

**COMPORTAMENTO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DE CAMADAS
POROSAS DE ATRITO APLICADAS EM CAMPO**

**FUNCTIONAL AND STRUCTURAL BEHAVIOR OF OPEN-GRADED
FRICTION COURSE APPLIED ON-SITE**

Alessandro Alves¹

Luciano Pivoto Specht²

Paulo Henrique Mareze³

Deividi da Silva Pereira⁴

Juceline Batista dos Santos Bastos⁵

Revista Infinity

Revista dos Cursos de Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil e Engenharia de
Produção da Uceff.

Vol 5, n. 2, 2020

ISSN 2525-3204

¹ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

² Universidade Federal de Santa Maria

³ Universidade Federal de Santa Maria

⁴ Universidade Federal de Santa Maria

⁵ Instituto Federal do Ceará

RESUMO

As misturas a quente tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) tem seu objetivo inicial e conhecido promover a drenagem superficial da água nos dias de chuva. Porém este revestimento também vem sendo estudado em virtude do seu comportamento ligado a redução de ruídos e na estratégia de mitigação de ilhas de calor nos centros urbanos. O objetivo principal deste estudo é realizar uma avaliação funcional com foco na capacidade de atenuação sonora da CPA bem como fazer verificações de ATR (Afundamento em Trilha de Roda) em 3 trechos executados no Rio Grande do Sul. Na metodologia utilizada foram realizadas medidas do coeficiente de absorção acústica com o tubo de impedância, de misturas densas e do CPA. Em campo foi avaliado o NPS (Nível de Pressão Sonora) de uma CPA e de um revestimento convencional em CA (Concreto Asfáltico), verificou-se uma redução sonora de 6 dB (A), através do SPBI (Statistical Pass-by Index), o que equivale a uma perda de energia acústica de 50%. Já nos ensaios em laboratório a CPA apresentou picos de absorção de 0,6 na principal faixa audível aos seres humanos, demonstrando assim, características semelhantes aos pavimentos silenciosos, utilizados em outros países especificamente com essa intenção. Finalmente, a CPA não apresentou valores relevantes para a patologia de ATR mesmo depois de 10 anos de serviço.

Palavras-chave: Camada porosa de atrito, Ruído de tráfego, Afundamento em Trilha de Roda.

ABSTRACT

Open-Graded Friction Course (OGFC) have their initial objective and are known to promote surface water drainage on rainy days. However, this coating has also been studied due to its behavior related to noise reduction and the strategy of mitigating heat islands in urban centers. The main objective of this study is to carry out a functional assessment with a focus on the sound attenuation capacity of PFL (Porous Friction Layer) as well as make WTR (Wheel Track Rutting) checks in 3 stretches performed in Rio Grande do Sul. In the methodology used, measurements of the sound absorption coefficient were performed with the impedance tube, of dense mixtures and of PFL. In the field, the SPL (Sound Pressure Level) of a PFL and of a conventional coating in AC (Asphalt Concrete) was evaluated, with a 6 dB (A) sound reduction, through SPBI (Statistical Pass-by Index), which is equivalent to a 50% loss of acoustic energy. In laboratory tests, PFL showed absorption peaks of 0.6 in the main range audible to human beings, thus demonstrating characteristics similar to silent floors, used in other countries specifically for this purpose. Finally, PFL did not present values relevant to the pathology of WTR even after 10 years of service.

Keywords: Porous friction layer, Traffic noise, Wheel track rutting.

Introdução

As rodovias brasileiras transpassam tanto ambientes rurais quanto urbanos onde são importantes vetores de desenvolvimento econômico para as cidades às suas margens (DNER,1999a). Excessivas vezes a mancha urbana tende a crescer a partir do entorno desses trechos, mas raramente isso acontece de acordo com um planejamento urbanístico adequado, que harmonize as demandas locais e a vocação original da rodovia. Problemas nessas rodovias geralmente resultam em trechos de alto risco, tanto para moradores locais quanto para os motoristas, e exigem soluções de órgãos públicos e concessionárias.

Os pavimentos de concreto asfáltico são projetados, em sua camada de revestimento, para que suportem uma vida de serviço de 10 a 15 anos. Nesse período, o pavimento, que inicia numa condição ótima, alcançará uma condição terminal no final do período ao qual foi dimensionado, caso não passe por um processo de reabilitação intermediário (BERNUCCI et al., 2010).

Quando se trata de misturas a quente tipo CPA (Camada Porosa de Atrito), sabe-se que são projetadas com porcentagens de vazios de 18% a 25% e utilizadas como camada de rolamento sobre revestimentos asfálticos. Seu objetivo inicial e conhecido era promover a drenagem superficial da água nos dias de chuva, mobilizando sua percolação para as sarjetas de drenagem (DNER,1999b).

Desta forma, reduzindo significativamente o *spray* decorrente da interação pneu-pavimento nos dias chuvosos (ALVAREZ et al., 2011; PINTO, S. & PINTO, I. E., 2015). Essa camada também vem sendo estudada em virtude do seu comportamento quanto à redução de ruídos (CALLAI, 2008; SPECHT et al., 2009; ALVES, SPECHT & DRESCH, 2016; KNABBEN, 2017; ALVES et al.,2018; ALVES, 2019).

Destaca-se ainda que as obras de restauração, recuperação e conservação rodoviária utilizadas nos programas CREMA do DNIT buscam soluções para recuperar as rodovias, dentre as quais está a CPA que emprega ligante modificado por polímero, o qual é adequado a tráfegos elevados e ao clima do Estado do Rio Grande do Sul que apresenta variações térmicas acentuadas não só em relação às estações do ano, quando a temperatura ambiente varia desde valores negativos até cerca de 40°C, mas também diariamente, principalmente no outono e primavera, quando são verificadas oscilações de até 20°C. O clima gaúcho é bastante chuvoso, o que facilita o processo de deslocamento da película de asfalto pela água, potencializando assim os processos de

trincamento e afundamentos; este último sendo a principal preocupação em termos de patologias quanto trata-se de CPA.

Existem muitos benefícios para utilização de misturas porosas que são reconhecidos e verificados em diversas pesquisas, conforme relatado em NCHRP Synthesis 49 (HALSTEAD, 1978), NCHRP Synthesis 180 (SMITH, 1992) e NCHRP Synthesis 284 (HUBER, 2000). A maioria desses benefícios está relacionada à segurança.

A aplicação de uma camada de rolamento porosa para remover a água da superfície, fornecendo um bom contato entre os pneus e o pavimento, minimizando assim o potencial de acidentes e mortes no trânsito durante o tempo chuvoso é ratificada nos estudos de Watson et al. (2018).

Superfícies porosas são muito populares, também, para a redução do ruído do tráfego devido à sua aptidão em absorver o mesmo. Elas podem reduzir o ruído em até 6 dB (A), em comparação a uma camada convencional. Sabe-se que para uma superfície ser considerada silenciosa é necessário a redução de no mínimo 3 dB (A) em relação a uma camada padrão de referência (PIARC, 2013).

O valor do coeficiente de absorção acústica dependerá da facilidade da onda para entrar nos poros do material, por um lado. Por outro lado, este valor depende do atrito com a superfície da estrutura interna que participa na dissipação da energia sonora (TIWARIA et al., 2004).

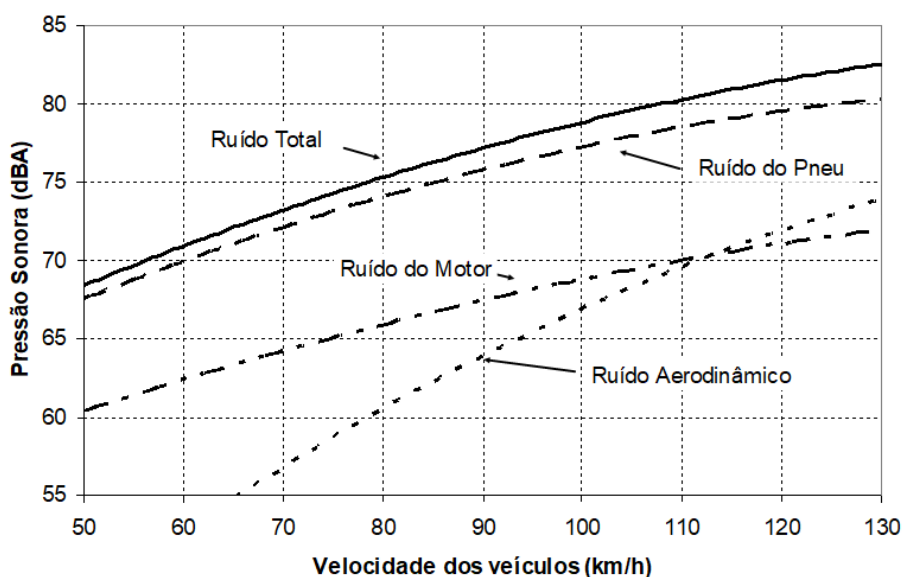
Na Europa, os métodos correntes para a limitação do ruído rodoviário incluem a construção de barreiras acústicas, o controle do tráfego, com a limitação da velocidade, a alteração do traçado vertical e horizontal, a definição de zonas protegidas, e ainda um método inovador de limitação do ruído que é a construção de pavimentos silenciosos (CAMOMILLA & LUMINARI, 2004).

Os pavimentos silenciosos surgem da necessidade de redução do ruído que resulta do contato entre o pneu e o pavimento, uma vez que o estado atual da técnica não permite uma redução significativa do ruído produzido pelo motor e pelo sistema de exaustão dos veículos.

O ruído de tráfego resulta da acumulação das emissões de ruído de todos os veículos. No entanto cada veículo possui várias fontes de ruído, cuja soma corresponde ao ruído total desse veículo (Figura 1), sendo que as principais resultantes do funcionamento do motor e do sistema de exaustão influenciam o ruído principalmente a baixas velocidades, enquanto que para velocidades acima dos 50 km/h o ruído da

interação pneu/pavimento é predominante (BENDTSEN & RAABERG, 2006; SANS, 2006).

Figura 1 - Influência dos diversos fatores no ruído.



Fonte: Hanson et al. (2005).

Em sua pesquisa, Astrana Júnior (2006) realizou ensaios de absorção sonora em concretos asfálticos drenantes e densos, com o tubo aberto colocado sobre a placa asfáltica drenante. Nesse trabalho, com granulometrias propostas inicialmente por Meurer Filho (2001), determinou-se que o coeficiente de absorção das misturas drenantes foi maior que o encontrado para as misturas convencionais.

Láo (2004) e Knabben (2012) realizaram ensaios de absorção sonora em diferentes tipos de revestimento utilizando o tubo de impedância. Nessas pesquisas os maiores coeficientes de absorção foram para as misturas drenantes e camadas porosas de atrito.

As curvas de absorção sonora das misturas abertas ou porosas se comportam como um ressonador de Helmholtz, isto é, existe um pico de absorção sonora na frequência de ressonância de Helmholtz (KNABBEN, 2012).

Cabe destacar ainda, que os benefícios das superfícies silenciosas podem ser alcançados sem afetar o desempenho estrutural e de segurança da rodovia, sendo que a resistência à derrapagem será preservada ou pode até ser aumentada. Algumas das superfícies com características de redução de ruído são ainda mais seguras que as densas convencionais, como as superfícies porosas que têm a capacidade de drenar as águas pluviais, melhorando a visibilidade em tempo chuvoso (PIARC, 2013).

A partir de uma definição simplificada, costuma-se atribuir o termo ruído ao som indesejado. O ruído urbano proveniente das mais diferentes fontes prejudica, diariamente, a saúde física e psicoemocional das pessoas. Desta forma, são necessárias ações para o monitoramento e fiscalização para este que é um dos grandes problemas para a saúde pública da atualidade (MEDINA, GONZALES & PAIXÃO, 2012).

Destaca-se que o ruído rodoviário, o qual constitui atualmente um problema grave de qualidade ambiental, resulta essencialmente, em velocidades acima dos 40 km/h, dos mecanismos de contato entre o pneu e a superfície do pavimento. Por conseguinte, a avaliação em termos acústicos das superfícies da rede rodoviária é importante quando trata-se de áreas urbanas ou rurais com velocidade acima das mencionadas (HANSON et al., 2005).

Atualmente, o desafio das cidades é conciliar suas atividades com ações que conduzam a um desenvolvimento sustentável, consciente e menos agressivo ao meio ambiente. Em especial, no Brasil, o monitoramento do ruído urbano é recente e fruto, em sua maioria, de iniciativas individuais de pesquisadores que se dedicam ao estudo, proposta e avaliação de camadas com o intuito de redução de ruídos (LÁO, 2004; NASCIMENTO et al., 2005; ASTRANA, 2006; FRANK, 2009; ALVES, SPECHT & DRESCH, 2016).

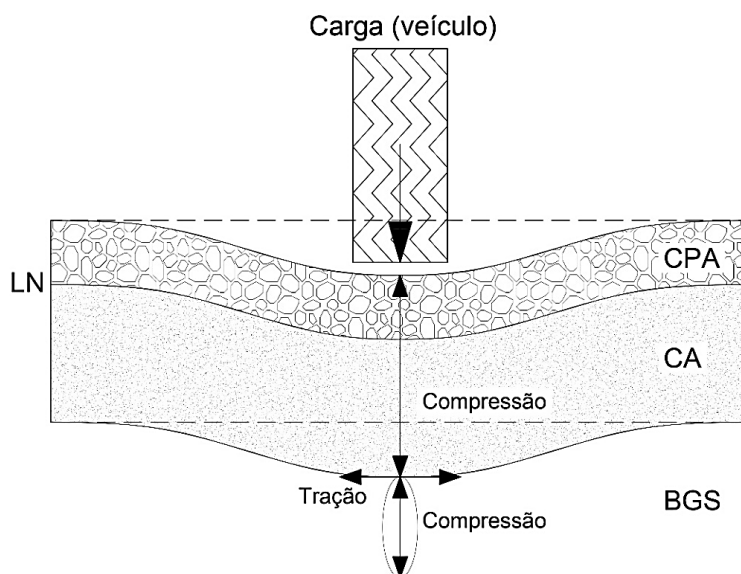
O ruído produzido pelos veículos, resultante da interação pneu-pavimento em vias de trânsito rápido, necessita maiores cuidados, especialmente em áreas próximas a aglomerados urbanos, em função de danos que podem causar à saúde da população. Dentre os fatores ambientais prejudiciais à saúde, na Europa, o ruído ambiental é sabidamente a segunda maior causadora de doenças superado apenas pela poluição do ar, conforme informações da *World Health Organization* (WHO, 2011).

Além do fator sonoro, os pavimentos porosos já estão sendo utilizados como estratégia de mitigação de ilhas de calor nos centros urbanos. Estudos verificaram a influência direta no impacto dos pavimentos e na consequente redução do fluxo de calor sensível entre a atmosfera e a superfície pavimentada porosa (SANTAMOURIS, 2013). Nesse sentido, a ação mitigadora envolvendo pavimentos é extremamente vantajosa devido à grande disponibilidade de áreas (ruas, estacionamentos, etc.) nas cidades para sua implementação (PAULA et al., 2016; WERNECK, 2018).

Sabe-se que para pavimentos com revestimento convencional em concreto asfáltico denso, denominado aqui de CA, as principais patologias são decorrentes da fadiga dos materiais. Já em misturas porosas (aplicadas geralmente em camada de 4

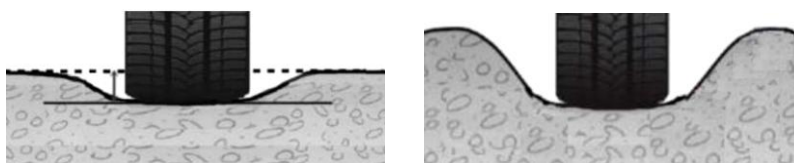
cm), a região de compressão é de suma importância para análise, pois é onde ocorre a plastificação ou deformação permanente para este revestimento, causando, em campo, afundamentos em trilha de roda (ATR), sendo este um dos objetos de análise deste trabalho. Visualiza-se na Figura 2 um esquema demonstrando as áreas de tração e compressão em pavimentos asfálticos tipo CPA.

Figura 2 - Esquema de esforços em pavimentos tipo CPA.



Primeiramente, as solicitações do tráfego induzem a deformações irreversíveis abaixo dos pneus, sem que haja a ocorrência de elevações laterais adjacentes, havendo dessa maneira, redução de volume e indicando a ocorrência de densificação (Figura 3a). Em seguida, em um segundo estágio, o decréscimo de volume abaixo dos pneus passa a ser igual ao incremento de volume nas elevações laterais, indicando deformação causada por cisalhamento da massa asfáltica (Figura 3b).

Figura 3 - Deformação permanente em revestimentos asfálticos.



(a) Densificação do revestimento asfáltico (b) Cisalhamento do revestimento asfáltico

Fonte: Adaptado de Ferreira (2002).

Compreende-se ainda que os mecanismos que regem ambos os estágios do comportamento das misturas asfálticas em termos de deformação permanente são

influenciados principalmente pelas características dos agregados, na parcela que envolve a deformação plástica do esqueleto mineral, e pelo ligante asfáltico utilizado, envolvendo a deformação do seu fluxo viscoso, devido seu comportamento viscoelastoplástico e termosensível (JOLIET & MALLOT, 2000).

Os objetivos deste trabalho são, com relação à etapa de laboratório: i) verificar a influência no comportamento de absorção sonora das misturas tipo CPA com diferentes curvas granulométricas (CPA da Faixa V - DNIT; CPA da Faixa IV - DNIT e Faixa norte-americana) e ii) caracterizar a resistência à deformação permanente dessas misturas, a partir dos ensaios uniaxial e triaxial de carga repetida. Para a etapa de campo, buscou-se avaliar a evolução da absorção sonora ao longo do tempo, em trechos experimentais selecionados, utilizando o método SPBI (Statistical Pass-by Index). Sendo estes, o trecho em CPA na BR-158 e o trecho de controle em CA subsequente, e ainda, os trechos em CPA da BR-285 e o trecho de controle em CA nesta mesma rodovia. Finalmente, medições de ATR foram realizadas seguindo as seguintes metodologias: i) treliça de haste móvel central e ii) perfilômetro inercial laser.

Métodos

Este trabalho apresenta duas frentes, sendo que em laboratório, desenvolveu-se e implementou-se um tubo de impedância acústica, para avaliação do coeficiente de absorção sonora e ainda foram realizados ensaios uniaxial e triaxial de carga repetida para avaliação mecânica quanto à deformação permanente das CPAs investigadas nesta pesquisa. Em outra frente fez-se a avaliação do NPS (Nível de Pressão Sonora), utilizando-se o método estatístico de passagem, e do ATR, através da treliça de haste móvel central e do perfilômetro inercial laser, em campo.

Desenvolvimento e implementação de avaliação acústica em laboratório

Os ensaios para a determinação do coeficiente de absorção acústica, em tubo de impedância acústica, aplicando o método da transferência sonora empregando dois microfones, foram realizados de acordo com o procedimento especificado na ISO 10534-2 (1998) e na ASTM-E 1050 (2006). Resumidamente, pode-se descrever que o sistema constituiu em excitar um tubo de impedância com um ruído branco e medir as funções de resposta em frequência de pressão acústica no seu interior.

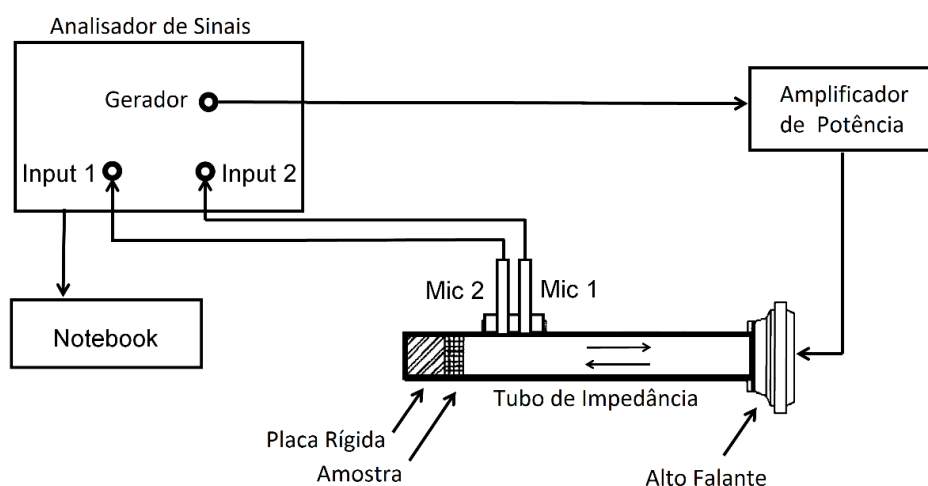
O processo de medição foi baseado na interação de duas ondas planas: uma incidente e a outra refletida. A razão entre a energia acústica absorvida e a energia

acústica incidente determinará o coeficiente de absorção sonora em função da frequência.

O princípio de funcionamento e o equacionamento baseia-se na propagação de ondas planas ao longo do tubo e na medição da função de transferência de pressão sonora em duas posições distintas. O ensaio é demonstrado conforme esquema da Figura 4.

O tubo de impedância utilizado para a execução dos ensaios de coeficientes de absorção foi confeccionado pelo Laboratório de Engenharia Acústica da UFSM (Universidade Federal de Santa Maria). Este apresenta diâmetro igual a 103 mm, com aproximadamente 2,60 metros de comprimento, uma distância de 80 mm entre os microfones e de 406 mm entre o microfone mais distante e a amostra. É importante comentar que um molde metálico com 110 mm de diâmetro e 80 mm de profundidade foi utilizado, no final do tubo, onde a amostra esteve inserida.

Figura 4 - Esboço esquemático do sistema utilizado na medição do coeficiente de absorção.

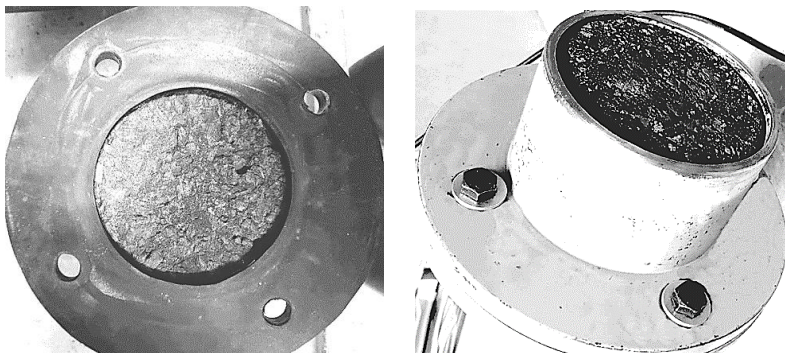


Fonte: Adaptado de ASTM-1050 (2006).

Equipamentos como um amplificador de potência B&K 2732, notebook compaq com software Pulse LabShop 15, analisador de sinais B&K Pulse 3160-A-042, com quatro canais de entrada e dois de saída, dois microfones de campo difuso, de 1/2", modelo B&K 4942-A-021, calibrador de microfones B&K 4231, 94 dB - 1 kHz, paquímetro digital Starfer de 0-150 mm e termo higrômetro digital Acepil também foram utilizados para a análise dos dados.

Concluída a montagem da instrumentação necessária, posicionou-se o corpo de prova no interior do suporte metálico de forma que uma de suas faces fique em contato com a terminação rígida do suporte (Figura 5).

Figura 5 - Posicionamento dos CPs e do suporte metálico no tubo de impedância.



As amostras tinham diâmetros que permitiram o perfeito acoplamento no tubo. A profundidade do porta-amostras era compatível com o tipo de pavimento moldado ou retirado em campo, o que para a CPA em análise é 4 cm. Em seguida, gerou-se um ruído branco (de característica randômica) na faixa de frequências audível aos seres humanos, podendo-se medir a pressão sonora nas duas posições previamente estabelecidas.

A faixa de frequência útil de medição foi estabelecida entre 100 Hz e 2100 Hz de forma a garantir que as ondas sejam planas e incidam perpendicularmente na face da amostra, devido as dimensões construtivas do tubo. Para a realização dos ensaios, os microfones foram calibrados antes de cada dia de medição, a fim de assegurar a precisão dos dados.

Os resultados dos coeficientes de absorção sonora apresentados para as amostras analisadas são formados pela média dos valores ensaiados em corpos de prova nas mesmas condições.

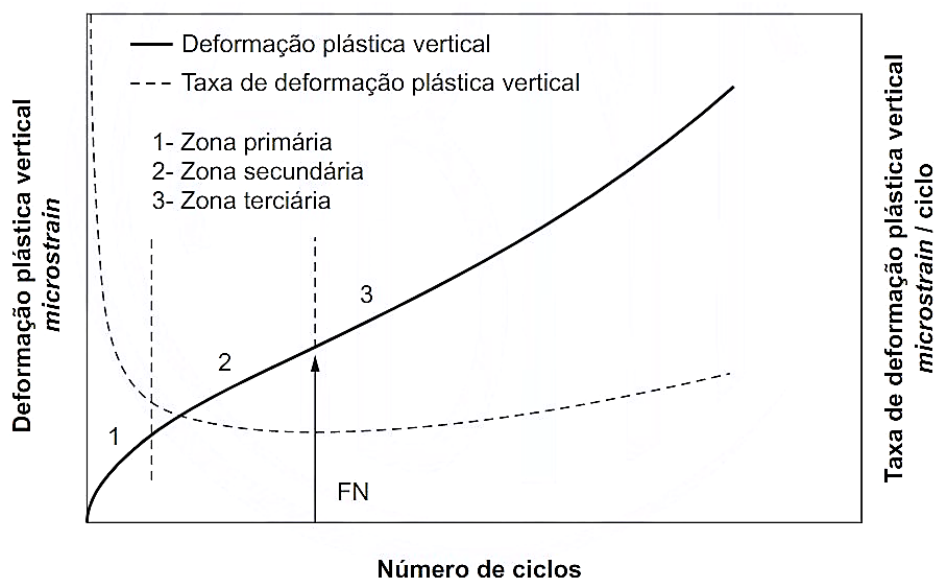
Obteve-se 18 CPs retirados in loco na BR-158 (9 em CA e 9 em CPA Faixa V), com dimensões de 100x40 mm e ainda outros 6 CPs moldados em laboratório, com todas as faixas de misturas porosas analisadas neste estudo (CPA Faixa IV, CPA Faixa V e mistura porosa de referência norte-americana). Destaque-se ainda, que neste ensaio, assim como nos levantamentos acústicos em campo do SPBI, concomitantemente com os levantamentos acústicos, foram monitorados a temperatura atmosférica, inicial (27,0°C) e final (27,3°C), e também a umidade do ar, inicial (59%) e final (60%).

O coeficiente de absorção ou o coeficiente de redução de ruído (NRC) será calculado seguindo A avaliar revestimentos de pavimentos e materiais de construção.

2.2 Ensaios uniaxial e triaxial de carga repetida em laboratório

Realizou-se o ensaio regido pela norma ABNT NBR 16505:2016 (Figura 6), o qual descreve o procedimento para a caracterização da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, a partir do ensaio uniaxial de carga repetida em corpo de prova cilíndrico, utilizando o parâmetro denominado número de fluxo (Flow Number - FN).

Figura 6 - Curva típica do ensaio uniaxial de carga repetida.



Fonte: (ABNT, 2016).

Neste experimento a amostra, a uma temperatura de teste específica, é submetida a um impulso axial de carga de compressão de 0,1 s a cada 1,0 s. O ensaio pode ser realizado com ou sem pressão confinante, tal que as deformações axiais permanentes são medidas em função do tempo, sendo o número de fluxo definido como o número de ciclos de carga correspondente à taxa mínima de variação de deformação axial (NCHRP, 2008).

Witczak et al. (2002) confirmam que este ensaio, inicialmente ocorre uma deformação com velocidade elevada (zona primária), posteriormente a deformação mantém-se a uma taxa constante (deformação secundária) e por fim, a velocidade de deformação cresce rapidamente, caracterizando a falha do material (zona terciária), conforme Figura 6. Além disso, destaca-se para a análise da deformação permanente, a definição do FN, o qual indica o início da zona terciária.

Quanto maior for o FN, maior é a capacidade de a mistura resistir à deformação permanente. Contudo, a inclinação da reta na zona secundária também deve ser levada em consideração nesta avaliação, pois, de acordo com a metodologia de ensaio, uma mistura asfáltica será resistente à deformação permanente se apresentar baixas inclinações na zona secundária, ou seja, pequeno valor de deformação permanente ao fim do ensaio, e um elevado FN, isto é, um longo tempo de ensaio.

Ainda nesse sentido, o TRLPD (*Triaxial Repeated Load Permanent Deformation Test*) é definido como um ensaio de compressão cíclica sob pressão confinante constante que emprega um pulso de carga semi-senoidal seguido por um período de repouso.

Os resultados de FN, determinados também a partir do ensaio Triaxial de Carga Repetida, conforme o Report 465 (WITCZAK et al., 2002), obtiveram coeficientes de determinação, R^2 , de 0,90 ou maior para a correlação dos resultados de laboratório com desempenho em campo, mostrando que esse é o parâmetro que melhor se relaciona com a deformação permanente.

Os autores indicaram que esse ensaio pode ser realizado com confinamento (triaxial) ou sem confinamento (uniaxial). No entanto, a pressão de confinamento pode ser aplicada para melhor simular condições da mistura em campo (BORGES, 2014). Nos ensaios confinados, únicos deste trabalho realizados na Universidade Federal do Ceará (UFC), a tensão utilizada foi de 138 kPa e a temperatura de 47°C (máxima), conforme Bastos et al. (2017).

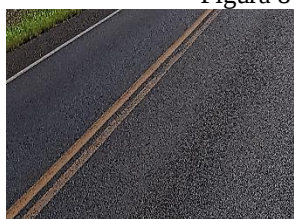
Delimitação dos trechos avaliados *in loco*

A definição dos trechos experimentais para estudo em campo levou em consideração pavimentos com revestimento em CPA executados no Estado do Rio Grande do Sul (RS). O trecho da BR-158, do km 73 ao km 75, localizado no município de Boa Vista da Missões, completará 6 anos de execução em dezembro de 2020. Já o trecho da BR-285, também com 2km de extensão e executado em dezembro de 2016, localiza-se no município de São Antônio das Missões, aproximadamente no km 593.

O outro trecho da BR-285 avaliado, próximo ao km 656, localiza-se no município de São Luiz Gonzaga e foi executado em torno do ano de 2005. Os trechos avaliados em campo enquadram-se na faixa de designação V do DNER ES 386 (1999b). Foram também avaliados trechos de controle em CA (Concreto Asfáltico), subsequentes a estes (Figura 7 e Figura 8).

Figura 7 - Mapa de localização dos trechos avaliados *in loco*

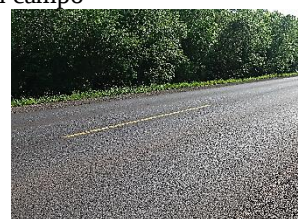
Figura 8 - Imagens dos trechos em CPA avaliados em campo



(a) BR-158/km 73



(a) BR-285/km 656



(a) BR-285/km 593

Método Estatístico de Passagem

A avaliação do ruído em campo se deu através do Método Estatístico de Passagem ou *Statistical Pass By Method* (SPB), regido pela norma ISO 11819-1, na qual o ruído de passagem e a velocidade são medidos para veículos individuais (100 carros, 80 caminhões) em um local específico, através destes dados resulta o Índice Estatístico de Passagem ou *Statistical Pass-by Index* (SPBI). O método é amplamente utilizado e pode ser usado para classificação de ruído de pavimentos.

O tráfego foi classificado segundo o Manual de estudos de tráfego do DNIT (DNIT, 2006) e seguindo a ISO 11819-1, que classifica os veículos em apenas duas categorias: 1 - carro e 2 - caminhões e ônibus, subdividindo-se em 2a para os veículos com dois eixos e 2b para veículos com mais de 2 eixos. Um número mínimo de veículos

de cada categoria deve ser atendido; para veículos de passeio, 100, para veículos pesados com dois eixos, 30 e, para veículos pesados com mais de dois eixos, 30, sendo que a soma destes dois últimos deve ser, no mínimo, 80. Ainda deve-se destacar que só devem ser levados em consideração veículos que estão claramente livres da interferência acústica de outros veículos. Deve ser feita uma regressão linear dos valores obtidos para que eles possam enquadrar-se aos da Figura 9.

Figura 9 - Quadro relacionando as velocidades de referência e peso dos fatores (Wx)

Categoria do veículo		Velocidade da rodovia					
		Baixa		Média		Alta	
Nome		Velocidade de referência	x	Velocidade de referência	x	Velocidade de referência	x
Carros		50 km/h	,90	80 km/h	,80	110 km/h	,70
Pesados de dois eixos	a	50 km/h	,08	70 km/h	,10	95 km/h	,08
Pesado de mais de dois eixos	b	50 km/h	,03	70 km/h	,10	95 km/h	,23

Fonte: ISO 11819 (1997).

Quando do levantamento de dados deve-se considerar baixa velocidade de rodovia (45-64 km/h), com velocidade de referência 50 km/h, média velocidade de rodovia (65-99 km/h), velocidade de referência 80 km/h para carros e 70 km/h para veículos pesados, e alta velocidade de rodovia (100 km/h ou mais), com velocidade de referência 110 km/h para veículos leves e 95 km/h para caminhões e ônibus.

Então aplicá-los na Equação 1 que fornece o SPBI, para uma relação padronizada entre veículos leves e pesados. L1, L2a, L2b = Valores de nível de pressão sonora para as categorias respectivas em dB (A). W1, W2a, W2b = Fatores que presumem as proporções dos veículos respectivos e V1, V2a, V2b = Velocidades de referência dos veículos.

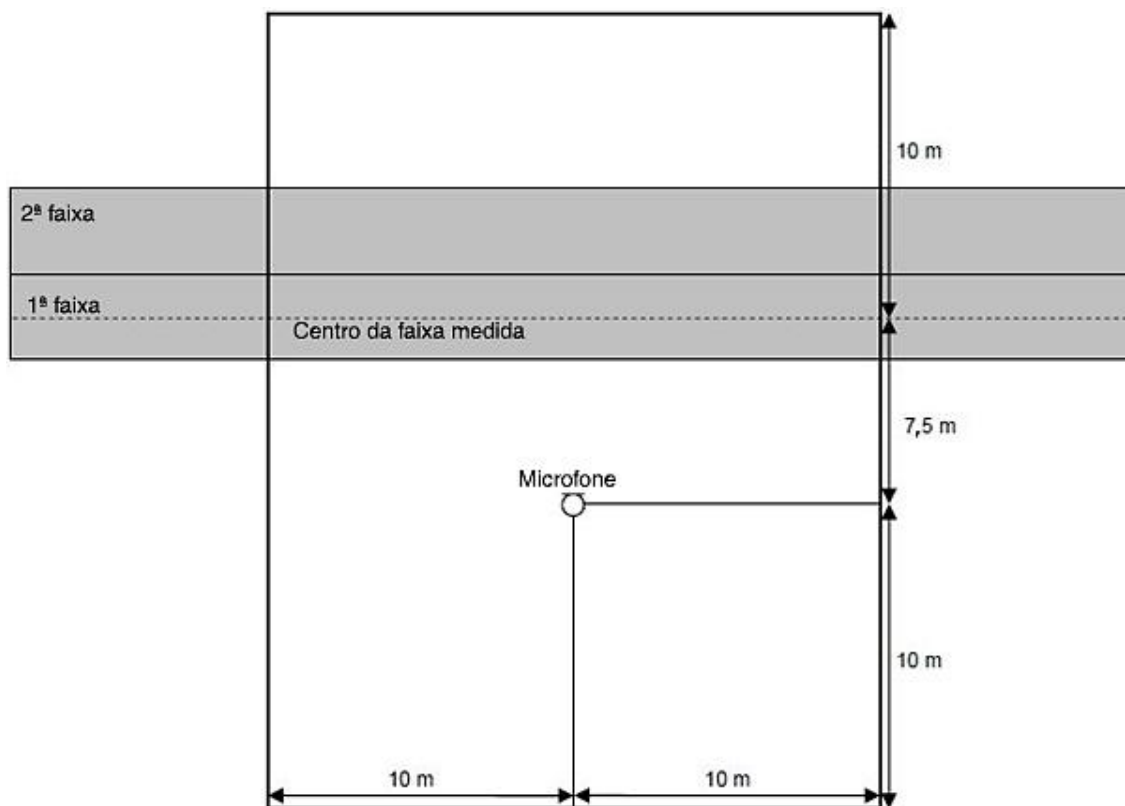
$$SPBI = 10\log[W_1 \times 10^{L1/10} + W_{2a} (V_1/V_{2a}) \times 10^{L2a/10} + W_{2b} (V_1/V_{2b}) \times 10^{L2b/10}]$$

Eq.1

O método SPB é um método padronizado por norma ISO com baixo nível de incerteza. No entanto, é apenas uma avaliação de um ponto da estrada, demorado e tem severas restrições quanto ao ambiente acústico (Figura 10). Porém, se o local avaliado é representativo e satisfaça os requisitos, considera-se o melhor método para a avaliação

sonora, comparando-se assim seu comportamento ao longo do tempo e em diferentes pavimentos.

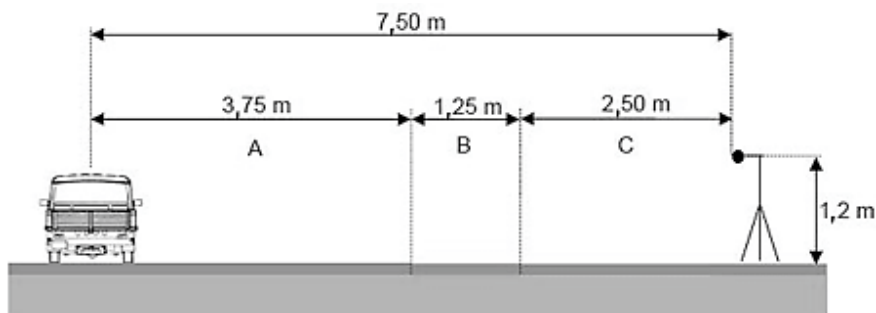
Figura 10 - Área sem objetos refletoras na avaliação pelo método SPB.



Fonte: Adaptado de ISO 11819-1 (1997).

A superfície da estrada deve estar em bom estado, homogênea, seca e deve cobrir a distância entre o microfone e o centro da pista medida pelo menos conforme descrito na Figura 11. Se possível, toda a distância entre a pista e o microfone deve ser coberta com a mesma superfície da estrada.

Figura 11 - Configuração das distâncias e requisitos para medição na rodovia.



Fonte: Adaptado de SILVIA (2006).

A medição sonora do nível máximo de pressão acústica ponderada A, $L_{AFmáx}$, deve ser efetuada utilizando-se um medidor de nível sonoro e um microfone que satisfaçam os requisitos do tipo 1 da norma IEC 60651. O nível de pressão sonora deve ser medido com a ponderação de frequência A e o tempo de ponderação F (FAST) do nível máximo de pressão sonora durante as passagens de veículos.

Para realização das medições do Nível de Pressão Sonora (NPS) foram utilizados os seguintes equipamentos: Medidor de nível de pressão Sonora 01dB - BLACK SOLO 01 número de série: 65856, calibrado pelo INMETRO em 14/03/2017, certificado de calibração nº RBC-1-9934-541 processo nº 17211; Calibrador de nível de pressão Sonora 01dB - CAL 21 número de série: 34634214, calibrado pelo INMETRO em 14/03/2017, certificado de calibração RBC-2-9934-673 processo nº 17211 e Microfone 01dB - MCE 212, número de série: 153606, calibrado por Prepolarized Free Field Microphone em 14/03/2017, ainda um tripé de apoio para garantir a distância mínima entre o MNPS e o pavimento.

Medições de ATR com treliça de haste móvel central

Na medição do afundamento plástico nas trilhas de roda (ATR), foi utilizado um equipamento chamado de treliça, com haste móvel central, capaz de medir os afundamentos com a precisão de 0,5 mm que segue os preceitos da norma DNIT 006/2003-PRO. Os valores de flechas serão a média de 10 leituras na trilha de roda externa em uma extensão de 15 metros.

Medições de ATR com perfilômetro inercial laser

A avaliação do ATR dos pavimentos que compõem os trechos monitorados foi executada com o perfilômetro inercial laser com 5 sensores e foram utilizados os valores médios determinados entre as trilhas de roda externa e interna em toda a extensão dos segmentos em CA e CPA analisados.

Resultados das medições de NPS em campo e da absorção sonora em laboratório

Nos levantamentos de dados realizados do Nível de Pressão Sonora, utilizando-se como referência o SPBI, foi verificado uma variação considerável entre os trechos de CA e CPA analisados.

Na obtenção dos dados de campo foram realizadas mais de 1200 medidas de NPS, em sete etapas de medições, do 1º semestre de 2016 até o 1º semestre de 2019, além dos levantamentos da velocidade dos veículos, da umidade relativa do ar, da

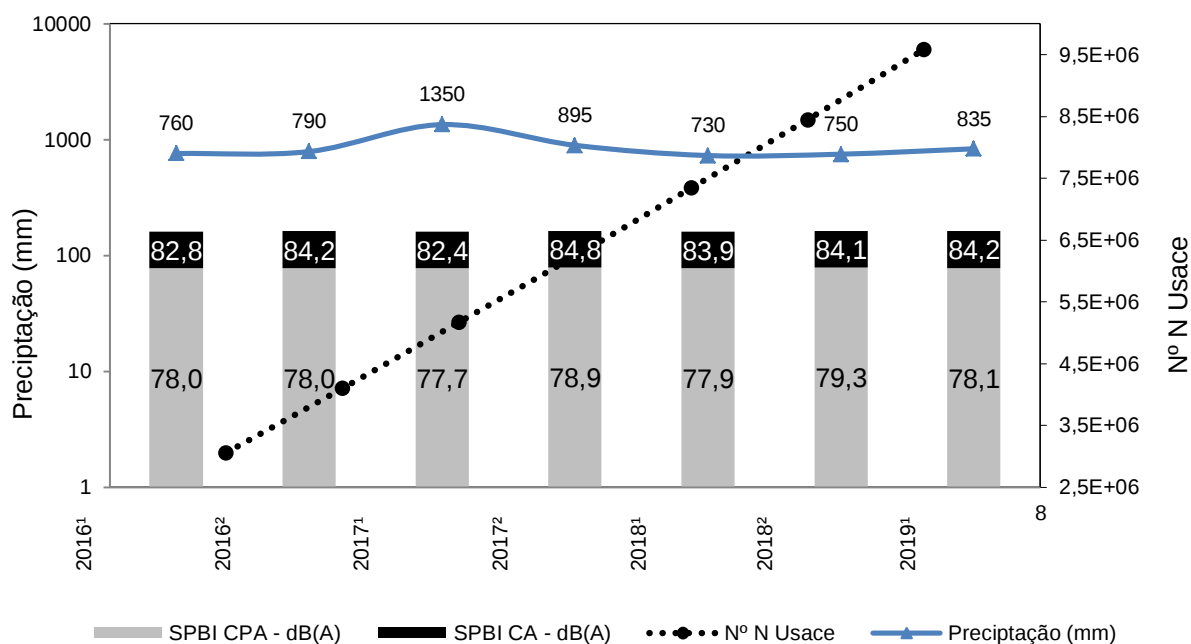
velocidade do vento e da temperatura ambiente. Também, para se atender os requisitos da norma ISO 11819-1, as velocidades médias de todos os veículos estavam entre 50 e 80 km/h, garantindo, conforme Hanson et al. (2005), que o principal componente do NPS medido é devido a interação pneu-pavimento, e ainda, que as diferenças entre as velocidades foram compensadas por efeito estatístico proposto no método utilizado.

Conforme a Figura 13, o tipo de revestimento causa modificações expressivas no ruído resultante. Quando se compara as médias dos dois semestres de cada ano do CA, ao longo dos 4 anos avaliados, tem-se: em 2016, SPBI = 83,5 dB (A); em 2017, SPBI = 83,6 dB (A); em 2018, SPBI = 84,0 dB (A); e finalmente, apenas no primeiro semestre de 2019, SPBI = 84,2 dB (A). Já para o pavimento em CPA apresenta-se essas médias, em 2016, SPBI = 78,0 dB (A); em 2017, SPBI = 78,3 dB (A); em 2018, SPBI = 78,6 dB (A); e também, apenas no primeiro semestre de 2019, SPBI = 78,1 dB (A), mantendo estatisticamente, em todos os casos, o mesmo índice para ambos os pavimentos.

É constatada uma relação de proporcionalidade direta entre o tipo de pavimento, devido também as suas características superficiais e internas (porosidade), e o nível de pressão sonora obtido, com diferenças no SPBI dos pavimentos em CA e CPA chegando à aproximadamente 6,0 dB (A).

Apresenta-se também, na Figura 12, a precipitação média semestral com dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Como não houve redução da eficiência do CPA ao longo do tempo acredita-se que o volume de precipitação possa ser o principal fator responsável pela limpeza dos poros da CPA, mantendo o baixo valor de SPBI mesmo com o trecho da BR-158 possuindo 5 anos de abertura ao tráfego.

Figura 12 - Gráfico comparando o SPBI em CPA e CA da BR-158



De modo a manter sua eficiência drenante e acústica, estudos realizados na Europa, Japão e Estados Unidos da América, onde a precipitação é, via de regra, menor que no Brasil, demonstram que esta limpeza dos poros do pavimento é feita de forma artificial.

No km 522 da BR-285, onde localiza-se a CPA com mais de 15 anos de execução, encontrou-se o SPBI = 78,3 dB (A), apresentando seu pavimento de controle em CA um SPBI = 85,4 dB (A), já no km 617 da mesma rodovia onde foi avaliado a CPA com menor tempo de abertura para o tráfego, aproximadamente 2 anos, tem-se o SPBI = 77,3 dB (A), e seu pavimento de controle um SPBI = 83,0 dB (A), mantendo estatisticamente, novamente e em ambos os casos, o mesmo índice dos pavimentos avaliados na BR-158.

Destaca-se que ao caracterizar o tráfego nestas rodovias, utilizou-se o número equivalente N (número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 t) da contagem já realizada no projeto CREMA 2 (Contrato de Restauração e Manutenção 2ª Etapa) do DNIT, a qual possui o levantamento para os trechos da BR-158, através do posto de contagem 2, com um N acumulado para 5 anos, em 2019, de $9,6 \times 10^6$ (moderado volume de tráfego), e para os trechos da BR-285, através do posto de contagem 3, um N acumulado para a CPA do km 617, na ocasião com 1 ano de abertura para o tráfego, em 2017, de $2,7 \times 10^6$ (moderado volume de tráfego) e, também, para a CPA do km 522, um

N após 15 de execução, estimado, de $2,3 \times 10^7$ (alto volume de tráfego) (BRASIL, 2012; CERATTI et al., 2015).

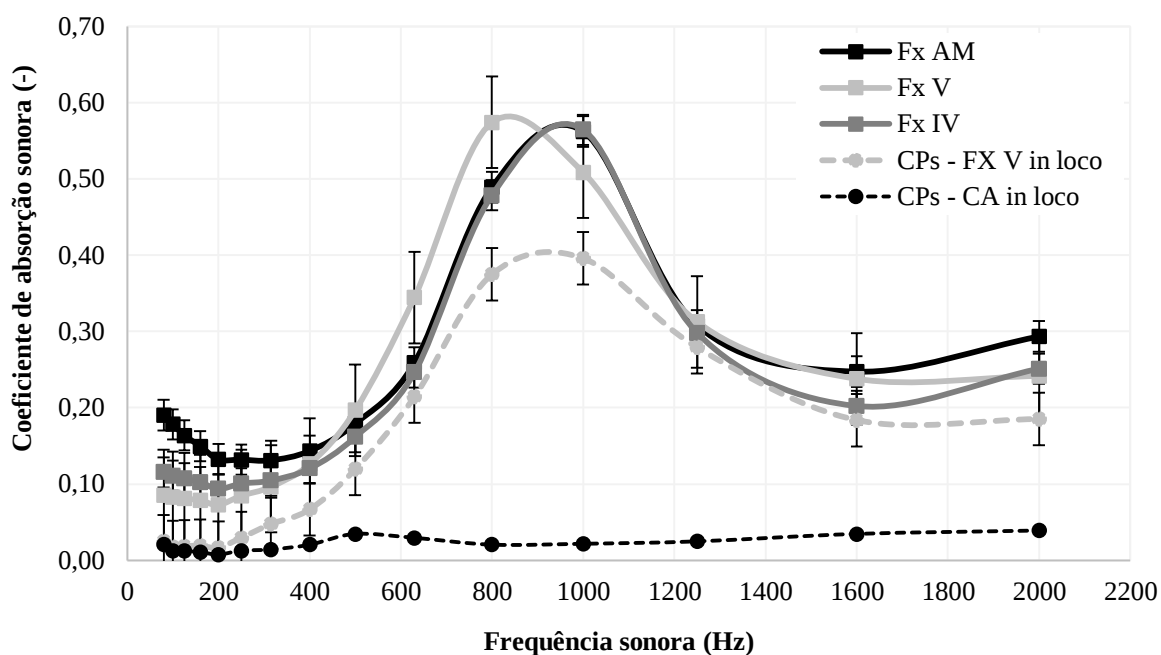
Sabe-se que o aumento de 3 dB (A) demonstra o dobro de energia sonora, e ainda, que alterações de -3 e -5 dB (A) no ruído representam 50 e 67% de perda na energia acústica, sendo esse valor bastante expressivo (USDOT/FHA,1995). A margem de erro de 1dB (A) corresponde às características do equipamento utilizado nas medições.

Paralelamente, nos ensaios em laboratório, os resultados dos coeficientes de absorção sonora apresentados para as amostras analisadas são formados pela média dos valores ensaiados em corpos de prova nas mesmas condições.

Com estes dados construiu-se o gráfico de Frequência versus Coeficiente de absorção sonora, comparando-se a absorção sonora médias, de cada tipo de material estudado (Figura 13). Através destes dados pode-se verificar o comportamento bastante semelhante entre as misturas em CPA (Fx IV e Fx V) e a mistura porosa norte-americana (Fx AM), sendo que a Fx IV apresenta o pico no coeficiente de absorção sonora, 0,56 em 1000 Hz, exatamente como acontece com a Fx AM.

Em outra análise, comparando-se a mistura em Fx V moldada em laboratório com as amostras do pavimento na mesma faixa retiradas *in loco*, observa-se uma redução no coeficiente de absorção, especialmente nas frequências de 800Hz, de 0,57 para 0,37, e 1000 Hz, de 0,51 para 0,40, respectivamente.

Figura 13 - Curva de absorção sonora média das misturas avaliadas.



Este fato pode ser justificado pelo processo de retirada dos CPs em campo, o que pode ter gerado a colmatção lateral da amostra, pois sabe-se que a remoção ocorreu no primeiro ano de avaliação e não se verificou nenhum tipo de colmatção nas medições realizadas *in loco*, as quais foram discutidas neste trabalho.

De toda forma, ao se analisar a absorção sonora dos pavimentos em CA, confirma-se que este pavimento possui um comportamento praticamente nulo em relação a este quesito.

Pode-se verificar, que independe do delinear metodológico adotado, com medidas de campo ou laboratório, as avaliações funcionais com foco na acústica de misturas tipo CPA produzidas e aplicadas no Brasil tem eficácia comprovada e podem contribuir na redução da poluição sonora, especialmente para áreas urbanas contíguas as vias de tráfego rodoviário.

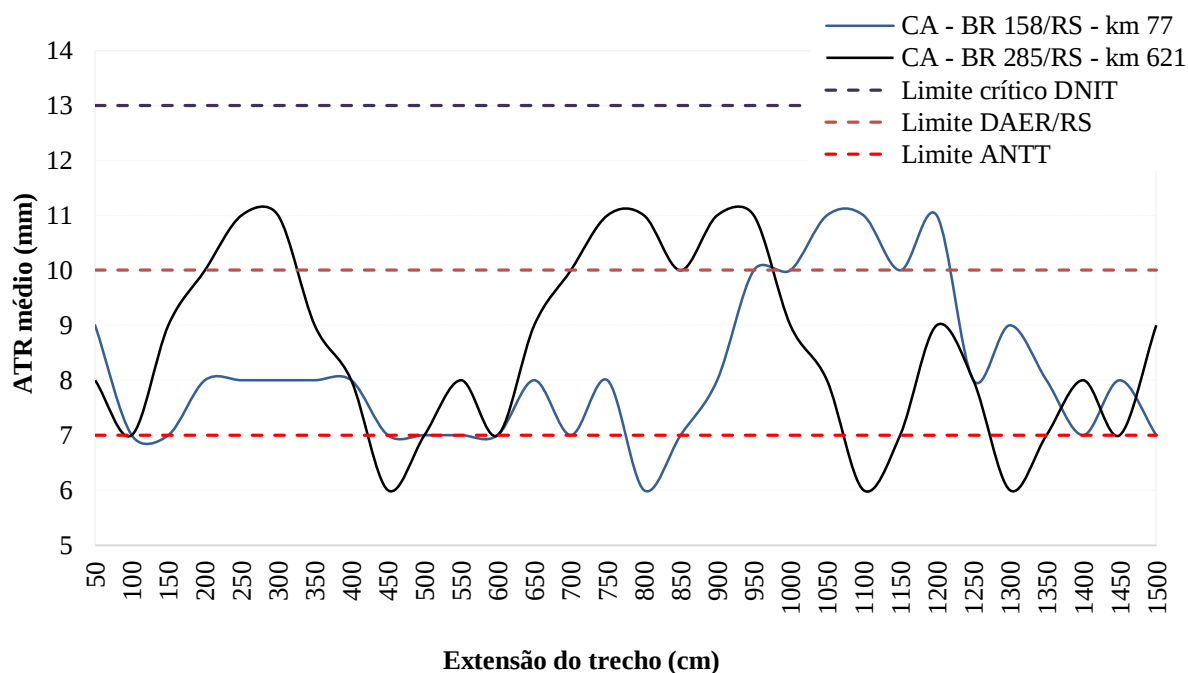
Resultado das medições de ATR em campo e laboratório

Após serem executados os levantamentos dos afundamentos em trilhas de roda, conforme padronizado na norma do DNIT 006/2003-PRO, os valores encontrados das deformações são apresentados como a média de 30 leituras de 50 em 50 centímetros efetuadas em cada trecho na trilha externa da via e em uma extensão de 15 metros, próximos ao ponto onde foram realizadas as medições do SPBI.

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), pelo seu programa de exploração de rodovias (PER), especifica 7,0 mm como limite do valor máximo de ATR. Para o Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS), em seu programa de restauração em andamento, denota que os limites de afundamentos deverão ser inferiores a 7,0 mm em 95% dos resultados e menores que 10,0 mm para 100% das medidas. Já o DNIT, para o CREMA, estabelece que 10,0 mm é o limite de flecha nas trilhas de roda para recuperação da pista, ainda apontando 13,0 mm como crítico para hidroplanagem.

Considerando-se os valores limites, foi desenvolvido um gráfico para facilitar a interpretação dos dados, assim, na Figura 14 apresentam-se os valores de ATR obtidos ao longo dos trechos em CA e CPA da rodovia BR-158 e da BR-285.

Figura 14 - ATR médio obtido com a treliça para os trechos em CA.



Os valores apresentados, as médias de ATR para cada trecho averiguado neste trabalho e levantados próximos aos pontos onde eram obtidos os dados para o SPBI, foram adquiridos no 2º semestre de 2017. Onde os trechos em CA e CPA da BR-158 possuíam um N de $6,0 \times 10^6$, os trechos da BR-285 em CA e CPA do km 617 um N de $2,7 \times 10^6$, e ainda o trecho em CPA do km 522 um N de $1,8 \times 10^7$.

Analisando o montante de dados, assim como, sabendo do limite de 7,0mm definido pela ANTT, e ainda, considerando a média dos afundamentos das trilhas de

roda da faixa de rolamento, observa-se que este é ultrapassado em quase todas as ocasiões do trecho em CA da BR-158, fato semelhante ao que acontece no trecho em CA da BR-285.

Ressalta-se igualmente, que nos três trechos de CPA, tanto o da BR-158 quanto os dois da BR-285, não apresentaram resultados de afundamentos em trilha de roda para os ensaios realizados com treliça de haste móvel central.

No intuito de ampliar as avaliações de ATR, utilizou-se também o perfilômetro inercial laser nos trechos em CA e CPA das rodovias BR-158 e BR-285, podendo assim expandir as análises sobre este parâmetro.

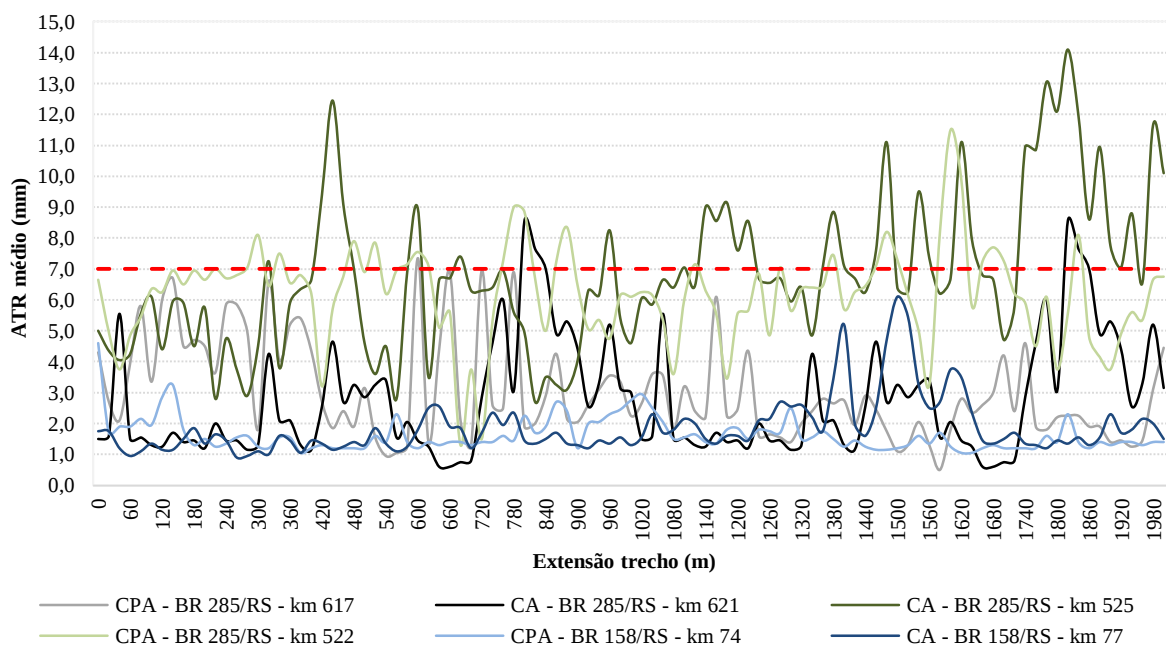
Destaca-se inicialmente, que os lasers diagonais do equipamento, utilizados na contabilização das medidas de ATR, costumam perder alguns dados no decorrer do levantamento de campo, devido à direção oblíqua com a qual o feixe laser é apontado para a superfície do pavimento.

Conforme esse feixe contata a superfície, os dados não retornam ao sensor de medição e, conseqüentemente, deixam de ser adquiridas. Assim, algumas ocorrências de ATR igual à zero em um determinado intervalo medido, podem segundo Bueno (2019), equivocadamente, indicar que não há presença de afundamentos no local; contudo, o equipamento pode não ter adquirido medidas naquele intervalo, tornando o resultado nulo.

Constata-se que, nos subtrechos em que o equipamento não conseguiu realizar a aquisição de medidas, esta fração do segmento total deve ser desconsiderada do montante de dados. Em pistas com baixa presença de afundamentos, esse resultado não costuma impactar relevantemente no resultado final; todavia, em pavimentos com trilhas de roda destacadamente altas, as alterações podem ser significativas. Nos dados levantados para este trabalho, com medições contínuas e com integração de 20 em 20 metros, este fato não foi observado.

A Figura 15 exibe os dados dos afundamentos médios, medidos com o perfilômetro inercial da UFSM, nos trechos em CA e CPA da BR-285, adquiridos no mês de novembro de 2017, e ainda, nos trechos em CA e CPA da BR-158, obtidos no mês de julho de 2019.

Figura 15 - ATR medido com perfilômetro a laser para os trechos em CA e CPA.



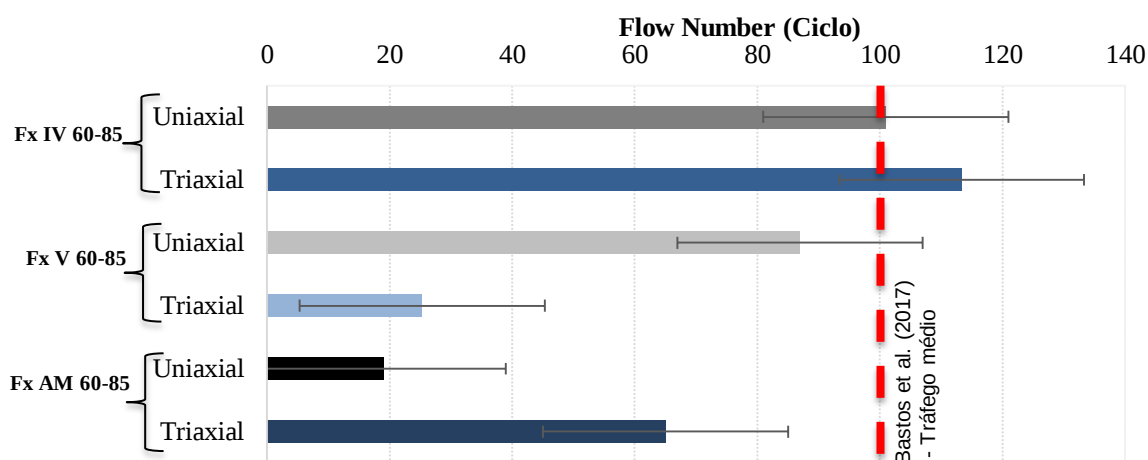
Nestes levantamentos pode-se verificar a semelhança no comportamento dos pavimentos em CA e CPA, tanto na BR-158 quanto na BR-285, e também corrobora com a avaliação de um bom desempenho em relação ao ATR das CPAs. Destaca-se ainda, que apesar do trecho em CPA do km 617 da BR-285 ter um tempo de abertura ao tráfego, aproximadamente, 10 anos menor do que o trecho em CPA do km 522 da mesma rodovia, confirmou-se que todos os trechos avaliados estão abaixo do limite de 7 mm definido pela ANTT.

Espera-se diferenças entre as medidas de ATR obtidas pelas duas metodologias usadas nesta pesquisa, já que o perfilômetro trabalha em caráter dinâmico, com o veículo em movimento, enquanto a treliça é posicionada de maneira estática, em cada ponto de medição (BUENO, 2019). Mesmo assim, entende-se que estas variações não influenciam na magnitude do resultado final, validando as medidas de ATR quantificadas tanto com o perfilômetro quanto com a treliça. Assim como verificado por Bueno (2019), de maneira geral tanto a treliça metálica quanto o perfilômetro inercial identificam adequadamente os segmentos com baixa incidência de ATR, no qual se enquadram os trechos avaliados neste trabalho. Porém, não foi possível identificar um padrão de relação entre os equipamentos, já que os pontos se distribuem de forma distinta entre estes métodos de análise.

Conjuntamente, nos ensaios em laboratório, como as misturas porosas apresentaram um baixo FN Uniaxial (sem confinamento) e bom desempenho em

campo, para um tráfego de moderado a alto, buscou-se verificar se o ensaio Triaxial (com confinamento) seria mais adequado. Neste sentido, foram moldados mais quatro CPs para cada tipo de mistura porosa e enviados para a UFC, onde o ensaio foi realizado considerando confinamento. Os resultados apresentados na Figura 16, adotando-se uma tensão de confinamento de 138 kPa, indicam que, mesmo com confinamento, os resultados de FN para as misturas asfálticas porosas apresentam valores baixos, o que não condiz, novamente, com os valores encontrados *in loco*.

Figura 16 - Comparação do Flow Number das misturas porosas



Borges (2014) comparou os resultados do ensaio TRLPD e uniaxial de carga repetida e verificou que ambos apresentaram o mesmo ranque. Esse autor indicou ainda que o ensaio TRLPD apresentou menores FNs e maiores valores de deformação quando comparado ao ensaio uniaxial, dado que as condições do ensaio confinado são mais severas. Entretanto, como os FNs para misturas porosas são bastante baixos, esse fator não pode ser claramente observado.

Considerando-se que pavimentos com FNs inferiores a 100 resistiriam apenas a um baixo volume de tráfego ($\leq 10^6$), e ainda, $100 < FN < 300$ seriam indicadas para um volume de tráfego moderado ($10^6 < N \leq 10^7$), o que denotaria que as faixas analisadas suportariam apenas um baixo volume de tráfego.

Diante do baixo valor de FN para as misturas porosas desta pesquisa, na qual ressalta-se ainda que a mistura da Fx V apresenta o menor valor entre as misturas porosas para o ensaio confinado, em contrapartida demonstra um bom desempenho à deformação permanente em campo, suportando inclusive um alto volume de tráfego.

Conclusão

O ruído causado pelo tráfego rodoviário tem se tornado um quesito de projeto de rodovias rurais e urbanas e, também, tem sido alvo de pesquisas e preocupação da sociedade como um todo. O trabalho apresentou análises a partir de medidas de NPS em trechos diferentes da rodovia BR-158 e da rodovia BR-285, em períodos ao longo de quatro anos.

Assim, com o cálculo do SPBI, foi possível verificar a importância do tipo de pavimento sobre o ruído ambiental. Esse índice é bastante adequado para caracterização do ruído, visto que a média direta dos valores medidos não ponderaria a velocidade e a composição de tráfego de cada via.

Os pavimentos em CA, da BR-158, foram os revestimentos que apresentaram os maiores valores de ruído, com uma média ao longo dos quatro anos para o SPBI de aproximadamente 84 dB (A), sendo que os pavimentos em CPA apresentaram menores valores, aproximadamente 78 dB (A), mantendo-se constante ao longo do tempo.

Mesmo se considerando o trecho mais antigo, no km 522 da BR-285, onde localiza-se a CPA com mais de 15 anos de execução, encontrou-se um SPBI próximo de 78 dB (A), dentro da margem de erro do sonômetro utilizado nas medições (± 1 dB (A)), igualmente, quando comparado com o trecho mais recente, no km 617 da BR-285, aproximadamente 3 anos de abertura para o tráfego, que por sua vez possui um SPBI perto de 77 dB (A).

Desta forma, pode-se verificar que o comportamento da CPA na redução de ruídos apresenta diferenças de valores com os revestimentos de CA que chegam a 6,0 dB (A), o que representa perda na energia acústica acima de 50%. Fato que se mantém ao longo de sua vida útil, com a limpeza dos poros, possivelmente, através dos períodos chuvosos das regiões onde estão inseridos os trechos avaliados, o que evita sua colmatação.

Finalmente, ao se avaliar a deformação permanente de misturas asfálticas porosas, a presente pesquisa utilizou as medidas com a treliça de haste móvel central, as avaliações com perfilômetro inercial laser, e ainda, os resultados dos ensaios uniaxial e triaxial de carga repetida.

Destaca-se aqui que, tanto o km 522 da BR-285 (CPA Faixa V e N $\cong 1,9 \times 10^7$) apresentando aproximadamente 15 anos de abertura de tráfego quando dos levantamentos em campo do ATR, quanto o km 617 (CPA Faixa V e N $\cong 6,2 \times 10^6$) da mesma rodovia, com aproximadamente 2 anos de execução, e, da mesma forma, a CPA

da BR-158 (CPA Faixa V e $N \cong 9,6 \times 10^6$) com cerca de 5 anos de abertura ao tráfego, são trechos com volume de tráfego alto ou moderado.

Apesar disso, estas CPAs não obtiveram deformações computáveis para medidas com a treliça de haste móvel central, e mesmo nas avaliações com perfilômetro inercial laser, apresentaram ATRs menores que 7 mm (limite da ANTT) em todos os segmentos analisados, sendo seus resultados superiores aos trechos de controle em CA.

Finalmente, identificou-se, a partir do ensaio com três amostras de cada uma das misturas porosas (CPA Faixa IV, CPA Faixa V e Faixa AM), o comportamento quanto à deformação permanente através de ensaios confinado e não confinado. Considerando-se os critérios de FN em função do tráfego, as faixas analisadas suportariam apenas um baixo volume de tráfego. Porém verificou-se seu comportamento em campo, sem grandes deformações, até altos volumes de tráfego.

Ressalta-se que estes valores de FN são inferiores inclusive para misturas modificadas por polímero, onde se enquadram as CPAs deste estudo. Destacando-se, finalmente, a necessidade de um estudo mais aprofundado da utilização do parâmetro FN, obtido pelos ensaios uniaxial e triaxial de carga repetida, como critério para deformação permanente em misturas asfálticas porosas tipo CPA, onde o esqueleto mineral e o polímero modificado são importantes fatores a serem considerados nos resultados de ATR.

Referências

- ALVAREZ, A. E.; MARTIN, A. E.; ESTAKHRI, C. **A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures**. Construction and Building Materials. Volume 25, issue 3, p. 1159-1166, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181000471X?via%3Dihub>>. Acesso em: 14 jan. 2020.
- ALVES, A. **Comportamento Mecânico e Funcional de Misturas Asfálticas Porosas**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC). Santa Maria, RS. 2019. 213 p.
- ALVES, A.; SPECHT, L. P.; DRESCH, F.; SANTANA ECHEVERRIA, J. A. **Estudo acústico de tráfego rodoviário rodante sobre pavimentos em concreto asfáltico e com camada porosa de atrito na rodovia BR 158/RS**. Revista Transportes, v.26. 2018. 16p.
- ALVES, A.; SPECHT, L. P.; DRESCH, F. **Análise do desempenho acústico de pavimentos em CPA na rodovia BR158**. 22º Encontro Asfalto. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP). 2016. 10p. Disponível em: <https://consulta-biblioteca.ibp.org.br/scripts/bnportal.exe/upload?arquivo=29169&cod_fonte=36368>. Acesso em: 14 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16505: Misturas asfálticas - **Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida**. Associação Brasileira de Normas Técnicas /Organismo de Normalização Setorial de Petróleo (ABNT/ONS-034), 2016. 9 p.

ASTRANA JÚNIOR, C. A. L. **Estudo da absorção sonora e permeabilidade de concretos asfálticos drenantes**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEC/UFSC). Florianópolis. 2006. 155 p.

BENDTSEN H., RAABERG J. French Experiences on Noise Reducing Thin Layers. Denmark. 2006. 36 p. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/843609>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010. 504p.

BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2014. Disponível em: <www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/11168/1/2014_dis_rlborges.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2020.

CALLAI, S.C. **Perfil de influência da poluição sonora em rodovias**. Ijuí, RS. Monografia. 57 p. 2008.

CAMOMILLA, G., LUMINARI, M. **Silent Road for Urban and Extra-Urban Use: The innovative resilient and resonant pavements**, proceedings of the 5th symposium on pavement surface characteristics. Toronto, Canada. 2004.

CERATTI, J. A. P. et al. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015. 144 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. 1999a. 228 p. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-anuais/manuais/documentos/706_manual_de_projeto_geometrico.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.

_____. DNER ES 386. **Pavimentação - pré-misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito**. Rio de Janeiro, 1999b, 15 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dner-es386-99.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Relatório dos levantamentos funcionais das rodovias federais**. Brasília, 2013. 26p. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/relatorio-sgp-2012-2013-brasil.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2020.

_____. DNIT. Manual de estudos de tráfego. Publicação IPR - 723. Rio de Janeiro, 2006. 388 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/manual_estudos_trafego.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2020.

FRANK, R. **Rodoanel terá camada porosa de atrito para reduzir poluição sonora**. Tecnologia & Materiais. Solução asfáltica desenvolvida pelo IPT será aplicada no

trecho Oeste, junto com barreiras acústicas. 2009. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/tecnologia-materiais/rodoanel-recebera-camada-porosa-de-atrito-para-reduzir-poluicao-sonora-130303-1.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

HANSON, D. I., DONAVON, P., JAMES, R. **Tire/pavement noise characteristics for HMA pavements**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. v.74, p.1-38, 2005.

HALSTEAD, W. **Open-Graded Friction Courses for Highways**. NCHRP Synthesis 49. TRB, National Research. Council, Washington, D.C. 1978.

HUBER, G. **Performance Survey on Open-Graded Friction Course Mixes**: Synthesis of Highway Practice 284. TRB, National Research Council, Washington, D.C. 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11819-1: **Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise** - Part 1: Statistical Pass-By method. Reviewed and confirmed in 2013. Genebra. 1997. 27p.

_____.ISO 10534-2: **Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes** - Part 2: Transfer-function method. Reviewed and confirmed in 2015. 1998. 27p.

JOLIET, Y.; MALLOT, M. **Precautions when interpreting rutting results from the LCPC traffic simulator**, 2º Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, 2000.

KANDHAL, P. S.; COOLEY, L. A. Jr. Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. NCHRP Report 508. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 2003. 116p. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_508.pdf>. Acesso em: 08 maio 2020.

KNABBEN, R. M. **Desenvolvimento do Trailer-CPX e de uma Mistura Asfáltica de Baixa Emissão De Ruído Pneu-Pavimento**. Tese de doutorado da Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PPGE. Florianópolis. 2017. 372p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/181238>>. Acesso em: 08 maio 2020.

LÁO, V. L. E. S. T. **Estudo comparativo do desempenho acústico de diferentes tipos de revestimento dos pavimentos**. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. 2004. 266p.

MEDINA, M. O.; GONZALES, A. E.; PAIXÃO, D. X. **Ruído e Cidade**: a necessidade de uma convivência harmônica. In: Martha Orozco Medina e Alice Elizabeth Gonzáles. (Org.). Ruido en ciudades latinoamericanas: Bases orientadas a su gestión. 1ed. Guadalajara - México: Orgánica editores, v. 1, 2012. 16p.

NASCIMENTO, L. A. et al. **Pavimentos silenciosos**. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36º, Curitiba, Anais. 2005. 12p.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP). **Refining**

the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice. Transportation Research Board. Washington, D. C. 2008.

PAULA, C.C.M. de; CALLEJAS, I.; DURANTE, L.; ROSSETI, K.; SILVA, D. **Pavimento poroso e vegetação:** estratégias para melhoria microclimática em áreas urbanas. In: Congresso LusoBrasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável, 7., 2016, Maceió. Anais. Maceió: UFAL - PLURIS, 2016.

PIARC (World Road Association). **Quiet Pavement Technologies.** Comité technique D.2 Chaussées routières. Technical Committee D.2 Road Pavements. 2013. 105p. Disponível em: <<https://www.piarc.org/ressources/publications/7/19692,2013R10-EN.pdf>>. Acesso em: 11 maio 2020.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação asfáltica:** conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos. 1.ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2015. 269p.

SANS. **Evaluación del Ruido de Rodadura en Carreteras.** UCLM. Ciudad Real. 2006.

SMITH, H. **Performance Characteristics of Open-Graded Friction Course.** NCHRP Synthesis 180. TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1992.

SPECHT, L. P. et al. **Avaliação do ruído através do SPBI (Statistical Pass-By Index) em diferentes pavimentos.** Revista Escola de Minas. 2009. 7p.

TIWARI, V.; SHUKLA, A.; BOSE, A. **Acoustic properties of cenosphere reinforced cement and asphalt concrete.** Article in Applied Acoustics 65(3):263-275. 2004. 13p.

WATSON, D. et al. **Performance-Based Mix Design for Porous Friction Courses.** NCHRP Research Report 877. Washington, DC: The National Academies Press. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2018. 142p. Disponível em: <<https://doi.org/10.17226/25173>>. Acesso em: 8 jul. 2020.

WERNECK, D. **Estratégias de Mitigação das Ilhas de Calor Urbanas:** Estudo de Caso em Áreas Comerciais em Brasília - DF. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. 2018, 118p.

WITCZAK, M. W. et al. **Simple performance test for superpave mix design.** NCHRP Report 465. National Research Council, Transportation Research Board. Washington, D.C, 2002. 114p. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_465.pdf>. Acesso em: 11 maio 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Burden of disease from environmental noise:** Quantification of healthy life years lost in Europe. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2011. 126p. Disponível em: <http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf>. Acesso em: 11 maio 2020.