8, no Capítulo anterior, esses valores foram atendidos. Os valores da especificação AASHTO divergem um pouco da especificação do DNIT que determina um VAM mínimo de 16% para misturas com DMN de  $\frac{1}{2}$ " (12,7mm) e um RBV de 75% a 82% para camada de rolamento (Faixa C do DNIT).

### 4.2.2 CDI, TDI e $TDI_m$

Conforme já relatado no capítulo anterior, a definição das temperaturas de usinagem e de compactação foram baseadas nos parâmetros CDI e  $TDI_m$ , tendo como critério a obtenção de resultados semelhantes aqueles verificados na mistura de Controle, a qual não havia sofrido nenhuma redução de temperatura ou modificação do ligante/técnica de usinagem. Ao realizar estas compactações percebeu-se que, de forma contrária ao que apontava o NCHRP 691 (2011), ocorriam diferenças consideráveis em algumas das misturas

nas diversas temperaturas em que elas eram produzidas e compactadas. Ressalta-se ainda que foram observadas variações nos valores encontrados para as mesmas misturas tanto para o CDI como para o TDI. Nas Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam-se os resultados obtidos em relação aos parâmetros CDI e TDI<sub>m</sub>, respectivamente.

Tabela 4.6 - Valores obtidos de CDI para as temperaturas teste

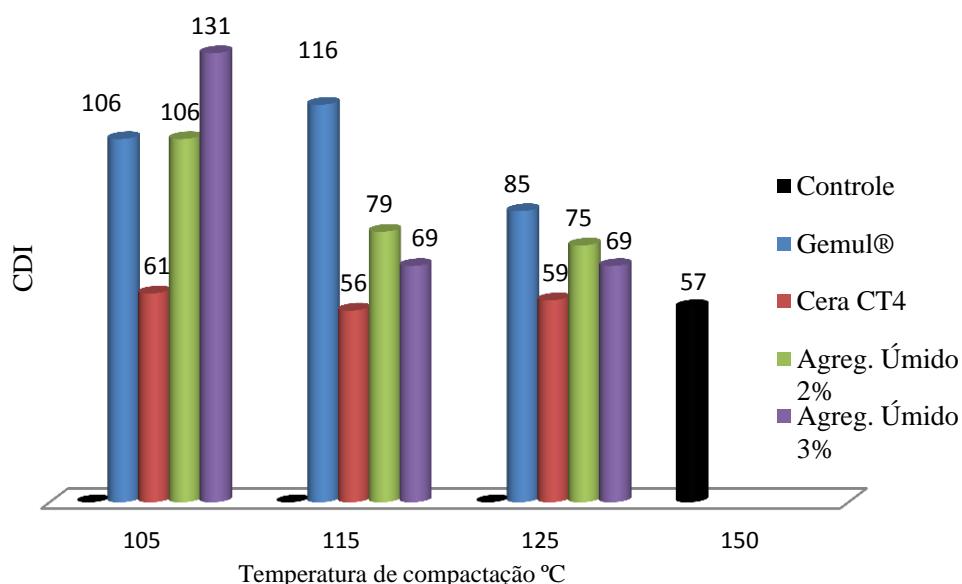
Temperatura compactação (°C)	Controle	Gemul®	Cera CT4	Agreg. Úmido 2%	Agreg. Úmido 3%
105	-	106	61	106	131
115	-	116	56	79	69
125	-	85	59	75	69
150	57	-	-	-	-

Tabela 4.7 - Valores obtidos de TDI<sub>m</sub> para as temperaturas teste

Temperatura compactação (°C)	Controle	Gemul®	Cera CT4	Agreg. Úmido 2%	Agreg. Úmido
105	-	342	256	437	605
115	-	343	227	351	275
125	-	265	264	319	273
150	220	-	-	-	-

Na Figura 4.10 são apresentados os resultados de CDI obtidos pelas misturas modificadas para cada temperatura utilizada na compactação para avaliação da trabalhabilidade em comparação com a mistura de controle que foi compactada a 150°C.

Figura 4.10 - Valores de CDI obtidos para as misturas modificadas nas temperaturas de 105°, 115° e 125°C e na mistura de controle à 150°C

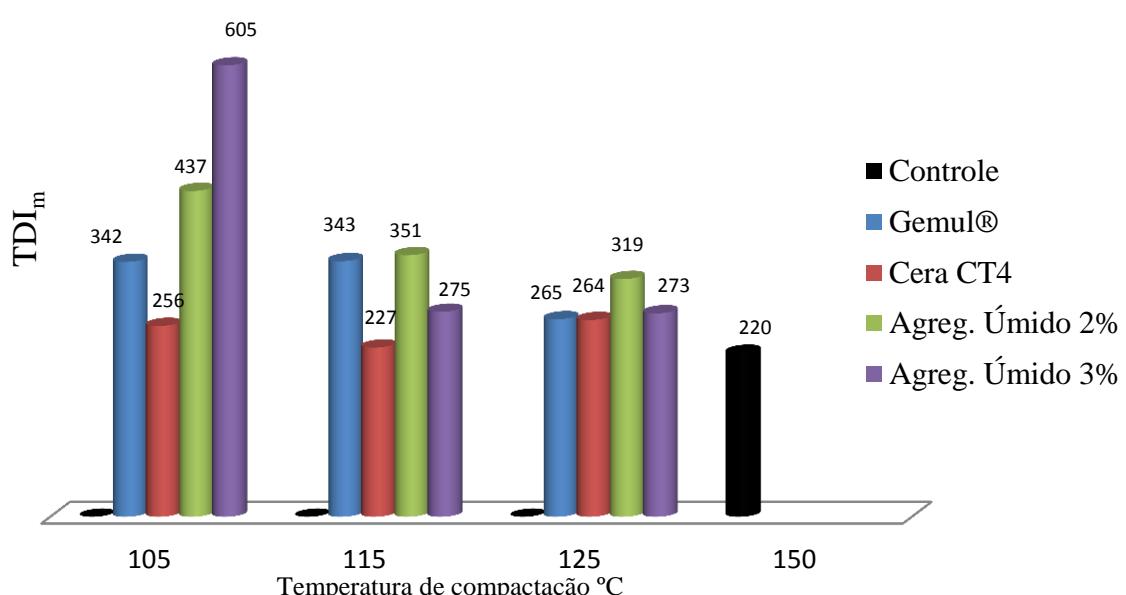


Observa-se pelo gráfico que a mistura com ligante modificado com Cera CT4 foi aquela que mais se aproximou da mistura de Controle em todas as temperaturas em que a mesma foi compactada. Os resultados de CDI, para esta mistura, nas três temperaturas (105°, 115° e 125°C) foram semelhantes e atingiram os seguintes valores, respectivamente, 61, 56 e 59. Pode-se inferir que isso ocorreu em virtude da expressiva redução da viscosidade do ligante puro provocada pelo aditivo, conforme já apresentado na Tabela 4.1.

Em relação ao ligante modificado com o aditivo Gemul® verificou-se que o valor de CDI que mais se aproximou daquele obtido para a mistura de Controle foi aquele encontrado na temperatura de 125°C. Em relação às outras temperaturas avaliadas notou-se que os valores foram superiores àqueles encontrados para a mistura de Controle.

Para os agregados úmidos notou-se certa semelhança entre os resultados tanto para 2% como para 3% de umidade sendo que para as temperaturas de 115° e 125°C a mistura com quantidade inferior de umidade (2%) apresentou maiores valores de CDI, enquanto que para a temperatura de 105°C a situação se mostrou inversa, ou seja, a mistura com 3% de água resultou em um CDI maior. Tendo em vista que os resultados ficaram próximos, por uma questão de segurança no que se refere ao dano por umidade, optou-se pela continuidade apenas com a mistura com menor quantidade de umidade, ou seja, a mistura agregado úmido com 2%. Os valores do parâmetro  $TDI_m$  já citados na Tabela 4.6 são apresentados graficamente na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Valores de  $TDI_m$  obtidos para as misturas com ligantes modificadas nas temperaturas de 105°, 115° e 125°C e para a mistura de controle à 150°C



Verifica-se que todas as misturas modificadas com ligantes modificados, seja através de aditivos ou da técnica com uso do agregado úmido, apresentaram valores superiores aos encontrados pela mistura de controle. Isto pode ser considerado um ponto positivo, uma vez que é interessante que as misturas tenham maiores valores para TDI<sub>m</sub>. Este fato pode indicar uma maior resistência à deformação permanente durante a vida de serviço do revestimento se comparados com a mistura de Controle. As misturas que alcançaram os maiores valores neste parâmetro foram àquelas executadas com agregado úmido com 3% e 2% de água na temperatura de 105°C. Acredita-se que a água remanescente (incompressível) nas amostras que se encontravam confinadas no CGS pode ter dificultado a obtenção de densidade para atingir o TDI<sub>m</sub>.

A mistura contendo o ligante modificado com a Cera CT4 apresentou os menores resultados entre as misturas modificadas em todas as temperaturas com exceção da temperatura de 125°C em que foi obtido quase o mesmo valor daquele encontrado para a mistura com o ligante modificado com o aditivo Gemul®. Com base nos resultados do TDI e do CDI definiram-se as temperaturas de produção. Conforme já relatado, adotou-se como critério para as temperaturas de compactação a redução em 10°C em relação às temperaturas de produção, com exceção da mistura com agregado úmido, a qual foi mantida a mesma temperatura de usinagem (TABELA 4.8).

Tabela 4.8 - Temperaturas definitivas de produção e compactação das misturas

Misturas	Controle	Adit. Gemul®	Adit.Cera CT4	Agreg. Úmido
Temp. usinagem (°C)	150-160	135	125	90-100
Temp. compactação (°C)	150	125	115	100

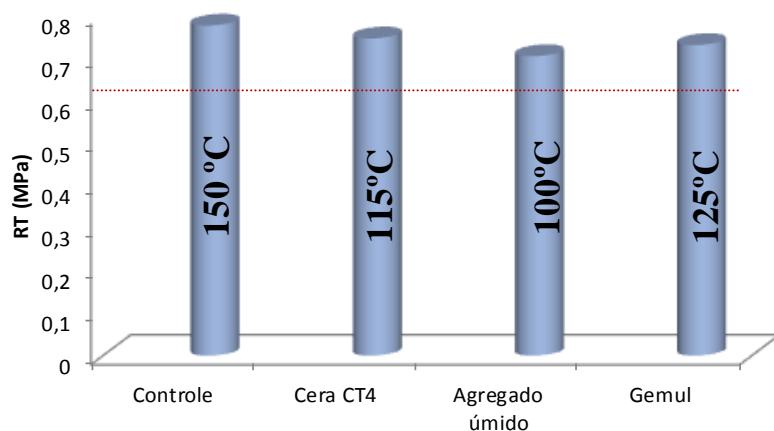
#### 4.2.3 Resistência a Tração por Compressão Diametral (RT)

Os CPs foram submetidos aos ensaios de RT conforme estabelecido na metodologia de ensaio DNIT 136 (2010) já descrita no capítulo de Materiais e Métodos. Durante a execução dos ensaios ocorreu um problema com a prensa existente no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará (UFC) e em virtude deste fato os CPs tiveram que ser rompidos no Departamento Estadual de Rodovias do Ceará (DER). Os valores de RT obtidos são mostrados na Tabela 4.9 e podem ser visualizados graficamente na Figura 4.12.

Tabela 4.9 - Resultados de RT

Mistura	RT (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV(%)
Controle (150°C)	0,78	0,03	4
Cera CT4 (115°C)	0,75	0,10	14
Agregado úmido (100°C)	0,70	0,07	10
Gemul® (125°C)	0,73	0,05	7

Figura 4.12 - Valores de RT (MPa) das misturas estudadas



Pelo que pode ser observado nos gráficos todas as misturas confeccionadas com ligante modificado apresentaram valores próximos aos obtidos para a mistura de Controle. Esperava-se de um modo geral que os resultados obtidos tivessem sido superiores em virtude do bom intertravamento esperado pela elaboração da granulometria Bailey. A mistura de controle foi a que atingiu os maiores resultados neste parâmetro, seguida pela mistura com o aditivo Cera CT4. Os CPs elaborados com agregado úmido obtiveram os menores valores de RT, o que já seria esperado, pela redução da rigidez da mistura em virtude da menor temperatura utilizada na produção e compactação. Cabe ressaltar, porém, que todas as misturas atingiram valores superiores ao estabelecido pela especificação de pavimentos flexíveis do DNIT 031 (2006) que é de 0,65MPa, conforme destaca-se pela linha apresentada na Figura 4.12.

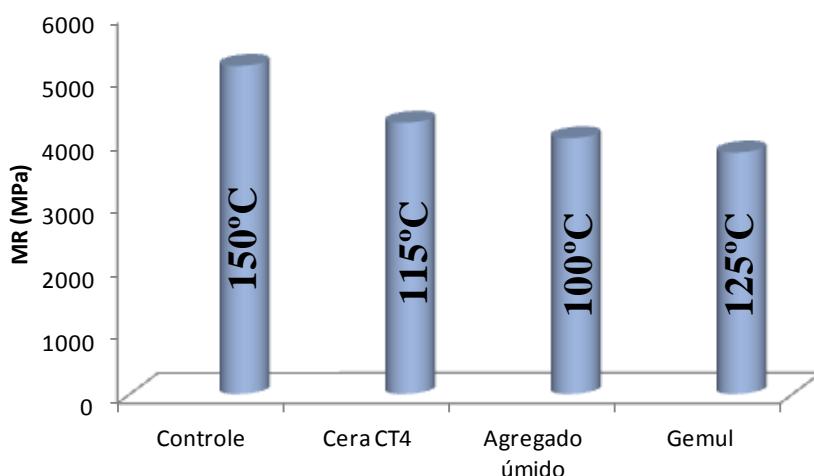
#### 4.2.4 Módulo de Resiliência (MR)

Os valores obtidos para o módulo de resiliência são apresentados na Tabela 4.10 e posteriormente na Figura 4.13.

Tabela 4.10 - Valores de Módulo de Resiliência (MR)

Mistura	MR (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	CV(%)
Controle (150°C)	5186	160	3,1
Cera CT4 (115°C)	4288	41	0,9
Agregado úmido (100°C)	4042	299	7,4
Gemul (125°C)	3817	293	7,7

Figura 4.13 - Valores de MR a 25°C das misturas estudadas



Apesar de todas as misturas terem alcançado resultados compatíveis com os diversos estudos realizados observou-se que a mistura de Controle foi a que obteve os valores mais elevados de MR. De acordo com Bernucci *et al.* (2008), para concretos asfálticos os valores típicos de MR podem variar de 2000MPa, no caso de misturas com ligantes modificados por polímeros ou borracha, a 8000MPa para ligantes mais consistentes.

Analizando-se os resultados obtidos na mistura de Controle, pode-se inferir que, em virtude da maior temperatura utilizada na usinagem e na compactação, ocorreu um maior envelhecimento levando a mistura se tornar mais rígida e consequentemente obter um maior valor de MR. Ao observarmos, porém, as misturas modificadas, verifica-se que os valores foram muito semelhantes, sendo que a mistura com a Cera CT4 alcançou os maiores valores. Nestes casos a lógica da temperatura proporcionando uma maior rigidez e envelhecimento não se comprovou, pois no caso da mistura com aditivo Gemul® em que as temperaturas utilizadas foram as maiores entre as misturas modificadas, o MR ficou cerca de 26% inferior se comparado aos valores encontrados para a mistura de Controle, enquanto que para as amostras com ligante modificado com Cera CT4 e de agregado úmido os valores ficaram 17% e 22%, respectivamente, menores. Pode-se verificar assim que, para a mistura com agregado

úmido, em que o envelhecimento e a compactação ocorreram a 100°C encontraram-se valores de MR similares àqueles encontrados para a mistura com a Cera CT4 que foi compactada a 115°C com uma diferença de apenas 5%. Tendo em vista que o ensaio é realizado a 25°C, e sabendo-se que a Cera CT4 em temperaturas inferiores ao seu ponto de amolecimento (em torno de 80°C) proporciona um aumento de rigidez, acredita-se que este fato fez com que a mistura com este aditivo atingisse o valor mais elevado de MR para as misturas modificadas.

#### 4.2.5 Fadiga

O ensaio de fadiga foi executado com três níveis de tensão variando de 50% a 30% da RT. Não foi possível a realização do ensaio com menores níveis de tensão conforme já descrito no capítulo anterior. Os resultados encontrados são apresentados na Figura 4.14. Na Tabela 4.11 são mostrados os parâmetros dos modelos obtidos com as curvas de fadiga em todas as misturas estudadas.

Figura 4.14 - Curvas de fadiga obtidas com as misturas estudadas

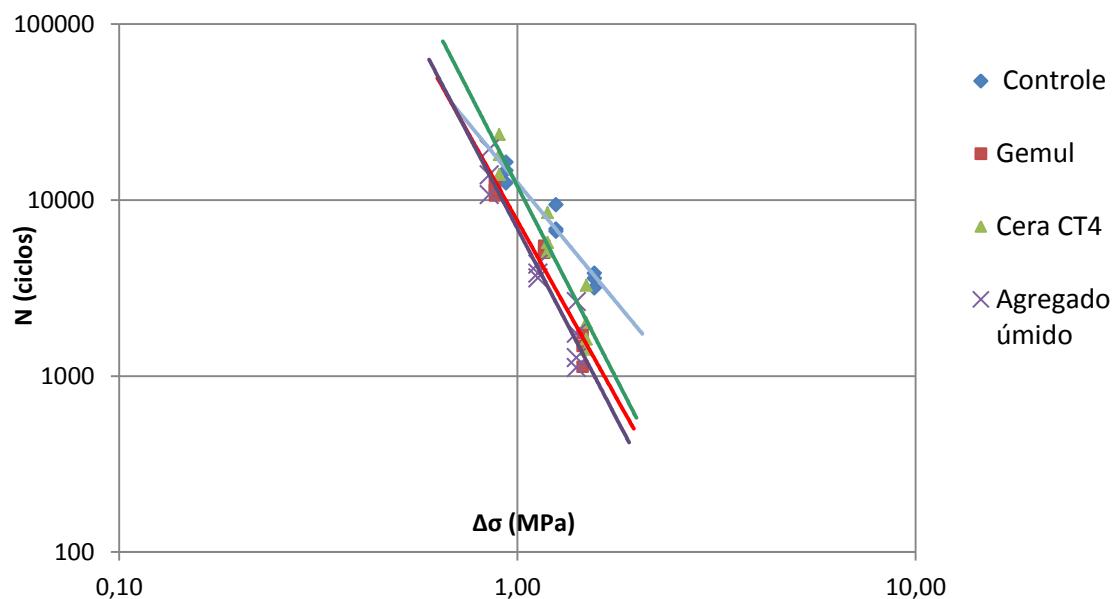


Tabela 4.11 - Parâmetros das curvas de fadiga das misturas estudadas

Mistura	$N = K_1 \cdot \Delta\sigma^{n_1}$		
	$K_1$	$n_1$	$R^2$
Controle	12.573	-2,738	0,94
Gemul®	7.616	-4,041	0,94
Agregado úmido	6.885	-4,330	0,93
Cera	11.984	-4,403	0,92

Visualmente a mistura de Controle para os níveis de tensão de 50% e 40% apresentou-se com um N (vida de fadiga) mais elevado se comparado com as outras três misturas modificadas. Isto de certa forma já era esperado uma vez que a mistura mais rígida em um ensaio conduzido a tensão controlada tende a apresentar valores superiores para N. Como já visto na Tabela 4.10, a mistura de Controle obteve um MR em torno de 20% superior à mistura morna com maior MR. Observa-se, no entanto, que para o menor nível de tensão utilizado no ensaio (30%) a mistura de Controle ficou muito próxima das misturas modificadas. Para as misturas mornas observa-se que elas tiveram comportamento muito semelhante no que se refere à fadiga comprovando-se o entendimento de que os valores de N neste ensaio estarão diretamente ligados à rigidez da mistura. Pode ser observado ainda que para as três misturas modificadas a inclinação das retas foi muito semelhante. Este fato não ocorreu para a mistura de Controle que apresentou uma inclinação maior e assim pode-se inferir pela Figura 4.14 que, para menores níveis de tensão (< 30%) esta mistura tenderia a apresentar uma vida de fadiga inferior, se comparado com as outras misturas avaliadas nesta pesquisa.

#### 4.2.6 Dano por Umidade Induzida

A avaliação do dano por umidade induzida foi realizada com os procedimentos da norma AASHTO T283 (2007), conforme apresentada no Capítulo 3. Os CPs passaram por uma saturação parcial à vácuo obtendo níveis de saturação de 70% a 80%, conforme preconiza a norma. Nas Tabelas 4.12 e 4.13 são apresentados os resultados obtidos para o grupo condicionado e não condicionado, das misturas com Agregado úmido/Gemul® e Cera/Controle.

Tabela 4.12 - Valores de RT (MPa) e RRT (%) para as misturas Agregado úmido e Gemul®

Agregado úmido				Gemul			
RT Condicionado	RT ñ Condicionado	RT Condicionado	RT ñ Condicionado				
CP1	0,37	CP5	0,51	CP1	0,42	CP5	0,65
CP2	0,40	CP6	0,52	CP2	0,43	CP6	0,57
CP3	0,44	CP7	0,58	CP3	0,41	CP7	0,52
CP4	0,42			CP4	0,45		
Média	0,42		0,55		0,43		0,58
D.Padrão	0,02		0,04		0,02		0,07
C.Var(%)	3,92		7,65		4,61		11,29
RRT		76		RRT		74	
RRT mín/máx.	64	86		RRT mín/máx.	62	87	

Tabela 4.13 - Valores de RT (MPa) e RRT (%) para as misturas Cera CT4 e Controle

Cera CT4				Controle			
RT Condicionado	RT ñ Condicionado	RT Condicionado	RT ñ Condicionado				
CP1	0,38	CP4	0,52	CP1	0,44	CP4	0,59
CP2	0,37	CP5	0,53	CP2	0,48	CP5	0,65
CP3	0,42	CP6	0,56	CP3	0,53	CP6	0,54
	CP7	0,54					
Média 1	0,39		0,54		0,48		0,59
D.Padrão	0,02		0,02		0,05		0,05
C.Var(%)	5,98		3,10		9,43		8,89
RRT		72		RRT		81	
RRT mín/máx.	68	73		RRT mín/máx.	68	98	

De forma geral, os valores de RT do grupo não condicionado não atingiram os valores mínimos de 0,65MPa conforme exigido na Especificação 031 (2006) do DNIT. Cabe a ressalva, porém, que estes CPs foram moldados com um percentual de 7% de Vv no sentido de obedecer à norma AASHTO T283 (2007), a qual exige que os CPs estejam com este volume variando entre 6% e 8% enquanto que o Vv previsto na Especificação 031(2006) é de 3% a 5% para a faixa C. Ainda nas amostras não condicionadas verificou-se que os resultados são similares para todas as misturas estudadas sendo que a média dos valores mais elevada foi da mistura de Controle com valor de RT de 0,59MPa e a menor foi aquela obtida para a mistura com Cera CT4 com RT de 0,54MPa.

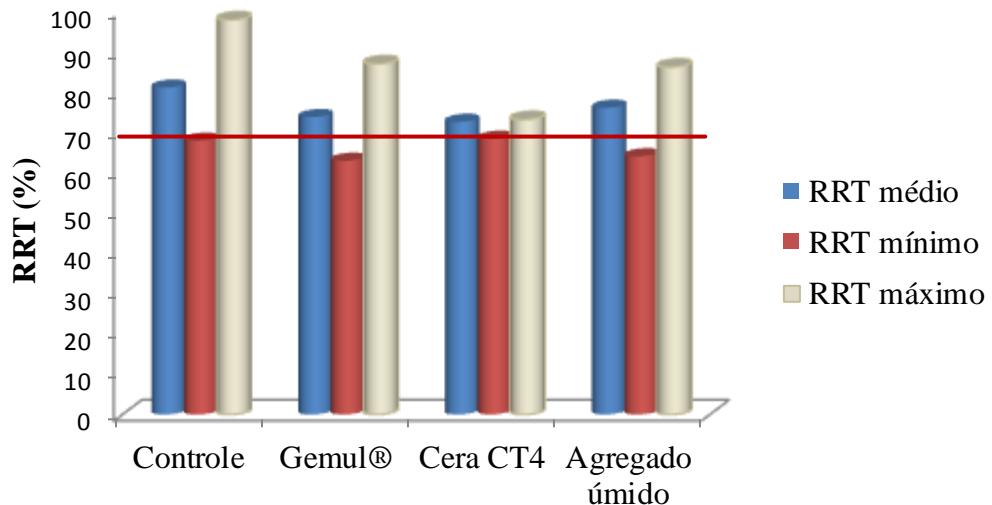
Nas amostras condicionadas observa-se uma redução maior nos resultados de RT o que já se era esperado tendo em vista às condições adversas que os CPs foram submetidos. Observou-se, porém, que os resultados de RRT (relação dos valores de RT antes e pós-

condicionamento) tiveram uma variação dependendo da mistura. De acordo com a norma AASHTO 323 (2007) os valores de RRT admitidos para as misturas de concreto asfáltico devem ser maiores do que 80%. Neste caso somente a mistura de Controle teria obtido este valor. No entanto, no Brasil, de acordo com a especificação 031/2006 do DNIT este valor é de 70%. Desta forma, considerando-se o valor determinado na norma brasileira, todas as misturas estariam dentro da especificação e, portanto, poderiam ser aprovadas neste quesito. A redução de valores de RRT para as misturas produzidas a menores temperaturas está de acordo com o estudo elaborado por Kim *et al.* (2012) no qual as misturas mornas também se apresentaram mais suscetíveis a umidade. Assim, entende-se que a redução nas temperaturas de usinagem e de compactação nas misturas modificadas estudadas podem ter contribuído para que os resultados propostos na especificação da AASHTO não fossem atingidos. No entanto, os valores médios das misturas mornas nesta pesquisa ficaram próximos a 75%, o que não pode ser considerado um mau resultado, embora inferior ao admitido pela norma AASHTO 323 (2007), uma vez que alguns resultados individuais tanto para a mistura com agregado úmido quanto para a mistura com Gemul®, obtiveram valores superiores aos 80%. A mistura com agregado úmido foi a que obteve melhores resultados de RRT das misturas mornas, atingindo um valor médio aproximado de 76%. Este fato foi uma surpresa, uma vez que se imaginava que água adicionada ao agregado miúdo poderia trazer uma redução da ligação entre o agregado e o ligante. Ao observar porém, o estudo promovido por Ceratti *et al.* (2007), verifica-se que os valores de RRT de 70% são semelhantes ao encontrados neste trabalho, apesar do percentual de água utilizado naquela pesquisa ter sido de 8%. Acredita-se que a pequena parcela da água que permaneceu nos CPs não afetou a adesividade entre o ligante e o agregado.

A adesividade entre os dois insumos principais de uma mistura asfáltica (ligante e agregado) é fundamental para que resultados adequados possam ser obtidos. Uma solução para as misturas modificadas incluídas no estudo poderia ser a inserção de um melhorador de adesividade além da cal já presente.

Na Figura 4.15 apresentam-se os valores médios, mínimo e máximo de RRT de cada mistura estudada.

Figura 4.15 - Valores de RRT obtidos nas misturas estudadas



#### 4.2.7 Flow Number

Os ensaios de *Creep* Dinâmico foram realizados com o objetivo de caracterizar a mistura no que se refere à resistência a deformação permanente das mesmas. Uma vez que a granulometria elaborada tinha o objetivo de trazer um melhor arranjo entre os agregados proporcionando uma maior resistência à deformação permanente, esperava-se que as misturas se comportassem de forma adequada, apesar das reduções de temperatura realizadas tanto na usinagem quanto na compactação.

Observou-se, no entanto que todas as misturas, inclusive a de Controle, apresentaram baixos valores de *Flow Number* quando se considera o valor recomendado por Nascimento (2008) para rodovias de tráfego médio que é de no mínimo 300. Com os resultados obtidos pode-se inferir que as misturas estudadas nesta pesquisa teriam um maior potencial à deformação permanente. Este fato apresentou-se como inusitado, já que além do intertravamento proporcionado pela granulometria Bailey, a mistura tinha um teor de ligante de 4,8%, o que pode ser considerado baixo, se comparado às misturas enquadradas na faixa C do DNIT, normalmente elaboradas em projetos do estado do Ceará.

A resistência a deformação permanente, conforme já relatado anteriormente, é uma das grandes preocupações quando se refere a misturas mornas, em virtude da menor rigidez inicial da mistura ocasionada pelas menores temperaturas utilizadas. Na Tabela 4.14 verificam-se os valores de *Flow Number* obtidos para as misturas estudadas.

Tabela 4.14 - Valores de *Flow Number* (FN) obtidos

<b>Mistura</b>	<b>FN</b>	<b>Desvio</b>	
		<b>Padrão</b>	<b>CV(%)</b>
Agregado úmido	116	5	4
Cera CT4	244	2	1
Controle	219	14	7
Gemul®	141	18	13

No estudo realizado por Nascimento (2008), foram avaliadas amostras utilizando CAP20 com diferentes DMNs e verificou-se que para a mistura com DMN 12,5mm o valor médio de FN foi de 384.

Em Onofre (2010), observou-se que as amostras com 100% de agregado granítico e Vv de 7% alcançaram *Flow Number* de 317, ciclos enquanto que em um novo estudo realizado em 2012 pelo mesmo pesquisador foram atingidos valores na ordem de 490.

Um estudo que incluiu a preparação de misturas mornas elaboradas com o aditivo Rediset<sup>TM</sup> (aditivo sólido com propriedades surfactantes como o Gemul®) e CAP 30/45, foi realizado por Cavalcanti (2010) apresentando resultados de *Flow Number* semelhantes aos encontrados nesta dissertação. A Tabela 4.15 apresenta alguns valores obtidos nas pesquisas citadas como parâmetro de comparação.

Tabela 4.15 - Resultados de *Flow Number* neste estudo e em pesquisas recentes

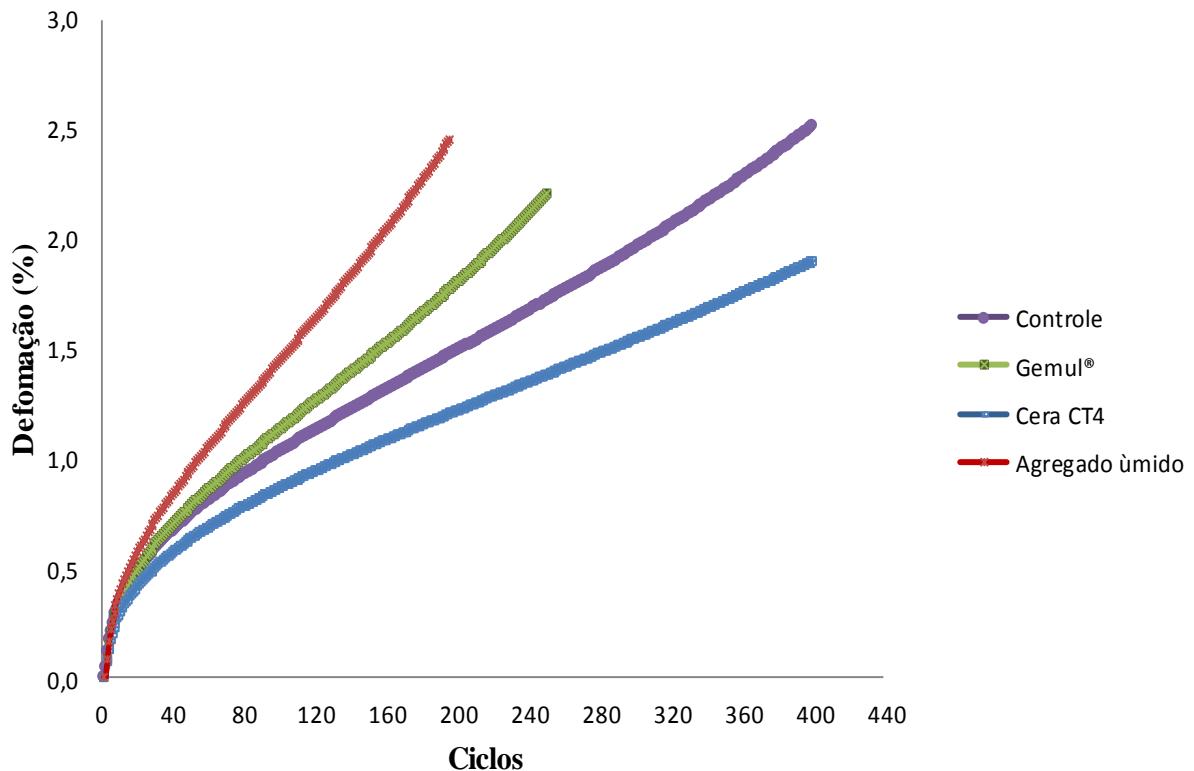
<b>Mistura</b>	<b>Temperatura de compactação (°C)</b>	<b>Teor de CAP (%)</b>	<b>FN</b>
Controle	150	4,8	219
Gemul®	125	4,8	141
Cera CT4	115	4,8	244
Agregado úmido	100	4,8	116
Nascimento (2008) Ligante - 152 Agregado - 162		4,6	384
	130	4,6	151
Cavalcanti (2010)	120	4,6	131
	110	4,7	157
Onofre (2010)	145-150	6,0	317
Onofre (2012)	140	5,3	490

Para as misturas avaliadas nesta dissertação verifica-se que aquela produzida com o aditivo Cera CT4 foi a que obteve o melhor resultado apesar de ter sido produzida e compactada com temperaturas 40° e 35°C, respectivamente, inferiores às temperaturas aplicadas para a mistura de Controle. Este fato pode ser justificado pelo aumento de rigidez que a cera provoca no CAP quando as temperaturas são inferiores ao ponto de amolecimento do ligante modificado com este aditivo. A Cera CT4 promoveu uma redução da viscosidade do ligante na temperatura de produção conforme já foi visto na Tabela 4.1, porém, na temperatura utilizada no ensaio (60°C), e que pode ser considerada a temperatura de serviço no Nordeste brasileiro, a cera manteve a rigidez da mistura podendo assim ser considerada uma técnica de mistura morna promissora.

Esperava-se que a mistura com aditivo Gemul® gerasse resultados semelhantes àqueles encontrados para a mistura de Controle neste ensaio, porém estes ficaram em média 30% inferiores se comparadas às amostras sem modificação. Isto poderia significar uma menor resistência à deformação permanente em campo. Pelos resultados obtidos pela mistura com agregado úmido, percebe-se que a redução da temperatura em torno de 100°C, tanto na produção como na compactação, contribuiu para a obtenção de um menor valor de *Flow Number*, muito provavelmente em virtude da baixa rigidez do ligante.

Apesar de ser um estado com temperaturas médias anuais elevadas, o ligante utilizado no Ceará é um CAP 50/70. Este tipo de ligante com uma viscosidade e consistência inferiores áquelas encontradas para o CAP 30/45 pode também aumentar as possibilidades do revestimento sofrer precocemente com os danos relacionados à deformação permanente. Uma alteração do tipo de ligante poderia promover uma maior resistência a este tipo de defeito do revestimento. Na Figura 4.16 podem ser observadas as curvas encontradas no ensaio de *Creep Dinâmico* do qual se obtiveram os valores de *Flow Number*.

Figura 4.16 - Curvas de deformação versus número de ciclos encontradas nas misturas estudadas

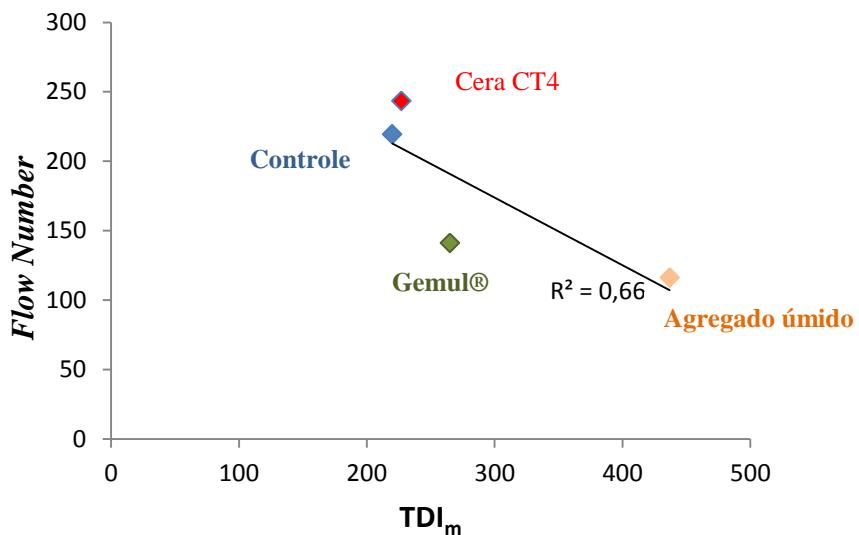


Procurou-se realizar uma correlação entre os valores de *Flow Number* obtidos no ensaio de *Creep Dinâmico* e o parâmetro  $TDI_m$ . Esperava-se que, de modo geral, as misturas com os maiores valores de *Flow Number* tivessem obtido também os maiores valores de  $TDI_m$ . Na Tabela 4.16 são apresentados os resultados encontrados para estes dois parâmetros e na Figura 4.17 estes dados são mostrados graficamente.

Tabela 4.16 - Correlação entre os valores encontrados para os parâmetros  $TDI_m$  e *Flow Number*

Mistura	$TDI_m$	<i>FN</i>
Agregado úmido	437	116
Gemul®	265	141
Controle	220	219
Cera CT4	227	244

Figura 4.17 - Correlação gráfica para os parâmetros  $TDI_m$  e *Flow Number*



Como pode ser verificado pelos resultados ocorreu uma baixa correlação entre o  $TDI_m$  e o parâmetro *Flow Number*. A mistura com água que havia obtido o maior resultado no CGS foi a que teve a menor resistência à deformação permanente. A amostra da mistura de Controle que havia atingido o menor valor de  $TDI_m$  entre todas as misturas, embora com valores próximos aos das mistura modificadas com aditivos, alcançou quase a mesma resistência à deformação permanente que a mistura com Cera CT4 que foi a que atingiu os maiores valores de *Flow Number*. Em relação a mistura com agregado úmido, acredita-se, conforme já citado, que os maiores valores encontrados no  $TDI_m$  não referem-se provavelmente a uma maior dificuldade da mistura em ser compactada, mas sim da pequena parcela de água remanescente que encontrava-se confinada no CGS e pode ter impedido a obtenção da densidade do parâmetro esperada para encerrar a compactação da mistura. O resultado para esta mistura já era esperado uma vez que a menor temperatura utilizada tanto para a usinagem quanto para a compactação promoveria também uma menor rigidez e, como consequência, uma menor resistência à deformação permanente da amostra. Considerava-se que a mistura com o aditivo Gemul® atingisse resultados superiores aos obtidos o que não ocorreu.

#### 4.2.8 Custos de Produção

Para que se possa ter uma avaliação sucinta dos custos utilizados na produção dos quatro diferentes tipos de misturas estudadas foi utilizado o Sistema de Custos Rodoviários – SICRO II do DNIT. Uma vez que todas as misturas possuem a mesma granulometria, mesmo teor de ligante; em caso de produção de campo estas utilizariam a mesma mão de obra e

desconsiderando questões ligadas ao transporte de insumos, observou-se que as variáveis de comparação seriam:

- ✓ custos dos aditivos;
- ✓ custo do CAP puro;
- ✓ custo do combustível utilizado para a usinagem.

Ressalta-se que não foram considerados os custos envolvidos para realização de alteração da usina no caso da utilização de misturas com agregados úmidos. Neste tipo de mistura haveria necessidade de implantar tubulação para inserção de água e outras possíveis alterações necessárias para controle de inserção deste aditivo natural. Em relação às misturas modificadas com aditivos, considera-se que estes materiais já teriam sido misturados ao CAP antes da usinagem.

Para avaliar o consumo de combustível utilizou-se a equação fundamental da calorimetria, Equação 4.1.

$$Q = mc\Delta t \quad (4.1)$$

Onde:

m - massa material

c - calor específico médio

$\Delta t$  - variação da temperatura

A Tabela 4.17 apresenta valores médios de calor específico de algumas substâncias, incluindo o asfalto e o basalto (considerou-se equivalente ao agregado da pesquisa). O consumo médio de combustível utilizado em uma mistura asfáltica, de acordo com o Sistema de Custos Rodoviários do DNIT gira em torno de 8 litros/tonelada de massa produzida.

Tabela 4.17 - Calor específico médio (kcal/kg.°C) de algumas substâncias

SUBSTÂNCIA	kcal/kg °C	SUBSTÂNCIA	kcal/kg °C	SUBSTÂNCIA	kcal/kg °C
ÁCIDO ACÉTICO	0,510	CELOTEX	0,400	MADEIRA (PINHO)	0,650
ÁCIDO SULFÚRICO	0,330	CHUMBO	0,030	MAGNÉSIO	0,250
AÇO	0,115	CIMENTO	0,200	MANGANÉS	0,120
AÇÚCAR	0,280	CINZAS	0,200	MÁRMORE	0,210
ÁGUA (LÍQUIDA)	1,000	CLOROFÓRMIO	0,230	MERCÚRIO	0,036
ÁGUA (VAPOR)	0,374	COBRE	0,095	MICA	0,209
ALCATRÃO	0,400	CONCRETO	0,180	MONÓXIDO DE CARBONO	0,312
ÁLCOL	0,580	COQUE	0,260	NAFTALINA	0,310
ALGODÃO	0,320	COURO	0,360	NÍQUEL	0,110
ALUMINA	0,200	DURALUMÍNIO	0,211	ÓLEO COMBUSTÍVEL	0,450
ALUMÍNIO (POLIDO)	0,220	EBONITE	0,360	ÓLEO DE OLIVA	0,400
AMONÍACO	1,000	ESCORIAS	0,180	ÓLEO LUBRIFICANTE	0,400
ANILINA	0,400	ESTANHO	0,054	OURO	0,033
AREIA	0,200	ETER ELÍTICO	0,520	OXIGÊNIO (LÍQUIDO)	0,316
ARGILA EM TIJOLOS	0,200	FERRO	0,118	PEDRA (GRANITO)	0,200
ASBESTO	0,200	FERRO FUNDIDO	0,119	PETRÓLEO	0,510
ASFALTO	0,220	GÁS CARBÔNICO CO <sub>2</sub>	0,527	PLATINA	0,082
BAQUELITE	0,350	GÁS SULFÚRICO SO <sub>2</sub>	0,397	PÓ DE SERRA	0,500
BARRO SECO	0,220	GELO	0,500	PORCELANA	0,258
BARRO ÚMIDO	0,550	GESSO	0,260	PRATA	0,083
BASALTO	0,200	GLICERINA	0,578	QUARTZO	0,210
BISMUTO	0,030	GORDURA	0,460	QUEROSENE	0,470
BORRACHA DURA	0,330	GRAFITE	0,200	SAL	0,210
BORRACHA MOLE	0,480	HIDROGÊNIO	0,318	SEDA	0,330
BRONZE	0,090	LÂ	0,320	TALCO	0,210
CARBONATO Ca	0,190	LÂ DE ROCHA	0,200	TERRA	0,440
CARBORUNDUM	0,160	LÂ DE VIDRO	0,180	TIJOLO REFRATÁRIO	0,220
CARVÃO MINERAL	0,310	LADRILHO	0,150	VIDRO COMUM	0,200
CARVÃO VEGETAL	0,200	LATÃO	0,090	ZINCO	0,107

Fonte: Aalborg Industries

A Tabela 4.18 apresenta os dados das misturas produzidas que serão inseridos na fórmula para o cálculo do consumo de combustível das misturas mornas. Para efeito de simplificação tendo em vista que o calor específico do ligante e do agregado são muito próximos utilizou-se um valor médio de 0,21. Considerou-se também a massa total de 1 tonelada de mistura, sendo 0,048t para o ligante e 0,952t para a mistura. As temperaturas  $T_i$  e  $T_f$  referem-se respectivamente à temperatura inicial e temperatura final dos insumos (agregado e ligante) em cada uma das misturas estudadas antes e após a usinagem.

Tabela 4.18 - Dados para obtenção da quantidade de energia utilizada durante a usinagem

Mistura	c	Ti (°C)	Tf (°C)	Ti (°C)	Tf (°C)
				Aggregado	Ligante
Controle	0,21	30	175	100	160
Gemul®	0,21	30	135	100	145
Cera CT4	0,21	30	125	100	145
Agregado úmido	0,21	30	160	100	160

Utilizando-se os dados da mistura de Controle e considerando-se a quantidade de caloria necessária para cada produto (agregado e ligante) tem-se a seguinte equação:

$$Q = c \times (m_{ligante} \Delta t_{ligante} + m_{agregado} \Delta t_{agregado}) \quad (4.2)$$

Onde:

$m_{ligante}$  - massa do ligante

$\Delta t_{ligante}$  - variação entre a temperatura final e inicial do ligante

$m_{agregado}$  - massa do agregado

$\Delta t_{agregado}$  – variação entre a temperatura final e inicial do agregado

Obtém-se então o resultado para a mistura de Controle que seria de  $Q = 29,59\text{kcal}$ . Tendo se então o consumo médio de 8 litros e fazendo-se a relação consumo/Q obtém-se um fator de  $0,2703/\text{^{\circ}C}$ . Ao aplicar-se este fator em todas as misturas obtém-se o consumo médio conforme apresentado na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Consumo de combustível estimado para as misturas estudadas

Mistura	Consumo (l)	Redução (%)
Controle	8,0	0
Gemul®	5,8	28
Cera CT4	5,2	35
Agregado úmido	6,2	23

De posse dos dados referentes ao consumo de combustível utilizado e dos custos dos aditivos cera CT4 e Gemul® fornecidos pelos dados da CONAB e do fabricante, respectivamente, é possível estabelecer os custos para cada mistura.

A Tabela 4.20 apresenta um resumo dos custos dos materiais das misturas que foram objeto deste estudo. Ressalta-se que foi utilizado apenas o item “c” (materiais) da composição do SICRO uma vez que todos os outros fatores de produção foram considerados iguais na produção de misturas.

**Tabela 4.20 - Custos Unitários baseados no SICRO II – DNIT (Nov/2012)**

c - Material	1 A 01 390 22 - Usinagem de CBUQ c/ cal hidratada						Sub-total (R\$)			
	Controle	Gemul	Cera CT4	Agregado úmido	UD	Preço Unitário(R\$)	Controle	Gemul	Cera CT4	Agregado úmido
M003 - Óleo Combustível 1A	8,000	5,787	5,248	6,157	1	1,65	13,20	9,55	6,10	5,08
M101 - Cimento asfáltico CAP 50/70	0,048	0,0478	0,0456	0,048	t	1213,76	58,26	58,02	55,35	58,26
- Aditivo Gemul	-	0,1912	-	-	kg	20,00	-	3,82	-	-
- Aditivo Cera CT4	-	-	2,400	-	kg	6,06	-	-	14,54	-

A partir dos dados da Tabela 4.21 obtém-se o custo médio do ítem “Material” do SICRO e os percentuais de acréscimo ou redução encontrados para cada mistura.

**Tabela 4.21 - Custos dos materiais obtidos para cada mistura**

Mistura	Valor estimado/tonelada (R\$)	%
Controle	71,46	-
Gemul®	71,39	100
Cera CT4	75,99	106
Agregado úmido	63,34	89

Constata-se que a mistura com agregado úmido teve um custo 11% inferior ao da mistura de Controle sendo a mais barata entre as misturas modificadas. A mistura com Gemul® ficou com os valores muito próximos aos da mistura de controle, podendo-se considerá-los iguais. Por outro lado a amostra produzida com o aditivo Cera CT4 teve um acréscimo em torno de 6% em relação à mistura de Controle.

Uma vez que a mistura com o uso da cera teve comportamento mecânico satisfatório nos ensaios, tendo inclusive sido superior no parâmetro de resistência à deformação permanente, acredita-se que uma redução no percentual utilizado do aditivo poderia ser testado para igualar os custos aquele obtido para a mistura de controle.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Considerações Finais

Pelos estudos verificados até o momento, percebe-se que empresas e órgãos rodoviários têm avançado nas pesquisas e na utilização de mistura morna tanto a nível laboratorial como em trechos executados no mundo inteiro. Diversas experiências têm alcançado resultados promissores permitindo que esta “nova forma” de se produzir misturas asfálticas possa ser aperfeiçoada. Isto pode ser notado pela diversidade de técnicas que permitem a redução das temperaturas de usinagem e de compactação das misturas e pelo aparecimento de novos aditivos e formas de produção em relativo curto espaço de tempo.

Tendo em vista a mitigação nos impactos ambientais, possíveis reduções nos custos envolvidos, além de melhores condições de trabalho aos funcionários envolvidos na elaboração e no espalhamento do produto, há um grande interesse que este tipo de mistura possa ganhar espaço frente às misturas produzidas em temperaturas mais elevadas.

No Brasil, esta técnica tem sido utilizada em alguns estados, especialmente em São Paulo e no Rio de Janeiro, com resultados positivos até o momento. Com o presente trabalho, buscou-se a obtenção de maior conhecimento no comportamento das misturas mornas, com agregados e ligante disponíveis no estado do Ceará.

O objetivo desta dissertação foi de avaliar três diferentes técnicas de misturas mornas. Duas destas misturas foram produzidas com aditivos de características distintas, sendo um deles de origem surfactante e o outro proveniente da cera de carnaúba. A terceira mistura foi produzida a partir da inserção de água no agregado miúdo úmido.

Para que as avaliações destas técnicas pudessem ser comparadas entre si, foram realizados ensaios de caracterização nos ligantes estudados e ensaios mecânicos nas misturas produzidas. A definição da temperatura de usinagem se deu pela verificação do parâmetro CDI, que foi obtido na curva de densificação do CGS. A temperatura de compactação foi arbitrada em 10°C inferior àquela utilizada na usinagem. A mistura com Cera CT4 pôde ser produzida a 125°C enquanto que para a mistura com Gemul® a temperatura de produção utilizada foi de 135°C. Na mistura com agregado miúdo úmido tanto a temperatura de produção quanto aquela usada para a compactação foi de 100°C.

As misturas foram ainda submetidas aos ensaios de resistência a tração por compressão diametral (RT), módulo de resiliência (MR), Lottman (dano por umidade induzida), fadiga por compressão diametral, e *creep* dinâmico para obtenção do *Flow Number*. As conclusões obtidas após a revisão da literatura e a análise dos resultados obtidos são relacionadas abaixo:

- Através dos ensaios de caracterização dos ligantes pôde ser observado que o CAP modificado com Cera CT4 proporcionou uma expressiva redução da viscosidade quando comparado aos CAP puro e ao outro ligante modificado. O CAP modificado com o aditivo Gemul® manteve praticamente a mesma viscosidade que o ligante puro. Esta situação já era esperada, uma vez que, de acordo com os diversos estudos pesquisados, é relatado que os aditivos surfactantes atuam sem a necessidade da alteração deste parâmetro de consistência promovendo por outro lado uma melhora na ligação entre o ligante e os agregados. Isto pôde ser observado tanto no CAP modificado com Gemul® quanto com Cera CT4. Os aditivos utilizados promoveram uma substancial melhoria na adesividade com os agregados se comparados com o ligante puro. Esta melhora, por si só, já pode ser considerada um ponto positivo, uma vez que, evitaria ou minimizaria a necessidade de utilização de um outro agente melhorador de adesividade. Observou-se também que o efeito do envelhecimento a curto prazo executado no RTFOT elevou a consistência para os ligantes modificados conforme pôde ser observado no ensaio de penetração em que a redução foi de aproximadamente 50% tanto para o Gemul® quanto para a Cera CT4. No ensaio de infravermelho foi observado que o aditivo Cera CT4 serviu como agente anti-oxidante quando misturado com o CAP reduzindo em cerca de 28% o nível de oxidação se comparado com o CAP puro. O aditivo Gemul® sofreu uma oxidação em torno de 15% superior a do CAP puro.

- Os resultados obtidos com o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em todas as misturas ficaram muito próximos e acima dos valores mínimos previstos na especificação ES 031/2006 do DNIT que é de 0,65MPa. A mistura com Cera CT4 foi a que obteve os maiores resultados para as misturas modificadas, enquanto que a mistura produzida com agregado úmido obteve a menor resistência à tração. Ressalta-se, porém, que isto pode ter acontecido em virtude da menor temperatura utilizada na usinagem e na compactação (100°C). No que se refere ao ensaio de MR, a mistura de controle foi a que alcançou o maior módulo. Nas misturas modificadas, novamente a mistura com a cera CT4 atingiu os maiores resultados apesar de não ter sido a mistura morna com maior temperatura. Como já citado anteriormente o ensaio foi realizado a 25°C e a cera tem a característica de aumentar a rigidez do ligante a temperaturas inferiores a seu ponto de amolecimento, podendo ter contribuído para elevação do MR.

- No ensaio de fadiga, a mistura de Controle para os níveis de tensão de 50% e 40% apresentou-se com um N mais elevado se comparado com as outras três misturas modificadas. Os resultados, entretanto, são semelhantes para o nível de tensão de 30%.

- Como já citado anteriormente, um dos pontos questionados quando se refere às misturas mornas, é a possibilidade que a mesma não consiga manter a ligação do agregado com o ligante. Este fato pode ocorrer em virtude da possível retenção de umidade face às baixas temperaturas utilizadas de forma que esta venha a provocar uma desestabilização da mistura. Tendo em vista o ensaio Lottman executado, pôde-se constatar que os valores de RRT ficaram muito próximos para todas as misturas e variaram de 72% a 81%. Estes valores estão dentro daqueles exigidos pela norma do DNIT que é de 70%, porém um pouco inferiores à norma AASHTO 323 (2007), a qual requer um valor de RRT superior a 80%. Apesar de se supor que a mistura com agregado úmido teria o pior comportamento no que se refere a este ensaio, face a menor temperatura utilizada e principalmente pela inserção de água, aconteceu exatamente o inverso e assim esta mistura foi a que alcançou os melhores resultados das misturas modificadas. Acredita-se que a maior parte da água presente na mistura tenha evaporado durante a mistura e a compactação. Embora não se tenha elaborado misturas sem a utilização de cal (CaOH) na composição, acredita-se que este insumo pode ter contribuído para obtenção de resultados positivos no parâmetro RRT para todas as amostras estudadas.

- No ensaio de deformação permanente era esperado que as misturas atingissem valores superiores para o parâmetro *Flow Number* se comparados com aqueles encontrados já que a granulometria havia sido definida pelo método Bailey. Isto não aconteceu, ressalta-se, porém, que a mistura Controle ficou com resultado inferior ao obtido por uma das misturas modificadas. A mistura com o aditivo Cera CT4 obteve o melhor resultado entre todas as amostras estudadas, apesar desta, ter sido produzida e compactada a temperaturas de 125° e 115°C, respectivamente. Não foi observada uma boa correlação entre o parâmetro  $TDI_m$  e o *Flow Number* como era esperado, especialmente no caso da mistura com agregado úmido que obteve o maior resultado do primeiro parâmetro e no ensaio de *Creep* dinâmico apresentou-se com a menor resistência à deformação permanente. Nos estados com temperaturas médias mais elevadas, como por exemplo, o Ceará, percebe-se a necessidade da utilização de CAPs mais consistentes com o objetivo de aumentar a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. Para que isso possa ocorrer haverá necessidade de demanda por este tipo de produto especialmente por órgãos rodoviários como o DNIT e os DER's, permitindo que a Petrobras viabilize economicamente a substituição do CAP 50/70, atualmente utilizado na maior parte do Brasil, pelo CAP 30/45.

Em relação aos custos, como já era esperado, a mistura com agregado úmido obteve o menor valor, por não ter utilizado aditivo e pela redução da temperatura. A mistura

com o aditivo Gemul® ficou com o preço praticamente igual ao da mistura de Controle mesmo com a inserção do aditivo. Isto ocorreu em virtude da pequena quantidade utilizada deste produto e também pela expressiva redução da temperatura aplicada, que gerou economia de aproximadamente 28% no combustível utilizado para secagem e aquecimento dos materiais. Na produção de mistura com Cera CT4, o percentual de aditivo utilizado foi mais de 10 vezes superior quando comparado com a mistura com o Gemul® e em virtude deste fato mesmo o aditivo de cera tendo um valor inferior, este percentual afetou o custo final que ficou cerca de 6% superior ao obtido pela mistura de Controle.

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 tanto neste estudo como em diversos outros já publicados e com os diversos trechos já executados, é possível prever que as misturas asfálticas mornas terão uma forte participação na área de pavimentação a nível mundial.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Baseado nos resultados desta pesquisa listaram-se algumas sugestões que podem ser exploradas em futuras investigações:

- Apenas um teor de cada aditivo foi utilizado para cada mistura e considera-se importante testar diversos teores para definição daquele que poderia ser considerado, tendo-se como critério para definição do teor mais adequado os resultados obtidos nos ensaios mecânicos especialmente no que se refere ao ensaio Lottman o qual é uma das grandes preocupações quando se refere à misturas mornas;

- No que se refere a mistura com Cera CT4, uma vez que o custo previsto ficou 6% superior ao da mistura de Controle, poder-se-ia testar um teor deste aditivo que igualasse o custo das misturas e verificar o comportamento da mesma. A maior parte da produção brasileira de acordo com o IBGE refere-se ao pó proveniente da carnaúba. O pó beneficiado se tornará a cera. Testes poderiam ser realizados no sentido de se tentar utilizar diretamente o pó da cera na mistura asfáltica ao invés da cera já beneficiada;

- Testes em misturas sem modificação no ligante, nas mesmas temperaturas utilizadas para as misturas mornas, poderiam ser realizados, comparando-se os resultados dos ensaios mecânicos;

- Trechos experimentais com as técnicas usadas nesta pesquisa poderiam ser executados no sentido de validar os resultados encontrados em laboratório além de proporcionar uma correlação campo-laboratório;
- Outras faixas granulométricas e agregados poderiam ser investigados para verificar os aspectos relacionados especialmente ao dano por umidade e resistência à deformação permanente;
- Os ensaios de caracterização nos ligantes modificados poderiam ser aprofundados de forma a se entender quimicamente a influência que os aditivos provocam no ligante puro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKZO NOBEL, Apresentação “Aditivos Promotores de Adhesión”, 2012.
- AKZO NOBEL, Apresentação documento técnico “Activantes de Adhesividad”, 2012.
- AL-RAWASHDEH, A. S., Performance Assessment of Warm Mix Asphalt (WMA) Pavements, 104 p. Dissertação de Mestrado - Russ College of Engineering and Technology of Ohio University, EUA, 2008.
- AIREY, G. D.; COLOOP, A. C.; ZOOROB, R. C. E., The Influence of Aggregate, Filler and Bitumen on Asphalt Mixture Moisture Damage, EUA, 2007.
- ARAÚJO JR., P. C.; VALE, A. C.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T., Análise Laboratorial do Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP 30/45 - Em Misturas Asfálticas, 19º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- \_\_\_\_\_ AASHTO Designation M 35-04: Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Hot-Mix Asphalt (HMA), EUA, 2007.
- \_\_\_\_\_ AASHTO Designation M 323-04: Superpave Volumetric Mix Design, EUA, 2006.
- \_\_\_\_\_ AASHTO Designation: T 19M/T 19-09, Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, EUA, 1997.
- \_\_\_\_\_ AASHTO T 240-09, Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), EUA, 1997.
- \_\_\_\_\_ AASHTO T 283 Standard Method of Test for Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage, EUA, 1989.
- \_\_\_\_\_ AASHTO T 283: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage, EUA, 2007.
- \_\_\_\_\_ ASTM 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), EUA, 2004.
- \_\_\_\_\_ ASTM 4402: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, EUA, 2007.
- AUSTROADS TECHNICAL REPORT, AP-T214-12 Field Validation of Warm Mix Pavements, Sidney, Australia, 2012.
- BAHIA, H.; MAHMOUD, A. F. F., Using the Gyratory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures, Wisconsin Highway Research Program, EUA, 2004.
- BAHIA, H.; FAHEEM, A. F., Using the Superpave Gyratory Compactor to Estimate Rutting Resistance of Hot-Mix Asphalt - Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing, Transportation Research Circular EC124, EUA, 2007.

BARTHEL, W.; MARCHAND, J.-P.; DEVIVERE, M., Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite. In: Euraspahlt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 2004.

BERNUCCI, L.B.; CERATTI, J.; A.P.; MOTTA, L.M.G.; SOARES, J.B., Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros, Rio de Janeiro, 3<sup>a</sup> edição, 2010.

BESSA, I. S.; Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas, 154p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2012.

BUDNY, J., Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas, Dissertação de Mestrado, 155p, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

BUTTON, J. W.; ESTAKHRI, C.; WIMSATT, A., A Synthesis of Warm-Mix Asphalt, Texas A&M University System, EUA, 2007.

CASTRO NETO, A. A., Crítica à Postura dos EUA sobre o Protocolo de Kyoto, VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, Fortaleza, Brasil, 2007.

CAVALCANTI, L. S., Efeito de Alguns Modificadores de Ligante na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas, Dissertação de Mestrado, 196p, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

CERATTI, J. A. P.; NÚÑEZ, W. P.; ROHDE, L.; SOUZA, D.C., Projeto de Pesquisa Concepá-Lapav, Estudo laboratorial de redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas, Porto Alegre, 2007.

CHOWDHURY, A.; BUTTON, J.W., A Review of Warm Mix Asphalt, Texas A&M University System, EUA, 2008.

CROTEAU, J.M.; BERNARD, B., Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective, Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Montreal, 2008.

CUNHA, M. B.; GOUVÊIA, L. T.; LEOMAR, J. F. J.; MOTTA, L. M. G., Influência dos agregados sobre as propriedades mecânicas e volumétricas das misturas asfálticas: Análise do Método Bailey, XVIII ANPET (Congresso) de Pesquisa e Ensino em Transportes, Brasil, 2004.

CUNHA, M. B., Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas, 105p. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2004.

D'ALVA, O. A., O Extrativismo da Cera de Carnaúba no Ceará, 193p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2004.

\_\_\_\_\_DNER-ME 035 Agregados - Determinação da Abrasão “Los Angeles”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

- \_\_\_\_\_DNER-ME 054 Agregados - Equivalente de Areia. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1997.
- \_\_\_\_\_DNER-ME 078 Agregado Graúdo - Adesividade ao Ligante Betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_DNER-ME 081 Agregados - Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.
- \_\_\_\_\_DNER-ME 084 Agregado Miúdo - Determinação da Densidade Real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_DNER-ME 086 Agregados - Determinação do Índice de Forma. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_DNER-ME 089 Agregados - Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_DNIT 031 ES Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_DNIT Manual de Pavimentação, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_DNIT 131 ME Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_DNIT 135 ME Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_DNIT 136 ME Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas –Determinação da resistência à tração por Compressão Diametral. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_DNIT 155 ME Material asfáltico - Determinação da penetração. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010.

FERREIRA, C. I. G., Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas, 140p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2009.

GOH, S.W.; YOU, Z., Moisture Damage and Fatigue Cracking of Foamed Warm Mix Asphalt Using a Simple Laboratory Setup, T & DI Congress, EUA, 2011.

GOH, S.W.; YOU, Z.; DAM T. J. V., Laboratory Evaluation and Pavement Design for Warm Mix Asphalt, Michigan Technological University, EUA, 2007.

GOUVEIA, L. T., Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas, 301p. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, USP – São Carlos, 2006.

GUERRA, A. A. M.; MARTINS, R. S.; FEITOSA, J. P. M.; ALENCAR, A. E. V.; SOARES, S. A., RICARDO, N. M. P. S., SOARES, J. B.; Aditivos Modificadores para Obtenção de Misturas Morans (WMA): Efeito nas Propriedades de Ligantes Asfálticos Utilizados na Pavimentação In: 20 ° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012, Joinville - SC.

HENRIQUES, M. F. J., Potencial de Redução de Emissão de Gases de Efeito Estufa pelo Uso de Energia no Setor Industrial Brasileiro, 309 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

KIM, Y-R; ZHANG, J.; BAN, H., Moisture Damage Characterization of Warm-Mix Asphalt Mixtures Based on Laboratory-Field Evaluation, Construction and Building Materials, 2012.

KRISTJÁNSDÓTTIR, Ó.; MUENCH, S.T.; MICHAL, L.; BLURKE, G., Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption. Transportation Research Record, No. 2040. TRB, 2007.

KUANG, Y., Evaluation of Evotherm as a WMA Technology Compaction and Anti-Strip additive, 154 p. Dissertação de Mestrado, Iowa State University, Iowa, EUA, 2012.

LOUREIRO, T. G., Estudo da Evolução do Dano por Fadiga em Misturas Asfálticas, 113 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, CE, 2003.

LUZ, A. B., Zeólitas: propriedades e usos industriais, CETEM/CNPq, Rio de Janeiro, RJ, 1995.

MOTTA, R. S., Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético, 229 p. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2011.

NASCIMENTO, D.R; BRINGEL, R. M.; PAMPLONA, T. F.; SOARES, J.B., A Energia de Ativação de Fluxo e a Correlação com as Propriedades dos Ligantes Asfálticos, 19º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, 2008

NASCIMENTO, L. A. H., Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente, 204 p. Dissertação de Mestrado - UFRJ- COPPE, Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_ NCHRP PROJECT 09-43 PANEL, Field of Materials and Construction—Area of Bituminous Materials, EUA, 2011

\_\_\_\_\_ NCHRP REPORT 691, Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt, EUA, 2011.

\_\_\_\_\_ NCHRP REPORT 714, Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt: A Supplement to NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary, EUA, 2011.

NEITZKE, B.; WASILL, B., Placement of Warm Mix Asphalt on the East Entrance Road of Yellowstone National Park, EUA, 2009.

OLARD, F.; GAUDEFROY, V., Laboratory Assessment of Mechanical Performance and Fume Emissions of Lea® Half-Warm Mix Asphalt versus Traditional Hot Mix Asphalt, 2nd International Conference on Warm-Mix Asphalt, St Louis, EUA, 2011.

OLIVEIRA, L. K., Petróleo e Segurança Internacional – Aspectos Globais e Regionais das Disputas por Petróleo na África Subsaariana. 191 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2007.

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, 158p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2012.

ONOFRE, F. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T.; SOARES, J. B., Correlação entre variáveis de densificação do compactador giratório e resistência à deformação permanente de misturas asfálticas convencionais e com resíduos, Revista Transportes v.19 n.1, p. 13–22, 2011.

OTTO, G. G., Misturas asfálticas mornas: Verificação da fadiga e do módulo complexo. 179 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2009.

PETIT, A. C.; MILLIEN, A.; CANESTRARI, B. F. V.; PANNUNZIO, B. V.; VIRGILI B. A., Experimental study on shear fatigue behavior and stiffness performance of Warm Mix Asphalt by adding synthetic wax, Construction and Building Materials, 2012.

PINE, W.P., The Bailey Method, Achieving Volumetrics and HMA Compactability, Emulsicoat, Inc. / Heritage Research Group Urbana, IL / Indianapolis, EUA, 2011.

PROWELL, B.D., Warm Mix Asphalt – The International Technology Scanning Program – Summary Report, FHWA, AASHTO, EUA, 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, EUA, 2007

RIBEIRO, E. A., O Efeito da Modificação de Ligante Asfáltico com o Líquido da Castanha de Caju (LCC) na Resistência ao Dano por Umidade em Misturas Asfálticas, 152 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2011.

ROBERTS, L. F; KANDHAL P.S.; BROWN, E.R.; LEE, D.; KENNEDY, T. W., Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction, 2<sup>a</sup> Edição, EUA, 1996.

SIDDQUI, M. N.; ALI, M. F., Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts; King Fahd University of Petroleum Et Mineral, Arabia Saudita, 1999.

SISTEMA DE CUSTOS RODOVIÁRIOS – SICRO 2 DNIT/CE Mês de Referência – Nov/12, Brasília, DF, 2012.

SOARES, F. A. A, Imagens fotográficas realizadas às margens da BR116, Km73, em 11/06/2013.

SOUZA FILHO, A.C., Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas, 85p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2006.

TONIAL, I.A., Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

TRANSPORTATION RESEARCH CIRCULAR E-C044 - Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design, TRB, EUA, 2002.

VAVRIK, W.; PINE, W.J.; HUBER, G; CARPENTER, S.H.; BAILEY, R., The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in the Mineral Aggregate, EUA, 2002.

WALL, A. V., Warm Mix Asphalt in a Critical Perspective, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istambul, Turquia, 2012.

XIAO X.F.; AMIRKHANIAN, S.N.; PUNITH, V.S., Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures, Clemson University, Clemson, EUA, 2011.

ZHAO, W.; XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S. N.; PUTMAN, B. J., Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures, Clemson University, Clemson, EUA, 2011.

<http://www aalborg-industries.com.br/downloads/calor-especifico-medio.pdf>, acesso em 14/05/2013

<http://www.abcr.org.br/Conteudo/Secao/43/estatisticas.aspx>, acesso em 07/04/2013

<http://www.asphamin.com>, acesso em 10/10/2011

<http://www.brasil.gov.br/pac/relatorios/nacionais>, acesso em 20/10/2011

<http://www.cnt.org.br>, acesso em 20/01/2012

[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pevs/2011/default\\_pdf.shtml](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pevs/2011/default_pdf.shtml)

[http://www.portalopovo.com.br/noticia\\_detalhe.php?id=10233](http://www.portalopovo.com.br/noticia_detalhe.php?id=10233)