

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/655

## Análise de comportamento de mistura asfáltica morna

João Carlos de Oliveira

Orientador, Professor Doutor em Geotecnia do Instituto Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil,  
joaocarlosifg@gmail.com

Amanda Peres Cunha

Engenheira Civil, Instituto Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, joaocarlosifg@gmail.com

Jordana Portilho Neves

Engenheira Civil, Mestre em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil,  
jordanapn@hotmail.com

Giovane Batalione

Engenheiro Civil, Professor Mestre em Geotecnia do Instituto Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil,  
g-bat@hotmail.com

**RESUMO:** Nos últimos anos questões ambientais têm ganhado cada vez mais destaque no cenário mundial. O setor rodoviário, engajado em contribuir com a redução do consumo de combustíveis e a consequente emissão de gases de efeito estufa, passou a fomentar a criação e aplicação de tecnologias para métodos já existentes de pavimentação. Uma das alternativas encontradas foi a redução das temperaturas de usinagem de misturas asfálticas, a partir da execução de misturas mornas, onde estas são realizadas cerca de 10°C a 50°C abaixo da temperatura convencional, sendo que a redução depende de qual técnica será usada para produzi-la. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento advindo do uso de misturas asfálticas mornas, obtidas a partir da técnica de incorporação de aditivos químicos do tipo surfactante ao ligante asfáltico. Para tal foram formuladas duas misturas, uma à quente e outra morna, esta com redução de 30°C na temperatura de aquecimento dos agregados e da mistura, para cinco teores diferentes de cimento asfáltico de petróleo, de acordo com método Marshall. Os resultados experimentais de ambas misturas foram analisados e comparados, e indicaram desempenho mecânico semelhante, confirmando assim a viabilidade do uso das misturas asfálticas mornas, na substituição das misturas convencionais, à quente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Mistura asfáltica morna, Aditivo surfactante, Redução de temperatura.

**ABSTRACT:** In recent years environmental issues have become increasingly prominent on the world stage. The road sector, engaged in contributing to the reduction of fuel consumption and the consequent emission of greenhouse gases, started to foster the creation and application of technologies for existing paving methods. One of the alternatives found was the reduction of the machining temperatures of asphalt mixtures, by performing warm mixtures, where they are performed about 10°C to 50°C below the conventional temperature, and the reduction depends on which technique will be used to produce over there. The objective of this research is to analyze the behavior of using warm mix asphalt obtained from the technique of incorporating surfactant chemical additives into the asphalt binder. For this purpose two mixtures were formulated, one hot and the other warm, with a reduction of 30°C in the heating temperature of the aggregates and the mixture, for five different levels of petroleum asphalt cement, according to Marshall method. Experimental results of both mixtures were analyzed and compared, and indicated similar mechanical performance, thus confirming the feasibility of using warm mix asphalt to replace conventional hot mixtures.

**KEYWORDS:** Warm mix asphalt, Surfactant additive, Temperature reduction.

### 1 Introdução

O transporte rodoviário é fundamental para o Brasil, movimentando a maioria das cargas e passageiros no país. No entanto, apenas uma pequena porcentagem das rodovias brasileiras é pavimentada, enfrentando sérios problemas de infraestrutura.

Com a crescente preocupação ambiental desde o Protocolo de Kyoto em 1997, setores da economia têm buscado reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (MOTTA, 2011). Os produtos asfálticos utilizados em pavimentação são uma fonte significativa dessas emissões, contribuindo para preocupações tanto ambientais quanto de saúde ocupacional (NIOSH, 2000).

Como resposta a essas preocupações, o setor rodoviário tem investido em tecnologias para reduzir as emissões de GEE, incluindo a produção de Misturas Asfálticas Mornas (MAMs) (MOTTA, 2011). Essas misturas, produzidas em temperaturas mais baixas do que as misturas convencionais, têm mostrado promessa na redução das emissões e na melhoria da qualidade do ar (BUDNY, 2012; WEST *et al.*, 2014).

O presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho das MAMs, incluindo ensaios experimentais de laboratório com uma mistura asfáltica morna dosada com agregados da região metropolitana de Goiânia. Também será utilizado um aditivo surfactante para reduzir a temperatura da mistura estudada. Os resultados desses ensaios serão comparados com as propriedades de desempenho das misturas asfálticas convencionais, fornecendo insights sobre a viabilidade e os benefícios das MAMs (PÉREZ, 2013).

## 2 Materiais e Métodos

Almejou-se estudar uma solução de mistura asfáltica morna com uso de aditivo surfactante. Foram realizados diversos ensaios laboratoriais dos materiais e das misturas, para se verificar a aplicabilidade de surfactantes que permitam reduzir as temperaturas de produção e aplicação de concretos asfálticos.

### 2.1 Materiais

Os materiais utilizados para realização da pesquisa estão descritos a seguir, assim como os ensaios relacionados às diferentes características e parâmetros que foram analisados.

- Ligante asfáltico tipo CAP 50/70. Realizou-se ensaios de penetração, de acordo com a norma ME 155 (DNIT, 2010); viscosidade Saybolt Furol, segundo a NBR 14950 (ABNT, 2003) e adesividade, seguindo os preceitos da norma ME 078 (DNER, 1994).
- Agregados pétreos de origem gnáissica tipo brita 1, brita 0 e pó de brita obtidos seguindo as recomendações da NBR 16915 (ABNT, 2021). Os ensaios desenvolvidos para caracterização dos agregados foram: caracterização granulométrica, de acordo com a norma ME 083 (DNER, 1998) e a NBR 7211 (ABNT, 2022); massa específica, segunda a NBR 6458 (ABNT, 2016); índice de forma, em concordância com a NBR 7809 (ABNT, 2019) e Abrasão “Los Angeles”, conforme a norma ME 035 (DNER, 1998).
- Aditivo surfactante classificado como do tipo 3G cujas características físicas estão descritas na Tabela 1. De acordo com o FHWA (2019) esse material não possui água, sendo assim não se assemelha aos princípios de espuma, e a outros métodos que interferem na viscosidade do ligante. Aditivos desse tipo devem fornecer redução no atrito interno entre os agregados e as finas camadas de ligante que os encobrem, quando estes estiverem sujeitos a altas taxas de cisalhamento, decorrentes das tensões que ocorrem durante a compactação.

Tabela 1. Características do aditivo surfactante 3G.

Características	Aditivo 3G
Aparência	Âmbar
Carcinógeno	Sim
Estado físico	Líquido
Odor	Semelhante ao de amina
pH	10 a 12
Solubilidade	Pouco solúvel em água

Fonte: MeadWestvaco Corporation (2015).

### 2.2 Métodos

Os métodos empregados para a execução dos CPs das misturas à quente e mornas, estão descritos abaixo.

### 2.2.1 Composição granulométrica

Foi produzida uma mistura de agregados, cuja curva granulométrica se enquadre na faixa C da especificação brasileira ES 031 (DNIT, 2006).

### 2.2.2 Temperatura de mistura e compactação

A temperatura de compactação varia de acordo com a viscosidade ideal do ligante asfáltico (MENSCH, 2017). Sendo assim, após estabelecida curva de viscosidade versus temperatura do CAP, foi definida a temperatura de trabalho para as misturas à quente, e para a mistura morna, ocorrendo uma redução de temperatura para o aquecimento dos agregados e para a compactação da mistura.

Segundo Motta (2011) é essencial que a temperatura de produção e compactação seja controlada, para garantir que a qualidade da mistura morna resultante seja similar à da mistura à quente, o surfactante é um fator importante para que a resistência ao dano por umidade não seja comprometida.

### 2.2.3 Dosagem Marshall

As dosagens das misturas foram executadas de acordo com método Marshall (DNER ME 043/95). A partir das misturas intituladas pilotos, com cinco dosagens de ligantes asfálticos diferentes, (teores 4,5% a 6,5%, em intervalos de 0,5%), obteve-se o teor de ligante “ótimo”, ou também chamado teor de projeto.

Ao total foram compactados 30 CPs de 1200 g cada, sendo 15 compostos de mistura asfáltica à quente, e outros 15 de mistura asfáltica morna com aditivo surfactante. É importante ressaltar que o uso do aditivo surfactante e a diminuição nas temperaturas de produção e compactação, são as únicas variáveis que diferenciam as misturas mornas das misturas convencionais (MOTTA, 2011). Por isso, todas as etapas do processo de produção das MAMs seguiram as especificações de misturas à quente.

### 2.2.4 Resistência à tração por compressão diametral

Esse ensaio é normatizado pelo ME 136 (DNIT, 2018) e pela NBR 15087 (ABNT, 2012). O corpo de prova foi submetido a duas forças de compressão, sendo estas concentradas e paralelas, perpendiculares ao longo de seu diâmetro. A resistência à tração indireta (RT) por compressão diametral foi determinada pela Equação 1.

$$\sigma_R = \frac{2 Prup}{100\pi DH} \quad (1)$$

$\sigma_R$  = resistência à tração (MPa);

Prup = carga de compressão de ruptura (N);

D = diâmetro do CP (cm);

H = altura do CP (cm).

Conforme definido por Bernucci *et al.* (2010) os valores médios de resistência a tração de CPs recém moldados, variam entre 0,5 e 2,0 MPa. Após aplicação em pista, a RT aumenta, e ocorre perda de flexibilidade, a partir do envelhecimento dos materiais.

## 3 Resultados e Análises

A partir dos dados adquiridos foi possível comparar os resultados de desempenho da mistura morna estudada aos de uma mistura de referência (à quente) produzida nas condições de temperatura convencionais, de acordo com os parâmetros estabelecidos.

### 3.1 Agregados

A partir dos ensaios realizados em laboratório: granulometria, massa específica, massa unitária, abrasão “Los Angeles” e índice de forma, caracterizou-se os agregados utilizados na pesquisa. A Figura 1 mostra as curvas granulométricas dos agregados e a Tabela 2 traz os valores de caracterização dos mesmos.



sendo que sua temperatura deve variar entre 107°C e 177°C. Para as equações de regressão definidas pelas curvas de viscosidade x temperatura, os valores de aquecimento variaram entre 157 e 160°.

O ensaio de adesividade foi executado primeiramente com o CAP puro, e seu resultado não foi satisfatório, uma vez que houve deslocamento da película betuminosa. Optou-se então por utilizar DOPE de adesividade em taxa de 0,9%, o seu cobrimento foi notado como competente, desse modo, seu uso foi necessário para a execução da mistura à quente. O mesmo ensaio também foi realizado para a o ligante com adição de aditivo surfactante, uma vez que este melhora a propriedade adesiva do asfalto. Seu resultado foi classificado como satisfatório, podendo-se assim dispensar o uso do DOPE, na preparação da mistura morna. A Figura 3 apresenta os cobrimentos obtidos a partir do método visual de adesividade.



Figura 3. Ensaio visual de adesividade.

### 3.3 Aditivo surfactante

A curva viscosidade x temperatura do ligante asfáltico + surfactante está representada na Figura 4. O aditivo surfactante foi utilizado em taxa de 0,7%, conforme especificações do fabricante.

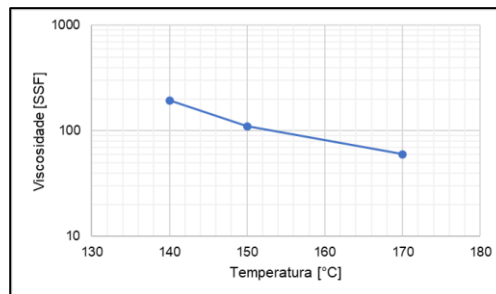


Figura 4. Curva de viscosidade do CAP 50/70 com aditivo surfactante.

O ensaio laboratorial comprovou como proposto por Oliveira *et al.* (2012) que esse tipo de aditivo não altera a viscosidade do CAP, uma vez que a diferença de temperatura do ligante com aditivo para o puro, foi de 2,5°C a mais.

### 3.4 Mistura Asfáltica

Para que as misturas se enquadrassem na Faixa C da ES 031 (DNIT, 2006) foram empregados 14% de brita 1, 39% de brita 2 e 47% de areia artificial. A distribuição dos agregados foi classificada como contínua bem-graduada, e sua dimensão máxima característica (DMC) foi de 19,1mm.

A Figura 5 apresenta a curva granulométrica das misturas estudadas, a faixa C do DNIT e as faixas de controle para aplicação.

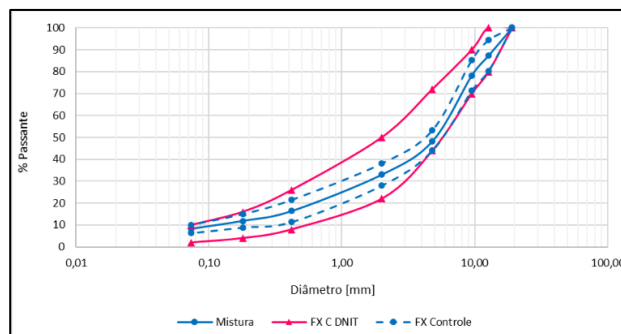


Figura 5. Curva granulométrica.



Segundo ES 031 (DNIT, 2006) a temperatura de aquecimento dos agregados deve ser cerca de 10 a 15°C superior à do ligante asfáltico, não podendo exceder os 177°C. A partir da equação encontrada no gráfico do ensaio de viscosidade Saybolt Furol, foi determinada a temperatura de aquecimento do ligante, fixou-se o valor de 160°C, sendo que este definiu as temperaturas de aquecimento dos agregados, e de compactação da mistura.

A referência para a fixação das temperaturas referentes a mistura morna, foram adotadas de acordo com a tese de Motta (2011), onde a temperatura de aquecimento do CAP foi mantida, variando-se somente para os agregados, e para a compactação, sendo estabelecida uma redução de 30°C para cada processo. Os valores finais adotados para os dois tipos de misturas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Temperaturas de aquecimento e compactação.

Mistura asfáltica	Temperatura (°C)		
	Ligante	Agregado	Compactação
Quente	160	170	150
Morna	160	140	120

A dosagem da mistura foi estabelecida conforme método Marshall pela DNER ME 043/1995 por compactação manual. Após a realização do ensaio foi possível o levantamento de dados para se estabelecer os parâmetros volumétricos: massa específica máxima teórica; massa específica aparente; volume de vazios (VV); vazios com betume (VCB); vazios do agregado mineral (VAM); e relação betume/vazios (RBV). A partir do rompimento dos CPs, foram determinados os dados de estabilidade Marshall, e fluência. As Tabelas 4 e 5 trazem os valores referentes a cada característica analisada, para a mistura à quente, e morna, respectivamente. E os gráficos gerados a partir dos resultados dos parâmetros estão representados pelas Figuras 6, 7, 8, 9 e 11.

Tabela 4. Parâmetros dos CPs das misturas à quente e morna

Parâmetro	Mistura à quente					Mistura morna				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Teor de ligante (%)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Massa específica máxima teórica (g/cm <sup>3</sup> )	2,68	2,66	2,64	2,62	2,59	2,68	2,66	2,64	2,62	2,59
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,55	2,54	2,53	2,52	2,52	2,53	2,54	2,53	2,53
Volume de vazios (%)	4,81	4,22	3,70	3,28	2,86	6,04	4,77	3,86	3,17	2,50
Vazios com betume (%)	11,22	12,49	13,70	14,88	16,06	11,12	12,42	13,67	14,90	16,12
Vazios do agregado mineral (%)	16,03	16,71	17,40	18,16	18,92	17,16	17,19	17,53	18,07	18,62
Relação betume/vazios (%)	70,00	74,74	78,73	81,94	84,88	64,80	72,25	77,99	82,46	86,57
Estabilidade (kgf)	1125	1180	1153	1069	899	731	890	884	793	703
Fluência (mm)	4,66	4,69	4,84	7,12	7,92	5,25	6,20	5,61	6,46	7,09

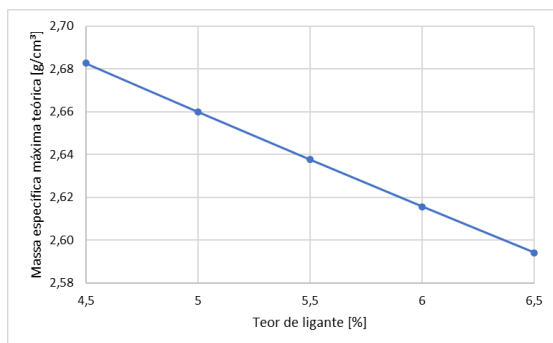


Figura 6. Massa específica máxima teórica x teor de ligante.

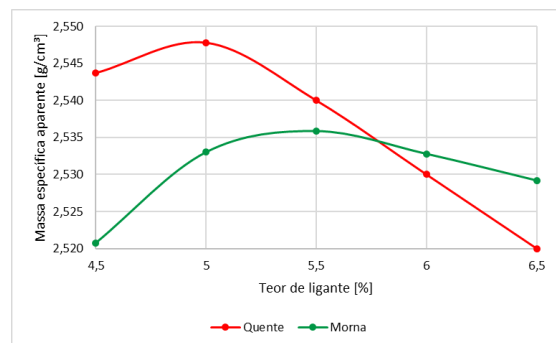


Figura 7. Massa específica aparente x teor de ligante.

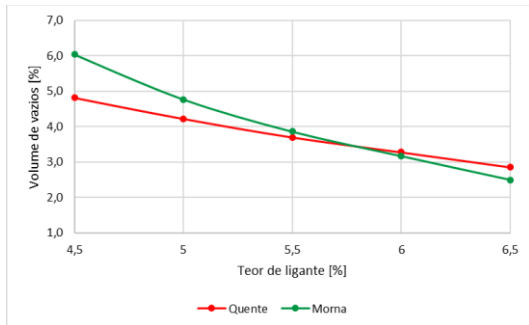


Figura 8. Volume de vazios x teor de ligante.

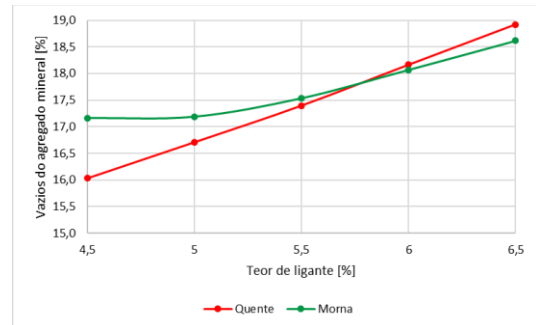


Figura 9. Vazios do agregado mineral x teor de ligante.

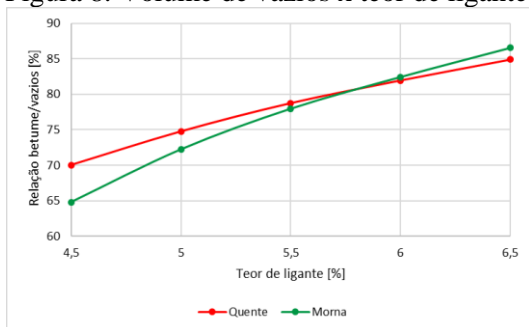


Figura 10. Relação betume/vazios x teor de ligante.

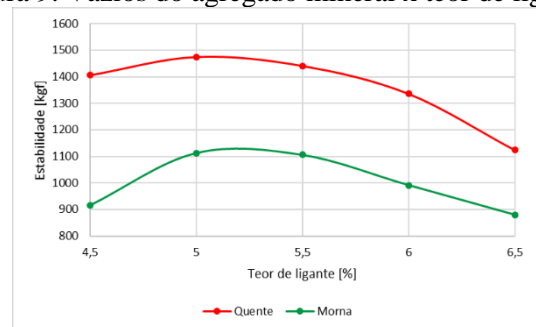


Figura 11. Estabilidade x teor de ligante.

Para a escolha do teor “ótimo” de ligante, foram utilizados dois métodos de cálculo. O primeiro, definido por NAPA (1982) estabelece que o critério a ser atendido pelos CPs corresponde ao volume de vazios igual a 4%, uma vez que a porcentagem de vazios para camadas de rolamento deve estar entre 3 e 5%. Assim foi encontrado para a mistura à quente o valor de 5,3% e para a mistura morna 5,5%.

Outro método empregado é baseado na média de 3 teores, sendo eles: volume de vazios de 4%, a máxima estabilidade Marshall e a massa específica aparente máxima das amostras compactadas. Os valores dos teores de projeto para este modelo de cálculo, foram para as misturas à quente, 5,1% e morna 5,3%, respectivamente.

Para o critério da relação betume/vazios, na mistura à quente os teores de 5,5 e 6% foram os únicos que se enquadraram, na morna somente o teor de projeto 5,5% cumpriu o requisito estabelecido no intervalo mínimo de valores da norma, sendo este de 75 a 82. A estabilidade Marshall mínima (500 kgf) foi atingida em todos os teores, apresentando valores de resistência consideravelmente superiores ao valor de referência, tanto para a mistura padrão, quanto para a morna. A porcentagem esperada de 15% de VAM de acordo com o DMT dos agregados de 19,1mm, também foi outra característica que obteve valores acima do mínimo normatizado para todos os teores.

#### 4 Conclusão

A partir do desenvolvimento desta pesquisa, foi possível perceber uma crescente preocupação no cenário da pavimentação, na busca de soluções para os problemas e limitações que existem no emprego de materiais petrolíferos. Diversas tecnologias já foram e ainda estão sendo desenvolvidas nesse contexto. Existe uma ampla variedade de técnicas que utilizam misturas asfálticas mornas e semi-mornas, como alternativa de substituição para o processo de CBUQ, dentre elas, o uso de aditivos surfactantes.

A utilização do aditivo surfactante permitiu que houvesse uma redução na temperatura de aquecimento dos agregados e de compactação da mistura da morna. Após análises dos resultados foi possível concluir que as duas misturas obtiveram resultados de desempenho que se enquadram aos valores esperados para o método Marshall, assim como das diversas literaturas consultadas, apesar de cada uma possuir suas particularidades. Esse método de compactação mostrou ser estaticamente igual em relação a definição do teor de projeto para os dois tipos de misturas.

No geral, pode-se concluir que a diminuição da temperatura não interferiu de maneira expressiva na densificação da mistura asfáltica, uma vez que os resultados do VV para os dois tipos de misturas foram praticamente iguais. Esse fator é importante, pois demonstra que a mistura morna possui comportamento mecânico semelhante ao da mistura à quente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: *Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2016.
- \_\_\_\_\_. NBR 7211: *Agregados para concreto - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2022.
- \_\_\_\_\_. NBR 7809: *Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2019.
- \_\_\_\_\_. NBR 14950: *Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol*. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. NBR 15087: *Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Rio de Janeiro, 2012.
- \_\_\_\_\_. NBR 16915: *Agregados - Amostragem*. Rio de Janeiro, 2021.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA, CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 035: *Agregados - Determinação da Abrasão "Los Angeles": Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1998.
- \_\_\_\_\_. DNER-ME 043: *Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall: Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1995.
- \_\_\_\_\_. DNER-ME 078: *Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso: Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. DNER-ME 083: *Agregados - Análise Granulométrica: Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1998.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031 - ES: *Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_. DNIT 136 - ME: *Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2018.
- \_\_\_\_\_. DNIT 155 - ME: *Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 2010.
- BUDNY, J. *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. 137 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2012.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. U.S. Department of Transportation. Pavements, Sustainability: *Warm Mix Asphalt Technologies and Research*. Disponível em: < <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- MEADWESTVACO CORPORATION. (2015). Surfactante Evotherm® 3G. Richmond, VA: MeadWestvaco Corporation.
- MENSCH, N. G. *Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas*. 168 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2017.
- 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 (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2011.
- NIOSH. *Hazard Review: Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt*. Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2000.
- OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; ABREU, L. P. F.; GONZALEZ-LEON, J. A. *The role of a surfactant based additive on the production of recycled warm mix asphalts – Less is more*. Construction and Building Materials, n° 35, 693-700, 2012.
- PÉREZ, Y. A. G. *Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas*. 326 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico, Florianópolis, 2013.
- WEST, R.; RODEZNO, C.; JULIAN, G.; PROWELL, B. *Engineering properties and field performance of warm mix asphalt technologies*. Final Report. National Cooperative Highway Research Program, Auburn, 2014.