

BANCO DE DADOS DE MISTURAS ASFÁLTICAS AVALIADAS NO CEARÁ

Beatriz Ferreira da Fonseca

Juceline Batista dos Santos Bastos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, Brasil.

Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior

Jorge Barbosa Soares

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.

RESUMO

O objetivo deste artigo foi organizar um banco de dados de misturas asfálticas obtidas de pesquisas avaliadas no Ceará. O foco é atender aos parâmetros de entrada em métodos de dimensionamento mecânico-empíricos. Para tanto, foram levantados dados de rigidez, por meio dos módulos dinâmico e/ou de resiliência; vida de fadiga por compressão diametral, deformação permanente, além de resistência à tração. Foram caracterizados ainda os ligantes e os agregados utilizados nas 84 misturas asfálticas analisadas. Foi possível observar que misturas com altos valores de resistência à tração e módulo de resiliência geralmente contêm ligantes modificados por polímeros; ou material fresado na sua composição; e/ou ainda são misturas envelhecidas. Tais misturas têm a tendência de apresentar uma vida de fadiga com maior número de ciclos. Resultados elevados de ciclos no ensaio de deformação permanente de misturas com ligante puro são exceções, e apenas as misturas com ligantes modificados por polímeros apresentaram valores superiores ao ciclo 7200 nesse ensaio.

ABSTRACT

The objective of this paper was to organize an asphalt mixture data base obtained from research projects at Ceará. The focus is to obtain input parameters for mechanical-empirical design methods. Therefore, it was collected stiffness data, i.e., dynamic and/or resilient moduli, diametral compression fatigue life, rutting, and tensile strength. It was also characterized the binders and aggregates used at the 84 asphalt mixtures. It was possible to observe that mixtures with higher tensile strength and resilient modulus values, are usually contain binder modified by polymers; or contain Reclaimed Asphalt Pavement (RAP); and/or are aged mixtures. These mixtures have a tendency to present a greater fatigue life, with higher number of cycles in laboratorial tests. High number of cycles on the rutting test are exceptions for mixtures with neat binders, and only mixtures with polymer modified binders present a value above 7200 cycles on this test.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo DNIT (2018), no método mecânico-empírico MeDiNa, os valores de tensão-deformação nos pavimentos são determinados em análises computacionais que têm como dados de entrada as rigidezes dos materiais, obtidas em ensaios de módulo de resiliência (MR) (HVEEM, 1955; DNIT 135, 2018), e também as curvas de fadiga, obtidas em ensaios laboratoriais de vida de fadiga por compressão diametral (CD) (CARNEIRO, 1943; DNIT 183, 2018). Alternativamente, no Brasil, o software CAP3D-D, desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (Santiago, 2017; Santos, 2020) considera a viscoelasticidade, por meio do módulo dinâmico ($|E^*|$) (PAPAZIAN, 1962; DANIEL *et al.*, 1998; DNIT 416, 2019), a vida de fadiga por tração-compressão uniaxial direta (TD) (AASHTO TP 107, 2018), a viscoplasticidade, por meio do *Stress Sweep Rutting* (SSR) (CHOI *et al.* 2012; KIM e KIM, 2017), além de opcionalmente poder ser adotado o MR para rigidez e o CD para caracterização quanto à fadiga das camadas asfálticas.

Tanto no MeDiNa quanto no CAP3D-D são considerados os parâmetros do acompanhamento de trechos experimentais e funções de transferência, obtendo-se a previsão da evolução do trincamento por fadiga, conforme Fritzen (2016) e Santiago (2017), respectivamente. No caso do CAP3D-D é possível ainda obter a previsão da evolução de afundamentos em trilha de roda da camada asfáltica.

Considerando o revestimento asfáltico, segundo a abordagem do MeDiNa, o trincamento por fadiga é o que determina o dimensionamento da espessura dessa camada. Já a deformação

permanente das camadas asfálticas é limitada na dosagem da mistura asfáltica, em que o parâmetro *Flow Number (FN)*, obtido por meio do ensaio uniaxial de carga repetida (WITCZAK *et al.*, 2002; DNIT 184, 2018), se relaciona ao nível de tráfego ao qual essa mistura será submetida (BASTOS, 2016). Outros critérios são exigidos ainda para aplicação dessas misturas em campo, como a resistência à tração (CARNEIRO, 1943; DNIT 136, 2018), indicada por DNIT 031 (2006), e caracterização básica dos ligantes asfálticos e das curvas granulométricas das misturas.

Dessa forma, a partir dos avanços no desenvolvimento de métodos mecanístico-empíricos; da necessidade da obtenção de parâmetros de ensaio que alimentem esses métodos; e para facilitar o acesso a esses dados, possibilitando aos usuários utilizar uma grande variedade de abordagens no tratamento das informações, o presente artigo tem como objetivo organizar um banco de dados com as características dos materiais de misturas asfálticas avaliadas no Ceará.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram analisados diferentes trabalhos desenvolvidos ao longo de uma década no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da Universidade Federal do Ceará, com foco na caracterização de misturas asfálticas e especificamente em dados que possam ser usados em métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento. A partir disso, os resultados físicos e mecânicos dos diferentes constituintes, dosagens, além de análises mecânicas das misturas asfálticas foram organizados para compor um banco de dados. Na Tabela 1 é possível observar as pesquisas e os dados obtidos. Características dos ligantes e misturas asfálticas foram organizadas, sendo 84 misturas divididas em 35 com ligantes modificados e 49 com ligantes puros (cf. Figura 1).

Tabela 1: Pesquisas e dados coletados

| Referência | Quant. | Código | Visc. (Pa.s) | Pen. (dmm) | PA (°C) | E* (MPa) | MR (MPa) | RT (MPa) | FN | CD | Gran. |
|---------------------|--------|--------|-----------------|---------------|------------|--------------|-------------|-------------|----|----|-------|
| Rodrigues (2010) | 3 | 01-03 | x | x | x | | x | x | | x | x |
| Coutinho (2012) | 3 | 04-06 | x | x | x | x | x | x | | x | x |
| Onofre (2012) | 17 | 07-23 | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Bessa (2012) | 2 | 24-25 | x | x | x | | x | x | x | x | x |
| Ponte (2013) | 3 | 26-28 | x | x | x | | x | | | | x |
| Wargha (2013) | 3 | 29-31 | x | x | x | | x | x | x | x | x |
| Oliveira (2013) | 14 | 32-45 | x | x | x | | x | x | x | x | x |
| Oliveira (2015) | 18 | 46-63 | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Borges (2014) | 4 | 64-67 | x | x | x | | | x | x | | x |
| Xavier (2016) | 6 | 68-73 | x | x | x | | | x | | | x |
| Gouveia (2016) | 1 | 74-74 | x | x | x | x | | | | | x |
| Bastos (2016) | 5 | 75-79 | x | x | x | x | | | x | | x |
| Lucas Júnior (2018) | 5 | 80-84 | x | x | x | | | x | x | | x |

Quanto aos ligantes, foram analisados os resultados de ponto de amolecimento (PA), penetração (Pen) e viscosidade (Visc). Os ensaios de PA e Pen foram realizados antes e após o envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (*RTFOT - Rolling Thin Film Oven Test*), para que pudessem ser analisados os efeitos do envelhecimento. Para as misturas asfálticas, foram compatibilizados dados de módulos dinâmicos ($|E^*|$) e de resiliência (MR), vida de fadiga por compressão diametral (CD), *Flow Number (FN)*, resistência à tração por compressão diametral (RT), além das granulometrias.

Os cimentos asfálticos de petróleo utilizados nos trabalhos são CAP 50/70, CAP 30/45 e CAP 60-85, além de ligantes com os diferentes modificadores: borracha de estireno butadieno

(SBR), estireno-butadieno-estireno (SBS), Elvaloy, Etil Vinil Acetato (EVA), ácido polifosfórico (PPA), modificador de misturas mornas (Gemul XT-14), e o Líquido da Castanha de Caju (LCC).

Quanto à origem mineralógica dos agregados que compuseram as misturas asfálticas investigadas, tem-se basálticos, fonolíticos, gnaissicos e graníticos, sendo catalogadas as granulometrias por peneiramento (DNER-ME 083/1998) desses agregados.

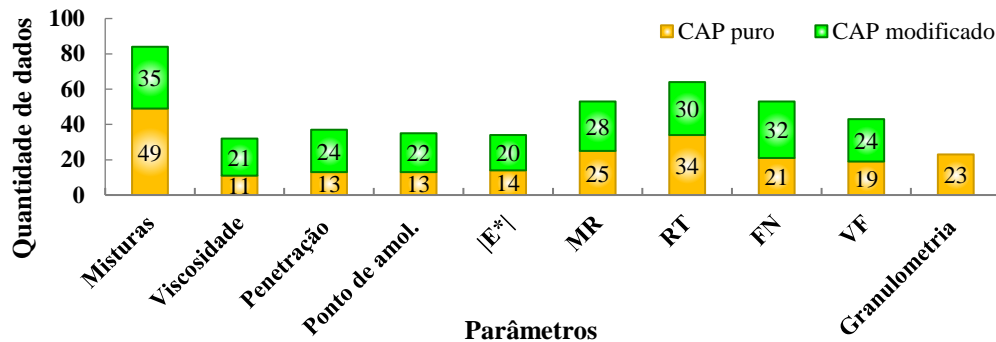


Figura 1: Dados utilizados no estudo.

2.1 Ensaios Mecânicos - Misturas Asfálticas

2.1.1 Módulo de Resiliência (MR)

Na determinação do MR é aplicada uma carga repetida no plano diametral vertical de um corpo de prova (CP) cilíndrico, com altura entre 3,5 e 6,5cm e diâmetro de 10cm. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão de tração (DNIT-ME 135, 2018).

2.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)

A determinação da RT das misturas asfálticas pode ser realizada em uma prensa Marshall, a partir de um CP com as mesmas dimensões indicadas para o ensaio de MR. Esse CP é posicionado diametralmente em relação à direção da compressão, resultando em uma tração no eixo horizontal. Aplica-se uma carga progressivamente a uma razão de 0,8mm/s até que se dê a ruptura do CP, segundo um plano diametral vertical (DNIT-ME 136, 2018).

2.1.3 Vida de Fadiga por Compressão Diametral (CD)

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida pelo número total de aplicações de um carregamento vertical diametral em um CP, à tensão constante e à temperatura controlada, correspondente à ruptura em cada nível de tensão. Este ensaio é realizado a uma frequência de 60 aplicações por minuto (1Hz) com 0,1s de duração do carregamento repetido (DNIT-ME 183, 2018). Determina-se o número de repetições necessárias à ruptura completa do CP (correspondente geralmente aos níveis de carregamento de 10, 20, 30, 40 e 50% da RT). Traçam-se gráficos das curvas de fadiga relacionando o número de repetições do carregamento até a ruptura completa da amostra (N) e a diferença de tensões.

2.1.4 Módulo Dinâmico ($|E^*|$)

Os ensaios de módulo dinâmico são realizados em prensas universais de ensaio (neste estudo, uma *Universal Testing Machine-25*, UTM-25). No ensaio é aplicado um carregamento uniaxial compressivo na forma semi-senoidal sobre um CP cilíndrico, com altura de 150mm e diâmetro de 100mm em cinco temperaturas (-10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54°C) e seis frequências (25; 10; 5; 1; 0,5 e 0,1Hz). Três LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) com um

intervalo de 120° entre eles medem os deslocamentos axiais (DNIT-ME 416, 2019).

2.1.5 Uniaxial de Carga Repetida

O ensaio uniaxial de carga repetida tem o *Flow Number* (FN) como parâmetro para determinar a deformação permanente de um CP cilíndrico com dimensões de 150mm de altura e 100mm de diâmetro. É realizado de acordo com a norma DNIT-ME 184 (2018) em uma temperatura de 60°C. O ensaio é finalizado quando um dos seguintes três critérios de parada é atingido: (i) quando o FN é identificado por meio do número de ciclo correspondente à taxa de deformação mínima, (ii) o CP atinge o ciclo de número 7.200 ou (iii) quando o CP atinge sua deformação máxima de 2% para ensaios não confinados.

2.2 Ensaios nos Ligantes Asfálticos

O ensaio de Pen consiste na penetração em décimos de milímetro que uma agulha de massa padronizada em uma amostra de CAP com volume também padronizado, durante o intervalo de 5s, com temperatura de realização do ensaio de 25°C (DNIT-ME 155, 2010). No ensaio de PA uma bola de aço de dimensões e peso especificados é colocada no centro de uma amostra de asfalto confinada dentro de um anel metálico padronizado. O conjunto é colocado em um banho de água em béquer aquecido a uma taxa de 5°C/minuto. Quando o asfalto amolece o suficiente para não mais suportar o peso da bola, a bola e o asfalto deslocam-se em direção ao fundo do béquer. A temperatura é marcada no instante em que esse toca a placa do fundo do conjunto. O teste é conduzido com duas amostras do mesmo material, sendo que a diferença de temperatura entre essas amostras não deve exceder 2°C (DNIT-ME 131, 2010). As viscosidades nos ligantes puros e modificados antes e após RTFOT são determinadas conforme a ABNT NBR (12583, 2016) nas seguintes temperaturas: 135, 150 e 175°C a diferentes taxas de cisalhamento, utilizando-se o viscosímetro Brookfield modelo DVII+ acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL. Os ligantes modificados são submetidos a uma temperatura de até 190°C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Granulometrias

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas de 23 misturas asfálticas. Boa parte dessas se enquadra na Faixa C (DNIT 031, 2006). Apenas as misturas [77 e 76] apresentam granulometrias que se enquadram na Faixa B do DNIT. Algumas misturas são investigadas em mais de uma pesquisa, portanto apenas uma das misturas foi apresentada nesta pesquisa, como em [75 – 79], avaliadas simultaneamente por Bastos (2016) e Gouveia (2016).

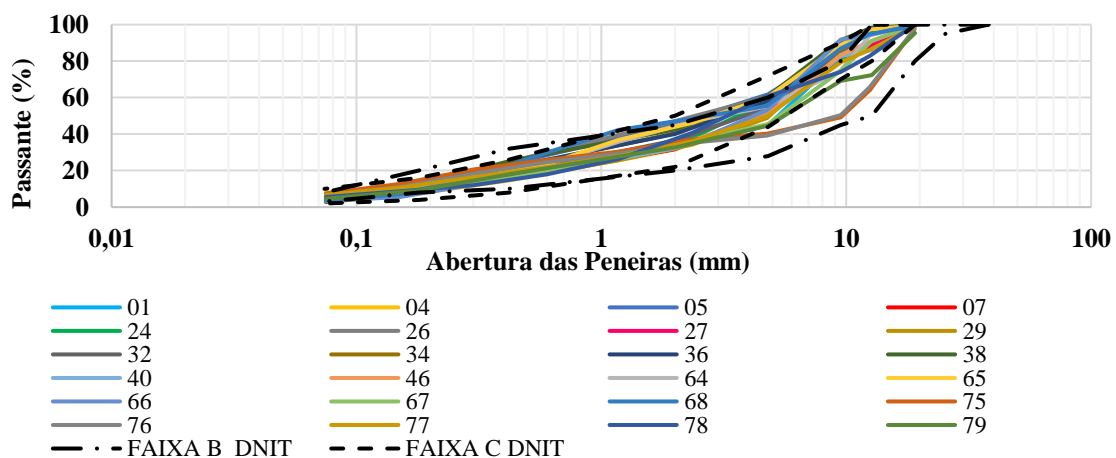


Figura 2: Curvas granulométricas

3.2 Ensaios nos Ligantes Asfálticos

As Figuras 3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios de Pen e PA para os ligantes puros e modificados, respectivamente, antes e após o RTFOT.

Como esperado, os ligantes envelhecidos a curto prazo apresentaram uma diminuição na penetração quando comparados com os ligantes virgens, correspondendo a um CAP mais viscoso e com maior rigidez. O ligante na mistura [16], modificado pelos polímeros PE+PPA, apresentou o menor valor de penetração, tanto virgem (25dmm) quanto envelhecido (20dmm).

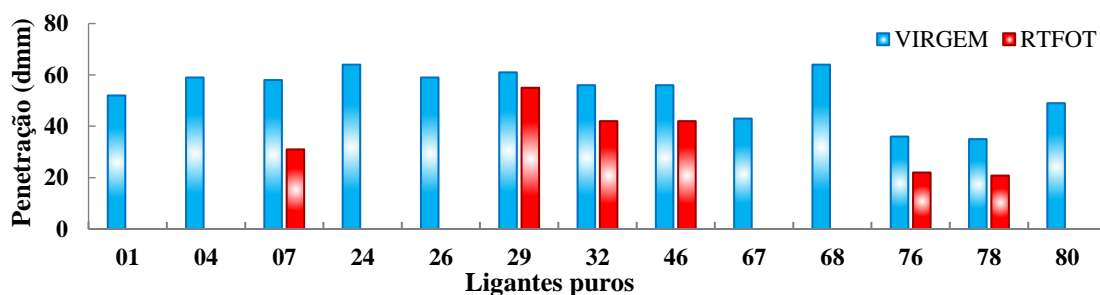


Figura 3: Penetração – ligantes puros

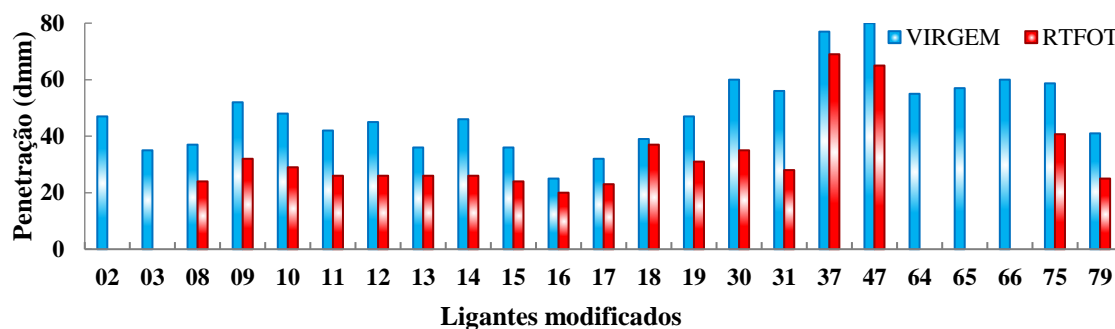


Figura 4: Penetração – ligantes modificados

Os ligantes que apresentaram maiores valores de penetração estão presentes nas misturas [37] e [47], sendo modificados por Gemul e LCC, respectivamente. Os ligantes nas misturas [30 e 31] que foram modificados por Cera CT4 e Gemul também apresentaram valores elevados de penetração, comparativamente aos demais ligantes. Com base em estudos anteriores, o Gemul é um aditivo surfactante e tem características de melhorar a trabalhabilidade do ligante. O LCC contribui para que o CAP se torne menos consistente, aumentando a penetração mesmo após o envelhecimento se comparado com o ligante puro. A Cera CT4 reduz a viscosidade do ligante durante a usinagem. Os ligantes modificados que também apresentaram valores elevados de penetração foram [64] com adição do polímero Polimul e [65, 66 e 75] com adição de aditivo melhorador de adesividade (DOPE). O ligante da mistura [66] tem a menor adição de DOPE na sua composição e apresentou o menor valor de penetração quando comparado com os demais ligantes modificados. A partir dos resultados dos ligantes dos 13 trabalhos analisados, como esperado, é possível observar, de forma geral, que ligantes modificados por polímeros têm penetrações menores que os ligantes puros, antes ou após o RTFOT.

Com base nos resultados de ligantes puros e modificados, percebe-se que os valores de PA aumentam após o envelhecimento. O ligante com maior PA, virgem ou após o RTFOT, é o

CAP 60-85, que compõe a mistura [79]. As Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, o comportamento quanto ao PA dos ligantes puros e modificados, antes e após RTFOT.

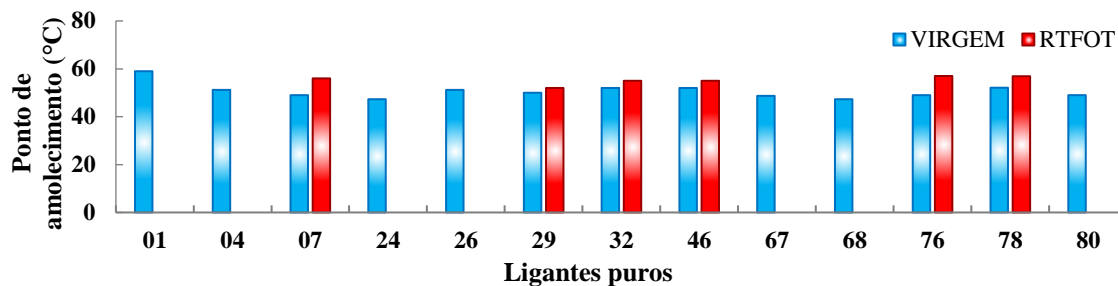


Figura 5: Ponto de amolecimento - ligantes puros

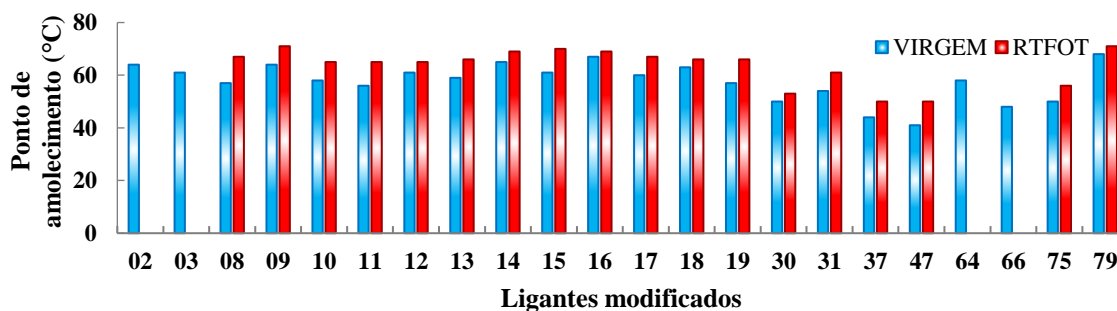


Figura 6: Ponto de amolecimento- ligantes modificados

Foram obtidos os parâmetros da viscosidade Brookfield em três temperaturas 135, 150 e 177°C. Apenas o ligante [79], com polímero, foi submetido à temperatura de 190°C. Como esperado há uma diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura. Dos ligantes presentes nas misturas [01, 78 e 29] que apresentaram viscosidade mais elevada, o ligante [77] se diferencia por ser um CAP 30/45 e apresentar menor penetração quando comparado aos demais ligantes. Sendo assim, o alto valor de viscosidade é esperado. Além disso, esse altos valores podem indicar uma melhor resistência do ligante à deformação permanente. Dos 10 ligantes puros (Figuras 7), é possível perceber 3 tendências, tendo em vista os valores aproximados mesmo sendo avaliado ao longo de uma década.

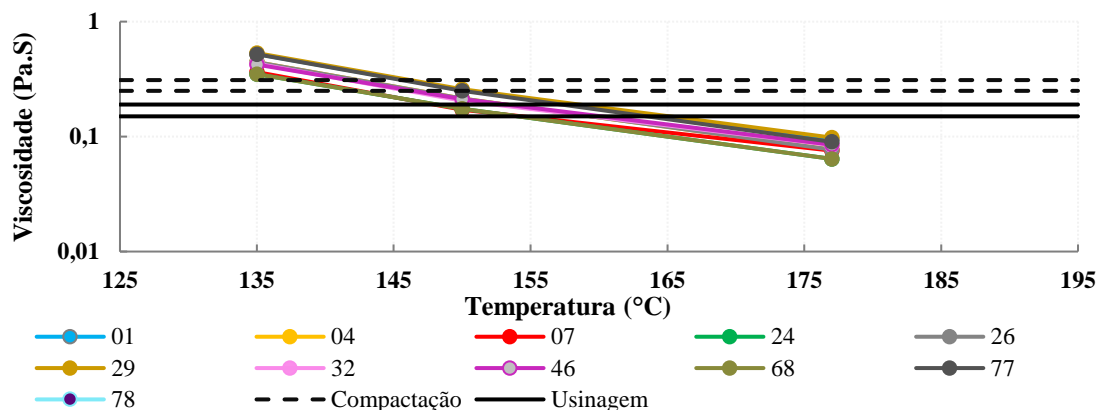


Figura 7: Viscosidade de ligantes puros

É possível observar na Figura 8 que os ligantes modificados [10] e [14] apresentam maiores viscosidades quando comparados aos outros ligantes modificados. Eles são modificados por PPA com adição de Borracha e EVA, respectivamente. Os ligantes [11] modificados por SBS

e [79] modificado por polímero elastomérico, também apresentaram viscosidade elevada em todas as temperaturas. Destaca-se que todos os ligantes que obtiveram valores altos de viscosidade são modificados por polímeros. Além de ser usada como propriedade de controle dos ligantes, a viscosidade também foi empregada na determinação das temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas apresentadas nos trabalhos analisados.

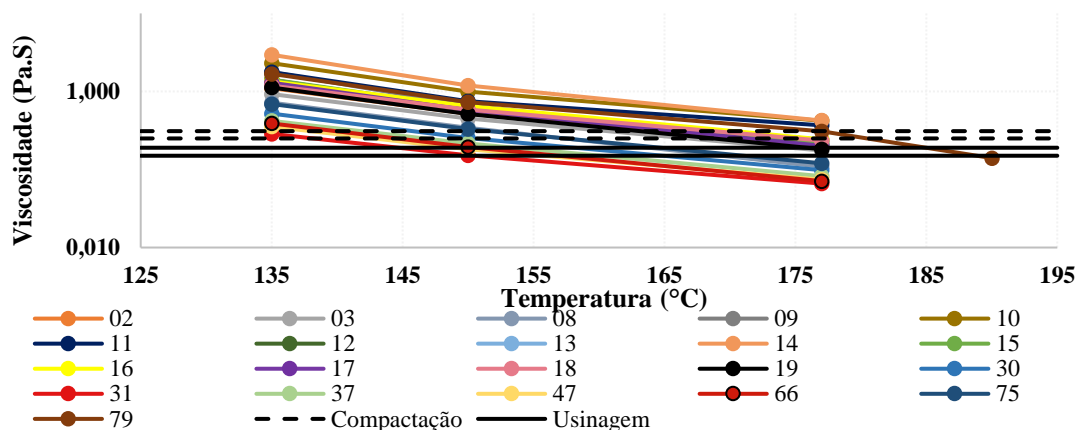


Figura 8: Viscosidade de ligantes modificados

3.3 ENSAIOS MECÂNICOS

3.3.1 Resistência à Tração (RT) e Módulo de Resiliência (MR)

Segundo os estudos analisados neste artigo, misturas com valores mais altos de RT apresentaram também maior rigidez (MR). O resultado está relacionado com a viscosidade do CAP, pois quanto mais viscoso o ligante, há uma tendência de a mistura tornar-se mais rígida.

Os resultados de RT e MR das misturas contendo ligantes com e sem adição de modificadores (Figuras 9 e 10) indicam que apenas uma mistura [84] não se enquadra no valor mínimo de resistência à tração de 0,65MPa (a 25°C), de acordo com a DNIT ES 031 (2006). Tendo em vista a proximidade do laboratório onde as pesquisas foram desenvolvidas com a refinaria Lubnor, o CAP 50/70 é o mais usado entre as misturas que utilizaram o parâmetro de MR para determinação da rigidez. Segundo Bernucci *et al.* (2010), os valores de MR de misturas investigadas no Brasil utilizando a Faixa C do DNIT apresentam um valor médio de cerca de 3000MPa. As misturas asfálticas produzidas com os ligantes puros deste artigo apresentam valores próximos de MR, porém algumas, como [14] e [15], apresentam valores bastante elevados (acima de 9000MPa), comparado com outras misturas. As misturas [14], [15], [19] e [36] apresentam maiores valores tanto de RT quanto de MR, pois nas três primeiras misturas há ligantes com polímero, porém a mistura [36] não tem ligante com polímero, mas em sua composição há 35% de material fresado. As menores rigidezes são observadas na mistura [37] e [47] modificadas respectivamente por Gemul e LCC.

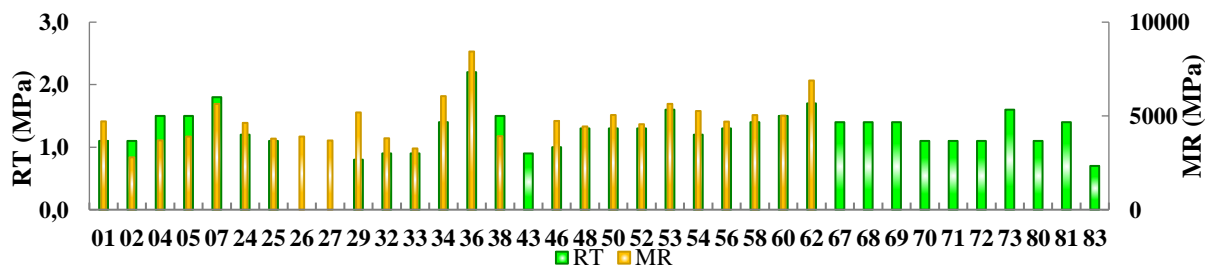


Figura 9: RT e MR de misturas com ligante puro

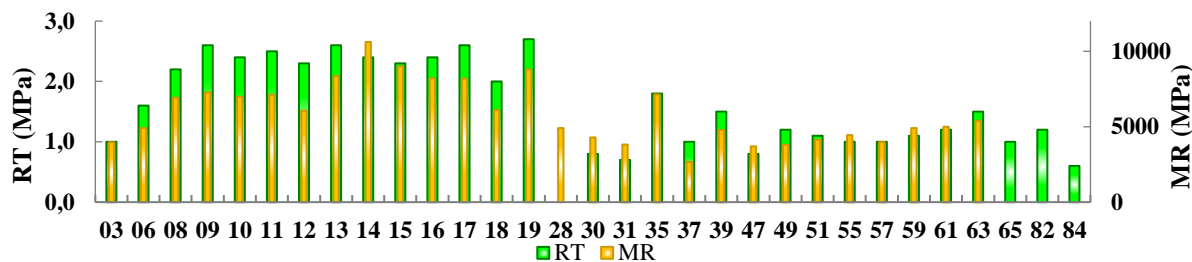


Figura 10: RT e MR de misturas com ligante modificado

3.3.2 Módulo Dinâmico

Percebe-se na Figura 11 que as misturas com ligante puro apresentaram resultados similares a altas frequências e as misturas com ligantes modificados apresentam valores mais dispersos a baixas frequências (Figura 12). Misturas com maior rigidez em médias e altas temperaturas tendem a apresentar uma melhor resistência à deformação permanente, como as misturas [07, 77, 78, 19, 14 e 17] que apresentaram rigidezes superiores às demais.

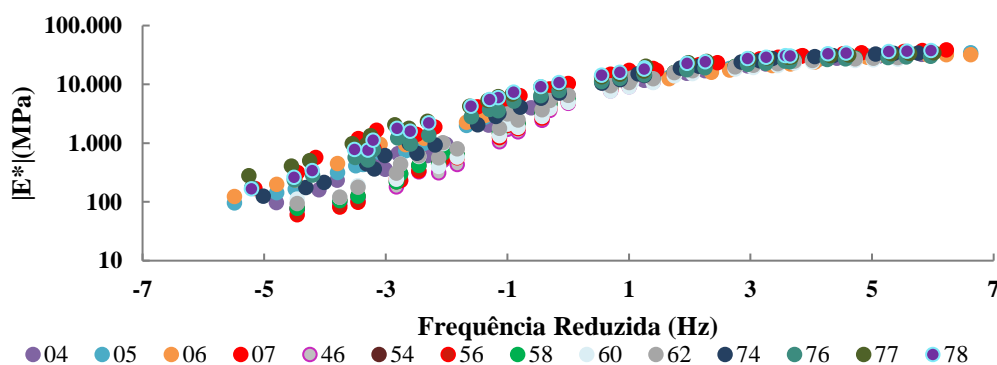


Figura 11: Curvas mestras de misturas com ligante puro

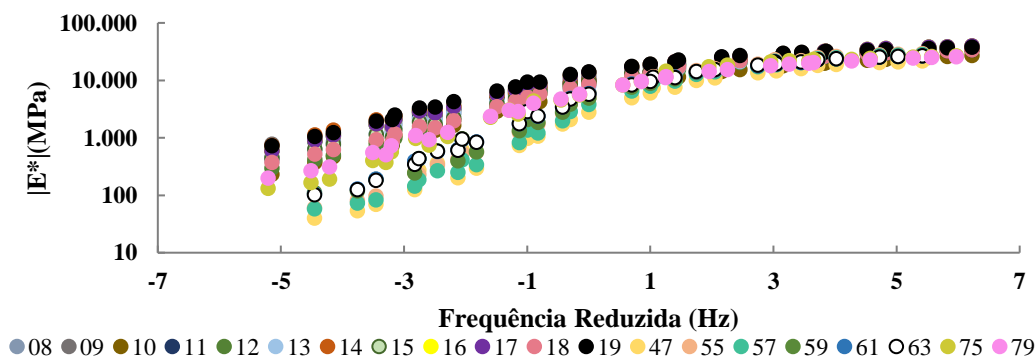


Figura 12: Curvas mestras de misturas com ligante modificadas

3.3.3 Vida de Fadiga por Compressão Diametral

As misturas contendo CAP com adição de LCC apresentaram vida de fadiga inferior quando comparadas às misturas com CAP Puro. As Figuras 13 e 14 apresentam as curvas de fadiga das misturas com ligantes puros e modificados, respectivamente. Na Tabela 2 é possível observar as equações e os R^2 das curvas de fadiga. Esses dados juntamente com os dados de rigidez apresentados anteriormente tornam possível a análise do comportamento das misturas e conseqüentemente a realização do dimensionamento de pavimentos pelo MeDiNa.

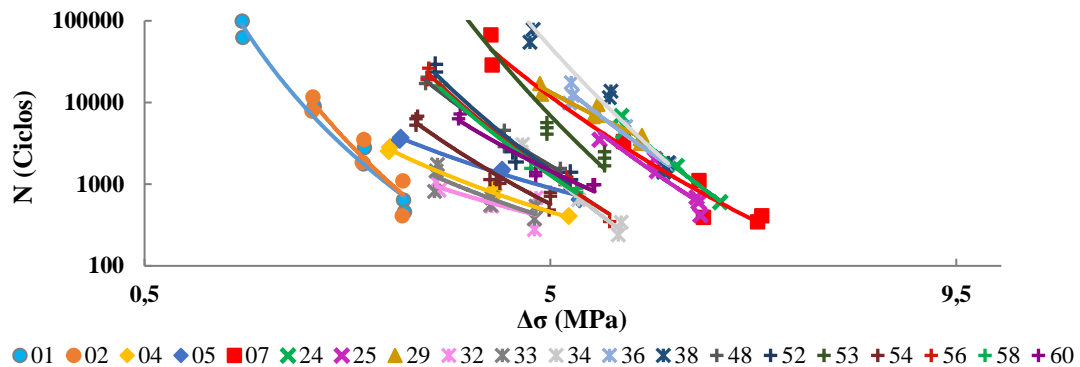


Figura 13: Curvas de vida de fadiga das misturas com ligante puro

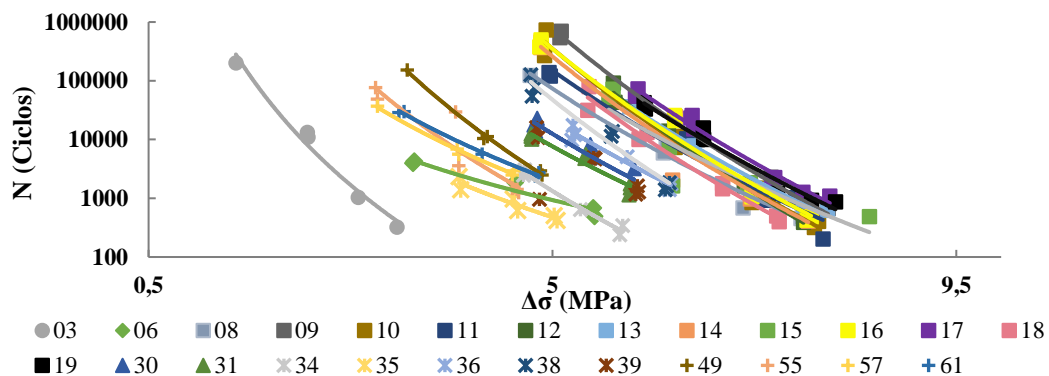


Figura 14: Curvas de vida de fadiga das misturas com ligante modificado

É possível observar que as misturas que atingiram um maior número de ciclos contêm ligantes com polímeros como PPA+Borracha e SBS, fresado e/ou ligante envelhecido, ou seja, misturas com uma maior rigidez. Segundo Oliveira (2014), misturas que apresentam valores elevados de MR ou RT, apresentam também maior número de ciclos no ensaio de fadiga por compressão diametral. Destaca-se que a adoção dos ensaios de MR e de CD não incorporam parâmetros viscoelásticos nas análises. O leitor é referido a Babadopulos *et al.* (2015) para uma discussão sobre como o ensaio de fadiga CD apresenta efeitos de danificação por fluência excessiva, não proporcionados apenas por fadiga.

3.3.4 Uniaxial de Carga Repetida

Segundo os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida, as misturas que ultrapassaram os 7200 ciclos sem apresentar rompimento ou deformação excessiva são mais resistentes à deformação permanente. Conforme Bastos (2016), as misturas com valores elevados de FN indicam que se adequam a um tráfego extremamente pesado ($> 3 \times 10^7$). A maioria das misturas de Onofre (2012) apresenta valores acima de 7200 ciclos [08 – 19], sendo que a maioria conta com aditivos modificadores em sua composição, excetuando-se as misturas [07 e 20]. A mistura [64], contendo ligante modificado por Polimul S-74, apresentou também mais de 7200 ciclos. Observa-se que isso só ocorrerá nas misturas com ligantes contendo polímeros (Figura 16). Trabalhos com misturas com CAP puro apresentaram reduzido FN (Figura 15). As misturas da Figura 15 com elevado FN apresentam peculiaridades, como a mistura [07], composta por um CAP 50/70 e agregado basáltico, as misturas [38 e 36] com adição respectivamente de 50 e 35% de fresado, e a mistura [78] com CAP 30/45. As misturas com valores baixos de FN (Figura 16) apresentaram na sua composição ligantes modificados por Gemul, Cera CT4, LCC e DOPE. Esses materiais apresentaram uma alta penetração e

uma viscosidade baixa, levando a misturas com uma baixa resistência à deformação permanente. A maioria das misturas com ligantes puros não atingiram 300 ciclos.

Tabela 2: Equações de fadiga e R²

| Mistura | Equação | R ² | Mistura | Equação | R ² |
|---------|---------------------|----------------|---------|--------------------|----------------|
| 01 | y= 43170x-1,5728 | 0,98 | 30 | y = 7.616x-4,041 | 0,94 |
| 02 | y=38987x-5,723 | 0,70 | 31 | y = 11.984x-4,403 | 0,92 |
| 03 | y=52754x-6,823 | 0,95 | 32 | y= 330,03x-1,745 | 0,66 |
| 04 | y = 18.061,08x-3,49 | 0,95 | 33 | y= 321x-2,119 | 0,82 |
| 05 | y= 27.746,35x-3,40 | 1,00 | 34 | y= 1225,7x-4,523 | 0,98 |
| 06 | y = 43.579,94x-3,68 | 0,96 | 35 | y= 455,49x-2,366 | 0,83 |
| 07 | y = 13727x-3,578 | 0,96 | 36 | y= 20717x-4,082 | 0,96 |
| 08 | y = 71588x-4,079 | 0,98 | 37 | y= 3429,5x-3,388 | 0,89 |
| 09 | y = 612821x-5,123 | 0,98 | 38 | y= 43358x-5,6567 | 0,97 |
| 10 | y = 313044x-5,176 | 0,98 | 39 | y= 8097,4x-4,317 | 0,95 |
| 11 | y = 140914x-4,464 | 0,97 | 48 | y = 1.795,4x-3,688 | 0,98 |
| 12 | y = 242223x-4,995 | 0,98 | 49 | y = 794,09x-4,198 | 0,98 |
| 13 | y = 164830x-4,232 | 0,99 | 52 | y = 1.345,1x-4,437 | 0,94 |
| 14 | y = 332331x-5,114 | 0,98 | 53 | y= 5.910,5x-6,444 | 0,96 |
| 15 | y=113.891x-3,744 | 0,92 | 54 | y= 502,83x-3,357 | 0,95 |
| 16 | y=332.331x-5,114 | 0,98 | 55 | y= 267,52x-3,891 | 0,92 |
| 17 | y=418.185x-4,538 | 0,97 | 56 | y = 1.314,7x-4,348 | 0,99 |
| 18 | y=109.820x-4,799 | 0,98 | 57 | y = 629,63x-2,761 | 0,98 |
| 19 | y=261.929x-4,256 | 0,96 | 58 | y = 1.180,3x-4,367 | 0,98 |
| 24 | y= 24.969x-4,09 | 0,89 | 60 | y = 1.426,7x-2,895 | 0,92 |
| 25 | y= 8.438x-3,58 | 0,94 | 61 | y = 810,1x-2636 | 0,98 |
| 29 | y = 12.573x-2,738 | 0,94 | | | |

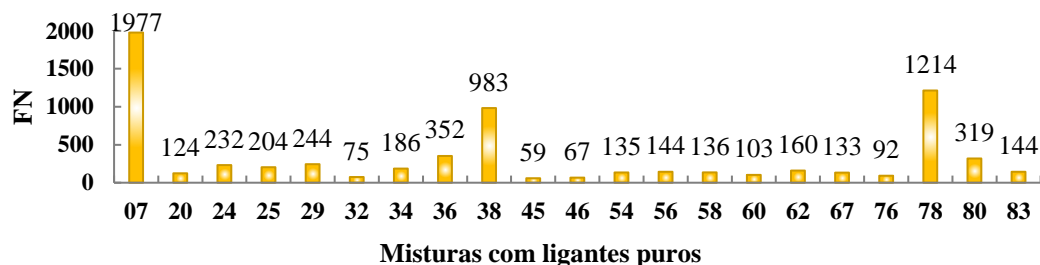


Figura 15: Flow Number - ligante puro

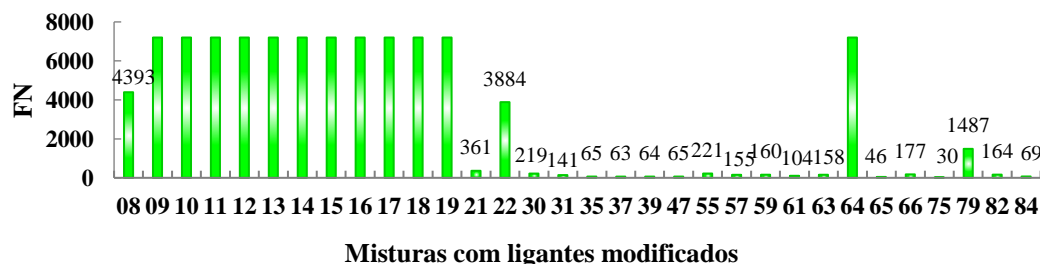


Figura 16: Flow Number - ligante modificado

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo buscou organizar um banco de dados de misturas asfálticas avaliadas no Ceará, caracterizando-as quanto aos parâmetros que podem ser utilizados como dados de entrada em análises computacionais para métodos de dimensionamento mecânico-empíricos,

permitindo, por exemplo, a previsão da evolução do trincamento por fadiga. Os resultados dos dados analisados mostram que a maioria das misturas estudadas se enquadra na Faixa C do DNIT e apresenta na sua composição o CAP 50/70. Misturas contendo ligantes com adição de polímero apresentam maior rigidez e resistência à deformação permanente, quando comparadas a misturas com ligantes não modificados. Misturas com altos valores de RT e MR tendem a ser misturas com ligantes modificados por polímeros; ou com material fresado na sua composição e/ou misturas envelhecidas. Essas misturas têm a tendência de obter uma curva de fadiga por compressão diametral com maior número de ciclos, muito embora tal resultado não seja observado em ensaios de fadiga mais modernos, sem a excessiva fluência gerada no ensaio por compressão diametral. Resultados elevados de FN de misturas com CAP puro são exceções, como por exemplo, as misturas com a adição de material fresado e ainda com CAP 30/45. Em geral, essas misturas não atingem 300 ciclos. Vale salientar que apenas misturas contendo ligantes modificados obtiveram valores superiores aos 7.200 ciclos no ensaio uniaxial de carga repetida.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Funcap pelo apoio no âmbito do Programa Cientista Chefe, à ANP pela bolsa do terceiro autor, ao CNPq pela bolsa PQ do quarto autor, à Rede de Tecnologia em Asfalto da Petrobras pelo apoio ao grupo de pesquisa da Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12583. Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional, 2016.
- Babadopulos, L. F. A. L.; Soares, J. B.; Castelo Branco, V. T. F. Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics. *Revista Transportes* v. 23, n2, p. 85-94.
- Bastos, J. B. S. Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico. 2016. Tese – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, 2010.
- Bessa, I. S. Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas. 2012. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- Borges, R. L. Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do Shift Model viscoplastico e ensaios triaxiais de carga repetida. 2014. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- Carneiro, F. L. Um novo método para determinação da resistência à tração dos concretos. Comunicação. In: Reunión Associação Brasileira de Normas Técnicas, 5, 1943, Rio de Janeiro. Anais [...]. Instituto Nacional de Tecnologia, 1943.
- Choi, Y. T.; Subramanian, V. A.; Guddati, M. N. E Kim, Y. R. (2012). Incremental model for the prediction of permanent deformation of asphalt concrete in compression. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2296, p 24-35. DOI: 10.3141/2296-03.
- Coutinho, R. P. Utilização da parte fina de misturas asfálticas para avaliação do dano por fadiga. 2012. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- Daniel, J. S.; Kim, Y. R.; Lee, H. J. Effects of aging on viscoelastic properties of asphalt aggregate mixtures. *Transportation Research Record*, n. 1630, p. 21-7, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER ME 083: Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT ES 031: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico. Rio de Janeiro, RJ, 2006.
- DNIT-ME 131: Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- DNIT-ME 135/2018: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- DNIT-ME 136/2018: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão. Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- DNIT-ME 155/2010: Material asfáltico – Determinação da penetração. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

- DNIT-ME 183/2018: Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- DNIT-ME 184/2018: Pavimentação – Misturas asfálticas – Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- DNIT-ME 416/2019: Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico. Rio de Janeiro, RJ, 2019.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes (DNIT) – Guia para Utilização do Método Mecânico-Empírico de Dimensionamento (versão provisória) Projeto TED nº682/2014, Processo nº 50607.002043/2013-00, 2018.
- Fritzen, M. A. Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão de dano por fadiga em pavimentos asfálticos. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Programa de engenharia civil da COPPE/URFJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- Gouveia, B. C. S. Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias brasileiras. 2016. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- Hveem, F. N. Pavement deflection and fatigue failures. Highway Research Board Bulletin. v. 114, p 43-87, 1955.
- Lucas Júnior, J. L. O. Influência da adesividade agregado-ligante no trincamento por fadiga de misturas asfálticas. 2018. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- Oliveira, J. A. Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo. 2013. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- Oliveira, A. H. Avaliação do potencial antioxidante do líquido da castanha de caju (LCC) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento. 2015. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- 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. 2012. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- Papazian, H. S. The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete. In: International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, 1962, Ann Arbor. Proceedings [...]. Ann Arbor: Transportation Research Board, 1962. v. 203, n. 1, p. 385-394.
- Ponte, R. S. Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do módulo de resiliência de misturas asfálticas. 2013. Monografia - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- Rodrigues, F. B. Efeito do líquido da Castanha do Caju (LCC) nas propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por SBS. 2010. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, 2010.
- Santiago, L. S. Contribuições para o desenvolvimento de um método mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. 2017. Tese - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- Santos, A.B.V. (2020) Contribuições para um método mecânico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos: influência da temperatura e da velocidade de tráfego na previsão de área trincada. Dissertação – Universidade Federal do Ceará, 2020.
- Xavier, M. F. Avaliação do uso de cinzas de carvão mineral como melhorador de adesividade em misturas asfálticas. 2016. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- Wargha Filho, N. Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas. 2013. Dissertação - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- Witzak, M. W.; Kaloush, K.; Pellinen, T.; El-Basyouny, M; Von Quintus, H. NCHRP Report 465: Simple performance test for superpave mix design. Transportation Research Board. Washington, DC, 2002.

Beatriz Ferreira da Fonseca (beatriz98ffonseca@gmail.com)

Juceline Batista dos Santos Bastos (jucelinebatista@hotmail.com)

Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior (j.lucas.j@det.ufc.br)

Jorge Barbosa Soares (jsoares@det.ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará
Bloco 703 – Fortaleza, CE, Brasil