

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA) NO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA (DSV) EM MEIO URBANO

Renan Santos Maia
Carla Marília Cavalcante Alecrim
Verônica Teixeira Franco Castelo Branco
Flávio José Craveiro Cunto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

A utilização de revestimentos do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) em meios urbanos tem sido uma alternativa aplicada na cidade de Fortaleza-CE, quando se busca a reabilitação de revestimentos que, ao longo dos anos, tenham passado por sucessivas aplicações de Concreto Asfáltico (CA) sem a devida fresagem do revestimento antigo. A partir do estudo de caso do revestimento de uma interseção semaforizada típica de Fortaleza-CE, este artigo busca verificar o impacto da alteração da camada de revestimento com uma solução em CA desgastado para uma CPA nova na ocorrência de conflitos veiculares. Para tanto, utilizaram-se métodos de previsão do atrito pneu-pavimento, além de ferramentas de microssimulação de tráfego e de análise de indicadores de segurança, verificando-se que a adoção dessa solução pode representar uma redução superior a 100% da necessidade teórica de realização de manobras evasivas por parte dos condutores para que se evite a ocorrência de colisões traseiras.

ABSTRACT

The use of Porous Friction Courses (PFC) in urban environments has been growing as an alternative to be applied in the city of Fortaleza-CE, when replacing asphalt layers that, over the years, have undergone successive applications of Asphalt Concrete (AC) without proper milling of the old layer. From the case study of a typical signalized intersection of Fortaleza-CE, this paper aims to analyze the impact of the replacement of the superficial old AC layers to the PFC solution in urban areas concerning the occurrence of vehicular conflicts. In order to do so, methods for skid resistance prediction and computational tools for traffic microsimulation and safety analysis were used. It was verified that the adoption of the PFC solution may represent a reduction of more than 100% of the theoretical need of the drivers to perform evasive maneuvers to avoid the occurrence of rear-end collisions.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2018), os acidentes de trânsito foram responsáveis por 1,36 milhões de mortes globalmente em 2016 e são reconhecidos como um problema de saúde pública. Dentre as causas de acidentes de trânsito, sabe-se que a imprudência dos condutores é um fator contribuinte, porém de difícil modelagem. Cabe à engenharia de transportes, portanto, propor formas de mitigar as já graves implicações desses fatores comportamentais, estabelecendo intervenções que não somente contribuam para inibir o comportamento de risco, mas que ajudem a evitar o acidente, mesmo quando existem falhas neste processo de condução.

No que compete à infraestrutura de transportes, o Desempenho da Segurança Viária (DSV) está diretamente associado ao atrito desenvolvido na interface pneu-pavimento. Neste aspecto, existem revestimentos porosos cujo o objetivo é melhorar as condições de segurança do tráfego, justamente a partir do aumento do atrito pneu-pavimento e da drenagem da água superficial durante eventos de chuva. Dentre esses tipos de revestimento, está a Camada Porosa de Atrito (CPA), cujo uso em meios urbanos não é usual, porém tem sido uma alternativa aplicada na cidade de Fortaleza-CE, especialmente quando se busca a reabilitação de revestimentos com recorrente ocorrência de defeitos e que, ao longo dos anos, tenham passado por sucessivas aplicações de camadas asfálticas, em geral Concreto Asfáltico (CA), sem a devida fresagem do revestimento antigo. Tal prática, ao longo dos anos, pode comprometer, dentre outras questões,

a drenagem e o projeto geométrico das vias urbanas, tornando comum a observação de vias nas quais o pavimento se encontra a uma cota superior à das calçadas.

Segundo a Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF, 2018), as experiências realizadas na cidade com a utilização de tecnologias como a CPA e os Asfaltos Modificados por Polímero (AMP) mostrou-se satisfatória em aspectos como o desempenho mecânico (mesmo em vias de tráfego intenso e após períodos chuvosos) e também quanto à possibilidade de serem utilizados revestimentos mais esbeltos. Segundo os gestores municipais, práticas como essas tendem a ser continuadas visando à melhoria do desempenho, da qualidade e da durabilidade dos pavimentos asfálticos de Fortaleza. Cabe à academia, portanto, avaliar os impactos de tais tecnologias de maneira mais aprofundada. Tem sido, assim, uma meta do grupo de autores do presente trabalho avaliar aspectos sustentáveis relativos a diversas soluções aplicadas na pavimentação asfáltica urbana na cidade de Fortaleza, integrando análises dos custos sociais, ambientais e econômicos dos serviços de pavimentação. Como parte dos custos sociais que, de certa forma, são associados à pavimentação, estão os acidentes de trânsito.

Uma vez que o poder público apresenta uma tendência de substituição de soluções de revestimento asfáltico para a cidade de Fortaleza, dando-se preferência à utilização da CPA, este artigo científico busca, em resumo, avaliar o impacto da utilização desse tipo de mistura asfáltica no DSV, dado que a sua aplicação em meio urbano não é usual. Pretende-se, assim, avaliar como misturas desse tipo se diferenciam de soluções convencionais quanto ao atrito desenvolvido na interface pneu-pavimento e também como essas possíveis diferenças se traduzem no DSV, a partir da análise de conflitos veiculares microssimulados.

2. CAMADA POROSA DE ATRITO E CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE

Revestimentos do tipo CPA são executados com o uso de misturas asfálticas com elevada permeabilidade. A norma que especifica as características necessárias a esse tipo de revestimento é a DNER-ES 386-99 (DNER, 1999). Segundo a especificação mencionada, a mistura asfáltica deve apresentar Volume de Vazios (Vv) entre 18 e 25%, distribuição granulométrica de acordo com uma das 5 faixas normatizadas, além de espessura de revestimento inferior a 4 cm e teor de ligante entre 4,0 e 6,0%, apesar de esse valor ser muitas vezes difícil de ser alcançado, ficando entre 3,5 e 4,5%, segundo Bernucci *et al.* (2010). Além disso, há requisitos que devem ser observados referentes à resistência ao desgaste da camada, avaliada por meio do ensaio Cântabro, cuja perda de massa não deve superar os 25% e a Resistência à Tração (RT) que deve ser superior a 0,55MPa. Em suma, a CPA é um tipo de revestimento construído com a finalidade de promover a drenabilidade e aumentar o atrito desenvolvido no pavimento, sem necessariamente exercer função estrutural.

No banco de dados avaliado por Aps (2006), trechos da BR-116 executados com CPA apresentaram macrotextura grossa/muito grossa, além de microtextura rugosa/muito rugosa, avaliadas segundo os ensaios de Mancha de Areia (MA) e Pêndulo Britânico (PB), respectivamente. Em laboratório, misturas de CPA apresentaram valores relativos aos resultados dos ensaios de MA e PB superiores aos obtidos para *Stone-Matrix Asphalt* (SMA), (47% e 10%, respectivamente) e Areia Asfalto (AA) (1000% e 29%, respectivamente). De acordo com Ferraz *et al.* (2012), o aumento da rugosidade de pavimentos, mediante o recapeamento com mistura asfáltica adequada pode conduzir à redução de 5 a 10% na ocorrência de acidentes, em função do desenvolvimento de maior atrito entre os pneus e o

pavimento. Isso representaria uma maior capacidade de se realizar frenagens bruscas com segurança. Tal afirmação corrobora com o defendido por Lyon e Persaud (2008).

Uma abordagem acerca do fenômeno do atrito pneu-pavimento consiste na aplicação de modelos de previsão dessa propriedade, a partir das características dos materiais utilizados na pavimentação asfáltica (Ueckermann *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2017). No estado do Texas (Estados Unidos), Chowdhury *et al.* (2017) conduziram um estudo, utilizando dados de campo e laboratório, que estabeleceu um modelo de previsão de resistência à derrapagem, por meio do parâmetro IFI (*International Friction Index*) (Wambold *et al.*, 1995), em função da distribuição granulométrica, das propriedades de forma (avaliadas no equipamento *Aggregate Image Measurement System - AIMS*) e da resistência ao polimento dos agregados (avaliada com o uso do equipamento *Micro-Deval*), exposto nas Equações 1 e 2.

$$a_{\text{mix}} + b_{\text{mix}} = 0,33 \times \ln\left(\frac{1,43757 \times (a_{\text{TX}} + b_{\text{TX}}) + 46,8933 \times \lambda + 333,491 \times k}{2,42031 \times (a_{\text{GA}} + b_{\text{GA}})}\right) + 1,00801 \quad (1)$$

$$a_{\text{mix}} = \frac{49,3144 + \lambda}{351,289 - 0,00193 (\text{AMD})^2} \quad (2)$$

Onde: a_{mix} = IFI final;

$a_{\text{mix}} + b_{\text{mix}}$ = IFI inicial;

λ , k = parâmetros de escala e forma da Distribuição de Weibull para granulometria, respectivamente;

AMD = textura dos agregados avaliada no AIMS após 150min no equipamento *Micro-Deval*;

a_{TX} , b_{TX} = constantes de regressão para textura;

a_{GA} , b_{GA} = constantes de regressão para angularidade.

Uma vez que atrito e textura são medidos por meio de testes baseados em diferentes princípios, foi necessário o desenvolvimento de métodos de harmonização, para compatibilizar diferentes medidas em um único parâmetro. Assim, como parte de um esforço da PIARC (*Permanent International Association of Road Congresses*) para atingir o objetivo acima mencionado, o *International Friction Index* (IFI) foi proposto (Wambold *et al.*, 1995). A base do método consiste na definição dos parâmetros S_p (constante de velocidade) e F_s (valor de fricção) para estimar o coeficiente de atrito (μ) para diferentes velocidades. O DNIT (2006a), no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, prevê que, para qualquer dispositivo utilizado no país, será considerado ótimo o revestimento que apresentar μ superior a 0,30 para velocidades de 60 km/h. O manual também prevê limites para resultados obtidos em ensaios de MA e PB.

3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SEGURANÇA VIÁRIA (DSV)

Estudos para o diagnóstico das condições de segurança viária podem conter diferentes formas de abordagem. É comum a realização de estudos observacionais, baseados em bancos de dados de ocorrência de acidentes, sendo esta uma abordagem considerada reativa, com limitações que englobam problemas como a qualidade de dados e o caráter raro da ocorrência de acidentes (Hauer e Hakkert, 1989). Uma abordagem proativa pode surgir a partir conceito de *continuum* de segurança proposto por Hydén (1987), que mostra que um acidente de trânsito é resultado de uma sequência de eventos. Observa-se o acidente de trânsito em função de uma complexa série de fatores que interagem com a ocorrência de conflitos entre veículos e que podem contribuir para a ocorrência ou não do acidente. Mais precisamente, o conflito veicular ocorre

quando dois ou mais usuários do sistema viário se aproximam no tempo e no espaço, de forma que existe elevado risco de colisão caso os seus movimentos permaneçam inalterados.

Um dos primeiros modelos desenvolvidos para a avaliação de conflitos veiculares foi proposto por Cooper e Ferguson (1976), no qual, de forma simplificada, são incorporados os tempos necessário e disponível para uma travessia em interseções do tipo T, além de um fator de erro de julgamento. Modelos como o que foi previamente citado foram aprimorados ao longo do tempo, entretanto a observação de conflitos em campo ainda não é uma atividade trivial, exige treinamento dos observadores, compatibilização de julgamentos subjetivos, extensos períodos de coleta, bem como seleção de indicadores próprios, além de esforços de calibração e validação. Para superar essas limitações, a utilização da tecnologia tem se apresentado como um fator de extrema importância.

Nas décadas de 80 e 90, surgiram ferramentas de simulação computacional que, embora não originalmente concebidas para modelar a ocorrência de acidentes de trânsito, permitem a aplicação de ferramentas de detecção de conflitos veiculares, proporcionando uma abordagem desse tema de forma proativa. Assim, reduz-se a necessidade de observações em campo, por longos períodos de tempo, para a identificação e o diagnóstico de problemas de segurança viária. Ao mesmo tempo, essas ferramentas se apresentam como uma forma de superar as limitações de bancos de dados necessários à proposição de modelos de previsão de acidentes. Dentre as ferramentas de microsimulação de tráfego utilizadas na avaliação de desempenho quanto à segurança viária, destacam-se os pacotes computacionais CORSIM, SIMTRAFFIC, VISSIM, HUTSIM, *Paramics*, TEXAS, AIMSUN, WATSIM e *Integration* (FHWA, 2003).

A estrutura dos programas de simulação microscópica de tráfego como o VISSIM (PTV Group) incorpora dois tipos de componentes, os não comportamentais (rede viária e controle de tráfego) e os comportamentais (modelos de corrente de tráfego – *car following*, mudança de faixa e aceitação de brecha). Além das ferramentas de microsimulação, faz-se necessária uma avaliação dos indicadores mais apropriados para a análise de segurança viária. Cunto e Loureiro (2011) revisitaram conceitos de diferentes indicadores e avaliaram a pertinência dos mesmos dentro da utilização de modelos de microsimulação, dentre eles o tempo para colisão (TTC – *Time to Collision*), tempo para o acidente (TA – *Time to Accident*), tempo de invasão (ET – *Encroachment Time*), tempo pós-invasão (PET – *Post-Encroachment Time*), tempo de brecha (GT – *Gap Time*), taxa de desaceleração para evitar a colisão (DRAC – *Deceleration Rate To Avoid The Crash*) e índice de potencial de colisão (CPI – *Crash Potential Index*).

Lyon e Persaud (2008) investigaram o impacto da melhoria na resistência à derrapagem de pavimentos na segurança de tráfego a partir de dados oriundos do estado de Nova Iorque (EUA). No citado estudo, foram identificados pontos com elevada frequência de acidentes em função da ocorrência de derrapagem em dias chuvosos, levando à adoção de um programa de manutenção viária com o intuito de recuperação da qualidade do atrito pneu-pavimento. A partir de estudos do tipo antes-depois, os autores estabeleceram um fator de modificação de colisões (CMF – *Crash Modification Factor*) de 0,799 (erro padrão de 0,028) para todos os tipos de vias e de acidentes. Tal número significa uma expectativa de redução de, aproximadamente, 20% nos acidentes previstos nos pontos em análise, o que demonstra a importância da condição de superfície na segurança viária, especialmente para a condição de pavimentos molhados.

No estudo conduzido por Costa (2017), a consideração do atrito pneu-pavimento no DSV foi feita a partir do uso de microssimulações para um ambiente urbano, com o *software* VISSIM. Os dados de conflitos veiculares foram obtidos por meio do *Surrogate Safety Assessment Model* (*software* SSAM3), que registra a ocorrência e as informações de conflitos veiculares. Medidas de macro e microtextura foram realizadas e analisadas estatisticamente ao longo do trecho, sendo convertidas para diferentes valores de μ para diferentes velocidades. Tais valores foram incorporados em um modelo de frenagem máxima disponível, por meio do indicador MADR (*Maximum Available Deceleration Rate*), que foi comparado ao indicador DRAC. Dentre os resultados obtidos pelo autor, apontou-se uma dependência do MADR à demanda veicular e ao comportamento dos condutores: quanto maior for o fluxo veicular, maiores também foram os valores médios de MADR (de 5 a 18% para diferentes cenários), dada uma redução na velocidade, que representa um aumento no valor de μ .

4. MÉTODO

4.1. Análise das condições de superfície

A obtenção dos μ relativos aos diferentes tipos de revestimentos a serem avaliados neste trabalho partiu: (i) da aplicação do modelo proposto por Chowdhury *et al.* (2017), para as condições de IFInicial/IFIfinal (antes e depois do desgaste ocorrido em campo) e (ii) dos estudos de campo realizados no ano de 2017 com o uso dos métodos de ensaio de MA e PB, expostos por Costa (2017). Inicialmente, foram comparadas diferentes soluções de misturas asfálticas de acordo com o IFInicial (Equação 1), representando o atrito medido no início da vida útil do revestimento. Em seguida, a solução com o uso da CPA em estado inicial foi comparada com as soluções relativas ao CA desgastado, representada pelo IFIfinal (Equação 2). Num terceiro momento, compararam-se as curvas de atrito relativas às soluções de CPA e CA (com a aplicação do modelo de previsão de IFInicial), avaliadas como substituição aos trechos visivelmente desgastados e recapeados avaliados por Costa (2017), com o uso dos ensaios de MA e PB. As diferentes estratégias de obtenção de valores de atrito foram harmonizadas segundo o método proposto por Wambold *et al.* (1995), sendo, posteriormente, apresentados os resultados de acordo com as curvas obtidas para μ em diferentes velocidades.

Para a aplicação do modelo proposto por Chowdhury *et al.* (2017), foram mantidas constantes, para os diferentes tipos de revestimentos, as características relativas aos agregados minerais. Selecionaram-se três agregados: (i) agregado fonolítico oriundo de britador de Mandíbulas (M); (ii) agregado fonolítico oriundo de britador de Impacto (I) e (iii) agregado granítico oriundo de britador Cônico (C), caracterizados por Diógenes (2018) e presentes em banco de dados de agregados minerais, em desenvolvimento neste grupo de pesquisa. Essa decisão permite a avaliação do impacto da distribuição granulométrica do revestimento nos resultados relacionados à segurança viária. As granulometrias selecionadas foram: (i) CA seguindo o limite superior da Faixa C (DNIT, 2006b), (ii) CA seguindo o limite inferior da Faixa C (DNIT, 2006b), (iii) CPA enquadrada dentro dos limites da Faixa II (DNER, 1999) e (iv) Areia Asfalto (AA) seguindo o limite inferior da Faixa A (DNIT, 2004). Não foi considerado o limite superior da Faixa A dada a inexistência de material retido nas peneiras de 9,50 e 4,75 mm, não havendo, portanto, correspondência dessa granulometria com as frações granulométricas avaliadas no equipamento Micro-Deval.

4.2. Microssimulação de tráfego e análise do DSV

Para análise do DSV a partir da simulação microscópica de tráfego, selecionou-se uma interseção semaforizada típica da cidade de Fortaleza-CE. Para a realização da

microssimulação, utilizou-se o *software* VISSIM (PTV Group). A etapa de calibração da simulação partiu da obtenção dos dados: (i) fluxos de saturação, (ii) proporção de movimentos, (iii) composição veicular do tráfego e (iv) velocidade desejada em fluxo livre. Os valores foram obtidos em horário de pico, em dia típico e em condições de tempo consideradas boas, porém estes também podem representar satisfatoriamente, para os fins deste trabalho, o comportamento do tráfego em condições de chuva com a presença de condutores agressivos, de acordo com o que foi observado por Costa (2017). Dados fornecidos pela Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC) foram aplicados para a consolidação de dados como geometria da via, controles semafóricos, presença de estacionamento e paradas de ônibus.

A interseção avaliada apresenta volume veicular de 904 veículos por hora (vph) na via principal e 764vph para a via secundária. A composição veicular do tráfego compreende veículos de passeio, ônibus urbanos, caminhões (padrão VUC, dadas as restrições de circulação de veículos de carga de maior porte em vias da cidade) e motocicletas. Para 600 minutos de microssimulação, foram obtidos os arquivos de trajetórias (.trj), os quais são importados no *software* SSAM3, que identifica conflitos veiculares para os limites de 1,5 s de TTC e 5,0 s de PET. A avaliação básica do DSV, neste trabalho, ocorreu pela contagem do número de conflitos em que os valores de DRAC (em função do tráfego) superam os valores de MADR (em função das condições de superfície). O DRAC pode ser calculado de acordo com a Equação 3, em que todas as variáveis podem ser obtidas a partir dos *outputs* da análise realizada no SSAM3.

$$DRAC = \frac{(V_{i,t} - V_{i-1,t})^2}{2 [(S_{i-1,t} - S_{i,t}) - L_{i-1,t}]} \quad (3)$$

Onde: $V_{i,t}$ e $V_{i-1,t}$: velocidades inicial dos veículos seguidor e líder, respectivamente;
 $S_{i-1,t}$ e $S_{i,t}$: posições dos veículos no momento do conflito;
 $L_{i-1,t}$: comprimento do veículo líder.

Para o cálculo do MADR, observa-se a presença da variável μ . Entretanto, essa não é a única variável necessária para a obtenção desse parâmetro, apresentado na Equação 4, que mostra o MADR como função, além do atrito, de: (i) coeficiente de resistência ao rolamento dos pneumáticos, (ii) inclinação da superfície e (iii) resistência aerodinâmica. O método aplicado (Canale, 1989) é o mesmo utilizado por Costa (2017), com a limitação de aplicação para veículos de 4 rodas. Dessa forma, foram filtrados os conflitos veiculares que envolvem motocicletas, sendo estes desconsiderados para efeito de análise, dada a dificuldade de se atingir uma modelagem consolidada do comportamento desses tipos de veículos em programas como o VISSIM. Na Tabela 1, apresentam-se os valores adotados para a obtenção de MADR.

$$MADR = \frac{g}{\gamma_b} \times \left\{ \mu + \left[0,01 + 0,0162 \times \left(\frac{v}{160} \right)^{2,5} \right] - \sin \theta + \frac{C_a \times \rho \times A \times v^2}{2g \times W} \right\} \quad (4)$$

Onde: g : aceleração da gravidade (m/s^2);
 γ_b : fator de influência das partes rotativas do veículo;
 μ : coeficiente de atrito;
 θ : inclinação da superfície;
 ρ : densidade do ar;
 C_a : coeficiente de arrasto;
 A : área frontal do veículo (m^2);
 v : velocidade veicular (m/s);
 W : peso do veículo (N).

Tabela 1: Parâmetros adotados para obtenção de MADR

Veículo	g (m/s ²)	γ_b	θ (°)	ρ (kg/m ³)	Massa (kg)	Ca	A (m ²)
Carro	9,81	1,04	0	1,1644	1.500	0,30	3
VUC	9,81	1,04	0	1,1644	6.000	0,50	6
Ônibus	9,81	1,04	0	1,1644	15.000	0,65	8

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Condições de superfície

A Figura 1 apresenta μ em início de vida útil, calculado a partir do modelo de Chowdhury *et al.* (2017), para diferentes velocidades, harmonizadas a partir do método IFI. Para velocidades de deslocamento inferiores a 20 km/h, todas as misturas avaliadas apresentaram μ superior a 0,40. Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006a), valores de IFI (μ a 60km/h) superiores a 0,30 são considerados “ótimos”. Em baixas velocidades, cabe ressaltar que a mistura asfáltica tipicamente utilizada para fins de recape, a Areia-Asfalto (AA), apresenta o pior desempenho quanto à previsão de atrito. Quando se avaliam maiores velocidades, acima de 40km/h, observa-se um melhor desempenho das misturas de CPA e do CA de granulometria mais graúda, independente do agregado mineral utilizado na composição da mesma. Ainda é possível observar um melhor desempenho no que concerne ao μ para os agregados graníticos, em comparação aos fonolíticos.

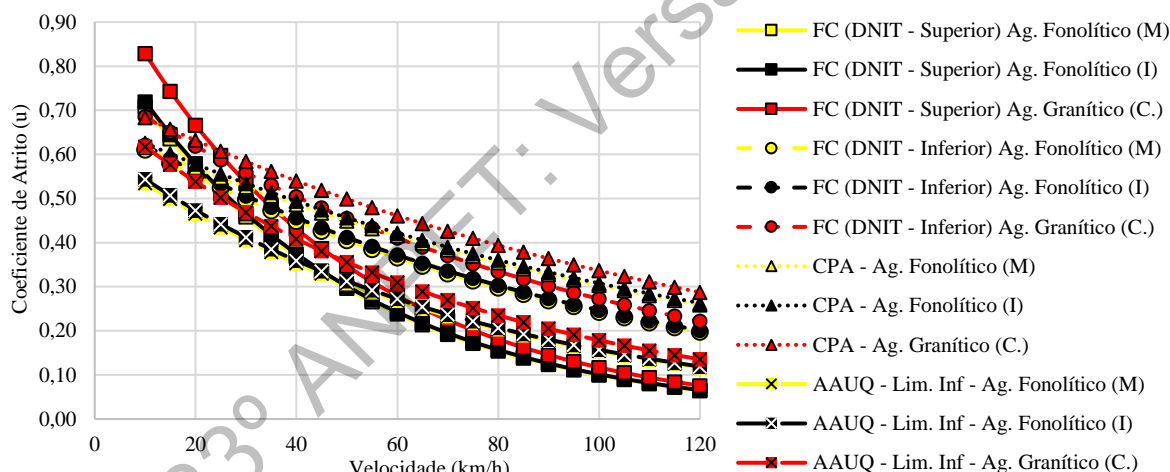


Figura 1: μ calculado a partir do modelo de Chowdhury *et al.* (2017) para diferentes misturas e velocidades

O modelo proposto por Chowdhury *et al.* (2017) também permite a avaliação de um valor de IFI final, que representa a superfície após um certo nível de desgaste, tomando como base a variável de textura dos agregados, avaliada com o uso do AIMS, após desgaste de 150 minutos no equipamento Micro-Deval, conforme mostrado na Figura 2. Comparando-se o comportamento de uma CPA recém-executada com misturas de CA após o desgaste, observou-se que o μ previsto para a CPA, em relação às misturas de CA foi de 2% a 368% superior (quanto maior a velocidade de deslocamento, para misturas no limite superior, com maior presença de agregados miúdos, da Faixa C do DNIT) e de 66 a 115% maior (quanto maior a velocidade de deslocamento, para misturas no limite inferior, com maior presença de agregados graúdos, da Faixa C do DNIT). Cabe mencionar que esta análise foi padronizada para o agregado granítico, anteriormente apresentado como o que originou maiores valores de μ .

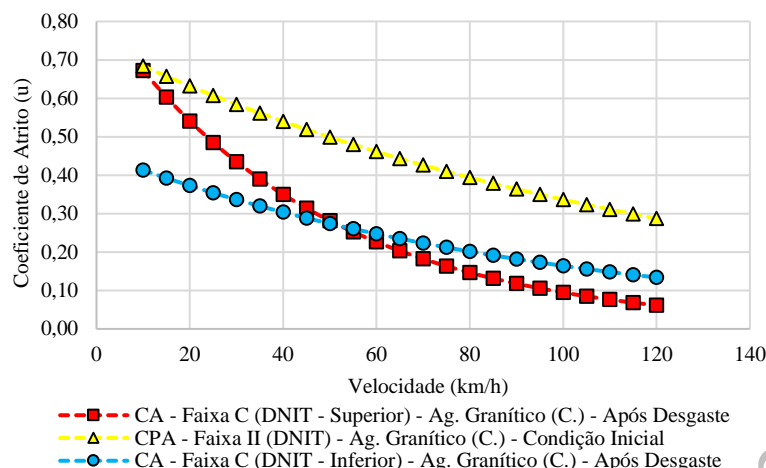


Figura 2: Comparação entre o μ previsto de misturas asfálticas de CA após o desgaste e de CPA recém-executada

Tendo como referência o atrito previsto para revestimentos do tipo CA e CPA recém executados, segundo o modelo de Chowdhury *et al.* (2017), e as análises realizadas por Costa (2017), para uma via típica da cidade de Fortaleza-CE, a partir dos ensaios de MA e PB, em trechos (i) de visível desgaste e (ii) recapeados, pode-se notar, a partir do exposto na Figura 3, que a substituição do revestimento desgastado/recapeado, avaliado em campo, por um revestimento novo composto por misturas asfálticas do tipo CA ou CPA pode representar ganhos de atrito, especialmente no caso de zonas com desenvolvimento de velocidades mais baixas, como em vias semaforizadas. A mudança desses revestimentos pode representar um aumento de 19 a 55% no μ desenvolvido no pavimento à velocidade de 10 km/h.

Em altas velocidades, a CPA se sobressai, e a adoção da solução de CA com maior percentual de agregados miúdos não é indicada, superando apenas o atrito desenvolvido em altas velocidades para trechos com recapeamento (em geral, com maiores percentuais de material miúdo). Tomando como referência a velocidade de 60 km/h, a mistura de CA com maior percentual de agregados miúdos apresenta um μ previsto 24% menor do que o medido em campo para trechos com visível desgaste, salientando-se que as formas utilizadas para a obtenção desses valores foram diferentes, porém harmonizadas de acordo com o método IFI (Wambold *et al.*, 1995). Cabe mencionar que se acredita que o μ superior a 0,30 a 60 km/h obtido para o trecho visivelmente desgastado pode ser função de uma elevada macrotextura, semelhante àquela de referência para CPA (resultado do ensaio de MA superior a 1,20 mm).

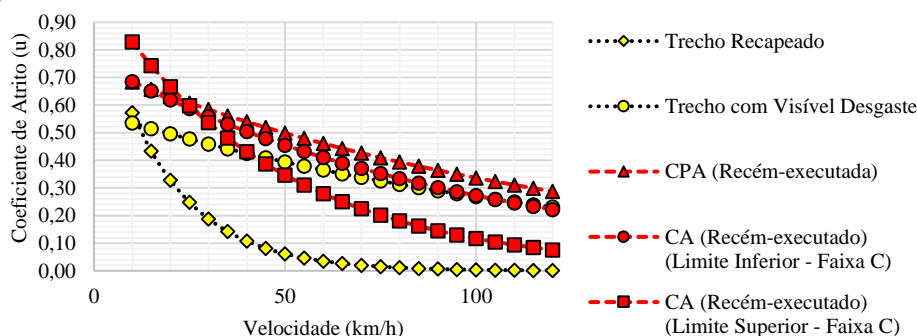


Figura 3: Comparação entre os resultados de μ obtidos por Costa (2017) e os previstos para revestimentos do tipo CA e CPA recém executados

5.2. Avaliação da segurança viária a partir de conflitos veiculares microssimulados

Para a simulação calibrada para os parâmetros anteriormente mostrados, em 600 minutos de microssimulação, foram contabilizados 2.834 conflitos, sendo 2.209 (78%) do tipo colisão traseira, para os limites de 1,5 s de TTC e de 5,0 s de PET. Dos 2.209 conflitos de colisão traseira, 1.174 acontecem com veículos de 4 rodas (automóveis, ônibus e caminhão padrão VUC). A Figura 4 apresenta uma comparação (média e 1 desvio-padrão) entre os valores obtidos de DRAC e os de MADR, comparando-se a solução da CPA recém-executada (início de vida útil) com as misturas com desgaste observadas em campo por Costa (2017) e previstas de acordo com o modelo de Chowdhury *et al.* (2017) para IFIfinal. Para todas as situações, os esforços médios de desaceleração necessários (DRAC) foram inferiores ao potencial de desaceleração disponibilizado pela superfície (MADR).

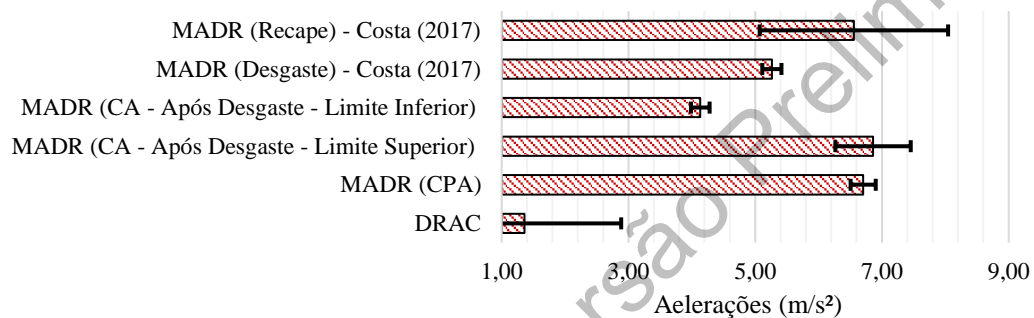


Figura 4: Comparação entre os valores médios de DRAC e MADR

No que concerne à avaliação da severidade dos conflitos a partir da observação se $DRAC > MADR$, a adoção da CPA representou uma redução na ocorrência de conflitos com necessidade de realização de manobras evasivas, quando comparadas com as soluções de CA (modeladas para IFIfinal), bem como quando comparadas com as superfícies desgastadas e recapeadas avaliadas em campo por Costa (2017). Observa-se, mais uma vez, que a condição de superfície do conjunto de materiais em estudo quando avaliados em conjunto com as simulações microscópicas não é, exatamente o mesmo comportamento daquele avaliado para uma velocidade constante de 60 km/h, valor padrão adotado na representação do IFI.

Os diferentes resultados para diferentes métodos de avaliação acontecem em virtude de os conflitos traseiros se localizarem, em geral, próximos à interseção semaforizada, nas quais os veículos estão, em geral, reduzindo a velocidade em função da parada obrigatória. Pode-se observar que a mistura de CA menos graúda, em estado pós-desgaste, apresentou DSV igual àquele obtido para uma CPA recém-executada, porém se observa que em velocidades superiores (60 km/h), conforme mostrado na Figura 5, as misturas de CA em condições mais desgastadas apresentam μ previsto a 60 km/h inferior a 0,30, condição que não seria a ideal, de acordo com DNIT (2006a).

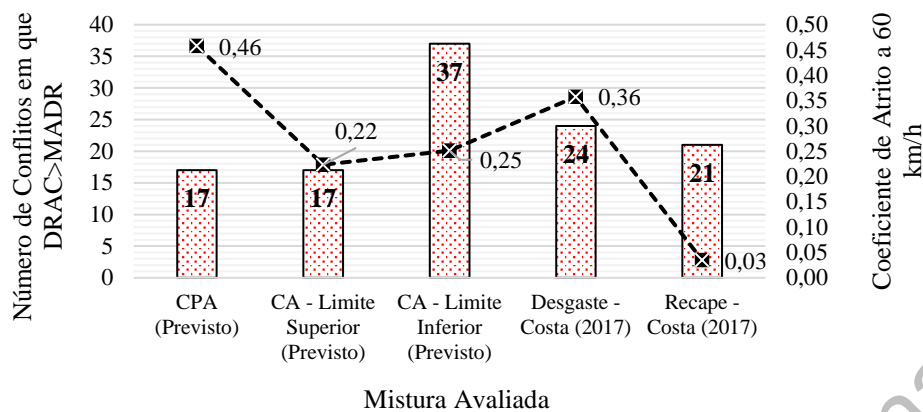


Figura 5: Número de conflitos em que $DRAC > MADR$ e μ previsto para 60 km/h.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A motivação do presente trabalho parte da utilização de revestimentos do tipo CPA em meio urbano como uma alternativa aplicada na cidade de Fortaleza-CE, especificamente para a reconstrução de revestimentos que, em processos de reabilitação, tenham passado por sucessivas aplicações de CA, sem a devida fresagem do revestimento antigo. Sabe-se que essa aplicação não é uma prática usual no Brasil. Dentre os diversos aspectos a serem avaliados, no que tange ao impacto dessa decisão nos aspectos socioambientais do meio urbano, dispôs-se aqui a avaliar a questão do DSV, uma variável dependente das condições de superfície do revestimento asfáltico, que se traduz no atrito desenvolvido na interface pneu-pavimento.

Para a realização do objetivo proposto, foram aplicados dois diferentes métodos para a obtenção de informações relativas às condições de superfície dos revestimentos avaliados: a modelagem do atrito a partir de características dos materiais e a medição dessa propriedade a partir de ensaios tradicionais realizados em campo. Além disso, utilizaram-se ferramentas de microsimulação de tráfego, avaliadas a partir do *Surrogate Safety Assessment Model (software SSAM3)*, para a análise dos conflitos veiculares. A avaliação do DSV, por sua vez, partiu da análise de conflitos veiculares em que $DRAC > MADR$, o que implica, teoricamente, na necessidade, por parte do condutor, de realizar manobras evasivas, uma vez que, nestes casos, os esforços de desaceleração necessários ($DRAC$) são superiores ao potencial de desaceleração disponibilizado pela superfície ($MADR$). As principais conclusões obtidas podem ser resumidas nos pontos a seguir:

- No início da vida útil, o atrito modelado para todas as misturas em estudo apresentou resultados satisfatórios para baixas velocidades ($\mu > 0,30$). Já para velocidades acima de 60 km/h, prevê-se melhor desempenho das misturas do tipo CPA e da mistura de CA de granulometria mais graúda, bem como dos agregados de origem granítica.
- No que tange à substituição de um CA desgastado por uma CPA nova (prática que tem se tornado recorrente na cidade de Fortaleza-CE), observou-se que a CPA pode promover maior μ que o CA, e a diferença é mais relevante quanto maiores velocidades: de 2 a 66% de diferença a baixas velocidades, enquanto para maiores velocidades essa diferença pode superar 300%, a depender da granulometria da mistura de CA.
- CA e CPA apresentaram maior μ se comparados aos trechos com desgaste visível e com recape avaliados por Costa (2017), à exceção do CA de granulometria menos graúda, que a velocidades superiores a 60km/h, apresenta μ 24% menor do que aquele obtido por Costa (2017) para trechos visivelmente desgastados. Essa constatação mostra que a recuperação

de vias urbanas com misturas asfálticas no limite superior da Faixa C (DNIT, 2006b) pode representar um investimento que se traduz em uma piora no DSV. Nesses casos, também se percebe que os trechos recapeados avaliados apresentaram o pior desempenho quanto ao μ em todas as velocidades avaliadas.

- Quanto às microssimulações de tráfego, a média de DRAC foi inferior a todas as médias de MADR (incluindo-se intervalos de 1 desvio-padrão). Quando se avalia especificamente o número de conflitos, em 600 minutos, em que $DRAC > MADR$, observa-se que esse valor pode ser reduzido em até 100% com a adoção da solução da CPA. Cabe ressaltar que, por mais que a mistura de CA com menor teor de agregados graúdos tenha apresentando o mesmo número de conflitos em que $DRAC > MADR$ em comparação à CPA, essa mistura apresenta um μ a 60km/h inferior a 0,30, o que torna essa solução menos interessante, do ponto de vista do atrito “ótimo” sugerido pelo DNIT (2006a) para essa velocidade.
- Deve-se ressaltar que o coeficiente de atrito à velocidade padrão (60 km/h) não é necessariamente um bom parâmetro para a avaliação do DSV em interseções semaforizadas, uma vez que os conflitos captados nessa condição, em geral, ocorrem em velocidades menores. Nesse tocante, a CPA e o CA de granulometria mais graúda são soluções que, em teoria, melhor equilibram os desempenhos a baixas e a altas velocidades.

Cabe mencionar o fato de que misturas do tipo CPA apresentam desempenho condicionado à colmatação de poros, assim como as misturas asfálticas em geral apresentam condições de atrito que dependem da resistência dos agregados ao polimento. É necessário, portanto, um avanço na abordagem das avaliações referentes ao atrito pneu-pavimento, de forma a considerar a mudança dessa propriedade ao longo do tempo. Para trabalhos futuros, sugere-se ainda: (i) uma maior diversificação dos métodos de previsão e medição de atrito, dada a variabilidade inerente à essa propriedade, que é apenas mitigada pela aplicação do método IFI; (ii) uma maior diversificação das condições representadas nas microssimulações, de forma a abranger diferentes condições climáticas, diferentes níveis de tráfego e diferentes tipos de via - incluindo-se as vias expressas, onde são desenvolvidas maiores velocidades.

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências CAPES e CNPq pelo apoio financeiro, à Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF) e ao Grupo de Pesquisa em Transporte, Trânsito e Meio Ambiente (GTTEMA/UFC) no auxílio prestado para a fase de realização das simulações computacionais. Os autores agradecem também ao grupo de Caracterização Avançada de Materiais para Pavimentação (CAMP/UFC), pela produção e compartilhamento do banco de dados de agregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andresen, A.; Wambold, J. C. (1999) *Friction Fundamentals, Concepts and Methodology*. Montreal, Canadá.
- Aps, M. (2006) *Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. São Paulo-SP.
- Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G.; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B. (2010) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras-ABEDA. Rio de Janeiro-RJ.
- Canale, A.C. (1989) *Automobilística: Dinâmica, Desempenho*. Livros Érica Editora Ltda. São Paulo-SP.
- Chen, B.; Zhang, X.; Yu, J.; Wang, Y. (2017) Impact of Contact Stress Distribution on Skid Resistance of Asphalt Pavements. *Construction and Building Materials*, v.133(2017), p.330–339. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.078.
- Chowdhury, A.; Kassem, E., Aldagari, S.; Masad, E. (2017) *Validation of Asphalt Mixture Pavement Skid Prediction Model and Development of Skid Prediction Model for Surface Treatments*. Report 0-6746-01-1, Project 0-6746, Texas Department of Transportation, Austin, Texas, Estados Unidos.
- Cooper, D.; Ferguson, N. (1976) A Conflict Simulation Model. *Traffic Engineering and Control*, v.17, p.306-309.
- Costa, S. L. (2017) *Influência da Aderência Pneu-Pavimento nos Conflitos Veiculares Microssimulados*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.

- Cunto, F. J. C.; Loureiro, C. F. G. (2011) O Uso da Microssimulação na Avaliação do Desempenho da Segurança Viária. *Revista Transportes*, v.19, n.3, p.5–11. DOI: 10.14295/transportes.v19i3.527.
- Diógenes, L.M. (2018) Avaliação das Relações entre Propriedades de Agregados Minerais com Base nas Características do Processo de Britagem e da Rocha de Origem. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER (1999) *DNER-ES 386/1999: Pavimentação – Pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito*. Rio de Janeiro-RJ.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT (2004) *DNIT-ES 032/2006: Pavimentos flexíveis – Areia-Asfalto a quente – Especificação de serviço*. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (2006a) *Manual de Restauração de Pavimentos*. 2ª Edição. Rio de Janeiro-RJ.
- DNIT (2006b) *DNIT-ES 031/2006: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço*. Rio de Janeiro-RJ.
- Essa, M.; Sayed, T. (2015) Simulated Traffic Conflicts: Do They Accurately Represent Field-Measured Conflicts? *Transportation Research Record*: n. 2514, p.48–57. DOI: 10.3141/2514-06.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA (2003) *Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models – Final Report Report No. FHWA-RD-03-050*.
- Ferraz, A. C. P.; Raia Júnior, A. A.; Bezerra, B. S.; Bastos, J. T.; Silva, K. C. R. (2012) *Segurança Viária*. Suprema Gráfica e Editora, São Carlos-SP.
- Hauer, E.; Hakkert, A. S. (1989) The Extent and Implications of Incomplete Accident Reporting. *Transportation Research Record*, n. 1185, p.1-10.
- Hydén, C. (1987) The Development of a Method for Traffic Safety Evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique. Bulletin 70, Department of Traffic Planning and Engineering, Lund University. Lund, Sweden.
- Lyon, C.; Persaud, B. (2008) Safety Effects of Targeted Program to Improve Skid Resistance. *Transportation Research Record*, n.2068, p.135–140. DOI: 10.3141/2068-15.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA (2018) <<https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-de-fortaleza-realiza-obras-de-recapamento-asfaltico-na-av-senador-virgilio-tavora>> Acesso em Julho/2019.
- Ueckermann, A.; Wang, D.; Oeser, M., Steinauer, B. (2015) A contribution to non-contact skid resistance measurement. *International Journal of Pavement Engineering*, v.16, n.7, p.646–659. DOI: 10.1080/10298436.2014.943216.
- Wambold, J. C.; Antle, C. E.; Henry, J. J.; Rado, Z. (1995) *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*. Paris, França.

Renan Santos Maia (renanmaia@det.ufc.br)

Carla Marília Cavalcante Alecrim (cmariliac.civil@gmail.com)

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

Flávio José Craveiro Cunto (flaviocunto@det.ufc.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN), Departamento de Engenharia de Transportes (DET), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará (UFC)

Campus do Pici, s/n – Bloco 703 – CEP: 60440-554 – Fortaleza, Ceará, Brasil