

Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo

Juceline Batista dos Santos Bastos¹, Jorge Barbosa Soares², Luís Alberto Herrmann do Nascimento³

¹Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, jucelinebatista@hotmail.com

²Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, jsoares@det.ufc.br

³Cenpes/Petrobras, Brasil, luisnascimento@petrobras.com.br

Recebido:

30 de novembro de 2016

Aceito para publicação:

13 de maio de 2017

Publicado:

31 de agosto de 2017

Editor de área:

Francisco Thiago Aragão, UFRJ

Palavras-chaves:

Deformação permanente.
Trechos monitorados.
Uniaxial de carga repetida.

Keywords:

Rutting.
Test sections.
Repeated uniaxial load.

DOI:10.14295/transportes.v25i2.1284

RESUMO

A busca por critérios que auxiliem na seleção de misturas asfálticas em laboratório que resistam à deformação permanente em campo motivou o desenvolvimento desta pesquisa. A partir dessa motivação, o objetivo foi avaliar a relação entre os dados experimentais disponíveis no Brasil de deformação permanente em laboratório (uniaxial de carga repetida) com aqueles encontrados em campo [Afundamento em Trilha de Roda (ATR)], com vistas ao refinamento de critérios para os resultados do ensaio laboratorial em função do tráfego. A partir da organização do banco de dados de 12 trechos experimentais monitorados, utilizou-se o método estatístico dos *clusters* para indicar 4 categorias de *Flow Number* (FN). Considerou-se que FNs inferiores a 100 resistem apenas a um tráfego leve; FNs acima de 100 são indicados para um tráfego médio; superior a 300 para um tráfego pesado; e acima de 1000 para um tráfego extremamente pesado. Destaca-se ainda a relevância da continuidade do monitoramento de pistas experimentais no Brasil. Desta forma, as informações possibilitarão a verificação contínua e o refinamento dos critérios propostos nesta pesquisa.

ABSTRACT

The selection of asphalt mixtures that resist to permanent deformation in the field has encouraged the development of the present research. The main goal is to evaluate the relationship between asphalt mixtures' rutting resistance obtained in the laboratory (uniaxial repeated load test) with field observations (rutting), seeking the refinement of criteria for the laboratory test results as a function of field traffic. A database of 12 monitored test sections in Brazil was organized and the cluster statistical method was used to indicate 4 Flow Number (FN) categories. It was considered that FNs under 100 resists only light traffic; FNs above 100 are indicated for medium traffic; more than 300 for heavy traffic; and above 1,000 for extremely heavy traffic. It is highlighted the importance of monitoring test sections in Brazil, which will lead to a continuous verification and refinement of the criteria proposed in this research.



1. INTRODUÇÃO

Para a caracterização em laboratório da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, foi desenvolvida a norma brasileira ABNT NBR 16505 (2016) "Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida", elaborada pelo Organismo de Normalização Setorial de Petróleo (ABNT/ONS-034). Essa norma descreve o ensaio mais comumente realizado no país como indicativo da resistência a deformação permanente de misturas asfálticas, que é o uniaxial de carga repetida (Nascimento, 2008; Onofre, 2012; Oliveira, 2014; Borges, 2014; Pazos, 2015; Bastos *et al.*, 2015; Barros *et al.*, 2015). O ensaio tem como resultado a determinação do chamado *Flow Number*

(*FN*). Apesar da normatização, a ausência de informações sobre a correspondência do referido parâmetro de misturas em laboratório com a deformação permanente das mesmas em campo instiga a comunidade técnico-científica a refinar critérios de aceitação de misturas asfálticas para esta falha específica quando submetidas a diferentes níveis de tráfego.

Diante do exposto, a presente pesquisa visa avaliar a relação dos dados experimentais hoje disponíveis no Brasil de deformação permanente em laboratório (uniaxial de carga repetida) com aqueles encontrados em campo [Afundamento em Trilha de Roda (ATR)], com vistas ao refinamento de critérios para os resultados do ensaio em função do tráfego.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Deformação Permanente em Misturas Asfálticas

A deformação permanente em misturas asfálticas pode ser causada por densificação e/ou movimento lateral (deformação por cisalhamento) desse material sob a ação do tráfego. As Figuras 1a e 1b exemplificam essas deformações. Na densificação, observa-se a diminuição do volume e, portanto, o aumento da densidade. Já na deformação por cisalhamento, observam-se mudanças de forma na camada asfáltica sem alteração volumétrica considerável (Brown *et al.*, 2001).

Para a avaliação da deformação permanente de misturas asfálticas em laboratório, a amostra é submetida a um carregamento cíclico de compressão e a deformação permanente acumulada (ϵ_p) é obtida em função do número de ciclos. Tanto no Brasil, quanto internacionalmente, o ciclo consiste de um pulso semi-senoidal (*haversine*) de 0,1s seguido por um repouso de 0,9s (Figura 2), a uma temperatura especificada (60°C) (Witczak *et al.*, 2002).

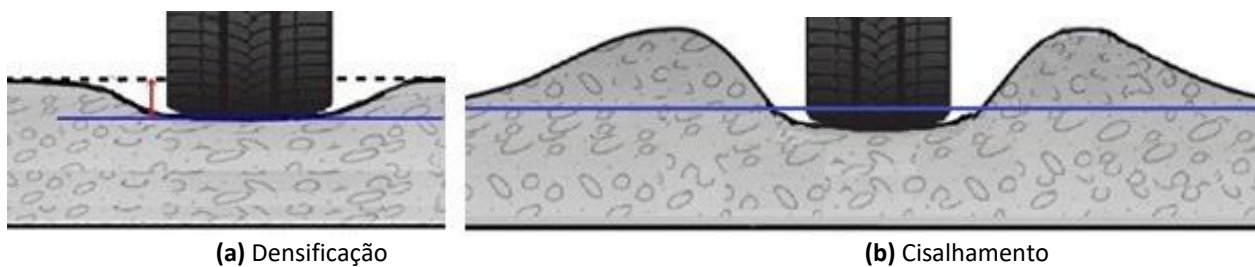


Figura 1. Deformação permanente em pavimentos asfálticos (Ferreira, 2015)

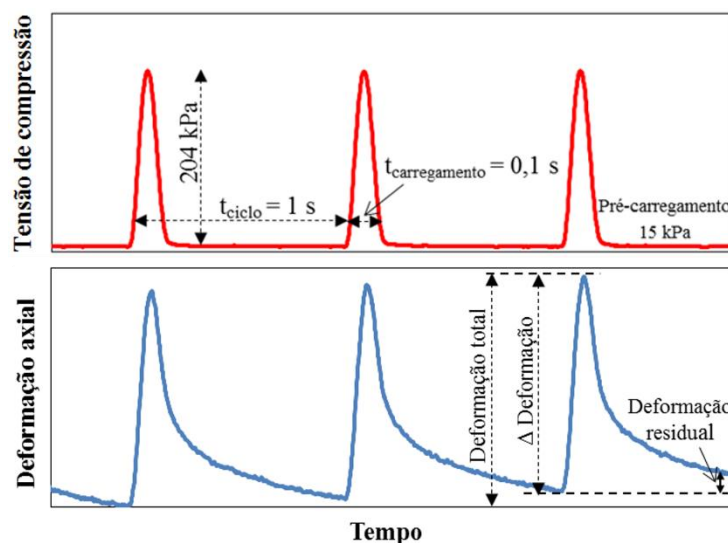


Figura 2. Ciclo de carga do ensaio uniaxial de carga repetida (Adaptada de Bernucci *et al.*, 2010)

A deformação permanente acumulada pode ser dividida em 3 regiões: primária, secundária e terciária. Essas regiões se comportam da seguinte forma: (i) na região primária, a densificação da amostra ocorre a uma taxa elevada, (ii) na região secundária, a taxa de deformação é praticamente constante e (iii) na região terciária, a amostra rompe. O número de ciclos onde começa a região terciária (cisalhamento com volume constante) é designado pelo já referido *Flow Number*. O *FN* é o número do ciclo em que a taxa de deformação plástica é mínima e a partir do qual o Corpo de Prova (CP) atinge a ruptura (Figura 3). O ensaio é finalizado geralmente quando um dos três critérios de parada é atingido, sendo eles: (i) quando o *FN* é identificado, (ii) quando o ciclo de número 7.200 é atingido ou (iii) quando a mistura atinge 5% de deformação para ensaios confinados e 2% de deformação para ensaios não confinados (Dongre *et al.*, 2009).

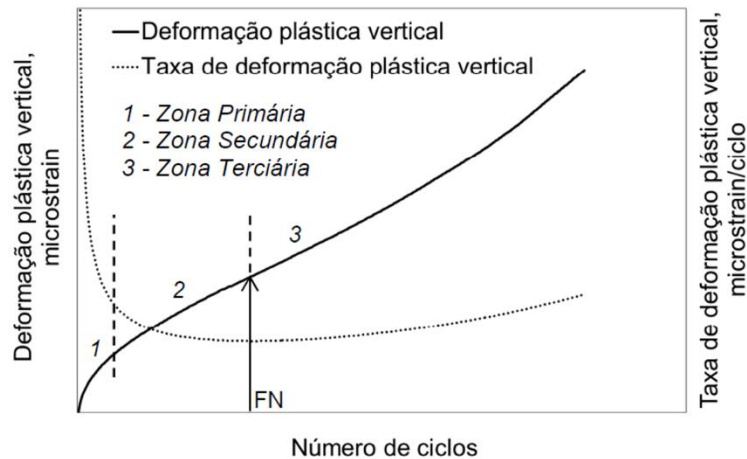


Figura 3. Regiões da curva de deformação plástica e obtenção do *FN* (ABNT 16505, 2016)

Para a determinação da deformação permanente específica, é proposto na literatura o modelo de Francken (Equação 1), que combina modelos de potência e exponencial. Este modelo é aplicável a misturas asfálticas com ligante não modificado ou modificado, ajustando-se bem às curvas de deformação permanente das misturas que atingiram ou não a zona terciária (Biligiri *et al.*, 2007; Dongre *et al.*, 2009; Von Quintus *et al.*, 2012).

$$\varepsilon_p = A \times N^B + C \times (e^{D \times N} - 1) \quad (1)$$

$$\frac{d\varepsilon_p}{dN} = A \times B \times N^{(B-1)} + C \times D \times (e^{D \times N}) \quad (2)$$

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dN^2} = A \times B \times (B-1) \times N^{(B-2)} + C \times D^2 \times (e^{D \times N}) \quad (3)$$

Onde, ε_p : deformação específica permanente; A, B, C e D : coeficientes determinados para cada CP; e N : número de ciclos.

Após a determinação dos coeficientes da Equação 1, é possível plotar a primeira e a segunda derivadas da curva de deformação plástica a partir das Equações 2 e 3, respectivamente. A Equação 2 corresponde à taxa de deformação plástica, cujo ponto de mínimo ao longo do número de ciclos (N) corresponde ao *FN* no ensaio uniaxial de carga repetida, conforme apresentado na Figura 3. Na segunda derivada (Equação 3) o *FN* corresponde ao ponto de inflexão, ciclo no qual o valor inverte de sinal (de negativo para positivo).

No modelo de Francken, os parâmetros *A* e *B* estão relacionados à zona primária e à zona secundária da curva de deformação permanente. Já os parâmetros *C* e *D* comandam o ajuste do modelo na zona terciária.

Além do ensaio uniaxial de carga repetida, há o ensaio triaxial de varredura de tensões (*Triaxial Stress Sweep – TSS*) (Choi, 2013), que não é tratado no presente artigo. Trata-se de um protocolo de ensaio sob condições de confinamento, a fim de melhor se aproximar das condições encontradas em campo, além de considerar diferentes níveis de tensão, tempos de aplicação de carga e repouso e temperaturas. Essa metodologia já foi validada nacionalmente (Bastos *et al.*, 2016), mas requer ainda a continuidade da pesquisa com vistas a realizar o maior número possível de ensaios em misturas locais. Além de considerar o confinamento, o ensaio *TSS* possibilita o uso do *Shift Model*, derivado do modelo incremental viscoplástico (Choi *et al.*, 2012; Subramanian *et al.*, 2013), que analisa o comportamento de misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente. A associação do *Shift Model* ao programa *LVECD* (*Layered Viscoelastic Continuum Damage*) (Eslaminia *et al.*, 2012; Choi e Kim, 2014) permite a previsão de desempenho de pavimentos asfálticos quanto à essa falha.

2.2. Histórico da Avaliação da Deformação Permanente de Misturas Asfálticas no Brasil

Nascimento (2008) reportou a investigação de misturas asfálticas nacionais por meio do ensaio uniaxial de carga repetida conforme proposta de Witczak *et al.* (2002). No entanto, esse ensaio vem sendo realizado por diversos grupos de pesquisa nacionais desde 1996 (Motta *et al.*, 1996), mas com configurações diferentes (número de ciclos, tensão axial e dimensões do CP) das que estão sendo utilizadas atualmente (proposta por Witczak *et al.*, 2002), além da utilização de diferentes equipamentos, e.g., prensa pneumática ou hidráulica e metodologias de dosagem (Marshall ou *Superpave*).

Motta *et al.* (1996), Santanna-Greco (2004), Wesseling (2005) e Cezaro Junior (2008) utilizaram prensas pneumáticas (geralmente utilizadas para o ensaio de módulo de resiliência de misturas) associadas a sistemas de aquisição de dados, em que uma célula de carga e dois transdutores do tipo *LVDT* (*Linear Variable Displacement Transducer*) são ligados a um computador. Nessas pesquisas, verifica-se concordância quanto ao tempo de carregamento (0,1s) e de repouso (0,9s) (Tabela 1), similar ao proposto por Witczak *et al.* (2002).

Tabela 1: Pesquisas no Brasil que realizaram ensaios com configurações diferentes da proposta de Witczak *et al.* (2002)

Pesquisador (es)	Local	Tensão axial (kPa)	Temp. (°C)	Dimensão do CP (mm)	Prensa	Dosagem
Motta <i>et al.</i> (1996)	Rio de Janeiro	100	25 a 45	-		
Santanna-Greco (2004)	São Carlos	400	40	-		
Wesseling (2005) e Cezaro Junior (2008)	Porto Alegre	100, 400 e 700	45	d=101,6 e h=63,5	Pneumática	Marshall
Santos (2007)	Brasília	200	27	-		
D'Antona e Frota (2011)	Manaus	100	40	d=101,5 e h=63 a 70	Hidráulica	
Soares (2014)	São Carlos	400	40 e 50	-	-	<i>Superpave</i>

Santos (2007) e D'Antona e Frota (2011) utilizaram o ensaio uniaxial de carga repetida objetivando ranquear diferentes misturas asfálticas, porém, diferente dos estudos mencionados no parágrafo anterior, fazendo uso de prensa hidráulica. Já Soares (2014) investigou 8 misturas asfálticas com a mesma granulometria (Faixa C) e tipo de agregado mineral (granito), porém variando-se o ligante (50/70 e 50/70+SBS), o Volume de vazios (*V_v*) (4% e 7%) e a adição de cal por meio de ensaios uniaxiais estático e dinâmico. Para os resultados dos ensaios estáticos e dinâmicos, notou-se que as misturas com *V_v* de 4% e com ligante modificado apresentam menor suscetibilidade à deformação permanente, o que era esperado. As vantagens do asfalto modificado foram observadas somente nos ensaios de carga repetida. Esse resultado também era esperado, tendo em vista a configuração carga-descarga, cujos intervalos

permitem evidenciar o comportamento da mistura quanto à recuperação da deformação elástica. Ademais, Witczak *et al.* (2002), após a avaliação de 09 ensaios, validaram o ensaio uniaxial de carga repetida a partir do desempenho de 16 pistas experimentais.

Além disso, essas pesquisas mostram que o ensaio uniaxial de carga repetida, tanto utilizando prensa pneumática quanto hidráulica, é indicado para ranquear as misturas asfálticas com relação à resistência à deformação permanente. No entanto, até o momento, não foram desenvolvidas, no Brasil, pesquisas comparando os resultados de prensas pneumáticas e hidráulicas para verificar se há variação nos resultados de *FN* obtidos em laboratório.

Onofre (2012) utilizou a proposta de Witczak *et al.* (2002) e analisou 17 misturas asfálticas, contendo o mesmo tipo de agregado e diferentes tipos de ligantes asfálticos e misturas com o mesmo ligante e diferentes tipos de agregados, por meio do ensaio uniaxial de carga repetida. A referida pesquisa mostrou que a resistência à deformação permanente de uma mistura asfáltica é consideravelmente mais influenciada pelo agregado do que pelo ligante asfáltico utilizado, porém não foi estudada a influência da granulometria nem do percentual de ligante (nesse estudo as misturas foram dosadas pelo método *Superpave* para 4% de Vv).

Borges (2014) comparou os resultados dos ensaios *Triaxial Repeated Load Permanent Deformation (TRLPD)*, ensaio triaxial de deformação permanente com carga repetida) e uniaxial de carga repetida e verificou que ambos apresentaram o mesmo ranque. O ensaio *TRLPD* apresentou menores *FNs* e maiores valores de deformação quando comparado ao ensaio uniaxial, dado que as condições do primeiro ensaio são mais severas, ou seja, consideram maiores valores de σ_d .

Bastos *et al.* (2015) avaliaram o desempenho em campo de 2 trechos monitorados e compararam o nível de tráfego *versus* ATR em campo com o nível de tráfego apontado por Nascimento (2008) com base no *FN*. Sugeriu-se na referida pesquisa a criação de critérios para o tráfego leve ($<3 \times 10^6$) e extremamente pesado ($>3 \times 10^7$), viabilizando nacionalmente a utilização dessas misturas para esse tipo de tráfego, análogo ao proposto por Bonaquist (2012). Outras pesquisas adotaram essa metodologia para selecionar ligantes (Oliveira, 2014; Barros *et al.*, 2015) quanto à resistência à deformação permanente, bem como agregados quanto à forma (Bessa, 2012; Pazos, 2015) ou quanto à granulometria (Ferreira *et al.*, 2016).

2.3. Critérios de *FN* para diferentes níveis de tráfego

Willis *et al.* (2010) compararam os resultados de 16 misturas asfálticas avaliadas em laboratório, utilizando o modelo de Francken, com resultados dessas misturas em campo, submetidas aos ensaios acelerados nas pistas *NCAT (National Center for Asphalt Technology)*. Essa comparação indicou que o *FN* apresenta correlações com as médias dos afundamentos em trilha de roda associados aos 5 e 10 milhões de *ESALs (Equivalent Single Axle Loads, i.e., número de passagens do eixo padrão)*. Além disso, foi encontrada correlação entre a taxa de deformação (mm/milhões *ESALs*) e o *FN*. Assim, essa correlação pode ser usada para determinar os critérios de *FN* no dimensionamento quando se consideram níveis de tráfego diversos.

Alguns autores recomendam critérios de *FN* para misturas asfálticas considerando diferentes níveis de tráfego. Em *NCHRP, Report 673 [Advanced Asphalt Technologies (AAT), 2011]*, critérios foram desenvolvidos com base na avaliação de 6 pistas da *FHWA (Federal Highway Administration)* e de 27 misturas em laboratório, sendo então incluídos no manual de misturas asfálticas a quente desenvolvido no referido projeto. Bonaquist (2012) considerou tais critérios excessivamente conservadores, tendo em vista o desempenho dessas misturas em campo. O autor atribuiu a provável discrepância à utilização do algoritmo de diferenças finitas para obtenção do *FN*. Assim, Bonaquist (2012) optou por utilizar o modelo de Francken ao propor critérios de *FN* para misturas utilizadas em cruzamentos viários, tendo em vista que nessa situação os pavimentos são submetidos a baixas velocidades, portanto, mais suscetíveis à deformação permanente. Nascimento (2008) recomendou, a partir da investigação laboratorial de 9 misturas asfálticas compostas de diferentes agregados minerais, granulometrias e ligantes, critérios de *FN* concomitantemente com critérios de *Compaction Densification Index (CDI)* e *Traffic Densification Index*

(TDI) de misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras. A Tabela 2 apresenta os critérios de *FN* sugeridos nas pesquisas mencionadas.

Tabela 2: Critérios de *FN* para diferentes níveis de tráfego da literatura

Pesquisas / Níveis de Tráfego (número N)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
				3×10^6	$[3 \times 10^6; 1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7; 3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
Nascimento (2008)	6,5 a 7,5	60,0	204	-	300	750	-
AAT (2011)	4,7 a 8,2	31,3 a 54,3	600	-	53	190	740
Bonaquist (2012)	6,0 a 7,3	49,6	600	15	50	135	415

Percebe-se da Tabela 2 que os critérios de *FN* para os tráfegos médios e pesados indicados para misturas asfálticas brasileiras são quase 6 vezes maiores que os critérios indicados para misturas asfálticas norte-americanas. Dadas as proporções de tensão [a tensão adotada por Nascimento (2008) (204 kPa) é quase 3 vezes menor que a adotada por Bonaquist (2012) (600 kPa)] e de temperatura [Nascimento (2008) utilizou uma temperatura cerca de 20% maior que Bonaquist (2012)], esses resultados sugerem que os critérios brasileiros são conservadores.

Essas pesquisas mostram ainda que o ensaio uniaxial de carga repetida é utilizado frequentemente para ranquear as misturas asfálticas com relação à resistência à deformação permanente. Destaca-se ainda, no Brasil, a necessidade de investigar a relação dos dados experimentais de misturas asfálticas em laboratório com o desempenho desses materiais em campo, com vistas ao refinamento dos critérios sugeridos por Nascimento (2008) e ainda à inclusão dos demais níveis de tráfego. Nesse sentido, o refinamento busca aperfeiçoar os valores mais conservadores de *FN*, sugeridos a partir da pesquisa laboratorial pelo referido autor, mas que a partir do desempenho de misturas em campo podem ser ajustados.

3. MATERIAS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, organizou-se um banco de dados contemplando informações referentes a 12 misturas asfálticas densas submetidas ao ensaio uniaxial de carga repetida (ABNT 16505, 2016), obtendo-se seus respectivos *FNs*. A Tabela 3 apresenta o teor e o Grau de desempenho PG (caracterizado apenas no limite superior) dos ligantes, Vv de projeto e a faixa granulométrica dessas misturas. Os ensaios foram realizados em 02 laboratórios diferentes, cada um com um tipo de equipamento: 75% das misturas foram avaliadas em uma *MTS-810* (*Materials Testing System* com capacidade de 100 kN) no Cenpes – Centro de pesquisas da Petrobras; e 25% das misturas foram avaliadas em uma *UTM - 25* (*Universal Testing Machine* com capacidade de 100 kN) no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC). O sistema de aquisição de dados de ambas as máquinas é idêntico (Lee *et al.*, 2012), apresentando resultados similares (Pereira, 2012).

Objetivando refinar os critérios para definir os níveis de tráfego compatíveis com valores de *FN* das misturas investigadas, avaliaram-se informações de campo (ATR e número N) e de laboratório (*FN*) dos trechos monitorados nesta pesquisa e ainda dos trechos considerados na Rede Temática de Asfalto, totalizando 12 trechos. A Tabela 4 apresenta as informações obtidas nesses levantamentos, assim como os resultados dos ensaios uniaxiais de carga repetida obtidos em laboratório. Como os referidos trechos são submetidos a diferentes níveis de tráfego, resultando em diferentes ATRs, buscou-se ordenar os dados em função de um único parâmetro. Assim, relacionou-se ATR à solicitação do tráfego (número N), obtendo-se o afundamento em trilha de roda causado pela passagem de cada número N, por meio da razão ATR/N, similarmente ao que foi proposto por Willis *et al.* (2010). Apresentam-se ainda na Tabela 4 informações dos trechos quanto à espessura total do revestimento asfáltico, região, temperatura média do ar e tempo de solicitação do trecho pelo tráfego.

Tabela 3: Banco de dados das misturas asfálticas

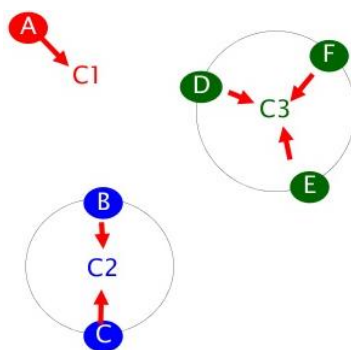
Mistura	Teor de ligante (%)	Vv de projeto (%)	Temperatura alta do PG capa de rolamento (°C)	Faixa granulométrica
T1	5,9	4,0	58-XX	C (DNIT)
T2	4,8	4,0	70-XX	C (DNIT)
T3	6,2	4,3	64-XX	C (DNIT)
T4	5,8	4,2	70-XX	C (DNIT)
T5	4,7	4,0	64-XX	C (DNIT)
T6	5,1	4,6	70-XX	19 mm (SPV) - <i>Superpave</i>
T7	4,7	4,5	70-XX	C (DNIT)
T8	4,2	4,0	64-XX	B (DNIT)
T9	5,2	4,9	82-XX	C (DNIT)
T10	4,7	4,0	70-XX	C (DNIT)
T11	4,2	4,0	64-XX	B (DNIT)
T12	4,4	4,0	70-XX	19 mm (SPV) – <i>Superpave</i>

Tabela 4: Banco de dados de laboratório e de campo de trechos monitorados

Trechos	ATR (mm)	N	ATR/N	FN	Espessura total do revestimento (cm)	Tempo de solicitação (meses)	Região	Temperatura média do ar (°C)
T1	4,1	$1,5 \times 10^6$	$2,7 \times 10^{-6}$	158	6,0	31	Sul	19,3
T2	1,5	$5,7 \times 10^5$	$2,5 \times 10^{-6}$	212	4,0	47	Sudeste	20,2
T3	2,5	$1,1 \times 10^6$	$2,3 \times 10^{-6}$	497	10,0	37	Sul	19,3
T4	5,4	$2,4 \times 10^6$	$2,2 \times 10^{-6}$	29	11,0	25	Nordeste	25,1
T5	0,7	$5,7 \times 10^5$	$1,2 \times 10^{-6}$	119	4,0	47	Sudeste	20,2
T6	0,2	$2,4 \times 10^5$	$9,8 \times 10^{-7}$	1318	10,0	22	Sul	21,7
T7	6,4	$3,1 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{-7}$	1487	8,0	36	Sul	18,9
T8	5,6	$2,9 \times 10^7$	$1,9 \times 10^{-7}$	354	15,0	26	Sul	19,1
T9	1,6	$1,1 \times 10^7$	$1,4 \times 10^{-7}$	4410	16,0	6	Sul	17,8
T10	1,6	$1,7 \times 10^7$	$9,4 \times 10^{-8}$	1214	12,0	14	Sudeste	18,5
T11	2,5	$2,9 \times 10^7$	$8,6 \times 10^{-8}$	354	18,0	26	Sul	19,1
T12	0,6	$2,2 \times 10^7$	$2,8 \times 10^{-8}$	315	12,0	16	Sudeste	18,2

Da Tabela 4, percebe-se o seguinte: trechos T1 a T6 já suportaram um tráfego leve ($<3 \times 10^6$); trecho T7 já suportou um tráfego extremamente pesado ($>3 \times 10^7$); e trechos T8 a T12 já suportaram um tráfego pesado ($>1 \times 10^7$; $<3 \times 10^7$). Destaca-se que os níveis de tráfego foram padronizados conforme os seguintes autores: Nascimento (2008), AAT (2011) e Bonaquist (2012) (Tabela 2).

Em seguida, adotou-se o método estatístico dos *clusters* para agrupar os dados de *FN* e da relação *ATR/N*, baseando-se na similaridade entre eles. O processo de agrupamento de objetos físicos ou abstratos em classes ou grupos de objetos similares é chamado de clusterização, que consiste na divisão dos dados em classes ou *clusters*, de maneira que objetos dentro de um mesmo *cluster* tenham alta similaridade, mas objetos pertencentes a *clusters* diferentes sejam muito distintos (alta dissimilaridade) (Han *et al.*, 2012).

**Figura 4.** Exemplos de *clusters* pelo método k-médias (Hillerman *et al.*, 2015)

Assim, a análise de *cluster* é uma técnica de agrupamentos e identificação de importantes distribuições e padrões que pode ser utilizada para caracterizar em laboratório e em campo o comportamento das misturas asfálticas quanto à resistência à deformação permanente.

Para esta pesquisa utilizou-se o método k-médias (onde k é o número de *clusters* que se deseja formar) (MacQueen, 1967). Nesse método, um algoritmo analisa os dados e os agrupa em função da distância entre o dado (*FN versus* relação ATR/N) e o meio (considerado como centro de um grupo, o seu centroide) de cada *cluster* (ver C2 e C3 nos *clusters* 2 e 3 da Figura 4). O algoritmo usado leva em consideração o comportamento das variáveis que caracterizam o material e a sua homogeneidade. Quando um dado é muito diferente dos demais, esse dado forma um único *cluster*, como é o caso do dado A, que forma isoladamente o *cluster* 1 da Figura 4.

Para a presente pesquisa duas premissas foram assumidas: i) deformação permanente apenas na camada de rolamento e ii) a proposta de refinamento de níveis de tráfego em função do *FN* não deve apontar um tráfego mais leve do que o trecho já suportou, conforme indicado pelo N correspondente ao trecho real que contem aquela mistura ensaiada em laboratório.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Decidiu-se utilizar inicialmente 3 *clusters* para agrupar as misturas dos trechos investigados de acordo com os tráfegos médio, pesado e extremamente pesado. A Figura 5 apresenta a distribuição dos dados de ATR/N e *FN* de 10 trechos, assim como os *clusters* centrais, conforme algoritmo desse método (os pontos indicados pelas setas na Figura 5 representam o centro de cada *cluster* e não um dado analisado). Como T4 e T9 são dados muito diferentes e cada dado formaria isoladamente um único *cluster*, deixando as demais amostras em um único grupo, esses dados foram excluídos da análise apresentada na Figura 5.

A partir da divisão entre grupos, apontada pela análise dos *clusters*, e da premissa de que a proposta de refinamento de níveis de tráfego em função do *FN* não deve indicar um tráfego mais leve do que o trecho já suportou, têm-se as seguintes correspondências entre os *FNs* e os *clusters* resultantes: *cluster* 1 - *FN* de 119 a 212; *cluster* 2 - *FN* de 315 a 497; *cluster* 3 - *FN* de 1214 a 1487. A partir dessa divisão, foram então formulados 4 critérios de *FN* em função das solicitações (Tabela 5). *FNs* inferiores a 100 resistem apenas a um tráfego leve; acima de 100 para um tráfego médio; acima de 300 para um tráfego pesado; e acima de 1000 para um tráfego extremamente pesado (Figura 6).

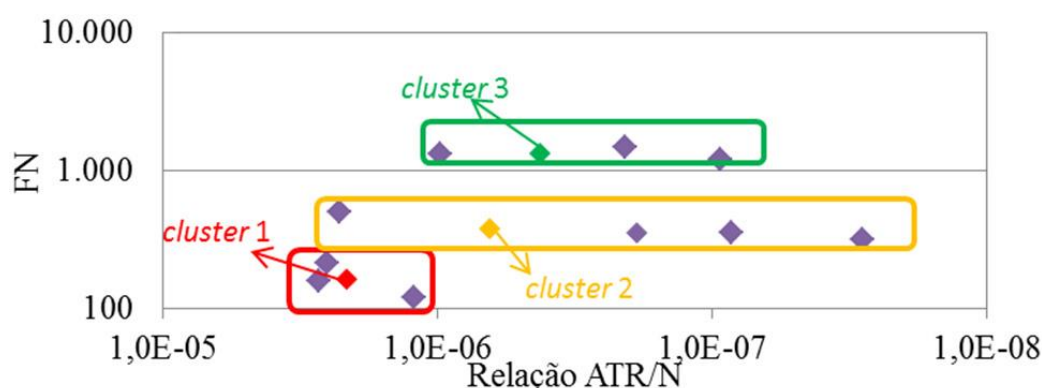


Figura 5. Apresentação do *FN versus* relação ATR/N e dos *clusters*

Tabela 5: Critérios de *FN* para diferentes níveis de tráfego desta pesquisa

Pesquisas / Níveis de Tráfego (número N)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
				3×10^6	$[3 \times 10^6; 1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7; 3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
Bastos et al. (2017)	5,0 a 7,5	60,0	204	-	100	300	>1000

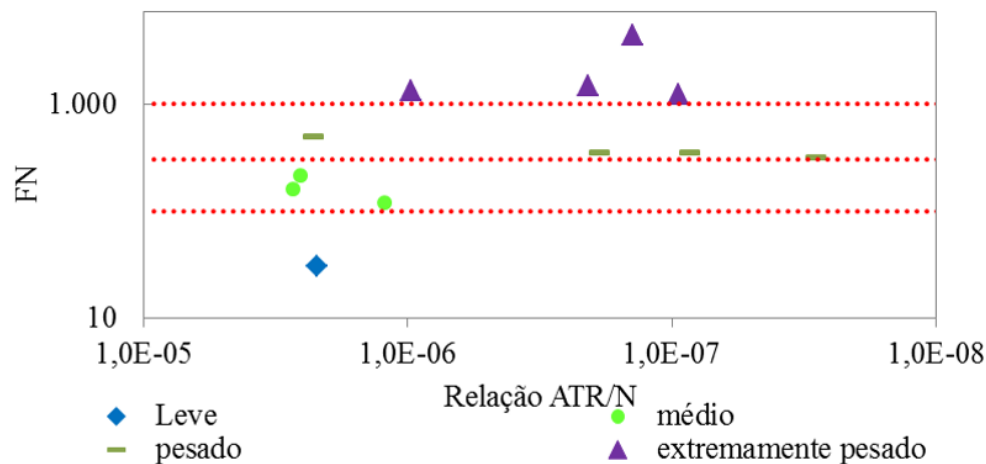


Figura 6. Refinamento de FNs versus desempenho em campo de misturas asfálticas

À vista do que foi exposto, o método estatístico dos *clusters* não foi adotado no trecho T4, já que essa mistura (FN de 30) apresenta um FN de 4 a 7 vezes menor que as misturas T1, T2 e T5 (tráfego médio). A mistura T4 apresentou ainda um valor elevado de ATR (5,4 mm) para um número N de $2,4 \times 10^6$. Esses resultados indicam que essa mistura atendeu um tráfego leve ($< 3 \times 10^6$), sem atingir o valor crítico de ATR de 12,5 mm. As misturas T1, T2 e T5 foram agrupadas no *cluster* 1 e indicadas para um tráfego médio (entre 3×10^6 e 1×10^7). Essas misturas apresentaram FNs de 158, 212 e 119, respectivamente, e foram submetidas, até o momento, a um tráfego leve e apresentaram ATRs de 4,1; 1,5 e 0,7 mm, respectivamente. Destaca-se ainda que nesses trechos foram adotadas espessuras de revestimentos mais esbeltas (6,0; 4,0 e 4,0 cm, respectivamente) e que mesmo o resultado de FN sendo adequado para um tráfego médio (entre 3×10^6 e 1×10^7), espessuras esbeltas apresentam valores elevados de tensão desvio (Bastos *et al.*, 2016) no ponto crítico de cisalhamento (Monismith *et al.*, 2006), podendo resultar em deformação por cisalhamento (exemplificada na Figura 1b).

Já a mistura T7 apresentou valores elevados de FN (1487) e de ATR (6,4 mm) para um número N de $3,1 \times 10^7$, indicando que essa mistura foi adequada para um tráfego extremamente pesado ($> 3 \times 10^7$). Além da mistura do trecho T7, as misturas asfálticas dos trechos T6, T9 e T10 também foram indicadas para um tráfego extremamente pesado ($> 3 \times 10^7$), tendo em vista os valores elevados de FN (1318, 4410 e 1214, respectivamente), baixos valores de ATR (0,2, 1,6 e 1,6 mm, respectivamente), além do baixo afundamento de trilha de roda causado por cada número N (ATR/N) ($9,8 \times 10^{-7}$, $1,4 \times 10^{-7}$ e $9,4 \times 10^{-8}$, respectivamente). Destaca-se que os trechos T9 e T10 já foram solicitadas por um tráfego superior a 1×10^7 , sem ATRs significativos. Saliencia-se que o método dos *clusters* não foi aplicado à mistura do trecho T9, tendo em vista que a mistura asfáltica aplicada nesse trecho apresentou um valor muito elevado de FN e em campo esse trecho apresentou uma baixa relação ATR/N . Assim, o trecho T9 formaria um *cluster* com um único dado, indicando um tráfego superior ao extremamente pesado. Desse modo, tal trecho foi englobado no nível de tráfego máximo (extremamente pesado).

As misturas dos trechos T3, T8, T11 e T12 foram agrupadas no *cluster* 2. Esses trechos apresentaram FNs de 497, 354, 354 e 315 e número N de $1,1 \times 10^6$, $2,9 \times 10^7$, $2,9 \times 10^7$ e $2,2 \times 10^7$, respectivamente. Esses resultados mostram que os trechos T8, T11 e T12 já suportaram um tráfego pesado (entre 1×10^7 e 3×10^7). A mistura T3 apresentou, até o momento, ATR de 2,5 mm. Esses resultados reforçam a adoção desse nível de tráfego para os trechos em questão.

Ressalta-se que em 67% dos trechos (T1 a T3, T5 a T8 e T11) os ATRs podem ter contribuição das demais camadas da estrutura, tendo em vista que nesses trechos essas camadas foram executadas sem a presença de material cimentício. De forma oposta, os demais trechos (T4, T9, T10 e T12) tiveram a camada de base ou sub-base executada com Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), atribuindo o surgimento de ATR à camada de revestimento.

Destaca-se ainda a relevância da continuidade do monitoramento de pistas experimentais, em grande parte já incentivada por meio do projeto da Rede Temática de Asfalto. Uma vez que o foco desse projeto é na execução e no monitoramento de pistas experimentais, além de uma caracterização mais avançada dos materiais, diversas universidades e concessionárias coletarão informações que possibilitarão continuamente a verificação e o refinamento dos critérios propostos nesta pesquisa.

CONCLUSÃO

Na busca por uma metodologia que subsidie a escolha mais adequada quanto à resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, o presente artigo refinou critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida em função do tráfego em campo. Identificou-se, a partir do desempenho de 12 trechos experimentais monitorados em todo o país, 4 critérios de *FN*. Considerou-se que *FNs* inferiores a 100 resistem apenas a um tráfego leve ($<3 \times 10^6$); *FNs* acima de 100 são indicados para um tráfego médio (entre 3×10^6 e 1×10^7); superior a 300 para um tráfego pesado (entre 1×10^7 e 3×10^7); e acima de 1000 para um tráfego extremamente pesado ($>3 \times 10^7$). É importante que no Brasil os diversos grupos de pesquisa, órgãos rodoviários e concessionárias sigam coletando informações de modo que esses critérios sejam continuamente refinados, tendo em vista que eles necessitam sistematicamente de atualizações, além da incorporação de novos materiais utilizados em misturas asfálticas. A adoção de critérios de *FN* baseada em desempenho representa uma segurança maior em relação à durabilidade dos pavimentos asfálticos, mas deve ser usada em conjunto com a seleção adequada dos materiais, métodos mais modernos de dosagem de misturas asfálticas e de dimensionamento de pavimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Pavimentação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Luis Miguel Gutiérrez Klinsky da concessionária da Rodovia Presidente Dutra S/A pelas amostras fornecidas e por todo apoio no decorrer desta pesquisa, ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ao DER-SP (Estrada do Leite), à ANTT e ARTERIS (Fernão Dias), às Universidades Federais do Paraná, Santa Catarina e Santa Maria pelos dados coletados e fornecidos para esta pesquisa e aos órgãos de fomento Funcap no Ceará e CNPq pelas bolsas de pós-graduação e produtividade em pesquisa, e a Petrobras pelo investimento em pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 16505*: Misturas asfálticas: resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.
- Advanced Asphalt Technologies, LLC (2011). A manual for design of hot mix asphalt with commentary, *NCHRP Report 673*. Washington: National Cooperative Highway Research Program.
- Barros, L. M.; Brito, L. A. T. E Ceratti, J. A. P. (2015). Desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com diferentes ligantes. In: CONGRESO IBERO LATINOAMERICANO DEL ASFALTO, 18., 2015. *Anais...* Bariloche, Argentina. pp. 325-333.
- Bastos, J. B. S.; Borges, R. L.; Soares, J. B. E Klinsky, L. M. G. (2015). Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. *Revista Transportes*, v. 23, n. 3. p. 44-55. DOI:10.14295/transportes.v23i3.914.
- Bastos, J. B. S.; Torquato E Silva, S. A.; Soares, J. B.; Nascimento, L. A. H.; Kim, Y. R. (2016). Triaxial Stress Sweep test protocol considerations for permanent deformation characterisation of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*. DOI: 10.1080/14680629.2016.1261729.
- Bernucci, L. L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P. E Soares, J. B. (2010). *Pavimentação asfáltica*: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras.
- Bessa, I. S. (2012). *Avaliação do processamento digital de imagens como ferramenta para caracterização de agregados e misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4842/1/2012_dis_isbessa.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2015.
- Biligiri, K. P.; Kaloush, K. E.; Mamlouk, M. S. E Witzczak, M. W. (2007). Rational modeling of tertiary flow for asphalt mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2001, n. 1, p. 63-72.
- Borges, R. L. (2014). *Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoplastico e ensaios triaxiais de carga repetida*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11168/1/2014_dis_rlborges.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2015.
- Bonaquist, R. (2012). *Evaluation of Flow Number (FN) as a discriminating HMA mixture property*. Wisconsin Highway Research Program. Projeto Número 0092-09-01.

- Brown, E.; Kandhal, P. S. E Zhang, J. (2001). *Performance testing for hot mix asphalt*. National Center for Asphalt Technology. Report 01-05.
- Cezaro Junior, T. (2008). *Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas*. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- 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.
- Choi, Y. T. (2013). *Development of a mechanistic prediction model and test protocol for the permanent deformation of asphalt concrete*. Dissertation. North Carolina State University at Raleigh. Disponível em: <<https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/8713>>. Acesso em: 18 jun. 2014.
- Choi, Y. T. E Kim, Y. R. (2014). Implementation and verification of a mechanistic permanent deformation model (shift model) to predict rut depths of asphalt pavement. *Road Materials and Pavement Design*, v. 15, n. S1, p.195-218. DOI: 10.1080/14680629.2014.927085.
- D'antona, D. M. G. E Frota, C. A. (2011). Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado pelo polímero EVA para pavimentos urbanos de Manaus. *AM: Revista Polímeros Ciência e Tecnologia*, v. 21, n. 1, p. 13-18. DOI: 10.1590/S0104-14282011005000007.
- Dongre, R., D'angelo, J. E Copeland, A. (2009). Refinement of flow number as determined by the asphalt mixture performance tester for use in routine QC/QA practice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2127, p. 127-136. DOI: 10.3141/2127-15.
- Eslamina, M.; Thirunavukkarasu, S.; Guddati, M. N. E Kim, Y. R. (2012). Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis. In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON CRACKING IN PAVEMENTS, 7., 2012. *Proceedings...* The Netherlands: Delft.
- Ferreira, J. L. S. (2015). *Melhoramento da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas pela escolha granulométrica a partir da metodologia da faixa de agregados dominantes*. Projeto (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Ferreira, J. L. S.; Soares, J. B. E Bastos, J. S. (2016). Métodos de seleção granulométrica com foco na resistência à deformação permanente. *Revista Transportes*, v. 24, n. 2. p. 46-52. DOI:10.4237/transportes.v24i2.1129.
- Han, J.; Kamber, M. E Pei, J. (2012). *Data mining concepts and techniques*. 3rd ed. Morgan Kaufmann Publishers.
- Hillerman, T. P.; Carvalho, R. N. E Reis, A. C. B. (2015). Brasil 100% Digital. In. SEMINÁRIO DE ANÁLISE DE DADOS NA ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA. ANÁLISE DE COBRANÇAS SUSPEITAS DE CONSULTAS MÉDICAS UTILIZANDO O ALGORITMO K-MEANS, 1., 2015. *Anais....* Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/tcuoficial/painel-01-01-tiago-hillermam>>. Acesso em: 09 nov. 2016.
- Lee, S.; Baek, C. E Park, J. (2012). Performance-based mix design of unmodified and lime-modified hot mix asphalt. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 39, n. 7, p. 824-833. DOI: 10.1139/l2012-067.
- Macqueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: BERKELEY SYMPOS. MATH. STATIST. AND PROBABILITY, 5., 1967. *Proceedings...* Berkeley, Calif., 1965/66. Vol. I: Statistics, p. 281-297.
- Monismith, C. L.; Popescu, L. E Harvey, J. (2006). Rut depth estimation for mechanistic-empirical pavement design using simple shear test results. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 75, p. 1294-1338.
- Motta, L. M. G.; Sá, M. F. P.; Oliveira, P. M. F. E Sousa, A. M. (1996). O ensaio de creep estático e dinâmico na avaliação das misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 2006. *Anais...* Salvador, BA. 115-135.
- Nascimento, L. A. H. (2008). *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/20220762-Nova-abordagem-da-dosagem-de-misturas-asfalticas-densas-com-uso-do-compactador-giratorio-e-foco-na-deformacao-permanente.html>>. Acesso em: 18 jun. 2014.
- Oliveira, A. H. (2014). *Avaliação do potencial antioxidante do Líquido da Castanha de Caju (LCC) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento*. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11174/1/2014_dis_aholiveira.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2015.
- Onofre, F. C. (2012). *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e polímeros*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11166/1/2012_dis_fconofre.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2014.
- Pazos, A. G. (2015). *Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&view=article&id=4540:abraham-guerrero-pazos&catid=388&Itemid=153&lang=pt-br>. Acesso em: 15 set. 2015.
- Pereira, M. M. L. (2012). *Estudo de mistura asfáltica de módulo elevado para camadas de base de pavimento*. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Santanna-Greco, J. A. (2004). *Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas, à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos*. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Santos, M. G. R. (2007). *Estudo do comportamento de agregado sintético de argila calcinada para uso em revestimentos asfálticos para Manaus*. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

- Soares, J. S. (2014). *Investigação da relação entre parâmetros da compactação giratória e de deformação permanente em misturas asfálticas densas*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Subramanian, V.; Guddati, M. N. E Kim, Y. R. (2013). A Viscoplastic model for rate-dependent hardening for asphalt concrete in compression. *Mechanics of Materials*, v. 59, p. 142-159. DOI:10.1016/j.mechmat.2012.10.003.
- Von Quintus, H. L.; Mallela, J.; Bonaquist, R.; Schwartz, C. W. E Carvalho, R. L. (2012). Calibration of rutting models for structural and mix design. *NCHRP Report 719*. Washington: Transportation Research Board.
- Wesseling, D. H. (2005). *Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- Willis, J.; Taylor, A.; Tran, N. E Copeland, A. (2010). A comparison of flow number for plant-produced mix to field rut depths under full-scale loading. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS, 11., 2010. *Proceedings...* Japan: International Society for Asphalt Pavements - ISAP Nagoya,
- Witczak, M. W.; Kaloush, K.; Pellinen, T.; El-Basyouny, M. E Von Quintus, H. (2002). Simple performance test for superpave mix design. *NCHRP Report 465*. Washington : ational Research Council, Transportation Research Board.