

AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO PARA DIFERENTES TIPOS DE PAVIMENTOS UTILIZANDO O INTERNATIONAL FRICTION INDEX (IFI)

RESUMO

A condição superficial do pavimento é um fator importante para a avaliação da segurança viária por caracterizar diretamente os níveis de atrito, que condicionam as frenagens veiculares. No intuito de padronizar os diversos indicadores de aderência, desenvolveu-se o *International Friction Index* (IFI). O principal objetivo deste método é quantificar o atrito superficial, reportando-o como um índice em escala que possa ser utilizado internacionalmente. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a aderência pneu-pavimento para diferentes tipos de pavimentos utilizados no Brasil. Para isso, consolidou-se um extenso banco de dados, obtidos a partir da revisão da literatura, de microtextura e de macrotextura, englobando aproximadamente dez técnicas diferentes de pavimentação. Desta análise, obtiveram-se curvas que correlacionam coeficiente de atrito e a velocidade, observando-se a preponderância da macrotextura do material no desempenho da aderência pneu-pavimento.

Palavras-chave: condição superficial, aderência pneu-pavimento, *International Friction Index* (IFI)

ABSTRACT

Pavement's surface condition is a key parameter to evaluate traffic safety because it directly characterizes friction levels, related to the quality of vehicular braking. Defined by both micro- and macrotexture, different techniques applied to determine skid resistance are documented in the literature. In order to standardized skid resistance, International Friction Index (IFI) was developed. Its main goal is to quantify frictional coefficient, reporting it as a single-scale indicator, which can be assessed worldwide. In this context, this paper's main objective is to assess skid resistance for different paving techniques. For that, an extent database of micro- and macrotexture was collected from the literature, counting on more than 10 different paving techniques. From this analysis, curves of frictional coefficient versus speed were plotted, observing macrotexture's preponderance on skid resistance performance.

Key-words: surface condition, skid resistance, International Friction Index (IFI)

1. INTRODUÇÃO

O atrito superficial é um dos principais componentes que condicionam o deslocamento veicular sobre os pavimentos, podendo ser considerado como um fator primário que determina a velocidade, além de auxiliar no processo de condução dos veículos. Além disso, elevados índices de aderência pneu-pavimento favorecem diretamente a segurança viária, condicionando a execução de manobras evasivas e de frenagens emergenciais. Desta forma, a qualidade da condição superficial deve ser sempre considerada em prol da mitigação dos riscos associados ao tráfego.

Os principais parâmetros avaliados para a caracterização da condição superficial de pavimentos abordados na literatura são macro e microtexturas. Segundo Wambold *et al.* (1995), a combinação de ambos os fatores, que são independentes entre si, condicionam a aderência pneu-pavimento. A macrotextura é explicada como as variações superficiais da mistura asfáltica. Já a microtextura é caracterizada pela rugosidade apresentada na superfície dos agregados que compõem a mistura asfáltica (Wambold *et al.*, 1995; Kokkalis e Panagouli, 1998; Noyce *et al.*, 2005).

Diversos ensaios e equipamentos são consolidados na literatura para quantificar ambos os parâmetros de micro e de macrotextura, passando por técnicas volumétricas, diretas e indiretas e, mais recentemente, através do uso do Processamento Digital de Imagens (PDI) (Araujo, 2014).

Diante da existência de diversos parâmetros que, em várias escalas, quantificam grandezas similares, Wambold *et al.* (1995) propuseram o uso do *International Friction Index* (IFI), cujo objetivo é reportar os resultados de macro e de microtexturas obtidos a partir dos resultados de diferentes ensaios em um único indicador, padronizado e em escala. Através do IFI, determina-se o coeficiente de atrito à velocidade padronizada de 60km/h (F_{60}), podendo este ser extrapolado para outras faixas de velocidade (Aps, 2006).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo aplicar o método do IFI para a determinação de curvas de coeficiente de atrito para diferentes técnicas de pavimentação. A partir da compilação de dados de macro e de microtexturas obtidos de diferentes estudos publicados na literatura, buscou-se identificar quais técnicas de pavimentação têm maior potencial para contribuir para a segurança viária. Além disso, por se tratarem de parâmetros independentes, buscou-se também avaliar a magnitude dos efeitos de cada um desses parâmetros na manutenção dos níveis de atrito.

2. CONDIÇÃO SUPERFICIAL E ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

A condição superficial do pavimento é o principal determinante da aderência existente na interface entre o pneu e o pavimento. Conforme o veículo percorre a via, forças de fricção, condicionadas pelo atrito, permitem que seja ofertada dirigibilidade ao automóvel, bem como capacidade de frear e de acelerar. Segundo Wambold *et al.* (1995), a aderência pneu-pavimento, principal propriedade relacionada à fricção, é condicionada pelo efeito de dois fatores distintos e independentes, macro e microtexturas, que variam a depender da origem mineralógica, das características físicas dos agregados, da dosagem da mistura asfáltica, do tipo de técnica de compactação utilizada em campo, dentre outros fatores. O primeiro fator (microtextura), relacionado à rugosidade dos agregados utilizados na pavimentação, condiciona o atrito superficial. Já o segundo (macrotextura), relacionado à textura superficial, é definido como as asperezas superficiais do pavimento causadas pelas protuberâncias dos agregados graúdos, condicionam o atrito na presença de água.

Microtextura está diretamente ligada à capacidade dos agregados em resistir aos efeitos do polimento superficial. Esta característica pode ser definida como a aspereza (ou rugosidade) superficial dos agregados, esta característica é fundamental para o desenvolvimento do atrito em baixas velocidades de rolamento. A manutenção deste parâmetro, que pode ser classificado de rugoso a polido, contribui para o aumento das forças de fricção, devido à interação da rugosidade dos agregados com os pneus, gerando as forças de adesão que compõem o atrito. Em pavimentos molhados, a microtextura tem a função de romper a película d'água existente na interface pneu-pavimento (Henry, 2000).

Macrotextura é o parâmetro principal na definição do atrito do pavimento. Esta componente é diretamente afetada pela composição granulométrica da mistura asfáltica, variando de aberta a fechada. Por exemplo, em misturas asfálticas cuja distribuição granulométrica é aberta, a grande concentração de agregados graúdos resulta em maior variação superficial da textura do compósito. Além disso, Do *et al.* (2009) apontaram que a macrotextura afeta a magnitude da redução do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de rolamento, bem como a capacidade drenante da superfície do pavimento.

A importância da macro e da microtexturas para a segurança viária está relacionada com a capacidade de executar manobras evasivas, uma vez que melhores condições de atrito fornecem maior dirigibilidade e controle ao condutor. Para baixas velocidades ($< 20 \text{ km/h}$), a magnitude da aderência pneu-pavimento é condicionada pela qualidade da microtextura, devido à maior interação da superfície do pneu com a rugosidade dos agregados. Conforme a velocidade de deslocamento aumenta, as forças de fricção tendem a diminuir por causa da perda de contato superficial, sendo agravadas em pavimentos com baixa profundidade média da macrotextura (Noyce *et al.*, 2005). A Figura 1 esquematiza as diferenças dos níveis de macrotextura, variação topográfica superficial da mistura asfáltica, e de microtextura, rugosidade ou aspereza intrínseca aos agregados, que é visualmente imperceptível (Noyce *et al.*, 2005).



Figura 1: Níveis de micro e de macrotexturas (Elaborado pelo Autor, 2016)

Do *et al.* (2009) apontaram diversos fatores que comprometem a aderência pneu-pavimento, dentre eles está o efeito da exposição ao tráfego. Segundo os autores, os esforços horizontais sofridos pelos pavimentos, resultante do rolamento dos pneumáticos na superfície, *a priori*, removem a película de ligante asfáltico e, *a posteriori*, iniciam o polimento das faces expostas dos agregados. Araujo (2014) verificou que o desgaste na superfície dos pavimentos gera inicialmente a redução da rugosidade superficial e, posteriormente, contribui para a degradação da macrotextura.

Outro fator redutor da aderência pneu-pavimento abordado na literatura é a presença de contaminantes, como areia, poeira ou óleo, e a presença de películas d'água na superfície da via. Kokkalis e Panagouli (1998) constataram que a redução do atrito superficial, mesmo em pavimentos com condições adequadas de macro e de microtextura, varia de 15 a 20%, podendo reduzir em até 50% na presença de lâminas d'água no pavimento. Do *et al.* (2014) conduziram estudos em laboratório para avaliar os efeitos da contaminação por agregados muito finos (poeira) no atrito superficial, a fim de captar a variação nos três períodos: estiagem, chuva e estiagem. Na análise, para o pavimento seco, os autores verificaram uma redução do coeficiente de atrito na ordem de 0,15 na condição superficial limpa e contaminada. No início do período de pavimento seco, a redução do atrito atingiu até 0,30; porém, observou-se uma recuperação de 0,05 do coeficiente de atrito, sendo atribuída à remoção do contaminante pela água.

3. INTERNATIONAL FRICTION INDEX (IFI)

Dada a importância da macro e da microtexturas para a aderência pneu-pavimento, Wambold *et al.* (1995) propuseram o uso do IFI (ASTM E1960-07, 2011), através de um experimento internacional de comparação e de harmonização de métodos e de medidas de textura e de atrito.

Basicamente, o IFI pretende reportar em um único valor, padronizado e em escala, as magnitudes de macro e de microtexturas.

Diante da existência de diversos ensaios consolidados na literatura para quantificar ambos os parâmetros de textura, Aps (2006) compilou resultados de sete e de onze ensaios comumente utilizados para medir macro e microtextura, respectivamente. Um método que possibilite a comparação, na mesma magnitude e escala, de diferentes condições superficiais é útil, uma vez que estes resultados, obtidos em campo, são corrigidos por constantes de regressão a depender do tipo de ensaio empregado.

Para se determinar o valor do IFI, necessita-se, inicialmente, realizar medidas de atrito (FR) e de textura (T_X) no pavimento. Assim, como primeiro passo, busca-se estimar a constante de referência da velocidade (S_P), a qual representa a influência da velocidade, expressa em km/h (Equação 1). Este valor resulta da correção por constantes de regressão, a e b , do valor de macrotextura obtido, a depender do ensaio empregado. Wambold *et al.* (1995), Aps (2006) e ASTM E1960-07 (2011) apresentam, por tipo de ensaio, os valores de a e b . Em seguida, tem-se o ajuste do valor do atrito (FR_S), medido para uma velocidade específica S (km/h), para a velocidade comum de $60 km/h$. Neste ajuste, utiliza-se o valor de S_P (Equação 2), reportando-se o valor do atrito do próprio equipamento convertido para a velocidade de $60 km/h$ (FR_{60}).

Aps (2006) afirma que, com a intenção de obter um índice válido para os diversos equipamentos e ensaios empregados, foi necessário fixar um valor real de atrito. Segundo a citada autora, utilizou-se uma curva de referência com esta finalidade, combinando os resultados de atrito superficial em diferentes faixas de velocidade, obtidos através dos diversos equipamentos utilizados por Wambold *et al.* (1995). Assim, como última etapa da harmonização, o coeficiente de atrito à velocidade de $60 km/h$ (F_{60}) na curva de referência é estimado através de regressão linear, a partir de FR_{60} e T_X , cujas constantes de calibração, A , B e C , são próprias dos equipamentos e testes utilizados (Equação 3). O IFI permite, ainda, a determinação do coeficiente de atrito padronizado para diferentes velocidades (F_S). A Equação 4 apresenta o cálculo para a determinação do F_S a partir do ajuste do coeficiente de atrito F_{60} .

$$S_P = a + b \cdot T_X \quad (1)$$

$$FR_{60} = FR_S \cdot e^{[(S-60)/S_P]} \quad (2)$$

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot T_X \quad (3)$$

$$F_S = F_{60} \cdot e^{[(60-S)/S_P]} \quad (4)$$

Fuentes *et al.* (2012) conduziram um estudo com o objetivo de identificar as limitações do modelo do IFI, focando na sensibilidade do parâmetro da constante de referência da velocidade (SP) com a macrotextura. Foram conduzidos ensaios da condição superficial de pavimentos em condição extremas – macrotextura variando de $0,16$ a $2,50 mm$. Os autores identificaram que o parâmetro SP não se correlacionava com pavimentos cuja macrotextura era superior a $1,50 mm$, sugerindo este valor como limite superior para a aplicação do método do IFI.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 2 sintetiza o método utilizado pelos autores para o desenvolvimento do presente trabalho. Ao todo, três etapas foram desenvolvidas para atingir o objetivo principal desta pesquisa: *i*) elaboração do banco de dados, com a classificação de ambos os parâmetros superficiais e aplicação de análise estatística descritiva das amostras; *ii*) aplicação do IFI e classificação do indicador, além de eliminar valores inconsistentes; e *iii*) determinação das curvas de atrito *versus* velocidade, interpretando os resultados obtidos.

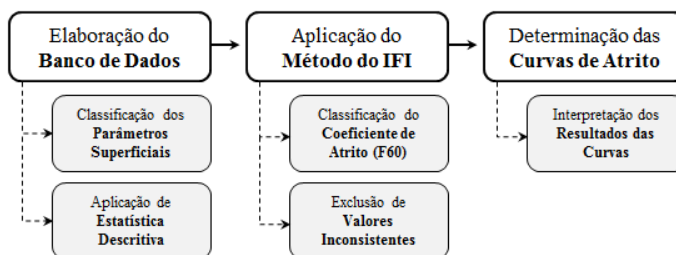


Figura 2: Fluxograma do método adotado

Como primeira etapa da pesquisa, buscou-se na literatura técnica variados estudos que avaliaram a condição superficial, os quais reportaram dados de macro e de microtexturas, bem como as técnicas aplicadas. Desta forma, consolidou-se um extenso banco de dados, contendo referências bibliográficas, técnica de pavimentação utilizada e os ensaios executados para quantificar a macro e a microtexturas, bem como os resultados encontrados. No mesmo banco de dados, os resultados foram classificados pelas faixas propostas pelo DNIT (2006) e por Aps (2006) (Tabela 1), para micro e para macrotexturas, respectivamente.

Tabela 1: Faixas de classificação de microtextura (DNIT, 2006) e de macrotextura (Aps, 2006)

| Microtextura [BPN] (DNIT, 2006) | | Macrotextura [mm] (Aps, 2006) | |
|---------------------------------|-----------|-------------------------------|---------------|
| Classificação | Faixa | Classificação | Faixa |
| Perigosa | < 25 | Muito Fechada | ≤ 0,20 |
| Muito Lisa | ≥ 25 < 31 | Fechada | > 0,20 ≤ 0,40 |
| Lisa | ≥ 31 < 40 | Medianamente Fechada | > 0,40 ≤ 0,60 |
| Insuficientemente Rugosa | ≥ 40 < 46 | Média | > 0,60 ≤ 0,80 |
| Medianamente Rugosa | ≥ 46 < 54 | Medianamente Grossa | > 0,80 ≤ 1,00 |
| Rugosa | ≥ 54 < 75 | Grossa | > 1,00 ≤ 1,20 |
| Muito Rugosa | ≥ 75 | Muito Grossa | > 1,20 |

O uso da estatística descritiva da amostra dos parâmetros de condição superficial buscou verificar o comportamento médio (média amostral) e de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação) das amostras, além de identificar se os resultados estariam vinculados ao propósito dos diversos tipos de materiais avaliados – por exemplo, esperou-se constatar que misturas asfálticas abertas, como a Camada Porosa de Atrito (CPA), apresentassem elevados índices de macrotextura.

A posteriori, a partir das técnicas empregadas na determinação dos parâmetros de condição superficial e dos seus respectivos resultados, aplicou-se o método IFI (Wambold *et al.*, 1995) para a determinação do coeficiente de atrito à velocidade de 60 km/h (F_{60}) e da constante de

referência da velocidade (S_p). Os resultados de F_{60} foram classificados pelas faixas propostas por Aps (2006) (Tabela 2). Seguindo os resultados publicados por Fuentes *et al.* (2012), observações cujo resultado de macrotextura fosse superior a 1,50 mm foram descartadas do banco de dados.

Tabela 2: Classificação qualitativa do índice F_{60} (Aps, 2006)

| Classificação | Ótimo | Muito Bom | Bom | Regular | Ruim | Muito Ruim | Péssimo |
|---------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|
| Faixa | > 0,35 | ≤ 0,35 > 0,21 | ≤ 0,21 > 0,14 | ≤ 0,14 > 0,11 | ≤ 0,11 > 0,08 | ≤ 0,08 > 0,05 | ≤ 0,05 |

No intuito de obter curvas de atrito superficial *versus* velocidade, aplicou-se outra etapa do método IFI (Equação 4), no qual é possível determinar o coeficiente de atrito para o mesmo par de informações de macro e de microtexturas em várias faixas de velocidade. Desta forma, foram utilizados incrementos de 5 km/h, partindo da velocidade inicial de 5 km/h até 60 km/h.

Pelo conceito físico do coeficiente de atrito, sabe-se que μ se trata de uma relação entre a força resistente ao movimento (força de atrito) e a força normal, assim μ varia entre nulo, para uma superfície perfeitamente lisa (teórica), e 1,0, para uma superfície bastante áspera e rugosa. Desta forma, valores de atrito superiores a 1,0 para a velocidade de 5 km/h foram excluídos da amostra por terem sido considerados inconsistentes.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, os resultados obtidos nas três etapas metodológicas propostas foram apresentados e discutidos. A estruturação da seção foi dividida em: *i*) Análise da Base de Dados; *ii*) Análise da Aplicação do Método do IFI; e *iii*) Análise das Curvas de Atrito.

5.1. Análise da Base de Dados

Na base de dados, observaram-se 11 técnicas de pavimentação: Concreto Asfáltico convencional usinado a quente (CA); CA com adição de Borracha (CA-B); CA com MicroFresagem (CA-MF); Camada Porosa de Atrito (CPA); Concreto de Cimento Portland (CCP); CA com *Grooving* (G); CA com *Grooving* Emborrachado (G-E); MicroRevestimento asfáltico (MR); *Stone Matrix Asphalt* (SMA); Tratamento Superficial Duplo (TSD); e Tratamento Superficial Simples (TSS). Para todos os 537 pares compilados, os índices de macro e de microtexturas foram obtidos através dos ensaios de mancha de areia (HS) e de pêndulo britânico (BPN). A Tabela 3 sumariza os resultados obtidos da estatística descritiva dos dados. As Figuras 3 e 4 apresentam a plotagem dos valores médios de micro e de macrotextura para cada técnica de pavimentação, considerando dois desvios-padrão. Nos gráficos, foram incluídas as faixas de classificação qualitativa propostas pelo DNIT (2006) e por Aps (2006).

Tabela 3: Estatística descritiva dos dados para cada tipo de técnica de pavimentação

| Técnica Pavimentação | CA | CA-B | CA-MF | CPA | CCP | G | G-E | MR | SMA | TSD | TSS | |
|---------------------------|-----------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tamanho Amostral | 231 | 6 | 6 | 6 | 11 | 80 | 65 | 25 | 45 | 56 | 6 | |
| Microtextura (BPN) | \bar{x} | 60,2 | 37,3 | 56,5 | 55,8 | 57,3 | 99,6 | 61,8 | 52,9 | 47,7 | 58,2 | 59,0 |
| | S_d | 12,9 | 6,6 | 9,6 | 8,2 | 7,1 | 13,2 | 11,6 | 5,1 | 9,9 | 10,4 | 1,1 |
| | CV(%) | 21 | 18 | 17 | 15 | 12 | 13 | 19 | 10 | 21 | 18 | 2 |
| Macrotextura (HS) | \bar{x} | 0,42 | 0,40 | 0,89 | 1,40 | 0,33 | 1,34 | 0,78 | 0,67 | 0,81 | 1,33 | 0,81 |
| | S_d | 0,16 | 0,05 | 0,18 | 0,32 | 0,11 | 0,14 | 0,14 | 0,20 | 0,20 | 0,42 | 0,16 |
| | CV(%) | 39 | 13 | 20 | 23 | 32 | 10 | 18 | 29 | 25 | 32 | 20 |

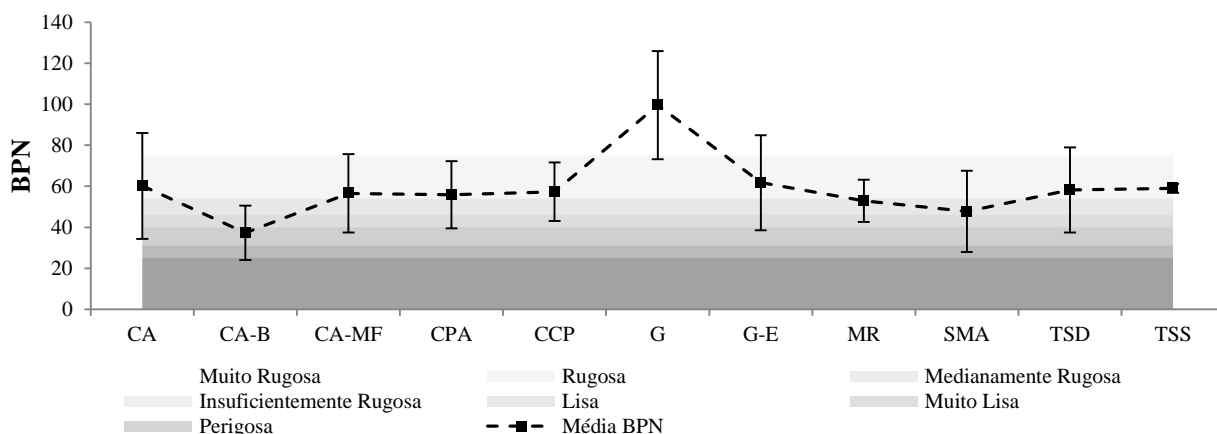


Figura 3: Curva dos valores médios de BPN

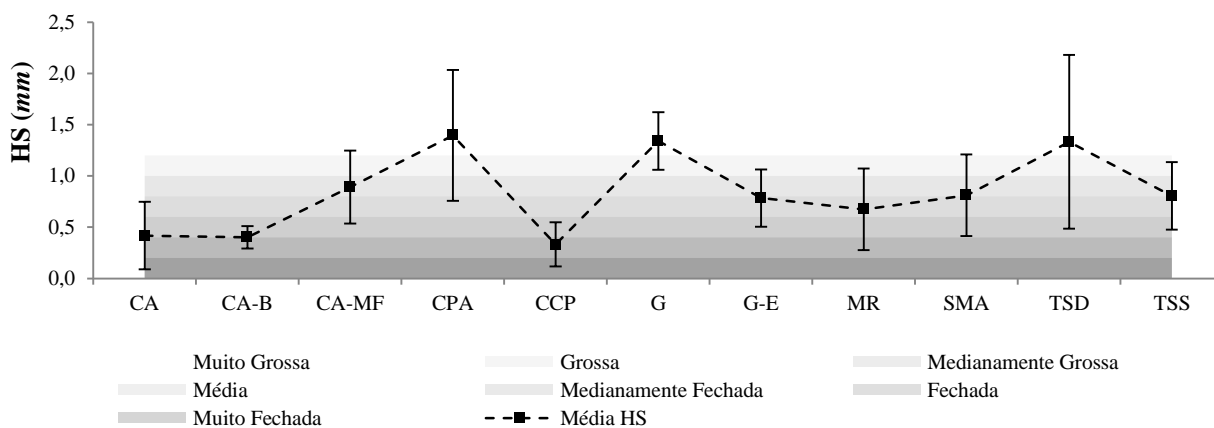


Figura 4: Curva dos valores médios de HS

Avaliando as médias de macrotextura (Tabela 3 e Figura 4), observou-se uma média baixa para as misturas asfálticas do tipo CA, CA-B e CCP. A principal característica dessas misturas asfálticas é a curva granulométrica contínua e a baixa concentração de agregados graúdos, gerando uma mistura asfáltica de macrotextura mais fechada – estando a macrotextura destas técnicas classificadas como fechada e medianamente fechada. Dentre estas, o CCP apresentou a macrotextura média mais baixa (0,33 mm); resultado já esperado, uma vez que esta técnica conta com a execução de ranhuras transversais ao eixo da via no intuito de atribuir maior aderência superficial.

Entre as faixas média e medianamente grossa, observaram-se 5 técnicas de pavimentação asfálticas: CA-MF, G-E, MR, SMA e TSS. Frequentemente utilizada em rodovias para correção de irregularidades e para a melhoria da aderência, a técnica de MicroFresagem (CA-MF) se propõe a executar ranhuras ao longo do eixo da via. Falcão *et al.* (2005) observaram ganhos de 34% e de 85% na macro e na microtextura, respectivamente, em pavimentos após a implementação da técnica. Contando com uma granulometria contínua, a técnica de MicroRevestimento asfáltico (MR), por se tratar de uma reabilitação superficial, pode ser

considerada uma mistura asfáltica mais densa, o que pode acarretar em baixos índices de macrotextura. Como consequência de sua curva granulométrica mais densa, a necessidade de um elevado teor de ligante pode, também, comprometer a microtextura superficial da estrutura.

A elevada concentração de agregados graúdos na mistura asfáltica que compõe o revestimento do tipo SMA (do inglês, *stone matrix asphalt*), apresenta em sua granulometria cerca de 50% de agregados retidos na peneira de 8,00 mm (Bernucci *et al.*, 2006), o que contribui para satisfatórios níveis de macrotextura. Contudo, a curva granulométrica contínua acaba necessitando de elevados teores de ligante (por volta de 6%), tendo efeito semelhante ao MR, podendo mascarar a microtextura no pavimento novo, o que pode ser constatado na Figura 5 – o SMA apresenta a penúltima menor média de microtextura (47,7). A execução do TSS pode ser explicada em duas etapas: *i*) aplicação da camada de ligante asfáltico, e *ii*) aplicação da camada de agregado mineral. Esta técnica oferece maior exposição dos agregados graúdos, contribuindo para maximizar os índices de macrotextura. Entretanto, os efeitos do tráfego na condição de aderência destes pavimentos são majorados ao longo do tempo, uma vez que, devido à ausência de películas de ligante asfáltico envolvendo as faces dos agregados, estes minerais acabam estando mais expostos ao polimento dos pneumáticos que ocorre na superfície.

Nas faixas de macrotextura grossa e muito grossa, observaram-se as técnicas CPA, TSD e G. Com um dos principais objetivos relacionado ao aumento da aderência pneu-pavimento em condições chuvosas, a CPA é, em sua essência, dotada de granulometria uniforme, prevalecendo a presença de agregados graúdos. Isto porque sua dosagem é feita de forma a conferir maior proporção de vazios, na ordem de 18 a 25%, caracterizando esta mistura como um revestimento asfáltico drenante. Estes fatores são protagonistas na composição de uma mistura asfáltica muito aberta; não obstante, o valor médio de macrotextura do CPA foi o maior dentre as técnicas de pavimentação avaliadas nesse estudo (1,40 mm). É válido ressaltar, porém, que o baixo teor de ligante (entre 3,5 a 4,5%) pode acarretar no rápido desgaste superficial, removendo a película de ligante asfáltico que envolve os agregados e, assim, comprometendo a microtextura superficial a partir do polimento dos agregados. A técnica de execução do TSD resulta de duas aplicações sucessivas de ligante asfáltico e, a *posteriori*, de agregado mineral. Desta forma, este material também se constitui de uma mistura asfáltica aberta, cujas faces dos agregados graúdos se encontram mais suscetíveis aos efeitos do polimento realizado pelo tráfego.

O revestimento com execução de *grooving* (G) transversal é largamente aplicado às pistas de pouso e de decolagem de aeroportos, as quais devem cumprir rigorosas exigências da ANAC (2012), que estipula níveis mínimos de atrito, além de exigir monitoramento anual da condição de aderência pneu-pavimento. Diante deste rigoroso controle, o qual é exclusivo para as vias aeroportuárias no Brasil, tanto a macro quanto a microtexturas do revestimento contendo o G estão no topo quando comparadas com os resultados oriundos das demais técnicas. A explicação de tamanho rigor é justificada através dos resultados dos pavimentos do tipo com *grooving* emborrachado (G-E). Como efeito direto do uso e da elevada solitação que as pistas aeroportuárias são submetidas, com o tempo, as ranhuras são preenchidas com a borracha dos pneus das aeronaves, através do fenômeno físico denominado de desgaste. Assim, o depósito da borracha dos pneus nas reentrâncias superficiais compromete ambos os parâmetros superficiais, reduzindo em 38% e 42% as médias de micro e de macrotexturas, respectivamente.

5.2. Análise da Aplicação do Método do IFI

Após a análise dos índices de micro e de macrotexturas, foram descartadas 22 observações com $HS \geq 1,50 \text{ mm}$. Em seguida, aplicou-se o método do IFI nos incrementos de 5 a 5 km/h até a velocidade de 60 km/h . Foram eliminadas, 96 observações em que o resultado do IFI foi superior a 1,0 para a velocidade de 5 km/h (F_5). Constatou-se relevante influência da macrotextura na determinação do IFI, uma vez que 99% das observações descartadas foram classificadas de Muito a Medianamente Fina; além disso, 98% dos níveis de microtextura desses dados foram classificados de Medianamente a Muito Rugosa, demonstrando a baixa relevância deste parâmetro para velocidades baixas. A Tabela 4 apresenta os resultados da estatística descritiva dos resultados de F_{60} por técnica de pavimentação. Através dos resultados apresentados, constatou-se considerável dispersão dos dados, com CV variando de 7 a 29%. Pelos resultados médios de F_{60} , as técnicas de pavimentação foram classificadas como: *i*) Ótimo (G e TSD); *ii*) Muito Bom (CA-MF, CPA, G-E, MR, SMA e TSS); *iii*) Bom (CA e CCP); e *iv*) Regular (CA-B).

Tabela 4: Estatística descritiva dos dados de F_{60} para cada tipo de técnica de pavimentação

| Estatística | CA | CA-B | CA-MF | CPA | CCP | G | G-E | MR | SMA | TSD | TSS |
|-------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| \bar{x} | 0,20 | 0,13 | 0,31 | 0,34 | 0,17 | 0,62 | 0,31 | 0,25 | 0,26 | 0,37 | 0,30 |
| S_d | 0,06 | 0,03 | 0,05 | 0,02 | 0,05 | 0,09 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,04 |
| CV(%) | 29 | 20 | 17 | 7 | 27 | 14 | 24 | 23 | 25 | 15 | 12 |

A Figura 5 apresenta a plotagem dos valores médios obtidos para cada condição avaliada, além das faixas de classificação conforme apresentada na Tabela 2. Considerando dois desvios-padrão abaixo, a técnica CA-B, a mais crítica quanto à condição de atrito pelo índice F_{60} do método do IFI, atinge à classificação Muito Ruim (limite inferior de 0,08). É válido também ressaltar que, mesmo considerando os dois desvios-padrão, o revestimento contendo o G sempre se manteve na faixa de classificação Ótima. O pavimento do tipo TSD também foi classificado, em média, como Ótimo, com limite inferior na faixa de classificação Muito Bom.

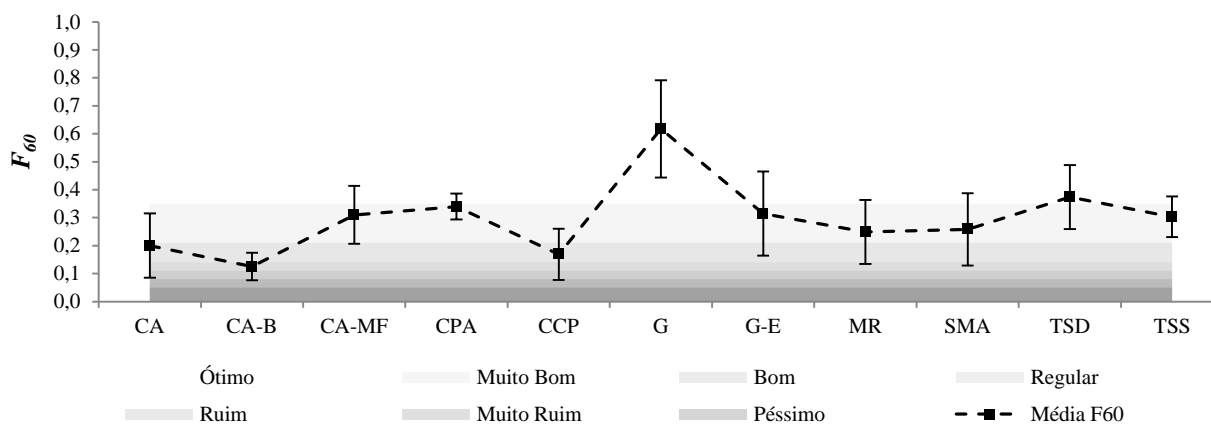


Figura 5: Curva dos valores médios de F_{60}

5.3. Análise das Curvas de Atrito

Após a eliminação das observações com $HS \geq 1,50 \text{ mm}$ e com $F_5 \geq 1,0$, as curvas de coeficiente de atrito *versus* velocidade foram traçadas. A Figura 6 apresenta as curvas com os valores médios

obtidos para cada tipo de revestimento em cada faixa de velocidade, em que se pôde constatar que o desempenho do revestimento do tipo CA com G foi sempre, em média, superior aos demais, com relação ao atrito superficial. Este resultado já era esperado, visto que os índices BPN e HS, para esse tipo de pavimento, foram de até 55% e 76% superiores, respectivamente, em relação aos índices médios mais baixos. Esta combinação de elevada condição superficial destes pavimentos resultou em coeficientes de atrito, no mínimo, 36% superiores à média dos demais revestimentos avaliados.

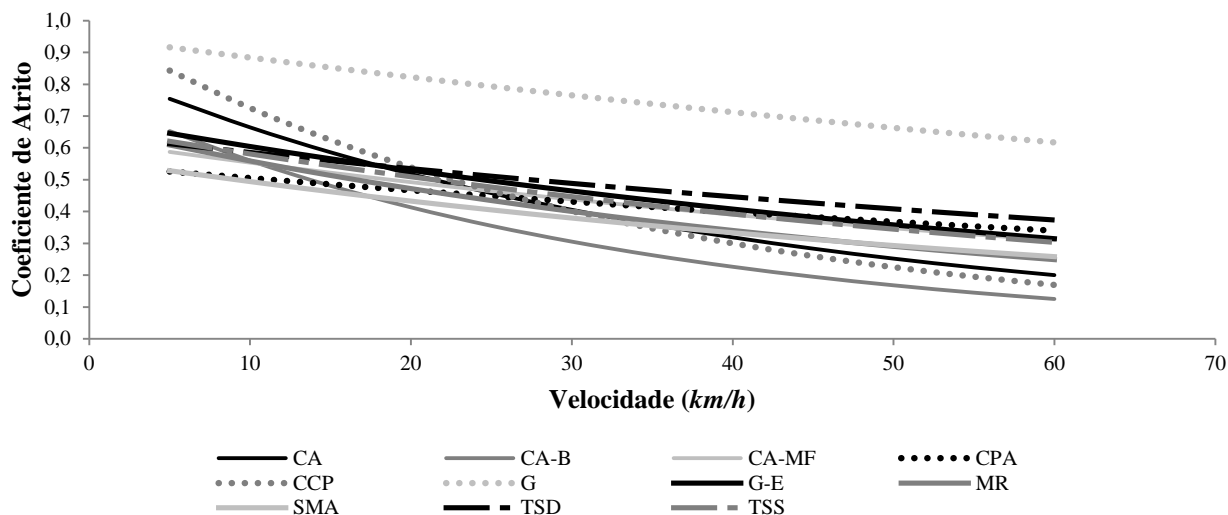


Figura 6: Coeficiente de atrito versus velocidade para cada tipo de revestimento avaliado

A curva de atrito do revestimento CCP chamou atenção pela alta susceptibilidade à variação da velocidade. Uma justificativa plausível se resvala nos valores médios de micro e de macrotextura; uma vez que o primeiro, classificado como rugoso, é fundamental para a manutenção do atrito em baixas velocidades, o segundo, classificado como fechado, encarrega-se do atrito em velocidades mais elevadas, quando há a redução da superfície de contato entre o pneu e o pavimento.

As demais curvas apresentam comportamentos semelhantes, com pouca variação à velocidade. Observou-se baixo desempenho da aderência pneu-pavimento frente às velocidades baixas para as curvas dos seguintes materiais: CPA, CA-MF, SMA, TSS e TSD. Este resultado pode ser atribuído às características destas misturas asfálticas, que podem comprometer a microtextura. Entretanto, o baixo índice de microtextura é compensado pela elevada macrotextura, intrínseca a estas técnicas, apresentando baixa sensibilidade à variação da velocidade, conforme verificado na Figura 7.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo traduzir os parâmetros de micro e de macrotextura de diferentes técnicas de pavimentação em aderência pneu-pavimento, através do método do *International Friction Index* (IFI). A partir de estudos publicados na literatura, compilou-se um banco de dados destes parâmetros e foram avaliadas as curvas de coeficiente de atrito versus velocidade, no

intuito de identificar qual técnica de pavimentação apresenta melhor condição superficial, além dos efeitos individuais da micro e da macrotextura desses materiais no atrito.

Ao todo, foram obtidos 537 pares de dados a partir da observação de 11 técnicas de pavimentação – sendo 10 oriundas de misturas asfálticas e 1 de CCP. Todos os dados referentes à macrotextura foram obtidos através do ensaio de Mancha de Areia (ASTM E965-96, 2006), reportados em HS (do inglês, *height of sand*), e os referentes à microtextura, através do ensaio de Pêndulo Britânico (ASTM E303-93, 2013), expressos em BPN (do inglês, *British pendulum number*).

A partir dos resultados encontrados, constatou-se a preponderância das misturas asfálticas tidas como abertas com relação ao índice médio de macrotextura, devido às particularidades dessas técnicas de pavimentação. O revestimento do tipo SMA, por exemplo, apresenta elevada concentração de agregados graúdos em sua matriz pétreo; já os revestimentos compostos por TSS e TSD geralmente são executados com penetração invertida, em que os agregados são aplicados após o ligante asfáltico. Esta elevada qualidade da macrotextura reverberou em satisfatório desempenho quanto à aderência pneu-pavimento, que se sobrepôs a menor microtextura, mostrando baixa susceptibilidade à variação da velocidade. Contudo, deve-se mencionar que as possíveis deficiências associadas às características destas misturas asfálticas podem mascarar os valores de microtextura.

Não apenas relacionado à qualidade da macrotextura, justificada pela execução de ranhuras (ou *groovings*) transversais ao eixo da via, mas também da microtextura, o revestimento do tipo CA com *grooving* apresentou desempenho, com relação à aderência pneu-pavimento, sempre superior se comparado às demais técnicas de pavimentação avaliadas. Largamente aplicados às pistas de pouso e de decolagem de aeroportos, estes revestimentos passam, anualmente, por um rigoroso controle de condição superficial exigido pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2012). Entretanto, este tipo de pavimento é recomendado, no Brasil, apenas para pistas aeroportuárias, diante das características operacionais desta estrutura.

Ainda que não haja controle tecnológico rigoroso do atrito superficial nos projetos de rodovias brasileiras, baseado em técnicas mais atualizadas de aferição, o que deve ser encarado como uma necessidade diante das implicações desta condição na segurança viária, pavimentos do tipo CPA, TSD e TSS apresentaram satisfatórios índices de aderência pneu-pavimento e baixa susceptibilidade às variações de velocidade. Deve-se atentar, porém, quanto à necessidade de manutenção periódica, uma vez que tais técnicas se encontram mais expostas ao desgaste superficial com o passar do tempo.

Com relação à aplicação do método do IFI, uma significativa parcela da base de dados (19%) foi descartada por apresentar resultados entendidos como inconsistentes (situações em que o IFI a 5 *km/h* era superior a 1,0). Assim, pode-se entender que o IFI não se ajusta a todo tipo de mistura asfáltica – tendo sido concluído no final de 1995 (Wambold *et al.*, 1995), quando algumas técnicas de pavimentação não haviam sequer sido concebidas.

Como sugestões para trabalhos futuros, indica-se a avaliação mais detalhada dos parâmetros que compõem a mistura asfáltica. Como exemplo, influenciado diretamente pela curva

granulométrica, sabe-se que valores de macrotextura mais aberta são oriundos de misturas asfálticas com elevado índice de vazios, além da elevada presença de agregados graúdos. Outro fator que pode afetar a aderência pneu-pavimento é o percentual de ligante asfáltico utilizado na dosagem da mistura asfáltica. Sabe-se que a superfície dos agregados exposta contribui para os níveis de microtextura, porém quando estas estão expostas por um intervalo maior de tempo as mesmas podem ser polidas pelos efeitos do tráfego. Também, uma investigação acerca de agregados com diferentes resistências ao polimento pode elucidar resultados significativos.

Sugere-se também análise direcionada para a questão da segurança viária, dada a intrínseca relação do coeficiente de atrito com o potencial de frenagem. Através de ferramenta de simulação microscópica de tráfego, pode-se buscar aferir qual o impacto de diferentes coeficientes de atrito em indicadores de segurança viária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAC (2012) *Resolução Nº 236*. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.
- ASTM (2006) *Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique (ASTM E965-96)*. American Standard for Testings and Materials, Pensilvânia, Estados Unidos.
- ASTM (2011) *Standard Test Method for Calculating International Friction Index of Pavement Surface (ASTM E1960-07)*. American Standard for Testings and Materials, Pensilvânia, Estados Unidos.
- ASTM (2013) *Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester (ASTM E303-93)*. American Standard for Testings and Materials, Pensilvânia, Estados Unidos.
- Aps, M. (2006) *Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP). São Paulo, SP.
- Araujo, V. M. C. (2014) *Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas a partir do Uso de Processamento Digital de Imagens*. Monografia, Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza, CE.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P. e Soares, J. B. (2006) *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Petrobras – ABEDA, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2006) *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (2ª Edição)*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- Do, M. T.; Kane, M.; Tang, Z.; Larrard, F. (2009) Physical Model for the Prediction of Pavement Polishing. In *Wear*, No. 267, p. 81-85.
- Do, M. T.; Cerezo, V.; Zahouani, H. (2014) Laboratory Test to Evaluate the Effect of Contaminants on Road Skid Resistance. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, No. 228(11), p. 1276-1284.
- Falcão, P. R. F.; Farias, M. M.; Santos, A. C. C. e Medeiros, A. G. B. (2005) Estudo da Macro e Micro Textura do Pavimento da BR-060 no Trecho das Sete Curvas. In *36ª Reunião Anual de Pavimentação – 36ª RAPv*. Curitiba, PR.
- Fuentes, L. G.; Gunaratne, M.; de León Izeppi, E.; Flintsch, G. W.; Martinez, G. (2012) Determination of Pavement Macrotexture Limit for Use in International Friction Index Model. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2306, p. 138-143.
- Henry, J. J. (2000) *Evaluation of Pavement Friction Characteristics – A Synthesis of Highway Practice (NCHRP Synthesis 291)*. National Cooperative Highway Research Program, Washington D.C., Estados Unidos.
- Kokkalis, A. G.; Panagouli, O. K. (1998) Fractal Evaluation of Pavement Skid Resistance Variations. I: Surface Wetting. In *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 9, no. 11, p. 1875-1890.
- Noyce, D. A.; Bahia, H. U.; Yambó, J. M. e Kim, G. (2005) *Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements – Draft Literature Review and State Surveys*. Midwest Regional University Transportation Center, Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory, Wisconsin, Estados Unidos.
- Wambold, J. C.; Antle, C. E.; Henry, J. J. e Rado, Z. (1995) *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements*. PIARC World Road Association, Paris, França.