



**Estudo do desempenho de um protótipo de medição
de atrito em pavimentos rodoviários**

Jorge Manuel Pereira de Sousa

UMinho | 2021

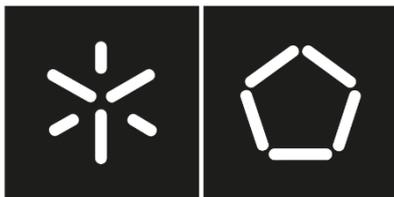


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jorge Manuel Pereira de Sousa

**Estudo do desempenho de um protótipo de
medição de atrito em pavimentos rodoviários**

Março de 2021



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Jorge Manuel Pereira de Sousa

**Estudo do desempenho de um protótipo de
medição de atrito em pavimentos
rodoviários**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professora Doutora Elisabete Fraga de Freitas
Professor Doutor Jorge José Gomes Martins

Março de 2021

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicado.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositórioUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Todo o percurso académico, no qual se inclui o trabalho inerente à presente dissertação, apenas faz sentido quando nos fazemos rodear por pessoas e entidades que o embelezam, credibilizam e tornam inesquecível. Assim, queria aproveitar esta oportunidade para exprimir o meu profundo agradecimento a todas as pessoas que ao longo destes últimos cinco anos contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional, querendo destacar em particular:

- A minha orientadora, Professora Doutora Elisabete Fraga de Freitas, por todo o apoio, conhecimentos transmitidos, paciência, motivação e por toda a confiança que desde muito cedo depositou em mim.
- Aos Professores Jorge Martins e Lúcio Machado pela cedência do equipamento utilizado no desenrolar da dissertação e que serviu de plano de fundo para o trabalho efetuado;
- Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, na pessoa do Professor Luís Picado Santos, pela gentileza de cedência de medições do equipamento GripTester;
- Aos técnicos do Laboratório de Vias de Comunicação, Carlos Palha e Hélder Torres pelos tempos passados e pelas aprendizagens ao longo deste último ano;
- Um agradecimento muito especial e particular ao Carlos Palha por ter sido, em muitas alturas, um motor imparável e incansável na busca da resolução para os problemas que surgiram no desenrolar da dissertação. Obrigado por todos os conhecimentos e por todo o empenho que teve, estou certo que mais do que o espírito de trabalho, ficará uma amizade para estimar por esta vida fora;
- A minha família, em particular os meus pais e irmãos por me terem feito de mim aquilo que sou. Por todos os princípios que me inculcaram, responsabilidade e determinação. Um agradecimento especial ao meu Padrinho por ter sido o principal impulsionador da escolha do curso, numa altura em que a hesitação era muita. Agradecer ainda à minha afilhada Maria e ao meu sobrinho Manuel, por todos os momentos em que foram um refúgio de felicidade por poder acompanhar o seu crescimento;

- A Vanda, por tanta coisa que esta dissertação integral não poderia abranger. Por ser a minha companheira desta viagem, por ter estado comigo nos bons e nos maus momentos, por me fazer sorrir, por me motivar, acompanhar e, sobretudo, me fazer sentir completo.
- Aos meus amigos de curso, em particular o Gustavo Silva e o Francisco Rebelo, por todos os momentos passados e por todas as memórias que guardaremos de toda esta jornada;
- A todos os Professores que contribuíram para o meu sucesso ao longo dos cinco anos, sem exceção pois considero que guardo de todos boas aprendizagens e vivências;
- A todas as amigadas que fiz no DEC, em particular a Carina. Obrigado por toda a paciência, cooperação e por não me mandar embora quando lhe roubava tempo precioso;

Por fim um agradecimento geral a toda a comunidade da Universidade do Minho, docente e não docente. Nada me deixa mais gratificado do que ter conseguido ao longo destes cinco anos criar laços de amizade de uma ponta à outra do Campus de Azurém, cumprimentar e ser cumprimentado pelo nome em qualquer dos serviços. A Universidade é mais do que um espaço de aprendizagem. É um espaço de partilha de conhecimentos, de culturas, e sobretudo da nossa imagem de marca.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Ao longo da presente dissertação, abordou-se aprofundadamente a temática da medição do coeficiente de atrito, algo que se justifica pela crescente preocupação inerente às características superficiais dos pavimentos rodoviários, nomeadamente o atrito, implicando o surgimento de novas metodologias de investigação que sejam suportadas por novos equipamentos dotados de capacidades que anteriormente não estavam disponíveis.

Através da realização da revisão bibliográfica tomou-se consciência da grande variabilidade de componentes que constituem o processo de medição e de avaliação do atrito, as vantagens e desvantagens dos equipamentos e ainda as novas tendências de evolução do processo de medição. Nesta perspetiva enquadrou-se o equipamento MAPA, um protótipo desenvolvido na Universidade do Minho.

Sobre o equipamento MAPA recaíram estudos aprofundados acerca da sua viabilidade, tendo-se concluído que o mesmo apresentava diversas debilidades. Conjugando os conhecimentos das diversas áreas da Engenharia, desde a Civil até à Eletrónica e Mecânica, foram implementadas alterações, melhorando o seu desempenho e comparando-o com o do equipamento *GripTester*, tendo-se obtido resultados positivos.

Utilizando o MAPA como suporte, foram realizados estudos acerca da influência de fatores como a velocidade e a dureza do pneu, tendo-se obtidos resultados que corroboram as medições e que denotam a grande influência que esses mesmos fatores podem assumir na redução do valor do coeficiente de atrito.

Foram ainda realizados estudos na aproximação de passagens pedonais, tendo-se aferido a tendência de redução do valor do atrito à medida que os veículos se aproximam da barra de paragem. O estudo efetuado constitui um ponto de partida para novas análises nas imediações das passadeiras, fazendo uso das vastas potencialidades do equipamento MAPA.

Palavras-chave: características superficiais; coeficiente de atrito; segurança rodoviária; novos métodos de medição.

ABSTRACT

During the present dissertation, the theme of measuring the friction coefficient was thoroughly addressed, something that is justified by the growing concern inherent in the surface characteristics of road pavements, namely friction, implying the emergence of new research methodologies that are supported by new equipment with capabilities that were not previously available.

Through the literature review, it became aware of the great variability of components that make up the process of measuring and evaluating friction. Both equipment's advantages and disadvantages were assessed. Additionally, the new trends in the evolution of the measurement process were also studied. In this perspective, the MAPA equipment was included, a prototype developed at the University of Minho.

Regarding the MAPA equipment, in-depth studies were carried out to assess its feasibility, and it was concluded that it has several weaknesses. Combining the knowledge of the different areas of Engineering, from Civil to Electronic and Mechanical, changes were implemented in order to improve its performance. Latter it was compared with the GripTester equipment, having obtained similar results, that is, positive results.

Using MAPA as support, studies were carried out on the influence factors such as the speed and hardness of the tire, obtaining results that corroborate the measurements and that denote the great influence that these same factors can have in reducing the value of the coefficient friction.

Studies were also carried out on the approach of pedestrian crossings, with a tendency to reduce the friction value as the vehicles approach the stop bar. The study carried out constitutes a starting point for new analyzes in the vicinity of the crosswalks, making use of the vast potential of the MAPA equipment.

Keywords: superficial characteristics; friction coefficient; road safety; new measurement methods.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Índice.....	viii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de tabelas.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2. Estado da arte.....	4
2.1 Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários	4
2.1.1 Introdução	4
2.1.2 Atrito.....	5
2.1.3 Textura	12
2.1.4 Regularidade.....	15
2.2 Equipamentos de Medição do Coeficiente de Atrito.....	17
2.2.1 Introdução	17
2.2.2 Equipamentos Portáteis.....	18
2.2.3 Equipamentos de Rodas Bloqueadas	20
2.2.4 Equipamentos de Rodas Obíquas.....	22
2.2.5 Equipamentos de rodas parcialmente bloqueadas.....	25

2.2.6	Novos equipamentos de medição	32
2.2.7	Equipamento MAPA	33
3.	Validação do Equipamento MAPA.....	37
3.1	Análise e proposta de melhorias na componente estrutural.....	37
3.2	Análise e propostas de melhoria na componente eletrónica e de programação.....	38
3.3	Curva Atrito vs. <i>Slip</i>	44
3.3.1	Trecho de estudo	45
3.3.2	Metodologia de ensaio.....	45
3.3.3	Resultados obtidos	46
3.3.4	Análise comparativa com os resultados do equipamento <i>GripTester</i>	49
4.	Estudos de atrito usando o equipamento mapa.....	53
4.1	Evolução do coeficiente de atrito devido à variação de velocidade	53
4.1.1	Trecho de estudo	53
4.1.2	Metodologia de recolha de dados	54
4.1.3	Resultados obtidos para velocidade fixa e <i>slip</i> variável.....	54
4.1.4	Resultados obtidos para <i>slip</i> fixo e velocidade variável.....	60
4.1.5	Representação das curvas atrito vs <i>slip</i>	66
4.2	Estudo do impacto das características do pneu no coeficiente de atrito.....	68
4.2.1	Leitura dos valores de dureza	68
4.2.2	Localização do trecho de estudo e metodologia de ensaio.....	69
4.2.3	Análise do efeito da dureza do pneu	69
4.3	Estudo do atrito na aproximação de passagens pedonais.....	71
4.3.1	Trechos de estudo.....	71

4.3.2	Metodologia de ensaio.....	73
4.3.3	Resultados obtidos	73
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	77
5.1	Conclusões.....	77
5.2	Trabalhos Futuros.....	79
	Referências.....	80
	Anexos.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Importância das principais características superficiais dos pavimentos (adaptado de Couchinho, 2011).	5
Figura 2 – Esquema das forças que atuam no pneu em rotação (Hall, 2009).....	6
Figura 3 – Gráfico esquemático da histerese e da adesão (Rasmussen, 2013).....	7
Figura 4 - Evolução dos valores do coeficiente de atrito, de acordo com a presença e ausência de precipitação (adaptado Branco et al., 2008).....	11
Figura 5 – Diferentes comprimentos de onda da textura do pavimento (adaptado de Hall, J.W., 2009). ...	12
Figura 6 – Efeito da macrotextura e microtextura no atrito do pavimento (adaptado de Noyce et al., 2005).	13
Figura 7 - Influência da textura do pavimento na curva de coeficiente de atrito – taxa de deslizamento (Omar, 2019).	15
Figura 8 – Evolução do grau de detalhe das medições da regularidade	16
Figura 9 - Equipamentos de medição do atrito	18
Figura 10 – Mecanismo de funcionamento do Pêndulo Britânico. (a) Pêndulo Britânico; (b) Pormenor de leitura do Valor da medição (Mataei et al., 2016).....	19
Figura 11 – Dynamic Friction Tester (Rodriguez, 2009).	20
Figura 12 – Equipamento Adhera (GDDKiA, 2009).	21
Figura 13 – Equipamento MAder (Domingues, 1997).	21
Figura 14 – Equipamento Mu – meter (EASA, 2010).	23
Figura 15 – Equipamento Stradograph. (a) Stradograph; (b) Pormenor da roda oblíqua (Santos, 2004). ..	23
Figura 16 – Equipamento Odoliograph (TYROSAFE, 2008).....	24
Figura 17 – Esquematização do funcionamento do SCRIM (Descornet et al., 2006).	24
Figura 18 – Equipamento SCRIM (Descornet et al., 2006)	25
Figura 19 – Equipamento BV11 – Skiddometer (GDDKiA, 2009).....	26
Figura 20 – Equipamento GripTester (Harverson, 2003).....	27
Figura 21 – Micro GripTester (Findlay Irvine, 2011).	27
Figura 22 – Equipamento SFT. (a) Parado; (b) Em medição (Airport Friction Tester, 2011).....	28
Figura 23 – Organização do SFT (Airport Friction Tester, 2011).	28

Figura 24 – Equipamento Tatra Runway Tester (TYROSAFE, 2008).....	29
Figura 25 – Equipamento <i>Stuttgarter Reibungsmesser</i> (TYROSAFE, 2008).....	30
Figura 26 – Equipamento Oscar. (a) Reboque preparado para realização do ensaio; (b) Reboque elevado (TYROSAFE, 2008).....	30
Figura 27 – Equipamento RoadSTAR. (a) Organização do RoadSTAR; (b) Roda de teste (TYROSAFE, 2008).	31
Figura 28 - Requisitos para novos métodos de medição.....	32
Figura 29 – Equipamento MAPA.....	33
Figura 30 – Travão eletromagnético Telma AD50-55 (Machado, 2017).	34
Figura 31 – Monobraço traseiro de uma Honda VRF (Machado, 2017).	34
Figura 32 – Esquema ilustrativo do equipamento MAPA	35
Figura 33 – Medição do peso sobre a roda	39
Figura 34 – (a) Célula de Carga; (b) Pormenor das resistências	40
Figura 35 – Novo amplificador de sinal de alto desempenho.....	41
Figura 36 – Calibração da célula de carga	41
Figura 37 – Programação da interface LabView	43
Figura 38 – Registo visual durante as medições	43
Figura 39 – Captação da medição por uma câmara <i>GoPro</i>	44
Figura 40 – Localização do trecho de estudo	45
Figura 41 – Exemplos de perfis da variação longitudinal do coeficiente de atrito para <i>slip</i> de 10% e 30%..	46
Figura 42 – Coeficiente de atrito médio versus <i>slip</i> no sentido Este-Oeste	48
Figura 43 – Coeficiente de atrito médio versus <i>slip</i> no sentido Oeste-Este	48
Figura 44 - Coeficiente de atrito via direita – Sentido Este - Oeste.....	50
Figura 45 – Coeficiente de atrito via esquerda – Sentido Este - Oeste.....	51
Figura 46 - Coeficiente de atrito via direita – Sentido Norte - Sul.....	51
Figura 47 - Coeficiente de atrito via esquerda – Sentido Norte - Sul	52
Figura 48 – Trecho de estudo - AveParque	54
Figura 49 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 30 km/h e <i>slip</i> variável	55
Figura 50 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 40 km/h e <i>slip</i> variável	56
Figura 51 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 50 km/h e <i>slip</i> variável	57

Figura 52 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 60 km/h e slip variável	58
Figura 53 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 70 km/h e slip variável	59
Figura 54 – Coeficiente de atrito para slip de 5% e velocidade variável	60
Figura 55 – Coeficiente de atrito para slip de 10% e velocidade variável	61
Figura 56 – Coeficiente de atrito para slip de 15% e velocidade variável	62
Figura 57 – Coeficiente de atrito para slip de 20% e velocidade variável	63
Figura 58 – Coeficiente de atrito para slip de 30% e velocidade variável	64
Figura 59 – Coeficiente de atrito para slip de 40% e velocidade variável	65
Figura 60 – Curvas atrito vs slip sentido Norte – Sul	67
Figura 61 - Curvas atrito vs slip sentido Sul - Norte	67
Figura 62 – Leitura dos valores da dureza.	68
Figura 63 – Coeficiente de atrito medido com pneus Deli Tyre e Kings Tyre	69
Figura 64 – Coeficiente de atrito medido com pneus Deli Tyre e Kings Tyre	70
Figura 65 – Localização do trecho 1	71
Figura 66 – Localização do trecho 2	72
Figura 67 – Localização do trecho 3	72
Figura 68 – Coeficiente de atrito nas passadeiras 1 e 2 do trecho 1	74
Figura 69 – Coeficiente de atrito nas passadeiras 3 a 5 do trecho 2	75
Figura 70 – Coeficiente de atrito na passadeira 6 do trecho 3	76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores que afetam o atrito / resistência ao deslizamento da superfície do pavimento.....	9
Tabela 2 – Coeficiente de atrito médio (μ) versus slip (%).....	47
Tabela 3 – Redução do coeficiente de atrito médio na presença de água versus slip	49
Tabela 4 – Coeficiente de atrito médio nas medições Norte - Sul.....	66
Tabela 5 - Coeficiente de atrito médio nas medições Sul - Norte.....	66
Tabela 6 – Coeficiente de atrito médio para os pneus Deli Tyre e Kings Tyre	70

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e Motivação

A crescente preocupação com as características superficiais do pavimento, nomeadamente de um dos seus parâmetros, o atrito, resulta, por um lado, 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 desempenho um adequado durante o período de vida em serviço do pavimento.

Cabe à Engenharia Civil, em conjunto com outras áreas envolvidas, estudar a evolução do coeficiente de atrito, assim como dos fatores que o determinam, necessitando para isso de estar dotada de equipamentos que produzam resultados fiáveis.

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 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.

Tendo em conta o âmbito multidisciplinar do tema, importa agora dar continuidade ao trabalho de conceção e construção do equipamento MAPA com a análise e validação do seu desempenho e também com a sua aplicação visando contribuir para o conhecimento do efeito do atrito na sinistralidade junto a passagens pedonais.

1.2 Objetivos

A investigação do atrito dos pavimentos é transversal a diversas áreas da Engenharia, que pela sua natureza, deve ser multidisciplinar e agregadora.

Neste contexto, o equipamento de medição do coeficiente de atrito (MAPA), desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, foi cedido ao Laboratório de Vias de Comunicação para que fosse efetuado um estudo de viabilidade e comparação do seu desempenho. Assim, a validação do desempenho deste equipamento é o objetivo que suporta a concretização de outros objetivos subsequentes, que envolvem a recolha e análise do atrito em determinados trechos de estudo.

No âmbito do estudo de viabilidade e reprodutibilidade, foram definidos os seguintes sub objetivos: 1) analisar o funcionamento do equipamento, partindo da análise da sua conceção em termos mecânicos e eletrónicos; 2) apresentar propostas e concretizar alterações com vista à melhoria do desempenho do equipamento; 3) realização de ensaios comparativos com equipamentos comerciais e certificados, como o GripTester.

Após a aferição da viabilidade e reprodutibilidade do equipamento, pretende-se realizar estudos relacionados com fatores que determinam o atrito, nomeadamente do efeito da velocidade e das características do pneu. Complementarmente, pretende-se analisar a evolução do coeficiente de atrito na aproximação de passagens pedonais, de modo a verificar se existe uma diminuição localizada do coeficiente de atrito. As passadeiras em meio urbano são locais onde ocorrem frequentemente acidentes com peões, pelo que importa analisar a contribuição do pavimento neste problema.

1.3 Estrutura da dissertação

De modo a corresponder aos objetivos apresentados no ponto anterior, a presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos distintos, sendo descrita ao longo dos próximos pontos a os assuntos tratados.

Neste primeiro capítulo, contextualiza-se o problema, apresenta-se a motivação do trabalho, os objetivos e a estrutura da dissertação.

No **capítulo 2** efetua-se uma revisão bibliográfica que foca essencialmente nas características superficiais dos pavimentos e na forma como as mesmas se relacionam e interagem com a segurança dos utilizadores das vias de tráfego rodoviário. Subsequentemente é ainda realizado um levantamento dos equipamentos utilizados para a avaliação do coeficiente de atrito, as principais vantagens e desvantagens de cada um e os principais cenários de aplicabilidade.

No **capítulo 3** apresenta-se uma análise do funcionamento do equipamento MAPA, bem como as metodologias de resolução dos problemas e as principais alterações levadas a cabo de forma a melhorar o seu desempenho. Este capítulo contempla ainda a realização de um conjunto de ensaios no terreno que visam validar os resultados, inclusivamente recorrendo à comparação com dados obtidos com o GripTester, que é um equipamento normalizado e muito utilizado para a medição do atrito dos pavimentos rodoviários.

No **capítulo 4** apresenta-se o estudo do efeito de fatores como da velocidade de ensaio na evolução do coeficiente de atrito e do efeito da dureza do pneu nos valores registados. Por fim, apresenta-se um estudo acerca da variação longitudinal das condições de segurança asseguradas pelo coeficiente de atrito na aproximação de passagens pedonais.

No **capítulo 5** são apresentadas as principais conclusões do trabalho efetuado, aponta-se as limitações e estabelece-se um panorama de trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários

2.1.1 Introdução

O desenvolvimento da indústria automóvel tem permitido, ao longo das últimas décadas, conceber e oferecer aos condutores uma magnitude de velocidade cada vez mais elevada num cada vez menor espaço de tempo. Para que essa condução seja efetuada em segurança, é necessário que as estradas se encontrem em condições adequadas.

Uma estrada é uma construção tridimensional com várias camadas compactadas. A superfície da estrada, também designada de “camada superior”, “camada de desgaste” ou “pavimento”, pode ser constituída por um material flexível, como por exemplo as misturas betuminosas, ou por um material mais rígido, como por exemplo o betão de cimento. Um pavimento recém-colocado e bem construído é considerado adequadamente liso. Aquando da entrada em serviço, a superfície pode degradar-se e fendilhar-se devido a vários fatores, incluindo a carga de tráfego, influências meteorológicas, condições geológicas e idade (Huang & Huang, 2014; Zuniga-Garcia & Prozzi, 2019; Mataei et al., 2016).

A qualidade da superfície da estrada assume-se atualmente como um requisito cada vez mais relevante e, quando mantida em bom estado, contribui para um aumento da segurança, do conforto e da durabilidade (Najafi et al., 2017). Ao nível da rede, o desempenho do pavimento pode ser monitorizada através de diferentes fatores. Entre os mais avaliados encontram-se o desgaste do pavimento, o atrito, a irregularidade e a textura. Para além dos fatores mencionados, o ruído da estrada e a resistência ao rolamento, embora com um grau de monitorização inferior, também são características da superfície fortemente relacionadas a questões de sensibilização ambiental, sendo essenciais para atender às demandas atuais de sustentabilidade (Kane et al., 2015; Sohaney & Rasmussen, 2013; Kogbara et al., 2016).

Uma vez que o âmbito da presente dissertação está intrinsecamente relacionado com a avaliação de características superficiais, na Figura 1 introduz-se a relação existente entre os principais fatores de influência das características superficiais dos pavimentos e as exigências que lhes estão associadas.

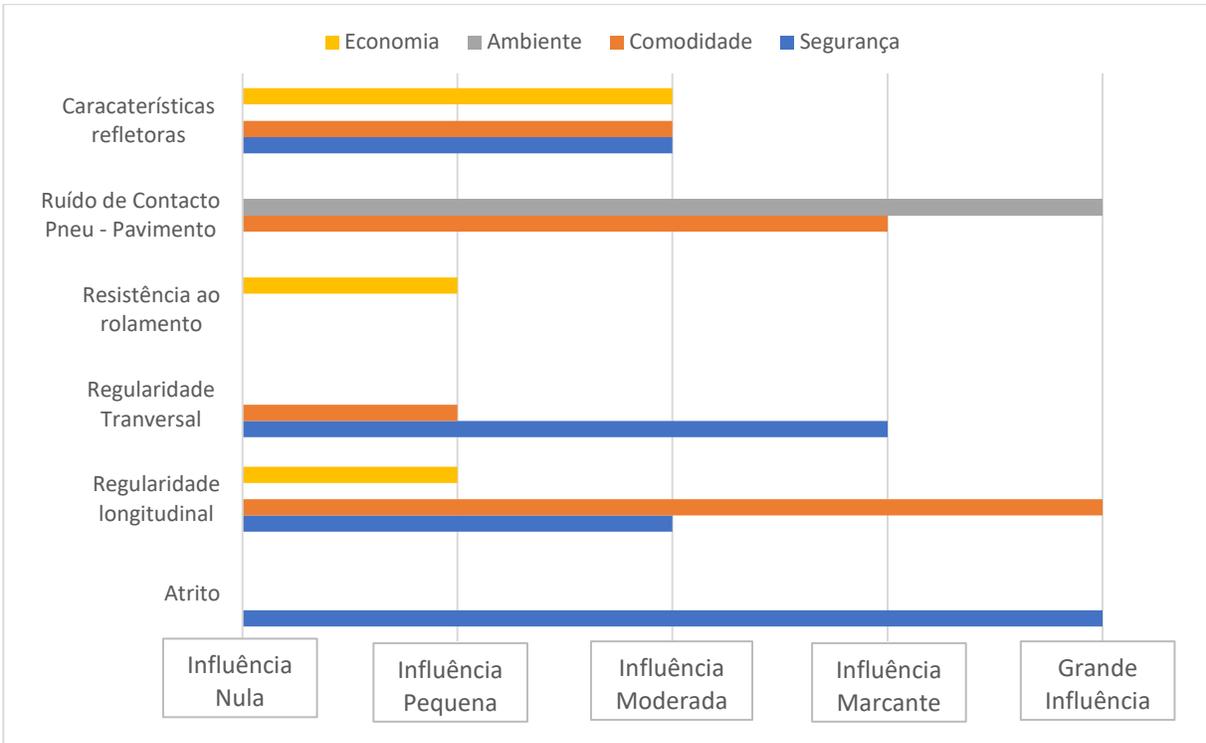


Figura 1 - Importância das principais características superficiais dos pavimentos (adaptado de Couchinho, 2011).

Nas próximas subsecções será realizada uma análise detalhada das características superficiais que se consideram preponderantes no âmbito do estudo levado a cabo na presente dissertação.

2.1.2 Atrito

Embora existam vários fatores de causa ligados aos acidentes rodoviários, várias investigações têm consistentemente mostrado uma estrita ligação entre os acidentes e as características da superfície do pavimento, como o atrito e a textura (Cezero et al., 2019). Assim, para que se possa desenvolver soluções eficazes para reduzir o número de situações potencialmente perigosas, é necessário recorrer à elaboração de estudos aprofundados sobre esses mesmos parâmetros (Huang & Huang, 2014; Zuniga-Garcia & Prozzi, 2019).

Para isso, é fundamental dominar o conceito de atrito. O atrito é definido como a resistência existente entre dois corpos quando estes se movem uns sobre os outros, resultando deste fenómeno uma força que atua

tangencialmente à área de contato (Smith, 2009). Na Figura 2 é apresentado um esquema das forças que atuam na interação pneu – pavimento.

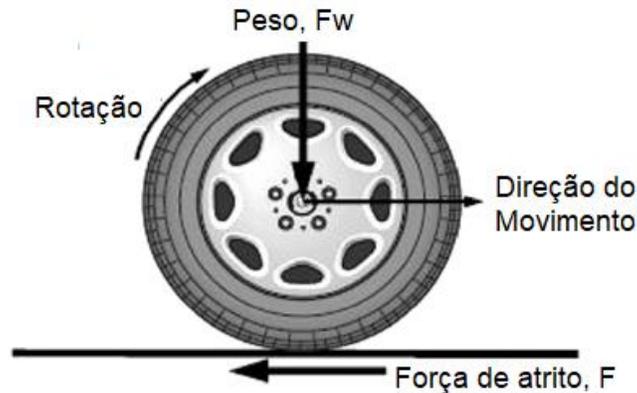


Figura 2 – Esquema das forças que atuam no pneu em rotação (Hall, 2009).

O atrito da superfície do pavimento é uma medida de segurança e tem um grande papel na redução de acidentes, especialmente em condições de tempo húmido. Uma parte essencial resultante da interação pneu – pavimento é a força de atrito entre o pneu e a superfície do pavimento, múltiplas vezes designada como resistência ao deslizamento. Esta interação confere ao veículo a possibilidade de realizar as suas manobras em condições de segurança (Fwa, 2017; Rezaei & Masad, 2013).

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 (Ueckermann, 2015).

A resistência ao deslizamento depende principalmente do atrito existente na interface pneu-pavimento. Nessa mesma interface, o atrito pode ter diversas componentes, sendo as principais categorizadas como atrito por adesão ou por histerese (ver Figura 3). 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 (Åström & Wallman, 2001). Além dos mecanismos mencionados, também existem componentes com menos importância. Estes estão

relacionados com o atrito proveniente do micro desgaste do pneu na superfície, dando-se então o nome de “micro” histerese ao contrário da “macro” histerese, anteriormente referida. O atrito proveniente do desgaste da borracha do pneu foi estudado e verificado através de vários ensaios efetuados na última década (Xiao et al., 2018; Smith, 2008).

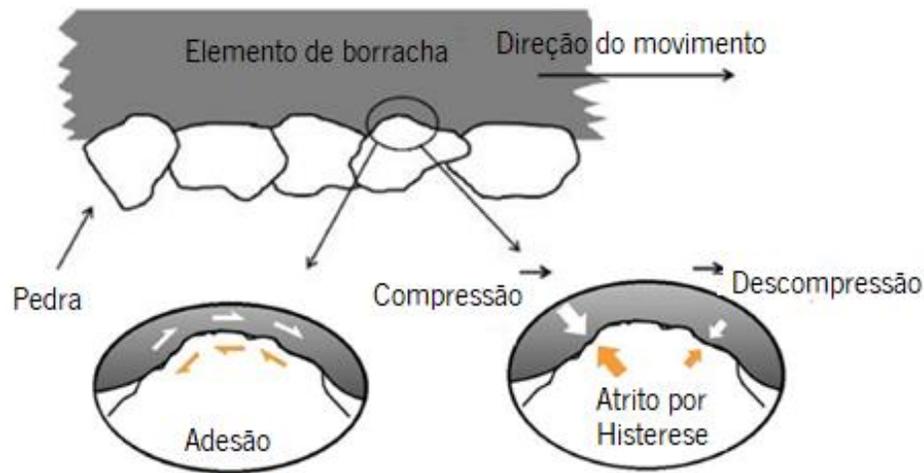


Figura 3 – Gráfico esquemático da histerese e da adesão (Rasmussen, 2013).

O atrito é, geralmente, avaliado através da medição de dois parâmetros (Pérez-Acebo et al., 2020; Al-Assi & Kassem, 2017):

- 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.
- Coeficiente de atrito transversal (CAT) – avalia a segurança de circulação em curva, sendo o que mais influencia a velocidade de circulação e consequentemente 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).

Para os dois coeficientes, os valores variam em função das condições do ensaio, tipo dos pneus (lisos ou com ranhuras), a espessura da lâmina de água, o ângulo de inclinação da roda (ângulo de deriva) e a velocidade do equipamento.

A Figura mostra a evolução típica do atrito ao longo do tempo face à ação repetida da passagem dos veículos, onde é possível identificar-se três fases distintas.

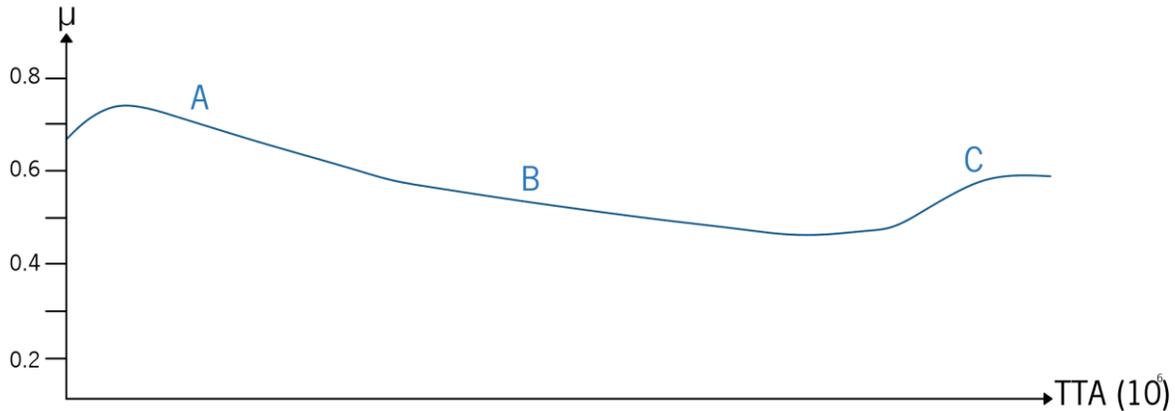


Figura 4 – Evolução do atrito sob a ação do tráfego total acumulado (TTA) (Branco et al., 2008)

Na fase A, a passagem do pneu dos veículos no pavimento provoca a remoção do filme de betume o que resulta num conseqüente aumento da micro e macro textura e do coeficiente de atrito. De seguida essa textura acaba por diminuir, devido ao contínuo desgaste dos inertes mais grossos, sendo então o coeficiente de atrito caracterizado por uma diminuição gradativamente lenta (Fase B). Na fase final (C), o pavimento encontra-se num estado de elevada degradação (caracterizado pelo aparecimento de várias patologias), o que acaba por contribuir para o aumento da macrotextura e da permeabilidade da camada de desgaste, levando assim a um novo aumento do coeficiente de atrito (Pérez-Acebo et al., 2020).

O nível de atrito é influenciado por diferentes características inerentes à estrada, inclusive à superfície do pavimento, ao tráfego e ao ambiente (Kane et al., 2019; Wang et al., 2013). Wilson e Dunn (2005) enumeraram vários fatores que afetam o nível de atrito proveniente da interação pneu – pavimento, a seguir identificados.

Relacionados com o veículo:

- Velocidade do veículo;
- Ângulo do pneu em relação à direção do movimento do veículo;

- A relação de deslizamento;
- Características do pneu (profundidade do piso do pneu, tipo estrutural, dureza e desgaste).

Relacionados com a superfície da estrada e fatores agregados:

- Propriedades geológicas do agregado superficial;
- Textura da superfície (microtextura e macrotextura);
- Tipo de superfície;
- Idade da superfície.

Relacionados com os fatores de carga:

- Número equivalente das cargas de tráfego;
- Geometria das estradas;
- Condições de fluxo de tráfego.

Relacionados com os fatores ambientais:

- Condições de temperatura;
- Acumulação anterior, intensidade e duração da chuva;
- Contaminação da superfície.

Wallman e Astrom (2001) também enumeraram vários fatores que influenciam o nível de atrito da superfície do pavimento. Denota-se alguma escassez de estudos relativamente aos fatores atmosféricos, algo que é justificado pelo facto de estes estudos já terem sido efetuados há algum tempo. No entanto, ao longo dos últimos anos têm sido implementadas novas metodologias no sentido de voltar as atenções para o efeito das alterações climáticas no que à evolução do coeficiente de atrito diz respeito, nomeadamente a temperatura e certos contaminantes.

Após apresentação da Tabela 1, são apresentadas descrições sumárias acerca da influência que determinadas solicitações climáticas imprimem na evolução do coeficiente de atrito.

Tabela 1 - Fatores que afetam o atrito / resistência ao deslizamento da superfície do pavimento

Características da superfície do pavimento	Parâmetros do Veículo	Propriedades do pneu	Clima
Microtextura	Velocidade de deslizamento (velocidade do veículo; ação dos travões)	Condições do pneu	Vento
Macrotextura	Manobras (virar; ultrapassagem)	Composição e dureza da borracha	Temperatura
Megatextura	-	Pressão do pneu	Presença de água (chuva; condensações)
Regularidade	-	Temperatura	Neve e gelo
Propriedades do material	-	-	Presença de contaminantes (sal; areia; poeira; lama)

Influência da temperatura:

Com o aumento da temperatura, as perdas do atrito por histerese diminuem contribuindo para a redução da resistência ao deslizamento. Com isto, a prática usual de medir o nível de atrito é mais recorrente no verão, pois é quando se obtém os valores mais baixos e, portanto, mais críticos para o dimensionamento (Kogbara et al., 2016).

A diminuição do atrito com o aumento da temperatura também foi atribuída a mudanças nas propriedades de rigidez, tanto do betume como do pneu. Mudanças na viscosidade da água também foram verificadas (Khasawneh & Liang, 2012). Diferentes fotomicrografias de pavimentos mostraram que a microrugosidade da superfície atinge o seu pico máximo durante o inverno, devido ao efeito natural que as intempéries imprimem nos agregados (Smith, 2008). Estes estudos apresentados fornecem então uma possível explicação para a variação da resistência ao deslizamento, observada ao longo do ano.

Influência da chuva:

Tal como se pode verificar na Figura 5, as medições de atrito feitas logo após a chuva revelam valores mais baixos (Fase A) comparativamente aos medidos durante períodos de secos. Isto deve-se provavelmente à

presença de contaminantes (poeira, óleos de veículos, areias), misturando-se estes com a água da chuva formando então uma lama que conseqüentemente conduz à diminuição do atrito. Quando essa lama é completamente “drenada” pela chuva e pela passagem de veículos o valor de atrito volta a aumentar (Fase B). Terminada a precipitação, esta inicia o seu processo de escoamento e de evaporação, passando o coeficiente de atrito do pavimento a ter novamente o valor normal em período seco (Fase C).

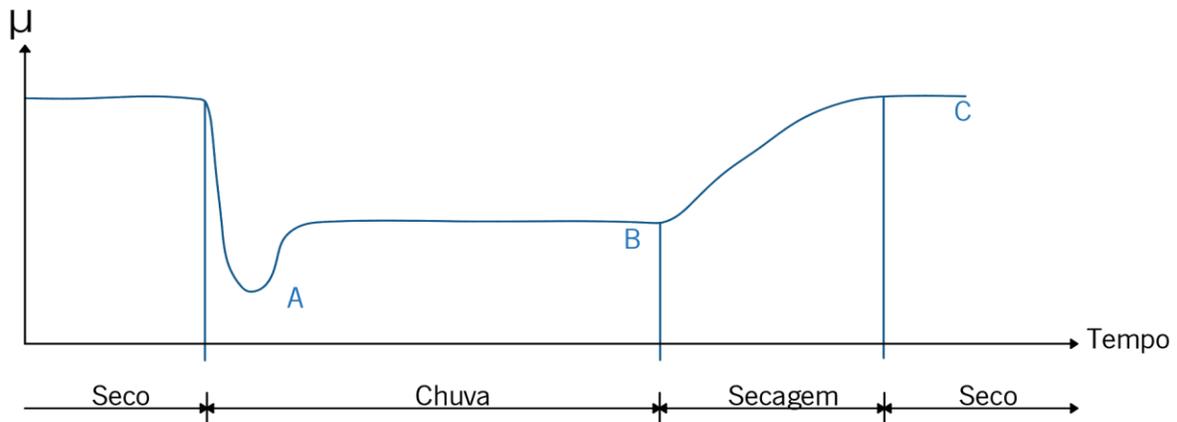


Figura 4 - Evolução dos valores do coeficiente de atrito, de acordo com a presença e ausência de precipitação (adaptado Branco et al., 2008).

Influência dos contaminantes:

A presença de contaminantes de granulometria fina, mas de dureza elevada (poeiras ou areias), levam ao polimento das superfícies, provocando assim uma redução na resistência ao deslizamento/atrito. Por outro lado, a presença de contaminantes igualmente duros, mas de granulometria grossa, acabam por lixar e “arranhar” a superfície dos pavimentos, tendo por isso o efeito oposto dos contaminantes finos, ou seja, contribuem para um aumento da resistência ao deslizamento/atrito (Yang et al., 2018; Wilson, 2013). Estas variações associadas à concentração de contaminantes podem conduzir a efeitos mais severos em locais propícios para a acumulação de veículos, nomeadamente as passagens pedonais, acrescentando-se ainda nestes locais o efeito dos óleos e os seus derivados.

2.1.3 Textura

A avaliação do atrito está diretamente relacionada com as características de textura da superfície dos pavimentos (Huang & Huang, 2014). A textura da superfície do pavimento é definida como as “irregularidades” verticais presentes na superfície relativamente a uma superfície perfeitamente plana (Zhu et al., 2021). As escalas de textura da superfície foram definidas pelo PIARC de acordo com os comprimentos de onda das irregularidades verticais (Kogbara et al., 2016).

Assim, a textura do pavimento divide-se em:

- Microtextura (comprimentos de onda de 0 mm a 0.5 mm);
- Macrotextura (comprimentos de onda de 0,5 mm a 50 mm);
- Megatextura (comprimentos de onda de 50 mm a 500 mm);
- Irregularidade (comprimentos de onda de 500 mm a 50 m).

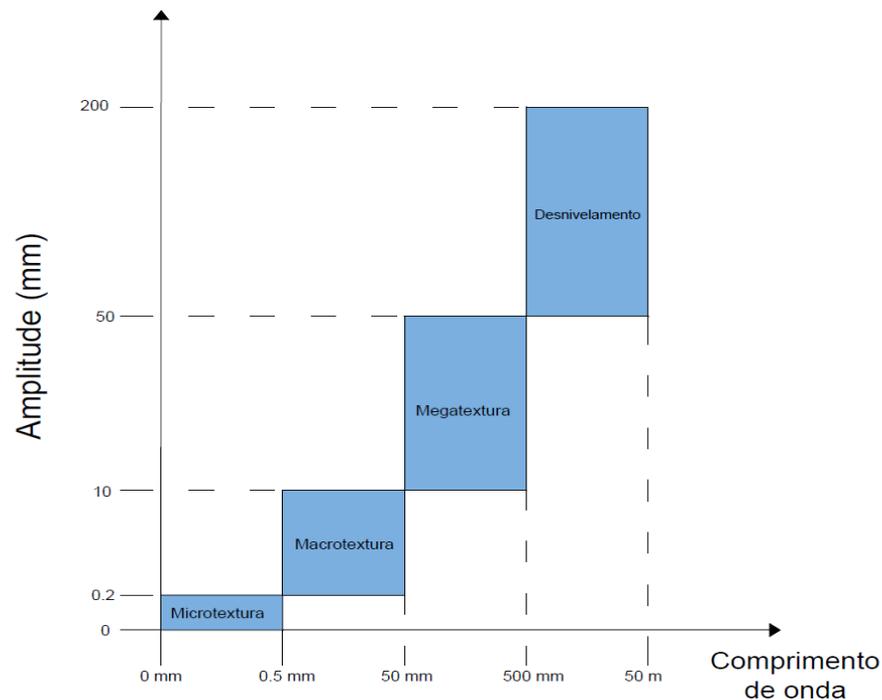


Figura 5 – Diferentes comprimentos de onda da textura do pavimento (adpatado de Hall, 2009).

As diferentes categorias de textura acabam por contribuir de diferentes formas para o atrito. A microtextura é a rugosidade da superfície de um pavimento a nível microscópico (Kassem et al., 2013). A sua magnitude

depende essencialmente da rugosidade da superfície dos agregados e da resistência dos mesmos ao polimento causado pela ação do tráfego (Jayawickrama et al., 1996; Noyce et al., 2005). Atua com relevância tanto em pavimentos húmidos como secos, sendo a sua presença necessária para qualquer que seja a velocidade do tráfego (Dunford, 2013). Além disso, a microtextura ajuda a cortar a película de água entre os agregados e o pneu, desempenhando assim uma função imprescindível na resistência ao deslizamento húmido (Mcquaid et al., 2013).

A macrotextura é tipicamente caracterizada pela forma e tamanho dos agregados presentes na superfície do pavimento, ou genericamente por ranhuras também presentes na superfície. A sua magnitude é afetada pelo tamanho, formato, espaçamento e disposição das partículas de agregados grossos (Noyce et al., 2005; Rezaei et al., 2009). A sua presença é mais determinante em pavimentos molhados, sendo para estes casos um dos fatores predominante na variação do atrito (Chen et al., 2019). Em pavimentos molhados, para velocidades superiores a 90 km/h, esta característica é a responsável por grande parte do atrito presente no pavimento (NCHRP, 2004).

Na Figura 6 apresenta-se uma breve representação da macrotextura e da microtextura e os respetivos efeitos destas duas características no nível de atrito.

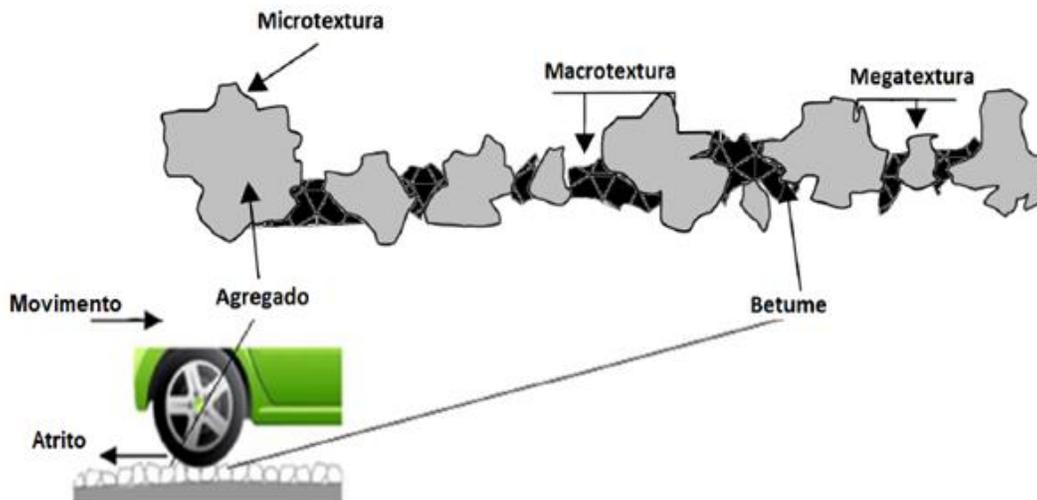


Figura 6 – Efeito da macrotextura e microtextura no atrito do pavimento (adaptado de Noyce et al., 2005).

A megatextura pode ser descrita por sulcos, buracos, grandes juntas e fendas presentes no pavimento. Esta característica afeta as vibrações na superfície dos pneus e, portanto, está relacionada ao ruído e à resistência

ao deslizamento. A irregularidade é geralmente causada por defeitos de construção ou por deformações causados pela carga de tráfego. Esta característica afeta a dinâmica do veículo, a qualidade de circulação e a drenagem do pavimento, podendo até diminuir o contato pneu – pavimento (Dunford, 2013). Tanto a microtextura como a macrotextura são essenciais para a correta circulação do tráfego, enquanto a megatextura e o desnivelamento são indesejáveis para o correto desempenho do pavimento.

Com isto pode-se concluir que a textura do pavimento é determinada por fatores relacionados com os materiais que compõem o pavimento e a sua formulação, isto é, das propriedades do agregado, do ligante da mistura betuminosa, assim como do tipo de técnica e tratamento dado durante e após a colocação do pavimento.

Como a medição da microtextura do pavimento não é trivial, os parâmetros de caracterização da textura são habitualmente relativos à macrotextura do pavimento, sendo os mais usados a profundidade média da textura (*Mean texture depth* - MTD) e a profundidade do perfil médio (*Mean profile depth* – MPD).

Os métodos tradicionalmente utilizados para a medição da textura são: a utilização de um perfilômetro equipado com laser, a utilização do método volumétrico da mancha de areia (ainda que este método possua muitas limitações devido à sua precisão, eficiência e confiabilidade) e ainda um método que recorre à drenagem de água: o “*Outflow Meter*” (Yu et al., 2020).

Outro método de medição emergente é a fotogrametria de curto alcance. As imagens podem ser fotografadas com câmaras comuns, mas devem ser tiradas sob iluminação natural ou LED. Seguidamente, as informações das imagens podem ser modeladas por *programas* profissionais, de forma a transformar as imagens num modelo 3D. Por exemplo, o *software* comercial 3DF Zephyr Pro pode ser adotado. Este *software* tem a capacidade de criar uma nuvem de pontos de alta densidade, permitindo então a avaliação tanto 2D como 3D da textura da superfície do pavimento (Woodward et al., 2014).

Tanto a macrotextura como a microtextura estão altamente relacionadas ao desempenho do pavimento relativamente à resistência ao deslizamento. A contribuição da macrotextura na resistência ao deslizamento do pavimento, é predominante para velocidade de circulação elevadas. Pelo contrário, a microtextura está mais relacionada com comportamento de atrito entre o pneu e o pavimento para velocidades mais baixas (Rado & Kane, 2014).

Além disso, conforme ilustrado na Figura 7, com o aumento da taxa de deslizamento 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 (Chou et al., 2017; Ong & Fwa, 2007; National academies Sciences, 2009).

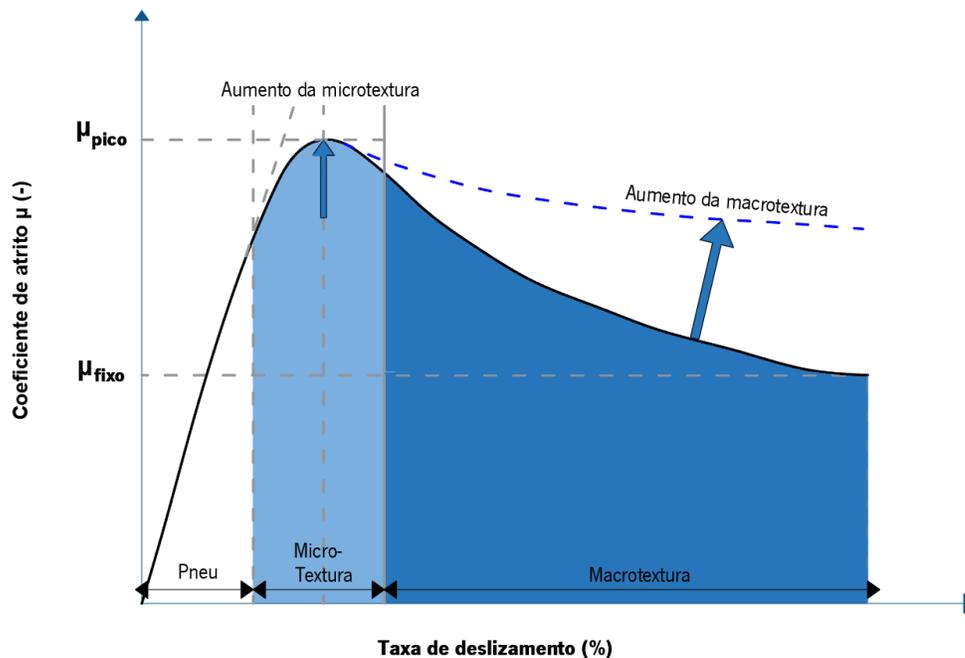


Figura 7 - Influência da textura do pavimento na curva de coeficiente de atrito – taxa de deslizamento (Luciana Girardi Omar, 2019).

2.1.4 Regularidade

A regularidade do pavimento é um parâmetro tradicionalmente utilizado por empreiteiros e gestores como um indicador de estado do pavimento nas estratégias de conservação e controlo de desempenho do pavimento. As irregularidades, definidas como desvios da superfície em relação a uma superfície plana, são indesejadas nos pavimentos e influenciam a dinâmica do veículo e a qualidade de circulação do mesmo. Podem também afetar a inclinação transversal e consequentemente prejudicar a drenagem nessa direção.

A nível de segurança, irregularidades presentes no pavimento podem levar o condutor a perdas de atenção e de percepção da estrada. Podem também originar situações de aquaplanagem, fenómeno caracterizado pela retenção de água, provocando então uma falta de atrito na interface pneu – pavimento. A nível económico, as irregularidades podem levar a um aumento do consumo de combustível e a um agravamento

do efeito das cargas transmitidas pelos pneus ao pavimento, aumentando o seu efeito dinâmico, levando então a uma redução do período de vida útil do mesmo, dada a diminuição das suas características estruturais (Couchinho, 2011).

Verifica-se a existência de métodos e indicadores que têm sido continuamente aprimorados para corretamente medir a regularidade da superfície da estrada. Os métodos de medição podem, dependendo da finalidade, ser divididos em métodos estacionários e dinâmicos (Figura 8). Os métodos estacionários são usados, por exemplo, em estacionamentos e áreas de trabalho em estradas fechadas, enquanto os métodos dinâmicos são essenciais para observação das redes viárias. A principal diferença entre os dois métodos de medição é que o método dinâmico implica medir fazer as medições à velocidade do tráfego, enquanto o estacionário está parado. Na Figura 8, pode-se ver o desenvolvimento de medições estacionárias, onde inicialmente se tinha em conta apenas um ponto para indicar irregularidades até à possibilidade atual de se calcular muitos pontos a partir de uma descrição 3D, quase verdadeira, da superfície da estrada.

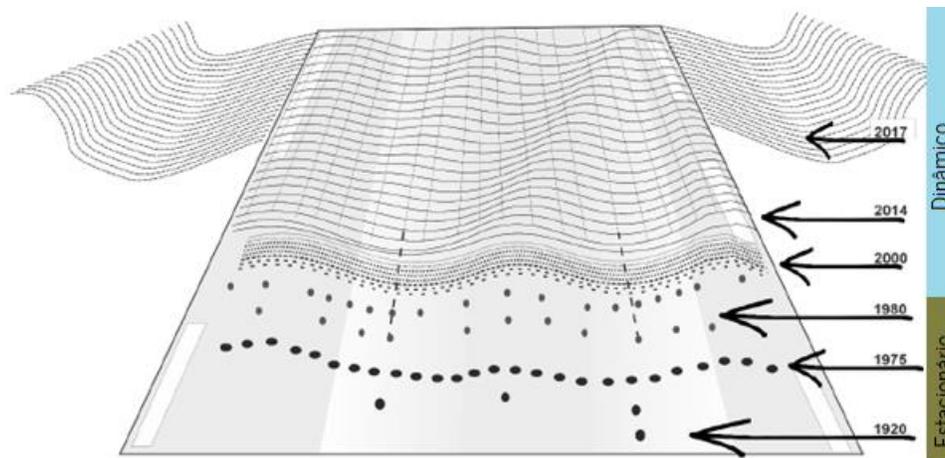


Figura 8 – Evolução do grau de detalhe das medições da regularidade

A regularidade divide-se em duas principais categorias: a regularidade longitudinal e a regularidade transversal. Relativamente à avaliação da irregularidade longitudinal das estradas usam-se dois princípios. Um deles é a medição recorrendo ao uso de, por exemplo, acelerômetros que medem a regularidade do pavimento (vibrações e choques induzidos). Outro princípio passa por fazer um levantamento dos perfis longitudinais e transversais, para que se possa conseguir reproduzir digitalmente a topografia do pavimento. Posto isto, modelos/filtros de efeito são aplicados nos perfis para avaliar os resultados. A nível de sensores, atualmente é recorrente o uso de sensores a laser que sem contato podem medir a característica desejada.

O desenvolvimento fez com que se mudasse de equipamentos estáticos como a régua perfiladora, para métodos mais modernos como os perfilômetros (também chamados de perfiladores inerciais).

A avaliação a nível transversal, visa o desgaste e as deformações causadas pelas cargas do tráfego. Para a sua medição são usados perfilômetros, que evoluíram desde o uso de vários lasers de medição pontual para um ou dois lasers de medição contínua de alta resolução (conseguem medir irregularidades com menos de um milímetro), capazes de cobrir quase 4 m de largura de estrada.

Recentemente, técnica LiDAR passou também a ser usada, sendo capaz de medir perfis quer da superfície da estrada quer da berma da estrada (Lundberg et al., 2018). Espera-se que em breve essa técnica seja confiável e tenha resolução suficiente para substituir as técnicas tradicionais.

2.2 Equipamentos de Medição do Coeficiente de Atrito

2.2.1 Introdução

No passado, a avaliação do atrito era tradicionalmente realizada com recurso a ensaios convencionais 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 análise do atrito, métodos estes mais rápidos e mais precisos, mas que ao mesmo tempo empregam um menor custo de utilização (Kogbara et al., 2018; Pérez-Acebo et al., 2020; Yang et al., 2018).

Este capítulo apresenta uma revisão dos métodos atualmente usados para a medição da resistência ao deslizamento e suas vantagens e desvantagens. No final, são propostas algumas ideias e soluções para desenvolver novos métodos de medição do atrito que contemplem os defeitos dos métodos atuais e com isto forneçam melhores resultados. Na Figura 9 apresenta-se a disposição/resumo do que será abordado de seguida.

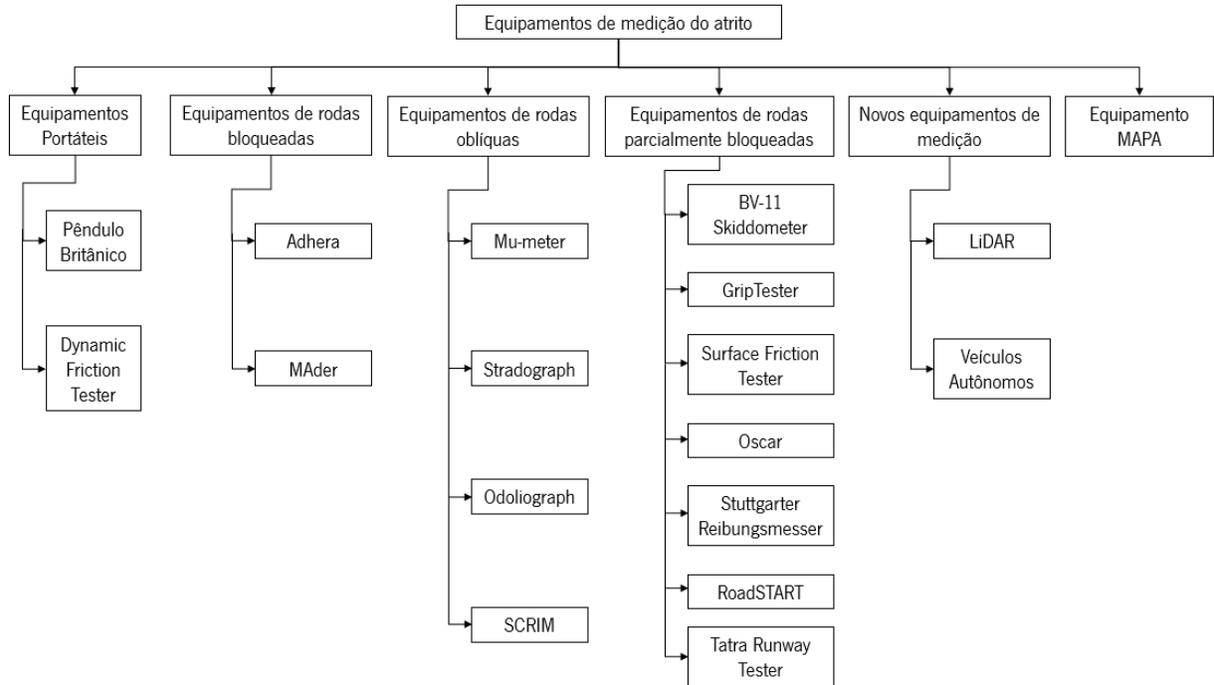


Figura 9 - Equipamentos de medição do atrito

2.2.2 Equipamentos Portáteis

Os equipamentos portáteis são utilizados para a realização de medições em laboratório ou em ensaios pontuais. Como exemplo desses equipamentos têm-se o Pêndulo Britânico e o *Dynamic Friction Tester*.

O mecanismo do Pêndulo Britânico (ver Figura 10) é baseado num pêndulo padronizado com uma base de borracha, que é lançado na direção do pavimento previamente humedecido. Após um contato deslizante de baixa velocidade com a superfície do pavimento é possível calcular o atrito de acordo com a sua perda de energia decorrente desse movimento. O seu valor é expresso em BPN (British Pendulum Number). É provavelmente o equipamento de medição de resistência ao deslizamento mais difundido no mundo. É altamente portátil e fácil de utilização (Mataei et al., 2016).

Como principal desvantagem tem o facto de medir o atrito da superfície em baixa velocidade. Apresenta comportamento não confiável quando usado em superfícies com textura grossa. Os procedimentos do operador e o vento podem afetar os resultados.

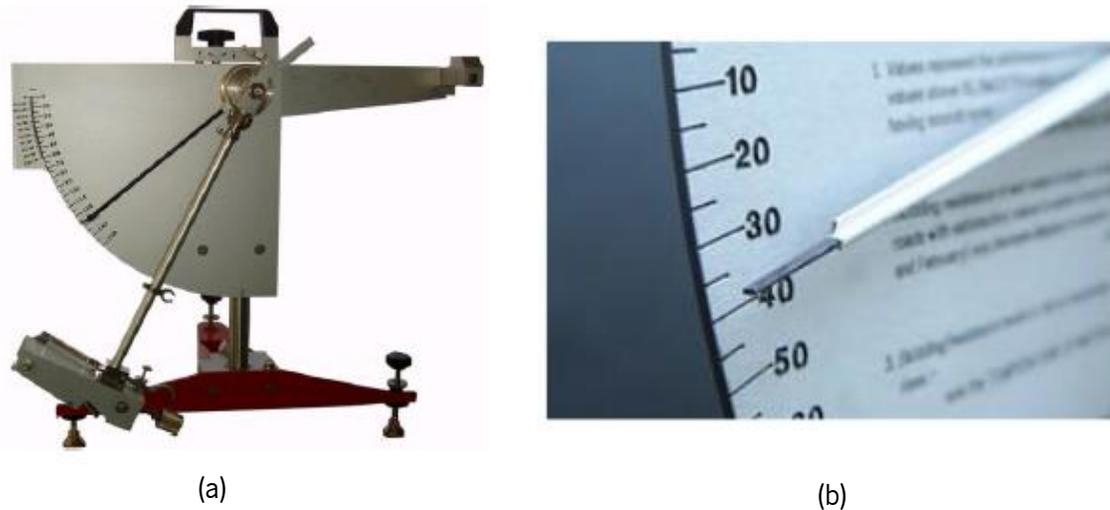


Figura 10 – Mecanismo de funcionamento do Pêndulo Britânico. (a) Pêndulo Britânico; (b) Pormenor de leitura do Valor da medição (Mataei et al., 2016).

O Dynamic Friction Tester (ver Figura 11), é um equipamento que permite realizar a medição direta do atrito, pontualmente, de vários tipos de superfícies de pavimentos. Este equipamento incide sobre a superfície do pavimento, sendo o seu contacto dado pelos deslizadores de borracha. Estes deslizadores estão ligados a um disco giratório horizontal. O atrito é medido conforme a velocidade de rotação do disco diminui. O equipamento possui um reservatório que despeja água na superfície que está a ser ensaiada. Os coeficientes de atrito em cada velocidade, entre 0 e 80 km/h, são graficamente registados num espectro contínuo para cada medição (Mataei et al., 2016; Rodriguez, 2009).

É um equipamento altamente repetível e não é afetado por operadores ou pelas condições do vento, como é o caso do Pêndulo Britânico. A sua principal desvantagem é que precisa de controlo de tráfego e fecho de via quando usado em campo.



Figura 11 – Dynamic Friction Tester (Rodriguez, 2009).

2.2.3 Equipamentos de Rodas Bloqueadas

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 têm 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 na realização de inspeções 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. De seguida são apresentados dois equipamentos deste tipo: o Adhera e o MAder.

O Adhera (ver Figura 12), é um equipamento de medição do atrito longitudinal, que é rebocado através de um veículo que contém no seu interior um reservatório de água bem como todo o sistema de aquisição de dados. De referir que o reboque foi desenvolvido de forma a simular um quarto de um veículo de passageiros comum (GDDKiA, 2009).



Figura 12 – Equipamento Adhera (GDDKiA, 2009).

A roda está totalmente bloqueada, simulando condições de deslizamento de 100%. Este equipamento consegue realizar medições para velocidades de 40, 60, 90 e 120 Km/h, sendo o comprimento habitual de medição de 20 metros.

O MAder (ver Figura 13), tal como o Adhera, também é um equipamento de medição do atrito longitudinal, que é rebocado através de um veículo específico que tem instalado na sua cabine um computador que comanda automaticamente todas as operações de medição e controlo. Este equipamento é um reboque de duas rodas que se encontram espaçados de acordo com as medidas de um automóvel comum. O principal objetivo desta configuração é que o equipamento transite no local onde normalmente as rodas dos veículos circulam, ou seja, onde o pavimento está mais desgastado (Domingues, 1997; Yu et al., 2020).



Figura 13 – Equipamento MAder (Domingues, 1997).

Todo o sistema de aquisição de dados está dentro do veículo que reboca o equipamento, bem como um sistema de ar comprimido. O ar comprimido é usado para atuar nas pinças dos travões que permitem o bloqueio das rodas de ensaio. Para medir o binário de travagem o equipamento conta com células de carga que medem a reação provocada nos travões. Esta leitura dá então de forma indireta o coeficiente de atrito entre da interface pneu / pavimento.

2.2.4 Equipamentos de Rodas Oblíquas

Os equipamentos de rodas oblíquas, também designados como equipamentos com ângulo de deslizamento lateral, 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. Sabendo-se o valor dessa força é possível calcular o coeficiente de atrito.

Estes equipamentos são muito utilizados em países como a Alemanha, Bélgica, Espanha, França, Itália e Reino Unido. Seguidamente serão abordados alguns equipamentos desta categoria, tais como: o Mu – meter, o Stradograph, o Odoliograph e o SCRIM.

O Mu – meter (ver Figura 14), consiste num equipamento rebocado, constituído por três rodas, duas delas para medir o coeficiente de travagem a partir da medida da força lateral nos eixos de duas rodas, designadas por “*Friction Wheels*” (FW). O seu mecanismo de medição baseia-se no afastamento dos membros laterais do chassis, causado pelo atrito entre os pneus laterais e o pavimento devido ao deslocamento do equipamento. Os sinais de força e distância obtidos no equipamento são transferidos para uma unidade de registo e processamento de dados, que está conectada a um computador portátil, permitindo então aceder às informações em tempo real.

Em cada “FW” é aplicada uma carga de 77,5 kgf através de um lastro colocado nos amortecedores (TYROSAFE, 2008). A velocidade do equipamento pode ser ajustável, entre os 20 e os 80 km/h, sendo a mais vulgar de 65 km/h.



Figura 14 – Equipamento Mu – meter (EASA, 2010).

O Stradograph (ver Figura 15), é um veículo com a adaptação de um dispositivo que permite realizar medições contínuas do coeficiente de atrito, através de duas rodas situadas ao lado do eixo longitudinal do mesmo. O *slip* (taxa de deslizamento) das rodas pode variar entre 0 e 15%, podendo também operar segundo ângulos de 0 a 15° em relação ao eixo longitudinal do veículo. A força normal que atua sobre as rodas de ensaio pode variar entre os 980 e os 3920 N e a velocidade mais usual de ensaio está compreendida entre os 20 e 60 km/h, podendo atingir em casos extremos os 150 km/h.

O equipamento pode registrar até sete parâmetros simultaneamente, tais como força lateral direita, força lateral esquerda, força longitudinal direita, força longitudinal esquerda, velocidade de rotação das rodas esquerda e direita, cargas que atuam nas rodas esquerda e direita e ainda a velocidade do veículo (Santos, 2004).

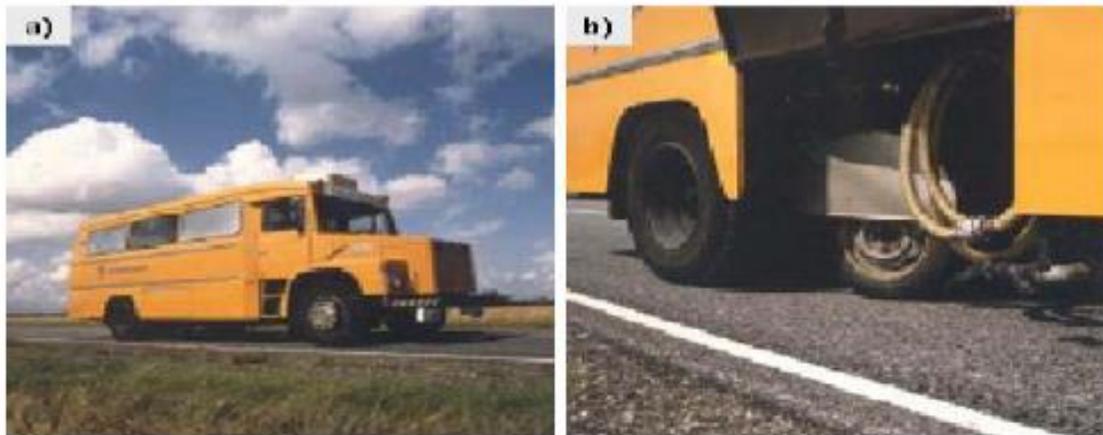


Figura 15 – Equipamento Stradograph. (a) Stradograph; (b) Pormenor da roda oblíqua (Santos, 2004).

O Odoliograph (ver Figura 16), é um equipamento de roda oblíqua que trabalha sob o princípio de força transversal, fazendo uso de um pneu de carro normal. Equipamento mede o atrito transversal com um ângulo de roda de 20 graus (TYROSAFE, 2008). A roda de ensaio é constituída por um pneu liso, sendo a carga vertical estática aplicada de 2700 N e a velocidade de ensaio de 80 Km/h. É um equipamento que foi desenvolvido na Bélgica, sendo por isso, muito utilizado no interior do território belga.



Figura 16 – Equipamento Odoliograph (TYROSAFE, 2008).

O SCRIM, também designado por “*Sideways Force Coefficient Routine Investigation Machine*” (ver Figura 18), foi desenvolvido pela Transportation Road Research Laboratory (TRRL) e é caracterizado por um sistema completamente autossuficiente, constituído por um chassis de veículo comercial dotado com um tanque de água de grande capacidade (ver Figura 17). Para além desta configuração, este equipamento também contém um sistema de espalhamento de água possibilitando assim molhar a superfície do pavimento imediatamente à frente da roda de ensaio com uma lâmina constante de 0.5 a 2 mm de espessura nominal. Com isto, o SCRIM permite medir o coeficiente de atrito da superfície do pavimento molhado.

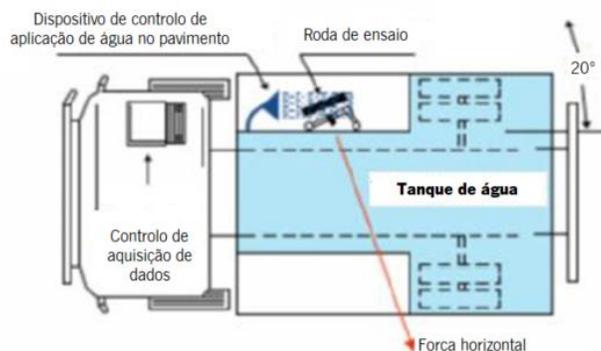


Figura 17 – Esquematização do funcionamento do SCRIM (Descornet et al., 2006).

De realçar que este equipamento é provavelmente o mais conhecido desta categoria, variando a sua velocidade de ensaio entre os 40 e 140 km/h, permitindo realizar inspeções diárias de aproximadamente 200 a 300 km, variando consoante o tipo de pavimento.



Figura 18 – Equipamento SCRIM (Descornet et al., 2006)

2.2.5 Equipamentos de rodas parcialmente bloqueadas

De forma distinta face à maioria dos equipamentos de rodas bloqueadas, estes equipamentos têm como principal objetivo medir, de forma contínua, o coeficiente de atrito. Podem-se dividir em duas categorias: deslizamento fixo, casos do “*BV11 – Skiddometer*”, do “*GripTester*” e do “*Surface Friction Tester*”, deslizamento variável, como o “*Oscar*”, o “*Stuttgarter Reibungsmesser*”, o “*RoadSTAR*” e o “*Tatra Runway Tester*”.

Os equipamentos de deslizamento fixo, o BV11 – Skiddometer (ver Figura 19), foi especificamente projetado para a medição contínua do coeficiente de atrito longitudinal. Consiste num reboque com uma estrutura soldada apoiada por três rodas em linha, sendo que as duas rodas laterais têm a função de garantir a estabilidade do conjunto do reboque e a roda intermediária para fazer as medições do coeficiente de atrito. Este equipamento pode ser usado para realizar medições em pavimentos rodoviários e aeroportuários (GDDKiA, 2009).



Figura 19 – Equipamento BV11 – Skiddometer (GDDKiA, 2009).

Este equipamento foi projetado para operar a uma *taxa de deslizamento* (slip) de 17% e a uma velocidade de 70 km/h. Quando acoplado com uma unidade de água, permite realizar medições com o pavimento molhado através de uma lamina de água com 0.5 a 1mm de espessura.

O GripTester consiste num reboque de três rodas (ver Figura 20), em que o seu funcionamento permite que as forças verticais e horizontais sejam continuamente medidas e totalizadas habitualmente a cada 10 ou 20 metros. As medições são realizadas pela roda central, sendo que esta tem uma rotação mais lenta/retardada, operando a uma *taxa de deslizamento* controlada de 15%. Este equipamento permite fazer medições para velocidade de circulação que variam entre 5 e 100 km/h.

A expressão utilizada pelo GripTester para calcular o coeficiente de atrito é dada por:

$$GN = \frac{F_v}{F_h}$$

Em que GN é o Grip Number (coeficiente de atrito – adimensional), e F_v e F_h são as forças (kgf) verticais e horizontas respetivamente.



Figura 20 – Equipamento GripTester (Harverson, 2003).

É caracterizado pela sua elevada robustez, é compacto e leve sendo a facilidade de operação umas das suas principais vantagens. A metodologia de ensaio é reconhecida internacionalmente pela PIARC/AIPCR e pela ICAO – “*International Civil Aviation Organization*”.

Na Figura 21 é ainda possível visualizar uma versão deste mesmo equipamento mas de utilização manual, normalmente utilizada em casos de estudos específicos ou em zonas de difícil acesso (Findlay Irvine, 2011).



Figura 21 – Micro GripTester (Findlay Irvine, 2011).

O *Surface Friction Tester* (SFT) (Figura 22), ao invés dos restantes equipamentos, consiste num veículo automóvel modificado, onde uma quinta roda, previamente instalada, efetua a medição contínua do coeficiente de atrito. Tal como o SCRIM, este equipamento também contém um sistema de aspersão de água possibilitando molhar a superfície do pavimento imediatamente à frente da roda de teste com uma lâmina constante aproximadamente 1 mm de espessura nominal (Airport Friction Tester, 2011).



(a)



(b)

Figura 22 – Equipamento SFT. (a) Parado; (b) Em medição (Airport Friction Tester, 2011).

O SFT opera com uma taxa de deslizamento de 15% e, por norma, as velocidades de ensaio podem variar entre 5 e 100 km/h. A Figura 23 apresenta, de forma esquemática, a organização do SFT, onde:

- 1 – Sistema Informático;
- 2 – Reservatório de água;
- 3 – Sistema de medição computadorizado;
- 4 – Unidade elétrica;
- 5 – Transmissor de torção;
- 6 – Sensor de carga vertical;
- 7 – Roda de ensaio;
- 8 – Sistema hidráulico.



Figura 23 – Organização do SFT (Airport Friction Tester, 2011).

Os equipamentos de deslizamento variável têm a capacidade de travar totalmente (100% de deslizamento) ou parcialmente as rodas, permitindo a medição do valor máximo e mínimo do coeficiente de atrito (Mataei

et al., 2016) . De seguida serão abordados alguns equipamentos desta categoria: o “*Tatra Runway Tester*”, o “*Stuttgarter Reibungsmesser*”, o “*Oscar*”, o “*RoadSTAR*”.

O *Tatra Runway Tester* (TRT) é constituído por um equipamento de medição localizado na parte inferior de um veículo especialmente modificado para o propósito (ver Figura 24). Para além desta configuração, este equipamento contém um cilindro hidráulico com um sensor de pressão incorporado de forma a controlar a carga vertical de ensaio durante as medições. Por norma utiliza-se uma carga vertical de 1400 N, mas esta pode variar de 500 N a 1400 N (Kogbara et al., 2016).



Figura 24 – Equipamento Tatra Runway Tester (TYROSAFE, 2008).

Este equipamento foi desenvolvido na República Checa para a realização de medições de rotina do coeficiente de atrito longitudinal. O seu sistema de travagem pode ser fixado para providenciar uma taxa de deslizamento entre 1% e 100%, sendo 25% o valor normalmente usado em medições de rotina.

O *Stuttgarter Reibungsmesser* (SRM) é um equipamento de medição do atrito longitudinal, que consiste num camião de grande porte com as rodas de ensaio montadas na parte traseira (ver Figura 25), em que as medições do coeficiente de atrito podem ser feitas pelos dois pneus, realizando-se em seguida, uma média dos valores.



Figura 25 – Equipamento Stuttgarter Reibungsmesser (TYROSAFE, 2008).

Este equipamento foi desenvolvido pela Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) e pode ser usado com uma roda bloqueada, com uma taxa de deslizamento fixa de 15% ou com uma taxa de deslizamento variável, simulando assim condições de travagem como as do sistema ABS (*Anti – Lock Braking System*). Contém uma unidade pneumática que controla a carga na roda de ensaio e a lâmina de água aplicada pode variar entre 0 mm e 3 mm. Para além disso o SRM permite fazer medições para velocidades de circulação de 40, 60, 80 e 100 km/h (Kogbara et al., 2016).

O Oscar, consiste num reboque, constituído por um eixo de duas rodas montado na parte traseira de um pequeno camião (ver Figura 26), onde este pode ser elevado quando não estiver a ser utilizado. Este equipamento mede o coeficiente de atrito longitudinal e é muito utilizado na Noruega. Para além disso, o Oscar mede o atrito com uma taxa de deslizamento variável, podendo esta variar entre 3 a 75% (TYROSAFE, 2008).



(a)



(b)

Figura 26 – Equipamento Oscar. (a) Reboque preparado para realização do ensaio; (b) Reboque elevado (TYROSAFE, 2008).

O RoadSTAR é um equipamento de medição do atrito longitudinal, que consiste num camião de grande porte com uma roda montada no lado direito da parte traseira do seu chassi (ver Figura 27), sendo possível realizar medições com taxas de deslizamento diferentes, usando uma caixa de embraiagem específica. Este equipamento contém um reservatório e um sistema de espalhamento de água possibilitando assim molhar a superfície do pavimento imediatamente à frente da roda de ensaio com uma lâmina constante de 0,5 a 2 mm de espessura nominal e pode chegar aos 120 km/h de velocidade de ensaio, sendo 60 km/h a velocidade padrão, pois permite a medição do coeficiente de atrito longitudinal em curvas com raio superior a 85 metros. Os valores obtidos no ensaio são transmitidos para um computador presente no interior da cabine através de um equipamento de controlo de dados (Kogbara et al., 2016; Mataei et al., 2016). A Figura 27a apresenta, de forma esquemática, a organização do RoadSTAR, onde:

- 1 – Roda de ensaio;
- 2 – Cilindro Pneumático;
- 3 – Saída de água;
- 4 – Sistema coletor de água;
- 5 – Caixa de engrenagem;
- 6 – Reservatório de água;
- 7 – Cabine de armazenamento de dispositivos;
- 8 – Cabine de operador e registo de dados digitais recolhidos.



(a)



(b)

Figura 27 – Equipamento RoadSTAR. (a) Organização do RoadSTAR; (b) Roda de teste (TYROSAFE, 2008).

2.2.6 Novos equipamentos de medição

Tendo por base os métodos atualmente existentes, existem novas propostas para medir o atrito do pavimento. A Figura 28 mostra os principais requisitos para os novos métodos de medição.

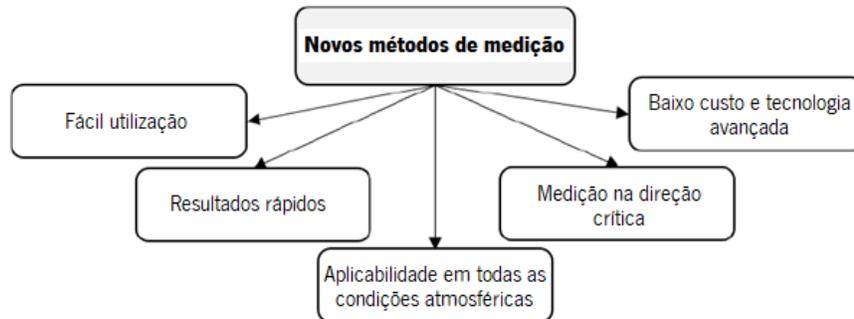


Figura 28 - Requisitos para novos métodos de medição.

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 (Du et al., 2019). Este método estima rapidamente o nível de atrito do pavimento por meio de modelação 3D usando as informações do pavimento adquiridas a partir de 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 a mesma confiabilidade que os métodos de medição tradicionais 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 dos VA em tempo real (Du et al., 2020). Atualmente, está em desenvolvimento um método dinâmico para estimar o nível de 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.

2.2.7 Equipamento MAPA

O MAPA (ver Figura 29) 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). Este equipamento é resultado da junção de dois sistemas distintos, o sistema mecânico (estrutura mecânica, eixos, rodas, chumaceiras, freio eletromagnético e carroçaria) e o sistema de controlo de aquisição de dados (cablagem elétrica, variadores de tensão, sensores de rotação, célula de carga, microcontrolador e software).



Figura 29 – Equipamento MAPA

De seguida são apresentados alguns dos componentes base presentes neste equipamento:

Travão eletromagnético do modelo Telma AD50-55 (ver Figura 30). O funcionamento deste tipo de travão baseia-se na interação entre o campo magnético criado pelas bobines e o campo contrário, criado pelas correntes de Foucault (geradas através da interação do campo magnético com os rotores do travão). A energia cinética é então transformada em energia térmica e libertada sob a forma de calor, sendo que esta transformação ocorre sem qualquer contacto físico entre as peças. Esta é talvez uma das vantagens destes equipamentos face às alternativas no mercado. Uma outra vantagem é que variando a potência elétrica que circula nas bobines do travão, varia-se o binário de travagem resultante, fator determinante para a variação do deslizamento da roda de teste.



Figura 30 – Travão eletromagnético Telma AD50-55 (Machado, 2017).

Monobraço oscilante (ver Figura 31). O mecanismo escolhido foi o monobraço traseiro de uma Honda VRF 750. Esta opção permite testar vários tipos de borracha de pneu e também de diferentes diâmetros de rodas, desde 8 polegadas até 15 polegadas, sendo apenas necessário remover 4 parafusos.



Figura 31 – Monobraço traseiro de uma Honda VRF (Machado, 2017).

Na gênese do equipamento, foi também desenvolvido um sistema elétrico de aquisição de dados, capaz de atuar e corrigir variações bruscas de rotação, intencionais ou não, durante os testes. De forma breve este sistema é constituído por um variador de tensão, um microcontrolador (responsável por ler os dados recolhidos pelos sensores de rotação e interage com o variador de tensão), um Encoder ótico de 200 pulsos por rotação (responsável pela leitura da velocidade de rotação das rodas), um Encoder indutivo (sensor de ABS), uma célula de carga de 300 Kg (responsável pela medição da reação do travão eletromagnético ao deslizamento requerido, ou seja, o binário de travagem), duas bombas elétricas (responsáveis por manter uma película de água constante de cerca de 1 mm sob o pneu de teste) e um variador de tensão (comandado pelo microcontrolador e é responsável por variar a velocidade de rotação).

O equipamento MAPA possui um conjunto de pressupostos mecânicos e eletrônicos, tendo alguns deles já sido expostos nos parágrafos anteriores. Do ponto de vista da Engenharia Civil, e mais especificamente no âmbito do trabalho de dissertação efetuado, importa compreender a forma como o mesmo efetua a medição e a conjuntura analítica que leva à aquisição dos dados necessários. De seguida apresenta-se um esquema que pretende servir de base para a explicação que se seguirá acerca do funcionamento do MAPA.

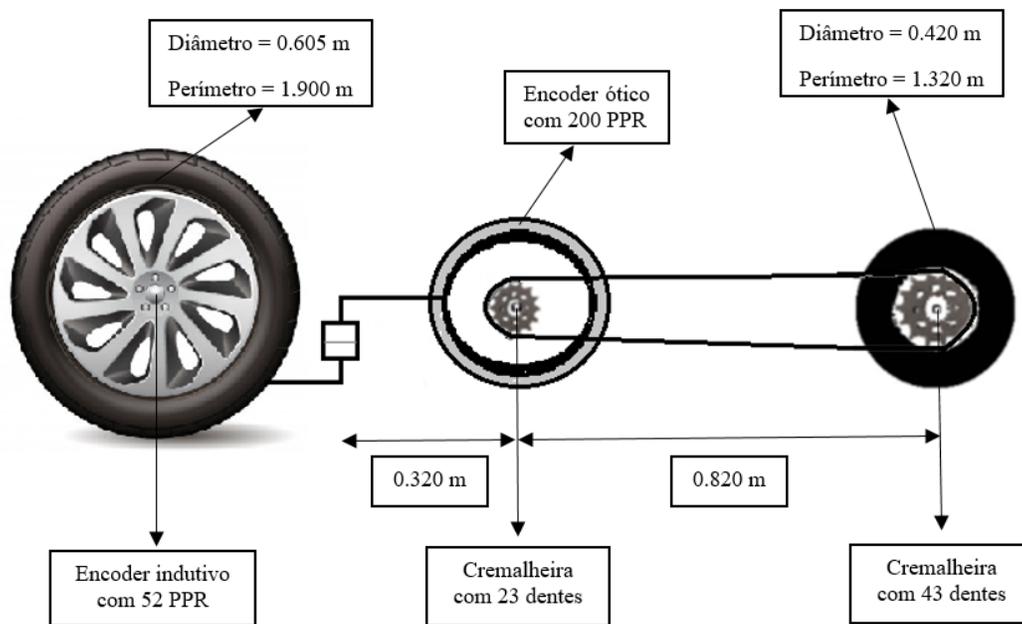


Figura 32 – Esquema ilustrativo do equipamento MAPA

O equipamento MAPA permite obter o valor do coeficiente de atrito (μ) através do princípio base da sua definição, ou seja, através do quociente entre um numerador (força de atrito) e um denominador (reação normal), através da expressão:

$$\mu = \frac{\text{Força de Atrito}}{\text{Reação Normal}}$$

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 exercido pela roda pequena sobre a superfície do pavimento da roda pequena, neste caso, 64 quilogramas.

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 (*slip*) 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. Esta força (totalmente aplicada sobre a célula) representa o esforço que o travão está a fazer para que a roda vá travada de uma determinada percentagem. Através da distorção de um conjunto de binários existentes entre a localização do travão elétrico e o eixo da roda de medição, é possível transformar a força vertical medida na célula numa força horizontal aplicada contrariamente ao movimento da roda pequena.

Efetuada o quociente entre essa mesma força horizontal e a reação normal sobre a roda, obtém-se então um parâmetro adimensional definido com o coeficiente de atrito. Este coeficiente obtido através do equipamento MAPA tanto pode ser aferido de forma instantânea como através da média de um determinado número de leituras que, por pré-configuração de código, são cem.

3. VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO MAPA

O equipamento MAPA foi desenvolvido no Departamento de Mecânica da Universidade do Minho com o principal objetivo de medir o atrito da superfície dos pavimentos numa perspetiva de avaliação da sinistralidade. Terminada a construção, é determinante a análise do seu funcionamento e validação dos seus resultados. Neste capítulo trata-se em detalhe essas duas fases de desenvolvimento do MAPA.

Numa primeira fase será apresentada a análise da componente estrutural do equipamento, ou seja, vantagens e/ou ineficiências na sua conceção. De seguida é feita uma análise à componente eletrónica, onde se identificou alguns aspetos a melhorar e se propôs melhorias, nomeadamente nos algoritmos que controlam o funcionamento do equipamento e fazem a aquisição e tratamento de dados. Por fim, surge o procedimento adotado para a validação do funcionamento do equipamento MAPA, inclusivamente recorrendo a ensaios comparativos com o equipamento *GripTester*.

3.1 Análise e proposta de melhorias na componente estrutural

O equipamento MAPA possui características ao nível da sua estrutura que devem ser analisadas, nomeadamente o peso, o comprimento e o movimento da roda de ensaio.

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 aceitável 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 o mesmo grande, algo que poderia ser corrigido. O efeito desta característica reflete-se nos binários célula/travão e travão/roda de medição, que poderiam ser diminuídos proporcionalmente, não alterando desse modo toda a interface analítica. A justificação deste comprimento está associada ao aproveitamento de um braço de mota, mas demasiadamente extenso.

Uma outra desvantagem apontada na componente estrutural reside na inexistência de movimentos rotacionais da roda de ensaio. Esta opção de conceção do equipamento dificulta o movimento em torno de rotundas ou curvas mais apertadas, porque a roda de ensaio acaba por se arrastada ao longo do trajeto, provocando um maior desgaste do pneu, e por consequência, afetando os resultados.

Em termos estruturais, estas são as principais lacunas do equipamento. Importa referir que não foram alteradas devido aos constrangimentos que iriam provocar. Assim, propõe-se que futuro a questão da rotação da roda e a diminuição do comprimento do equipamento seja tratada.

3.2 Análise e propostas de melhoria na componente eletrónica e de programação

Os dispositivos eletrónicos implementados no MAPA, como em todos equipamentos, requer o desenvolvimento de um conjunto de rotinas numa determinada linguagem de programação que visa o controlo do equipamento, a leitura de dados e tratamento de dados e ainda a exibição da informação em tempo real ao utilizador. Existe obviamente uma elementar ligação entre esta vertente e a vertente da Engenharia Civil, considerando-se preponderante que cada vez mais exista uma interligação de conhecimentos entre as diversas áreas, tendo contribuindo esta parte do trabalho para a aprendizagem de muitos dos fundamentos da eletrónica e das suas relações de interoperabilidade com os meios envolventes.

Para ser possível efetuar esta análise foi necessário estudar, interpretar e por fim corrigir os problemas encontrados, o que demorou muito mais tempo do que o inicialmente previsto para esta tarefa.

A seguir, aborda-se a componente eletrónica em três secções distintas: o funcionamento do código Arduino, o funcionamento da célula de carga e o *software* de aquisição de dados para suporte digital.

Relativamente ao Código Arduino, em primeiro lugar foi necessário estudar aprofundadamente o código de funcionamento do equipamento, tendo-se efetuado algumas alterações sobretudo no valor analítico de algumas variáveis. No Anexo I encontra-se a listagem do código Arduino, na sua versão final, isto é, como foi implementado.

Foram implementadas as seguintes alterações:

- Alteração do valor do peso exercido sobre a roda pequena de 64 kg para 60 kg. Efetuou-se a medição do peso transmitido pela roda (Figura 33) e verificou-se que era de 64 kg. Esta verificação é fundamental, dado que o peso da roda sobre o pavimento representa diretamente o valor da reação normal, no cálculo do coeficiente de atrito;
- Após recolha inicial de dados, concluiu-se que quando se iniciava a medição existia uma diferença *a priori* de aproximadamente 25% entre as RPM da roda de medição e as RPM da roda de maior diâmetro, sendo por isso necessário corrigir essa diferença. Este problema foi detetado durante a realização de ensaios com *slip* 0% (roda livre). Verificou-se que para este nível de *slip* o travão elétrico era acionado, a partir do som produzido que indicava a aplicação de força sobre a roda, o que não poderia acontecer pois com um *slip* nulo não pode existir qualquer travamento da mesma.
- Alteração do valor do “*loop time*”. Este parâmetro estabelece o intervalo de tempo entre cada medição. Inicialmente o valor era de um segundo, ou seja, o equipamento apenas registava uma medição por segundo, o que é insuficiente para a caracterização do atrito ao longo de uma determinada extensão particularmente a velocidades elevadas. O valor foi alterado de forma a obter uma medição a cada 100 milissegundos.



Figura 33 – Medição do peso sobre a roda

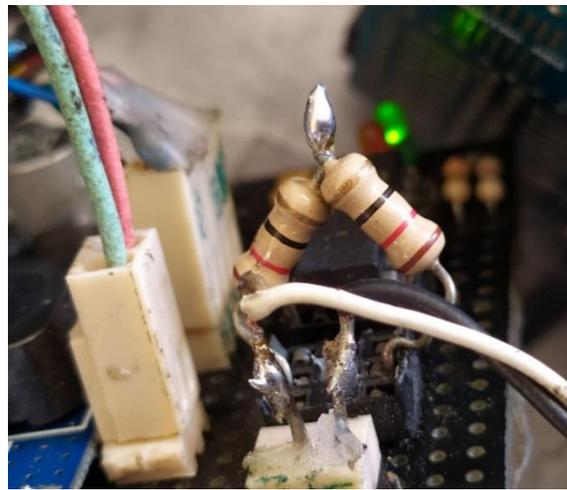
Relativamente à célula de carga (Figura 34a), foram identificados alguns problemas decorrentes da escolha deste equipamento. A célula de carga tem uma capacidade de medição de até 300 kg, sendo a sua gama de medição demasiado larga para a carga que vai efetivamente medir. Nestas condições, é expectável que

a medição seja menos rigorosa do que a efetuada por uma célula de carga ajustada à variação de carga que pode ocorrer neste tipo de ensaios.

O valor que é registado pela célula de carga é um sinal elétrico é lido em milivolts (mV). A placa Arduino apenas consegue ler valores em Volts, pelo que é necessário que exista um amplificador intermédio de sinal que efetue essa mesma amplificação. Posteriormente, esse valor que é lido em Volts é convertido em quilogramas e utilizado no cálculo da força de atrito. O sistema instalado no MAPA para fazer a amplificação de sinal era de baixo custo, que recorria a um conjunto de duas resistências mal concebidas, e por isso muito frágil (Figura 34b)



(a)



(b)

Figura 34 – (a) Célula de Carga; (b) Pormenor das resistências

De forma a resolver o problema existente com a amplificação de sinal, tomou-se a opção de substituir esse sistema. Assim, colocou-se um novo amplificador de sinal, de elevado desempenho e sólido (Figura 35) e sobre o qual existe maior controlo, e conseqüentemente maior confiança nos resultados do coeficiente de atrito.



Figura 35 – Novo amplificador de sinal de alto desempenho

Para assegurar a qualidade dos resultados, foi realizada a calibração da célula de carga, através do sistema apresentado na Figura 36. O procedimento de calibração consistiu na aplicação de uma carga de valor conhecido sobre a célula, que foi lido simultaneamente pela interface de aquisição de dados do MAPA e por um leitor periférico.

Para que estes dois valores assumam igual grandeza, foi efetuada uma regressão linear e consequente obtenção da equação da reta, recorrendo ao Excel, que foi posteriormente colocada no código. Apenas dessa forma se garante que os valores registados aquando das medições são de carácter fidedigno.



Figura 36 – Calibração da célula de carga

O modo de funcionamento do equipamento MAPA era acionado pela interface do Arduino e por um conjunto de botões manuais associados a um código numérico que deviam ser premidos. Por exemplo, para aumentar ou diminuir o valor do slip, para abrir e fechar as bombas, abrir e fechar as válvulas, etc. Os dados das medições eram guardados num ficheiro bloco de notas, e além disso, não estavam completos. Estava em falta, por exemplo, o registo de rotações, da força na célula, dos valores do atrito, abertura da válvula de controlo da água, entre outros.

Considerou-se que este modo de funcionamento e de aquisição de dados é rudimentar pelo que se desenvolveu uma interface de aquisição de dados baseada na programação LabView (Figura 37).

Esta interface dota o processo de medição de um conjunto de abordagens “*on board*” que anteriormente não eram possíveis. Assim, o número de parâmetros registados foi alargado e a forma como os mesmos são guardados foi melhorada sendo agora encaminhados para uma folha Excel, o que facilita o seu tratamento. Para o controlo do funcionamento do equipamento foi implementado um conjunto de opções no ecrã, de uso intuitivo (Figura 38).

Uma das principais vantagens da interface desenvolvida é a apresentação em tempo real da evolução gráfica das rotações por minuto dos pneus (RPM), do coeficiente de atrito, da força média medida pela célula, entre outros, o que permite acompanhar os resultados das medições e identificar problemas rapidamente e em tempo útil. O *software* permite ainda o registo de notas úteis ao longo da medição, notas essas que são enviadas diretamente para o Excel e que ficam associadas ao momento exato da medição em que foram apontadas.

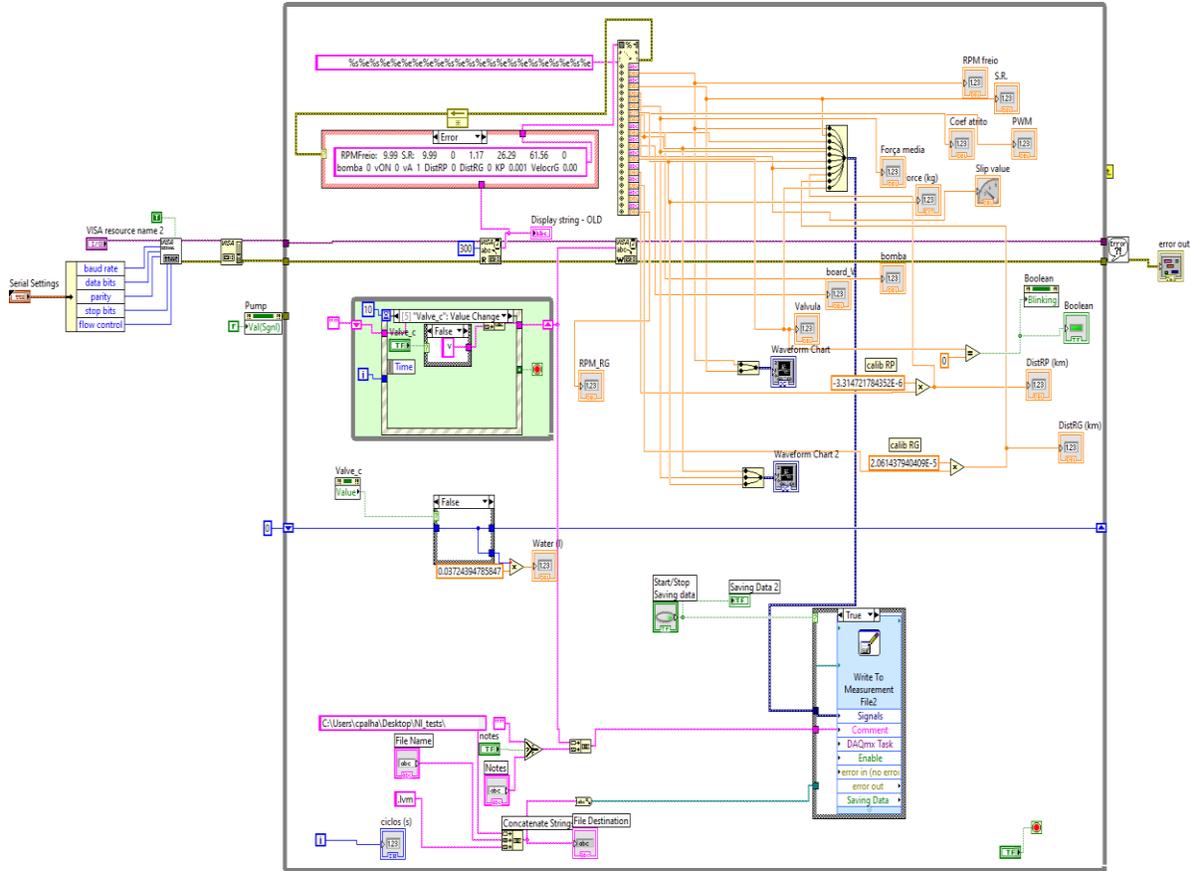


Figura 37 – Programação da interface LabView

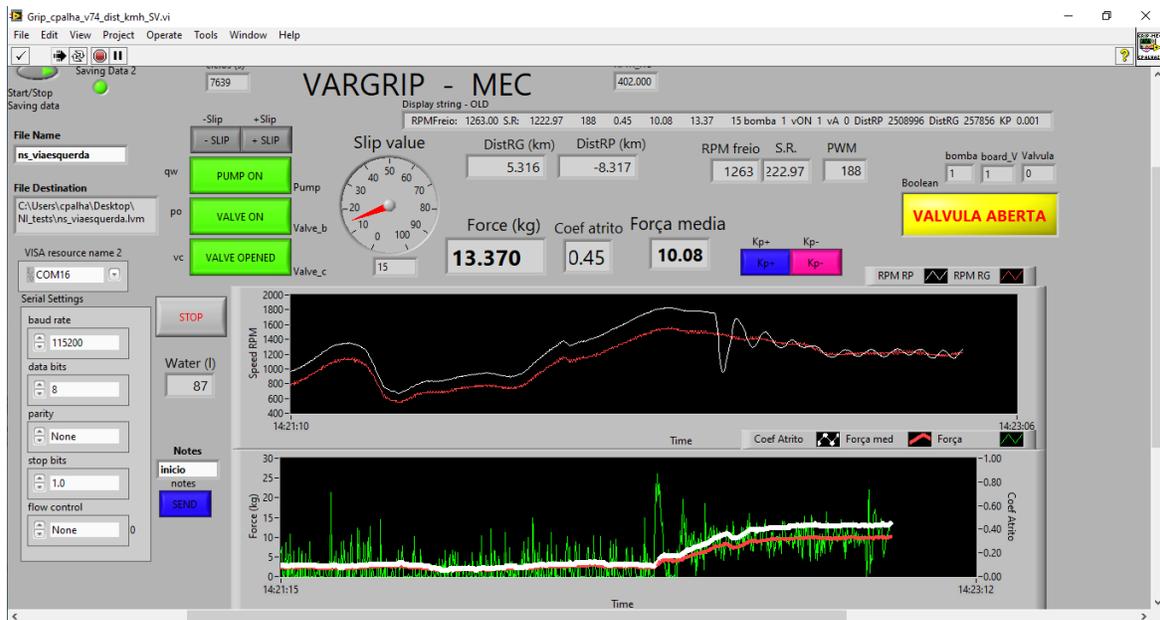


Figura 38 – Registo visual durante as medições

Complementarmente foi ainda instalado um sistema de captação de som e imagem (Figura 39), sendo dessa forma possível a visualização dentro da carrinha 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 39 – Captação da medição por uma câmara *GoPro*

3.3 Curva Atrito vs. *Slip*

Neste subcapítulo apresenta-se e analisa-se os resultados dos ensaios realizados com o objetivo central de validar os princípios teóricos considerados na conceção do equipamento, discutindo se os resultados vão ao encontro daquilo que é tradicionalmente expectável.

Uma das análises preliminares foca a obtenção da curva atrito vs. *slip*, a qual tradicionalmente apresenta um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 7. Esta curva, tal como o nome indica, apresenta a variação do valor do coeficiente de atrito, em função da percentagem de deslizamento (*slip*) aplicada. Importa desde já referir que apenas é possível aferir esta curva uma vez que o equipamento permite introduzir eletronicamente um *slip* variável entre 0 e 100%, algo que, por exemplo, não é possível no equipamento *GripTester*.

3.3.1 Trecho de estudo

A seleção do trecho para estudo da variação do atrito em função do *slip* teve em consideração fatores tais como a proximidade do Campus de Azurém (para resolução de pequenos problemas que surgiam frequentemente), constituir um alinhamento aproximadamente reto e com uma extensão de aproximadamente 200 metros, permitir efetuar com facilidade as manobras de inversão de sentido, entre outros. Assim, o trecho escolhido é parte integrante da Circular Urbana de Guimarães, tendo sido efetuada uma dupla análise, ou seja, no sentido Este – Oeste (representado com a cor amarela) e no sentido Oeste – Este (representado com a cor azul), na Figura 40.

Este trecho é solicitado por um elevado volume de tráfego possuindo duas faixas de rodagem, com duas vias por sentido. A nível da mistura utilizada na camada de desgaste, esta é definida como uma mistura betuminosa modificada com borracha.

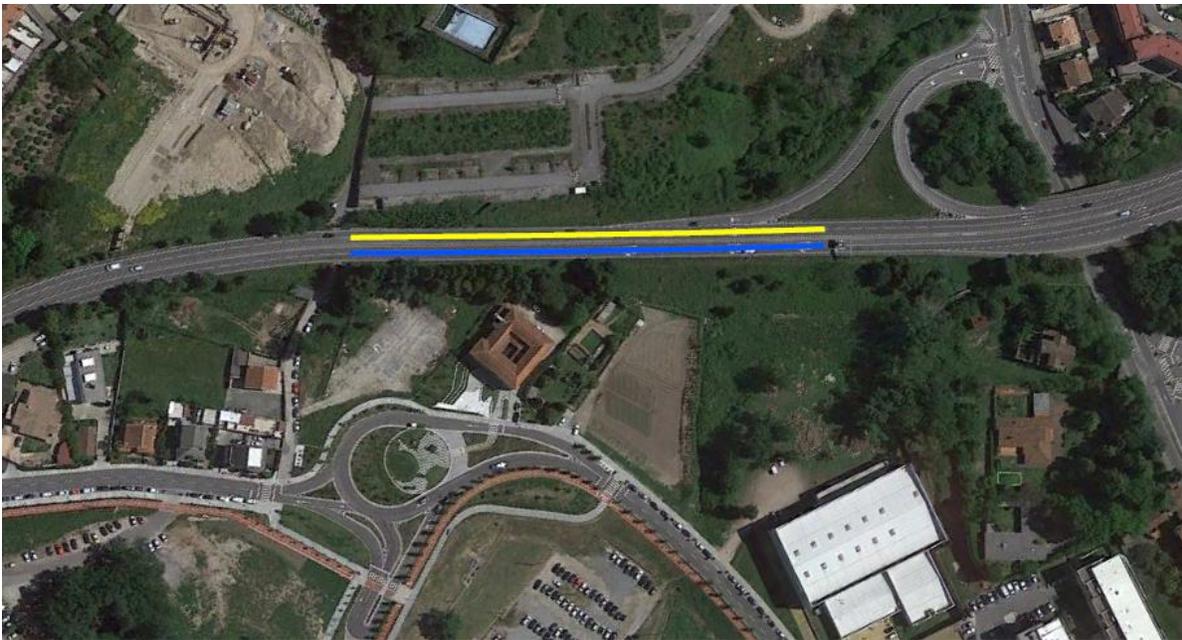


Figura 40 – Localização do trecho de estudo

3.3.2 Metodologia de ensaio

Na maioria dos casos, as medições do coeficiente de atrito são feitas com a superfície do pavimento molhada, uma vez que desta forma se obtém os valores mais baixos, isto é, mais desfavoráveis. No entanto, convém lembrar que numa perspetiva anual são muitos os dias em que não ocorre precipitação e que

nesses mesmos dias ocorrem muitos acidentes nas estradas nacionais. Por isso, considerou-se relevante estudar a relação existente entre as curvas de atrito obtidas com pavimento seco e molhado em função da percentagem de travagem/deslizamento da roda de ensaio (designada por *slip*). Acresce que, quando se utilizam equipamentos semelhantes ao MAPA, como o *GripTester*, utiliza-se geralmente um *slip* de 15% com uma velocidade de medição de 50 km/h.

Assim, na secção de estudo já apresentada foram efetuadas com o equipamento MAPA para as condições seco e molhado duas passagens em cada sentido, a uma velocidade padrão de 50 km/h com *slip* a 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100%. Na condição de pavimento molhado, utilizou-se um caudal de 20 l/min.

3.3.3 Resultados obtidos

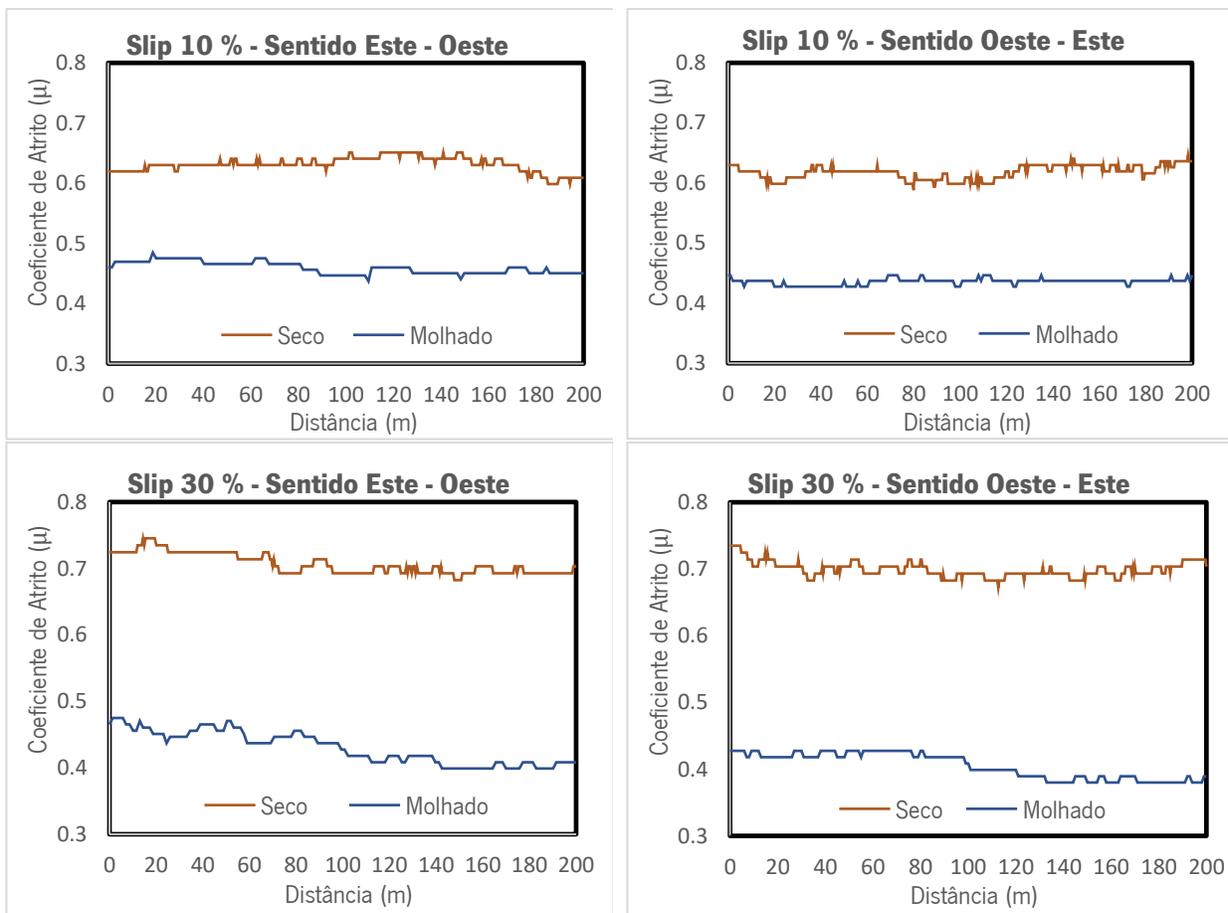


Figura 41 – Exemplos de perfis da variação longitudinal do coeficiente de atrito para *slip* de 10% e 30%

Por uma questão de limitação de espaço, apresentam-se na Figura 41 alguns perfis da variação longitudinal do coeficiente de atrito, obtidos com o equipamento MAPA, para as condições seco e molhado ao longo do trecho.

Para representação das curvas atrito vs slip, efetuou-se a média do valor do coeficiente de atrito obtido em cada perfil, considerando-se que esse valor é representativo do coeficiente de atrito no trecho (Tabela 2) que serviram de base para elaboração das curvas apresentadas na Figura 42 e Figura 43.

Tabela 2 – Coeficiente de atrito médio (μ) versus slip (%)

Slip (%)	μ (médio)			
	Sentido Este-Oeste		Sentido Oeste - Este	
	Pavimento Seco	Pavimento Molhado	Pavimento Seco	Pavimento Molhado
0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.56	0.39	0.53	0.37
10	0.66	0.48	0.62	0.44
15	0.71	0.50	0.66	0.45
20	0.72	0.48	0.70	0.46
25	0.71	0.48	0.70	0.43
30	0.69	0.46	0.68	0.42
40	0.68	0.45	0.66	0.41
50	0.66	0.45	0.65	0.40
60	0.66	0.43	0.65	0.40
70	0.65	0.43	0.65	0.40
80	0.64	0.42	0.65	0.40
90	0.65	0.43	0.65	0.39
100	0.63	0.40	0.64	0.36

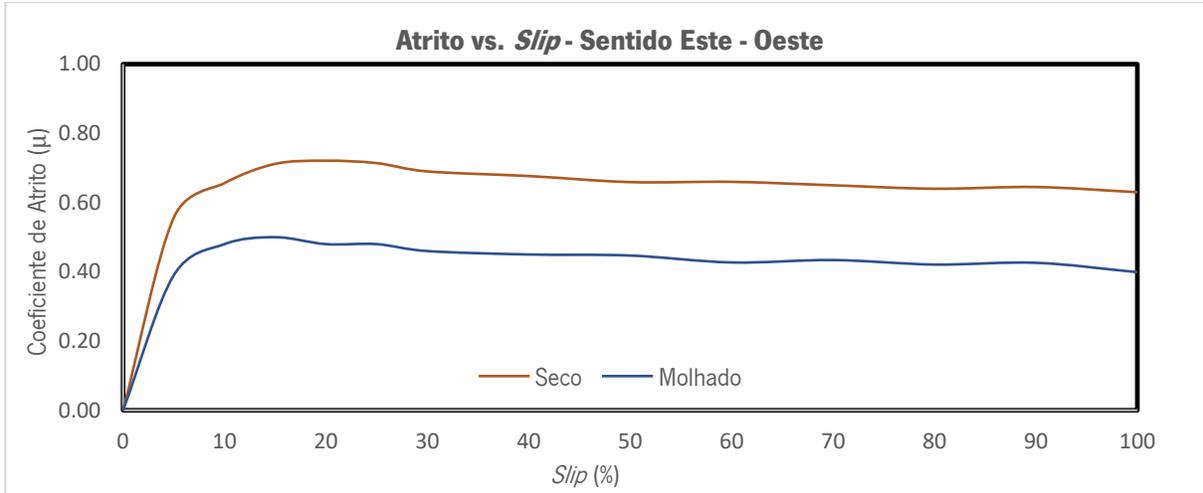


Figura 42 – Coeficiente de atrito médio versus slip no sentido Este-Oeste

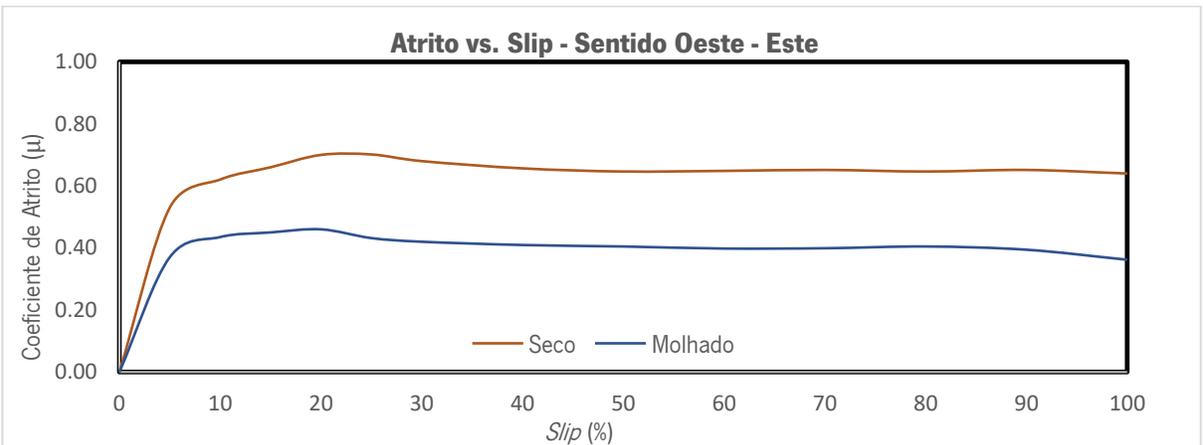


Figura 43 – Coeficiente de atrito médio versus slip no sentido Oeste-Este

Em termos gerais, verifica-se que as curvas apresentam um comportamento semelhante apresentado Figura 7, o que mostra que o equipamento em análise, quando solicitado pela aplicação de uma gama alargada de percentagens de deslizamento, consegue acompanhar a linha teórica da evolução, isto e responde como seria de esperar.

Para apoiar a análise do efeito do estado da superfície do pavimento, calculou-se a redução do coeficiente de atrito em termos percentuais resultante da presença de água (Tabela 3).

Tabela 3 – Redução do coeficiente de atrito médio na presença de água versus slip

		Slip (%)												
		5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
		Sentido Oeste – Este												
μ (Seco)		0.53	0.62	0.66	0.70	0.70	0.68	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64
μ (Molhado)		0.37	0.44	0.45	0.46	0.43	0.42	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.39	0.36
Redução (%)		30.19	29.03	31.82	34.29	38.57	38.24	37.88	38.46	38.46	38.46	38.46	40.00	43.75
		Sentido Este – Oeste												
		5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
μ (Seco)		0.56	0.66	0.71	0.72	0.71	0.69	0.68	0.66	0.66	0.65	0.64	0.65	0.63
μ (Molhado)		0.39	0.48	0.50	0.48	0.48	0.46	0.45	0.45	0.43	0.43	0.42	0.43	0.40
Redução (%)		30.36	27.27	29.58	33.33	32.39	33.33	33.82	31.82	34.85	33.85	34.38	33.85	36.51

Para todos os valores de slip, verifica-se uma diferença muito significativa entre os valores do atrito em condições de piso seco e molhado, entre 27% e 43% de redução. Nota-se que esta discrepância tem tendência a tomar os valores máximos para taxas de deslizamento compreendidas entre os 70 e 100%, ou seja, numa situação em que o pneu de medição está perto de bloquear. Além disso, observa-se que o valor máximo do atrito é obtido para o intervalo de 15 a 20% de taxa de deslizamento, estando as restantes parcelas abaixo desse valor.

Esta é mais uma das razões pelas quais é questionável o facto de os cadernos de encargos apenas exigirem a medição do coeficiente de atrito longitudinal com base nos resultados de um GripTester (com slip = 15%). Considera-se que seria mais prudente a realização obrigatória não só para obtenção do coeficiente de atrito máximo, mas também do chamado coeficiente de atrito fixo, que é representativo da zona em patamar existente na curva atrito vs *slip*.

3.3.4 Análise comparativa com os resultados do equipamento *GripTester*

Após a conclusão da campanha de ensaios e consequente tratamento dos dados mencionados no ponto anterior, que mostrou que o equipamento MAPA tem um comportamento expectável, para aumentar a confiança dos resultados, faltava ainda compará-los com os de um equipamento com funcionamento semelhante, comercial e certificado.

Assim, surgiu a oportunidade de comparar resultados obtidos com o equipamento MAPA com os de um *GripTester*. Por questões de sigilo solicitado pela entidade que efetuou as medições com o *GripTester*, não serão reveladas as localizações dos trechos onde se realizaram os ensaios. Porém, é possível referir que as medições ocorreram na cidade de Braga, numa zona com elevados volumes de tráfego e que recentemente foi objeto de trabalhos de reabilitação, sendo que a secção de estudo compreende uma parte nova e outra já com vários anos de serviço.

A metodologia de comparação consistiu em dividir o trecho avaliado em quatro secções com 200 metros de extensão cada, e efetuar uma passagem com os dois equipamentos. Assim, foram observadas duas secções em cada sentido, uma na via esquerda e outra na via direita. A velocidade de ensaio foi de 50 km/h, o caudal de 20 l/min e a taxa de deslizamento de 15%.

Antes de se passar à análise dos resultados apresentados nas Figura 44 à Figura 47, importa clarificar uma diferença fundamental que existe no processo de medição. O *GripTester* apenas disponibiliza um resultado de medição a cada 5 metros, o Grip Number, enquanto que o equipamento MAPA faz uma medição a cada 100 milissegundos e fornece a média deslizante de 100 medições.

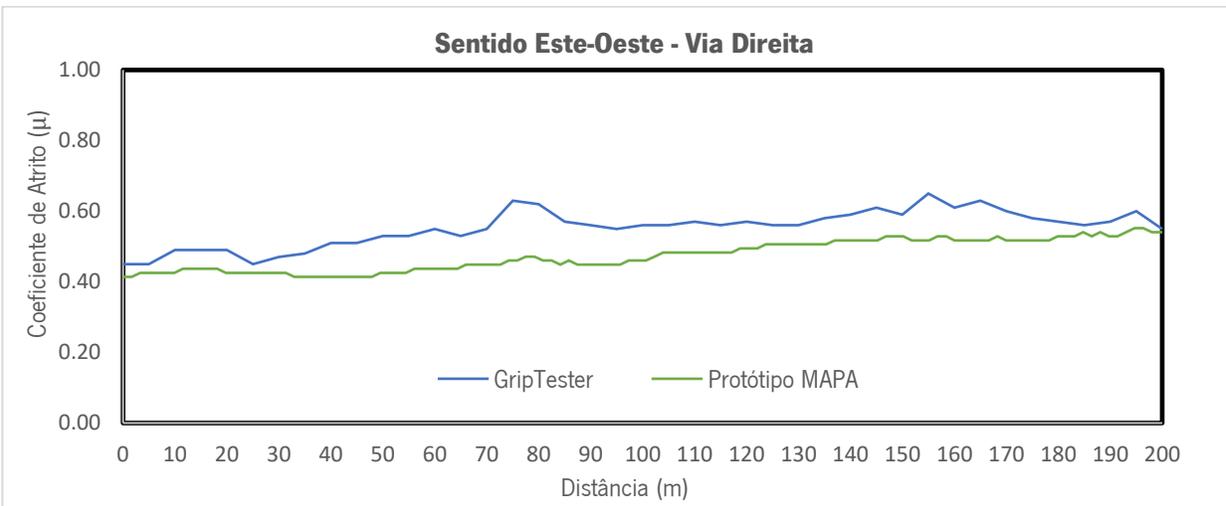


Figura 44 - Coeficiente de atrito via direita – Sentido Este - Oeste

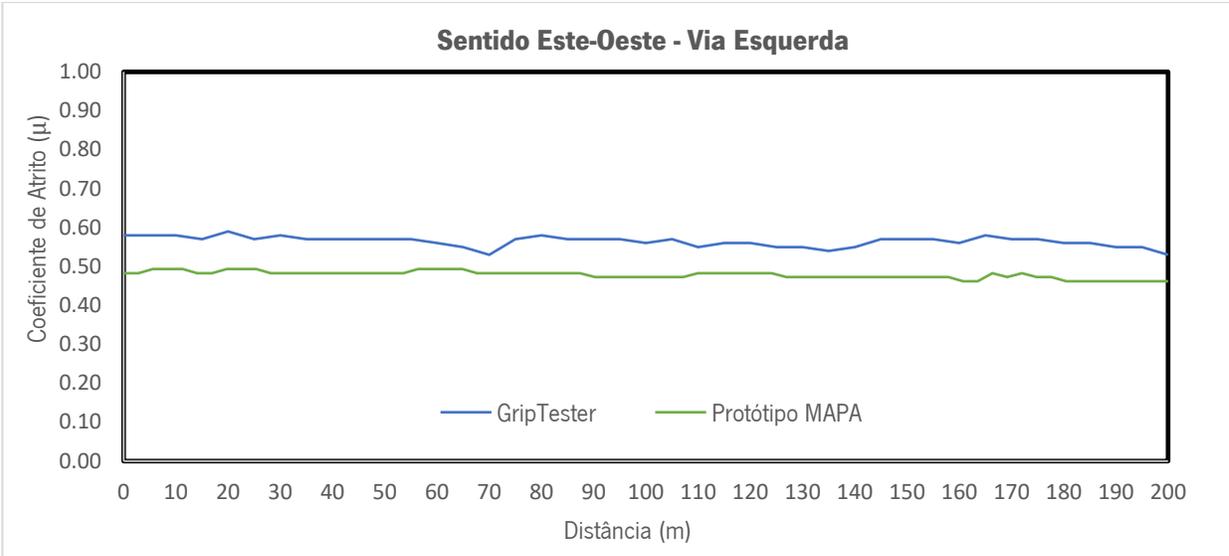


Figura 45 – Coeficiente de atrito via esquerda – Sentido Este - Oeste

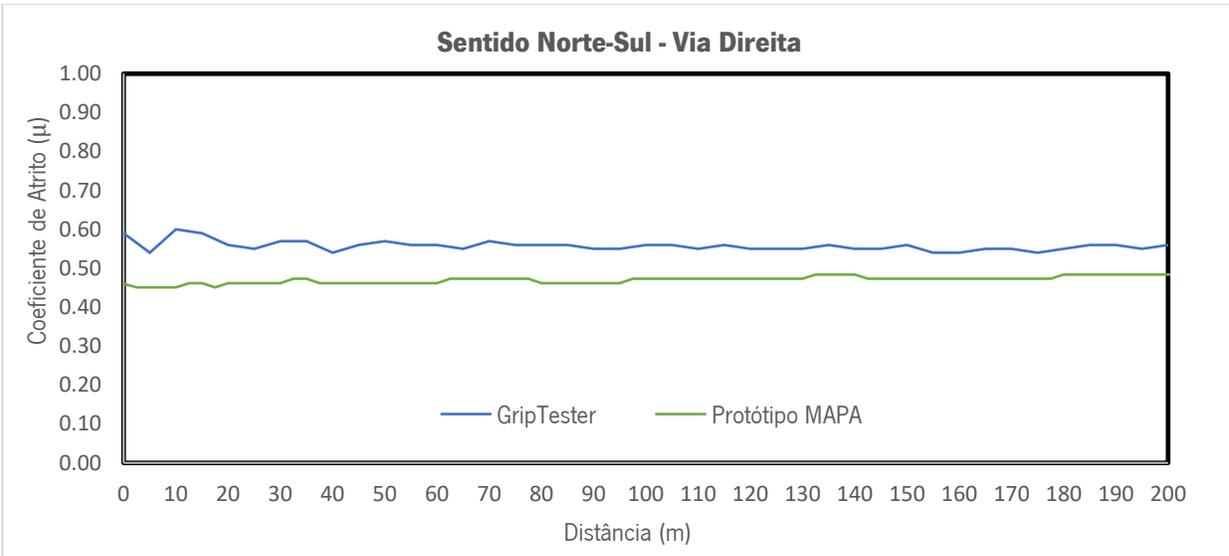


Figura 46 - Coeficiente de atrito via direita – Sentido Norte - Sul

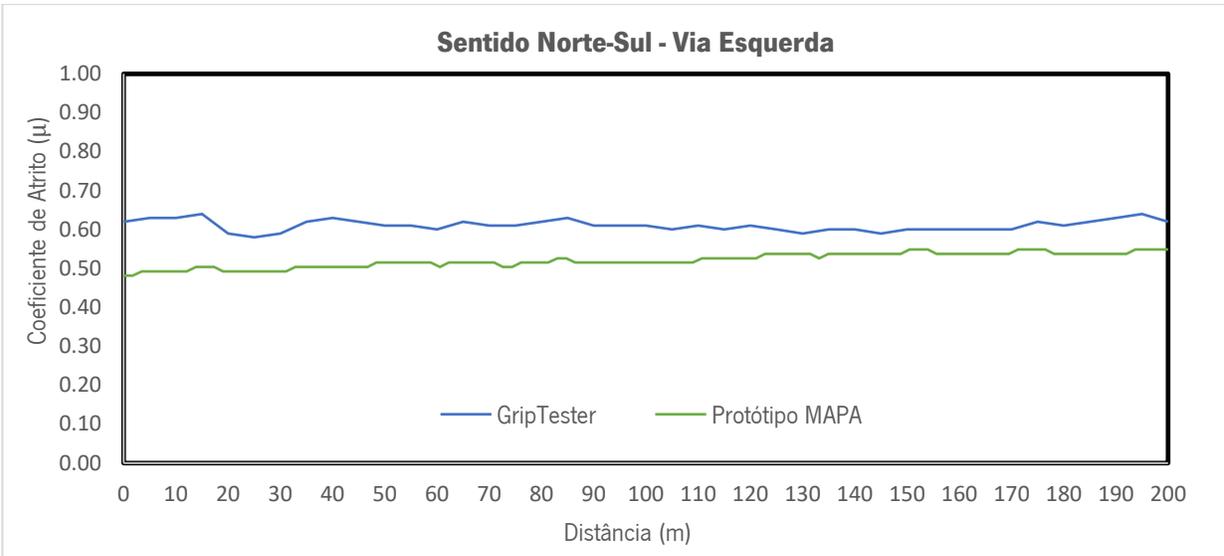


Figura 47 - Coeficiente de atrito via esquerda – Sentido Norte - Sul

Em termos gerais, o equipamento MAPA acompanha, em cada seção, os valores obtidos pelo considerase *GripTester*, isto é, a variação longitudinal medida mostra uma tendência muito semelhante entre os dois equipamentos. A diferença de tratamento dos dados por cada equipamento é evidente nos quatro gráficos apresentados, verificando para o MAPA que a curva atrito-distância é mais suave, o que resulta do uso da média deslizante.

Além disso, verifica-se que existe um desfasamento aproximadamente constante entre os valores do atrito, sendo os do *GripTester* superiores em cerca de 15%, o que pode ser justificado por um fator, habitualmente determinante, que é o pneu de medição. Ou seja, no caso do *GripTester* o pneu é normalizado, fabricado para este efeito, conseqüentemente, com características específicas (e um preço de mercado muito elevado), enquanto os pneus utilizados no MAPA são comerciais, e naturalmente com características diferentes. Embora se considere esta a razão principal, há a possibilidade de fatores como a temperatura do pavimento e do próprio pneu, aquando da medição, terem influenciado os resultados uma vez que não foi possível efetuar os ensaios com os dois equipamentos no mesmo dia e horário

4. ESTUDOS DE ATRITO USANDO O EQUIPAMENTO MAPA

O conteúdo deste capítulo de aplicação do equipamento MAPA foi estruturado tendo em consideração três estudos distintos: o efeito da velocidade na variação do atrito, o efeito das características dos pneus dos veículos e, por fim, a verificação da hipótese que o coeficiente de atrito reduz na aproximação das passagens pedonais.

4.1 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. No entanto, existem poucos estudos que procurem caracterizar o coeficiente de atrito a diferentes níveis de velocidade.

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 slip.

4.1.1 Trecho de estudo

O trecho selecionado para efetuar a recolha de dados localiza-se nas imediações do AveParque, nas Taipas, concelho de Guimarães (Figura 48) 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 48 a verde identifica-se o trecho Sul – Norte e a azul o trecho Norte – Sul.



Figura 48 – Trecho de estudo - AveParque

4.1.2 Metodologia de recolha de dados

Para o estudo do efeito da velocidade no atrito definiu-se um plano de ensaios que consiste na realização de medições do atrito para os valores de *slip* 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 *slip* foram efetuadas em cada um dos sentidos medições 5 medições velocidades distintas velocidades, o que perfaz um total de 30 medições em cada sentido.

A escolha desta gama de valores de taxa de deslizamento permite a definição curvas atrito vs *slip* de forma adequada, isto é, abrange todas as fases de desenvolvimento de acordo com o estado da arte.

No Anexo II são listados os resultados de todas as medições.

4.1.3 Resultados obtidos para velocidade fixa e *slip* variável

A primeira abordagem aos resultados visou a análise do atrito quando os veículos praticam determinadas velocidades (fixas) e com taxas de deslizamento dos pneus variáveis. Da Figura 49 à Figura 53 mostra-se graficamente para cada velocidade o efeito da variação do *slip* ao longo do trecho de análise.

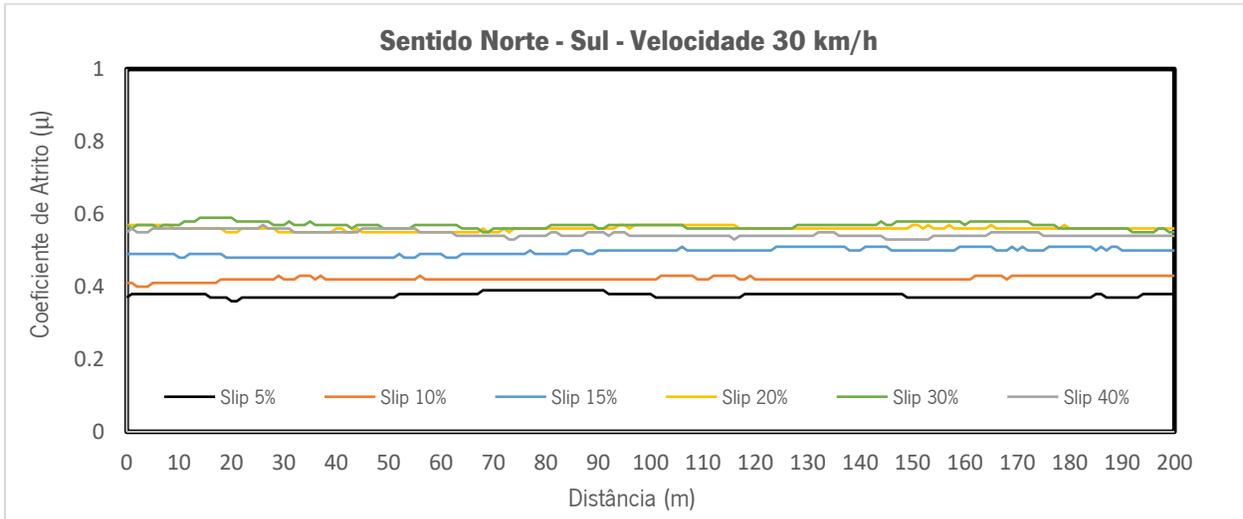
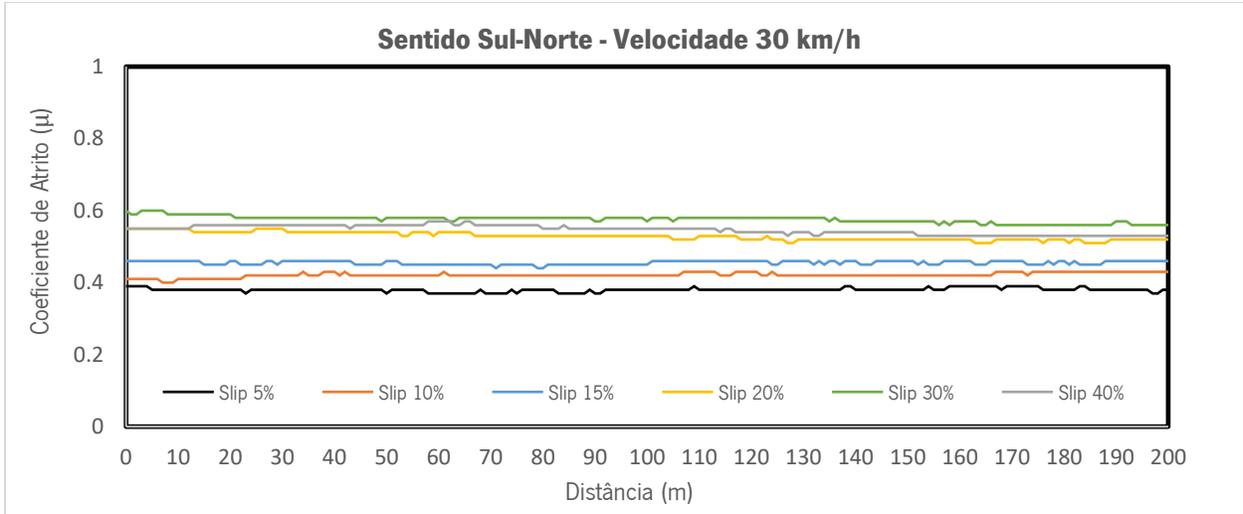


Figura 49 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 30 km/h e slip variável

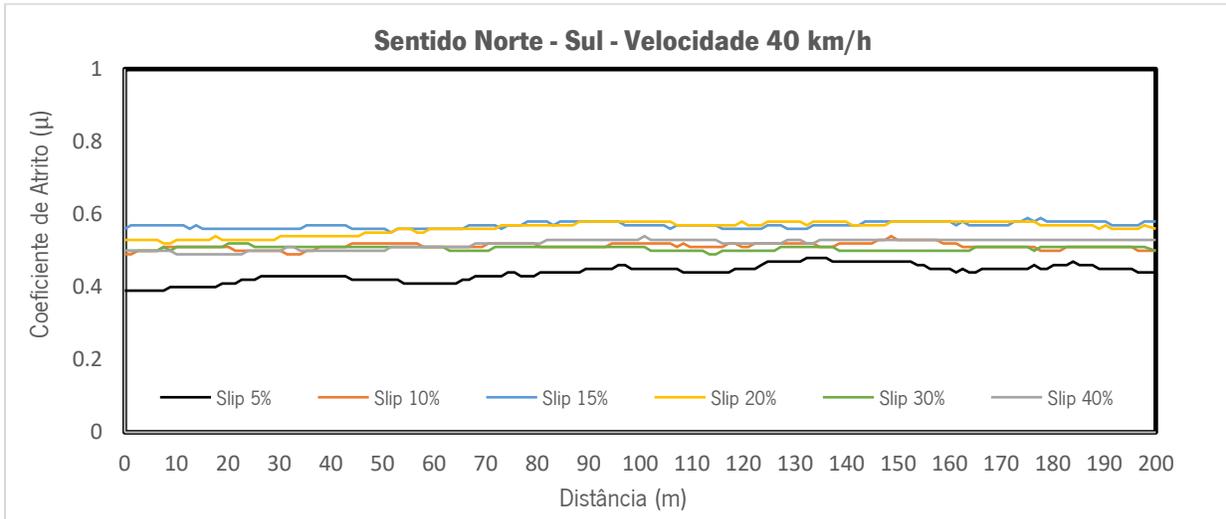
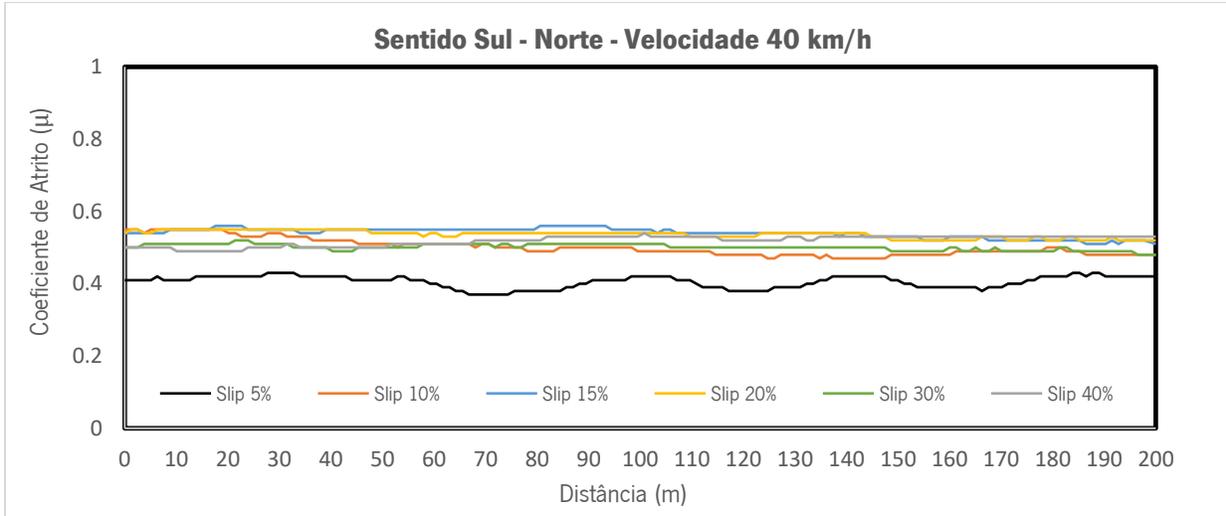


Figura 50 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 40 km/h e slip variável

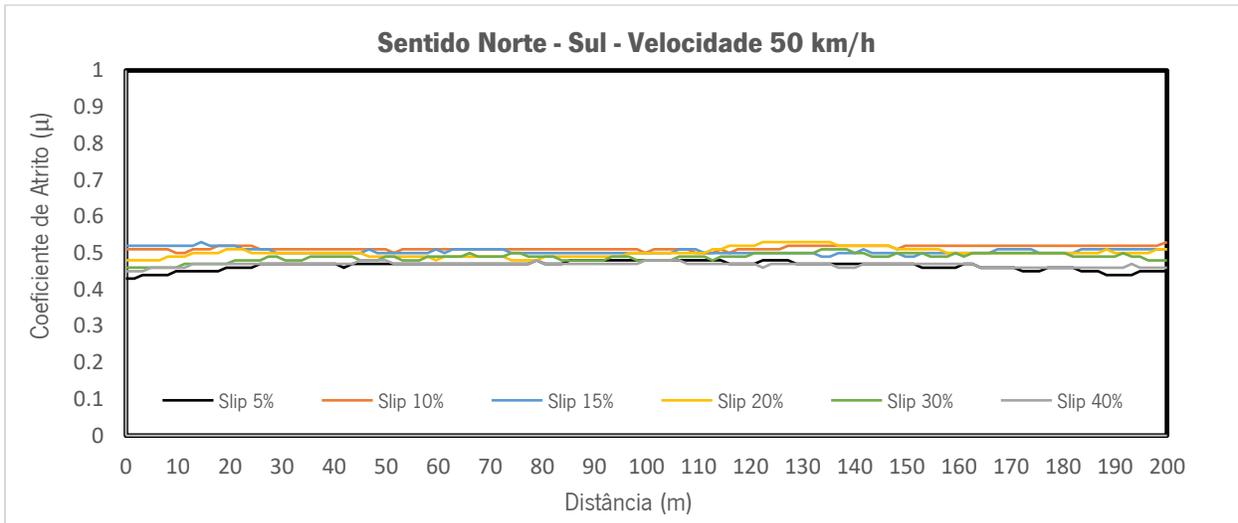
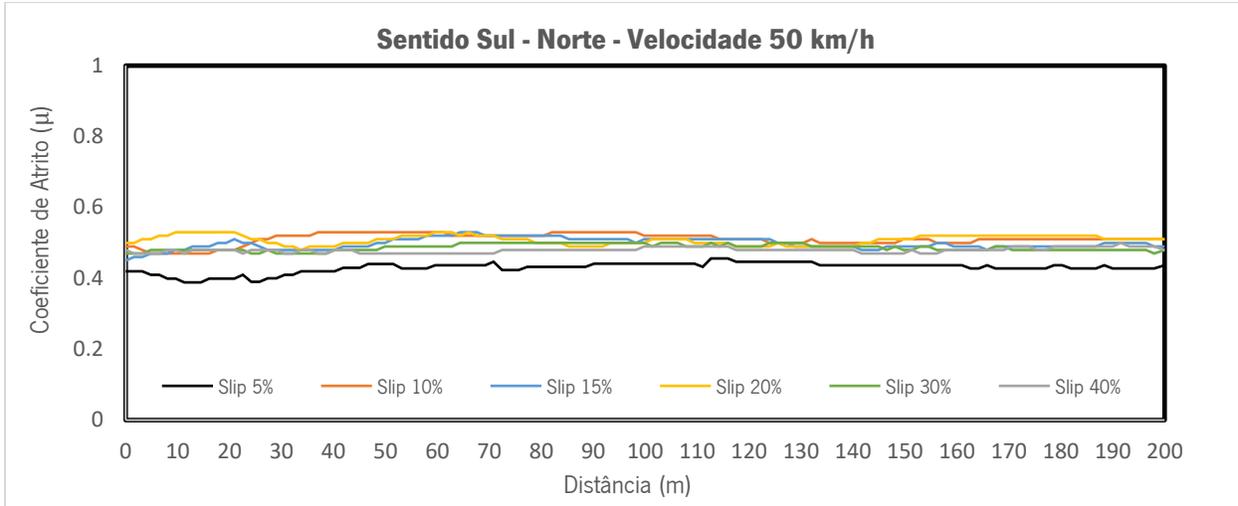


Figura 51 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 50 km/h e slip variável

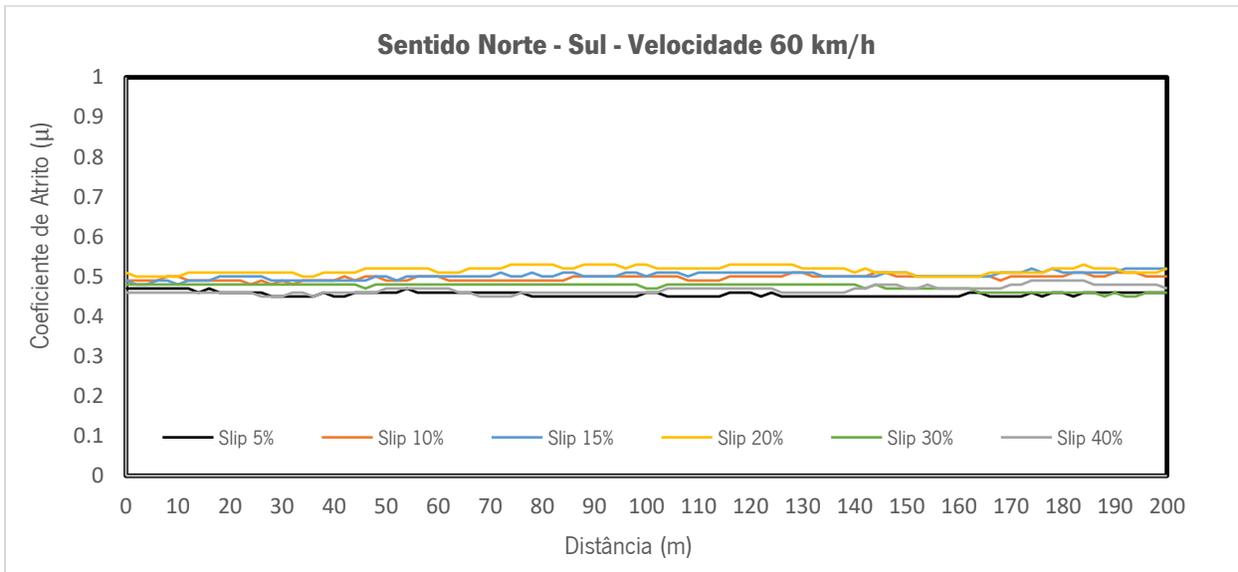
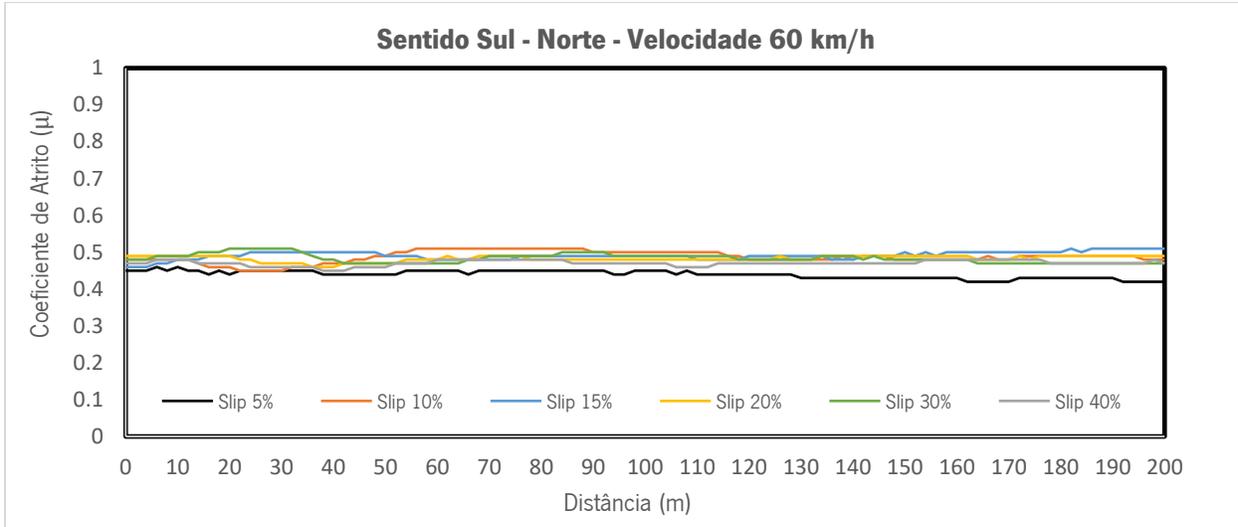


Figura 52 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 60 km/h e slip variável

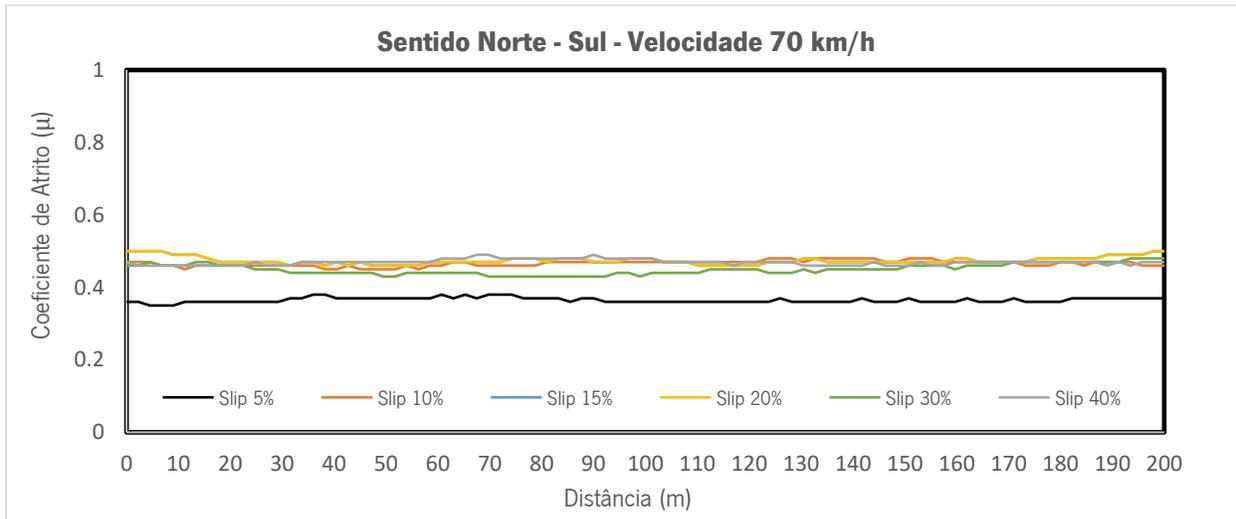
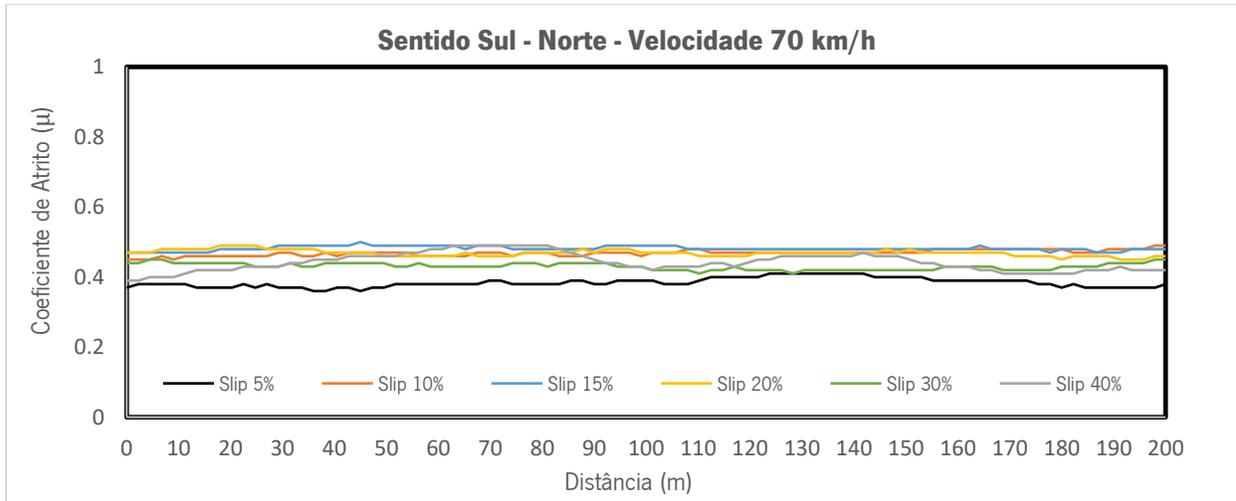


Figura 53 – Coeficiente de atrito para a velocidade de 70 km/h e slip variável

De uma forma geral, os resultados são semelhantes nos dois sentidos de medição, o que de certa forma corrobora a medição. Destaca-se o nível de slip de 5% a todas as velocidades por corresponder a valores de atrito mais baixos. Porém não existe um padrão claro para o nível de slip que proporciona valores de atrito mais elevados. Observa-se, contudo, que para os valores intermédias de 50 e 60 km/h, a influência do nível de slip parece ser menor, isto é, as curvas encontram-se mais juntas, indicando menor variação do coeficiente de atrito.

4.1.4 Resultados obtidos para slip fixo e velocidade variável

Noutra perspetiva, considerou-se relevante analisar qual a diferença no valor do coeficiente de atrito quando os veículos circulam a determinadas taxas de deslizamento, mas a diferentes velocidades. Da Figura 54 à Figura 59 mostra-se graficamente para cada nível de slip o efeito da variação da velocidade ao longo do trecho de análise.

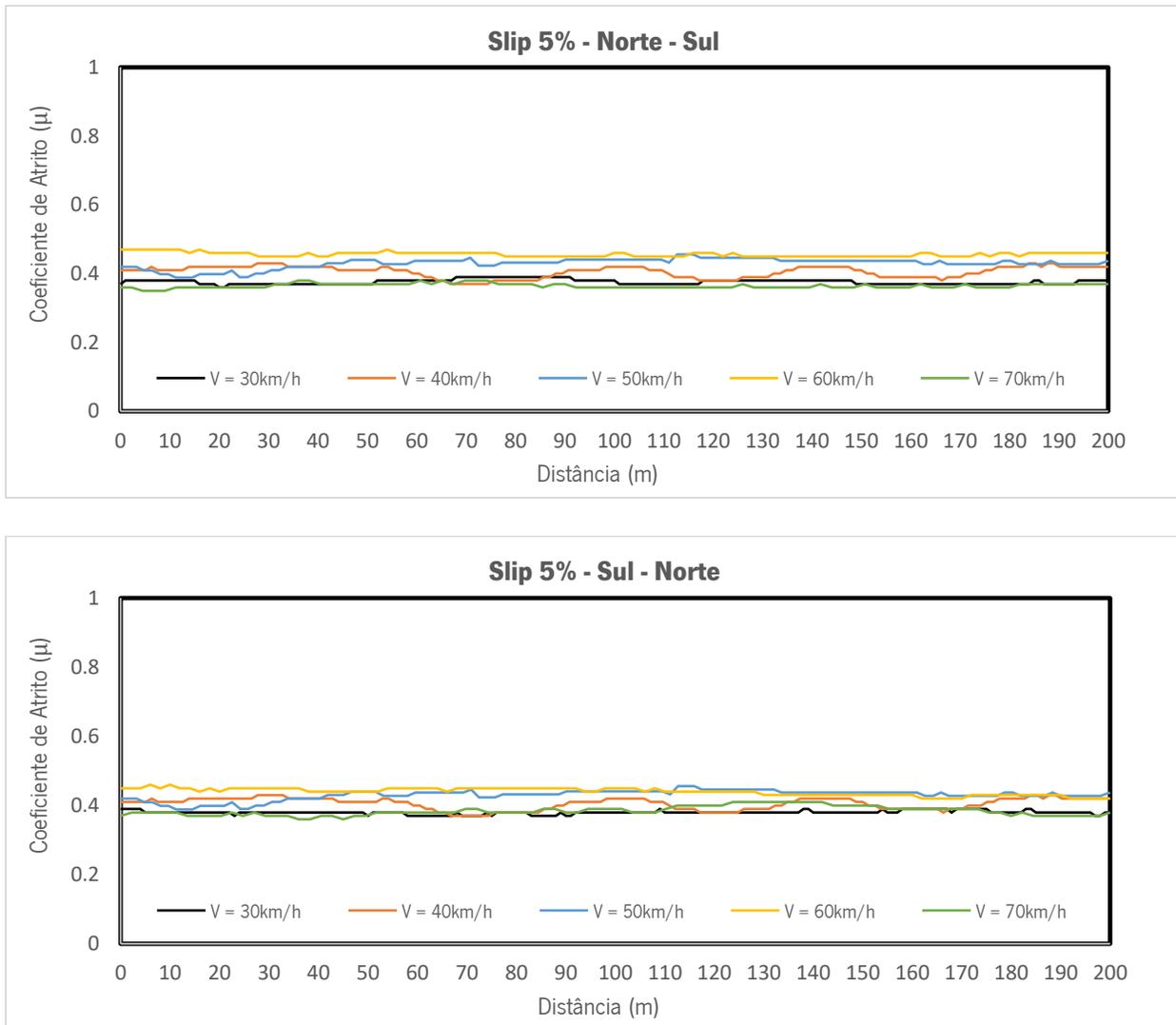


Figura 54 – Coeficiente de atrito para slip de 5% e velocidade variável

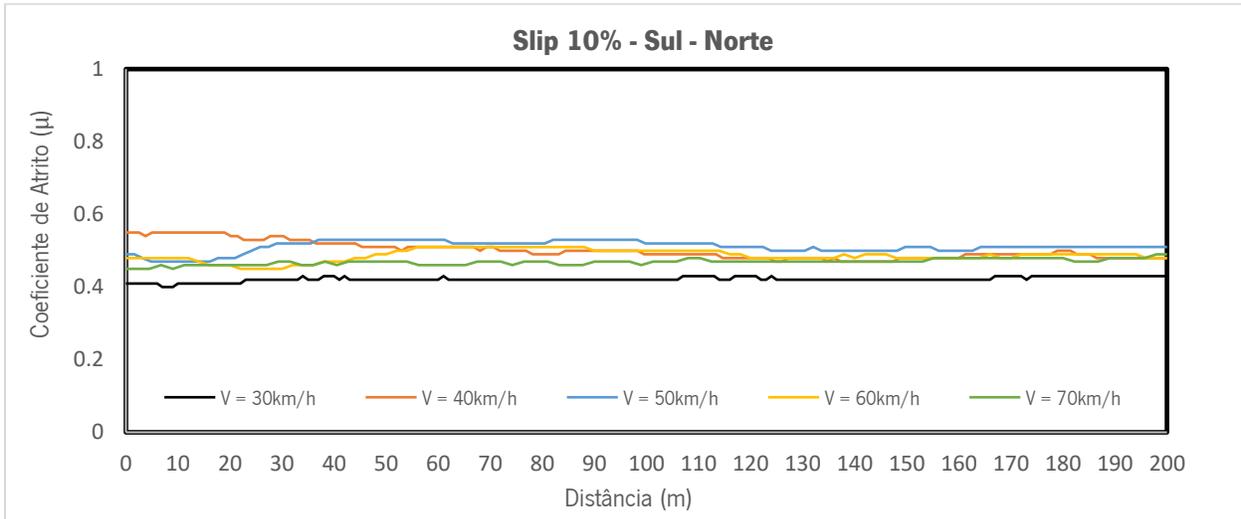
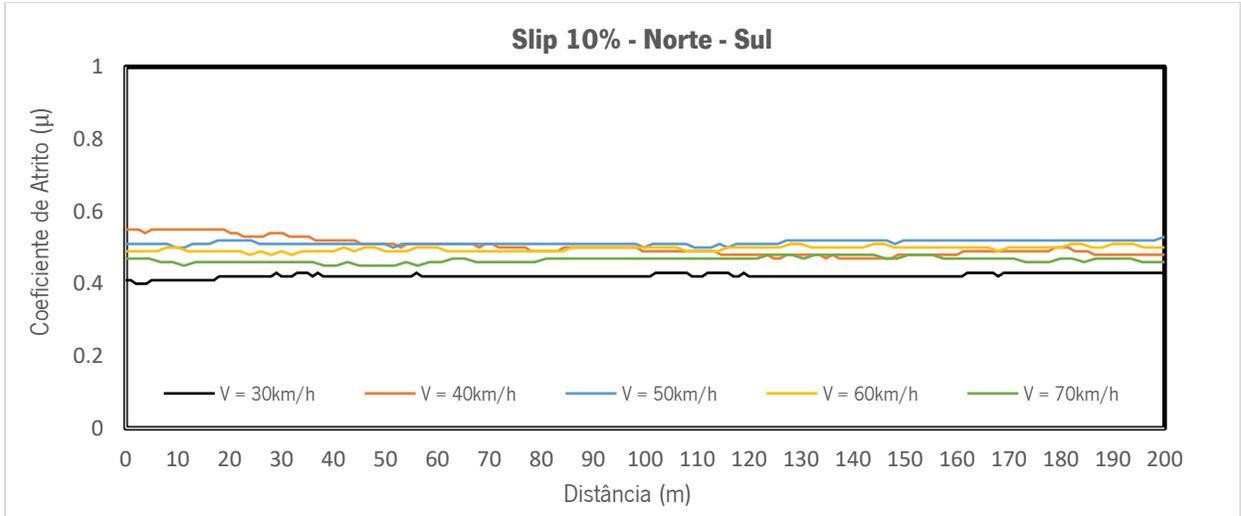


Figura 55 – Coeficiente de atrito para slip de 10% e velocidade variável

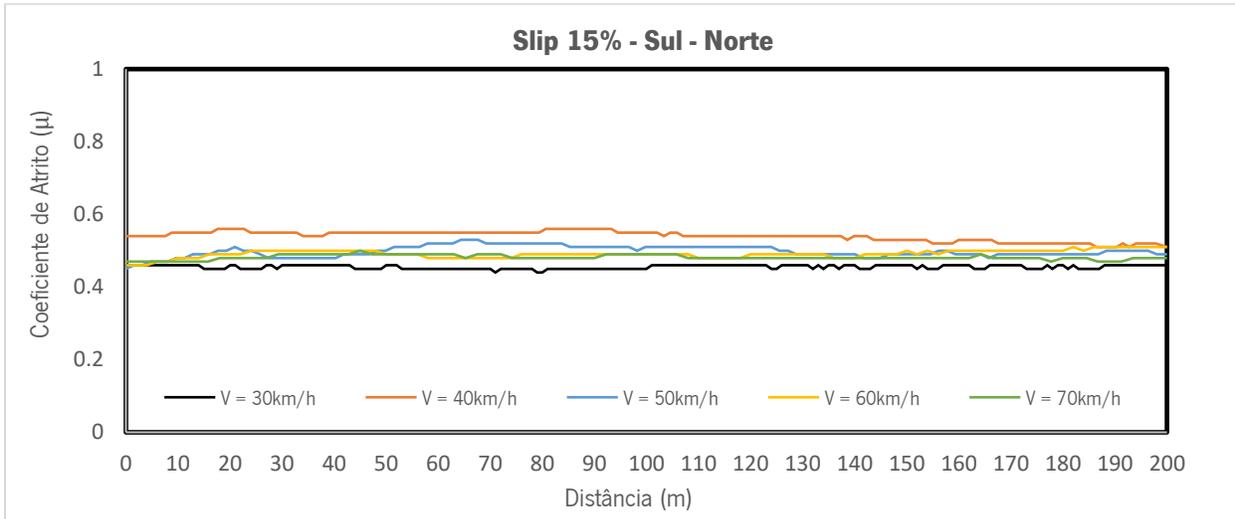
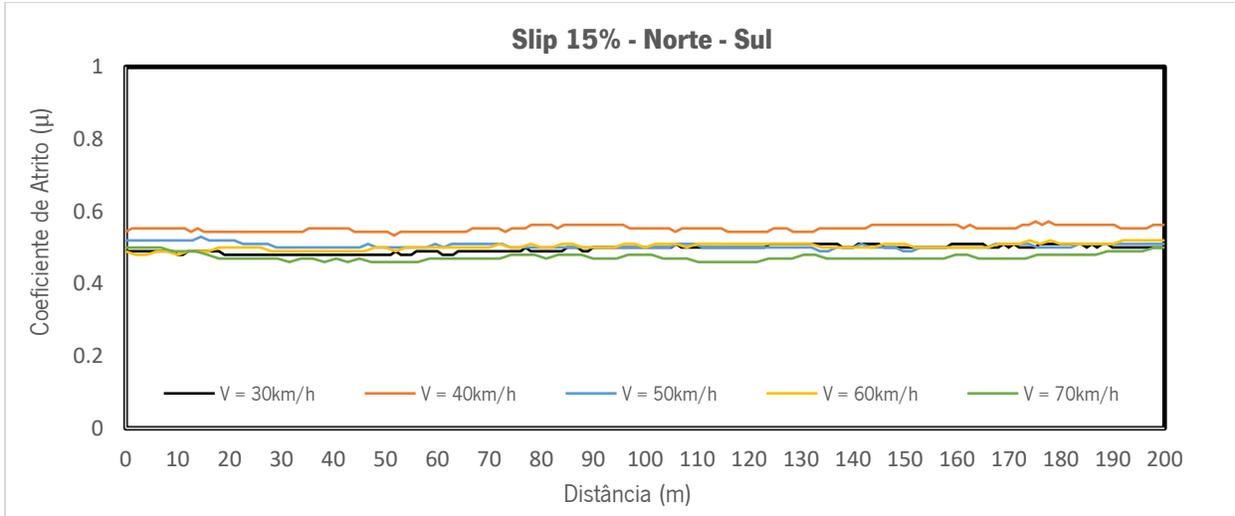


Figura 56 – Coeficiente de atrito para slip de 15% e velocidade variável

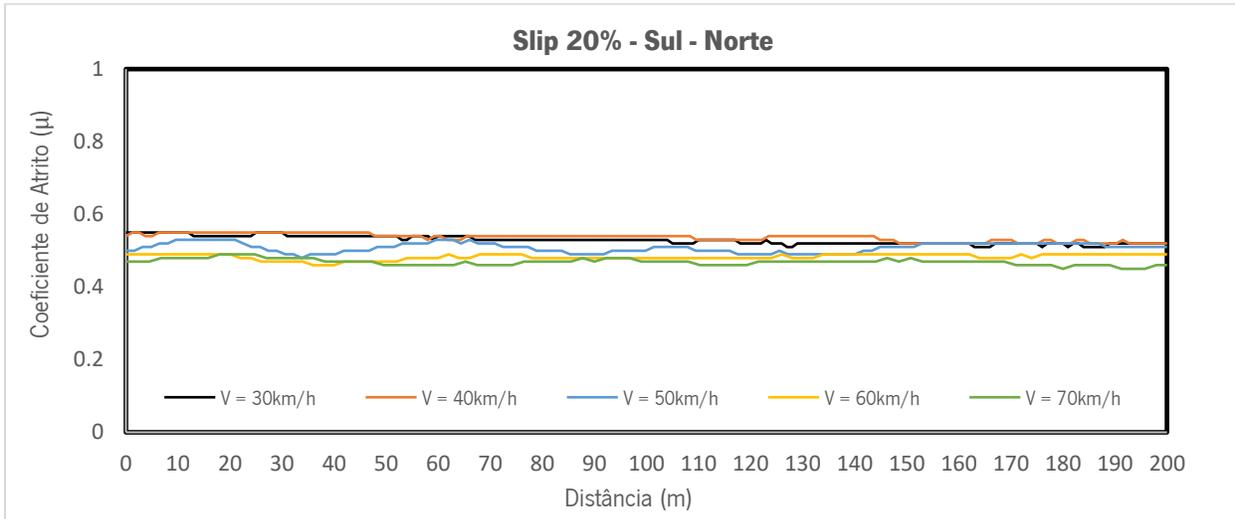
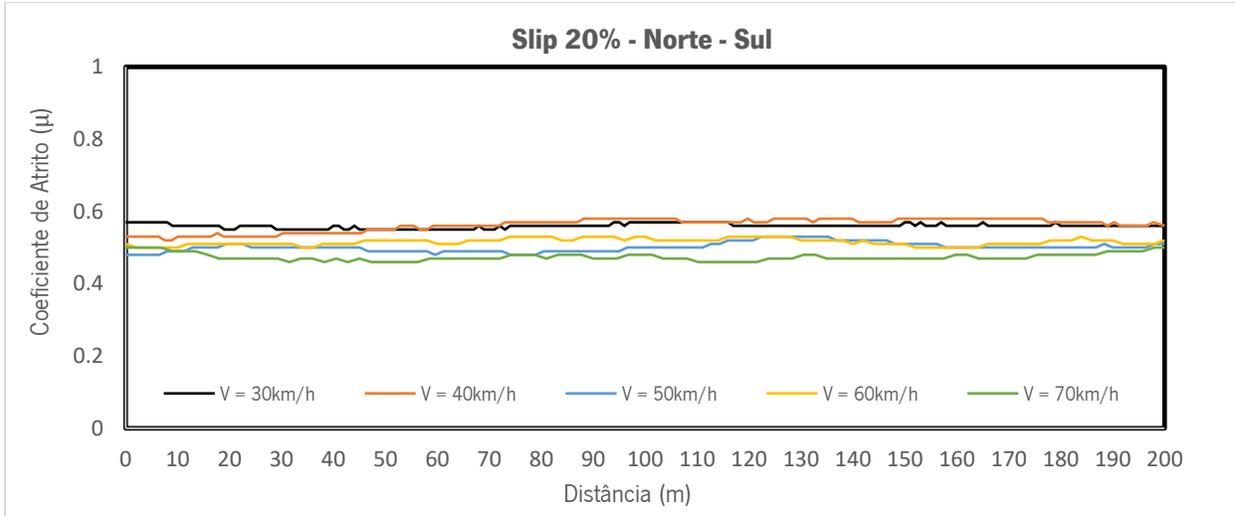


Figura 57 – Coeficiente de atrito para slip de 20% e velocidade variável

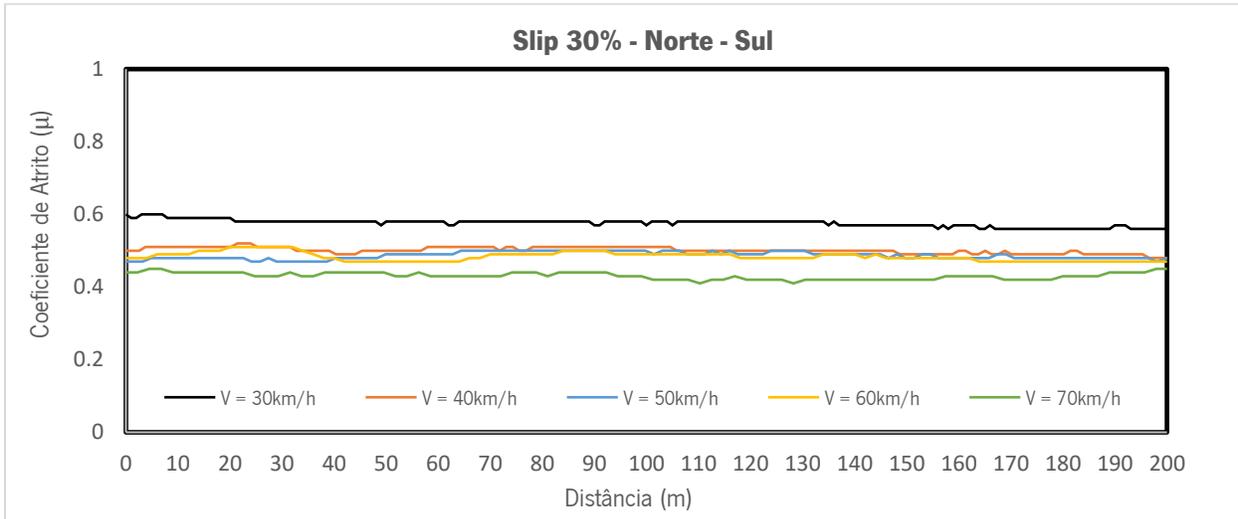
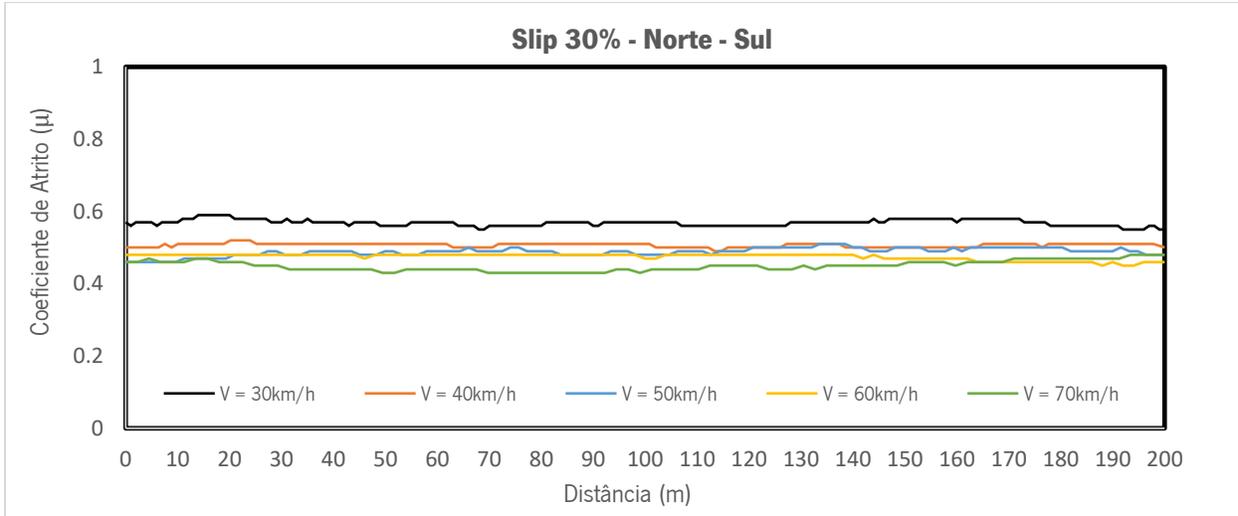


Figura 58 – Coeficiente de atrito para slip de 30% e velocidade variável

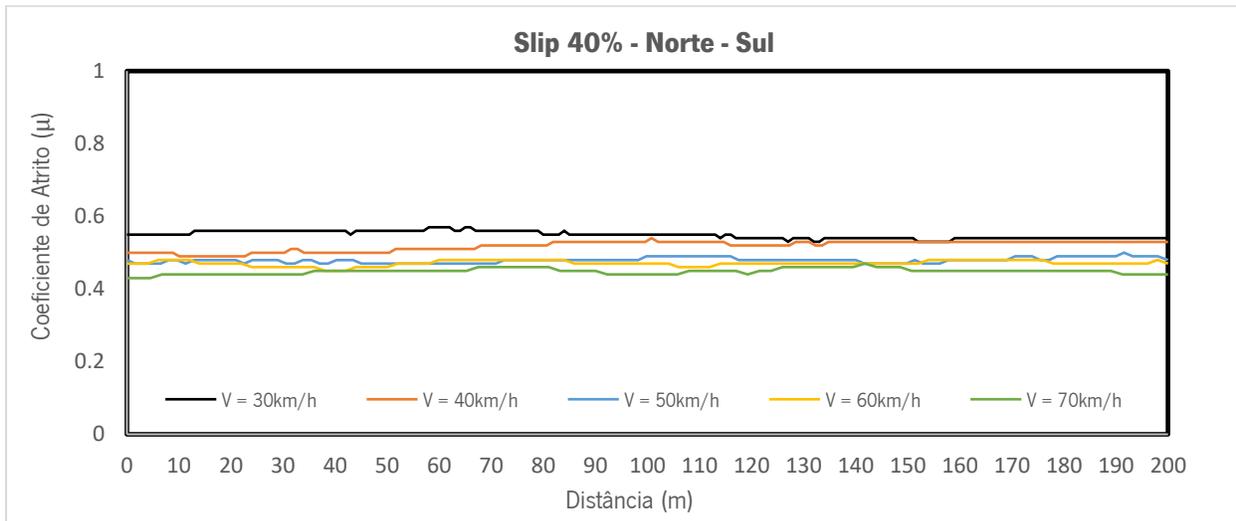
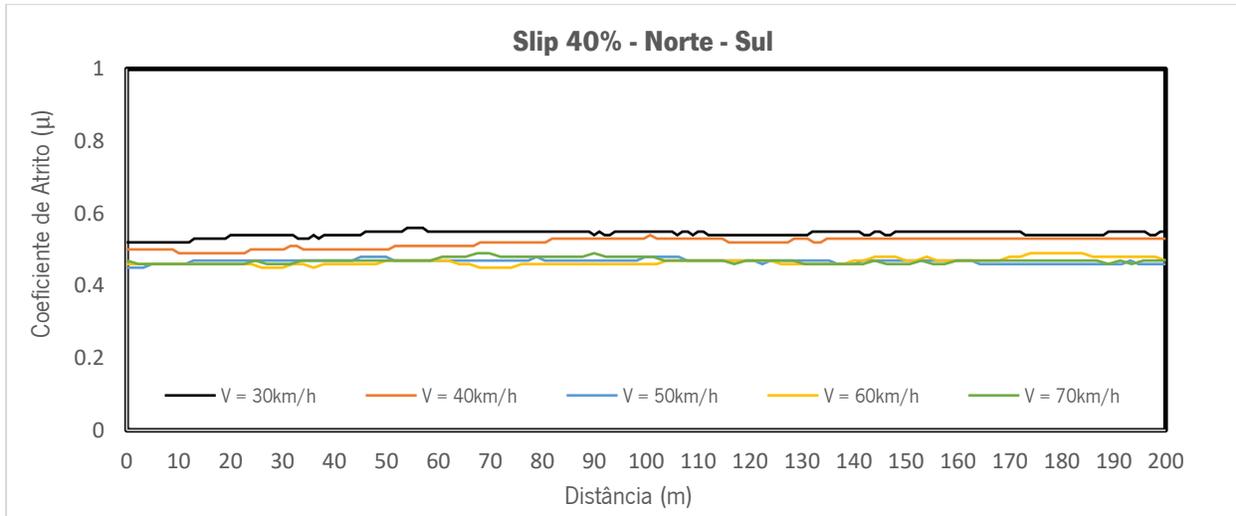


Figura 59 – Coeficiente de atrito para slip de 40% e velocidade variável

Neste caso e de uma forma geral, os resultados são semelhantes nos dois sentidos de medição, o que corrobora novamente a medição efetuada. Para os diversos níveis de slip, a velocidade provoca variações de atrito que se podem considerar próximas, tendo em conta os limites máximo e mínimo, exceto para o slip de 30%, em que se observa uma variação nitidamente superior.

Além disso, é visível ao longo do trecho que a velocidades reduzidas correspondem os valores de atrito mais elevados, enquanto que a velocidades mais elevadas correspondem os valores mais baixos.

4.1.5 Representação das curvas atrito vs slip

Conjugando os resultados obtidos, é possível efetuar-se a representação das curvas atrito vs *slip*, sendo os valores obtidos efetuando a média do coeficiente de atrito ao longo de cada uma das medições. Na Tabela 4 e na Tabela 5 apresentam-se os resultados médios obtidos e nas Figura 60 e Figura 61 é possível visualizar a representação gráfica das curvas, para cada uma das velocidades e cada um dos sentidos.

Tabela 4 – Coeficiente de atrito médio nas medições Norte - Sul

SENTIDO		<i>Slip (%)</i>					
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

Tabela 5 - Coeficiente de atrito médio nas medições Sul - Norte

SENTIDO		<i>Slip (%)</i>					
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	0.430	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

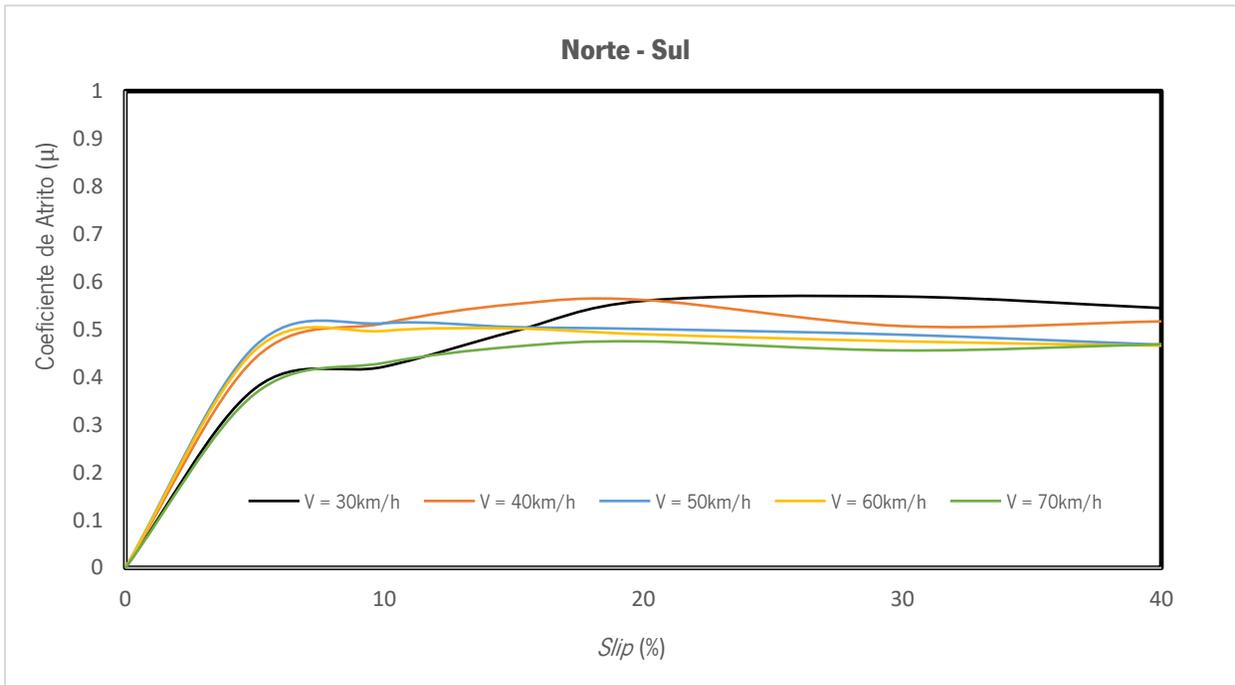


Figura 60 – Curvas atrito vs slip sentido Norte – Sul

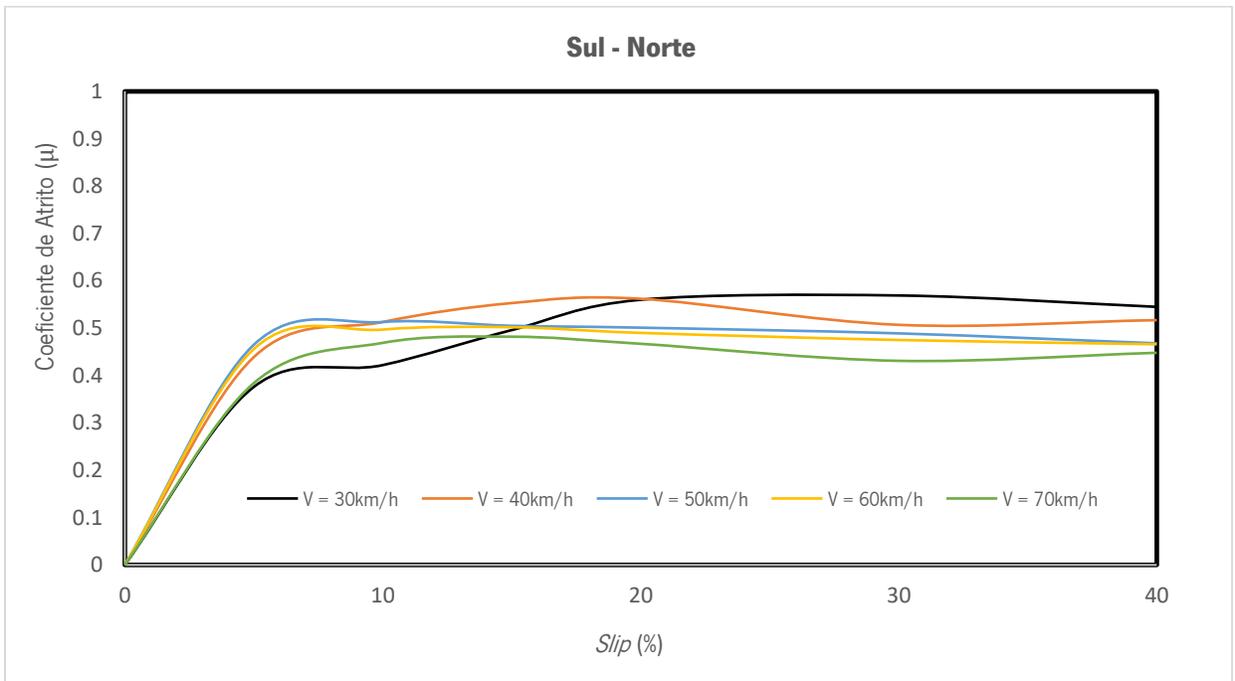


Figura 61 - Curvas atrito vs slip sentido Sul - Norte

4.2 Estudo do impacto das características do pneu no coeficiente de atrito

As características dos pneus impactam no valor do atrito dos pavimentos rodoviários. Recorda-se que, aquando da realização dos ensaios comparativos com o equipamento *GripTester*, foi verificada uma diferença aproximadamente constante entre os valores medidos por um e por outro equipamento, parte dessa diferença pode ser explicada pelas características dos pneus de ensaio. Entre essas características destaca-se a dureza.

Para estudar o efeito da dureza dos pneus no atrito foram adquiridos pneus com características de dureza distintas, e efetuados ensaio fazendo uso do equipamento MAPA.

4.2.1 Leitura dos valores de dureza

A medição da dureza do pneu foi efetuada recorrendo a um durômetro, sendo o princípio de medição bastante simples. O equipamento possui um amostrador digital que fornece a resposta dada pelo material, que consiste em cravar uma ponteira na superfície do pneu (Figura 62). Quanto maior é o valor obtido, maior é a dureza do pneu.

Na Figura 62 apresentam-se os resultados obtidos quer para o pneu da marca Kings Tire (à esquerda) quer para o pneu da marca Deli Tire (à direita).



Figura 62 – Leitura dos valores da dureza.

Os ensaios realizados no âmbito quer do Capítulo 3 quer do 4 foram efetuados com pneus da marca Kings Tire, ou seja, pneus com uma dureza de 0.70. Após consulta da norma de ensaio do GripTester, verificou-se que a dureza recomendada para o pneu é de 58 (+/-) 2 Shore A, ou seja, deve estar dentro do intervalo de 56 a 60 shore A. Não foi possível encontrar um pneu comercial para utilizar no MAPA que cumprisse essa indicação. Contudo, o pneu Deli Tire (dureza 0.65) é o que se aproxima mais dos valores preconizados para o pneu do *GripTester*.

4.2.2 Localização do trecho de estudo e metodologia de ensaio

Os ensaios foram realizados no trecho caracterizado no ponto 4.1.1, nas imediações do AveParque.

Relativamente à metodologia, seguiram-se as orientações da norma do *GripTester*, ou seja, adotou-se uma velocidade de 50 km/h, caudal de 20 l/min e uma taxa de deslizamento igual a 15%. Efetuaram-se três passagens por sentido, realizando posteriormente a média dos resultados.

4.2.3 Análise do efeito da dureza do pneu

Na Figura 63e na Figura 64 representam-se os perfis longitudinais de variação do coeficiente de atrito. Na Tabela 6, apresentam-se os valores médios, que servem de base para comparação.

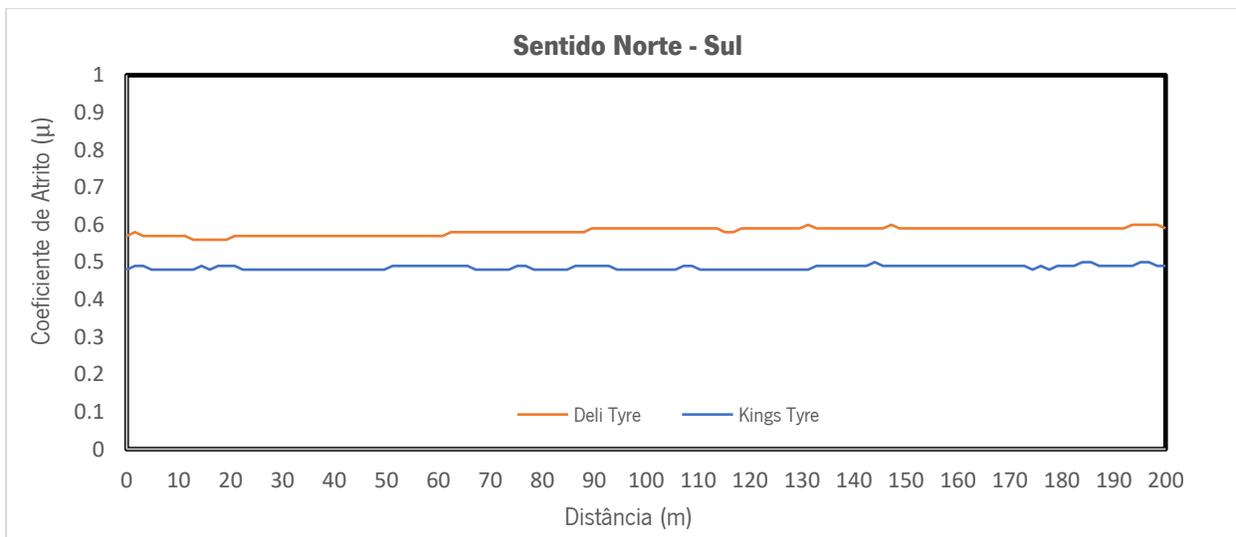


Figura 63 – Coeficiente de atrito medido com pneus Deli Tyre e Kings Tyre

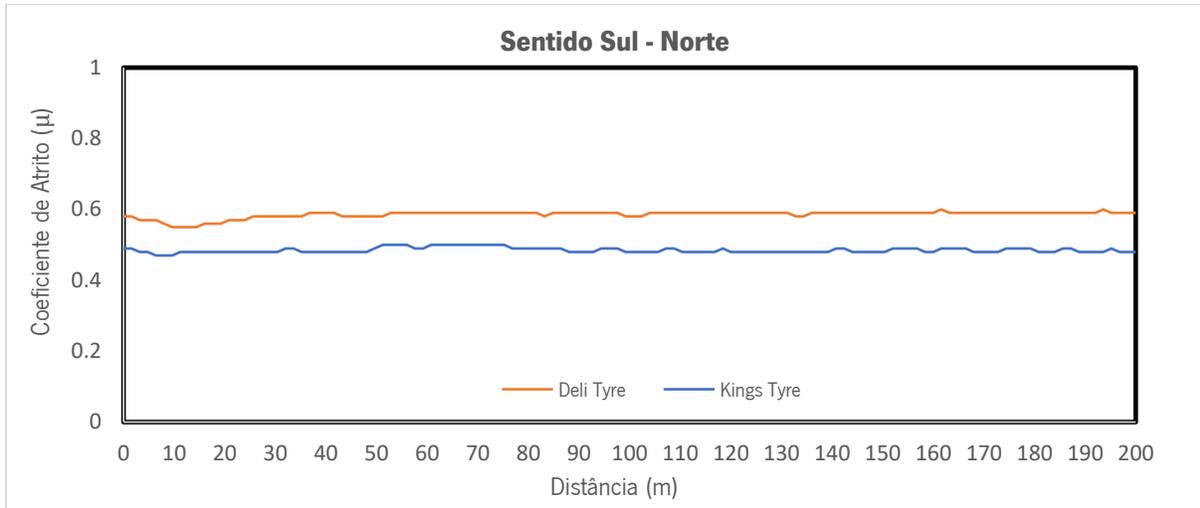


Figura 64 – Coeficiente de atrito medido com pneus Deli Tyre e Kings Tyre

Tabela 6 – Coeficiente de atrito médio para os pneus Deli Tyre e Kings Tyre

Tipo de Pneu	Sentido	
	Norte - Sul	Sul - Norte
Kings Tire	0.497	0.495
Deli Tire	0.583	0.586
Variação	14,76%	16,53%

As Figura 63 Figura 64 mostram, como esperado que há um desfasamento paralelo dos valores de atrito ao longo da secção de estudo nos dois sentidos, correspondentes a 14,76% e 16,53% para uma variação de dureza de 0.05 shore A. O pneu de dureza superior (Kings Tyre) leva a valores de atrito inferiores, o que pode ser explicado pela menor deformação do pneu.

É relevante referir que o piso destes pneus tem relevo, enquanto que o piso do pneu dos equipamentos de medição de atrito comerciais são lisos, o que também explica as diferenças encontradas no Capítulo 3.

4.3 Estudo do atrito na aproximação de passagens pedonais

As passagens pedonais são tipicamente reconhecidas como pontos de conflito quer em ambiente urbano quer fora dele. São muitos os fatores que podem conduzir a graves acidentes nestes locais, mas são poucos os estudos que procuram por um lado compreender as variáveis envolvidas na interação entre os condutores e os peões e, por outro lado, que introduzam propostas concretas que melhorem esta parte integrante das estradas portuguesas.

Com o objetivo verificar se o atrito diminui com a aproximação à passadeira e contribui para a sinistralidade nestes locais, foi feito a medição do atrito na proximidade de um conjunto de passadeiras.

4.3.1 Trechos de estudo

Em virtude da sua localização e do historial recente com atropelamentos, foram selecionados três trechos de estudo na vila de Cabeceiras de Basto, estando assinalados nas Figuras 65 a 67.

O trecho 1 (Figura 65) é referente à principal avenida da vila, e possui 2 passadeiras ao longo da sua extensão, onde já existiram atropelamentos com consequências graves. O trecho 2 (Figura 66) é localizado junto a uma escola do primeiro ciclo. Por fim, o trecho 3 (Figura 67) corresponde a um local que deu lugar a reclamações por diminuição do atrito e que condiciona a distância de travagem. Nestas figuras são identificadas as passadeiras selecionadas para este estudo com a numeração de 1 a 6.



Figura 65 – Localização do trecho 1



Figura 66 – Localização do trecho 2



Figura 67 – Localização do trecho 3

4.3.2 Metodologia de ensaio

Nos trechos assinalados os ensaios foram realizados com slip de 15% e caudal de 20 l/min a uma velocidade de 40 km/h, optou-se por uma velocidade inferior à usada tipicamente uma vez que as passadeiras se inserem num pequeno meio urbano.

Na perspetiva de obter resultados com melhor qualidade, foi efetuada uma alteração no código de funcionamento do equipamento, mudando-se a frequência de medição de 100 milissegundos para 30 milissegundos, sendo isto justificado pela necessidade de se obter valores do atrito em intervalos de extensão mais reduzidos para conseguir captar as suas pequenas variações.

Fazendo uso da interface LabView desenvolvida foi possível, ao longo do processo de medição, introduzir notas concretas acerca de quando se aproximava e ultrapassava uma passagem pedonal, bem como outras indicações pertinentes. Juntando estas notas com a gravação GPS dos percursos efetuados é obtida a segmentação dos trechos.

4.3.3 Resultados obtidos

Na Figura 68 à Figura 70 apresenta-se o coeficiente de atrito obtido junto às passadeiras numa extensão de 30 m que compreende a distância de aproximação e a largura da passadeira.

Para facilitar a análise dos resultados, apresenta-se ainda a linha de ajuste linear a cada perfil obtido assim como a reta de regressão. A partir da análise do declive da reta de regressão confirma-se que há uma redução do atrito na aproximação às passadeiras, embora a variação seja muito pequena.

No que respeita aos valores e atrito, relembra-se que obtidos com um pneu com características diferentes do usado em equipamentos comerciais e velocidade inferior, verifica-se que compreendem entre 0,5 e 0,4, o que pode ser reduzido para garantir condições de travagem num curto espaço.

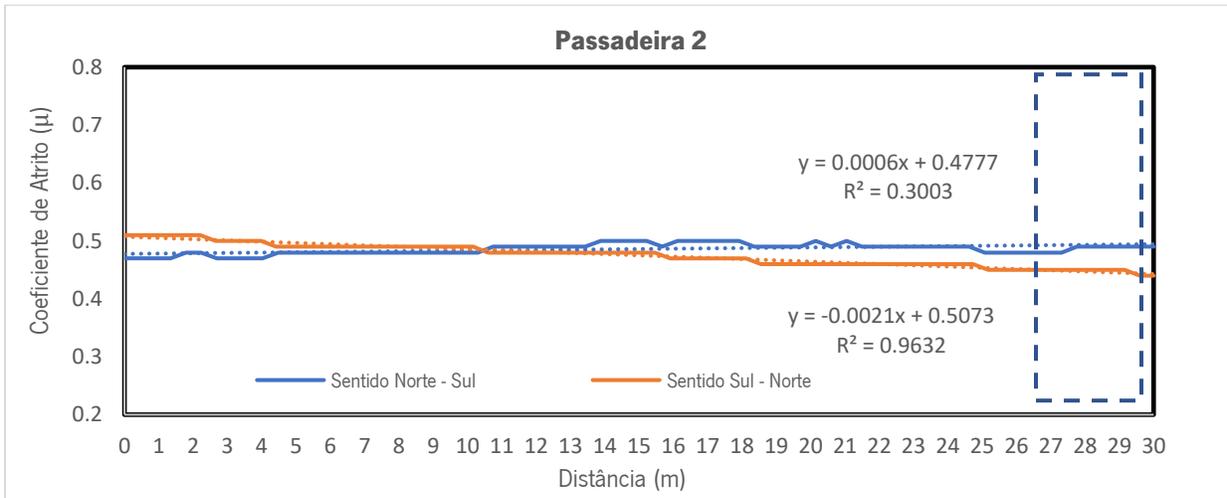
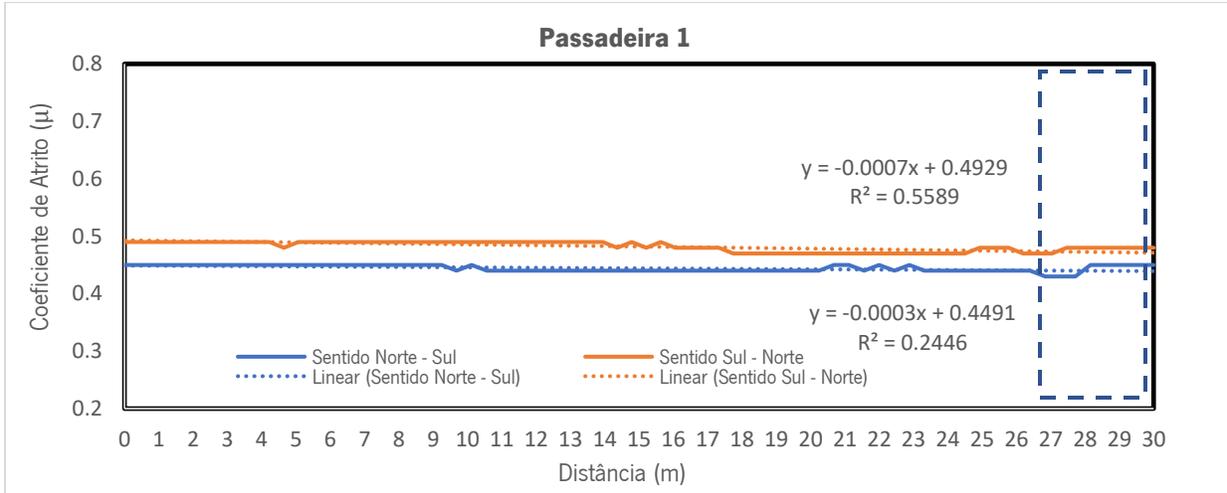


Figura 68 – Coeficiente de atrito nas passadeiras 1 e 2 do trecho 1

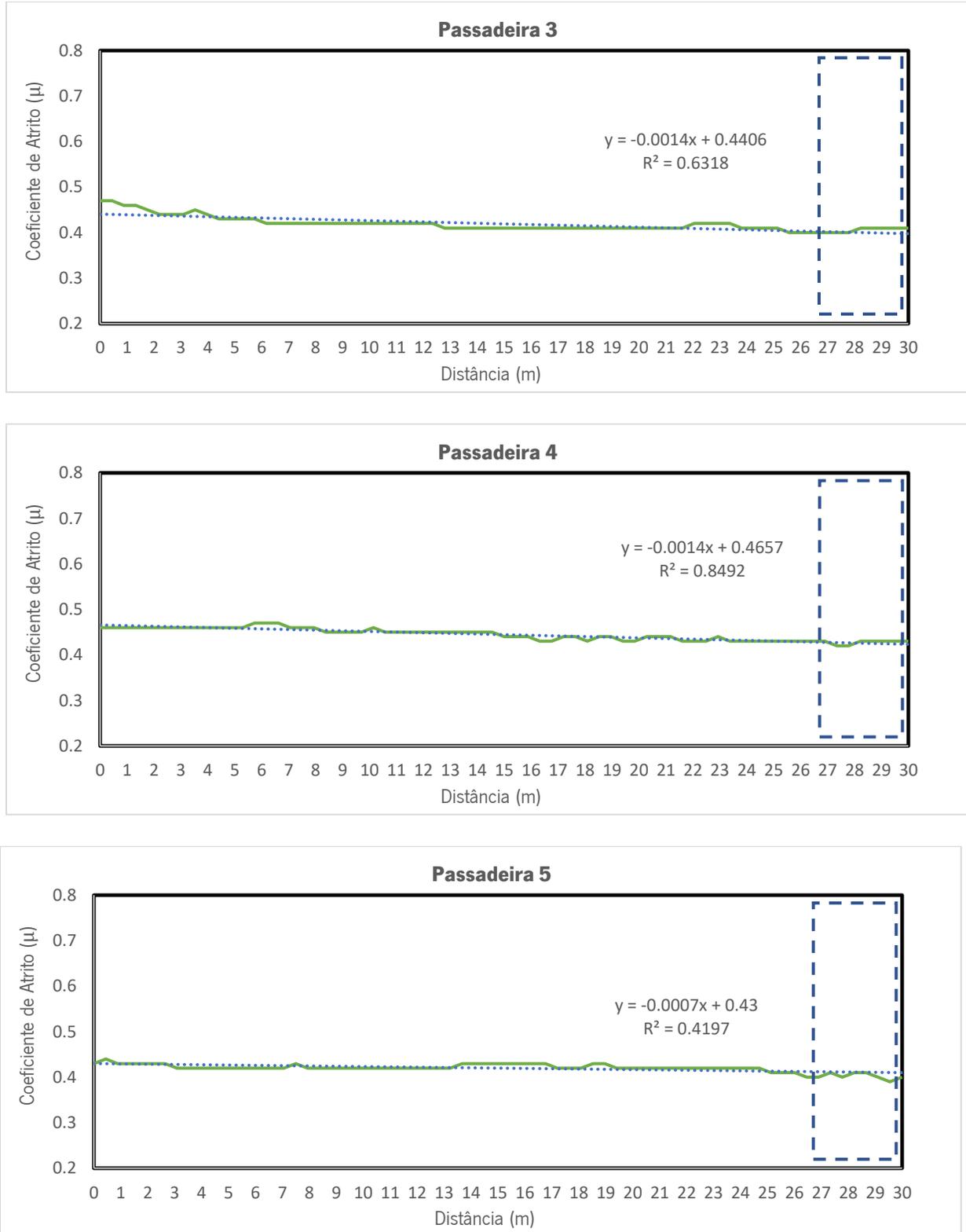


Figura 69 – Coeficiente de atrito nas passadeiras 3 a 5 do trecho 2

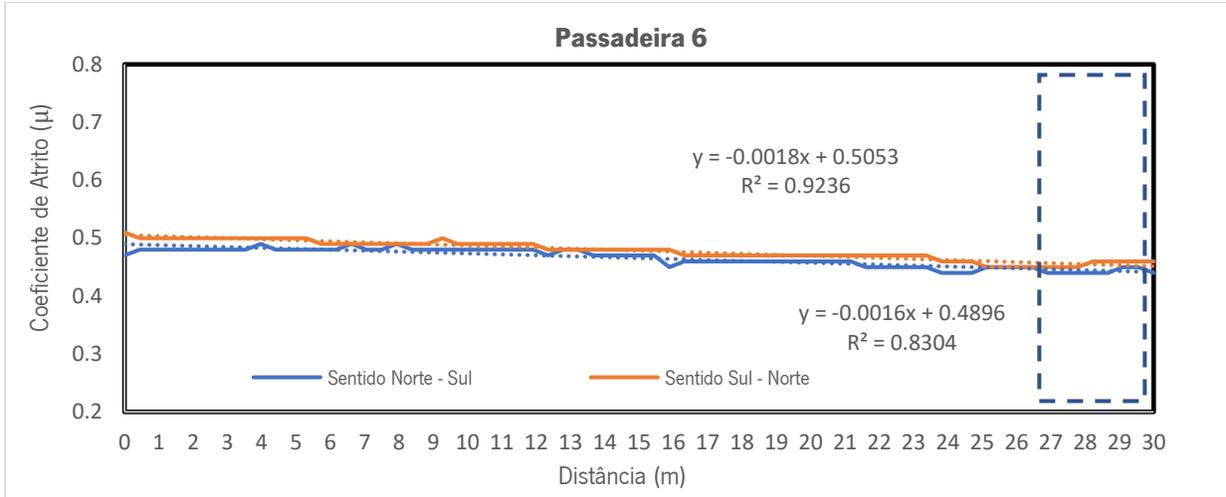


Figura 70 – Coeficiente de atrito na passadeira 6 do trecho 3

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Numa sociedade cada vez mais instrumentalizada e informada, a preocupação e exigência com as características superficiais dos pavimentos têm vindo a aumentar de forma notória. À medida que novos materiais vão emergindo, crescem também as preocupações acerca das garantias que os mesmos apresentam no que diz respeito à segurança dos utilizadores das vias circuláveis, quer na perspetiva dos condutores quer na perspetiva dos peões. Essa mesma segurança é assegurada, em grande parte, pelo atrito existente na superfície de contacto pneu – pavimento, constituindo este parâmetro um eixo fulcral em torno do qual devem ser desenvolvidas investigações acerca da forma como o mesmo pode ou não sofrer alterações com novas solicitações que, a curto ou médio prazo, vão acabar por interferir no desempenho dos pavimentos como é exemplo o aquecimento global.

A revisão bibliográfica efetuada no capítulo 2 permitiu concluir que quando se aborda o tema do atrito nos pavimentos é necessário contextualizar a estrita relação existente entre esse parâmetro e as demais características superficiais, tais como a textura e a regularidade, bem como a relação existente com outros intervenientes como as características dos veículos e do meio ambiente. A conjugação de todos estes fatores torna a avaliação do atrito uma tarefa difícil, mas ao mesmo tempo integradora e desafiante. Nesse capítulo foi ainda efetuado um levantamento acerca das distintas formas e equipamentos de medição do atrito, concluindo-se que ainda que já existam esforços para implementar metodologias mais tecnológicas, ainda são os equipamentos tradicionais como o *GripTester* e o *SCRIM* que assumem papel de destaque.

Ficou patente a necessidade de se desenvolverem novos equipamentos que incorporem alguns princípios dos já existentes mas que ao mesmo tempo os melhorem e é nessa perspetiva que ao longo do Capítulo 3 foi efetuada uma análise de viabilidade e desempenho de um protótipo de medição de atrito – o equipamento MAPA. Este equipamento denotou um conjunto de debilidades construtivas, eletrónicas e físicas. Depois de várias fases de estudos e alterações, foram resolvidos os principais dilemas, credibilizando-se desse modo os *outputs* de medição obtidos.

No entanto, após comparação de um conjunto de resultados com os obtidos com o *GripTester* verificou-se que os mesmos diferem percentualmente em torno de 15%, sendo os do *GripTester* superiores. Foram apontadas algumas justificações, que passam pelas diferentes características do pneu utilizado, desde o seu tamanho até à qualidade da borracha, e ainda questões relacionadas com os diferenciais de temperatura entre os momentos de medição. Ainda assim, os equipamentos apresentaram um comportamento evolutivo semelhante, algo que confere boas sensações aos resultados obtidos com o equipamento MAPA.

Os estudos efetuados no capítulo 4 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.

Através do estudo efetuado com diferentes pneus foi possível comprovar a elementar ligação que existe entre a dureza do pneu e o atrito que a superfície nos pavimentos consegue garantir, concluindo-se que uma diferença de aproximadamente 50 “*shore A*” na dureza conduz a uma variação de mais de 15% no valor do coeficiente de atrito, valor que se considera ser bastante elevado. Estas diferenças obtidas ajudam a compreender a diferença existente entre os valores do *GripTester* e do equipamento MAPA, ainda que muito provavelmente não seja a única justificação.

Por fim, o levantamento do coeficiente de atrito na aproximação de passagens pedonais, em meio urbano, permitiu observar uma tendência praticamente geral de redução do valor do coeficiente de atrito à medida que os veículos se aproximam da barra de paragem. Estes resultados vêm acentuar algumas das suspeitas iniciais. Esta diminuição pode ter algumas origens, sendo uma delas o efeito que os contaminantes, tal como óleos e poeiras, podem assumir nestes locais que são tipicamente caracterizados pela paragem e permanência de veículos em funcionamento.

5.2 Trabalhos Futuros

A presente dissertação permitiu tratar dois eixos distintos: por um lado corrigir e validar o protótipo e por outro aplicá-lo em estudos concretos de forma a assegurar o seu desempenho e reprodutibilidade. Existiram abordagens que infelizmente não puderam ser concretizadas e que serão apontadas como trabalhos a realizar num futuro próximo e que certamente irão contribuir para aprimorar as capacidades do equipamento.

Relativamente ao MAPA, é fundamental implementar alterações na sua jante de menor diâmetro com o objetivo de permitir a colocação de um pneu igual ao do GripTester, de forma a uniformizar os resultados obtidos. Ao nível do seu código, pode ser repensada uma forma de diminuir a frequência de medição, ainda que a mesma já seja atualmente mais baixa do que a do GripTester. Quando se pretendem medições muito rigorosas, como é o exemplo das passadeiras, é impensável realizá-las com o GripTester (que na melhor das hipóteses fornece uma medição a cada 5 metros), pelo que quanto menor for a distância entre medições, maior será a probabilidade de captar as variações existentes e conseqüente melhor será a fiabilidade dos resultados obtidos.

Uma outra 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 slip, seria muito interessante imprimir no código uma variação contante de 0% 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.

O equipamento representa uma mais-valia, sendo determinante o trabalho realizado nesta dissertação e o trabalho que venha a ser realizado para que o mesmo possa, num futuro próximo, ser normalizado e homologado, podendo dessa forma ser utilizado oficialmente em trabalhos no exterior.

REFERÊNCIAS

- Airport Friction Tester. (2021). *Runway Surface Friction Testing Equipment - SARSYS*. Retrieved, from <https://www.airport-suppliers.com/supplier/scandinavian-airport-and-road-systems-ab-sarsys/>
- Al-Assi, M., & Kassem, E. (2017). Evaluation of adhesion and hysteresis friction of rubber-pavement system. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 7, Issue 10). <https://doi.org/10.3390/app7101029>
- Andreas Ueckermann. (2015). *Calculation of skid resistance from texture measurements _ Elsevier Enhanced Reader.pdf* (p. 14).
- Åström, H., & Wallman, C.-G. (2001). Friction Measurement Methods And The Correlation Between Road Friction And Traffic Safety. A Literature Review. *Vti*.
- Branco, F., Pereira, P., & Santos, L. P. (2008). *Pavimentos Rodoviários 3ª reimpressão*.
- 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>
- Chou, C. P., Lee, C. C., Chen, A. C., & Wu, C. Y. (2017). Using a constructive pavement texture index for skid resistance screening. *International Journal of Pavement Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.05.002>
- Couchinho, R. (2011). *Estudo do equipamento GripTester*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Politécnico de Lisboa.
- Descornet, G., Schmidt, B., Boulet, M., Gothie, M., Do, M.-T., & J. Fafie. (2006). *Harmonization of European Routine and Research Measuring Equipment for Skid Resistance*.
- Domingues, F. A. A. (1997). *Medição da Aderência entre o Pneu e o Pavimento em Pistas Molhadas da Rede Dersa*.
- Du, Y., Li, Y., Jiang, S., & Shen, Y. (2019). Mobile Light Detection and Ranging for Automated Pavement Friction Estimation. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.1177/0361198119847610>

- 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>
- Dunford, A. (2013). *Friction and the texture of aggregate particles used in the road surface course*. Thesis (PhD). <http://eprints.nottingham.ac.uk/id/eprint/13412>
- EASA, E. A. S. A. (2010). *RuFAB – Runway Friction Characteristics Measurement and Aircraft Braking*.
- Findlay Irvine. (2021). *Findlay Irvine Ltd | Skid Resistance Section - micro GripTester*. Retrieved from <http://www.findlayirvine.com/capabilities/skid/micro-griptester-helideck.php>
- Fwa, T. F. (2017). Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety. In *International Journal of Transportation Science and Technology* (Vol. 6, Issue 3, pp. 217–227). <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.08.001>
- GDDKiA. (2009). *Análise sobre pavimentos voláteis, propriedades do desgaste no período inicial de serviço*.
- Hall, J.W., et al. (2009). National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies. *Guide for Pavement Friction*.
- Harverson, D. (2003). *“International Runwa Friction Testing.”*
- 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>
- Jayawickrama, P. W., Prasanna, R., & Senadheera, S. P. (1996). Survey of state practices to control skid resistance on hot-mix asphalt concrete pavements. In *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/1536-08>
- 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>
- Kane, M., Rado, Z., & Timmons, A. (2015). Exploring the texture-friction relationship: From texture empirical decomposition to pavement friction. In *International Journal of Pavement Engineering* (Vol. 16, Issue 10, pp. 919–928). <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.972956>

- 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>
- Khasawneh, M. A., & Liang, R. Y. (2012). Temperature effect on frictional properties of HMA at different polishing stages. *Jordan Journal of Civil Engineering*.
- Kogbara, R. B., Masad, E. A., Kassem, E., Scarpas, A., & Anupam, K. (2016). A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, *114*, 602–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.002>
- Kogbara, R. B., Masad, E. A., Woodward, D., & Millar, P. (2018). Relating surface texture parameters from close range photogrammetry to Grip-Tester pavement friction measurements. In *Construction and Building Materials* (Vol. 166, pp. 227–240). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.102>
- Luciana Girardi Omar. (2019). *Investigating the influence of distress on long-term performance of pavement friction of rural roads in Ontario Canada*.
- Lucio Machado. (2017). *Relatório Final de Execução -Medição de atrito em pavimentos*. www.cvresiduos.pt
- Lundberg, T., Andrén, P., Wahlman, T., Eriksson, O., Sjögren, L., & Ekdahl, P. (2018). *New technology for road surface measurement - Transverse profile and rut depth*.
- Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M., & Nejad, F. M. (2016). Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review. *Open Journal of Civil Engineering*, *06*(04), 537–565. <https://doi.org/10.4236/ojce.2016.64046>
- Mcquaid, G., Millar, P., Woodward, D., & Friel, S. (2013). Use of Close Range Photogrammetry To Assess the Micro-Texture of Asphalt Surfacing Aggregate. *International Journal of Pavements Conference*.
- 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>
- NCHRP. (2004). Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures. Final Report - Part 3: Design Analysis. *National Cooperative Highway Research Program*

NCHRP/Transportation Research Board.

Noyce, D. A., Bahia, H. U., Yambó, J. M., & Kim, G. (2005). Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements. *Midwest Regional University Transportation Center.*

Ong, G. P., & Fwa, T. F. (2007). Wet-Pavement hydroplaning risk and skid resistance: Modeling. *Journal of Transportation Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2007\)133:10\(590\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:10(590))

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>

Rado, Z., & Kane, M. (2014). An initial attempt to develop an empirical relation between texture and pavement friction using the HHT approach. *Wear*, 309(1–2), 233–246. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.015>

Rezaei, A., & Masad, E. (2013). Experimental-based model for predicting the skid resistance of asphalt pavements. In *International Journal of Pavement Engineering* (Vol. 14, Issue 1, pp. 24–35). <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.643793>

Rezaei, A., Masad, E., Chowdhury, A., & Harris, P. (2009). Predicting asphalt mixture skid resistance by aggregate characteristics and gradation. *Transportation Research Record*. <https://doi.org/10.3141/2104-03>

Rodriguez, O. D. G. (2009). *Evaluation of Pavement Surface Friction Seasonal Variations.*

Santos, E. L. (2004). “Análise Histórica de Medição do Atrito da Pista do Aeroporto Santos Dumont - RJ”. *Centro Técnico Aeroespacial, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Rio de Janeiro, Brasil.*

Sciences, N. A. of, E., & Medicine, A. (2009). *Guide for Pavement Friction.*

Smith, K. L., & L. Titus-Glover. (2009). Guide for Pavement Friction. *Guide for Pavement Friction, February.* <https://doi.org/10.17226/23038>

Smith, R. H. (2008). Analyzing Friction in the Design of Rubber Products and Their Paired Surfaces. In *Analyzing Friction in the Design of Rubber Products and Their Paired Surfaces.*

<https://doi.org/10.1201/9780849381379>

- 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*.
- TYROSAFE. (2008). *D04 - Report on state-of-the-art of test methods". Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects*.
- 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>
- Wilson, D. J. (2013). Research Report 515 - The effect of rainfall and contaminants on road pavement skid resistance. In *NZ Transport Agency*.
- Wilson, D. J., & Dunn, R. (2005). Analyzing Road Pavement Skid Resistance. *Annual Meeting and Exhibit Compendium of Technical Papers*, 7–10.
- Woodward, D., P. M., & McQuaid., G. (2014). *Use of 3D modelling techniques to better understand road surface textures*.
- Xiao, Y., Wang, F., Cui, P., Lei, L., Lin, J., & Yi, M. (2018). Evaluation of fine aggregate morphology by image method and its effect on skid-resistance of micro-surfacing. *Materials*, *11*(6). <https://doi.org/10.3390/ma11060920>
- Yang, G., Li, Q. J., Zhan, Y. J., Wang, K. C. P., & Wang, C. (2018). Wavelet based macrotecture analysis for pavement friction prediction. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *22*(1), 117–124. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1165-x>
- 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>
- 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>

Zuniga-Garcia, N., & Prozzi, J. A. (2019). High-Definition Field Texture Measurements for Predicting Pavement Friction. *Transportation Research Record*, 2673(1), 246–260.
<https://doi.org/10.1177/0361198118821598>

ANEXOS

Na presente secção apresentam-se os anexos que foram sendo mencionados no desenrolar da dissertação e que constituem elementos complementares das metodologias e dos resultados que foram explanados anteriormente.

Anexo I – Código de funcionamento do equipamento MAPA

```
gripmec_cp_digi_krmh | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help

gripmec_cp_digi_krmh
#include "math.h"
#include "Filter.h"
#define PWM1 6
#define encodPinA1 3
#define encodPinB1 11
#define pump1 4
#define pumpswitch 8
#define brakeswitch 7
#define valveswitch 9
#define pumps1speed 5
#define LOOPTIME 100 //30 em fast da leituras a cada 30ms
unsigned long oldTime= 0;
unsigned long lastMilli = 0;
unsigned long lastMilliPrint = 0;
long lastProcess=0;
float val;
float val1;

int slip = 0;
// filtro celula:
const int numReadings = 100;
int sleep2= Serial.read();

int PWM_val = 0;
volatile long count = 0;
volatile long count2 = 0;
volatile double speed_act= 0;
volatile double speed req= 0;
```

```
gripmec_cp_digi_krmh | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help

gripmec_cp_digi_krmh
volatile double speed_req= 0;
volatile double speed_act2= 0;
volatile double velocidade= 0;
volatile double catrito= 0;
volatile byte pulseCount= 0;
int pel=0;
double Kp = 0.001;
double Ki = 0.02 ;
double Kd = 0.095 ;

float readings[numReadings]; // the readings from the analog input
int readIndex = 0; // the index of the current reading
float total = 0; // the running total
float average = 0; // the average

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(PWM1, OUTPUT);
  pinMode(encodPinA1, INPUT);
  pinMode(encodPinB1, INPUT);
  pinMode(pumpswitch, OUTPUT);
  pinMode(brakeswitch, OUTPUT);
  pinMode(valveswitch, OUTPUT);
  digitalWrite(encodPinA1, HIGH);
  digitalWrite(encodPinB1, HIGH);
  digitalWrite(pump1, HIGH);
  pinMode(pumps1speed, OUTPUT);
  attachInterrupt(1, rencoder, RISING);
```

```
gripmec_cp_digi_kmh | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help

gripmec_cp_digi_kmh

attachInterrupt(1, rencoder, RISING);
attachInterrupt(0, rencoder2, RISING);
analogWrite(PWM1, PWM_val);
//analogWrite(pumpspeed,psl); novo
digitalWrite(pumpswitch,LOW);
digitalWrite(brakeswitch,LOW);
digitalWrite(valveswitch,HIGH);//antes era low a valv estava aberta de inicio cp
// filtro célula
for (int thisReading = 0; thisReading < numReadings; thisReading++) {
  readings[thisReading] = 0;
}

void loop() {
  delay (LOOPTIME);
  getParam();
  pulseCounter1();
  pulseCounter2();
  relay();
  printfInfo();
  psl=255;
  PWM_val= updatePid(PWM_val, speed_req, speed_act);
  analogWrite(PWM1, PWM_val);
  if (sleep2 > 97 || sleep2 < 122) sleep2 =0;
  else slip = sleep2;
}

27 Arduino Nano w/ ATmega328 on COM5
```

```
gripmec_cp_digi_kmh | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help

gripmec_cp_digi_kmh

void getParam() {

val=analogRead(0);
float voltage= (val) * (5.0 / 1024.0);
double forca=(0.1650*val); //novo amp. 12)an21 cp 1101 marco recalibras;

total = total - readings[readIndex];
readings[readIndex] = forca;
total = total + readings[readIndex];
readIndex = readIndex + 1;
if (readIndex >= numReadings) {
  readIndex = 0;
}
average = total / numReadings;
delay(1);

float binario=(average*0.32);
float btraseiro= 1.8695652173913*binario ;
float fatrito=(btraseiro/0.21);
ostrito=fatrito/64;

speed_req=((1.8695652173913)*(speed_act2)*(1-slip*0.01))*(0.605/0.42)*1.329; //dia 4mar adicionamos 1.329 para RPM F = speed req

velocidade=((speed_act2)*(1.90664*0.001*60));
analogWrite(pump1,LOW);

27 Arduino Nano w/ ATmega328 on COM5
```

O código possui ainda outra vertente direcionada para o *output*, mas considera-se que o fundamental já se encontra definido nas imagens acima.

Anexo II – Medições de atrito na circular urbana de Guimarães

Nos seguintes gráficos apresentam-se os resultados obtidos das medições realizadas na circular urbana de Guimarães. O slip aplicado e o sentido estão identificados no respetivo título.

