

Análise de desempenho e exploração das potencialidades de um protótipo de medição de atrito do pavimento no âmbito da segurança rodoviária

Jorge Sousa^{1*}; Jorge Martins²; Carlos Palha³; Lúcio Machado⁴; Elisabete Freitas⁵

¹M.Sc., id9829@alunos.uminho.pt, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal; ²Ph.D., jmartins@dem.uminho.pt, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho; ³M.Sc., cpalha@civiluminho.pt, Laboratório Engenharia Civil, Campus de Azurém, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal; ⁴Ph.D., lucio@dem.uminho.pt, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal; ⁵Ph.D., efreitas@civil,uminho.pt, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal;

Sumário

O MAPA é equipamento concebido para a medição do atrito em pavimentos, dotado de um *software* de controlo e aquisição de dados que permite efetuar a variação de parâmetros como a taxa de deslizamento, a espessura da lâmina líquida, a frequência de registo de dados, entre outros. Além disso, possui um eixo que permite a colocação de rodas/pneus de pequeno e de grande diâmetro, o que viabiliza a utilização de pneus comerciais de veículos. Esta particularidade associada ao controlo da taxa de deslizamento potencia a utilização do MAPA como uma ferramenta útil na determinação das distâncias de travagem e de paragem, o que é particularmente relevante para análises de sinistralidade.

Palavras-chave: características superficiais; coeficiente de atrito; equipamento MAPA; segurança rodoviária;

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as características superficiais do pavimento, nomeadamente de um dos seus parâmetros, o atrito, resulta do elevado número de acidentes que ocorrem nas estradas em todo o mundo, considerado um problema de saúde pública, com elevados custos sociais e económicos. Por outro lado, a constante inovação introduzida na camada superficial dos pavimentos, por exemplo com reutilização de materiais e a introdução de outros não tradicionais, leva a que haja a constante preocupação de se garantir um desempenho adequado durante o período de vida em serviço do pavimento.

Equipamentos como o GripTester ou o SCRIM são na atualidade, a nível europeu, os mais frequentemente usados para a avaliação do coeficiente de atrito. Porém, estes equipamentos apresentam algumas limitações. Neste contexto, o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho desenvolveu o equipamento de medição do coeficiente de atrito denominado de MAPA (Medição de Atrito em Pavimentos) para apoiar estudos de sinistralidade rodoviária, que permite controlar funcionalidades que nos equipamentos convencionais estão restringidas e, por essa razão, limitam a investigação da contribuição do atrito na sinistralidade.

1.1 Atrito e textura como indicadores importantes na garantia da segurança rodoviária

Embora existam vários fatores de causa ligados aos acidentes rodoviários, várias investigações têm consistentemente mostrado uma forte relação entre colisões e as características da superfície do pavimento, como o atrito e a textura [1]. Assim, para que se possa desenvolver soluções eficazes, quer ao nível do pavimento quer dos veículos, para reduzir o número de situações potencialmente perigosas, é necessário recorrer à elaboração de estudos aprofundados sobre esses mesmos parâmetros e a forma como se relacionam [2].

Uma parte essencial resultante da interação pneu-pavimento é a força de atrito entre o pneu e a superfície do pavimento. Esta interação confere ao veículo a possibilidade de realizar as suas manobras em condições de segurança.

O atrito é definido pela resistência existente entre dois corpos quando um se move sobre o outro, resultando deste fenómeno uma força que atua tangencialmente à área de contacto. O atrito também é designado múltiplas vezes por resistência ao deslizamento, porém importa deixar claro que a resistência ao deslizamento depende principalmente do atrito existente na interface pneu-pavimento. Na Figura 1 é apresentado um esquema das forças que atuam na interação pneu-pavimento. Por definição, o μ é obtido através do quociente entre um numerador (força de atrito) e um denominador (reação normal), através da expressão:

$$\mu = \frac{\text{Força de Atrito}}{\text{Reação Normal}} \quad (\text{Equação 1})$$

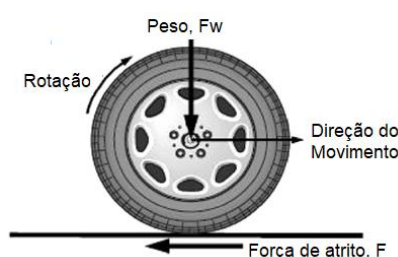


Figura 1 – Esquema das forças na interação pneu-pavimento

Um desempenho inadequado do pavimento, no que diz respeito à resistência ao deslizamento, leva à redução da eficiência da travagem dos veículos, aumentando dessa forma a probabilidade de ocorrência de acidentes.

O atrito é, geralmente, avaliado através de dois parâmetros [3, 12]:

- Coeficiente de Atrito longitudinal (CAL) – interessa sobretudo quanto à distância de paragem, estando associado à força que se desenvolve na área de contacto pneu-pavimento quando se arrasta uma roda travada.
- Coeficiente de atrito transversal (CAT) – avalia a segurança de circulação em curva, sendo o que mais influencia a velocidade de circulação e conseqüentemente os acidentes. Está associado à força que se desenvolve na área de contacto pneu - pavimento, perpendicular ao plano de rotação da roda, quando esta circula formando um ângulo em relação à sua direção de rotação (forças tangenciais).

Na interface pneu-pavimento, o atrito pode ter diversas componentes, sendo as principais categorizadas como atrito por adesão ou por histerese. A componente de adesão tem como origem a força de ligação atrativa entre a borracha do pneu e a superfície do pavimento. A componente de histerese ocorre geralmente quando existe uma grande deformação da borracha do pneu desencadeada devido a uma carga aplicada do pneu sobre o pavimento, incidindo na macrotextura [6].

Focando agora na vertente da textura, tanto a macrotextura como a microtextura estão relacionadas com o desempenho do pavimento relativamente à resistência ao deslizamento. A contribuição da macrotextura na resistência ao deslizamento do pavimento, é predominante para velocidades de circulação elevadas. Pelo contrário, a microtextura está mais relacionada com comportamento de atrito entre o pneu e o pavimento para velocidades mais baixas [3, 5, 11].

Além disso, conforme ilustrado na Figura 2, com o aumento da taxa de deslizamento, que representa a percentagem de travamento do pneu, ou velocidade do pneu, o valor de pico do coeficiente de atrito depende principalmente da microtextura do pavimento, enquanto a rapidez da degradação do atrito está mais interligada às condições de macrotextura do pavimento [6].

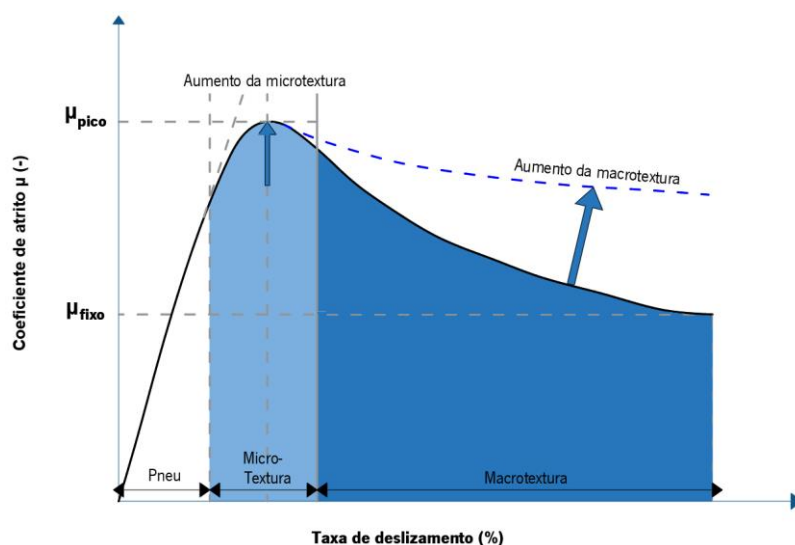


Figura 2 – Curva Atrito vs Taxa de deslizamento [6]

1.2 Equipamentos de Medição do Coeficiente de Atrito

No passado, a avaliação do atrito era tradicionalmente realizada com recurso a métodos expeditos e rudimentares. Estes ensaios eram normalmente realizados “in – situ”, após a conclusão da construção do pavimento. No entanto, ao longo do tempo, vários investigadores foram desenvolvendo diferentes métodos de medição do atrito, mais rápidos e mais precisos, e que ao mesmo tempo acarretam um menor custo de utilização [7].

Os equipamentos portáteis são utilizados para a realização de medições em laboratório e também *in situ* na fase de construção quando não se podem realizar ensaios recorrendo a meios mais pesados. Como exemplo desses equipamentos têm-se o *Pêndulo Britânico* e o *Dynamic Friction Tester*.

Os equipamentos de rodas bloqueadas têm como objetivo a medição do coeficiente de atrito longitudinal através do total bloqueio das rodas medidoras, ou seja, a velocidade na interface pneu–pavimento é a mesma da do veículo, visto que as rodas medidoras estão 100% travadas. As avaliações podem ser feitas em pavimentos secos ou molhados, dado que estes equipamentos tem um sistema de bombagem de água permitindo a aplicação, sobre o pavimento, de uma película de água de uma ordem de grandeza milimétrica. Têm grande aplicação no que toca a realização de inspeções anuais da malha rodoviária, como também na investigação de pontos críticos de ocorrência de acidentes. Podem também serem utilizados para a realização de obras de reabilitação. Dois dos mais conhecidos equipamentos deste tipo são: o *Adhera* e o *MAder* [8].

Os equipamentos de rodas oblíquas foram construídos para a medição do coeficiente de atrito transversal. O seu mecanismo baseia-se na medição da força lateral gerada pelo movimento do veículo. Estes equipamentos são referência em praticamente toda a Europa, inclusivamente em Portugal, onde foram tomados como única referência durante muitos anos. Exemplos de alguns equipamentos desta categoria são: o *Mu – meter*, o *Stradograph*, o *Odoliograph* e o *SCRIM* [9].

Os equipamentos de rodas parcialmente bloqueadas têm como principal objetivo medir, de forma contínua, o coeficiente de atrito através de um bloqueio, tipicamente entre 15 e 20%, da sua roda de medição. Podem-se dividir em duas categorias: os de deslizamento fixo, casos do “BV11 – Skiddometer”, do “GripTester” e do “Surface Friction Tester, ou de deslizamento variável, como o *Oscar*, o *Stuttgarter Reibungsmesser*, o *RoadSTAR* e o *Tatra Runway Tester*. [8]

Tendo por base os métodos atualmente existentes, existem novas propostas para medir o atrito do pavimento [13]. A Figura 3 mostra os principais requisitos para os novos métodos de medição.

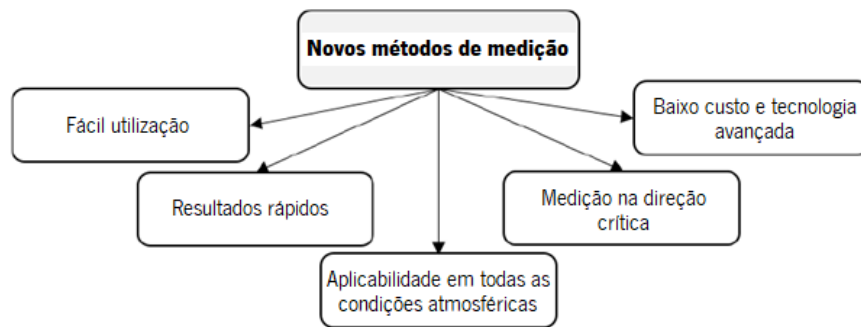


Figura 3 – Novos métodos de medição

Os novos métodos de medição são direcionados para estimar o atrito com base em características da superfície da estrada extraídas de imagens ou perfis do pavimento, ou seja, para determinar o atrito, de forma indireta. Um exemplo é o uso da tecnologia de sensor (LiDAR) [9]. Este método estima rapidamente o nível de atrito do pavimento por meio de modelação 3D usando as informações do pavimento adquiridas usando técnicas baseadas em deteção de luz e sensores de alcance. Os métodos propostos baseados na tecnologia LiDAR são capazes de dar estimativas rápidas, económicas e automáticas. No entanto, os resultados obtidos não apresentam o mesmo grau de confiança que os métodos de medição tradicionais / de campo oferecem.

Outros métodos emergentes estão relacionados com o controlo de atrito em veículos autónomos (VA). Os VA ainda não são projetados para medir a resistência ao deslizamento do pavimento, sendo as medições tradicionais ineficientes para o controlo VA em tempo real [10]. Atualmente, está em desenvolvimento um método dinâmico para estimar o atrito do pavimento usando visão computacional, com base na introdução de uma estrutura que controla o comportamento de movimentação do carro e os movimentos de manobra. A estrutura de controlo antiderrapante fornece novas capacidades para o aprimoramento do desempenho de segurança dos VA [10]. A Figura 4 apresenta um esquema geral, e resumido, dos equipamentos de medição de atrito.

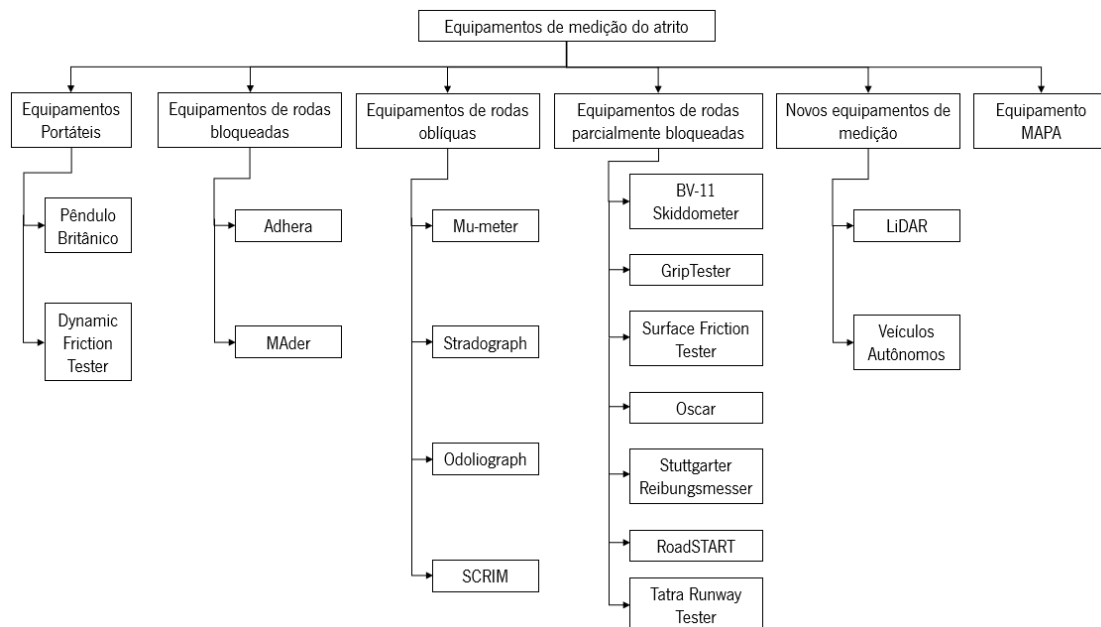


Figura 4 – Equipamentos de medição do atrito

2 Equipamento MAPA

O MAPA (Figura 5) é um equipamento de medição do atrito longitudinal em pavimentos desenvolvido em conjunto com o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho e financiado pelo Centro de Valorização de Resíduos (CVR), da mesma Universidade. Este equipamento é resultado da junção de dois sistemas distintos, o sistema mecânico (estrutura mecânica, eixos, rodas, chumaceiras, travão eletromagnético e carroçaria) e o sistema de controlo e aquisição de dados (cablagem elétrica, variadores de tensão, sensores de rotação, célula de carga, microcontrolador e software).



Figura 5 – Equipamento MAPA

O equipamento MAPA possui um conjunto de pressupostos mecânicos e eletrónicos, tendo alguns deles já sido expostos nos parágrafos anteriores. Do ponto de vista da Engenharia Civil importa compreender a forma como o mesmo efetua a medição e a conjuntura analítica que leva à aquisição dos dados necessários.

De seguida, na Figura 6, apresenta-se um esquema que pretende servir de base para a explicação que se seguirá acerca do funcionamento do MAPA.

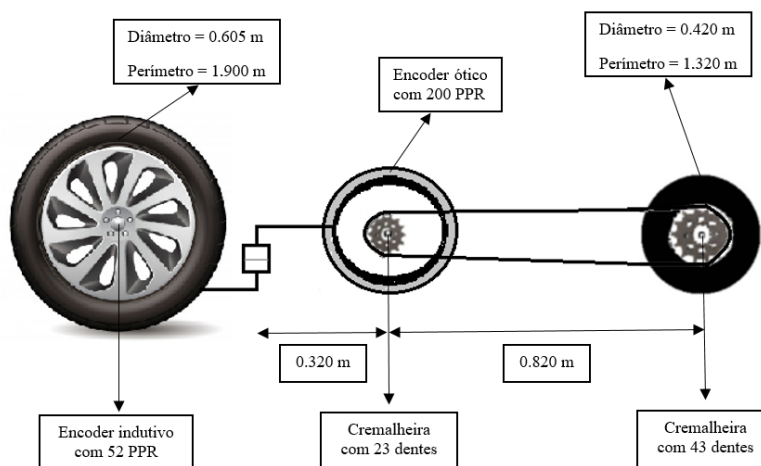


Figura 6 – Esquema de funcionamento do MAPA

Analisando o esquema estrutural do equipamento, verifica-se que o valor da reação normal é constante ao longo de qualquer que seja a medição e diz respeito ao valor do peso da roda pequena, ou seja, 60 kg.

O peso do MAPA é de aproximadamente 3000 N, sendo muito elevado em relação à maioria dos equipamentos similares, como por exemplo o *GripTester*. Se, por um lado o peso elevado lhe confere robustez, por outro dificulta certas ações de movimentação e transporte. No entanto, esta característica é desejável pela necessidade que está

inerente à simulação das condições reais de travagem dos veículos. Ou seja, se o objetivo do equipamento é garantir uma clara aproximação das condições reais, então é necessário que a reação normal no pneu de medição seja elevada, de modo a simular aquela que é a carga associada aos pneus dos veículos.

Relativamente ao comprimento do equipamento, considera-se que é bastante extenso, para simular ao máximo as condições reais de operabilidade dos veículos. O efeito desta característica reflete-se nos binários célula/travão e travão/roda de medição, que poderiam ser diminuídos proporcionalmente em caso do equipamento ser mais curto, não alterando desse modo toda a interface analítica.

No que diz respeito à determinação da força de atrito, esta toma um maior grau de complexidade, estando todo o sistema do equipamento montado de forma a permitir a sua obtenção. Ora, ao longo da medição, para um determinado valor de taxa de deslizamento aplicado, o travão elétrico exerce uma força contrária ao movimento de forma a equilibrar as rotações na roda grande e na roda pequena. Quando se atinge o equilíbrio, considera-se que as rotações são similares. A existência de uma célula de carga permite saber qual o valor da força que é exercida no local onde a mesma se localiza.

Uma das principais vantagens da interface desenvolvida é a apresentação em tempo real de diversos parâmetros, para além do coeficiente de atrito, tais como as rotações por minuto dos pneus (rpm), a força média medida pela célula de carga, entre outros, o que permite acompanhar os resultados das medições e identificar problemas rapidamente e em tempo útil (Figura 7). O *software* permite ainda o registo de notas ao longo da medição, as quais são enviadas diretamente para o Excel, ficando associadas ao momento exato da medição em que foram apontadas.

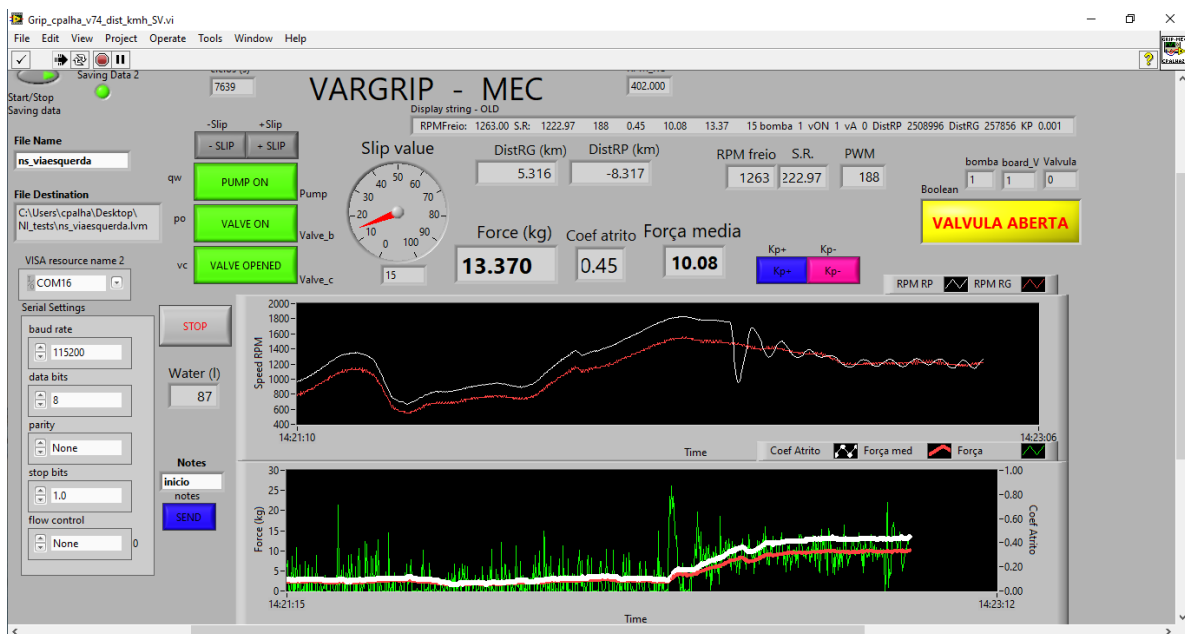


Figura 7 – Interface visual LabView

Complementarmente, foi instalado um sistema de captação de som e imagem (Figura 8), sendo dessa forma possível a visualização dentro do veículo daquilo que se passa na roda de medição do equipamento e ainda a gravação de vídeos que permitem analisar *a posteriori* os fenómenos que ocorrem na interação pneu-pavimento ao longo dos trechos analisados.



Figura 8 – Imagem da gravação *on board*

3 Estudos de atrito usando o equipamento MAPA

3.1 Evolução do coeficiente de atrito devido à variação de velocidade

A velocidade é referenciada como uma das principais causas da ocorrência de acidentes, incluindo atropelamentos. A dificuldade de controlo dos veículos aquando da prática de velocidades muito elevadas aumenta e é expectável que o coeficiente de atrito diminua.

Tendo por base a metodologia de funcionamento do equipamento MAPA, implementou-se uma metodologia experimental para analisar o coeficiente de atrito a diversas velocidades e níveis de taxa de deslizamento.

3.2 Trecho de estudo

O trecho seleccionado para efetuar a recolha de dados localiza-se nas imediações do AveParque, nas Taipas, concelho de Guimarães (Figura 9). É caracterizado por uma extensão de 200 metros, duas vias de tráfego (uma em cada sentido), e camada de desgaste em mistura betuminosa (AC14).

Na Figura 8 a verde identifica-se o trecho Sul – Norte e a azul o trecho Norte – Sul.



Figura 9 – Trecho de estudo

3.3 Metodologia de recolha de dados

Para o estudo do efeito da velocidade no atrito definiu-se um plano de ensaios que consistiu na realização de medições do atrito para os valores de taxa de deslizamento 5, 10, 15, 20, 30 e 40% e para as velocidades de 30, 40, 50, 60 e 70 km/h. Ou seja, para cada um dos valores de taxa de deslizamento foram efetuadas em cada um dos sentidos 6 medições com 5 velocidades distintas, o que fez um total de 30 medições em cada sentido. Referir ainda que as medições foram realizadas com injeção de água sobre a superfície do pavimento, com uma espessura da lâmina líquida, aproximadamente, de 1,2 mm. Para efetuar a medição recorreu-se a um pneu comercial da marca Deli Tire, com uma dureza de 65 Shore (A).

3.4 Resultados obtidos e análise

A escolha desta gama de valores de taxa de deslizamento permite a definição curvas atrito vs taxa de deslizamento de forma adequada. Nos Quadros 1 e 2 são apresentados os valores de atrito medidos nas duas vias da secção de estudo.

Quadro 1 – Resultados Sentido Norte - Sul

SENTIDO		Taxa de deslizamento (%)					
NORTE - SUL		5	10	15	20	30	40
Velocidade	30	0.376	0.422	0.496	0.560	0.569	0.545
	40	0.439	0.513	0.553	0.562	0.507	0.517
	50	0.465	0.513	0.505	0.501	0.489	0.468
	60	0.456	0.497	0.502	0.490	0.475	0.466
	70	0.365	0.43	0.464	0.475	0.456	0.469

Quadro 2 – Resultados Sentido Sul - Norte

SENTIDO		Taxa de deslizamento (%)					
SUL - NORTE		5	10	15	20	30	40
Velocidade	30	0.380	0.421	0.455	0.529	0.576	0.549
	40	0.405	0.500	0.540	0.536	0.501	0.518
	50	0.403	0.510	0.498	0.508	0.487	0.479
	60	0.440	0.487	0.491	0.483	0.484	0.470
	70	0.384	0.469	0.482	0.467	0.431	0.448

Nas Figuras 10 e 11 apresentam-se a representação gráfica dos resultados obtidos. Em termos gerais, verifica-se que as curvas apresentam um comportamento semelhante à curva teórica e que foi apresentada anteriormente na Figura 2, o que mostra que o equipamento MAPA, quando solicitado pela aplicação de uma gama alargada de percentagens de deslizamento, consegue acompanhar a tendência teórica expectável.

Analisando os resultados é possível denotar-se uma semelhança entre os valores obtidos para ambos os sentidos de medição, o que de certa forma corrobora a medição. Destaca-se o nível de taxa de deslizamento de 5% a todas as velocidades por corresponder a valores de atrito mais baixos. Parece não existir também um padrão claro para o nível de taxa de deslizamento que proporciona valores de atrito mais elevados. Observa-se, contudo, que para os

valores de velocidade intermédias de 50 e 60 km/h, a influência do nível de taxa de deslizamento parece ser menor, isto é, as curvas encontram-se mais juntas, indicando menor variação do coeficiente de atrito.

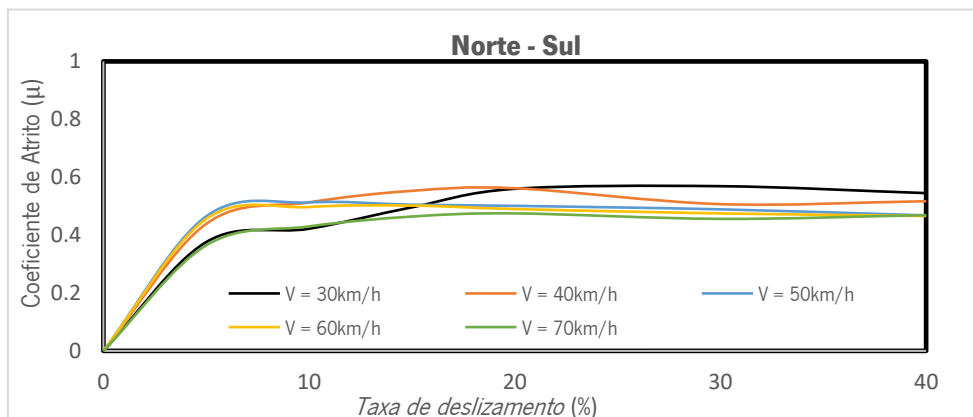


Figura 10 – Curva Atrito vs Taxa de deslizamento sentido Norte - Sul

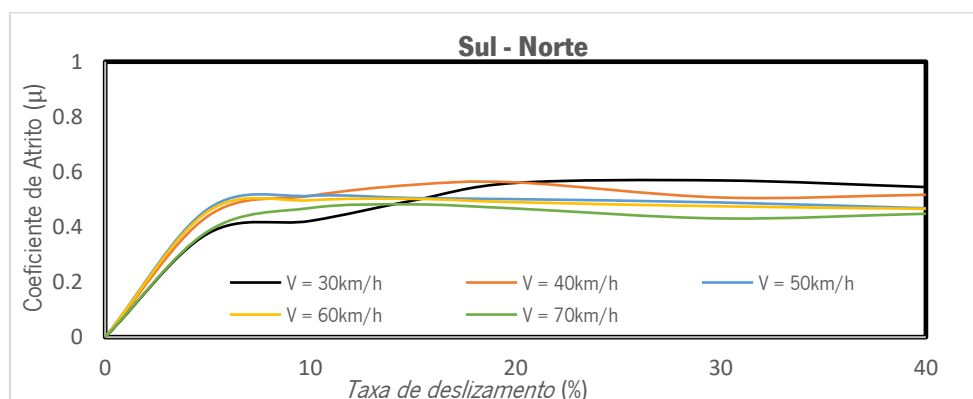


Figura 11 - Curva Atrito vs Taxa de deslizamento sentido Sul - Norte

4 Conclusões

Ficou patente a necessidade de se desenvolverem novos equipamentos que incorporem alguns princípios dos já existentes mas que ao mesmo tempo os melhorem e nessa perspetiva foi efetuada uma análise de viabilidade e desempenho de um protótipo de medição de atrito – o equipamento MAPA.

Os estudos preliminares efetuados vieram acentuar o grande potencial que o equipamento MAPA contém. Permitiu efetuar um conjunto de análises relativas ao efeito da velocidade e da taxa de deslizamento na evolução do coeficiente de atrito, sendo este assunto ou assunto sobre o qual existem muitas considerações teóricas mas poucas experiências práticas, muito devido às limitações que os equipamentos de mercado possuem.

Uma vertente futura de estudos, e que foi uma das justificações que levou à conceção do MAPA, passa por fazer uso das suas potencialidades para simular distâncias de paragem e de travagem para distintas velocidades. Uma vez que é possível inserir eletronicamente os valores do taxa de deslizamento, seria muito interessante imprimir no código uma variação constante até 100%, ou seja, roda livre até roda bloqueada, realizando o procedimento para uma gama alargada de velocidades e obtendo as distâncias percorridas desde que se acionou a travagem até que se estabilizou o equipamento. Esta investigação pode ser reproduzida para várias velocidades e tipologias de pavimentos e pode convergir para a obtenção de leis de variação da distância de travagem e paragem necessárias para as diferentes velocidades.

5 AGRADECIMENTOS

Para a realização deste trabalho foi imprescindível a colaboração da Universidade do Minho, através das condições disponibilizadas quer a nível técnico quer laboratorial. Uma especial referência ainda ao Centro de Valorização de Resíduos (CVR) pelo financiamento disponibilizado para a conceção do Equipamento MAPA.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Findlay Irvine. (2021). *Findlay Irvine Ltd | Skid Resistance Section - micro GripTester*. Retrieved from <http://www.findlayirvine.com/capabilities/skid/micro-griptester-helideck.php>
- [2] Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., Findley, D. J., & Rojí, E. (2020). A skid resistance prediction model for an entire road network. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120041>
- [3] Kane, M., Do, M. T., Cerezo, V., Rado, Z., & Khelifi, C. (2019). Contribution to pavement friction modelling: an introduction of the wetting effect. In *International Journal of Pavement Engineering* (Vol. 20, Issue 8, pp. 965–976). <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1369776>
- [4] Yu, M., You, Z., Wu, G., Kong, L., Liu, C., & Gao, J. (2020). Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: A review. *Construction and Building Materials*, 260, 119878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119878>
- [5] Huang, C., & Huang, X. (2014). Effects of pavement texture on pavement friction: A review. *International Journal of Vehicle Design*, 65(2–3), 256–269. <https://doi.org/10.1504/IJVD.2014.060804>
- [6] Sohaney, R. C., & Rasmussen, R. O. (2013). Pavement Texture Evaluation and Relationships to Rolling Resistance at MnROAD. *MnRoad Technical Report, MN/RC 2013-16 2, June*
- [7] Lundberg, T., Andrén, P., Wahlman, T., Eriksson, O., Sjögren, L., & Ekdahl, P. (2018). *New technology for road surface measurement - Transverse profile and rut depth*.
- [8] Najafi, S., Flintsch, G. W., & Medina, A. (2017). Linking roadway crashes and tire–pavement friction: a case study. In *International Journal of Pavement Engineering* (Vol. 18, Issue 2, pp. 121–129). <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1039005>
- [9] Du, Y., Liu, C., Song, Y., Li, Y., & Shen, Y. (2020). Rapid Estimation of Road Friction for Anti-Skid Autonomous Driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2918567>
- [10] Chen, J., Huang, X., Zheng, B., Zhao, R., Liu, X., Cao, Q., & Zhu, S. (2019). Real-time identification system of asphalt pavement texture based on close-range photogrammetry. In *Dongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)/Journal of Southeast University (Natural Science Edition)* (Vol. 49, Issue 5, pp. 973–980). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2019.05.022>
- [11] Zhu, X., Yang, Y., Zhao, H., Jelagin, D., Chen, F., Gilabert, F. A., & Guarin, A. (2021). Effects of surface texture deterioration and wet surface conditions on asphalt runway skid resistance. *Tribology International*, 153 (August 2020), 106589. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106589>
- [12] Wang, D., Chen, X., Yin, C., Oeser, M., & Steinauer, B. (2013). Influence of different polishing conditions on the skid resistance development of asphalt surface. In *Wear* (Vol. 308, Issues 1–2, pp. 71–78). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.09.013>
- [13] Kassem, E., Awed, A., Masad, E., & Little, D. (2013). Development of predictive model for skid loss of asphalt pavements. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/2372-10>