



**Susana Maria Silva  
Batata**

**ESTABELECIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE  
ANÁLISE DA INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO  
BASEADA EM ENSAIOS *IN SITU***





**Susana Maria Silva  
Batata**

**ESTABELECIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE  
ANÁLISE DA INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO  
BASEADA EM ENSAIOS *IN SITU***

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



*À minha família.*



## **o júri**

presidente

**Professor Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo**  
Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Doutor Luís Francisco Amaral Silva**  
Supervisor de Infraestruturas, EGIS Road Operation Portugal

**Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta**  
Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro





## agradecimentos

Com a presente Dissertação conclui-se mais uma etapa da minha vida, concretizando um dos maiores objetivos pessoais que detenho. Os meus agradecimentos dirigem-se não só para quem cooperou diretamente na realização da minha Dissertação, mas também para aquelas pessoas que sempre me apoiaram e deram força para continuar apesar dos obstáculos, em especial:

Ao Professor Doutor Agostinho Benta que me orientou ao longo desta fase, os meus sinceros agradecimentos, pelo apoio e compreensão demonstrados, pelas dicas e pelo conhecimento partilhados.

À EGIS Road Operation Portugal e à NorScut, em especial, ao Doutor Luís Silva, ao Engenheiro Paulo Barreto e ao Engenheiro Simão Pereira, pelo empenho na disponibilização de dados dos ensaios *in situ*, imprescindíveis no trabalho realizado ao longo desta Dissertação.

À minha estimada Rita Costa, que é aquela pessoa que me tem acompanhado desde o início do meu percurso académico, pela amizade, pelo carinho, pela ajuda e pelas palavras de coragem, mesmo estando à distância.

Ao meu namorado Henrique Pereira, o meu amparo, pelo apoio incondicional, pelo carinho e calma que me transmitiu em momentos menos bons.

Aos meus pais, Ana Santos e Manuel Batata, pelos valores que me transmitiram, pelo apoio incondicional, que sempre me auxiliaram e encorajaram, e que deram o maior contributo para que pudesse atingir este objetivo na minha vida.

À minha irmã, Edite Batata, por estar sempre presente com uma palavra reconfortante e pelo companheirismo.

Ao meu irmão, André Batata, aos meus Avós, Maria e Manuel Batata, aos meus Tios, Edite Batata e Carlos Guímaro, aos meus sogros, Carmo Tavares e António Moreira, e aos meus primos, que sempre acreditaram em mim e que, de uma maneira ou outra, contribuíram para que alcançasse mais esta etapa.

Aos meus amigos e colegas com os quais passei longas horas na Biblioteca, pelos momentos de diversão e pelo conhecimento que foram partilhados, e com os quais cresci muito a nível pessoal.

Um agradecimento em especial a Todos os Professores que me acompanharam ao longo destes anos na Universidade de Aveiro, que partilharam os seus conhecimentos para além da matéria das aulas e sem os quais seria impossível alcançar esta etapa.



**palavras-chave**

pavimentos rodoviários, segurança rodoviária, aderência, textura, atrito, IFI – International Friction Index, sistemas de segurança ativa, ABS, modelo de interação pneu-pavimento, distância de travagem.

**resumo**

Na presente dissertação é apresentado o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, baseado em parâmetros reais de textura e atrito do pavimento padronizados e, que poderá vir a ser implementado nos sistemas de segurança ativa dos veículos.

A segurança e o conforto dos utentes, assim como a durabilidade da estrutura do pavimento, dependem do estado em que se encontra o pavimento e dos pneus do veículo.

A interação pneu-pavimento é avaliada através da aderência do pneu ao pavimento possibilitando a mobilização de forças de atrito entre as duas superfícies.

A aderência é possível de avaliar de acordo com o tipo de superfície dos pneus e pela obtenção das características superficiais da camada de desgaste do pavimento, designadas por microtextura e macrotextura, onde a primeira depende da rugosidade da superfície e a segunda depende essencialmente da dimensão dos agregados.

Com utentes cada vez mais exigentes, surge a necessidade da utilização dos melhores materiais pavimentação e de desenvolver novas abordagens para os sistemas de segurança ativa, de modo a que estes atuem com o seu maior nível de otimização.

O sistema ABS é um dos sistemas de segurança ativa mais importante, tem como principal objetivo atuar antes que ocorra o acidente. A base do seu funcionamento é o princípio de que o atrito estático, resultante da aderência pneu-pavimento, atinja valores superiores ao atrito cinético, que surge entre as duas superfícies durante o deslizamento.

Foi desenvolvido um modelo de interação padronizado com base no modelo de interação existente, auxiliado por dados experimentais e dados de estudos bibliográficos.

Por fim, efetuou-se o estudo aprofundado das distâncias de travagem obtidas pelo modelo proposto, comparando com o Modelo de Burckhardt e a Norma de Traçado em vigor em Portugal.



**keywords**

road pavements, traffic safety, grip, texture, friction, IFI – International Friction Index, active safety systems, ABS, tyre-pavement interaction model, braking distance.

**abstract**

In this dissertation is presented a Standardized Tyre-Pavement Interaction Model, based on real parameters of standardized pavement texture and friction, which may be implemented in the active safety systems of the vehicles.

The safety and comfort of users, as well as the durability of the pavement structure, depend on the pavement conditions and the tyres of the vehicle.

The tyre-pavement interaction is evaluated by the adherence of the tyre to the pavement allowing the mobilization of frictional forces between the two surfaces.

The adherence can be evaluated according to the tyre surface type and by obtaining the surface characteristics of the pavement wear layer, called microtexture and macrotexture, where the first one depends on the surface roughness and the other depends essentially on the size of the aggregates.

With increasingly demanding users, there is a necessity of using the best paving materials and the development of new approaches to the active safety systems, so they perform at their highest level of optimization.

The ABS System is one of the most important active safety systems, its main objective is to act before the accident occurs. The basis of its operation is the principle that static friction resulting from tyre-pavement adherence reaches highest values than the kinetic friction that arises between the two surfaces during sliding.

A standardized interaction model was developed based on the existing interaction model, aided by experimental data and data from bibliographic studies.

Finally, a thorough study of the braking distances obtained by the proposed model was made, comparing them with the Burckhardt Model and the values demanded by other geometric road standards in place in Portugal.



## Índice Geral

Universidade de Aveiro .....	Erro! Marcador não definido.
<b>Índice Geral.....</b>	<b>I</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>V</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de Gráficos.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Simbologia.....</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento Temático .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estrutura da Tese.....	2
<b>2 Pavimentos Rodoviários .....</b>	<b>5</b>
2.1 Constituição de um Pavimento Rodoviário.....	5
2.2 Características Superficiais dos Pavimentos .....	8
2.2.1 Textura Superficial.....	9
2.2.2 Irregularidade Longitudinal e Transversal .....	12
2.2.3 Atrito .....	14
2.2.4 <i>International Friction Index</i> (IFI) – Cálculo do Valor de IFI de Acordo com o Procedimento ASTM .....	16
<b>3 Mecanismos de Interação Pneu-Pavimento.....</b>	<b>21</b>
3.1 Aderência Pneu-Pavimento .....	21
3.2 Deslizamento Longitudinal e Dinâmica do Veículo.....	22
3.3 Hidroplanagem.....	26
3.4 Influência dos Pneus.....	27
3.5 Mecanismos Ativos de Controlo de Travagem e Estabilidade .....	28
3.5.1 Sistema Anti-Bloqueio de Travagem (ABS).....	29
3.5.2 Nova Abordagem para o Sistema Anti-Bloqueio de Travagem (ABS modificado) .....	32
3.6 Caraterização do Fenómeno de Paragem .....	34

---

3.6.1	Distância de Paragem.....	34
3.6.2	Distância de Travagem.....	35
3.6.3	Distância de Paragem e Coeficiente de Atrito.....	36
<b>4</b>	<b>Modelos de Interação Pneu-Pavimento .....</b>	<b>39</b>
4.1	Modelo Penn State.....	39
4.2	Modelo Rado.....	40
4.3	Modelo de Burckhardt.....	42
<b>5</b>	<b>Modelo de Interação Pneu-Pavimento Baseado em Parâmetros Reais do Pavimento Desenvolvido por Silvério (2015).....</b>	<b>45</b>
5.1	Parâmetros de Burckhardt.....	45
5.2	Formulação Desenvolvida por Silvério (2015), para uma Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Denso – BB.....	46
5.3	Formulação Desenvolvida por Silvério (2015), para uma Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Drenante – BBD .....	48
5.4	Nova Aplicação do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015).....	51
5.4.1	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Denso – BB.....	52
5.4.2	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Muito Delgado – BBTM.....	54
5.4.3	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Rugoso – BBR.....	56
5.4.4	Camada de Desgaste em <i>Stone Mastic Asphalt</i> – SMA .....	57
5.5	Considerações Finais acerca do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Desenvolvido por Silvério (2015).....	58
<b>6</b>	<b>Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado Baseado em Parâmetros Reais do Pavimento.....</b>	<b>59</b>
6.1	Primeira Abordagem na Obtenção dos Parâmetros de Burckhardt em Função de IFI. 59	
6.1.1	Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 1 e a Formulação 2, para o Troço BB .....	61
6.1.2	Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 1 e a Formulação 2, para o Troço 2 (BB) .....	64
6.2	Aproximação das Curvas $\mu$ -s de IFI ao Modelo de Burckhardt, pelo Ajuste de C1 .....	67
6.2.1	Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 2 e a Formulação 3, para o Troço BB .....	67
6.2.2	Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 2 e a Formulação 3, para o Troço 2 (BB) .....	70



<b>6.3</b>	<b>Aproximação das Curvas <math>\mu</math>-s de IFI ao Modelo de Burckhardt, pelo Ajuste de C3 .....</b>	<b>72</b>
6.3.1	Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 3 e a Formulação 4, para o Troço BB .....	73
6.3.2	Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 3 e a Formulação 4, para o Troço 2 (BB) .....	76
<b>6.4</b>	<b>Padronização dos Parâmetros do Modelo de Burckhardt em Função de IFI .....</b>	<b>79</b>
6.4.1	Comparação de Resultados obtidos, entre a Formulação 4 e a Formulação 5, para uma Camada de Desgaste em BB .....	80
6.4.2	Considerações Finais Acerca da Formulação 1 e da Formulação 5, para uma Camada de Desgaste em BB .....	84
<b>6.5</b>	<b>Aplicação do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado nas Diferentes Camadas de Desgaste .....</b>	<b>91</b>
6.5.1	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Muito delgado – BBTM .....	91
6.5.2	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Rugoso – BBR .....	93
6.5.3	Camada de Desgaste em <i>Stone Mastic Asphalt</i> – SMA .....	95
6.5.4	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Drenante – BBD .....	97
<b>7</b>	<b>Distância de Travagem .....</b>	<b>103</b>
<b>7.1</b>	<b>Formulação de Burckhardt .....</b>	<b>103</b>
7.1.1	Veículo sem ABS .....	105
7.1.2	Veículo com ABS .....	107
7.1.3	Veículo com ABS Modificado .....	109
<b>7.2</b>	<b>Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado .....</b>	<b>111</b>
7.2.1	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Denso - BB .....	112
7.2.2	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Muito Delgado - BBTM .....	120
7.2.3	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Drenante - BBD .....	126
7.2.4	Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Rugoso - BBR .....	132
7.2.5	Camada de Desgaste em <i>Stone Mastic Asphalt</i> - SMA .....	135
<b>7.3</b>	<b>Norma de Traçado .....</b>	<b>137</b>
<b>8</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>151</b>
<b>8.1</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>151</b>
<b>8.2</b>	<b>Perspetivas Futuras .....</b>	<b>152</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>153</b>
	<b>Normas .....</b>	<b>162</b>

**ANEXO A – Tratamento dos dados referentes às camadas de desgaste em BB e BBD, obtidos de Silvério (2015) ..... Erro! Marcador não definido.**

**ANEXO B – Tratamento dos dados referentes às camadas de desgaste em BB e BBTM (2019)..... Erro! Marcador não definido.**

**ANEXO C – Tratamento dos dados referentes às camadas de desgaste em BBR e SMA, retirados da Bibliografia ..... Erro! Marcador não definido.**

**ANEXO D – Desenvolvimento do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado – Parâmetros de Burckhardt ..... Erro! Marcador não definido.**

**ANEXO E – Distâncias de Travagem obtidas pelo Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado ..... Erro! Marcador não definido.**

**ANEXO F – Distâncias de travagem para o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, Modelo de Burckhardt e Norma de Traçado Erro! Marcador não definido.**

**ANEXO G – Valores de Calibração dos Equipamentos de Medição Erro! Marcador não definido.**

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Constituição tipo de um pavimento rodoviário (Adaptado de Neves, 2009)....	6
Figura 2.2 - Influência das características do pavimento na sua utilização (Galp Energia, 2006).....	9
Figura 2.3 – Ilustração dos vários intervalos de textura num determinado pavimento (Adaptado de Hall <i>et al</i> , 2009) .....	11
Figura 2.4 - Características de desempenho de pavimento rodoviários em função dos intervalos dos comprimentos de onda da textura superficial (Meurer-Filho, 2001) .....	13
Figura 2.5 – Modelo para determinação do IFI (Adaptado de PIARC/AIPCR, 2003) .....	17
Figura 3.1 – Mecanismos de forças de atrito (Lugão, 2008).....	21
Figura 3.2 – Estrutura de deformação de pneu, raios respetivos e forças na interação com o pavimento (Silvério, 2015).....	24
Figura 3.3 – Coeficiente de atrito em função das cargas verticais e do estado do pavimento (Silvério, 2015).....	25
Figura 3.4 – Zonas de interação pneu-pavimento com piso molhado (Lugão, 2008).....	27
Figura 3.5 – Constituição do pneu (a) e constituição do piso do pneu (b), (Freitas <i>et al</i> , 2007).....	28
Figura 3.6 – Distribuição dos componentes de um sistema ABS num automóvel (Silvério, 2015).....	30
Figura 3.7 – Relação entre o coeficiente de atrito e deslizamento da roda no funcionamento do ABS. (Silvério, 2015).....	31
Figura 3.8 – Coeficiente de atrito longitudinal (Silvério, 2015) .....	32
Figura 3.9 – Curva tipo de superfície de estrada (Silvério, 2015).....	33
Figura 4.1 – Modelo de Penn State de duas superfícies com texturas diferentes (Henry, 2000).....	40
Figura 4.2 – Relação da velocidade de deslizamento e o coeficiente de atrito da superfície do pavimento (Henry, 2000).....	41
Figura 4.3 – Modelo de atrito de Rado com valores: $\mu_{\text{pico}}=0,6$ e $S_{\text{máx}}= 30$ km/h (Al-Qadid <i>et al</i> , 2002).....	42
Figura 4.4 – Curvas $\mu$ -s do Modelo de Burckhardt de acordo com os parâmetros da Tabela 4.1. ....	44

Figura 7.1 – Regiões que subdividem a distância de travagem de um veículo sem ABS  
(Silvério, 2015)..... 105

Figura 7.2 – Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo com ABS  
(Silvério, 2015)..... 108

Figura 7.3 – Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo com ABS  
modificado (Adaptado de Silvério, 2015) ..... 110

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação da textura superficial de acordo com <i>American Society for Testing and Materials</i> (Adaptado de ASTM E-867, 1997, <i>cit. in</i> Ranazzi, 2016).....	9
Tabela 2.2 – Classificação do valor de IFI de acordo com a proposta de Aps (2006) .....	18
Tabela 2.3 – Valores de $a$ e $b$ a considerar no cálculo de $Sp$ (Aps, 2006) .....	19
Tabela 2.4 – Valores de $S$ e $A, B, C$ a considerar no cálculo de $FR60$ e $F60$ (Aps, 2006) .	19
Tabela 3.1 – Valores de atrito de acordo com a ASSHTO (1994, 2001) e Guzmán (1995). .....	37
Tabela 3.2 – Distâncias de travagem (m), para os valores de atrito da Tabela 5 (Aps, 2006) .....	37
Tabela 3.3 – Distância de visibilidade mínimas de paragem e coeficientes de atrito longitudinal (JAE, 1994; InIR, 2010).....	38
Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros das estradas tipo na aplicação do Modelo de Burckhardt (Wang <i>et al.</i> , 2014).....	43
Tabela 6.1 – Valores dos parâmetros da Formulação 2 para o Troço BB.....	61
Tabela 6.2 – Valores dos parâmetros da Formulação 2 para o Troço 2 em BB, nos diferentes anos de ensaios.....	64
Tabela 6.3 – Resultados da correlação de valores de “IFI” a valores de “ $T_x$ ”, para uma camada de desgaste em BB .....	79
Tabela 6.4 – Diferença do valor de coeficiente de atrito máximo entre a Formulação 1, a Formulação 5 e o Modelo de Burckhardt, para o Troço BB .....	87
Tabela 6.5 – Diferença do valor de coeficiente de atrito máximo entre a Formulação 1, a Formulação 5 e o Modelo de Burckhardt, para o Troço 2 nos diferentes anos .....	90
Tabela 7.1– Valor da energia cinética e do trabalho da força de atrito para as diferentes velocidades .....	104
Tabela 7.2 – Parâmetro $k$ para o cálculo do coeficiente de permeabilidade e altura de água para Betão Betuminoso Drenante (Silvério, 2015).....	142

## Índice de Gráficos

Gráfico 5.1– Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as vias A e B do Troço BB .....	47
Gráfico 5.2 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as vias C e D do Troço BB .....	48
Gráfico 5.3 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para a Via A do Troço BBD .....	49
Gráfico 5.4 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para a Via B do Troço BBD .....	50
Gráfico 5.5 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para a Via C do Troço BBD .....	50
Gráfico 5.6 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para a Via D do Troço BBD .....	50
Gráfico 5.7 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 2 (BB), do ano de ensaios de 2009.....	52
Gráfico 5.8 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 2 (BB), do ano de ensaios de 2011.....	53
Gráfico 5.9 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 2 (BB), do ano de ensaios de 2014.....	53
Gráfico 5.10 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 1 (BBTM), do ano de ensaios de 2009 .....	54
Gráfico 5.11 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 1 (BBTM), do ano de ensaios de 2011 .....	55
Gráfico 5.12 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço1 (BBTM), do ano de ensaios de 2014.....	55
Gráfico 5.13 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para uma camada em Betão Betuminoso Rugoso .....	56
Gráfico 5.14 – Curvas $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para uma camada em <i>Stone Mastic Asphalt</i> .....	57
Gráfico 6.1 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço BB .....	61
Gráfico 6.2 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço BB .....	62

---

Gráfico 6.3 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via C do Troço BB .....	62
Gráfico 6.4 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via D do Troço BB .....	63
Gráfico 6.5 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009 .....	65
Gráfico 6.6 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009 .....	65
Gráfico 6.7 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014 .....	66
Gráfico 6.8 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014 .....	66
Gráfico 6.9 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço BB .....	68
Gráfico 6.10 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço BB .....	68
Gráfico 6.11 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via C do Troço BB .....	69
Gráfico 6.12 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via D do Troço BB .....	69
Gráfico 6.13 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009.....	70
Gráfico 6.14 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009.....	71
Gráfico 6.15 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014.....	71
Gráfico 6.16 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014.....	72
Gráfico 6.17 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço BB .....	74
Gráfico 6.18 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço BB .....	74
Gráfico 6.19 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via C do Troço BB .....	75

---

Gráfico 6.20 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via D do Troço BB .....	75
Gráfico 6.21 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009.....	76
Gráfico 6.22 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009.....	77
Gráfico 6.23 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014.....	77
Gráfico 6.24 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014.....	78
Gráfico 6.25 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço BB .....	81
Gráfico 6.26 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B em BB .....	81
Gráfico 6.27 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via C em BB .....	82
Gráfico 6.28 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via D em BB .....	82
Gráfico 6.29 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009.....	83
Gráfico 6.30 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009.....	83
Gráfico 6.31 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014.....	84
Gráfico 6.32 – Comparação das curvas $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014.....	84
Gráfico 6.33 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço BB .....	85
Gráfico 6.34 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço BB .....	85
Gráfico 6.35 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via C do Troço BB .....	86
Gráfico 6.36 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via D do Troço BB .....	86



---

Gráfico 6.37 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009 .....	88
Gráfico 6.38 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009 .....	88
Gráfico 6.39 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014 .....	89
Gráfico 6.40 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014 .....	89
Gráfico 6.41 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço 1 (BBTM), no ano de ensaios de 2009.....	91
Gráfico 6.42 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço 1 (BBTM), no ano de ensaios de 2009.....	92
Gráfico 6.43 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço 1 (BBTM), no ano de ensaios de 2014.....	92
Gráfico 6.44 – Comparação das curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço 1 (BBTM), no ano de ensaios de 2014.....	93
Gráfico 6.45 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para Betão Betuminoso Rugoso, ensaio do Pêndulo Britânico .....	94
Gráfico 6.46 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para Betão Betuminoso Rugoso, ensaio de SCRIM.....	95
Gráfico 6.47 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para <i>Stone Mastic Asphalt</i> , ensaio do Pêndulo Britânico .....	96
Gráfico 6.48 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para <i>Stone Mastic Asphalt</i> , ensaio do <i>GripTester</i> .....	96
Gráfico 6.49 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço BBD, considerando pavimento novo .....	98
Gráfico 6.50 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço BBD, considerando pavimento novo .....	99
Gráfico 6.51 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via C do Troço BBD, considerando pavimento novo .....	99
Gráfico 6.52 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via D do Troço BBD, considerando pavimento novo .....	100
Gráfico 6.53 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço BBD, considerando pavimento velho .....	100

---

Gráfico 6.54 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço BBD, considerando pavimento velho .....	101
Gráfico 6.55 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via C do Troço BBD, considerando pavimento velho .....	101
Gráfico 6.56 – Curvas $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via D do Troço BBD, considerando pavimento velho .....	102
Gráfico 7.1 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para os pavimentos abordados no modelo de Burckhardt.....	107
Gráfico 7.2 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para os pavimentos abordados no modelo de Burckhardt.....	109
Gráfico 7.3 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para os pavimentos abordados no modelo de Burckhardt.....	111
Gráfico 7.4 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BB com camada de desgaste molhada.....	112
Gráfico 7.5 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BB com camada de desgaste seca.....	113
Gráfico 7.6 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da via A do Troço 2 (BB), nos anos 2009 e 2014 .....	113
Gráfico 7.7 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da via B do Troço 2 (BB), nos anos 2009 e 2014 .....	114
Gráfico 7.8 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço BB .....	115
Gráfico 7.9 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço 2 (BB), no ano 2009.....	115
Gráfico 7.10 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço 2 (BB), no ano 2014.....	116
Gráfico 7.11 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço BB .....	117
Gráfico 7.12 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço 2 (BB), no ano 2009.....	117
Gráfico 7.13 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço 2 (BB), no ano 2014.....	118
Gráfico 7.14 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço BB .....	119

---

Gráfico 7.15 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço 2 (BB), no ano 2009.....	119
Gráfico 7.16 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço 2 (BB), no ano 2014.....	120
Gráfico 7.17 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da via A do Troço 1 (BBTM), nos anos 2009 e 2014.....	121
Gráfico 7.18 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da via B do Troço 1 (BBTM), nos anos 2009 e 2014.....	121
Gráfico 7.19 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço 1 (BBTM), no ano 2009.....	122
Gráfico 7.20 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço 1 (BBTM), no ano 2014.....	122
Gráfico 7.21 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço 1 (BBTM), no ano 2009.....	123
Gráfico 7.22 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço 1 (BBTM), no ano 2014.....	124
Gráfico 7.23 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço 1 (BBTM), no ano 2009.....	125
Gráfico 7.24 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço 1 (BBTM), no ano 2014.....	125
Gráfico 7.25 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias da do Troço BBD com camada de desgaste nova molhada.....	126
Gráfico 7.26 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BBD com camada de desgaste nova seca.....	127
Gráfico 7.27 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BBD com camada de desgaste velha molhada.....	127
Gráfico 7.28 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BBD com camada de desgaste velha seca.....	128
Gráfico 7.29 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para a via B do Troço BBD.....	128
Gráfico 7.30 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para a via C do Troço BBD.....	129
Gráfico 7.31 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para a via B do Troço BBD.....	130

---

Gráfico 7.32 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para a via C do Troço BBD .....	130
Gráfico 7.33 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para a via B do Troço BBD .....	131
Gráfico 7.34 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para a via C do Troço BBD .....	131
Gráfico 7.35 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da camada de desgaste BBR .....	132
Gráfico 7.36 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para BBR .....	133
Gráfico 7.37 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para BBR .....	133
Gráfico 7.38 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para BBR .....	134
Gráfico 7.39 – Curvas $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da camada de desgaste SMA .....	135
Gráfico 7.40 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para SMA .....	135
Gráfico 7.41 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para SMA .....	136
Gráfico 7.42 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para SMA .....	137
Gráfico 7.43 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em BB .....	138
Gráfico 7.44 – Distâncias de travagem em BB para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 50 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	139
Gráfico 7.45 – Distâncias de travagem em BB para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 90 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	139
Gráfico 7.46 – Distâncias de travagem em BB para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 120 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	140
Gráfico 7.47 – Distâncias de travagem em BB para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 140 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	140

---

Gráfico 7.48 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em BBTM.....	141
Gráfico 7.49 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em BBD .....	143
Gráfico 7.50 – Distâncias de travagem em BBD para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 50 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	143
Gráfico 7.51 – Distâncias de travagem em BBD para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 90 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	144
Gráfico 7.52 – Distâncias de travagem em BBD para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 120 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	144
Gráfico 7.53 – Distâncias de travagem em BBD para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 140 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	145
Gráfico 7.54 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em BBR .....	146
Gráfico 7.55 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em SMA .....	146
Gráfico 7.56 – Distâncias de travagem em SMA para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 50 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	147
Gráfico 7.57 – Distâncias de travagem em SMA para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 90 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	148
Gráfico 7.58 – Distâncias de travagem em SMA para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 120 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	148
Gráfico 7.59 – Distâncias de travagem em SMA para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 140 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada .....	149

## Simbologia

### Abreviaturas

AASHTO	<i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i>
ABS	Sistema anti-bloqueio de travagem
ACAS	Sistema anticolisão de bordo
ACC	Sistema de controlo de cruzeiro adaptivo
ACSurf	<i>Asphalt Concrete for Surface Layers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAS	Sistema de assistência à travagem
BB	Betão Betuminoso Denso
BBD	Betão Betuminoso Drenante
BBTM	<i>Béton Betumineux Très Mince</i> (Betão Betuminoso Muito Delgado)
BBR	Betão Betuminoso Rugoso
BD	Betão Betuminoso em Camada de Desgaste
BS	<i>British Standards</i> (Norma Britânica)
CAL	Coefficiente de Atrito Longitudinal
CAT/CRT	Coefficiente de Atrito Transversal
CEN	Comité Europeu de Normalização
DP	Distância de paragem
DT	Distância de travagem
EBD	Aplicação eletrónica de distribuição da força de travagem
EBS	Sistema de travagem elétrico
EN	<i>European Standards</i> (Norma Europeia)
ETD	<i>Estimated Texture Depth</i>
GN	<i>Grip Number</i>
IFI	<i>International Friction Index</i>
IMTT	Instituto da Mobilidade e dos Transportes
InIR	Instituto de Infraestruturas Rodoviárias
IP	Infraestruturas de Portugal
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JAE	Junta Autónoma de Estradas

LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MPD	<i>Mean Profile Depth</i>
MTD	<i>Mean Texture Depth</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PIARC/AIPCR	<i>Permanent International Association of Road Congress/ Associação Internacional Permanente de Congressos Rodoviários, da Associação Mundial de Estradas</i>
PTV	<i>Pendulum Test Value</i>
UEC	Unidade eletrónica de controlo do sistema ABS
SCRIM	<i>Sideways Force Coefficient Routine Investigation Machine</i>
SMA	<i>Stone Mastic/Matrix Asphalt</i>
SMTD	<i>Sensor Measure Texture Depth</i>

### Letras Latinas

$a, b$	Valores que dependem do tipo de ensaio de macrotextura
$A, B, C$	Constantes de calibração do equipamento de medição de microtextura
$C$	Fator de forma relacionado com a microtextura da superfície do pavimento
$C_1$	Coefficiente de Burckhardt – condicionador do valor máximo da curva de atrito no Modelo de Burckhardt
$C_2$	Coefficiente de Burckhardt – condicionador da forma da curva de atrito no Modelo de Burckhardt
$C_3$	Coefficiente de Burckhardt – condicionador da diferença entre o valor máximo da curva de atrito e o valor para $s=1$ , no Modelo de Burckhardt
$d_1$	Distância percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção-reação do condutor
$d_2$	Distância percorrida durante o tempo de travagem
$d_{crit}$	Distância percorrida em derrapagem
$d_i$	Distância percorrida nas regiões em análise dependente do tipo de veículo
$d_{ótima}$	Distância de travagem ótima
$d_t$	Distância de travagem
$D$	Diâmetro médio do círculo no ensaio de mancha de areia
$E_c$	Energia cinética

---

$F_{60}$	Coefficiente de atrito de referência harmonizado
$F_a$	Força de atrito
$F_{a_{ótima}}$	Força de atrito máxima considerada pelo sistema de travagem
$F_{ap}$	Força de atrito constante ao longo da distância percorrida com rodas bloqueadas
$FR_{60}$	Coefficiente de atrito para uma velocidade de deslizamento de 60 km/h
$FR_S$	Coefficiente de atrito medido pelo equipamento a velocidade de deslizamento $S$
$F_S$	Coefficiente de atrito a qualquer velocidade de deslizamento $S$
$F_X$	Força horizontal
$F_Z$	Força vertical
$g$	Aceleração da gravidade
$G$	Inclinação longitudinal da estrada
$h_w$	Altura de água no pavimento
$k$	Coefficiente que depende da permeabilidade da superfície da camada de desgaste
$m$	Massa do veículo
$n$	Inverso do grau de saturação da superfície da camada de desgaste
$P$	Peso do veículo
$PNG$	Porcentagem do gradiente normalizado
$r_0$	Raio nominal da roda
$r_i$	Coefficiente de atrito ao longo da região em estudo
$r_{eff}$	Raio efetivo da roda
$r_{sta}$	Raio estático da roda
$s$	Razão de deslizamento longitudinal
$s_0$	Limite superior de integração (alvo de controlo inicial de ABS)
$s_t$	Deslizamento total do veículo na travagem
$S$	Velocidade do equipamento de medição de microtextura
$S_p$	Constante de velocidade
$S_{pico}$	Velocidade de deslizamento de pico
$S_{máx}$	Velocidade máxima de deslizamento



---

$t$	Tempo de reação do condutor
$T_X$	Textura superficial (macrotextura)
$V$	Volume do material espalhado no ensaio de mancha de areia (pg. 14)
$V$	Velocidade do movimento livre do pneu (pg. 23)
$V$	Velocidade do veículo (pg. 34)
$V_w$	Velocidade linear do ponto de contato com o solo
$W_{Fa}$	Trabalho da força de atrito
$W_{Fa_i}$	Trabalho da força de atrito nas regiões em análise, dependentes do sistema de travagem
$W_{Fa_{ótima}}$	Trabalho da força de atrito na região ótima
$W_{Fa_p}$	Trabalho da força de atrito com as rodas boqueadas

### Letras Gregas

$\gamma$	Grau de saturação da superfície da camada de desgaste
$\Delta s_t$	Incremento da razão de deslizamento
$\Delta s_i$	Diferença da razão de deslizamento longitudinal na região em estudo e dependendo do veículo
$\omega$	Velocidade angular
$\omega_D$	Velocidade angular da roda
$\lambda$	Coefficiente que depende da permeabilidade da superfície da camada de desgaste
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\mu_0$	Coefficiente de atrito quando a velocidade é nula
$\mu_1$	Coefficiente máximo da curva do Modelo de Burckhardt
$\mu_2$	Coefficiente máximo da curva da Formulação 5 (modelo de interação pneu-pavimento padronizado)
$\mu_3$	Coefficiente máximo da curva da Formulação 1 (modelo de interação pneu-pavimento)
$\mu_P$	Coefficiente de atrito longitudinal de projeto
$\mu_{pico}$	Coefficiente de atrito de pico
$\tau$	Valor característico a estrada
$\tau_m$	Valor característico máximo da estrada



# **1 Introdução**

No presente trabalho, o principal objetivo do estudo é a obtenção de uma metodologia de análise integrada do fenómeno de interação pneu-pavimento, com ênfase na avaliação do atrito pneu-pavimento, que incorpore as características físicas e o estado hídrico das superfícies do pneu e do pavimento.

Este capítulo apresenta o enquadramento do tema da dissertação, os objetivos do trabalho e a estrutura do documento.

## **1.1 Enquadramento Temático**

A História comprova que, da necessidade de uma circulação mais rápida e segura, surgiram as primeiras vias. A grande expansão da rede viária aconteceu durante a expansão do antigo Império Romano, daí a existência de ditados populares como: “Quem tem boca vai a Roma.” e “Todos os caminhos vão dar a Roma.”.

Desde o seu aparecimento, que o objetivo da construção de estradas se baseia na procura de melhores vias de comunicação.

No final do século XVIII, com a invenção do veículo automóvel, as exigências na construção de novas estradas foram cada vez mais elevadas. Tendo em conta o aumento das velocidades, surgiu uma maior necessidade de comodidade e segurança dos utentes das vias.

Nas últimas décadas verificou-se o aumento significativo de tráfego nas estradas em todo o Planeta e, apesar de toda a tecnologia e informação que já existe ao alcance de qualquer pessoa, quem circula de carro nas estradas continua sujeito a muitos riscos, sejam eles devido ao estado do pavimento ou devido à condução imprudente de outras pessoas.

No que diz respeito ao estado do pavimento, no seu dimensionamento as características estruturais são as que têm maior importância, frequentemente desvalorizando as características superficiais, o que leva a que o pavimento apresente degradações nas camadas de desgaste mais rapidamente, diminuindo a segurança e o conforto durante a circulação. De acordo com o estado do pavimento existe uma resposta por parte do pneu do veículo, logo é essencial ter em conta a interação existente entre o pneu e o pavimento.

Atualmente, de forma a garantir que a circulação de veículos é realizada em condições adequadas, tem de se ter em conta fatores como a segurança, o conforto, a economia e ainda o meio ambiente. É incontestável que o estudo das características funcionais dos pavimentos deve passar a ser realizado a nível superficial com a mesma importância em que é realizado

a nível estrutural. Para tal, existem ensaios de caracterização que fornecem os parâmetros intrínsecos do pavimento e os parâmetros de estado necessários, são eles: coeficiente de atrito pneu-pavimento (longitudinal e transversal); microtextura e macrotextura; porosidade; petrografia do agregado constituinte da mistura betuminosa; estado hídrico do contato pneu-pavimento e geometria do contato pneu-pavimento.

## **1.2 Objetivos**

A partir do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), que se baseia em ensaios de caracterização superficial das camadas de desgaste, é possível a aplicação do modelo a camadas de desgaste diferentes daquelas que serviram de base à sua formulação, avaliando a exequibilidade do modelo quando aplicado a essas.

Em 1992, foi realizada uma experiência a nível internacional, pelo Comité de Características de Superfície da PIARC (*Permanent International Association of Road Congress*), atualmente denominada *por World Road Association*, que teve como principal objetivo a uniformização dos resultados obtidos pelos diversos equipamentos e ensaios existentes para a caracterização superficial das camadas de desgaste, tanto a nível de textura como de atrito. Esta uniformização permitiu chegar a correlações entre os diversos equipamentos e à conceção de um índice internacional, designado por IFI (*International Friction Index*), em que o seu cálculo segue a norma ASTM E-1960-98.

Através da análise dos vários estudos que têm sido realizados no que diz respeito à caracterização superficial das camadas de desgaste, optou-se pelo desenvolvimento de um modelo baseado nos mesmos princípios do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), que permita agora a padronização das curvas, de acordo com o índice internacional referido, a aplicar nos modelos matemáticos dos sistemas ABS, avaliando ainda as distâncias de travagem nas diferentes camadas de desgaste, em veículos sem ABS, com ABS e com ABS Modificado.

## **1.3 Estrutura da Tese**

A presente Dissertação encontra-se estruturada por oito Capítulos, em seguida descritos de forma pormenorizada.

Este primeiro, Capítulo 1, de carácter introdutório, onde se expõe o tema da dissertação através de um enquadramento temático e os objetivos alcançados com a realização deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a Constituição e as Características Superficiais de um Pavimento Rodoviário, alguns Equipamentos de Medição da Textura e de Atrito, e ainda, o Procedimento a seguir no cálculo do valor de IFI de acordo com a Norma ASTM E-1960-98.

No Capítulo 3 é abordado o Mecanismo de Interação Pneu-Pavimento mediante a aderência, fazendo referência ao deslizamento horizontal, à hidroplanagem e à influência dos pneus; e ainda, apresenta os diversos Sistemas de Travagem e a Caracterização do Fenómeno de Paragem.

No Capítulo 4 são descritos alguns Modelos Matemáticos existentes que caracterizam o Fenómeno de Interação Pneu-Pavimento.

O Capítulo 5 apresenta a formulação do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), e efetuou-se a aplicação deste modelo às diferentes camadas de desgaste de pavimentos betuminosos.

O Capítulo 6 incide sobre o objetivo principal desta dissertação, onde é apresentado o desenvolvimento das formulações dos Parâmetros de Burckhardt em função do índice internacional (IFI), alcançando assim a Padronização das Curvas do modelo desenvolvido por Silvério (2015).

No Capítulo 7 são apresentadas as Distâncias de Travagem obtidas pelos três sistemas (sem ABS, com ABS e com ABS modificado), considerando o veículo a quatro velocidades de circulação (50, 90, 120 e 140 km/h), nos diferentes tipo de pavimentos, de acordo com o estudo da Formulação de Burckhardt apresentado por Silvério (2015). De forma análoga a esse estudo, foram calculadas as distâncias de travagem considerando as curvas obtidas pelo Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado proposto na presente Dissertação, comparando-as com as distâncias de travagem obtidas pela Formulação de Burckhardt e pela Norma de Traçado em vigor em Portugal.

Para finalizar, o Capítulo 8 apresenta algumas considerações finais acerca do trabalho realizado e são sugeridas algumas propostas relativas ao trabalho possível de desenvolver no futuro.



## 2 Pavimentos Rodoviários

O pavimento “*é a parte da estrada, rua ou pista que suporta diretamente o tráfego e transmite as respectivas solicitações à infraestrutura: terreno, obras de arte, etc. Pode ser constituído por uma ou mais camadas, tendo no caso mais geral uma camada de desgaste e camadas de fundação. Cada uma destas camadas pode ser composta e construídas por várias camadas elementares*” (LNEC, 1962, cit. in Neves, 2009).

O pavimento rodoviário tem como função principal garantir uma superfície de rolamento onde a circulação de veículos é feita com segurança e comodidade, durante o seu período de vida, na presença de ações devidas às ações de tráfego e nas condições climatéricas que sucedam. Para que tal aconteça, o pavimento deve possuir dois tipos de qualidade: qualidade estrutural (capacidade do pavimento de suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações dentro dos limites determinados), e qualidade funcional (capacidade de segurança e conforto de circulação na superfície do pavimento), (Neves, 2009; Videira, 2014).

### 2.1 Constituição de um Pavimento Rodoviário

O pavimento rodoviário é constituído por várias camadas (constituídas por materiais diversificados), ligadas entre si por um ligante de colagem (por norma uma emulsão betuminosa), assentes na fundação do pavimento (pode ser constituída pelo terreno natural ou então solos selecionados). De acordo com o tipo de materiais utilizados na construção das suas camadas e com a sua resposta mecânica, o pavimento pode assumir uma de três classificações existentes: pavimentos flexíveis, rígidos e semirrígidos.

Os pavimentos flexíveis são compostos por uma ou várias camadas formadas por misturas betuminosas, em que os materiais se encontram estabilizados com ligantes betuminosos (geralmente com betume asfáltico), e quando carregados evidenciam a adequada recuperação elástica, o que significa que apresentam alta deformabilidade. Relativamente aos pavimentos semirrígidos, estes contêm uma ou duas camadas superiores formadas por misturas betuminosas, seguidas de uma camada de base em agregado estabilizado com ligante hidráulico que poderá assentar numa sub-base granular, quando carregados revelam reduzida deformabilidade. Já os pavimentos rígidos têm uma ou duas camadas inferiores concebidas em agregados estabilizados, com ou sem ligante hidráulico, e superiormente são

compostos por uma camada de betão de cimento, geralmente cimento Portland<sup>1</sup>, o que não confere grande poder de deformabilidade ao pavimento quando carregado (Branco *et al.*, 2011; Neves, 2009).

Tendo em conta que o estudo apresentado nesta dissertação retrata a realidade em Portugal, interessa analisar os pavimentos flexíveis, uma vez que é o tipo de pavimento rodoviário mais utilizado. Deste tipo de pavimentos, a camada em estudo é a de desgaste, visto ser nesta que se devem garantir as características funcionais do pavimento, apesar de também desempenhar funções estruturais. Na Figura 2.1 está representado um esquema da constituição das várias camadas de um pavimento rodoviário.

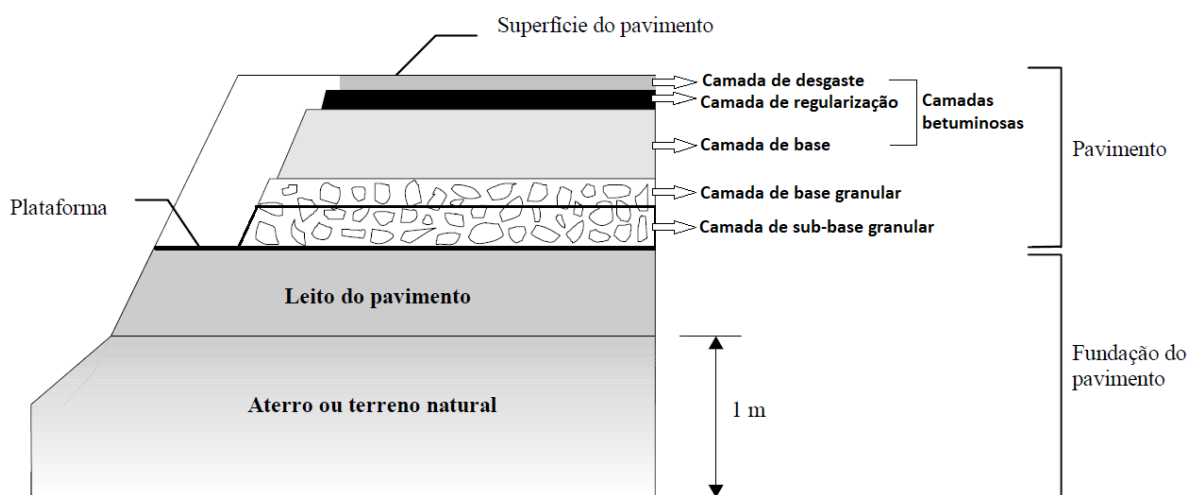


Figura 2.1 – Constituição tipo de um pavimento rodoviário (Adaptado de Neves, 2009)

A camada de desgaste em pavimento flexível pode ser composta por misturas betuminosas fabricadas a quente, misturas betuminosas fabricadas a frio ou temperadas. A maioria das misturas betuminosas a quente, aplicadas atualmente na camada de desgaste, engloba-se na designação Betão Betuminoso (BD; ACSurf), onde esta é uma mistura pouco permeável, mas resistente à ação abrasiva do tráfego, sendo aplicada com uma espessura de 4 a 6 cm. No que diz respeito às misturas betuminosas fabricadas a frio, estas são compostas por agregados aos quais se junta uma emulsão betuminosa (ligante) onde, por vezes, se adicionam água e aditivos, sendo produzidas, espalhadas e compactadas sem aquecimento

<sup>1</sup> O cimento Portland é um cimento artificial obtido por tratamento térmico a alta temperatura (cerca de 1450°C) de misturas de argila (aluminossilicatos hidratados) e calcário (carbonato de cálcio), devidamente proporcionadas e finamente moídas (Silva, 2009).



dos materiais. Por norma, estas misturas aplicam-se em camadas de pavimento onde as solicitações de tráfego não são significativas (Branco *et al.*, 2011).

O pavimento é dimensionado para um determinado período de vida útil, tendo em conta as ações de tráfego e condições climáticas. Porém, com o aumento significativo de tráfego para além do dimensionado e, também, com condições climáticas cada vez mais adversas, tem-se verificado maior degradação a curto prazo na camada de desgaste do pavimento. Como referido, as características funcionais do pavimento devem ser garantidas pela camada de desgaste, para a qual, com o aumento das exigências impostas pelos utentes e pelas condições climáticas, têm sido desenvolvidas várias misturas betuminosas especiais.

As misturas betuminosas em análise no presente estudo, para além do Betão Betuminoso Denso, são: Betão Betuminoso Drenante, Betão Betuminoso Rugoso, *Béton Bitumineux Très Mince* e *Stone Mastic Asphalt*.

O Betão Betuminoso Denso, designado por BB, é uma mistura pouco permeável, mas resistente à ação abrasiva causada pelo tráfego. Como a sua macrotextura apresenta valores baixos, não é aconselhável a aplicação em vias onde a velocidade de circulação seja elevada e em climas chuvosos (Jiménez, 2014; Menezes, 2008; Reis, 2012).

O Betão Betuminoso Drenante, designado por BBD, é uma mistura que apresenta elevada porosidade, aplicada com uma espessura de cerca de 4 cm e que permite que a água que cai sobre o pavimento seja drenada através do interior da camada superficial até as bermas, em vez de ser drenada à superfície como é o normal, permitindo uma circulação em condições molhadas semelhante à circulação em condições secas. Por outro lado, estas misturas apresentam menor resistência ao efeito abrasivo do tráfego e menor durabilidade, lavando a que, com os vários anos de serviço, se dê a colmatagem de vazios (Jiménez, 2014; Menezes, 2008; Reis, 2012).

O Betão Betuminoso Rugoso, designado por BBR, é uma mistura que proporciona excelentes valores de macrotextura, apresentando uma percentagem de material fino maior que em BBD e, portanto, resultando numa maior resistência à ação abrasiva do tráfego (Jiménez, 2014; Menezes, 2008).

O *Béton Bitumineux Très Mince* (betão betuminoso muito delgado), designado por BBTM, é uma mistura desenvolvida em França em meados de 1980, que não acrescenta capacidade estrutural, apenas garante as características superficiais da camada de desgaste, em especial a aderência e absorção acústica. Este garante maior nível de aderência em comparação com a

maioria dos tipos de pavimentos, sendo uma técnica mais utilizada para a manutenção de pavimentos de alto tráfego (Nikolaides, 2015; Reis, 2012).

O *Stone Mastic/Matrix Asphalt* (betume mástique de pedra), designado por SMA, é uma mistura que foi desenvolvida na Alemanha em 1968, caracterizada por conter elevada percentagem de agregados graúdos, formando um elevado volume de vazios que são preenchidos por um mástique asfáltico, composto pela mistura de uma fração grossa (essencialmente material britado), *filler*, ligante asfálticos e fibras de celulose. Este tipo de camada apresenta características de atrito superficial semelhantes a BBD, isto é, apresenta uma textura superficial, de média a rugosa, permitindo boa aderência entre pneu-pavimento e drenabilidade superficial, que resulta em boas condições de segurança aos utentes (Martinho, 2013; Reis, 2012; Kreide *et al.*, 2003).

## 2.2 Características Superficiais dos Pavimentos

As diversas camadas do pavimento rodoviário devem garantir certas características estruturais e funcionais de modo a alcançar a segurança, comodidade e economia de circulação na via. No que diz respeito à segurança, sabe-se que não são apenas as características do traçado que têm relevância, mas também, as características funcionais (ou superficiais), do pavimento. Estas características têm de ser asseguradas nas camadas de desgaste, e são as seguintes (Menezes, 2008):

- ✓ Bom coeficiente de atrito para qualquer condição climatérica (pavimento seco ou molhado);
- ✓ Nível de ruído na interação pneu-pavimento dentro dos limites exigidos;
- ✓ Boas características óticas;
- ✓ Superfície regular para que a circulação se realize em condições de conforto, economia e segurança;
- ✓ Boa macrotextura que permita bom escoamento de águas.

A Figura 2.2 resume a influência das principais características superficiais dos pavimentos na segurança e comodidade dos condutores, bem como no meio ambiente e na economia de circulação e operação.

	Segurança	Conforto	Ambiente	Economia
Aderência	●	○	○	○
Irregularidade Longitudinal	●	●	○	●
Irregularidade Transversal	●	●	○	○
Ruído	○	●	●	○
Visibilidade	●	●	○	●

● Importante  
● Significativa  
● Moderada  
● Fraca  
○ Nula

Figura 2.2 - Influência das características do pavimento na sua utilização (Galp Energia, 2006)

### 2.2.1 Textura Superficial

A textura superficial é determinada pelas irregularidades superficiais apresentadas no pavimento. O domínio da textura varia numa escala em função do comprimento de onda, em milímetros, entre 0 a 50 mm e pode ser do tipo: microtextura, macrotextura e megatextura. Quando a textura se refere a variações geométricas com comprimentos de onda superiores a 50 mm, esta passa a ser tratada em termos de irregularidade superficial longitudinal ou transversal (Meurer-Filho, 2001; Francisco, 2009; Hall *et al*, 2009; Ranazzi, 2016).

A Tabela 2.1 apresenta a classificação da textura superficial de acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Tabela 2.1 – Classificação da textura superficial de acordo com *American Society for Testing and Materials* (Adaptado de ASTM E-867, 1997, *cit. in* Ranazzi, 2016)

Classificação da Textura	Intervalo do Comprimento de Onda	
	Horizontal	Vertical
<b>Microtextura</b>	0 m a 0,5 mm	0 mm a 0,2 mm
<b>Macrotextura</b>	0,5 mm a 50 mm	0,2 mm a 10 mm
<b>Megatextura</b>	50 mm a 500 mm	1 mm a 50 mm
<b>Irregularidade</b>	0,5 m a 50 m	1 mm a 200 mm

A textura da camada de desgaste é a característica mais relevante para a qualidade funcional do pavimento, uma vez que afeta em vários fatores, tais como (Menezes, 2008):

- ✓ “O desenvolvimento das forças de atrito na interação pneu-pavimento quando em condições de pavimento seco ou molhado;
- ✓ Resistência ao movimento que tem influência no consumo de combustível;
- ✓ Desgaste do pneu por micro-deslizamento da borracha na interação pneu-pavimento;
- ✓ No ruído de baixa frequência; tanto dentro como fora do veículo;
- ✓ Nas vibrações transmitidas ao veículo”.

A microtextura é definida como “o conjunto de desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características de comprimento de onda e amplitude menores que 0.5mm”, isto é, a microtextura é a rugosidade da superfície individual dos agregados que compõem o revestimento (ASTM E-867, *cit. in* Francisco, 2009; Hall *et al*, 2009).

A macrotextura é definida como “o conjunto de desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características de comprimento de onda e amplitude que variam de 0.5mm até uma dimensão que não afete a interação pneu-pavimento”, isto é, está relacionada com o tamanho dos agregados, os espaços vazios existentes na superfície do revestimento e a forma geométrica de cada agregado (ASTM E-867, *cit. in* Francisco, 2009; Hall *et al*, 2009).

A megatextura afeta principalmente a nível de ruído e resistência ao movimento provocada pelo atrito pneu-pavimento, relacionado com os desvios do pavimento causados pela formação de rodeiras, buracos, remendos, perda de agregado na superfície e pelas juntas e fissuras de maiores dimensões (Francisco, 2009; Hall *et al*, 2009; Menezes, 2008).

A Figura 2.3 apresenta uma ilustração simplificada que contém os vários tipos de textura referidos anteriormente existentes num pavimento rodoviário.

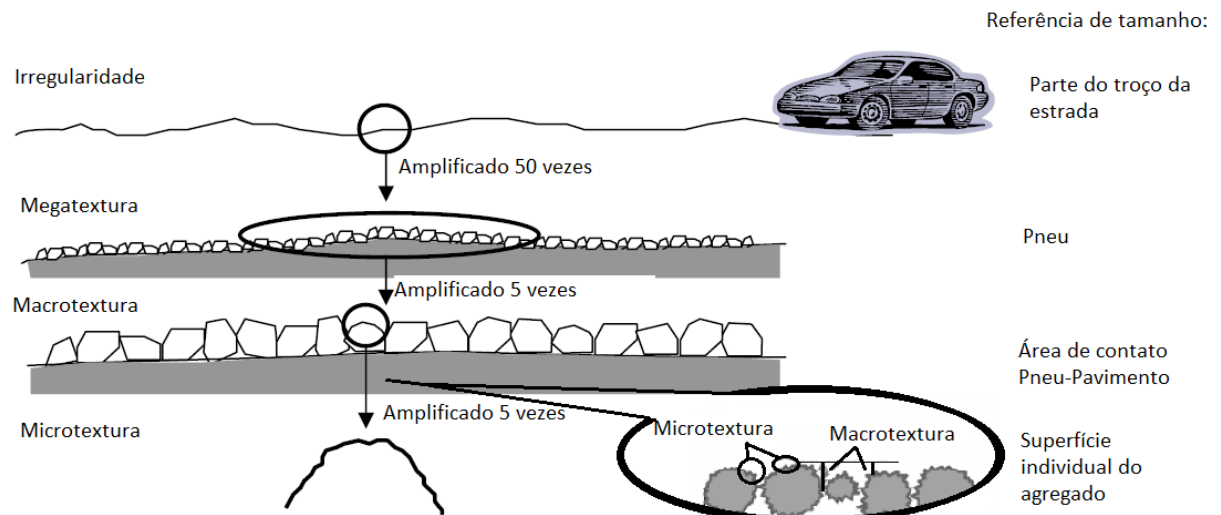


Figura 2.3 – Ilustração dos vários intervalos de textura num determinado pavimento (Adaptado de Hall *et al*, 2009)

O valor da textura superficial de um pavimento pode ser obtido com recurso a diversos métodos. Para o presente estudo, os ensaios foram realizados com recurso a três métodos diferentes:

- ✓ Determinação da profundidade média da textura, à superfície da camada de desgaste, com recurso ao ensaio volumétrico da Mancha de Areia, sendo designada por MTD (*Mean Texture Depth*);
- ✓ Determinação da profundidade média da textura, à superfície da camada de desgaste, com recurso ao equipamento Texturómetro Laser (equipamento de ensaio com raios laser), sendo designada por SMTD (*Sensor Measure Texture Depth*);
- ✓ Determinação da profundidade média da textura, à superfície da camada de desgaste, com recurso ao equipamento SCRIM (equipamento de ensaio com raios laser), sendo designada por MPD (*Mean Profile Depth*).

### **Mancha de Areia**

O ensaio da Mancha de Areia realiza-se segundo a norma europeia EN 13036-1 (2001). A aplicação deste método consiste na colocação de uma quantidade conhecida de esferas de vidro de dimensão normalizada, sobre a superfície seca da camada de desgaste, sendo espalhada de forma circular com recurso a um disco apropriado, preenchendo os espaços vazios. Com o valor do diâmetro da circunferência obtida, através da Equação 2.1, efetua-se a aproximação do valor da profundidade média do material espalhado, designada por MTD:

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (2.1)$$

Onde:

$MTD$  [mm] – Profundidade média da textura superficial;

$V$  [mm<sup>3</sup>] – Volume do material espalhado;

$D$  [mm] – Diâmetro médio do círculo com o espalhamento do material.

### **Perfilômetro Laser**

A utilização de equipamento laser na medição do valor da textura superficial, não só permite efetuar medidas de macrotextura sem interromper o tráfego das estradas, como também que o valor da textura superficial seja obtido em contínuo.

A medição da textura superficial com equipamento laser deve cumprir o procedimento estabelecido pela norma ISO 13473-1 (2019), (InIR, 2010; Freitas *et al*, 2008).

Como já referido, foram utilizados equipamentos laser dos quais se obtiveram valores para a macrotextura de MPD e SMTD. Os resultados obtidos deverão ser aferidos com ensaios de determinação da profundidade média da textura superficial, sendo esses valores designados por ETD (*Estimated Texture Depth*), através das correlações dadas pelas Equações 2.2 e 2.3.

- ✓ Correlação indicada na norma ISO 13473-1 (2019), entre o valor medido MPD e o valor ETD, valor estimado para a profundidade média:

$$ETD = 0,2 + 0,8 \times MPD \text{ (mm)} \quad (2.2)$$

- ✓ Correlação indicada na norma ISO 13473-1 (2019), entre o valor medido SMTD e o valor ETD, valor estimado para a profundidade média:

$$ETD = 0,3 + SMTD \text{ (mm)} \quad (2.3)$$

### **2.2.2 Irregularidade Longitudinal e Transversal**

Quando a textura se refere a variações geométricas com comprimentos de onda superiores a 50mm, esta passa a ser tratada em termos de irregularidade superficial longitudinal ou transversal. A irregularidade de um pavimento é definida como “*o desvio da superfície do pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana com dimensões características que afetam a dinâmica do veículo e a qualidade do rolamento*”, isto é, o desvio da superfície da rodovia com relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica

dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via (ASTM E-867, *cit. in* Francisco, 2009; Menezes, 2008).

A irregularidade do perfil longitudinal é devida a um destes fatores: desnivelamentos da superfície do pavimento em relação ao seu perfil longitudinal ou então a defeitos da superfície do pavimento. A análise desta torna-se complexa uma vez que compreende duas dimensões, em que envolve a variação altimétrica de um perfil ao longo do seu desenvolvimento, isto significa que a irregularidade tem de ser avaliada para um determinado comprimento, e não pontualmente (Menezes, 2008).

A irregularidade do perfil transversal, em geral, trata-se de uma característica que se pode presenciar quando há a existência de rodeiras ao longo da via, que ocorrem devido a assentamentos na zona de passagem de pesados e que evolui ao longo da via do pavimento, dando lugar a rodeiras de pequeno ou de grande raio.

Os efeitos qualitativos da textura e das irregularidades estão representados na Figura 2.4, para diferentes comprimentos de onda (Francisco, 2009; Menezes, 2008).

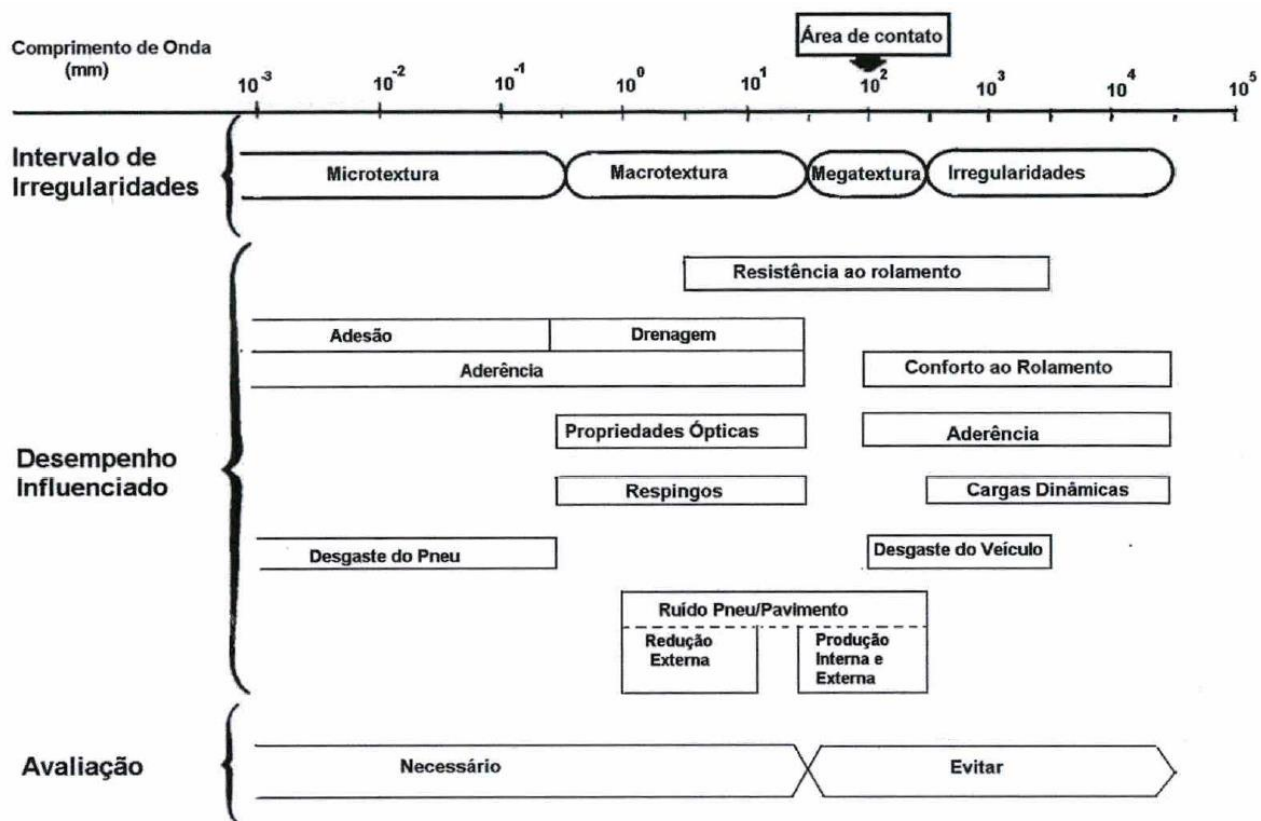


Figura 2.4 - Características de desempenho de pavimento rodoviários em função dos intervalos dos comprimentos de onda da textura superficial (Meurer-Filho, 2001)

### 2.2.3 Atrito

A segurança dos utentes que circulam nas estradas encontra-se altamente associada ao atrito obtido da interação pneu-pavimento na camada de desgaste, isto é, quando um veículo circula num pavimento, a área da superfície do pneu e do pavimento encontram-se em contato e não devem ter deslocamentos entre si. Ao exercer certa manobra ao veículo, às forças obtidas deste contato, irão ocorrer forças que se opõem, levando ao deslizamento do veículo no caso da força de atrito, disponível entre o pneu e a camada de desgaste, ser insuficiente para anular as forças opostas, como acontece, por exemplo, numa situação de travagem. (Meurer-Filho, 2001)

O atrito, como propriedade física da estrada, é medido na camada de desgaste do pavimento, através de equipamentos com determinadas condições padrão, sendo sempre medido na condição mais desfavorável, isto é, quando o piso se encontra molhado, uma vez que a resistência à derrapagem é menor (Menezes, 2008).

Ao longo do tempo o atrito vai evoluindo devido a determinados fatores como (Branco *et al.*, 2011):

- ✓ *“Desgaste mecânico e polimento dos agregados;*
- ✓ *A exsudação na camada de desgaste;*
- ✓ *O aparecimento de discontinuidades devidas ao fendilhamento;*
- ✓ *A redução da porosidade do pavimento devido à densificação da camada de desgaste;*
- ✓ *A existência de rodeiras, provocando a acumulação de água; e a poluição devida ao derrame de combustíveis”.*

O atrito da camada de desgaste pode ser avaliado pela medição do coeficiente de atrito longitudinal, denominado por CAL, que avalia a distância de paragem, ou pela medição do coeficiente de atrito transversal, denominado por CAT, que avalia a segurança da circulação em curva (Menezes, 2008). Estes valores de coeficiente de atrito dependem de fatores como (Silva, 2009):

- ✓ *“Tipo de pneu (constituição, desenho, composição e qualidade da borracha), grau de desgaste, pressão de enchimento e carga por roda;*
- ✓ *Presença de água na camada de desgaste e textura superficial dessa camada;*
- ✓ *Existência de materiais provenientes dos veículos (borracha, etc.), acumulados sobre o pavimento e espessura desses;*



- ✓ *Época do ano (temperatura e pluviosidade);*
- ✓ *Velocidade de circulação;*
- ✓ *Pavimento Rodoviário”.*

O valor de atrito da camada de desgaste pode ser obtido com recurso a diversos equipamentos. Para o presente estudo, os ensaios foram realizados com recurso a três métodos diferentes:

- ✓ Medição pontual do coeficiente de atrito no pavimento sem utilização de pneu, denominado por PTV, obtido pelo ensaio do Pêndulo Britânico;
- ✓ Medição do coeficiente de atrito longitudinal em contínuo com o pneu parcialmente bloqueado (este avalia a distância de travagem), denominado por CAL, obtido pelo equipamento *GripTester*;
- ✓ Medição do coeficiente de atrito transversal em contínuo com o pneu livre (este avalia a segurança na circulação em curva), denominado por CAT, obtido pelo equipamento SCRIM.

### **Pêndulo Britânico**

O pêndulo britânico é um equipamento portátil que permite estudar as características de atrito da camada de desgaste. Este ensaio é definido como “*uma medição localizada do coeficiente de atrito cinemático através da avaliação da energia cinemática absorvida por atrito quando uma superfície de borracha do pêndulo desliza sobre o pavimento, ou sobre uma amostra do material em estudo*” (Branco *et al*, 2011).

O valor do coeficiente de atrito medido é denominado por PTV (*Pendulum Test Value*), e representa, indiretamente, o atrito (transversal), entre o pneu e o pavimento. O equipamento pode ser utilizado em laboratório, ou em ensaios de campo, e o ensaio é realizado de acordo com a norma europeia EN 13036-4 (2011).

### **GripTester**

O GripTester é um equipamento de medição em contínuo do coeficiente de atrito longitudinal, através de uma roda parcialmente bloqueada de deslizamento fixo, pela norma CEN/TS 15901-7 (2009). O equipamento é constituído por um reboque com três rodas, sendo que o coeficiente de atrito, também denominado de GN (*Grip Number*), é medido relativamente à roda central. Esta roda central tem um pneu liso e um sistema de transmissão que a bloqueia parcialmente com uma taxa de 15% em relação à rotação das restantes rodas

do aparelho. O ensaio é realizado em condições molhadas e consiste na medição das forças horizontais e verticais que são exercidas no pneu, quando este se desloca sobre um pavimento (em condições normalizadas relativamente à velocidade e espessura da película da água), (Menezes, 2008).

#### **Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine – SCRIM**

O SCRIM é um equipamento de medição em contínuo do coeficiente de atrito transversal, através de rodas com determinado ângulo em relação ao sentido de deslocamento do equipamento, de acordo com a norma britânica BS 7941-1(2006).

A roda do ensaio tem pneu liso de dureza normalizada e está localizada a meio do veículo, sendo aplicada com determinada carga normalizada e com um ângulo de 20° em relação ao eixo longitudinal do veículo. Também é um ensaio realizado em condições molhadas, em que o controle é feito de modo a proporcionar uma película de água de 0,5 a 2 mm de espessura nominal (Couchinho, 2011).

#### **2.2.4 International Friction Index (IFI) – Cálculo do Valor de IFI de Acordo com o Procedimento ASTM**

O Índice Internacional de Atrito, designado por IFI, é um índice determinado em função dos valores da textura e de atrito, que permite avaliar a resistência à derrapagem, tendo como base o modelo apresentado na Figura 2.5. Este índice foi desenvolvido a partir de uma experiência internacional de comparação e harmonização de métodos de medidas de textura e atrito dos pavimentos, sob a responsabilidade do Comité de Características de Superfície da PIARC. Esta experiência foi realizada em estradas abertas ao tráfego, obtendo uma boa representação de dados sobre a textura, atrito, desgaste e polimento da superfície, e que permitiu correlacionar a textura e o atrito do pavimento (Aps, 2006; Ferreira, 2016; Wambold *et al*, 1995).

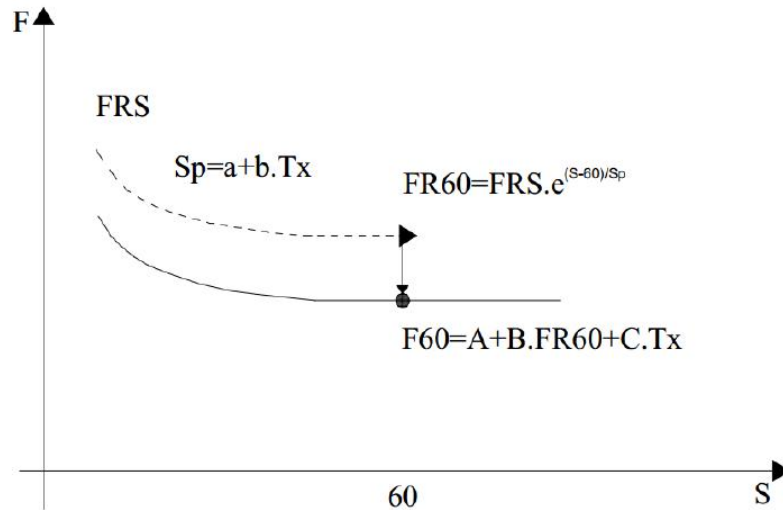


Figura 2.5 – Modelo para determinação do IFI (Adaptado de PIARC/AIPCR, 2003)

Para a determinação de IFI, com recurso a qualquer um dos equipamentos contemplados pela norma ASTM E-1960 (2015), a primeira etapa consiste na realização de ensaios de textura e atrito na camada de desgaste, obtendo os valores de  $T_X$  e  $FR_S$ , respetivamente.

A constante de velocidade de referência,  $S_p$ , é dada pela Equação 2.4 e as constantes  $a$  e  $b$  são valores que dependem do ensaio de medição da textura realizado. De seguida efetua-se o ajuste do valor do coeficiente de atrito,  $FR_S$ , que foi obtido de acordo com a velocidade do equipamento,  $S$ , para a velocidade de referência de 60 km/h, dado pela Equação 2.5, obtendo-se o coeficiente de atrito convertido para a velocidade de 60 km/h, designado por  $FR_{60}$ .

$$S_p = a + b \times T_X \quad (2.4)$$

$$FR_{60} = FR_S \times e^{\left(\frac{S-60}{S_p}\right)} \quad (2.5)$$

Onde:

$S_p$  [km/h] – Constante de velocidade;

$a, b$  – Valores que dependem do tipo de ensaio de medição de textura (Tabela 2.3);

$T_X$  [mm] – Textura superficial;

$FR_{60}$  [adimensional] – Coeficiente de atrito para uma velocidade de deslizamento de 60 km/h;

$FR_S$  [adimensional] – Coeficiente de atrito medido pelo equipamento a uma velocidade de deslizamento  $S$ ;

$S$  [km/h] – Velocidade do equipamento de medição de atrito (Tabela 2.4).

A última etapa desta harmonização passa por estimar o coeficiente de atrito harmonizado à velocidade de referência de 60 km/h,  $F_{60}$ , na curva de referência, através da regressão linear dada pela Equação 2.6, onde as constantes  $A$ ,  $B$  e  $C$  são constantes de calibração do equipamento utilizado na medição do atrito.

$$F_{60} = A + B \times FR_{60} + C \times T_X \quad (2.6)$$

Onde:

$F_{60}$  [adimensional] – Coeficiente de atrito de referência harmonizado;

$A, B, C$  – Constantes de calibração do equipamento de medição de atrito (Tabela 2.4);

$FR_{60}$  [adimensional] – Coeficiente de atrito para uma velocidade de deslizamento de 60 km/h (Equação 2.5);

$T_X$  [mm] – Textura superficial.

No estudo conduzido por Fuentes *et al.* (2012), que teve como objetivo identificar as limitações do modelo de IFI, mais concretamente no que diz respeito à sensibilidade do parâmetro da constante de velocidade,  $S_p$ , com a macrotextura, os autores concluíram que este parâmetro não se correlacionava em pavimentos cuja textura superficial apresentava valores superiores a 1,50 mm.

A Tabela 2.2 apresenta a classificação e os intervalos de variação do valor de IFI, de acordo com a qualificação proposta por Aps (2006).

Tabela 2.2 – Classificação do valor de IFI de acordo com a proposta de Aps (2006)

<b>Classificação</b>	<b>Valor de IFI (<math>F_{60}</math>)</b>
<b>Péssimo</b>	< 0,05
<b>Muito ruim</b>	0,06 a 0,08
<b>Ruim</b>	0,09 a 0,11
<b>Regular</b>	0,12 a 0,14
<b>Bom</b>	0,15 a 0,21
<b>Muito bom</b>	0,22 a 0,35
<b>Ótimo</b>	>0,35

A Tabela 2.3 apresenta os valores de  $a$  e  $b$  a ter em consideração de acordo com o ensaio de medição da textura superficial utilizado e, a Tabela 2.4 apresenta os valores de calibração

dos equipamentos utilizados na medição de atrito, abordados na presente dissertação (a tabela completa relativa aos valores de calibração dos equipamentos encontra-se disponível na Tabela G.I do Anexo G).

Tabela 2.3 – Valores de  $a$  e  $b$  a considerar no cálculo de  $S_p$  (Aps, 2006)

<b>Norma</b>	<b>Ensaio</b>	<b><math>a</math></b>	<b><math>b</math></b>
<b>ASTM E-1845</b>	<b>Perfilómetro laser</b>	14,2	89,7
<b>ASTM E-965</b>	<b>Mancha de areia</b>	-11,6	113,6

Tabela 2.4 – Valores de  $S$  e  $A, B, C$  a considerar no cálculo de  $FR_{60}$  e  $F_{60}$  (Aps, 2006)

<b>Caraterísticas</b>	<b>Equipamento</b>	<b>S</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Roda parcialmente bloqueada</b>	<b>GripTester</b>	9,4	0,082	0,910	0
<b>Roda oblíqua</b>	<b>SCRIM (F)</b>	20,5	-0,006	0,866	0
<b>Estático</b>	<b>Pêndulo Britânico (UK)</b>	10	0,056	0,008	0



### 3 Mecanismos de Interação Pneu-Pavimento

Neste capítulo são abordados os mecanismos de interação entre o veículo e o pavimento através da aderência alcançada essencialmente pelo atrito da camada superficial, e os sistemas de segurança ativa integrados nos veículos nos dias de hoje.

#### 3.1 Aderência Pneu-Pavimento

A aderência existente entre o pneu e o pavimento é a característica mais importante quando se aborda a questão da segurança dos utentes das vias de circulação. É graças a esta que se garante a resistência à derrapagem necessária para que o veículo conserve a sua trajetória durante a realização de manobras.

O coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento é composto por duas partes, o atrito que ocorre devido à adesão e o atrito devido à perda por histerese, ambas relacionadas com a velocidade, há ainda autores que consideram também o atrito devido ao desgaste da banda de rodagem. A adesão encontra-se relacionada com a atração molecular existente entre a borracha do pneu e o agregado do pavimento da estrada, enquanto que a histerese está relacionada com a deformação cíclica da superfície do pneu causada pela macrotextura do pavimento. Relativamente ao desgaste da banda de rodagem, este ocorre devido à desagregação de partículas do pneu na superfície em contacto com o pavimento (Lugão, 2008; Wilson, 2006).

Na Figura 3.1 encontram-se ilustradas as componentes de atrito devido à adesão e à histerese.

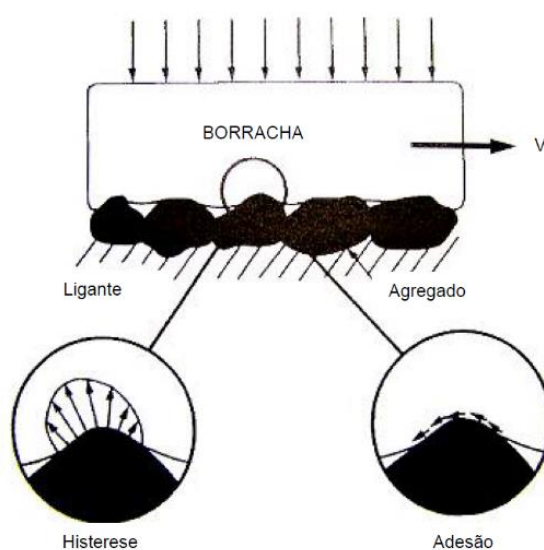


Figura 3.1 – Mecanismos de forças de atrito (Lugão, 2008)

Quando se verifica a presença de uma película de água no pavimento, embora o pneu tenda a comprimir a água para fora da superfície de contacto, no caso da adesão, o processo fica incompleto uma vez que as ligações moleculares apenas se dão quando a microtextura se projeta para além dessa película de água, resultando numa redução significativa da adesão e consequente redução do atrito disponível. Visto que as perdas por histerese não são muito afetadas na presença de água na superfície, especialmente quando os pneus são compostos por borrachas de alto valor de histerese (proporcionando grande atração em superfícies molhadas), então a componente de histerese é a mais significativa na resistência à derrapagem em pavimento molhado (Lugão, 2008; Wilson, 2006).

Os fatores que influenciam a aderência, relativos ao pavimento, são a textura superficial e o atrito pneu-pavimento, no que diz respeito ao pneus tem-se o grau de desgaste, a pressão de enchimento, o tipo de pneu (constituição, composição e qualidade de borracha), tem-se ainda outros fatores como a velocidade de circulação, a presença de uma película de água e a sua espessura no pavimento, a presença de outros contaminantes no pavimento e a época do ano (Lugão, 2008; Pinto, 2003; Silva, 2009).

Em Portugal, a Estradas de Portugal (EP) e a BRISA estipulam, nos seus cadernos de encargos, valores mínimos para a macrotextura e para a resistência à derrapagem, para as novas estradas. No que diz respeito às estradas em exploração, os requisitos de qualidade estão relacionados com os sistemas de gestão de pavimentos adotados e que, no caso de estradas concessionadas, fazem parte do contrato de concessão (Silvério, 2015).

### **3.2 Deslizamento Longitudinal e Dinâmica do Veículo**

As ações do condutor resultam em reações do veículo, que atuam de novo sobre o condutor, forçando-o a tomar novas medidas na condução. O condutor está ainda sujeito a outras perturbações durante a condução relacionadas com a geometria da estrada, características do pavimento e condições meteorológicas.

Durante o movimento do veículo, são transmitidas, entre o pneu e o pavimento, forças normais à superfície da estrada (forças verticais) e forças paralelas (forças horizontais). As forças horizontais podem ainda ser projetadas na direção paralela ao percurso do deslocamento (direção tangencial) ou na direção perpendicular ao percurso (direção radial). Quando o condutor aplica os travões, a velocidade angular,  $\omega$ , adquirida pelas rodas, diverge da velocidade do veículo. A diferença que se obtém designa-se por deslizamento longitudinal,  $s$ , e é dado pela Equação 3.1 (Silvério, 2015).



$$s = \frac{V - V_w}{V} = \frac{V - \omega_D \times r_{eff}}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

$s$  – Deslizamento longitudinal;

$V$  [m/s] – Velocidade do movimento livre do pneu;

$V_w$  [m/s] – Velocidade linear do ponto de contacto com o solo;

$\omega_D$  [rad/s] – Velocidade angular da roda;

$r_{eff}$  [m] – Raio efetivo da roda.

Na Figura 3.2 encontra-se representado o desenvolvimento da força vertical, da força longitudinal, o deslizamento e a velocidade angular do pneu na travagem (onde  $\omega \neq 0$ ), verificando-se que existem três tipo de raios a considerar (Almeida, 2013):

$r_o$  – Raio nominal: corresponde ao raio do pneu sem carga vertical;

$r_{sta}$  – Raio estático: corresponde ao raio do pneu com carga vertical;

$r_{eff}$  – Raio efetivo ou raio de rolamento, que pode ser obtido pela relação (Castro, 2008):

$$r_{eff} = r_o - \left( \frac{r_o - r_{sta}}{3} \right)$$

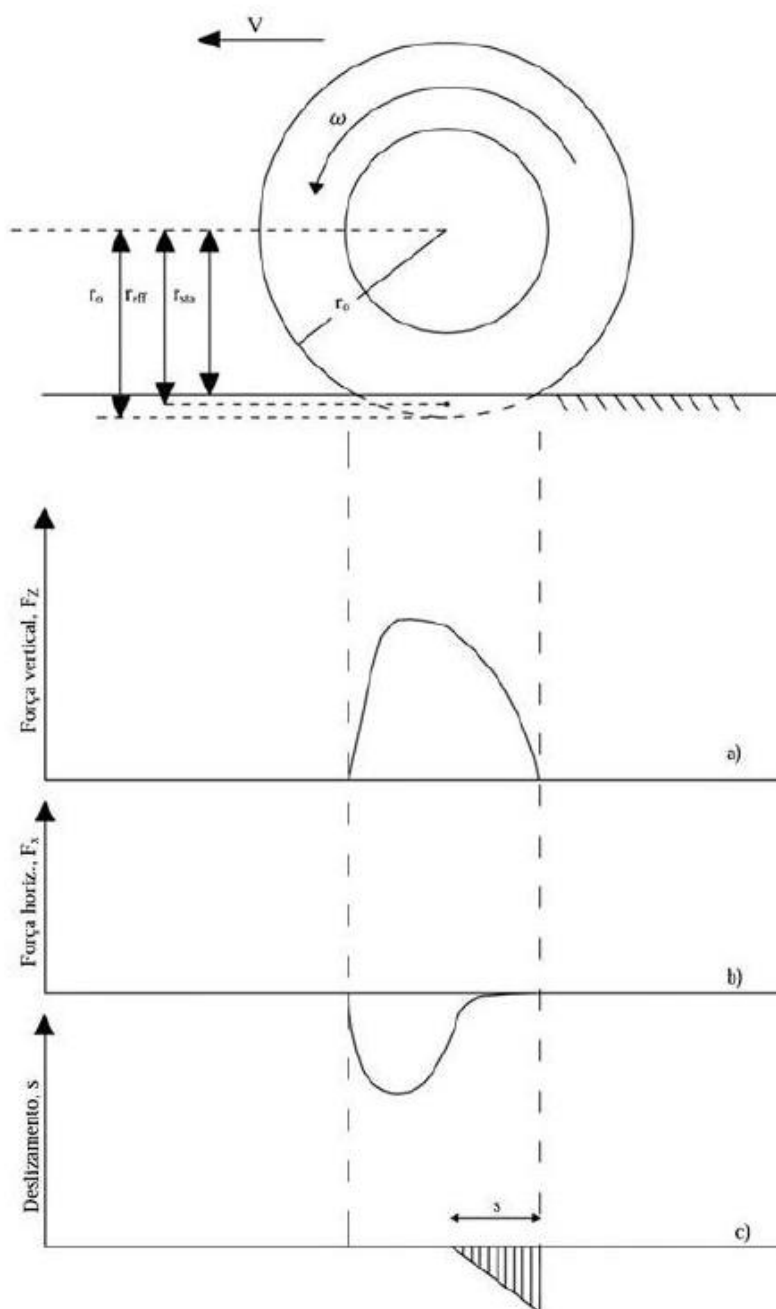


Figura 3.2 – Estrutura de deformação de pneu, raios respetivos e forças na interação com o pavimento (Silvério, 2015)

Observando o desenvolvimento da força vertical (Figura 3.2-a), verifica-se que esta aumenta ao longo da área de contacto entre o pneu e o pavimento e, devido à pressão de travagem exercida, esta é máxima num ponto pouco à frente do centro da roda. Já a força horizontal (Figura 3.2-b), diminui até atingir um limite a partir do qual a força vertical diminui e o pneu entra em deslizamento (Figura 3.2-c).

A partir do início da travagem, desenvolve-se uma força de tração na superfície do pneu que provoca o deslizamento longitudinal sobre o pavimento. Na Figura 3.3 encontram-se ilustradas as curvas de coeficiente de atrito,  $\mu$ , versus deslizamento longitudinal,  $s$ , provocadas pela travagem. Pela observação das curvas  $\mu$ - $s$ , é evidente que o coeficiente de atrito aumenta linearmente (a roda encontra-se em rolamento livre), até atingir um valor máximo numa faixa de deslizamento que varia entre 10 a 25%, e a partir do valor máximo o coeficiente de atrito decresce, devido à condição instável do veículo, até ao valor designado por coeficiente de atrito de deslizamento crítico,  $\mu_{crit}$ , onde a roda fica totalmente bloqueada (Silva, 2008).

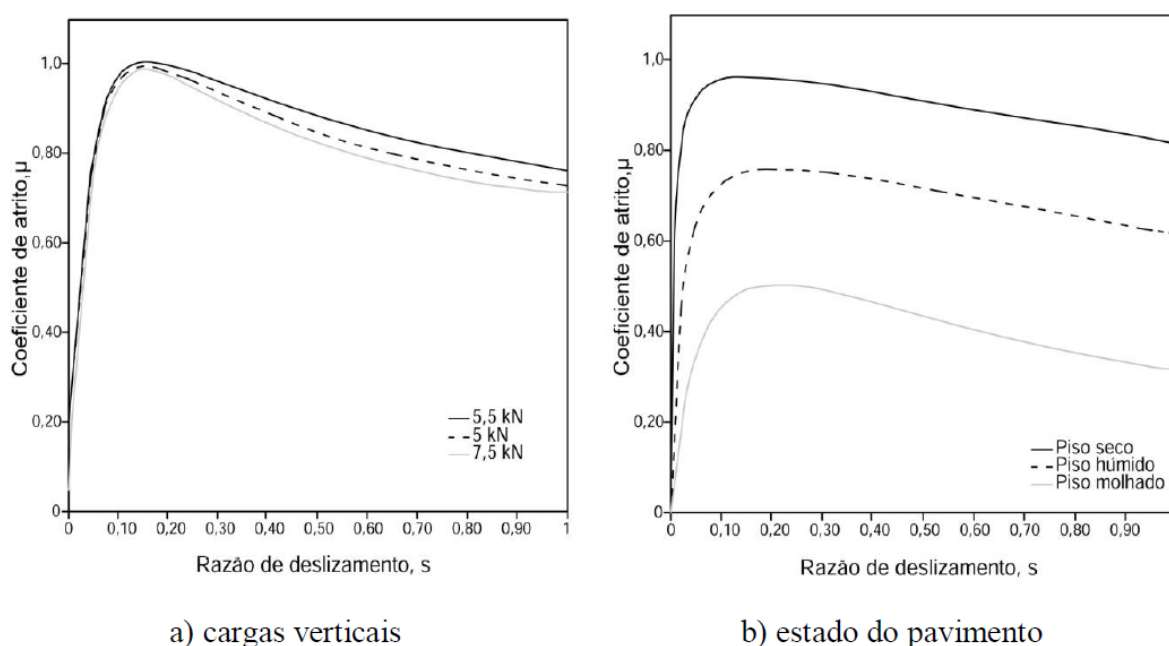


Figura 3.3 – Coeficiente de atrito em função das cargas verticais e do estado do pavimento (Silvério, 2015)

De acordo com a Figura 3.3-a, que apresenta a influência da variação do peso do veículo no comportamento das curvas  $\mu$ - $s$ , verifica-se que os valores do coeficiente de atrito obtidos são semelhantes para as diferentes cargas, pelo que se conclui que o valor do coeficiente de atrito é independente do valor da carga. Já o mesmo não se pode dizer acerca do estado do pavimento (Figura 3.3-b), que influencia bastante os valores obtidos para o coeficiente de atrito. Então, para uma utilização ótima de um sistema de travagem, este deverá fornecer um valor de coeficiente de atrito máximo durante o maior período possível, de modo a que se possa estabilizar o veículo e garantir assim uma menor distância de travagem. O sistema que garante esta condição, e atualmente o mais utilizado, é o sistema ABS (Silvério, 2015).

### 3.3 Hidroplanagem

A hidroplanagem é um fenómeno que ocorre quando os pneus perdem total contacto com o pavimento devido à presença de uma lâmina de água, isto é, os pneus deixam de rodar sobre a superfície do pavimento devido à descontinuidade pneu-pavimento, e passam a flutuar e a escorregar (Soares, 2011).

Como referido anteriormente, na presença de uma película de água a componente da força de atrito devido à adesão é praticamente inexistente, reduzindo o valor de atrito disponível no pavimento para um valor insuficiente de manter a roda a girar.

A hidroplanagem pode ser classificada em quatro tipos: viscosa, dinâmica, com desvulcanização e real/combinada.

Hidroplanagem viscosa: ocorre para velocidades relativamente baixas e é devida ao efeito da viscosidade da água se opor a sua expulsão na área de contacto entre o pneu e o pavimento (Rodrigues-Filho, 2006, *cit. in* Lugão, 2008).

Hidroplanagem dinâmica: ocorre quando existe uma espessa camada de água sobre o pavimento, em que o pneu do veículo desloca a água para a frente e para os lados na tentativa de estabelecer o contacto com o pavimento, mas forma-se uma pressão de intensidade correspondente ao impulso transmitido pelo pneu à água. Esta pressão (proporcional ao quadrado da velocidade da roda e à densidade da água), deforma o pneu de tal forma que as porções de água subsequentes são capazes de penetrar na área de contacto entre o pneu e o pavimento, sustentado parcialmente a carga vertical do pneu (Rodrigues-Filho, 2006, *cit. in* Lugão, 2008).

Hidroplanagem com desvulcanização: ocorre quando a velocidade de deslocamento de um veículo é superior à velocidade de hidroplanagem devido à rotação inexistente e à macrot textura do pavimento. A borracha na área de contacto fica sujeita a repetidas deformações locais, como o pneu possui propriedades viscoelásticas, este sobreaquece na área de contacto (Rodrigues-Filho, 2006, *cit. in* Lugão, 2008).

Finalmente, hidroplanagem real/combinada, em que ocorrem os fenómenos da hidroplanagem dinâmica e viscosa ao mesmo tempo. Através de pesquisas realizadas pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), mostrou-se que a área de contacto entre o pneu e o pavimento pode ser dividida em três zonas distintas, como exemplificado na Figura 3.4, onde:

- ✓ Zona 1: zona onde não existe contacto devido à presença de uma espessura considerável de água (hidroplanagem dinâmica);
- ✓ Zona 2: zona em que foi eliminada a maior parte da água presente no pavimento, ficando apenas uma película fina de água (hidroplanagem viscosa);
- ✓ Zona 3: zona teoricamente seca, em que o atrito contribui com maior intensidade na desaceleração e controle direcional do veículo.

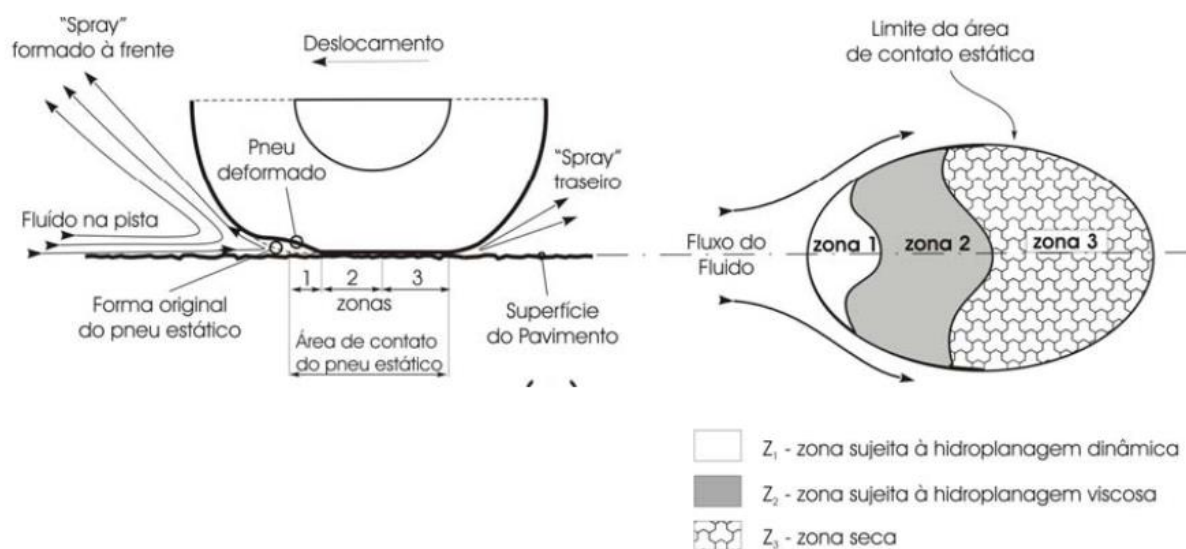


Figura 3.4 – Zonas de interação pneu-pavimento com piso molhado (Lugão, 2008)

### 3.4 Influência dos Pneus

Na resistência à derrapagem é ainda necessário considerar a parte que o pneu contribui na interação pneu-pavimento, sendo que para maiores velocidades, elevadas espessuras de películas de água, baixos valores de microtextura e macrotextura ou manobras bruscas, a probabilidade de o veículo derrapar é maior. Com a disponibilidade de tecnologias cada vez mais inovadoras, é possível desenvolver pneus que melhor se adaptam a cada tipo de veículo e que permitem a circulação com maiores velocidades, garantindo o conforto do condutor e proporcionando a melhor absorção ao choque, transferência de carga e de tração (Wilson, 2006).

Como se pode observar na Figura 3.5, o pneu é dividido em sete partes, mas a maior parte da força aplicada pelo solo ao pneu é absorvida pela compressão do ar no interior do pneu. A parte do pneu que entra em contacto com a superfície do pavimento é o piso, no qual

existem padrões baseados em nervuras em forma de circunferência e que são separadas por ranhuras grandes o suficiente de modo a acomodar a água que é deslocada, de modo a que não se desenvolva uma pressão hidrostática entre a superfície do piso e do pavimento. Existem algumas funcionalidades que devem ser garantidas pelo pneu, tais como: a capacidade de transportar carga, a transmissão da força de propulsão do motor, a absorção das irregularidades de estrada, a capacidade de travagem, a aderência, a resistência a furos, entre outras.

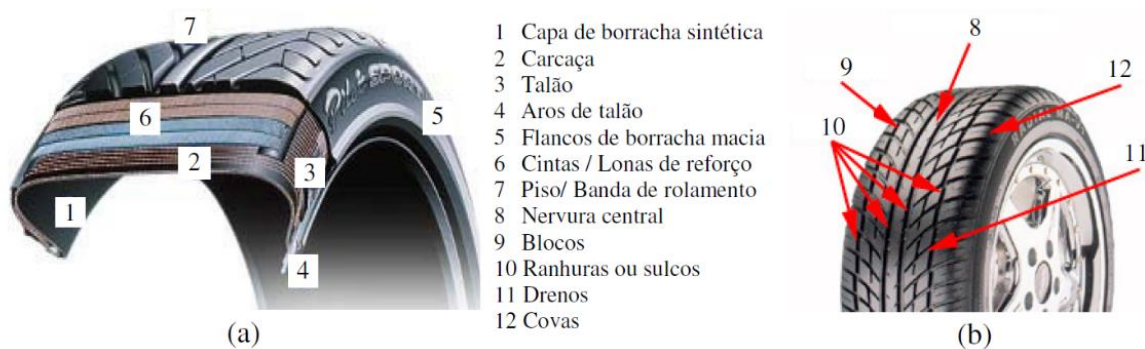


Figura 3.5 – Constituição do pneu (a) e constituição do piso do pneu (b), (Freitas *et al.*, 2007)

A tração originada entre o pneu e o pavimento é influenciada pelo tipo de borracha do pneu e esta depende da estrutura e das propriedades químicas. No caso de borrachas macias, o valor de atrito atingido é maior do que numa borracha mais dura. No entanto, quando se circula a grandes velocidades e na presença de água, o pneu com borracha mais dura é o que apresenta maior resistência à deformação elástica e, conseqüentemente, proporciona maiores valores de atrito (Silvério, 2015).

### 3.5 Mecanismos Ativos de Controle de Travagem e Estabilidade

A segurança rodoviária atualmente não depende unicamente das ações do condutor durante a circulação nas vias. Graças ao avanço tecnológico, vai depender também do recurso aos sistemas inteligentes disponíveis.

Os sistemas que garantem essencialmente a proteção dos ocupantes dos veículos no caso de acidentes, incluindo situações de colisão e capotamento, são os sistemas de segurança passiva. Estes sistemas dividem-se em sistemas primários, que englobam o cinto de segurança e encosto da cabeça, e em sistemas de retenção secundários, que englobam o sistema de pretensão dos cintos de segurança, os “airbags”, os sistemas de retenção infantil

e as estruturas com deformação progressivas (carroçaria que é deformável por um lado e resistente por outro), (IMTT (b)).

Entretanto surgiram sistemas que auxiliam o condutor, são designados por sistemas de segurança ativa e têm como finalidade a prevenção de acidentes, atuando antes do acidente ocorrer. Estes sistemas são constituídos por: sistema de travagem anti-bloqueio (ABS), direção frontal ativa (AFS), sensores e câmara de vídeo.

### **3.5.1 Sistema Anti-Bloqueio de Travagem (ABS)**

O sistema de ABS, por ser utilizado noutros sistemas de segurança ativa, é um sistema de grande importância. A função do sistema ABS não é única, isto é, este evita o bloqueio das rodas preservando a capacidade do pneu de produzir uma força lateral que permite a manobrabilidade do veículo, e também mantém a força de travagem próxima do máximo resultando numa menor distância de travagem (Hoàng, 2014).

O desenvolvimento do sistema ABS teve como base o princípio físico de que o atrito estático (aderência da roda ao piso), é sempre maior que o atrito cinético (existe derrapagem entre as superfícies em contacto). Como se pode observar pela Figura 3.6, que apresenta a constituição do sistema ABS, este baseia-se num conjunto de sensores de movimento junto às rodas. Estes sensores têm como finalidade transmitir a informação acerca do número de rotações de cada uma das rodas, à unidade eletrónica de controlo (UEC), a partir do qual é possível saber a velocidade do veículo (Silvério, 2015).

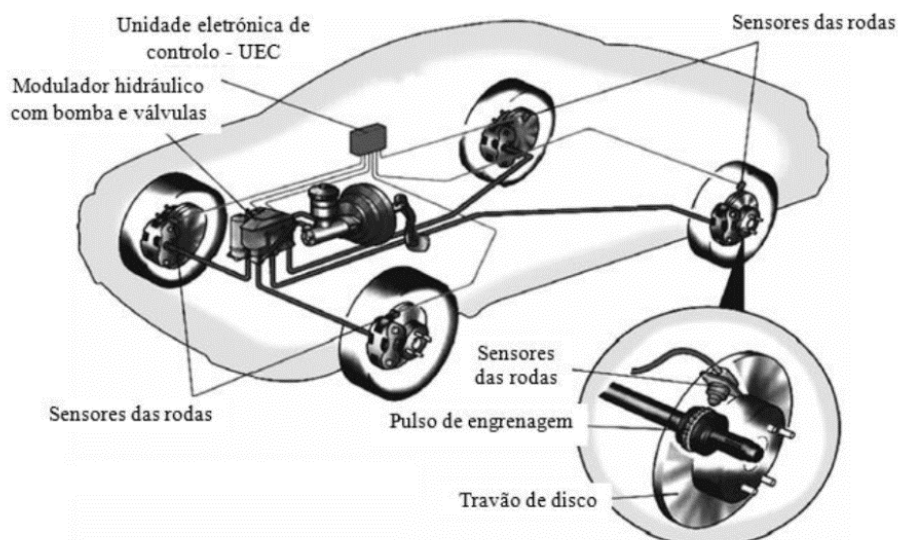


Figura 3.6 – Distribuição dos componentes de um sistema ABS num automóvel (Silvério, 2015)

O sistema atua quando a diferença de velocidade de rotação da roda, entre dois instantes consecutivos, é superior a um valor pré-estabelecido (memorizado na UEC), ativando as válvulas de controlo de pressão, regulando a pressão de travagem e evitando o bloqueio da roda. Este sistema permite que a força de travagem possa ser libertada várias vezes por segundo, até baixar a velocidade do veículo para um valor inferior a um valor pré-definido (IMTT (a)).

Muitos têm sido os algoritmos propostos para o sistema ABS, na sua maioria baseados no deslizamento longitudinal da roda, muitas vezes fundamentados em expressões matemáticas e que funcionam mesmo sem a definição de um ponto máximo de deslizamento das rodas. A Figura 3.7 apresenta a relação entre o deslizamento da roda e o coeficiente de atrito em diversos tipos de pavimento.



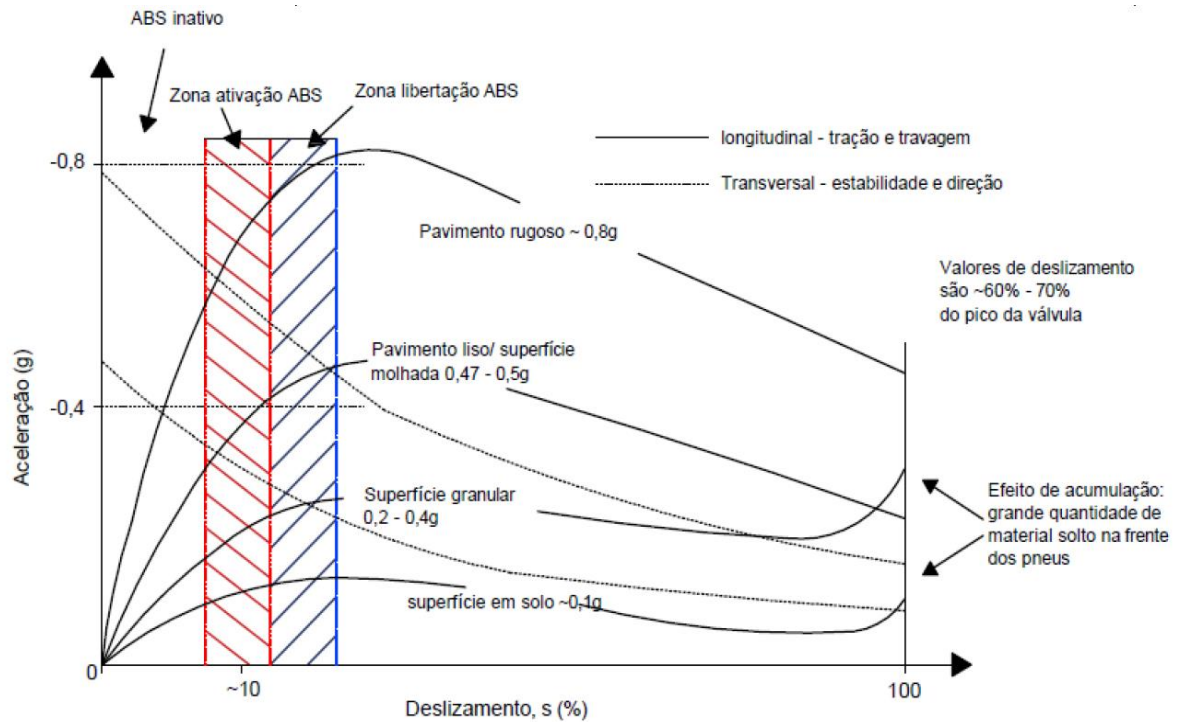


Figura 3.7 – Relação entre o coeficiente de atrito e deslizamento da roda no funcionamento do ABS. (Silvério, 2015)

As forças longitudinais e transversais que são transmitidas ao pavimento, podem ser reduzidas por: redução do atrito do pavimento, redução do atrito do pneu ou redução da pressão de contacto. O deslizamento da roda é considerado 0%, no caso em que a roda gira livremente, e 100%, no caso em que a roda se encontra totalmente bloqueada. Como se pode observar, a força de travagem será máxima para um deslizamento da roda entre 10 a 30%, e o coeficiente de atrito aumenta com a acumulação de material solto na frente do pneu (Aly *et al.*, 2011).

A eficácia do sistema ABS em evitar que os acidentes se deem nem sempre é a pretendida. Por um lado, tem-se que a capacidade de imobilização do veículo está limitada fisicamente ao coeficiente de atrito disponível e à resistência dos travões ao sobreaquecimento. Por outro, tem-se fatores que dependem dos restantes utilizadores que circulam na estrada, que podem não ter este tipo de sistema no veículo e/ou não cumpram a devida distância de segurança (IMTT (a)).

### 3.5.2 Nova Abordagem para o Sistema Anti-Bloqueio de Travagem (ABS modificado)

O desenvolvimento desta abordagem do sistema ABS advém do facto da unidade de controlo automática desconhecer a proporção ideal de deslizamento e o coeficiente de atrito máximo da estrada no início da travagem. Wang *et al.* (2014), desenvolveram uma abordagem que permitisse o reconhecimento da superfície da estrada através do “valor caraterístico da estrada”.

Partindo da integração das curvas do modelo de Burckhardt (apresentado no Subcapítulo 4.3), para uma razão de deslizamento pré-definida de 17% foi aplicada a Equação 3.2, determinando assim o índice de caraterização dos diversos tipos de pavimento, designado como “valor caraterístico da estrada”.

$$\tau = \int_0^{s_0} \mu ds \quad (3.2)$$

Onde:

$\tau$  – Valor caraterístico da estrada;

$s_0$  – Limite superior de integração (alvo de controlo inicial do controlador de ABS);

$s$  – Razão de deslizamento longitudinal;

$\mu$  – Coeficiente de atrito da estrada.

Este modelo de Wang *et al.* (2014), considera apenas a força de atrito longitudinal, logo o coeficiente de atrito da estrada é definido como a razão da força longitudinal normalizada do pneu,  $F_x$ , pela força normal,  $F_z$ , como se pode verificar na Figura 3.8.

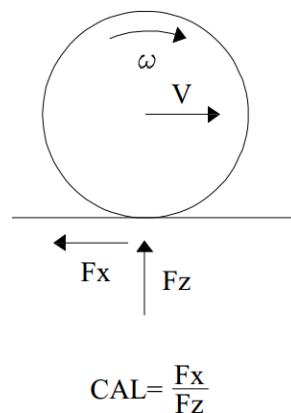


Figura 3.8 – Coeficiente de atrito longitudinal (Silvério, 2015)

Com este sistema, ao aplicar os travões, o veículo começa a travar e é estimado o coeficiente de atrito em cada roda, em tempo real, e calculado o incremento da razão de deslizamento,  $\Delta s_t$ , que dá a diferença entre a taxa de deslizamento atual e a relação de deslizamento do último instante. Ao mesmo tempo, o valor característico da estrada é obtido a partir do coeficiente de atrito estimado multiplicado pelo incremento da razão de deslizamento em tempo real e acumulado constantemente. Quando a razão de deslizamento atinge o valor de 17%, designando-se por  $s_0$ , tem-se que  $\tau = \tau_m$  e a unidade de controlo eletrónica determina o intervalo característico da estrada, identificando a superfície da estrada.

Como se pode observar pela Figura 3.9, Wang *et al* (2014), defendem que ao a razão de deslizamento atingir  $s_0$ , o valor característico da estrada atinge o seu máximo,  $\tau_m$ , isto é,  $\tau_m$  é a área fechada sob o segmento de curva  $\mu$ - $s$  antes de uma proporção de deslizamento fixo.

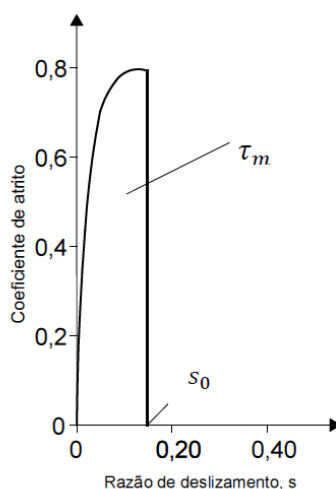


Figura 3.9 – Curva tipo de superfície de estrada (Silvério, 2015)

O valor de 17% atribuído para a razão de deslizamento pode não ser o mais indicado, mas no caso dos pavimentos em betão betuminoso e paralelos secos, que são os mais comuns, estes apresentam um valor máximo para o coeficiente de atrito próximo desse valor de razão de deslizamento. Graças a este método do valor característico, durante a fase inicial de travagem, a abordagem de identificação da superfície da estrada como sistema ativo de segurança pode realmente identificar as condições de superfície.

Existem outros sistemas de travagem assistida para além do ABS, são eles: o sistema de assistência à travagem (BAS), o sistema anticolisão de bordo (ACAS), a aplicação eletrónica de distribuição da força de travagem (EBD), o sistema de controlo de cruzeiro adaptativo (ACC) e o sistema de travagem elétrico (EBS).

### 3.6 Caracterização do Fenômeno de Paragem

#### 3.6.1 Distância de Paragem

A distância de paragem ou distância de visibilidade de paragem, designada por DP, é “a distância mínima necessária para que o veículo possa parar antes de atingir um determinado obstáculo inesperado”, obtida pela Equação 3.3, e é tida em consideração na velocidade de projeto (Silvério, 2015).

$$DP = d_1 + d_2 \quad (3.3)$$

Onde:

DP [m] – Distância de paragem;

$d_1$  [m] – Distância percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção-reação do condutor;

$d_2$  [m] – Distância percorrida durante o tempo de travagem.

O tempo de reação é “o tempo que decorre até o condutor carregar no pedal do travão depois de ter tomado a consciência da existência do obstáculo” e o tempo de percepção é “o tempo que decorre entre a visualização do obstáculo e a tomada de consciência que deve acionar os travões” (Silvério, 2015).

A distância percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção-reação do condutor é dada pela Equação 3.4.

$$d_1 = V \times t \quad (3.4)$$

Onde:

$d_1$  [m] – Distância percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção-reação do condutor;

V [m/s] – Velocidade do veículo;

t [s] – Tempo de percepção-reação do condutor.

Numa situação de travagem em plano inclinado, a distância de visibilidade de paragem é dada pela Equação 3.5.

$$DP = \frac{V \times t}{3,6} + \frac{V^2}{254 \times (\mu_p \pm G)} \quad (3.5)$$

Onde:

DP [m] – Distância de paragem;

V [m/s] – Velocidade do tráfego;

t [s] – Tempo de reação do condutor;

$\mu_p$  [adimensional] – Coeficiente de atrito longitudinal de projeto;

$G$  [%] – Inclinação longitudinal da estrada.

### 3.6.2 Distância de Travagem

A distância de travagem é “a distância necessária para que o trabalho das forças de atrito,  $W_{Fa}$ , anule a energia cinética,  $E_c$ ” (Silvério, 2015).

No início da travagem, o veículo possui uma velocidade  $V$  (m/s) e, conseqüentemente, possui uma energia cinética,  $E_c$ , que é dada pela Equação 3.6.

$$E_c = \frac{m \times V^2}{2} \quad (3.6)$$

Onde:

$E_c$  [J] – Energia cinética;

$m$  [kg] – Massa do veículo;

$V$  [m/s] – Velocidade do veículo.

Admitindo que a força é paralela ao deslocamento, o trabalho da força de atrito,  $W_{Fa}$ , é dado pela Equação 3.7.

$$\begin{aligned} W_{Fa} &= F_a \times d_2 = \mu \times P \times d_2 \\ &= \mu \times m \times g \times d_2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Onde:

$W_{Fa}$  [J] – Trabalho da força de atrito;

$F_a$  [N] – Força de atrito;

$d_2$  [m] – Distância percorrida durante o tempo de travagem;

$\mu$  [adimensional] – Coeficiente de atrito longitudinal entre o pneu e o pavimento;

$P$  [N] – Peso do veículo;

$m$  [kg] – Massa do veículo;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – Aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>).

No fim da travagem tem-se que a energia cinética é zero, uma vez que foi anulada pelo trabalho das forças de atrito ao longo da distância percorrida na travagem, ou seja, tem-se a relação dada pela Equação 3.8.

$$E_c = W_{Fa} \quad (3.8)$$

Pela substituição das fórmulas da energia cinética e do trabalho da força de atrito na equação 3.8, retira-se que a distância de travagem é dada pela Equação 3.9.

$$d_2 = \frac{V^2}{2 \times \mu \times g} \quad (3.9)$$

Onde:

$d_2$  [m] – Distância percorrida durante o tempo de travagem;

$V$  [m/s] – Velocidade do veículo;

$\mu$  [adimensional] – Coeficiente de atrito longitudinal entre o pneu e o pavimento;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] – Aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>).

### **3.6.3 Distância de Paragem e Coeficiente de Atrito**

A Tabela 3.1 apresenta os valores de atrito para pavimentos betuminosos molhados de acordo com AASHTO (1994, 2001) e os valores de atrito em função da microtextura e macrotextura, podendo ser rugosa e aberta, rugosa e fechada, polida e aberta, ou polida e fechada, apresentado por Guzmán (1995).

Tabela 3.1 – Valores de atrito de acordo com a ASSHTO (1994, 2001) e Guzmán (1995).

Velocidade (km/h)	ASSHTO	Guzmán			
		Rugosa e aberta	Rugosa e fechada	Polida e aberta	Polida e fechada
50	0,36	0,70	0,60	0,30	0,25
60	0,34	0,62	0,56	0,25	0,20
70	0,32	0,60	0,49	0,22	0,18
80	0,31	0,58	0,40	0,20	0,17
90	0,31	0,57	0,35	0,20	0,16
100	0,30	0,55	0,30	0,19	0,16
110	0,30	0,55	0,24	0,18	0,15
120	0,29	0,55	0,22	0,17	0,15

Como se pode verificar pelos resultados obtidos para as distâncias de travagem na Tabela 3.2, calculadas de acordo com os valores de atrito dados na Tabela 3.1, o valor do coeficiente de atrito tem grande influência no valor final da distância de travagem.

Tabela 3.2 – Distâncias de travagem (m), para os valores de atrito da Tabela 5 (Aps, 2006)

Velocidade (km/h)	ASSHTO	Guzmán			
		Rugosa e aberta	Rugosa e fechada	Polida e aberta	Polida e fechada
50	27,23	14,01	16,34	32,68	39,22
60	41,52	22,77	25,21	56,47	70,59
70	60,05	32,03	39,22	87,34	106,75
80	80,96	43,27	62,75	125,49	147,64
90	102,47	55,73	90,76	158,82	198,53
100	130,72	71,30	130,72	206,40	245,10
110	158,17	86,27	197,71	263,62	316,34
120	194,73	102,67	256,58	332,18	376,47

Em Portugal aplica-se a Norma Traçado (InIR, 2010). Esta fornece princípios básico, métodos e valores limite e de referência a considerar na realização de um projeto de Rede

Rodoviária Nacional. O tempo de percepção-reação a adotar é de 2 segundos, e o coeficiente de atrito longitudinal,  $\mu_p$ , a adotar na equação 3.6, depende de vários fatores, tais como: a velocidade, natureza e estado dos pavimentos, desenho do piso dos pneus e presença de água no pavimento.

Na Tabela 3.3 apresentam-se as distâncias de visibilidade de paragem, DP, que devem ser garantidas em projeto geométrico, tendo em consideração que o pavimento é em betão betuminoso, razoavelmente conservado, húmido, limpo e que se tem pneus bastantes gastos, características que foram adotadas em normas anteriores (JAE, 1994), e onde o atrito transversal não influencia de modo algum, uma vez que são admitidos raios para as curvas bastantes elevados.

Tabela 3.3 – Distância de visibilidade mínimas de paragem e coeficientes de atrito longitudinal (JAE, 1994; InIR, 2010)

<b>Velocidade (km/h)</b>	<b>DP mínima (m)</b>	<b>DP mínima (m)</b>	<b><math>\mu_p</math> (JAE, 1994)</b>	<b><math>\mu_p</math> (InIR, 2010)</b>
<b>40</b>	40	39,98	0,38	-
<b>50</b>	60	59,97	0,36	0,32
<b>60</b>	80	79,97	0,35	0,32
<b>70</b>	100	99,96	0,34	0,32
<b>80</b>	120	119,96	0,33	0,32
<b>90</b>	150	149,95	-	0,32
<b>100</b>	180	179,94	0,32	0,32
<b>110</b>	220	219,94	0,32	0,31
<b>120</b>	250	249,93	0,32	0,31
<b>130</b>	320	319,93	-	0,27
<b>140</b>	390	389,92	-	0,25



## 4 Modelos de Interação Pneu-Pavimento

Ao longo dos anos, foram desenvolvidos vários modelos de caracterizassem o fenómeno de interação pneu-pavimento. Os primeiros modelos surgiram no Reino Unido a partir de 1930. Em meados de 1970, nos Estados Unidos da América, foi desenvolvido o Modelo de Penn State. Mais tarde, foi melhorado e pelo Modelo Rado (Henry, 2000). Entretanto, a PIARC, desenvolveu um modelo com base no Modelo de Penn State, de modo a harmonizar medições de atrito dos diferentes equipamentos, através de um Índice Internacional de Atrito (IFI), apresentado no Subcapítulo 2.5.1. Entre outros modelos, que serão abordados neste capítulo.

### 4.1 Modelo Penn State

O Modelo de Penn State (Leu & Henry, 1983, *cit. in* Wilson 2006), descreve o coeficiente de atrito,  $\mu$ , em função da velocidade de deslizamento,  $S$ , por meio de uma função exponencial, como se mostra na Equação 4.1.

$$\mu = \mu_0 \times e^{\frac{-PNG}{100}S} \quad (4.1)$$

Onde:

$\mu$  [adimensional] – Coeficiente de atrito;

$\mu_0$  [adimensional] – Coeficiente de atrito quando a velocidade é nula;

$PNG$  [%] – Percentagem do gradiente normalizado de  $\mu$ ;

$S$  [km/h] – Velocidade de deslizamento.

De acordo com Leu e Henry (1983, *cit. in* Wilson 2006), o valor de  $PNG$  será constante com a velocidade, correlacionando-se com a macrotextura, e que  $\mu_0$  pode ser conhecido através da microtextura. Posteriormente, noutras versões do modelo, o termo “ $PNG/100$ ” foi substituído por uma constante de velocidade,  $S_p$ , apresentando-se uma nova expressão para o coeficiente de atrito, dado pela Equação 4.2.

$$\mu = \mu_0 \times e^{\frac{S}{S_p}} \quad (4.2)$$

Onde:

$\mu$  [adimensional] – Coeficiente de atrito;

$\mu_0$  [adimensional] – Coeficiente de atrito quando a velocidade é nula;

$S$  [km/h] – Velocidade de deslizamento;

$S_p$  [km/h] – Constante da velocidade de referência relacionada com a macrotextura, tratando-se de um modelo de regressão desenvolvido que se relaciona com a profundidade do perfil médio (Equação 2.4).

A Figura 4.1 apresenta o Modelo de Penn State para dois tipos de pavimentos que têm o mesmo nível de atrito para uma velocidade de deslizamento de 60 km/h, mas que como têm diferenças a nível de textura, então têm valores diferentes de  $S_p$  resultando num comportamento das curvas muito diferente.

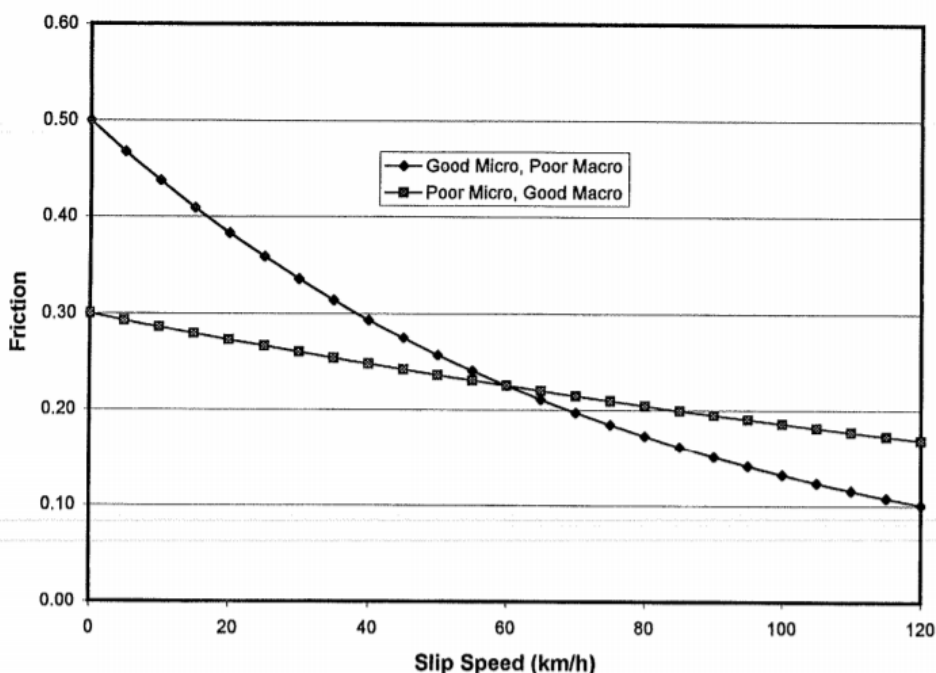


Figura 4.1 – Modelo de Penn State de duas superfícies com texturas diferentes (Henry, 2000)

Como se pode observar pelo comportamento das duas curvas, o valor do coeficiente de atrito à velocidade de 60 km/h, por si só, não é suficiente para descrever a resistência à derrapagem num pavimento (Henry, 2000).

## 4.2 Modelo Rado

De acordo com o Modelo Rado, o atrito varia ao longo do processo de travagem e, portanto, este depende da velocidade de deslizamento do veículo. Em Henry (2000), é referido que o atrito aumenta de zero até um valor de pico, estando a roda em rolamento livre, isto é, com velocidade angular,  $\omega_L$ , diferente de zero, e depois diminui com a roda travada, provocado pelo bloqueio da roda, onde a velocidade angular vai assumir o valor de zero, como mostra na Figura 4.2.

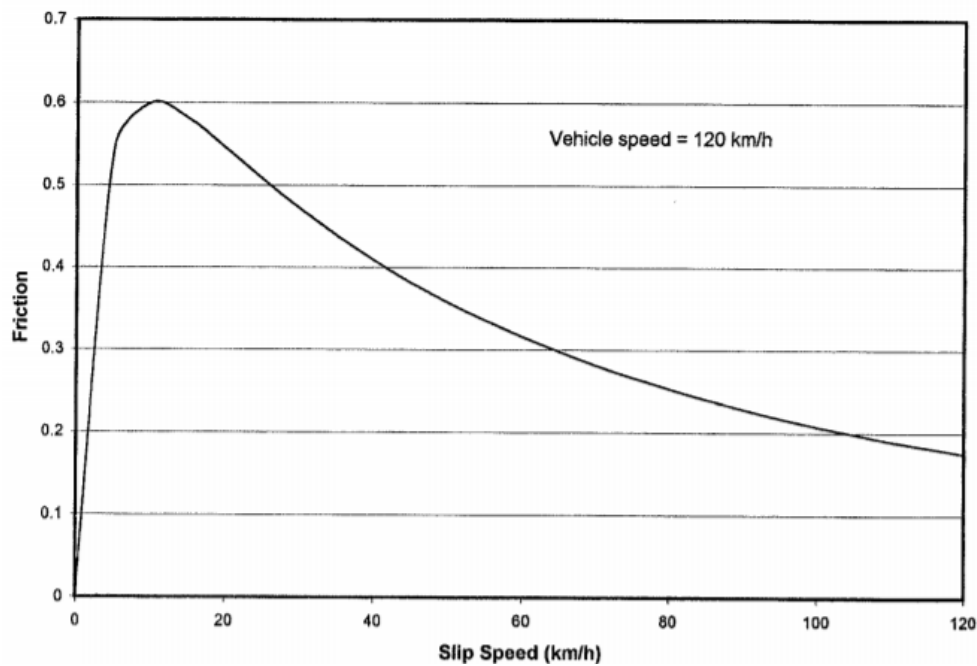


Figura 4.2 – Relação da velocidade de deslizamento e o coeficiente de atrito da superfície do pavimento (Henry, 2000)

Ainda relativamente à Figura 4.2, a parte ascendente da curva depende das propriedades do pneu, enquanto que, após o pico, a curva depende da macrotextura do pavimento. Rado (1994, *cit. in* Wilson 2006) modelou o comportamento da curva representada através da Equação 4.3.

$$\mu = \mu_{pico} \times e^{-\left[\frac{\ln(S/S_{pico})}{C}\right]^2} \quad (4.3)$$

Onde:

$\mu$  [adimensional] – Coeficiente de atrito;

$\mu_{pico}$  [adimensional] – Coeficiente de atrito de pico;

$S$  [km/h] – Velocidade de deslizamento;

$S_{pico}$  [km/h] – Velocidade de deslizamento de pico;

$C$  [adimensional] – Fator de forma relacionado com a microtextura da superfície do pavimento.

Este fator de forma,  $C$ , vai definir a forma descendente do gráfico. A Figura 4.3 apresenta o valor do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento, para quatro valores diferente do fator forma.

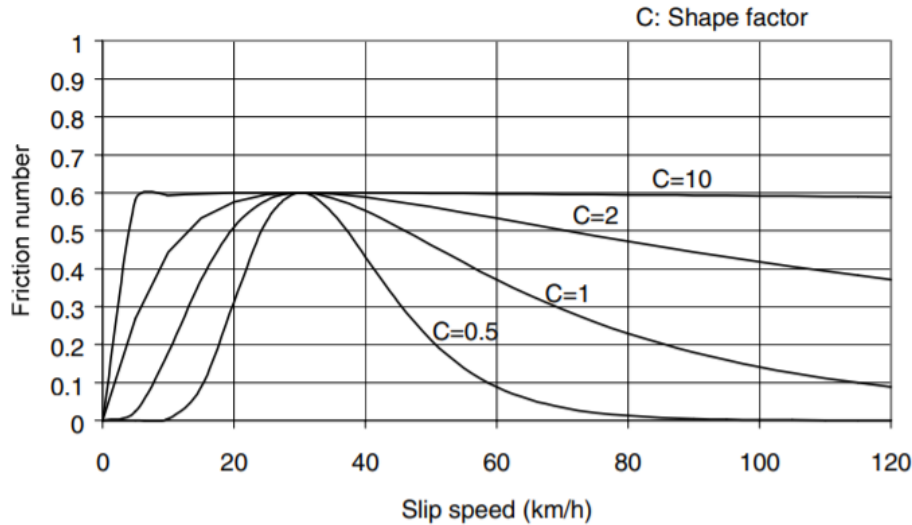


Figura 4.3 – Modelo de atrito de Rado com valores:  $\mu_{\text{pico}}=0,6$  e  $S_{\text{máx}}= 30$  km/h (Al-Qadid *et al*, 2002)

Como se pode verificar pela Figura 4.3, quando o fator forma for superior a 10, a parte descende da curva de atrito assume uma linha reta, isto significa que, o coeficiente de atrito permanece quase constante ao longo da variação da velocidade de deslizamento. Já quando o fator forma tem valor inferior a 1, a curva de atrito atinge um valor de pico. (Al-Qadi *et al*, 2002)

De acordo com Henry (2000), o Modelo Rado e o Modelo Penn State têm uma característica importante que é a sua relação com a travagem do veículo em condições reais de emergência. Em vista disso, quando o travão é aplicado pela primeira vez, a curva para o coeficiente de atrito segue o Modelo Rado, dada pela Equação 4.3, até ao bloqueio total das rodas, em seguida, o veículo, que nesse momento possui uma velocidade igual à velocidade de deslizamento, sofre uma diminuição na curva de atrito que segue de acordo com o Modelo de Penn State até o veículo parar.

Quando o veículo contém um sistema anti bloqueio de travagem (ABS), tem-se que a curva de atrito segue de acordo com o Modelo Rado até ser atingido um valor pré-definido de deslizamento, de seguida o travão é libertado, a curva de atrito diminui e as rodas tornam a girar até à nova aplicação de travão (novo ciclo ABS), onde para cada ciclo ocorre uma diminuição da velocidade do veículo. (Wilson, 2006)

### 4.3 Modelo de Burckhardt

O Modelo de Burckhardt foi desenvolvido com recurso a ensaios experimentais, ajustados de um grande número de resultados obtidos em diferentes tipos de pavimentos, sendo

utilizado em diversos estudos sobre a dinâmica de um veículo (Zhang *et al.*, 2014; Hoàng, 2014; Wang *et al.*, 2014; Dousti *et al.*, 2015). Este modelo de atrito baseia-se em funções lineares e exponenciais que simulam a relação entre o coeficiente de atrito e o deslizamento dos pneus, o coeficiente de atrito é dado pela Equação 4.4 por meio de parâmetros obtidos de curvas experimentais, são eles  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ .

$$\mu = C_1 \times (1 - e^{-C_2 \times s}) - C_3 \times s \quad (4.4)$$

Onde:

$\mu$  – Coeficiente de atrito;

$C_1$  – Valor máximo da curva de atrito;

$C_2$  – Forma da curva de atrito;

$C_3$  – Diferença entre o valor máximo da curva de atrito e o valor para  $s=1$ ;

$s$  – Razão de deslizamento do pneu (varia entre 0 e 1).

Wang *et al* (2014), apresentou os valores dos parâmetros das estradas a utilizar na aplicação do Modelo de Burckhardt, como apresentado na Tabela 4.1. Na Figura 4.4 apresentam-se as curvas  $\mu$ - $s$  para os sete tipos de pavimentos abordados neste modelo.

Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros das estradas tipo na aplicação do Modelo de Burckhardt (Wang *et al.*, 2014)

Superfície da estrada	Designação	$C_1$	$C_2$	$C_3$
<b>Betão</b>	<b>Betão</b>	1,1973	25,1680	0,5373
<b>Betão Betuminoso seco</b>	<b>BB seco</b>	1,2801	23,9900	0,5200
<b>Betão Betuminoso molhado</b>	<b>BB molhado</b>	0,8570	33,8220	0,3470
<b>Paralelos secos</b>	<b>P seco</b>	1,3713	6,4565	0,6691
<b>Paralelos molhados</b>	<b>P molhado</b>	0,4004	33,7080	0,1204
<b>Neve</b>	<b>Neve</b>	0,1946	94,1290	0,0646
<b>Gelo</b>	<b>Gelo</b>	0,0500	306,3900	0,0000

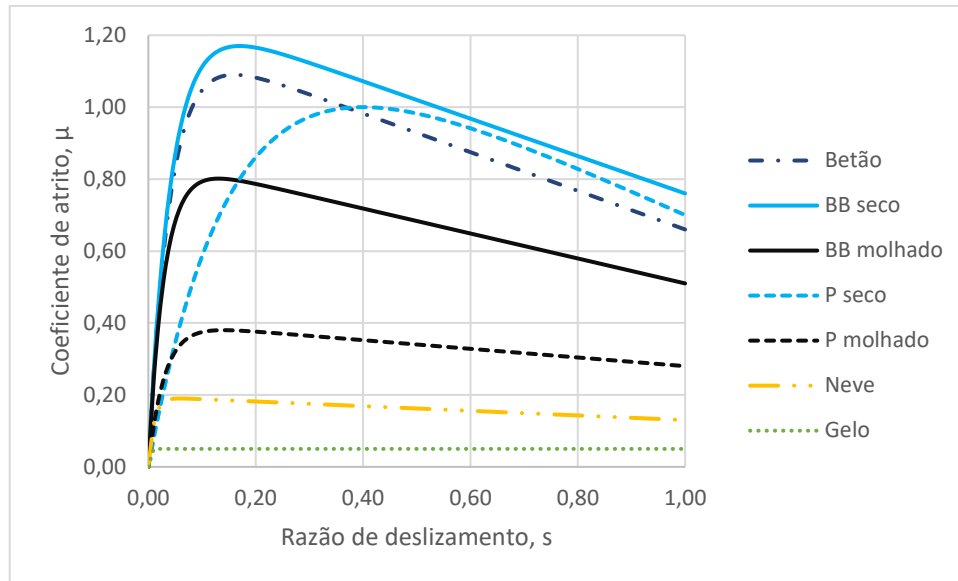


Figura 4.4 – Curvas  $\mu$ - $s$  do Modelo de Burckhardt de acordo com os parâmetros da Tabela 4.1.

Como se pode observar na Figura 4.4, uma das características deste modelo é a tendência linear descendente quando os valores de escorregamento atingem valores maiores que o valor máximo de coeficiente de atrito até ao bloqueio total das rodas (limite de deslizamento  $s=1$ ). Este modelo serve de base a modelos aplicados nos sistemas de segurança ativa, tais como o sistema ABS e ABS modificado. O conhecimento do coeficiente de atrito, para cada um dos tipos de pavimento abordados neste modelo, permite o conhecimento do valor de deslizamento longitudinal ideal a aplicar nos sistemas de segurança ativa referidos. (Dousti *et al.*, 2015)

O Modelo de Burckhardt serviu de base ao desenvolvimento do Modelo Interação Pneu-Pavimento proposto por Silvério (2015) e do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado desenvolvido na presente Dissertação.

## **5 Modelo de Interação Pneu-Pavimento Baseado em Parâmetros Reais do Pavimento Desenvolvido por Silvério (2015)**

O Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), serviu como base fundamental ao desenvolvimento do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, apresentado em seguida no Capítulo 6. Uma vez que foram tidos em conta, não só os princípios de funcionamento da interação pneu-pavimento apresentados por Silvério (2015), como também se desenvolveu o modelo padronizado a partir das formulações desenvolvidas por Silvério (2015).

A aderência do pneu ao pavimento, como se sabe, não é uniforme e, por isso, a capacidade de mobilização de forças de atrito entre o pneu e a superfície do pavimento varia de acordo com o tipo de pavimento em análise. O atrito não é só influenciado pelos parâmetros relacionados com as características do pavimento e do pneu, é também afetado por outras causas externas, nomeadamente, pela presença de água, pela suspensão do veículo, pelas condições ambientais, pela presença de contaminantes e pela velocidade do veículo.

O Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), teve como base de análise o Modelo de Burckhardt, este resulta de dados experimentais obtidos em pistas de ensaio e é apontado como o mais admissível no uso em sistemas de ABS nos dias de hoje. O modelo desenvolvido por Silvério (2015), teve como finalidade o uso de parâmetros que definem as características de aderência (textura e atrito), obtidos pelos diversos ensaios, nos modelos matemáticos de interação pneu-pavimento utilizados nos sistemas de segurança ativa (ABS) dos veículos.

### **5.1 Parâmetros de Burckhardt**

O modelo de Burckhardt utiliza funções lineares e exponenciais que simulam a relação entre o coeficiente de atrito e o deslizamento dos pneus; permite ainda a determinação do coeficiente de atrito, mas está limitado pela definição das constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ .

Silvério (2015), realizou um estudo com as várias aproximações da curva do modelo de interação pneu-pavimento à curva do modelo de referência (modelo de Burckhardt). De modo a perceber qual a influência que cada uma das constantes teve na curva, foi necessário ter em conta as definições teóricas, isto é,  $C_1$  é o parâmetro que determina o valor máximo

da curva de atrito;  $C_2$  é o parâmetro que configura a forma da curva de atrito e, por fim,  $C_3$  é o parâmetro que define a diferença entre o valor máximo da curva de atrito e o valor de razão de deslizamento igual a 1. (Burckhardt, 1993)

Partindo das definições teóricas das constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  e, através das diversas tentativas de aproximação às curvas da fórmula de Burckhardt, Silvério (2015), concluiu que:

A constante  $C_1$  está fortemente relacionada com o valor de *GripTester* (GN), podendo ser estimada pelo valor obtido nos ensaios de microtextura, porém o coeficiente de ajuste foi decomposto considerando a altura de água, de modo a avaliar este parâmetro para condições secas e molhadas;

A constante  $C_2$  é sensivelmente igual para os mesmo materiais de pavimentação, podendo ser estimada pelo valor obtido nos ensaios de macrotextura (MTD), isto é, foi assumida como dependente apenas do tipo de material da camada de desgaste em análise;

A constante  $C_3$  apesar de estar relacionada com o valor de MTD, também é fortemente influenciada pela presença de água no pavimento, mas não é apenas a degradação do valor do coeficiente de atrito na travagem que é influenciado, o valor de pico (proporcional a  $C_1$  e que é fortemente influenciado por GN), também é afetado pela altura de água sobre o pavimento, surgindo assim a necessidade do fator “ $n$ ”, que representa a contribuição da altura do pavimento que não está preenchida pela água.

## 5.2 Formulação Desenvolvida por Silvério (2015), para uma Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Denso – BB

O estudo de Silvério (2015), foi realizado para um pavimento com camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso e a formulação final para cada um dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  (que definem a melhor aproximação às curvas da fórmula de Burckhardt), apresenta-se em seguida pelas Equações 5.1, 5.2 e 5.3.

$$C_1 = 2GN - \frac{h_w}{2} \quad (5.1)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (5.2)$$

$$C_3 = \frac{4}{5}(n^2GN) + \frac{h_w}{3MTD} \quad (5.3)$$

$$n = \frac{1}{\gamma} = \frac{(MTD - h_w)}{MTD} \quad (5.4)$$

Onde:



$GN$  [adimensional] – *Grip Number* (valor do coeficiente de atrito dado pelo ensaio do *GripTester*);

$h_w$  [mm] – Altura de água no pavimento;

$MTD$  [mm] – Profundidade média da textura superficial (valor da macrotextura dado pelo ensaio da Mancha de Areia);

$n$  [adimensional] – Inverso do grau de saturação da superfície da camada de desgaste (Equação 5.4);

$\gamma$  [adimensional] – Grau de saturação da superfície da camada de desgaste.

Tendo em conta a formulação desenvolvida por Silvério (2015), para uma camada de desgaste do tipo BB, na Tabela A.II do Anexo A apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ . Os Gráficos 5.1 e 5.2 apresentam a variação das curvas  $\mu$ - $s$  obtidas para as 4 vias do Troço BB, considerando o pavimento seco/molhado. De notar que, em pavimento definido como pavimento molhado, a altura de água utilizada é igual à do ensaio do *GripTester*, isto é,  $h_w = 0,6$  mm.

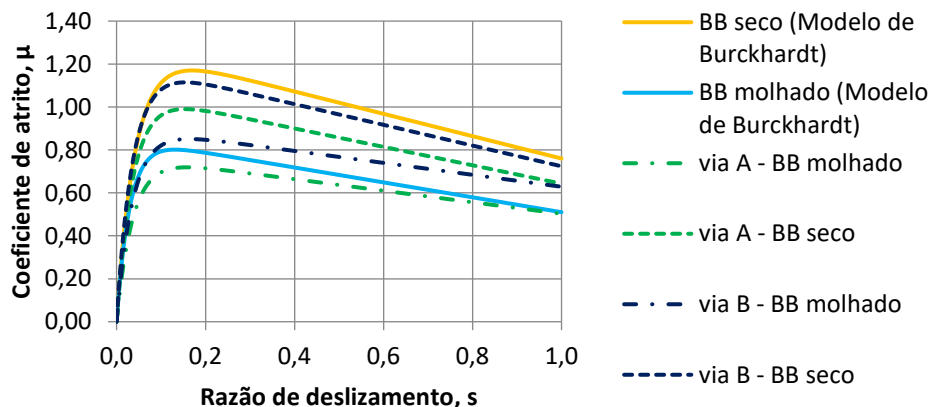


Gráfico 5.1– Curvas  $\mu$ - $s$  do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as vias A e B do Troço BB

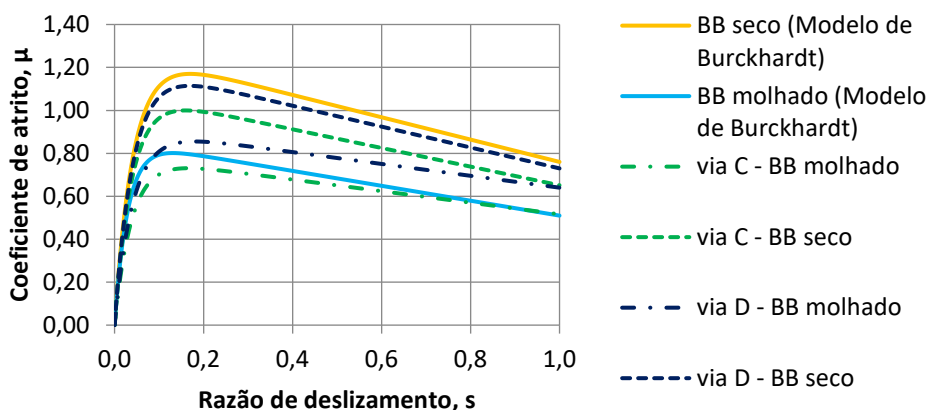


Gráfico 5.2 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as vias C e D do Troço BB

Pela análise dos gráficos, Silvério (2015), verificou que ao longo do deslizamento, para vias com maior GN, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas aproxima-se do valor de coeficiente de atrito em condições secas. Este fenómeno foi mais acentuado nas vias B e D.

### 5.3 Formulação Desenvolvida por Silvério (2015), para uma Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Drenante – BBD

Silvério (2015), para a camada de desgaste em BBD aplicou a mesma formulação desenvolvida para a camada de desgaste em BB, contudo, uma vez que se tratou de uma camada drenante, teve em consideração a evolução da permeabilidade do pavimento ao longo do tempo, que diminui com o passar dos anos devido à colmatagem de vazios, o que resulta numa diminuição da velocidade de percolação.

Para retratar este acontecimento, introduziu um coeficiente de permeabilidade,  $\lambda$ , dado pela Equação 5.5, onde  $k$  assumiu o valor de 1 para um pavimento novo e o valor de 1,3 para um pavimento colmatado (neste caso designado como um pavimento velho), e que permitiu avaliar as consequências do fator tempo no pavimento do tipo betão betuminoso drenante. Uma vez que Silvério (2015), não teve acesso a dados de ensaios que permitissem a avaliação da permeabilidade com os vários anos de serviço, os valores definidos para “ $k$ ” foram meramente indicativos do efeito do tempo produzido no modelo de interação desenvolvido.

$$\lambda = \frac{1}{k} \quad (5.5)$$

Dito isto, a formulação final para cada um dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , para o pavimento com camada de desgaste em Betão Betuminoso Drenante, é dada pelas Equações 5.6, 5.2 e 5.7.

$$C_1 = 2GN - \left(\frac{h_w}{2}\right) \times \left(\frac{1}{\lambda}\right) \quad (5.6)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (5.2)$$

$$C_3 = \frac{4}{5}(n^2GN) + \frac{h_w \times \lambda}{3MTD} \quad (5.7)$$

Onde:

$GN$  [adimensional] – *Grip Number* (valor do coeficiente de atrito dado pelo ensaio do *GripTester*);

$h_w$  [mm] – Altura de água no pavimento;

$MTD$  [mm] – Profundidade média da textura superficial (valor da macrotextura dado pelo ensaio da Mancha de Areia);

$n$  [adimensional] – Inverso do grau de saturação da superfície da camada de desgaste (Equação 5.4);

$\lambda$  [adimensional] – Coeficiente dependente da permeabilidade da camada de desgaste do pavimento (Equação 5.5).

Tendo em conta a formulação desenvolvida por Silvério (2015), para uma camada de desgaste do tipo BBD, nas Tabelas A.III e IV do Anexo A apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , considerando a camada de desgaste como nova e velha, respetivamente. Os Gráficos 5.3 a 5.6 apresentam a variação das curvas  $\mu$ -s obtidas para as 4 vias do Troço BBD, considerando o pavimento novo/velho e seco/molhado.

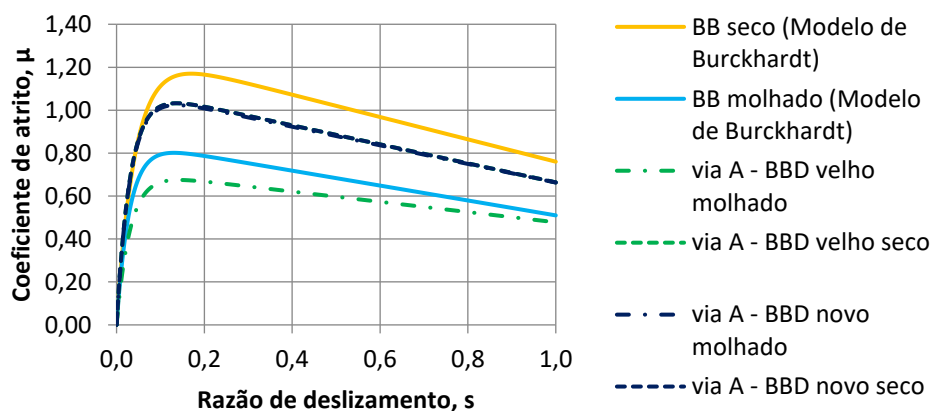


Gráfico 5.3 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para a Via A do Troço BBD

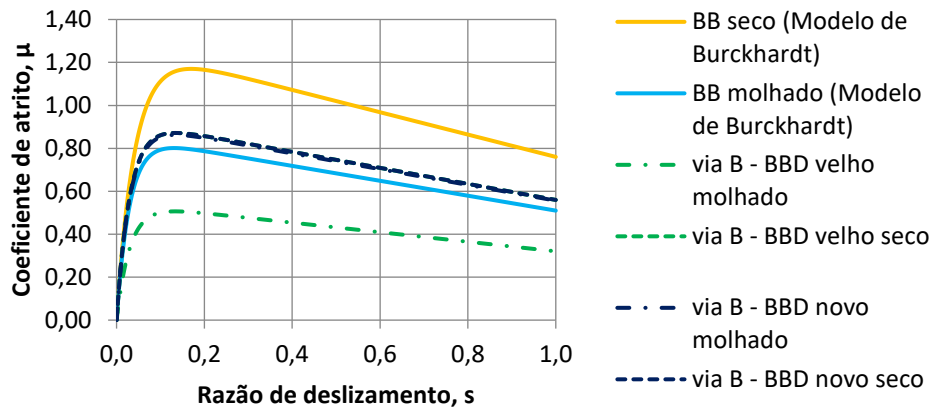


Gráfico 5.4 – Curvas  $\mu$ - $s$  do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para a Via B do Troço BBD

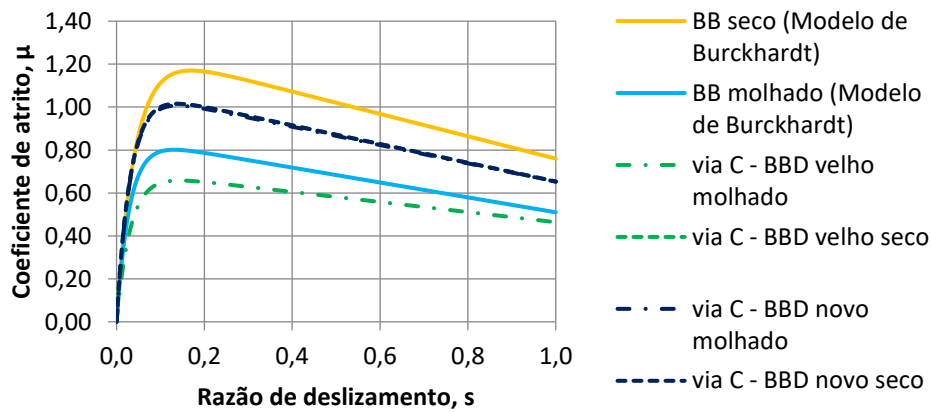


Gráfico 5.5 – Curvas  $\mu$ - $s$  do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para a Via C do Troço BBD

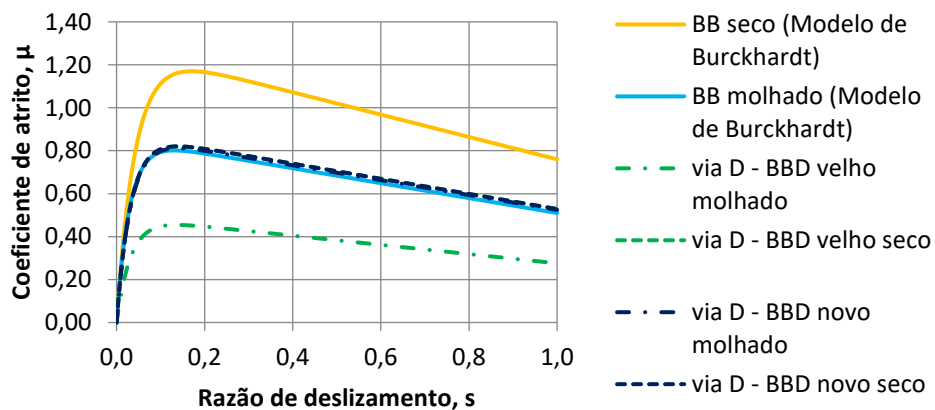


Gráfico 5.6 – Curvas  $\mu$ - $s$  do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para a Via D do Troço BBD

Silvério (2015), considerou a camada estudada como nova e na premissa simplificadora de que, numa camada drenante as curvas  $\mu$ -s correspondentes às situações: (i) nova molhada, (ii) nova seca e (iii) velha seca, tendem a ser próximas, tal como se observou nos gráficos; caso dispusesse de series temporais de dados, o fator tempo estaria refletido nos ensaios do *GripTester* e da Mancha de Areia.

Silvério (2015), referiu ainda que, como os resultados obtidos consideram as mesmas formulações de BB para BBD, as curvas obtidas encontram-se abaixo, quando comparado com as curvas BB do modelo de referência; para além dos efeitos incorporados no fator k, para que o ajuste fosse o ideal, seria necessário alterar coeficientes de ajuste.

#### **5.4 Nova Aplicação do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015)**

De modo a aprofundar o trabalho já desenvolvido por Silvério (2015), foram estudados novos trechos de pavimentos com base em resultados de ensaios *in situ* e, também se recorreu à bibliografia para retirar dados de outras camadas. Estes dados foram depois analisados de acordo com o Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015).

Os novos dados dizem respeito a dois tipos de camadas e, sabe-se que os troços em análise foram abertos ao tráfego em 2006. Os dados foram tratados e encontram-se disponíveis nas Tabelas B.II, B.III e B.IV do Anexo B. Estes dados foram adquiridos em três anos distintos (2009, 2011 e 2014), em dois troços com diferentes tipos de pavimentos, como descrito em seguida:

- ✓ Troço 1: pavimento com camada de desgaste em Betão Betuminoso Muito Delgado (BBTM);
- ✓ Troço 2: pavimento com camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso (BB).

Acerca dos Troços 1 e 2, como discriminado na Tabela B.I do Anexo B, é importante referir que o valor da textura superficial foi adquirido com recurso a ensaios de medição em contínuo, utilizando equipamentos laser. Para os resultados obtidos de MPD (*Mean Profile Depth*) e de SMTD (*Sensor Measure Texture Depth*), está estabelecida a necessidade de correlação entre eles e os valores ETD (*Estimated Texture Depth*), descrito no Subcapítulo 2.2.4.1, sendo que o valor “ETD” será utilizado no lugar de “MTD” nas formulações desenvolvidas por Silvério (2015). Importa referir ainda que, seria necessário realizar algumas medições nestes troços, com o ensaio de Mancha de Areia, de modo a confrontar

os valores obtidos de ETD no final das correlações. Relativamente ao coeficiente de atrito, foram realizados ensaios de *GripTester* e de *SCRIM*, dos quais os dados obtidos foram utilizados diretamente. De notar que, no caso do equipamento *SCRIM*, o valor “CAT” (ou “CRT”), obtido no ensaio, será o valor utilizado no lugar de “GN” nas formulações desenvolvidas por Silvério (2015).

Para a aplicação do Modelo de Interação Pneu-pavimento desenvolvido por Silvério (2015), numa camada de desgaste do tipo Betão Betuminoso Rugoso (BBR), e numa camada de desgaste do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), visto que não se teve acesso a dados experimentais, recorreu-se à bibliografia adquirindo assim uma série de dados. O resultado da análise estatística dos dados da bibliografia, para estas duas camadas de desgaste, encontra-se disponível nas Tabelas C.II e C.III do Anexo C, respetivamente.

#### 5.4.1 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Denso – BB

O Troço 2 possui uma camada de desgaste em BB com características idênticas ao Troço BB obtido de Silvério (2015), portanto a análise do Troço 2 foi crucial à verificação do modelo de Silvério (2015).

Tendo em conta a formulação desenvolvida para uma camada de desgaste do tipo BB, na Tabela B.V do Anexo B apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , calculados pela aplicação das Equações 5.1, 5.2 e 5.3.

Os Gráficos 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam as curvas  $\mu$ -s deste troço, referentes aos três anos em análise.

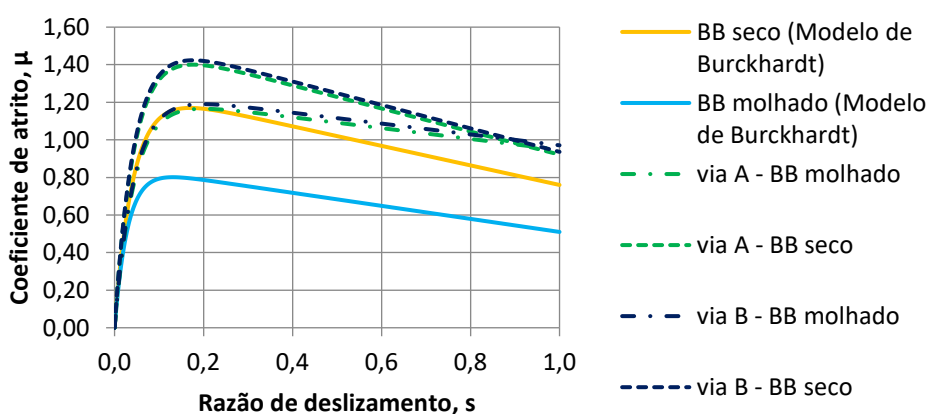


Gráfico 5.7 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 2 (BB), do ano de ensaios de 2009

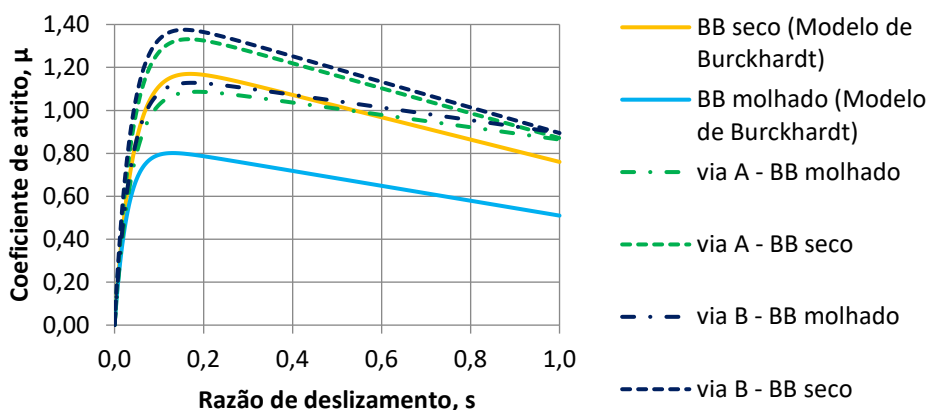


Gráfico 5.8 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 2 (BB), do ano de ensaios de 2011

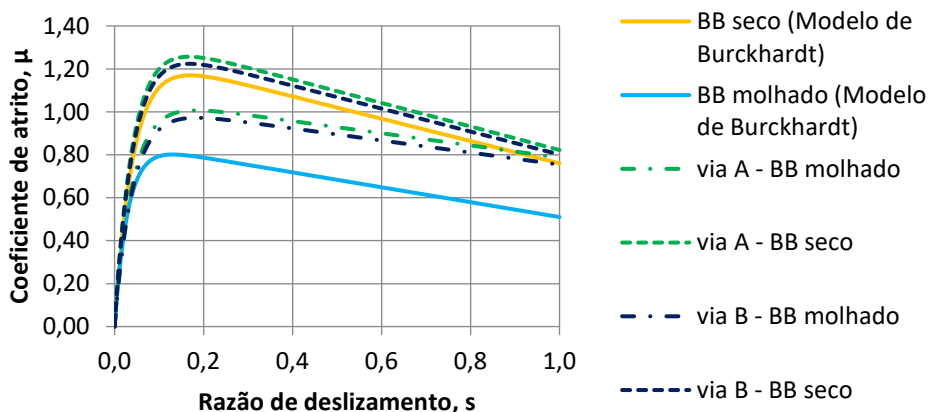


Gráfico 5.9 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 2 (BB), do ano de ensaios de 2014

As curvas  $\mu$ -s apresentadas para o Troço 2 apresentam o comportamento que seria esperado na aplicação do modelo de interação desenvolvido. Ao fim de três anos de ser aberto ao tráfego (2009), pode-se constatar que estas se encontram acima das curvas do modelo de referência (Modelo de Burckhardt).

Uma vez que, ao longo dos anos de serviço do troço, o coeficiente de atrito vai diminuindo, estas aproximam-se do modelo de referência. Este fenómeno torna-se mais evidente nas camadas de desgaste que se encontram em condições secas, respeitantes ao ensaio realizado em 2014.

Para o Troço 2 em BB, assim como aconteceu no Troço BB obtido de Silvério (2015), ao longo do deslizamento, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas tende para o valor de coeficiente de atrito em situações secas.

Em suma, nesta análise torna-se claro que o Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), para a camada de desgaste em Betão Betuminoso é válido. Tendo por base os princípios de dependência definidos por Silvério (2015), nas formulações dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , comprova-se que estes podem ser determinados a partir de ensaios de caracterização superficial.

#### 5.4.2 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Muito Delgado – BBTM

Tendo em conta a formulação desenvolvida para uma camada de desgaste do tipo BB, na Tabela B.VI do Anexo B apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , calculados pela aplicação das Equações 5.1, 5.2 e 5.3 em camada de desgaste em betão betuminoso muito delgado, sem efetuar qualquer ajuste, as curvas  $\mu$ -s resultantes estão apresentadas nos Gráficos 5.10, 5.11 e 5.12.

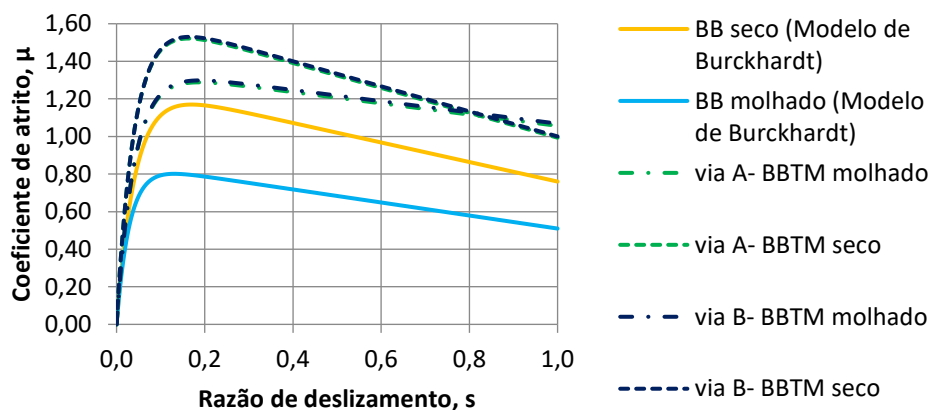


Gráfico 5.10 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 1 (BBTM), do ano de ensaios de 2009



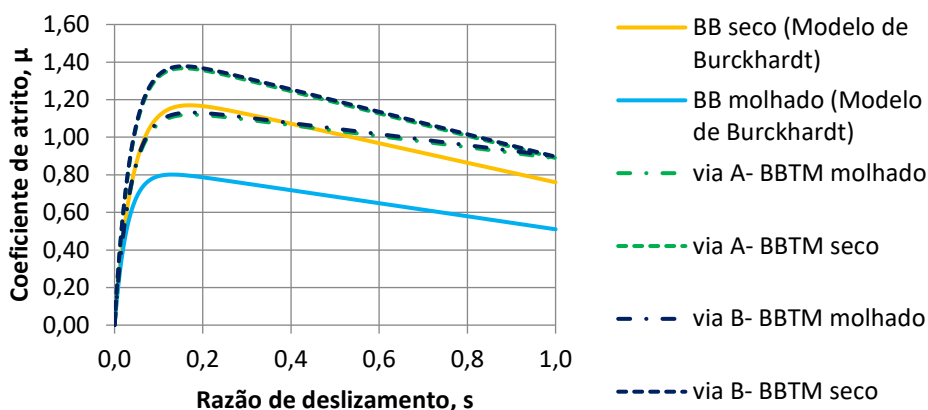


Gráfico 5.11 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 1 (BBTM), do ano de ensaios de 2011

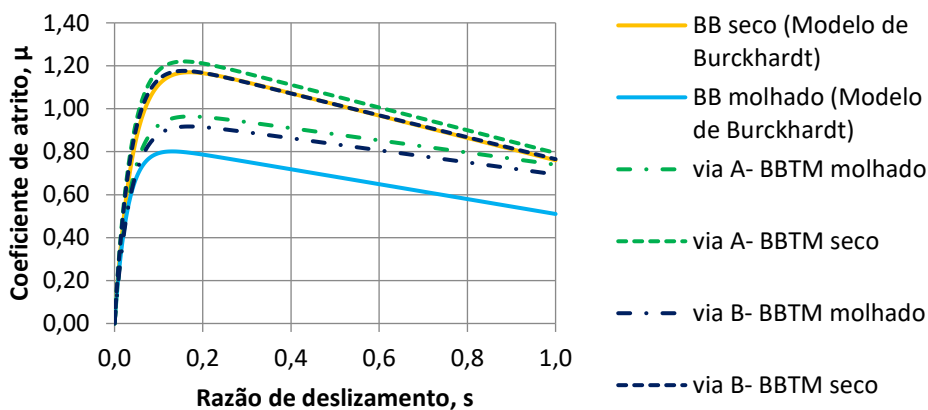


Gráfico 5.12 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para as Vias A e B do Troço 1 (BBTM), do ano de ensaios de 2014

Pela análise dos gráficos apresentados, pode-se concluir que, ao aplicar diretamente o modelo de interação desenvolvido neste tipo de camada de desgaste, as curvas  $\mu$ -s apresentam um comportamento idêntico às curvas da camada de desgaste em BB. Estas aproximam-se às curvas do modelo de referência e, ao longo do deslizamento, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas aproxima-se do valor de coeficiente de atrito em situações secas.

Concluindo, pela análise apresentada, torna-se claro que o Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), para a camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso, também é validado quando aplicado numa camada de desgaste em Betão Betuminoso Muito Delgado.

### 5.4.3 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Rugoso – BBR

Tendo em conta a formulação desenvolvida, para uma camada de desgaste do tipo BB, na Tabela C.IV do Anexo C apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , calculados pela aplicação das Equações 5.1, 5.2 e 5.3 em camada de desgaste em betão betuminoso rugoso, sem efetuar qualquer ajuste, as curvas  $\mu$ -s resultantes estão apresentadas no Gráfico 5.13.

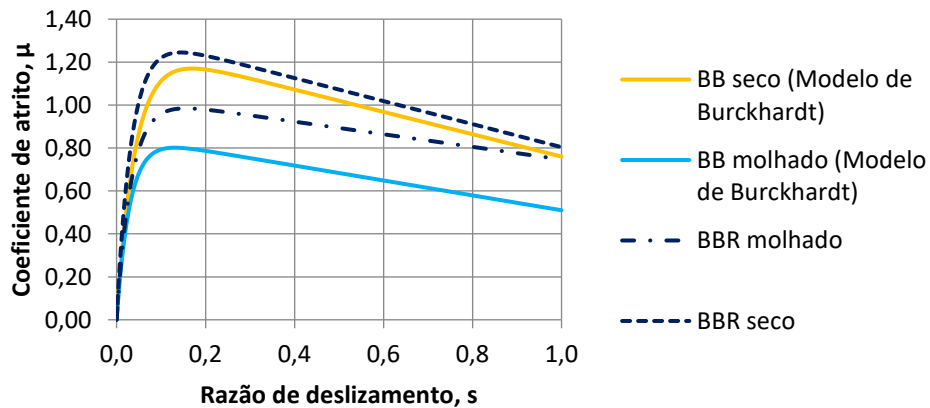


Gráfico 5.13 – Curvas  $\mu$ -s do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para uma camada em Betão Betuminoso Rugoso

Dado que são dados da bibliografia, as curvas traçadas servem como modelo na verificação do seu comportamento. Para uma análise mais aprofundada, é necessário avaliar depois se se verifica o mesmo com dados de campo.

Ao analisar o gráfico, verifica-se que, ao aplicar diretamente o modelo de interação desenvolvido, neste tipo de camada de desgaste, as curvas  $\mu$ -s apresentam um comportamento idêntico às curvas da camada de desgaste em BB. Estas aproximam-se às curvas do modelo de referência e, ao longo do deslizamento, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas aproxima-se do valor de coeficiente de atrito em situações secas.

Uma vez que as curvas modelo para BBR apresentam o comportamento esperado, pode-se afirmar que o Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), para a camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso, será aplicável também para uma camada de desgaste em Betão Betuminoso Rugoso.

#### 5.4.4 Camada de Desgaste em *Stone Mastic Asphalt* – SMA

Novamente, tendo em conta a formulação desenvolvida para uma camada de desgaste do tipo BB, na Tabela C.IV do Anexo C apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , calculados pela aplicação das Equações 5.1, 5.2 e 5.3 em camada de desgaste em *Stone Mastic Asphalt*, sem efetuar qualquer ajuste, as curvas  $\mu$ - $s$  resultantes estão apresentadas no Gráfico 5.14.

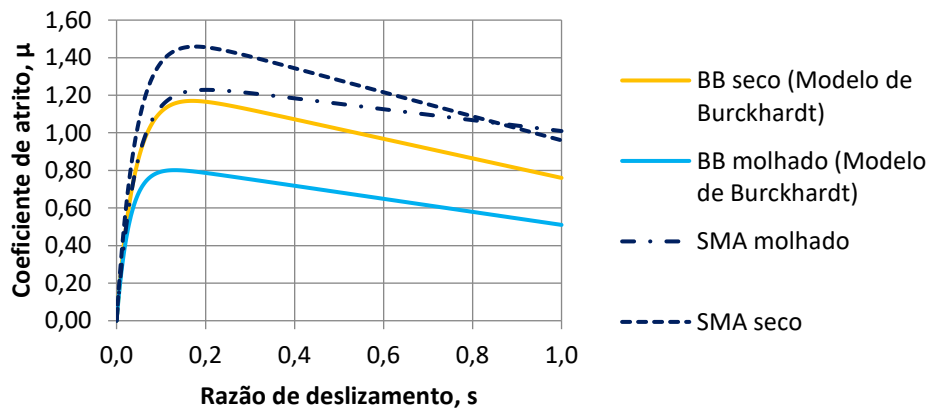


Gráfico 5.14 – Curvas  $\mu$ - $s$  do modelo desenvolvido por Silvério (2015), para uma camada em *Stone Mastic Asphalt*

Assim como para BBR, dado que são dados da bibliografia, as curvas traçadas servem como modelo na verificação do seu comportamento. Para uma análise mais aprofundada, é necessário avaliar depois se se verifica o mesmo com dados de campo.

Ao analisar o gráfico, novamente se verifica que, ao aplicar diretamente o modelo de interação desenvolvido, neste tipo de camada de desgaste, as curvas  $\mu$ - $s$  apresentam um comportamento idêntico às curvas da camada de desgaste em BB. Estas aproximam-se às curvas do modelo de referência e, ao longo do deslizamento, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas aproxima-se do valor de coeficiente de atrito em situações secas.

Mais uma vez se constata que, para uma camada de desgaste além de BB, as curvas modelo para SMA apresentam o comportamento esperado. Pode-se afirmar que o Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), para a camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso, será aplicável também para uma camada de desgaste em *Stone Mastic Asphalt*.

## **5.5 Considerações Finais acerca do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Desenvolvido por Silvério (2015)**

O modelo de Burckhardt é um dos principais modelos utilizados para descrever a interação pneu-pavimento e serve de base a alguns modelos lineares de travagem como os que são empregues nos sistemas anti bloqueio de travagem (ABS) e ABS modificado, referidos no Subcapítulo 3.5.

Um dos objetivos principais desta dissertação consistia na verificação do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), o qual se encontra descrito nos Subcapítulos 5.2 e 5.3.

Considerando que Silvério (2015), desenvolveu o modelo em função das características das camadas superficiais dos pavimentos rodoviários, apresentou-se ao longo do Subcapítulo 5.4, a caracterização de diversas camadas de desgaste. A sua caracterização superficial (textura e coeficiente de atrito) foi possível com recurso a ensaios de campo ou de dados retirados da bibliografia. Para cada tipo de camada de desgaste em análise, foram traçadas as curvas  $\mu$ -s pela aplicação direta das formulações desenvolvidas por Silvério (2015), para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , referentes à camada de desgaste em betão betuminoso denso.

Ao avaliar o comportamento das curvas  $\mu$ -s, em cada camada de desgaste, constatou-se que ao aplicar diretamente o modelo de interação desenvolvido por Silvério (2015), as curvas  $\mu$ -s apresentaram um comportamento idêntico às curvas da camada de desgaste em BB. E mais, para além de se aproximarem às curvas do modelo de referência, ainda se verificou em todas que, ao longo do deslizamento, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas aproxima-se do valor de coeficiente de atrito em situações secas.

Para finalizar, as formulações desenvolvidas para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , do modelo de interação desenvolvido para camada de desgaste em BB por Silvério (2015), foram bem concebidas, uma vez que se verificou a exequibilidade desse modelo nas diversas camadas de desgaste sem recorrer a ajustes de coeficientes.

## **6 Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado Baseado em Parâmetros Reais do Pavimento**

De acordo com o demonstrado no Capítulo 5, as formulações desenvolvidas por Silvério (2015), para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  foram bem expressas em função da textura e do coeficiente de atrito, no Modelo de Interação Pneu-Pavimento baseado em parâmetros reais do pavimento para a camada de desgaste em BB. De tal forma que, quando aplicado nas diferentes camadas de desgaste, estas evidenciaram o mesmo comportamento do modelo na camada de desgaste em BB desenvolvido por Silvério (2015).

Outra forma de quantificar os valores de textura superficial e coeficiente de atrito pode ser por meio de um índice designado de IFI (*International Friction Index*), elaborado pelo Comité de Características de Superfície da PIARC, retratado no Subcapítulo 2.2.5.

Uma vez que em Silvério (2015), os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  se encontram definidos em função da textura e do coeficiente de atrito, assim como IFI, levantou-se a questão de serem adaptáveis à utilização direta de IFI, efetuando os ajustes necessários dos coeficientes.

Neste capítulo é apresentado um modelo padronizado, desenvolvido com base no Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), apresentado no Capítulo 5, utilizando o índice IFI em vez dos valores de aderência, com vista à padronização do modelo desenvolvido por Silvério (2015).

### **6.1 Primeira Abordagem na Obtenção dos Parâmetros de Burckhardt em Função de IFI**

O cálculo do valor de IFI, de acordo com o procedimento ASTM, encontra-se explícito no Subcapítulo 2.2.5, considerando os dados dos ensaios apresentados ao longo do Capítulo 5. Os valores dos ensaios utilizados, para o cálculo do valor de IFI, foram os valores médios dos ensaios caracterizadores. De notar que o cálculo do valor de IFI difere de acordo com o tipo de ensaios e equipamentos utilizados. De acordo com Fuentes *et al.* (2012), o valor da macrotextura encontra-se limitado a 1,50 mm, o que não interferiu com os dados utilizados, uma vez que os valores obtidos para a macrotextura foram inferiores a esse.

Numa primeira abordagem, de modo a simplificar o estudo elaborado, foram analisados os pavimentos apenas com camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso (BB), isto é, utilizaram-se os dados dos ensaios de caracterização superficiais referentes ao Troço BB

obtidos de Silvério (2015) e ao Troço 2 (2019). As restantes camadas de desgaste foram abordadas no fim de alcançar as formulações finais do modelo padronizado.

A tabela que apresenta os valores resultantes do cálculo de IFI para o Troço BB obtido de Silvério (2015), encontra-se disponível na Tabela A.VI do Anexo A e as tabelas que apresentam os valores resultantes do cálculo de IFI para o Troço 2 (2019), nos anos de ensaios de 2009 e 2014, encontram-se disponíveis nas Tabelas B.VII e B.VIII do Anexo B. Considerou-se o Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), para uma camada de desgaste em BB, e fez-se a substituição direta do valor “GN” pelo valor “IFI” nas Equações 5.1, 5.2 e 5.3. A formulação com a substituição direta, para cada um dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , apresenta-se em seguida pelas Equações 6.1 e 6.2, o parâmetro  $C_2$  não depende de GN logo a sua expressão ainda se mantém igual à Equação 5.2 dada no Capítulo 5.

De modo a facilitar a identificação das formulações, sem criar ambiguidade no caso de comparações, considere-se que a formulação desenvolvida por Silvério (2015), tem a designação de Formulação 1 e a formulação proposta em seguida tem a designação de Formulação 2.

$$C_1 = 2IFI - \frac{h_w}{2} \quad (6.1)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (5.2)$$

$$C_3 = \frac{4}{5}(n^2IFI) + \frac{h_w}{3MTD} \quad (6.2)$$

Onde:

*IFI* [adimensional] – *International Friction Index*;

$h_w$  [mm] – Altura de água no pavimento;

*MTD* [mm] – Profundidade média da textura superficial (valor da macrotextura dado pelo ensaio da Mancha de Areia);

$n$  [adimensional] – Inverso do grau de saturação da superfície da camada de desgaste (equação 5.4).

De notar que, em pavimento definido como pavimento molhado, a altura de água utilizada é igual à do ensaio do *GripTester*, isto é,  $h_w = 0,6$  mm.

O estudo das curvas  $\mu$ -s para cada um dos conjuntos de dados fornecidos para BB é apresentado em seguida.

### 6.1.1 Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 1 e a Formulação 2, para o Troço BB

A tabela que apresenta os valores resultantes do cálculo de IFI para o Troço BB, encontra-se disponível na Tabela A.V do Anexo A. Na Tabela 6.1 apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  calculados pela Formulação 2.

Tabela 6.1 – Valores dos parâmetros da Formulação 2 para o Troço BB

Troço BB	BB molhado				BB seco			
	$C_1$	$C_2$	n	$C_3$	$C_1$	$C_2$	n	$C_3$
BB-A	0,465	27,606	0,413	0,248	0,765	27,606	1,000	0,306
BB-B	0,539	27,486	0,411	0,253	0,839	27,486	1,000	0,336
BB-C	0,456	26,219	0,382	0,250	0,756	26,219	1,000	0,302
BB-D	0,498	24,314	0,334	0,258	0,798	24,314	1,000	0,319

Os gráficos 6.1 a 6.4 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Burckhardt (Modelo de Referência), a Formulação 1 (Silvério, 2015), e a Formulação 2.

As curvas  $\mu$ -s identificadas por “via A – BB molhado” e “via A – BB seco” pertencem à Formulação 1, já as curvas identificadas por “via A -IFI- BB molhado” e “via A -IFI- BB seco” pertencem à Formulação 2. Desta forma foi possível comparar as diferenças dos resultados obtidos e identificar quais as discrepâncias entre valores e possíveis ajustes a realizar.

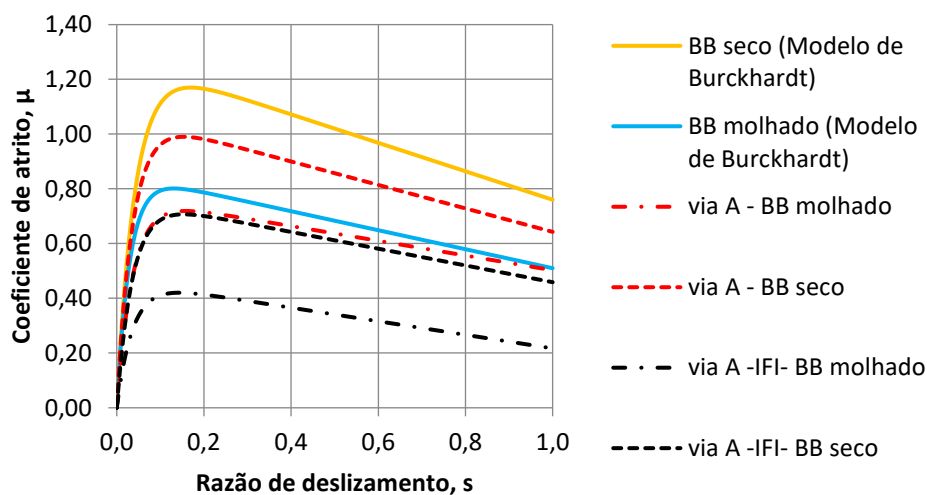


Gráfico 6.1 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço BB

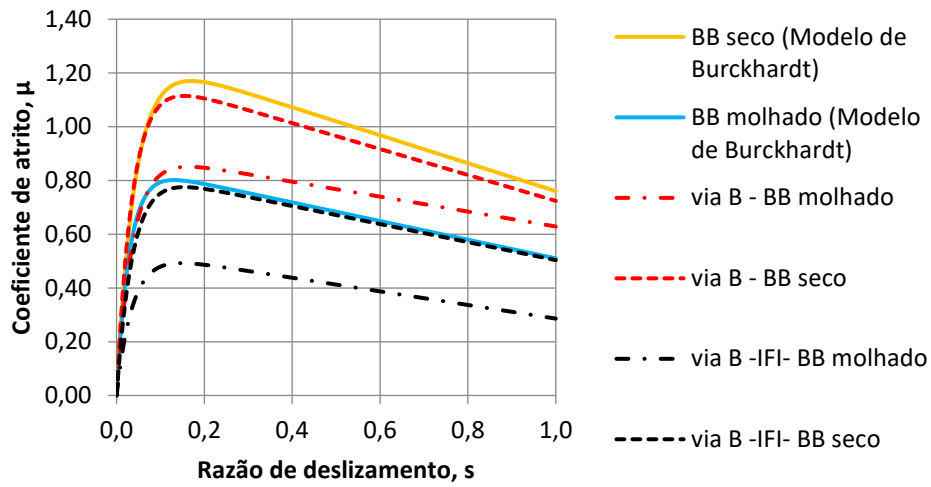


Gráfico 6.2 – Comparação das curvas  $\mu$ - $s$ , das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço BB

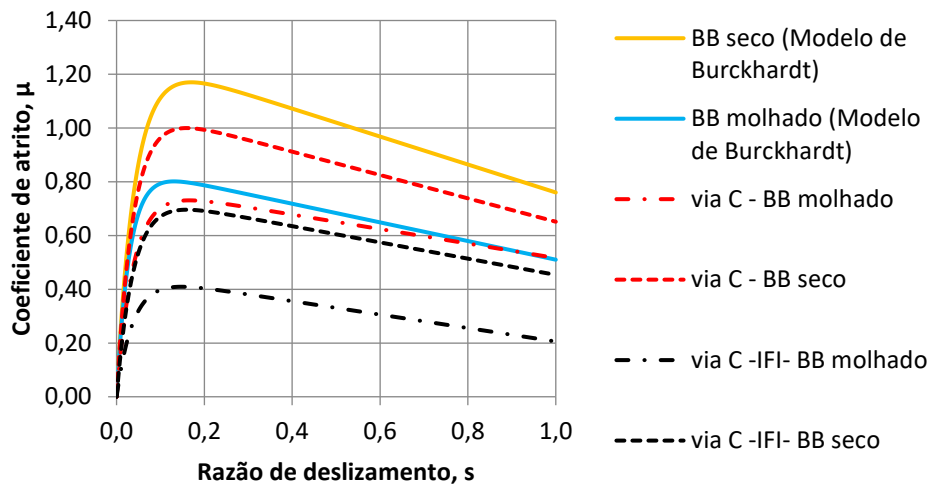


Gráfico 6.3 – Comparação das curvas  $\mu$ - $s$ , das formulações desenvolvidas, para a Via C do Troço BB



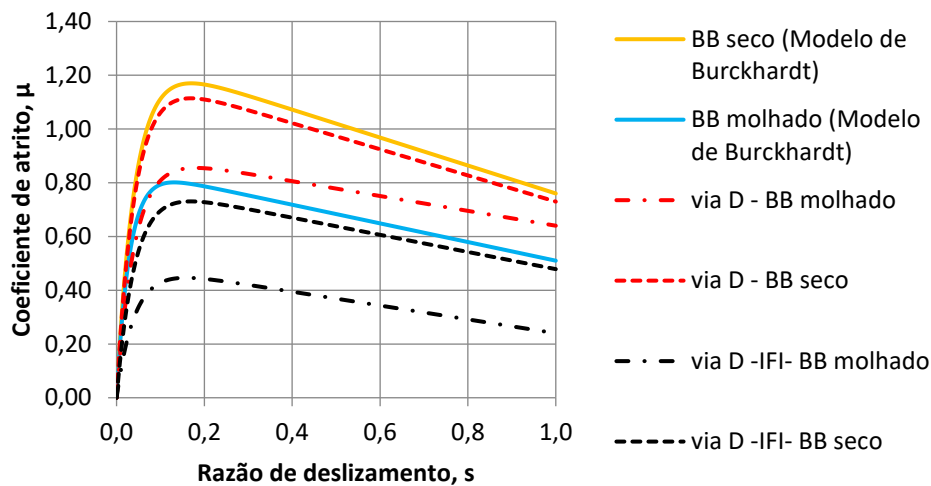


Gráfico 6.4 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via D do Troço BB

Ao analisar os gráficos, constatou-se que os valores obtidos pela Formulação 2 foram mais baixos que os da Formulação 1 (modelo desenvolvido por Silvério, 2015), algo que era possível de antever devido ao facto de que, o valor obtido de IFI é mais baixo quando comparado diretamente com o valor de GN.

À primeira vista, as curvas  $\mu$ -s de IFI aparentam ser paralelas às curvas do Modelo de Referência, ao contrário do que acontece para a Formulação 1 em que, ao longo do deslizamento, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas aproxima-se do valor de coeficiente de atrito em situações secas. Este efeito pode ser explicado pelo facto de que, como valor calculado para IFI já considera a influência da macrotextura, quando se aplica IFI no parâmetro  $C_3$  da Formulação 2, a primeira parte onde apenas era tido em conta o valor do coeficiente de atrito, agora também está incluído o efeito da textura superficial.

De forma a aproximar as curvas IFI às curvas do Modelo de Burckhardt (modelo de referência), é necessário recordar as definições teóricas dos parâmetros referidas no Capítulo 5:  $C_1$  é o parâmetro que determina o valor máximo da curva de atrito;  $C_2$  é o parâmetro que configura a forma da curva de atrito e, por fim,  $C_3$  é o parâmetro que define a diferença entre o valor máximo da curva de atrito e o valor de razão de deslizamento igual a 1.

Assim sendo, concluiu-se que o primeiro parâmetro a ajustar é o parâmetro  $C_1$  e depois de traçadas as curvas será verificada a necessidade, ou não, de ajustar os restantes parâmetros.

### 6.1.2 Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 1 e a Formulação 2, para o Troço 2 (BB)

As tabelas que apresentam os valores resultantes do cálculo de IFI para o Troço 2 encontram-se disponíveis nas Tabelas B.VII e B.VIII do Anexo B. Na Tabela 6.2 apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  calculados pela Formulação 2, para os anos em análise de 2009 e 2014. Relembrar que, como os ensaios de medição de textura deste troço foram obtidos por equipamentos laser, o valor a utilizar no cálculo dos parâmetros no lugar de “MTD” é o valor de “ETD”, como referido no Subcapítulo 5.4.

Tabela 6.2 – Valores dos parâmetros da Formulação 2 para o Troço 2 em BB, nos diferentes anos de ensaios

Troço 2 (2009)	BB molhado				BB seco			
	$C_1$	$C_2$	n	$C_3$	$C_1$	$C_2$	n	$C_3$
T2-A	0,493	22,923	0,293	0,263	0,793	22,923	1,000	0,317
T2-B	0,507	23,058	0,297	0,263	0,807	23,058	1,000	0,323
Troço 2 (2014)	BB molhado				BB seco			
	$C_1$	$C_2$	n	$C_3$	$C_1$	$C_2$	n	$C_3$
T2-A	0,465	24,667	0,343	0,255	0,765	24,667	1,000	0,306
T2-B	0,441	24,408	0,336	0,255	0,741	24,408	1,000	0,297

Os gráficos 6.5 a 6.8 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Burckhardt (Modelo de Referência), a Formulação 1 (Silvério, 2015), e a Formulação 2.

As curvas  $\mu$ -s identificadas por “via A – BB molhado” e “via A – BB seco” pertencem à Formulação 1, já as curvas identificadas por “via A -IFI- BB molhado” e “via A -IFI- BB seco” pertencem à Formulação 2.

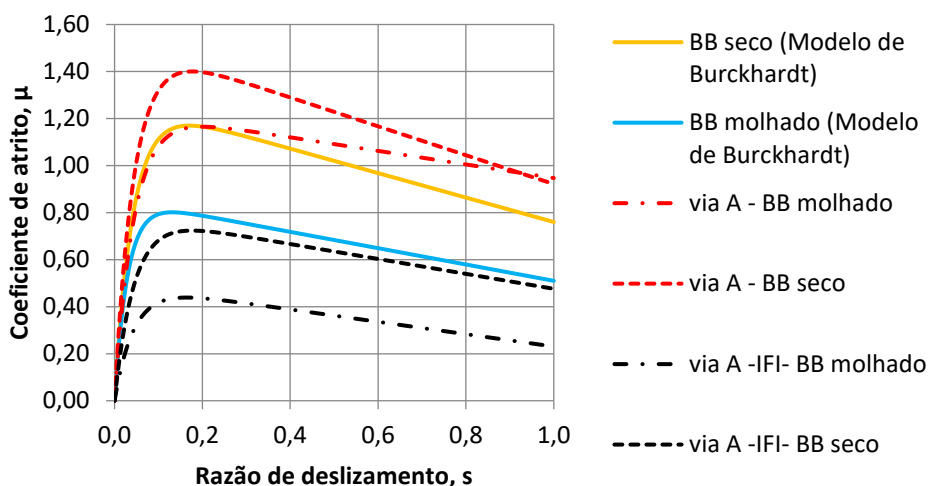


Gráfico 6.5 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

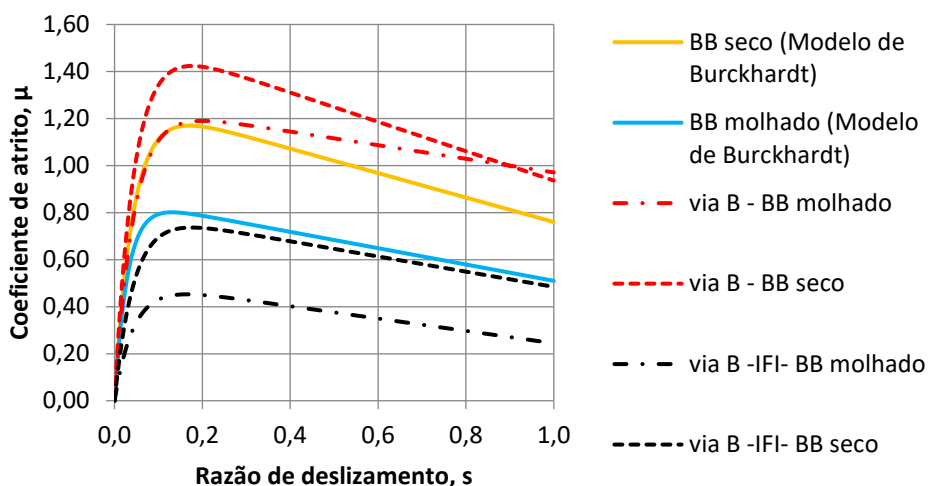


Gráfico 6.6 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

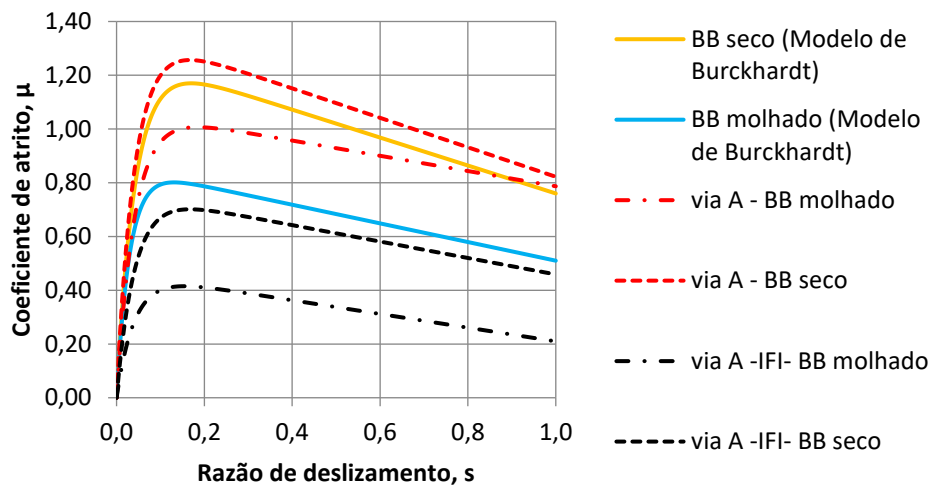


Gráfico 6.7 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

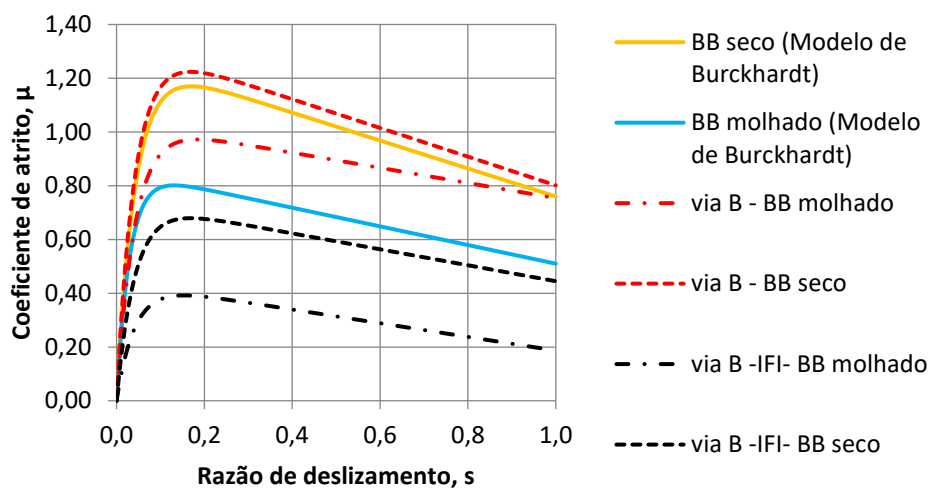


Gráfico 6.8 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

Ao analisar os gráficos, assim como sucedeu no caso anterior do Troço BB, constatou-se que os valores obtidos pela Formulação 2 foram mais baixos que os da Formulação 1. À primeira vista, as curvas  $\mu$ -s de IFI aparentam ser paralelas às curvas do Modelo de Referência, pelo mesmo motivo já descrito. Uma vez que o próximo passo seria o de aproximar estas curvas de IFI às curvas do Modelo de Referência, confirma-se a necessidade do ajuste do parâmetro  $C_1$ .

## 6.2 Aproximação das Curvas $\mu$ -s de IFI ao Modelo de Burckhardt, pelo Ajuste de $C_1$

Como referido no Subcapítulo 6.1, a primeira aproximação das curvas  $\mu$ -s, obtidas com os valores de IFI, seria realizando o ajuste do parâmetro  $C_1$ . Após algumas tentativas, de forma a perceber qual o melhor ajuste, chegou-se à Equação 6.3, os restantes parâmetros mantiveram as suas equações. Pelo motivo já referido no Subcapítulo 6.2, a formulação proposta em seguida tem a designação de Formulação 3.

$$C_1 = 3,2IFI - \frac{h_w}{2} \quad (6.3)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (5.2)$$

$$C_3 = \frac{4}{5}(n^2IFI) + \frac{h_w}{3MTD} \quad (6.2)$$

Onde:

*IFI* [adimensional] – *International Friction Index*;

$h_w$  [mm] – Altura de água no pavimento;

*MTD* [mm] – Profundidade média da textura superficial (valor da macrotextura dado pelo ensaio da Mancha de Areia);

$n$  [adimensional] – Inverso do grau de saturação da superfície da camada de desgaste (equação 5.4).

De notar que, em pavimento definido como pavimento molhado, a altura de água utilizada é igual à do ensaio do *GripTester*, isto é,  $h_w = 0,6$  mm.

O estudo das curvas  $\mu$ -s para cada um dos conjuntos de dados fornecidos para BB é apresentado em seguida.

### 6.2.1 Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 2 e a Formulação 3, para o Troço BB

Na Tabela D.I, disponível no Anexo D, apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  calculados pela Formulação 3.

Os gráficos 6.9 a 6.12 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Burckhardt (Modelo de Referência), a Formulação 2 e a Formulação 3.

As curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado” e “via A -IFI- BB seco” pertencem à Formulação 2 e as curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado Aprox.” e “via A -IFI- BB seco Aprox.” pertencem à Formulação 3.

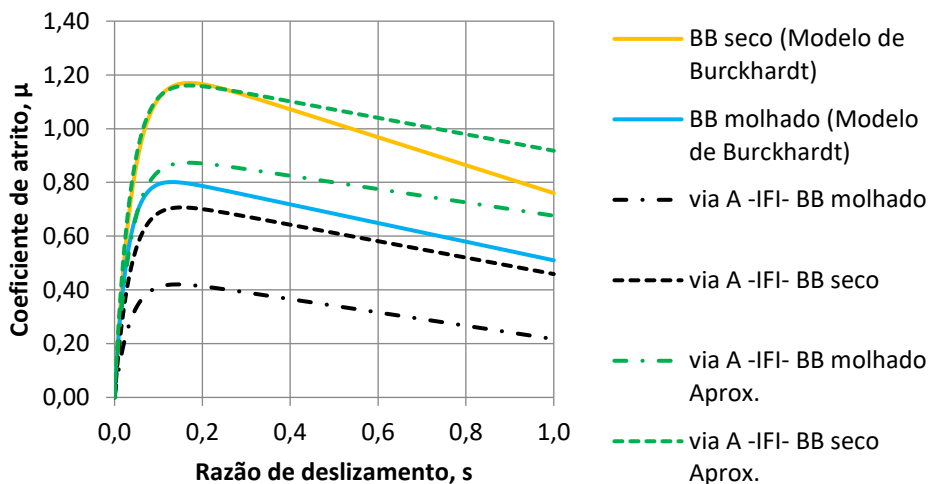


Gráfico 6.9 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço BB

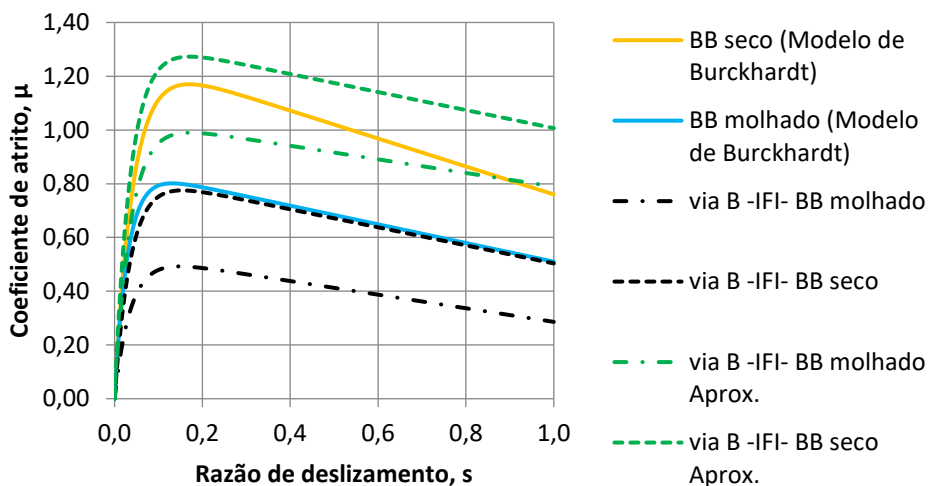


Gráfico 6.10 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço BB

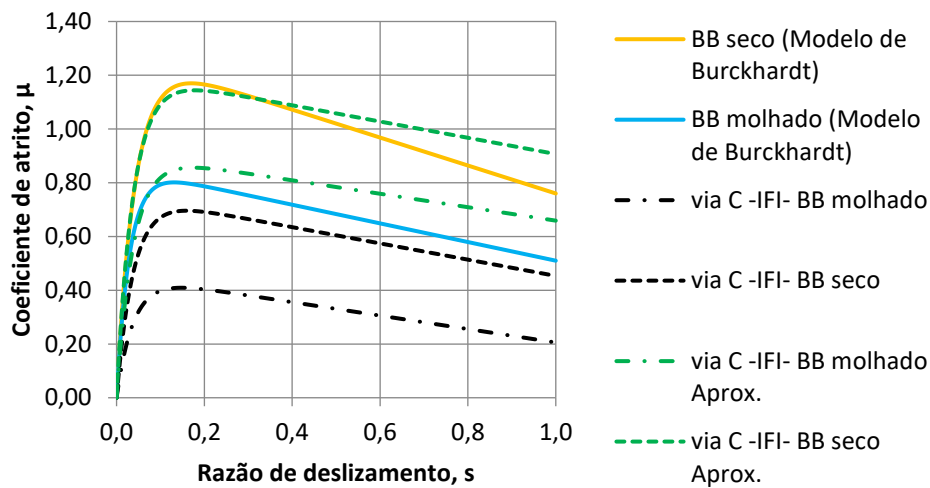


Gráfico 6.11 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via C do Troço BB

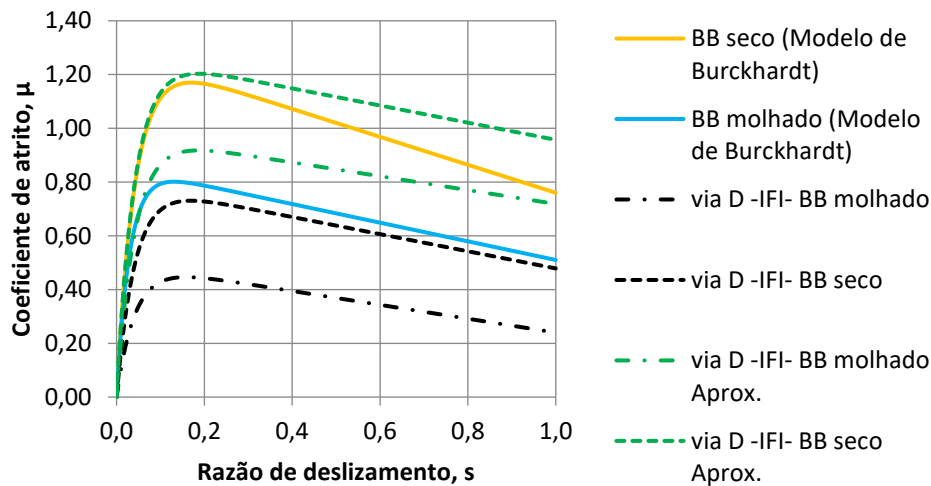


Gráfico 6.12 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via D do Troço BB

Ao traçar as curvas  $\mu$ -s do ajuste na formulação do parâmetro  $C_1$ , verifica-se que na maioria das vias consideradas com camada de desgaste seca, as curvas da Formulação 3 se encontram muito próximas do Modelo de Referência de BB seco, que era o desejado. Para as vias com camada de desgaste molhada, as curvas  $\mu$ -s encontram-se acima do Modelo de Referência de BB molhado, o que é bom.

Quanto à forma das curvas de atrito, também estas são muito semelhantes às curvas do Modelo de Referência, ou seja, o parâmetro  $C_2$  não necessita ser ajustado, pelo menos para já. A maior divergência em relação ao Modelo de Referência, diz respeito à diferença entre

o valor máximo da curva de atrito e o valor de razão de deslizamento igual a 1. O parâmetro respeitante a essa diferença é o parâmetro  $C_3$ , no qual será efetuado o próximo ajuste.

### 6.2.2 Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 2 e a Formulação 3, para o Troço 2 (BB)

Na Tabela D.IV, disponível no Anexo D, apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  calculados pela Formulação 3, para os anos em análise de 2009 e 2014.

Os gráficos 6.13 a 6.16 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Burckhardt (Modelo de Referência), a Formulação 2 e a Formulação 3.

As curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado” e “via A -IFI- BB seco” pertencem à Formulação 2 e as curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado Aprox.” e “via A -IFI- BB seco Aprox.” pertencem à Formulação 3.

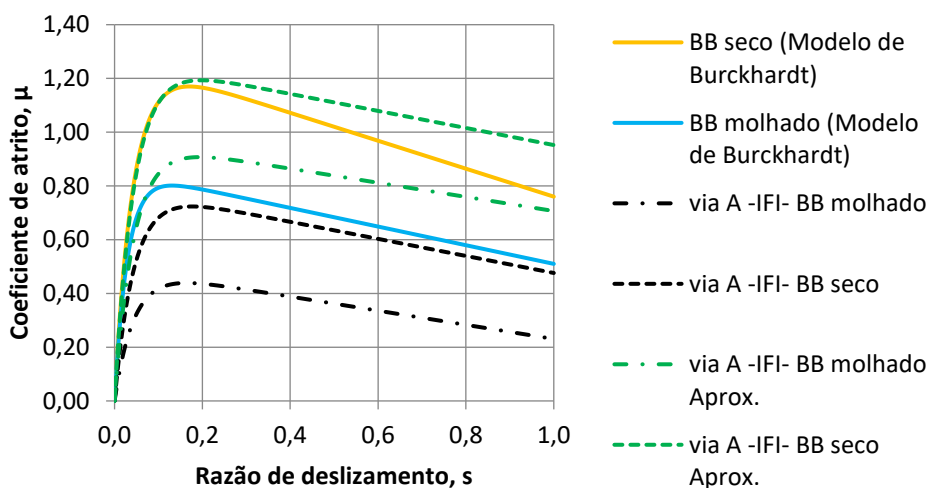


Gráfico 6.13 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009



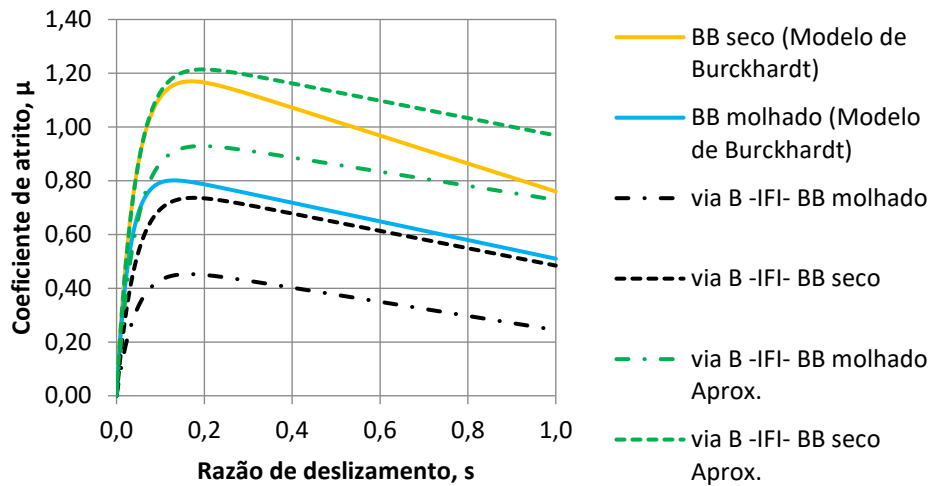


Gráfico 6.14 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

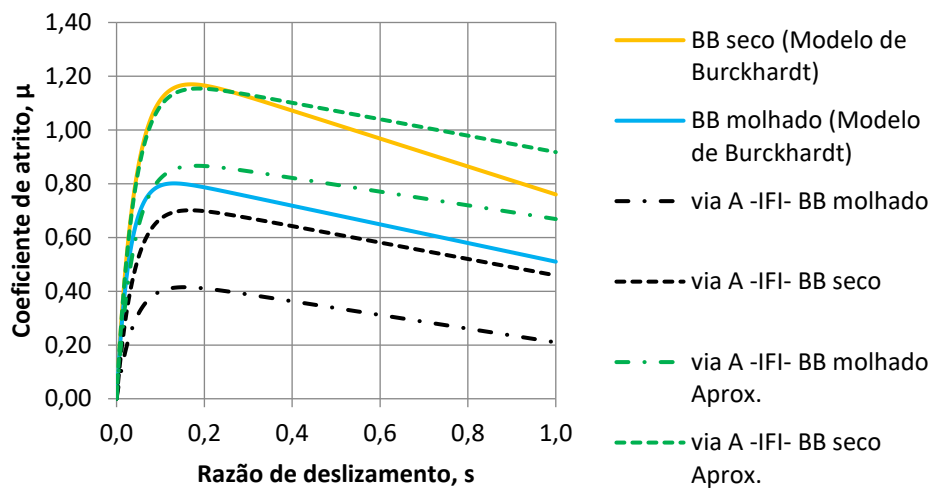


Gráfico 6.15 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

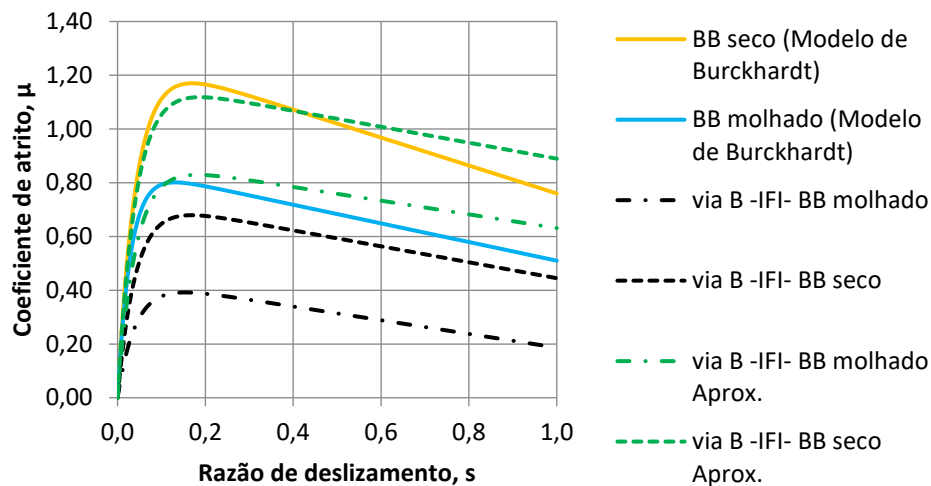


Gráfico 6.16 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

Considerando as curvas da formulação 3, verifica-se que a aproximação às curvas do Modelo de Referência se mantém.

Quanto à forma das curvas de atrito, também estas são muito semelhantes às curvas do Modelo de Referência, ou seja, o parâmetro  $C_2$  não necessita ser ajustado, pelo menos para já. A maior divergência em relação ao modelo de referência, diz respeito à diferença entre o valor máximo da curva de atrito e o valor de razão de deslizamento igual a 1. O parâmetro respeitante a essa diferença é o parâmetro  $C_3$ , no qual será efetuado o próximo ajuste, assim como referido anteriormente para no caso do Troço BB.

### 6.3 Aproximação das Curvas $\mu$ -s de IFI ao Modelo de Burckhardt, pelo Ajuste de $C_3$

Efetuada a primeira aproximação das curvas  $\mu$ -s obtidas com os valores de IFI, concluiu-se que seria necessário agora o ajuste do parâmetro  $C_3$ . Após algumas tentativas, chegou-se à Equação 6.5, considerando que se teve de aumentar o valor de  $C_3$  para que o valor do coeficiente de atrito,  $\mu$ , diminuísse, chegando à aproximação desejada. Os restantes parâmetros mantiveram as suas equações. Pelo motivo já referido no Subcapítulo 6.2, a formulação proposta em seguida tem a designação de Formulação 4.

$$C_1 = 3,2IFI - \frac{h_w}{2} \quad (6.4)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (5.2)$$

$$C_3 = \frac{5}{4}(n^2IFI) + \frac{h_w}{2MTD} \quad (6.5)$$

Onde:

*IFI* [adimensional] – *International Friction Index*;

$h_w$  [mm] – Altura de água no pavimento;

*MTD* [mm] – Profundidade média da textura superficial (valor da macrotextura dado pelo ensaio da Mancha de Areia);

$n$  [adimensional] – Inverso do grau de saturação da superfície da camada de desgaste (equação 5.4).

De notar que, em pavimento definido como pavimento molhado, a altura de água utilizada é igual à do ensaio do *GripTester*, isto é,  $h_w = 0,6$  mm.

O estudo das curvas  $\mu$ -s para cada um dos conjuntos de dados fornecidos para BB é apresentado em seguida.

### **6.3.1 Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 3 e a Formulação 4, para o Troço BB**

Na Tabela D.II, disponível no Anexo D, apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  calculados pela Formulação 4.

Os gráficos 6.17 a 6.20 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Burckhardt (Modelo de Referência), a Formulação 3 e a Formulação 4.

As curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado Aprox.” e “via A -IFI- BB seco Aprox.” pertencem à Formulação 3 e as curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado Aprox.2” e “via A -IFI- BB seco Aprox.2” pertencem à Formulação 4.

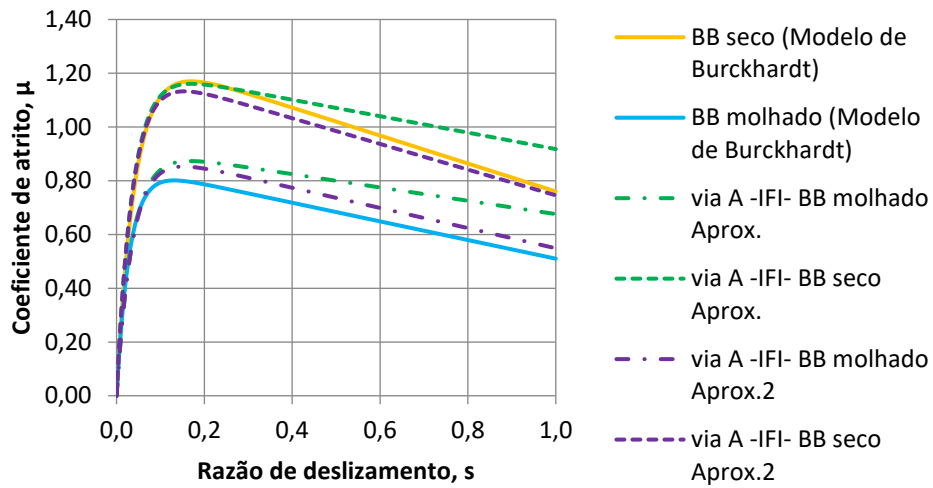


Gráfico 6.17 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço BB

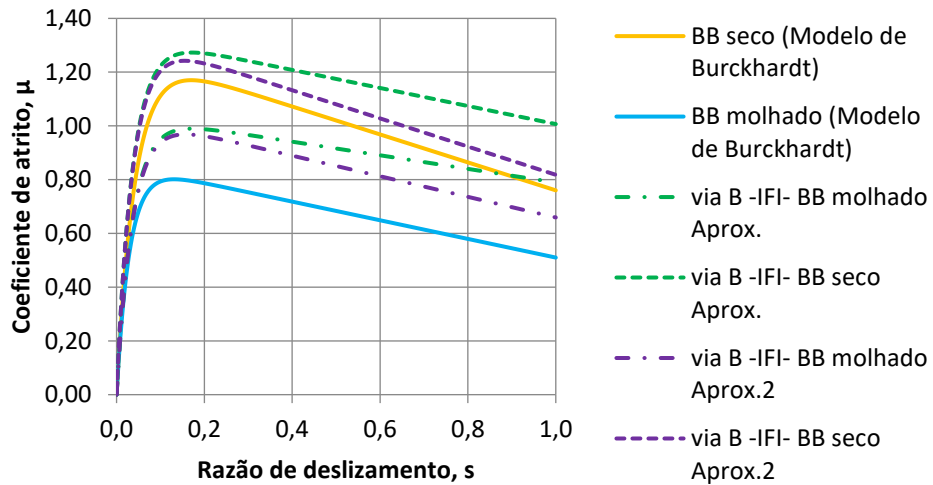


Gráfico 6.18 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço BB

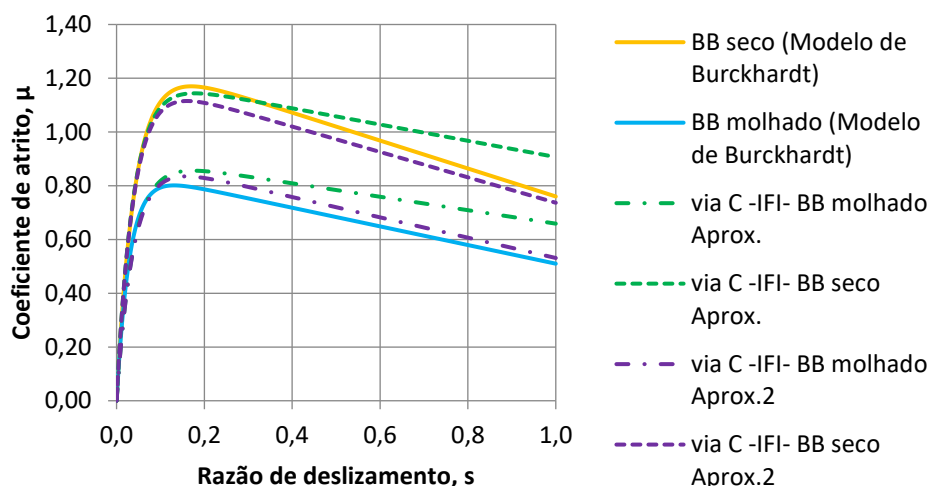


Gráfico 6.19 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via C do Troço BB

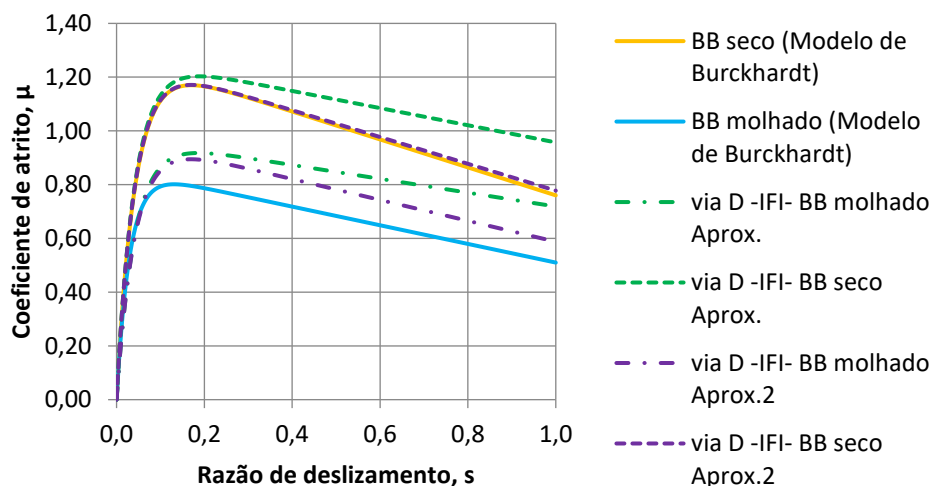


Gráfico 6.20 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via D do Troço BB

Como desejado, verifica-se a aproximação das curvas  $\mu$ -s de IFI ao Modelo de Referência. Para a camada de desgaste considerada seca, a aproximação da curva de IFI à curva do Modelo de Referência BB seco, é maior do que no caso em que se considera a camada de desgaste molhada, ainda assim, as curvas de IFI para a camada de desgaste molhada ainda se encontram acima das curvas do Modelo de Referência de BB molhado.

### 6.3.2 Comparação de Resultados Obtidos, entre a Formulação 3 e a Formulação 4, para o Troço 2 (BB)

Na Tabela D.V, disponível no Anexo D, apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  calculados pela formulação 4, para os anos em análise de 2009 e 2014.

Os gráficos 6.21 a 6.24 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Burckhardt (Modelo de Referência), a Formulação 3 e a Formulação 4.

As curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado Aprox.” e “via A -IFI- BB seco Aprox.” pertencem à Formulação 3 e as curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado Aprox.2” e “via A -IFI- BB seco Aprox.2” pertencem à Formulação 4.

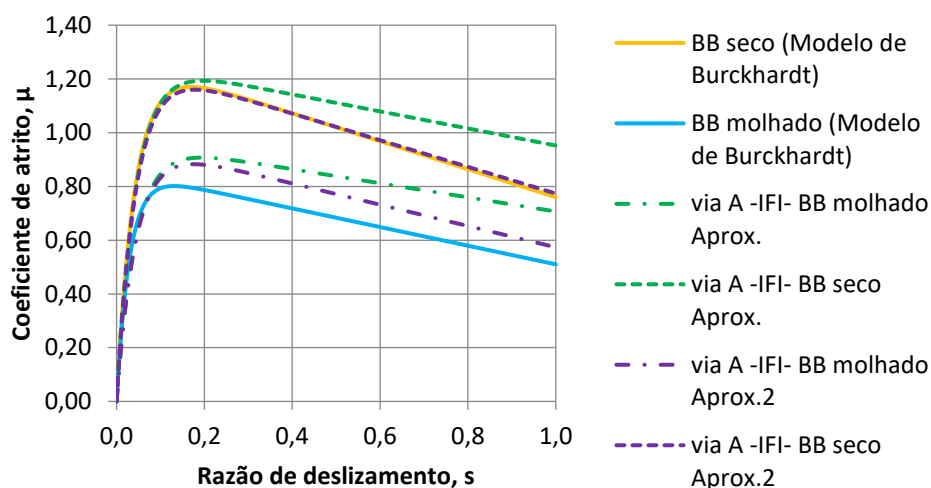


Gráfico 6.21 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

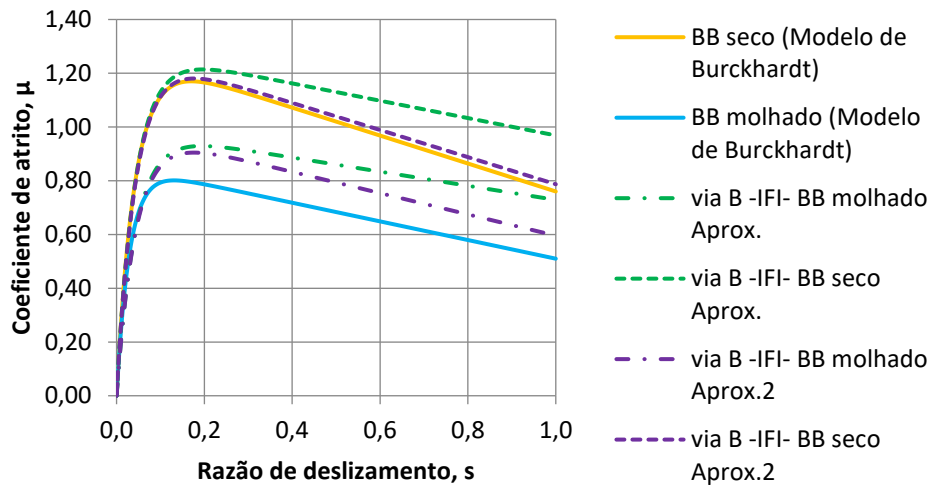


Gráfico 6.22 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

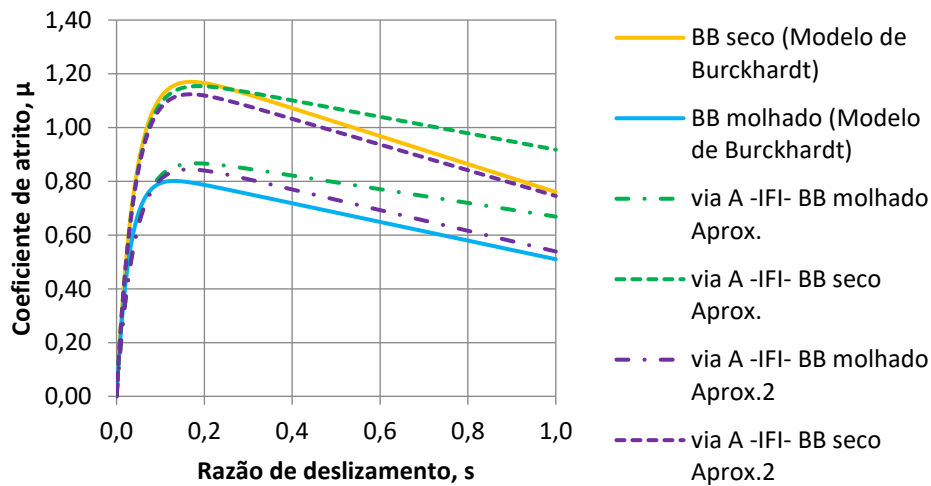


Gráfico 6.23 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

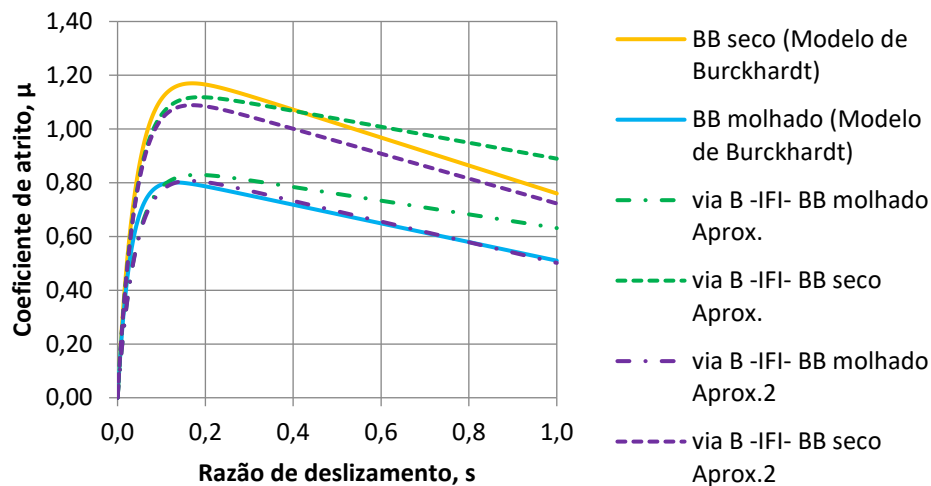


Gráfico 6.24 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

Para a análise do Troço 2, foram apresentados os gráficos das curvas  $\mu$ -s comparando a Formulação 3 e a Formulação 4, nos anos 2009 e 2014, de modo a analisar o comportamento das curvas pormenorizadamente. Como desejado, verifica-se a aproximação das curvas  $\mu$ -s de IFI ao Modelo de Referência.

Ao traçar as curvas  $\mu$ -s correspondentes aos dados registados em 2009 (três anos depois do Troço 2 ter sido aberto ao tráfego), onde se pode dizer que o pavimento está como novo, verificou-se que, ao longo do deslizamento, o valor de coeficiente de atrito em situações molhadas aproxima-se do valor de coeficiente de atrito em situações secas. Devido à influência que a macrotextura tem no cálculo de IFI, esse efeito vai diminuindo e é observável nos dados registados em 2014.

Relativamente à aproximação ao Modelo de Referência, que as curvas IFI vão apresentado ao longo dos anos, é boa e, as curvas de IFI para a camada de desgaste molhada ainda se encontram acima das curvas do Modelo de Referência de BB molhado. O que significa que as formulações aplicadas com IFI, até este ponto, cumprem as condições necessárias ao bom funcionamento do modelo padronizado (em desenvolvimento), de acordo com os princípios considerados por Silvério (2015), no desenvolvimento do Modelo de Interação Pneu-Pavimento.



## 6.4 Padronização dos Parâmetros do Modelo de Burckhardt em Função de IFI

A aproximação das curvas  $\mu$ -s, com os valores de “IFI” em vez de “GN”, foi bem conseguida.

Para finalizar as formulações em função de IFI, com objetivo de se ter todos os parâmetros dependentes da mesma variável, foi necessário fazer a passagem de “MTD” ao valor equivalente de “IFI”, e verificar se as equações obtidas na Formulação 4, agora só em função de IFI, ainda cumprem os mesmos princípios do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015).

Dito isto, foi comparado o valor da macrotextura,  $T_x$ , com o valor de IFI. Os resultados da correlação de valores de “IFI” a valores de “ $T_x$ ” apresentam-se na Tabela 6.3, tanto para o Troço BB como para o Troço 2 (BB).

Tabela 6.3 – Resultados da correlação de valores de “IFI” a valores de “ $T_x$ ”, para uma camada de desgaste em BB

Estrada	Designação	IFI	$T_x$ (mm)	Correlação	Média
<b>Troço BB</b>	<b>BB-A</b>	0,382	1,022	2,67	2,48
	<b>BB-A</b>	0,420	1,018	2,43	
	<b>BB-A</b>	0,378	0,971	2,57	
	<b>BB-A</b>	0,399	0,901	2,26	
<b>Troço 2 (2009)</b>	<b>T2-A</b>	0,397	0,849	2,14	2,13
	<b>T2-B</b>	0,404	0,854	2,12	
<b>Troço 2 (2014)</b>	<b>T2-A</b>	0,382	0,914	2,39	2,41
	<b>T2-B</b>	0,371	0,904	2,44	

Pela análise da tabela, verifica-se que no caso dos dados registados no ano 2014 para o Troço 2, a correlação da macrotextura,  $T_x$ , com o valor do IFI é muito similar à do Troço BB.

O valor considerado para a correlação entre “ $T_x$ ” e “IFI” foi de 2,50, isto é, na Formulação 4 procedeu-se à substituição de:  $MTD = 2,50 \times IFI$ . Para os parâmetros  $C_2$ ,  $C_3$  e  $n$ , que dependem de MTD, foram alteradas as suas equações, já a equação do parâmetro  $C_1$  vai manter uma vez que não depende de MTD. Pelo motivo já referido no Subcapítulo 6.2, a formulação proposta em seguida tem a designação de Formulação 5.

$$C_1 = 3,2IFI - \frac{h_w}{2} \quad (6.3)$$

$$C_2 = 67,5IFI \quad (6.5)$$

$$C_3 = \frac{5}{4}(n^2IFI) + \frac{h_w}{5IFI} \quad (6.6)$$

$$n = \frac{1}{\gamma} = \frac{(2,5IFI - h_w)}{2,5IFI} \quad (6.7)$$

Onde:

*IFI* [adimensional] – *International Friction Index*;

$h_w$  [mm] – Altura de água no pavimento;

$n$  [adimensional] – Inverso do grau de saturação da superfície da camada de desgaste (equação 6.7).

De notar que, em pavimento definido como pavimento molhado, a altura de água utilizada é igual à do ensaio do *GripTester*, isto é,  $h_w = 0,6$  mm.

O estudo das curvas  $\mu$ -s para cada um dos conjuntos de dados fornecidos para BB é apresentado em seguida.

#### **6.4.1 Comparação de Resultados obtidos, entre a Formulação 4 e a Formulação 5, para uma Camada de Desgaste em BB**

Na Tabela D.III, disponível no Anexo D, apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  calculados pela Formulação 5, para o Troço BB.

Os gráficos 6.25 a 6.28 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Burckhardt (Modelo de Referência), a Formulação 4 e a Formulação 5.

As curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado Aprox.2” e “via A -IFI- BB seco Aprox.2” pertencem à Formulação 4 e as curvas  $\mu$ -s identificadas “via A -IFI- BB molhado Final” e “via A -IFI- BB seco Final” pertencem à Formulação 5.

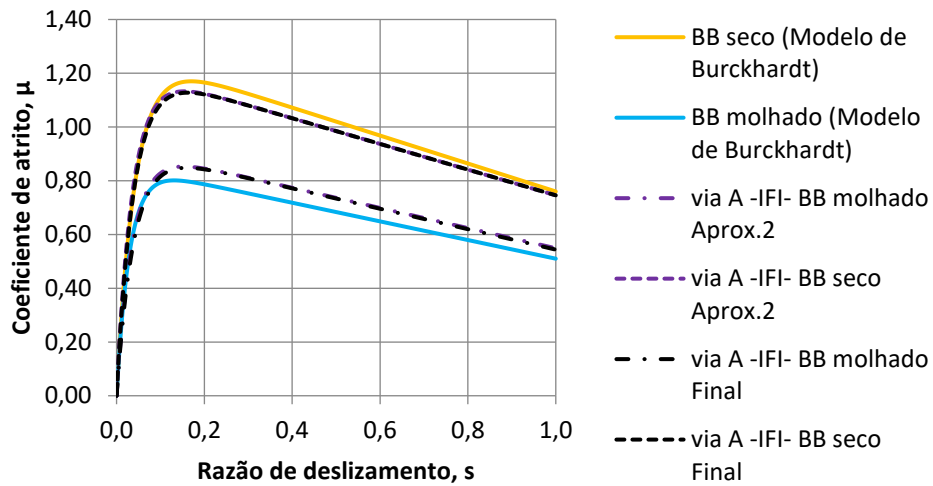


Gráfico 6.25 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço BB

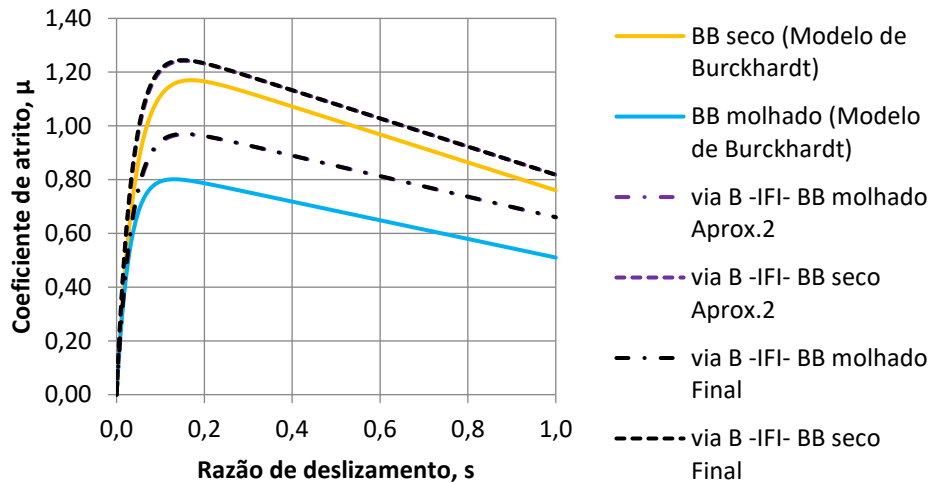


Gráfico 6.26 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B em BB

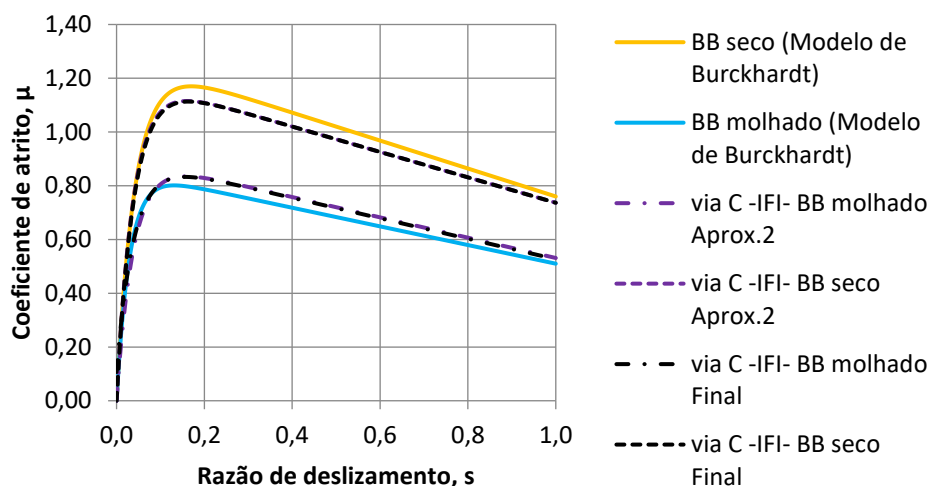


Gráfico 6.27 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via C em BB

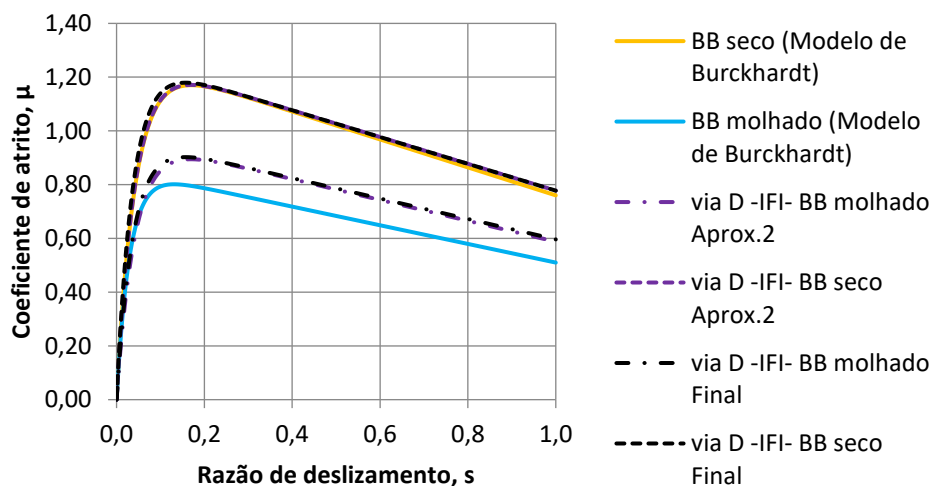


Gráfico 6.28 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via D em BB

Tal como se pode comprovar observando os gráficos, as curvas das Formulações 4 e 5, do Troço BB, encontram-se sobrepostas.

Na Tabela D.VI, disponível no Anexo D, apresentam-se os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  calculados pela Formulação 5, para o Troço 2 (BB).

Os gráficos 6.29 a 6.32 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Burckhardt (Modelo de Referência), a Formulação 4 e a Formulação 5.

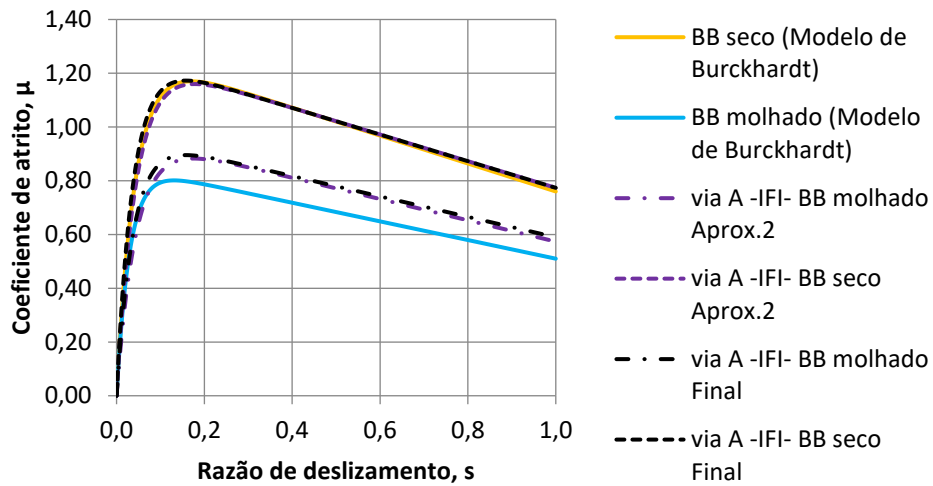


Gráfico 6.29 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

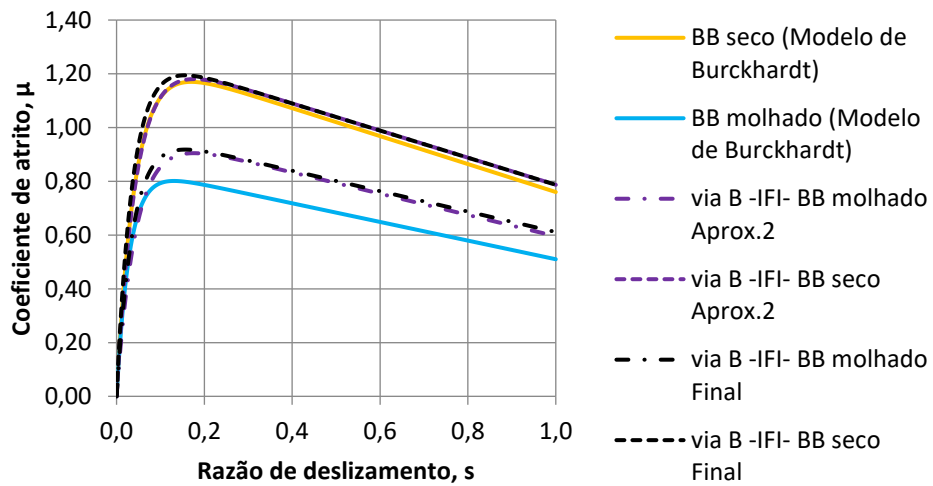


Gráfico 6.30 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

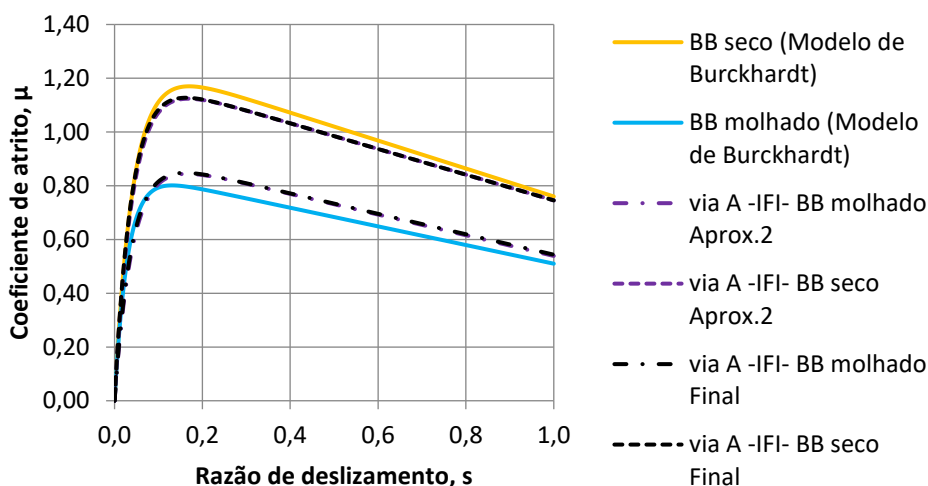


Gráfico 6.31 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

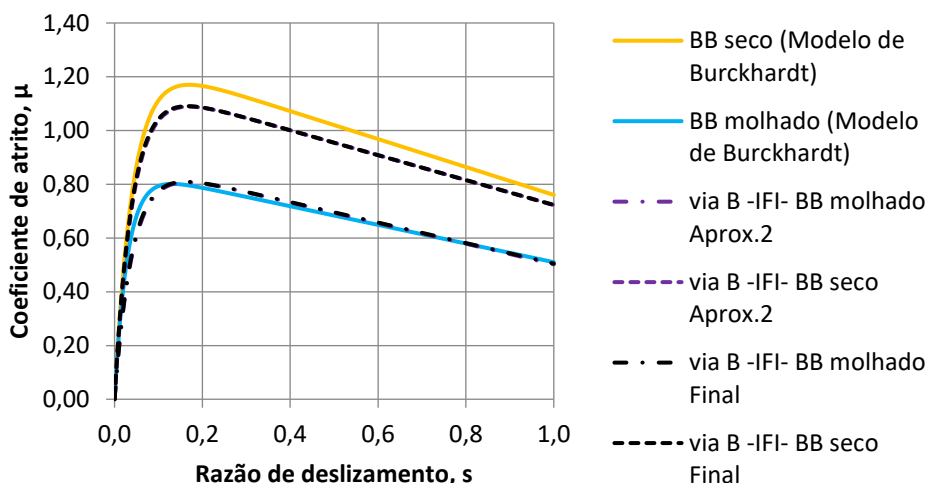


Gráfico 6.32 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, das formulações desenvolvidas, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

Tal como se pode comprovar observando os gráficos, as curvas das Formulações 4 e 5, do Troço 2 (BB), encontram-se sobrepostas.

### 6.4.2 Considerações Finais Acerca da Formulação 1 e da Formulação 5, para uma Camada de Desgaste em BB

Os gráficos 6.33 a 6.36 apresentam as curvas referentes ao Troço BB. Com estes é possível a visualização da diferença entre as curvas  $\mu$ -s do Modelo de Interação Pneu-Pavimento (desenvolvido por Silvério em 2015 – Formulação 1), o Modelo de Interação Pneu-

Pavimento Padronizado (obtido ao longo deste capítulo com camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso – Formulação 5), e o Modelo de Burckhardt (modelo de referência).

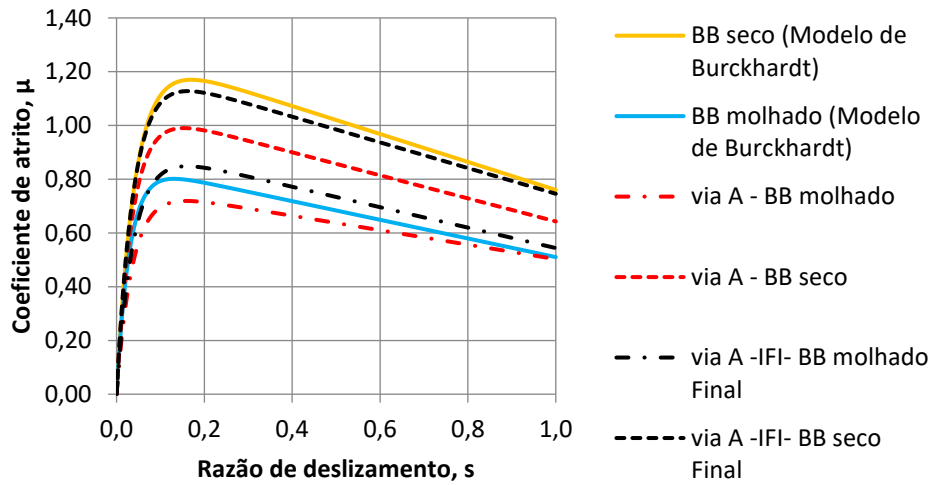


Gráfico 6.33 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço BB

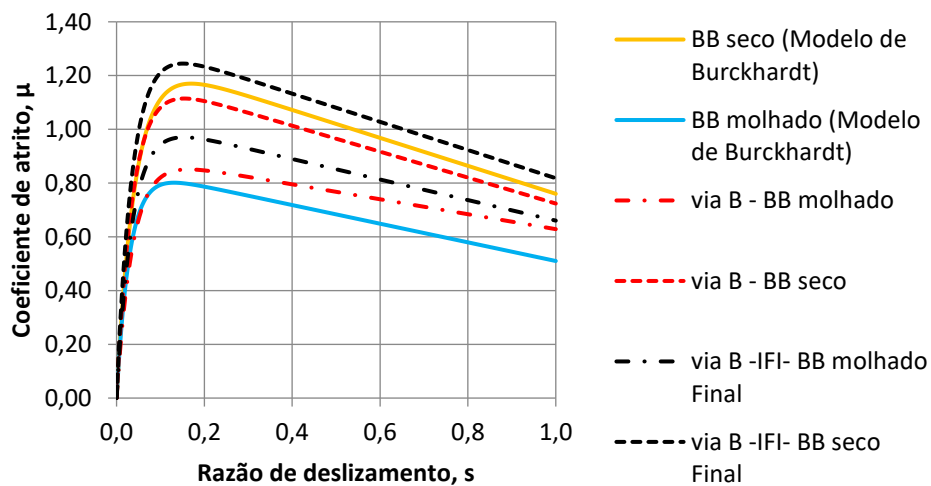


Gráfico 6.34 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço BB

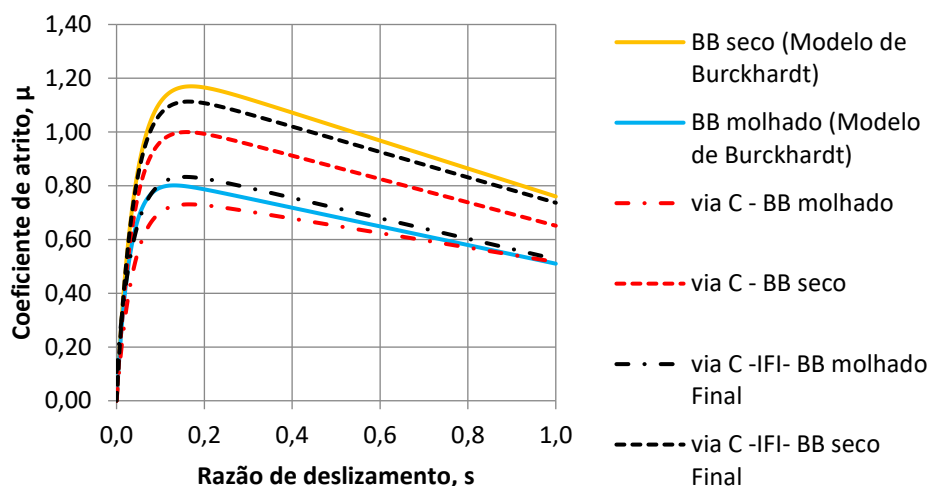


Gráfico 6.35 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via C do Troço BB

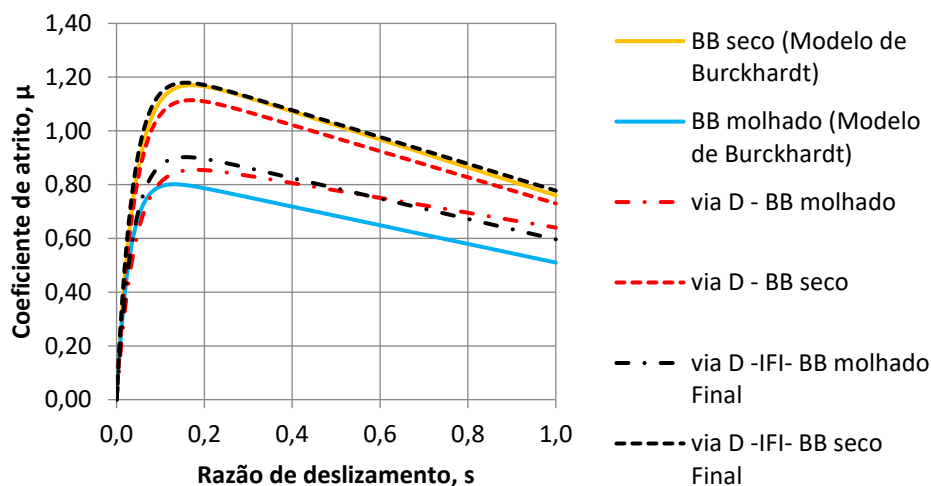


Gráfico 6.36 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via D do Troço BB

Para o Troço BB, verifica-se que o coeficiente de atrito máximo obtido nas curvas  $\mu$ -s da Formulação 1 é mais baixo que o da Formulação 5, que foi obtida por aproximação às curvas do Modelo de Burckhardt. A diferença de valor de atrito máximo, entre a Formulação 1, a Formulação 5 e o modelo de referência, apresenta-se na Tabela 6.4.



Tabela 6.4 – Diferença do valor de coeficiente de atrito máximo entre a Formulação 1, a Formulação 5 e o Modelo de Burckhardt, para o Troço BB

$\mu$ máximo	Troço BB via A		Troço BB via B	
	BB molhado	BB seco	BB molhado	BB seco
$\mu_1$ - curva Burckhardt	0,801	1,170	0,801	1,170
$\mu_2$ - curva Formulação 5	0,848	1,128	0,970	1,245
$\mu_3$ - curva Formulação 1	0,719	0,990	0,851	1,115
diferença $\mu_1$ & $\mu_2$	-0,047	0,042	-0,169	-0,075
diferença $\mu_1$ & $\mu_3$	0,082	0,180	-0,049	0,055

$\mu$ máximo	Troço BB via C		Troço BB via D	
	BB molhado	BB seco	BB molhado	BB seco
$\mu_1$ - curva Burckhardt	0,801	1,170	0,801	1,170
$\mu_2$ - curva Formulação 5	0,833	1,113	0,902	1,179
$\mu_3$ - curva Formulação 1	0,731	1,000	0,855	1,114
diferença $\mu_1$ & $\mu_2$	-0,032	0,057	-0,101	-0,009
diferença $\mu_1$ & $\mu_3$	0,071	0,170	-0,054	0,056

Pela avaliação das diferenças obtidas, pode concluir-se que pela Formulação 5, obtêm-se valores mais aproximados ao Modelo de Referência. Contudo, como resultado desta aproximação ao Modelo de Referência, e como a diferença entre o Modelo de Referência e a Formulação 5 não é uniforme para todas as vias, no final da Formulação 5 terá de se considerar um determinado erro para os resultados obtidos para BB. Dito isto, o erro a considerar varia entre 0,8% e 17,4%.

Os gráficos 6.37 a 6.40 apresentam as curvas referentes ao Troço 2 (BB). Com estes é possível a visualização da diferença entre as curvas  $\mu$ -s do Modelo de Interação Pneu-Pavimento (desenvolvido por Silvério em 2015 – Formulação 1), o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado (obtido ao longo deste capítulo com camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso – Formulação 5), e o Modelo de Burckhardt (modelo de referência).

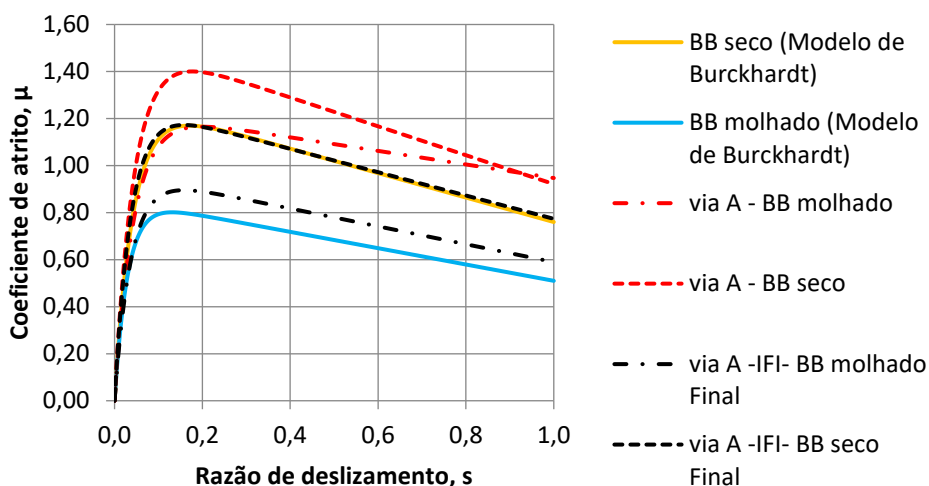


Gráfico 6.37 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

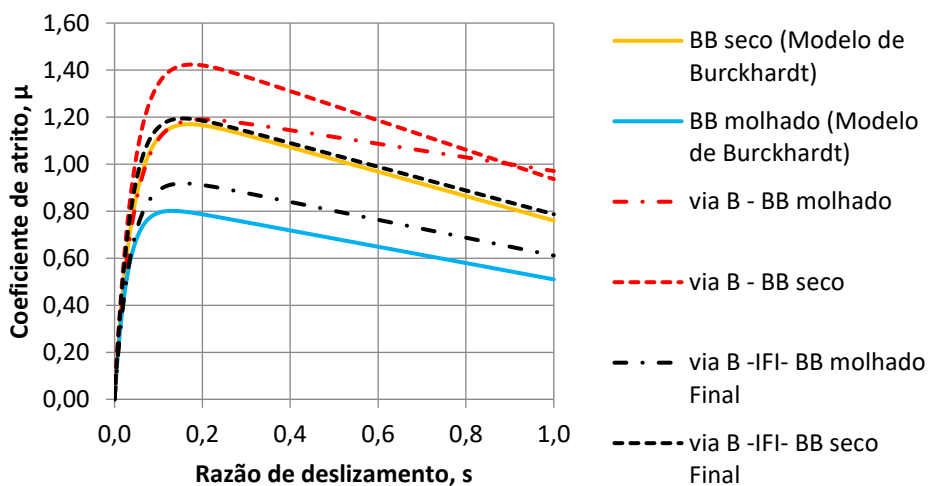


Gráfico 6.38 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2009

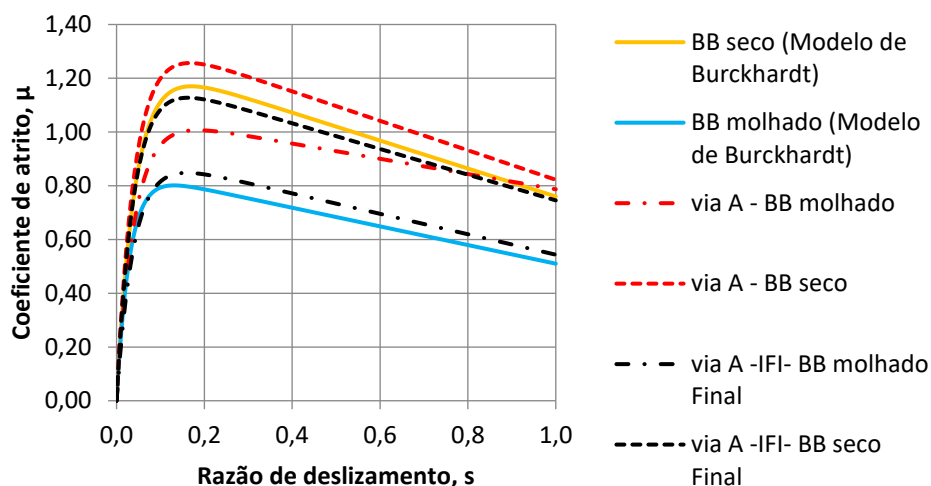


Gráfico 6.39 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

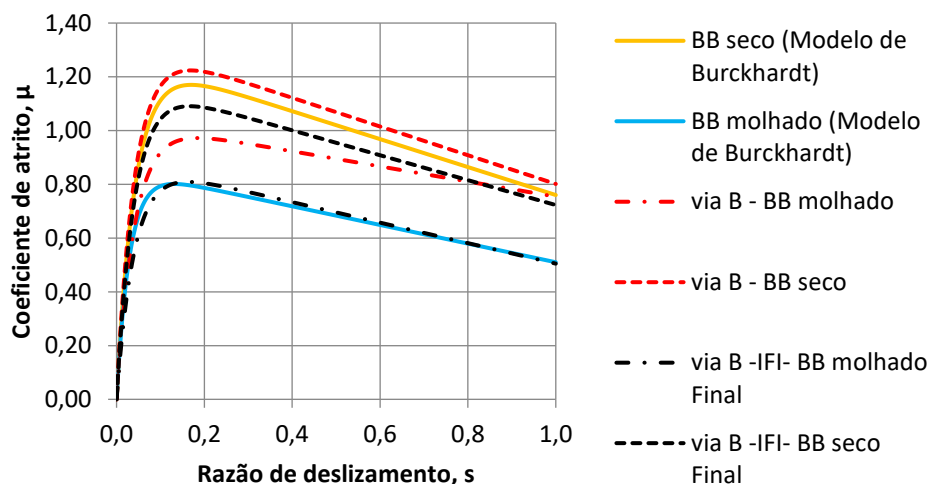


Gráfico 6.40 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço 2 (BB), no ano de ensaios de 2014

Para o Troço 2 (BB), verifica-se que o coeficiente de atrito máximo obtido nas curvas  $\mu$ -s da Formulação 5 é mais baixo que o da Formulação 1, que foi obtida por aproximação às curvas do Modelo de Burckhardt. A diferença de valor de atrito máximo, entre a Formulação 1, a Formulação 5 e o Modelo de Referência, apresenta-se na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Diferença do valor de coeficiente de atrito máximo entre a Formulação 1, a Formulação 5 e o Modelo de Burckhardt, para o Troço 2 nos diferentes anos

<b>Ensaio de 2009</b>	<b>Troço 2 via A</b>		<b>Troço 2 via B</b>	
	<b>BB molhado</b>	<b>BB seco</b>	<b>BB molhado</b>	<b>BB seco</b>
<b><math>\mu</math> máximo</b>				
<b><math>\mu_1</math> - curva Burckhardt</b>	0,801	1,170	0,801	1,170
<b><math>\mu_2</math> - curva Formulação 5</b>	0,895	1,173	0,918	1,194
<b><math>\mu_3</math> - curva Formulação 1</b>	1,165	1,400	1,190	1,424
<b>diferença <math>\mu_1</math> &amp; <math>\mu_2</math></b>	-0,094	-0,003	-0,117	-0,024
<b>diferença <math>\mu_1</math> &amp; <math>\mu_3</math></b>	-0,364	-0,230	-0,389	-0,254
<b>Ensaio de 2014</b>	<b>Troço 2 via A</b>		<b>Troço 2 via B</b>	
	<b>BB molhado</b>	<b>BB seco</b>	<b>BB molhado</b>	<b>BB seco</b>
<b><math>\mu</math> máximo</b>				
<b><math>\mu_1</math> - curva Burckhardt</b>	0,801	1,170	0,801	1,170
<b><math>\mu_2</math> - curva Formulação 5</b>	0,848	1,127	0,809	1,091
<b><math>\mu_3</math> - curva Formulação 1</b>	1,007	1,257	0,972	1,224
<b>diferença <math>\mu_1</math> &amp; <math>\mu_2</math></b>	-0,047	0,043	-0,008	0,079
<b>diferença <math>\mu_1</math> &amp; <math>\mu_3</math></b>	-0,205	-0,087	-0,171	-0,054

Pela avaliação das diferenças obtidas, pode concluir-se que, mais uma vez se verifica que, pela Formulação 5 obtêm-se valores mais aproximados ao Modelo de Referência, valores na sua maioria acima do modelo tal como era o desejado. Neste caso, o erro a considerar varia entre 0,3% e 12,7%, mais baixo em relação aos dados anteriores.

Da Formulação 5 obtida, resultam curvas que são muito próximas do Modelo de Referência, tal como era o pretendido. Quanto mais próxima do Modelo de Referência, mais fácil é de prever a interação pneu-pavimento e, em seguida, a aplicação nos modelos matemáticos utilizados nos sistemas de segurança ativa (ABS) dos veículos. Ao chegar a estas formulações dos parâmetros em função de IFI, a curva de atrito obtida pode ser considerada como uma curva de referência, à escala universal, padronizada para esse pavimento. Atingindo assim o objetivo final da utilização da curva de atrito de referência nos sistemas de segurança ativa (ABS).

Concluída a análise para a camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso, resta saber se a Formulação 5 é possível de aplicar diretamente a outras camadas de desgaste, sem ser necessário ajustastes nos parâmetros da Formulação 5, assim como se sucedeu para as

formulações dos parâmetros do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015).

## **6.5 Aplicação do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado nas Diferentes Camadas de Desgaste**

### **6.5.1 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Muito delgado – BBTM**

As tabelas em que se apresentam os valores obtidos no cálculo de IFI, para uma camada de desgaste em BBTM, nos anos de ensaios de 2009 e 2014, encontram-se disponíveis nas Tabelas B.VII e B.III do Anexo B, respetivamente. Os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , calculados pelas Formulações 1 e 5, encontram-se disponíveis na Tabela B.VI do Anexo B e na Tabela D.VII do Anexo D, respetivamente.

Em seguida, os gráficos 6.41 a 6.44 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Referência, a Formulação 1 e a Formulação 5.

As curvas  $\mu$ -s identificadas por “via A – BBTM molhado” e “via A – BBTM seco” pertencem à Formulação 1, já as curvas identificadas por “via A -IFI- BBTM molhado Final” e “via A -IFI- BBTM seco Final” pertencem à Formulação 5.

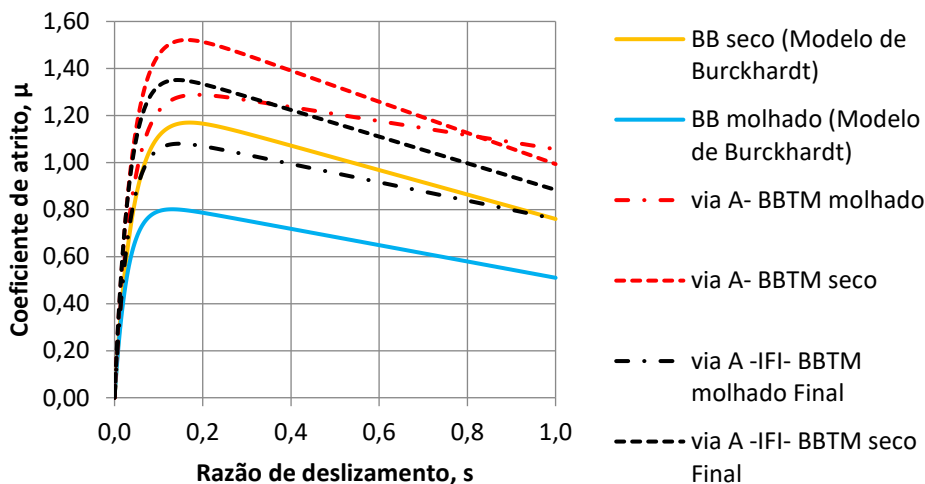


Gráfico 6.41 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço 1 (BBTM), no ano de ensaios de 2009

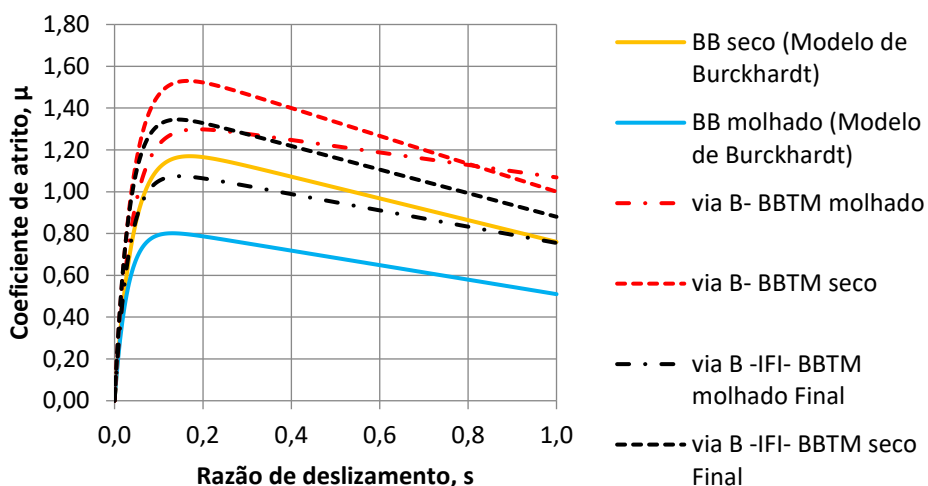


Gráfico 6.42 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço 1 (BBTM), no ano de ensaios de 2009

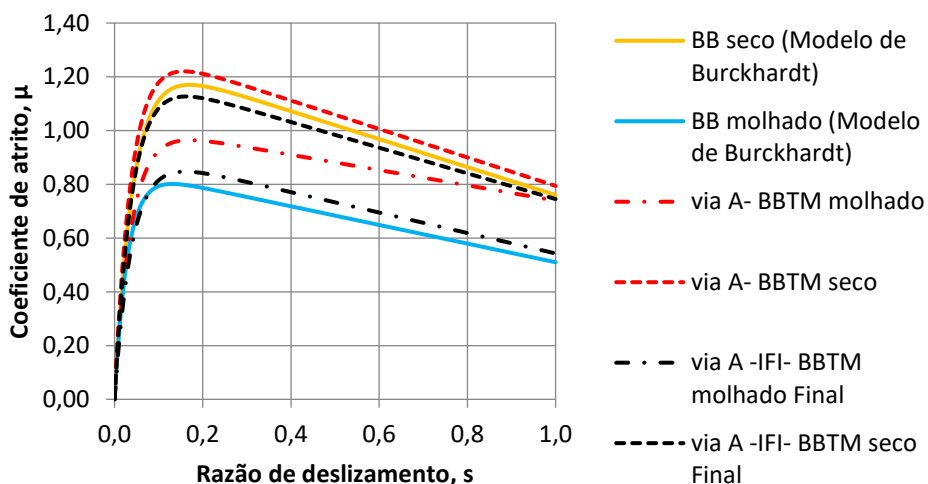


Gráfico 6.43 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço 1 (BBTM), no ano de ensaios de 2014

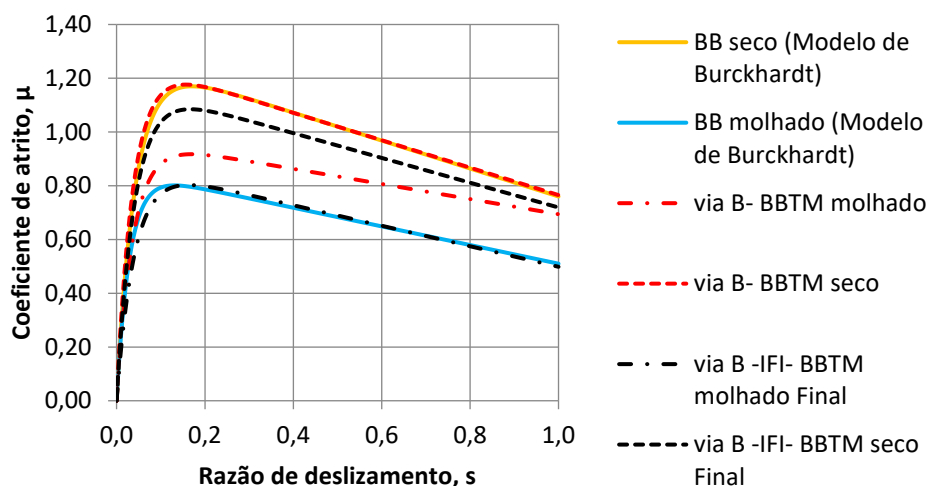


Gráfico 6.44 – Comparação das curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço 1 (BBTM), no ano de ensaios de 2014

Ao aplicar diretamente a Formulação 5 obtida ao longo deste capítulo, observa-se que as curvas  $\mu$ -s de IFI obtidas, para o Troço 1 (BBTM), apresentam o mesmo comportamento das curvas  $\mu$ -s do Modelo de Burckhardt.

Numa primeira análise do gráfico, comparadas as curvas obtidas pela Formulação 1 (modelo desenvolvido por Silvério em 2015), e as curvas obtidas pela Formulação 5, verifica-se que estas apresentam valores mais baixos que a Formulação 1. Isto deve-se ao facto de que a finalidade foi a aproximação das curvas IFI ao Modelo de Burckhardt (referência), em vez de aproximar as curvas IFI ao modelo de interação de Silvério (2015).

Quando comparadas as curvas relativas a 2009 com as curvas relativas a 2014, torna-se evidente o impacto que as causas externas têm na diminuição do coeficiente de atrito. Ainda assim, as curvas de IFI relativas ao ano 2014, em que o pavimento já tem alguns anos de serviço, apresentam os resultados esperados, isto é, apresentam-se muito próximas e acima da curva de BB molhado do Modelo de Referência.

Dito isto, o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, baseado em parâmetros reais do pavimento, é aplicável para uma camada de desgaste em Betão Betuminoso Muito Delgado.

### 6.5.2 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Rugoso – BBR

As tabelas em que se apresentam os valores obtidos no cálculo de IFI, para uma camada de desgaste em BBR, encontram-se disponíveis na Tabela C.V do Anexo C. Os resultados

obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , calculados pelas Formulações 1 e 5, encontram-se disponíveis na Tabela C.IV do Anexo C e nas Tabelas D.IX e D.X do Anexo D, respectivamente.

Para este tipo de pavimento teve-se em consideração a diferença das curvas no caso em que o cálculo de IFI considerou o ensaio realizado com SCRIM (CAT) e no caso em que considerou o ensaio com o Pêndulo Britânico (PTV), a textura superficial foi obtida pelo ensaio da Mancha de Areia (MTD). É importante lembrar que para esta camada de desgaste os dados utilizados foram retirados da bibliografia, servindo como modelo do comportamento que esta camada de desgaste apresenta ao aplicar ambas as formulações, será necessário a realização de ensaios de campo e verificar se apresenta o mesmo comportamento das curvas obtidas em seguida.

Os gráficos 6.45 e 6.46 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Referência, a Formulação 1 e a Formulação 5.

As curvas  $\mu$ -s identificadas por “BBR molhado” e “BBR seco” pertencem à Formulação 1 (onde em vez de GN foi utilizado CAT), já as curvas identificadas por “BBR molhado -IFI-Final” e “BBR seco -IFI-Final” pertencem à Formulação 5.

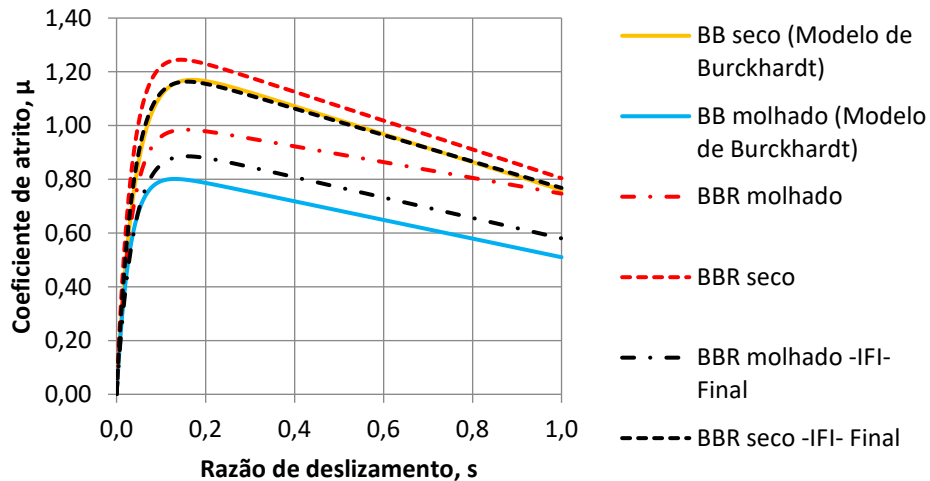


Gráfico 6.45 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para Betão Betuminoso Rugoso, ensaio do Pêndulo Britânico



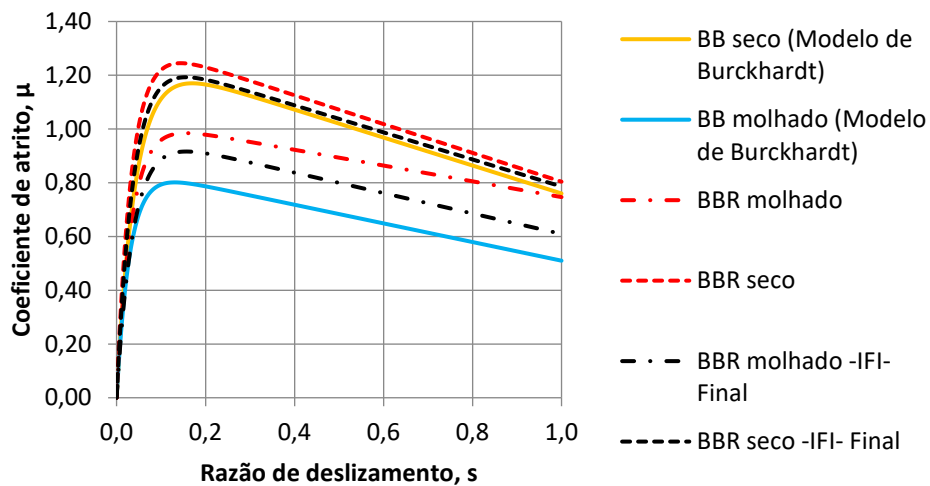


Gráfico 6.46 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para Betão Betuminoso Rugoso, ensaio de SCRIM

Ao aplicar diretamente a Formulação 5 obtida ao longo deste capítulo, observa-se que as curvas  $\mu$ -s de IFI obtidas, para a camada de desgaste em BBR, apresentam o mesmo comportamento das curvas  $\mu$ -s do Modelo de Burckhardt, tanto no caso das curvas de IFI considerando o ensaio do Pêndulo Britânico, como no caso considerando o ensaio de SCRIM.

Numa primeira análise do gráfico, assim como aconteceu para o Troço 1 (BBTM), comparadas as curvas obtidas pela Formulação 1 e as curvas obtidas pela Formulação 5, verifica-se que estas apresentam valores mais baixos que a Formulação 1.

Comparadas as curvas do modelo de referência com as curvas IFI de BBR em ambos os casos, estas apresentam os resultados esperados, isto é, apresentam-se muito próximas e acima da curva de BB molhado do Modelo de Referência.

Dito isto, o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, baseado em parâmetros reais do pavimento, é aplicável para uma camada de desgaste em Betão Betuminoso Rugoso.

### 6.5.3 Camada de Desgaste em *Stone Mastic Asphalt* – SMA

As tabelas em que se apresentam os valores obtidos no cálculo de IFI, para uma camada de desgaste em SMA, encontram-se disponíveis na Tabela C.V do Anexo C. Os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , calculados pelas Formulações 1 e 5, encontram-se disponíveis na Tabela C.IV do Anexo C e nas Tabelas D.IX e D.X do Anexo D, respetivamente.

Para este tipo de pavimento teve-se em consideração a diferença das curvas no caso em que o cálculo de IFI considerou o ensaio com GripTester (GN) e no caso em que considerou o ensaio com o Pêndulo Britânico (PTV), assim como sucedeu para a camada de desgaste em BBR.

Em seguida, os gráficos 6.47 e 6.48 apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Referência, a Formulação 1 e a Formulação 5.

As curvas  $\mu$ -s identificadas por “SMA molhado” e “SMA seco” pertencem à Formulação 1, já as curvas identificadas por “SMA molhado -IFI- Final” e “SMA seco -IFI- Final” pertencem à Formulação 5.

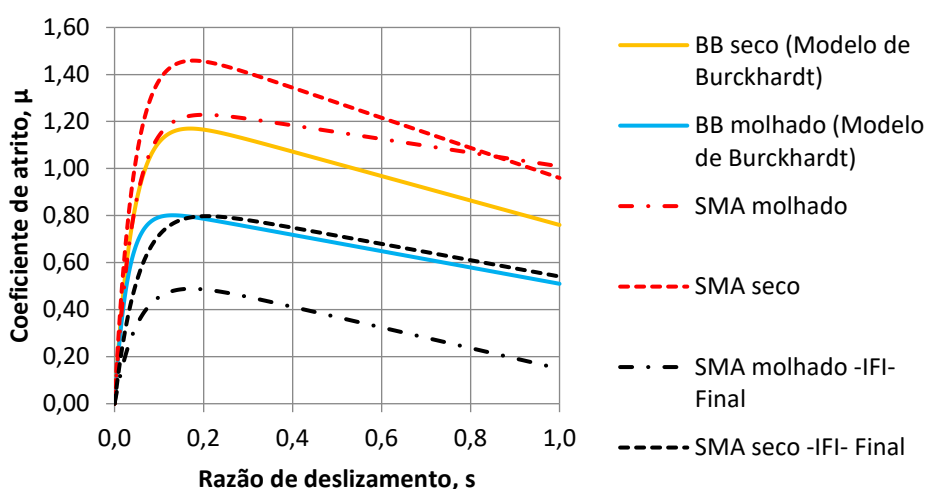


Gráfico 6.47 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para *Stone Mastic Asphalt*, ensaio do Pêndulo Britânico

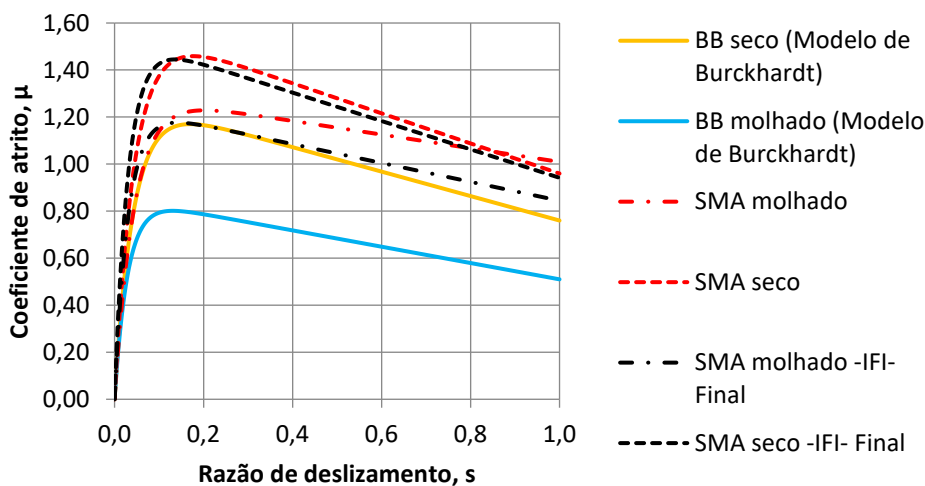


Gráfico 6.48 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para *Stone Mastic Asphalt*, ensaio do *GripTester*

Ao aplicar diretamente a Formulação 5 obtida ao longo deste capítulo, observa-se que as curvas  $\mu$ -s de IFI obtidas no caso do ensaio do Pêndulo Britânico, para a camada de desgaste em SMA, apresentam valores para o coeficiente de atrito muito baixos em relação ao que seria de esperar para este tipo de camada. Seria necessário saber mais dados acerca das camadas de desgaste das quais foram retirados os valores dos ensaios, como por exemplo, o tipo de camada SMA aplicado e os anos de serviço.

Já as curvas relativas ao IFI do ensaio do *GripTester* tiveram um comportamento similar às curvas do Modelo de Burckhardt, apresentam-se muito próximas e acima da curva de BB molhado do Modelo de Referência.

Dito isto, o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, baseado em parâmetros reais do pavimento, é aplicável para uma camada de desgaste em *Stone Mastic Asphalt*, mas ainda carece de um estudo mais aprofundado.

#### **6.5.4 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Drenante – BBD**

Para a camada de desgaste em BBD, assim como na formulação para uma camada BBD desenvolvida por Silvério (2015), foi necessário ter em consideração a evolução da permeabilidade do pavimento ao longo do tempo e para retratar este acontecimento foi necessário introduzir novamente o coeficiente de permeabilidade,  $\lambda$ , dado pela Equação 5.5, (onde  $k$  assume o valor de 1 para um pavimento novo e o valor de 1,3 para um pavimento velho), aplicado nas Equações 6.3 e 6.6 da Formulação 5, resultando nas Equações 6.8 e 6.9. Pelo motivo já referido no Subcapítulo 6.2, a formulação proposta em seguida tem a designação de Formulação 6.

$$C_1 = 3,2IFI - \left(\frac{h_w}{2}\right)\left(\frac{1}{\lambda}\right) \quad (6.8)$$

$$C_2 = 67,5IFI \quad (6.5)$$

$$C_3 = \frac{5}{4}(n^2IFI) + \frac{h_w\lambda}{5IFI} \quad (6.9)$$

$$n = \frac{1}{\gamma} = \frac{(2,5IFI - h_w)}{2,5IFI} \quad (6.7)$$

Onde:

*IFI* [adimensional] – *International Friction Index*;

$h_w$  [mm] – Altura de água no pavimento, onde  $h_w = 0,02$  mm para pavimento novo molhado e  $h_w = 0,6$  mm para pavimento velho molhado;

$\lambda$  [adimensional] – Coeficiente dependente da permeabilidade da camada de desgaste do pavimento (Equação 5.5);

$n$  [adimensional] – Inverso do grau de saturação da superfície da camada de desgaste (equação 6.7).

As tabelas em que se apresentam os valores obtidos no cálculo de IFI, para uma camada de desgaste em BBD, encontram-se disponíveis na Tabela A.V do Anexo A. Os resultados obtidos para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , calculados pelas Formulações 1 e 6, encontram-se disponíveis nas Tabelas A.III e A.IV do Anexo A e na Tabela D.VIII do Anexo D, respectivamente.

Em seguida, os gráficos 6.49 a 6.52, para uma camada BBD considerada “nova”, apresentam as curvas  $\mu$ - $s$  para o Modelo de Referência, a Formulação 1 e a Formulação 6.

As curvas  $\mu$ - $s$  identificadas por “via A – BBD molhado novo” e “via A – BBD seco novo” pertencem à Formulação 1, já as curvas identificadas por “via A -IFI- BBD molhado novo Final” e “via A -IFI- BBD seco novo Final” pertencem à Formulação 6.

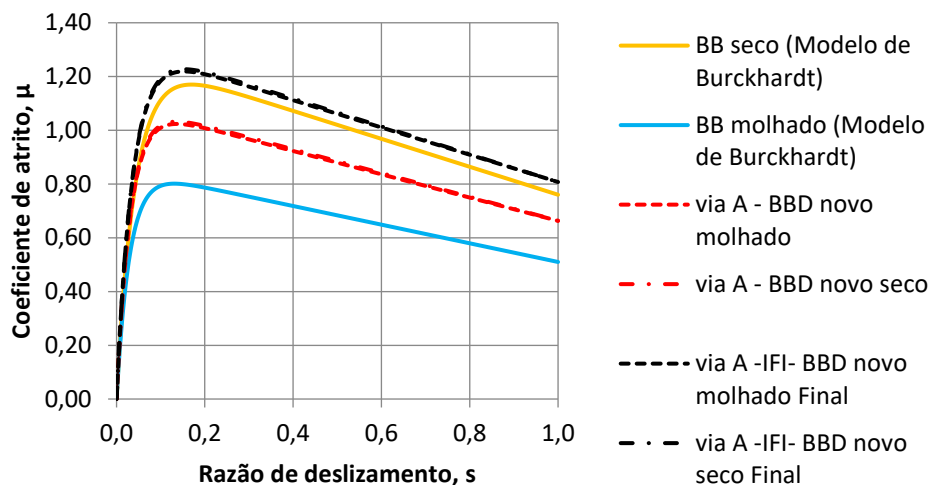


Gráfico 6.49 – Curvas  $\mu$ - $s$ , dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço BBD, considerando pavimento novo

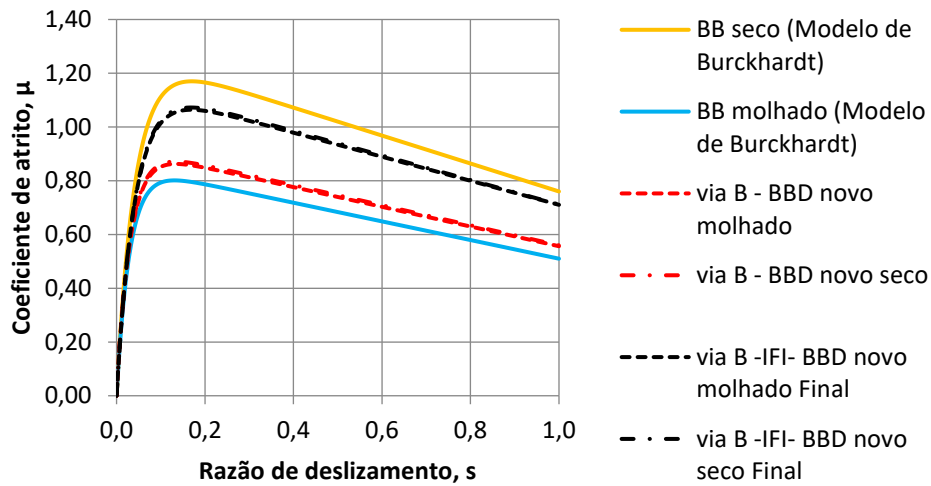


Gráfico 6.50 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço BBD, considerando pavimento novo

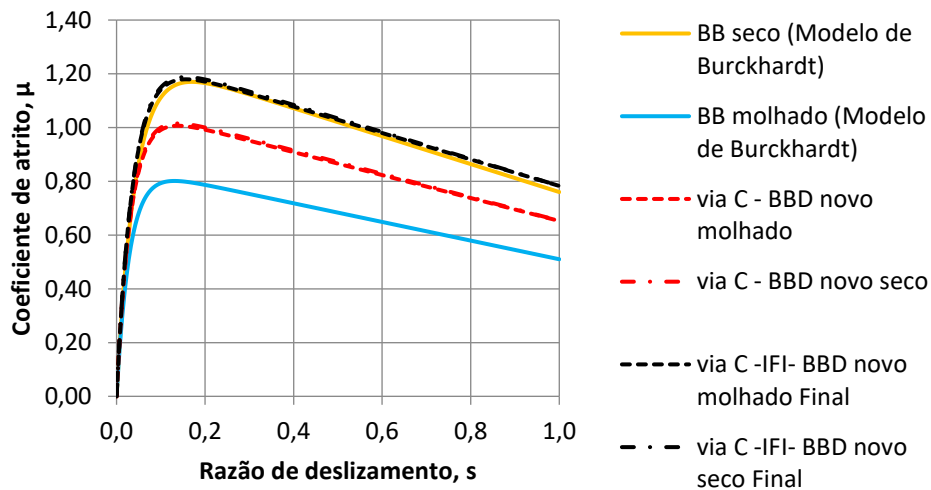


Gráfico 6.51 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via C do Troço BBD, considerando pavimento novo

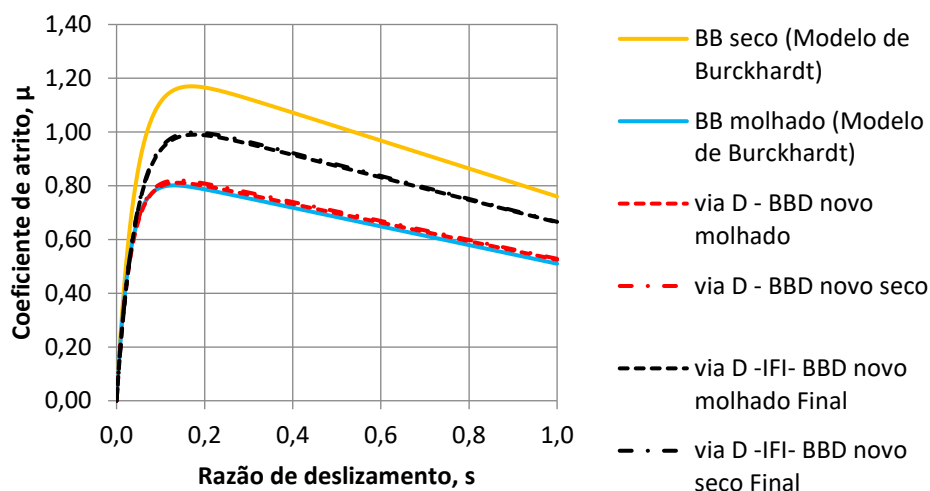


Gráfico 6.52 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via D do Troço BBD, considerando pavimento novo

Em seguida, os gráficos 6.53 a 6.56, para uma camada BBD considerada “velha”, apresentam as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Referência, a Formulação 1 e a Formulação 6. As curvas  $\mu$ -s identificadas por “via A – BBD molhado velho” e “via A – BBD seco velho” pertencem à Formulação 1, já as curvas identificadas por “via A -IFI- BBD molhado velho Final” e “via A -IFI- BBD seco velho Final” pertencem à Formulação 6.

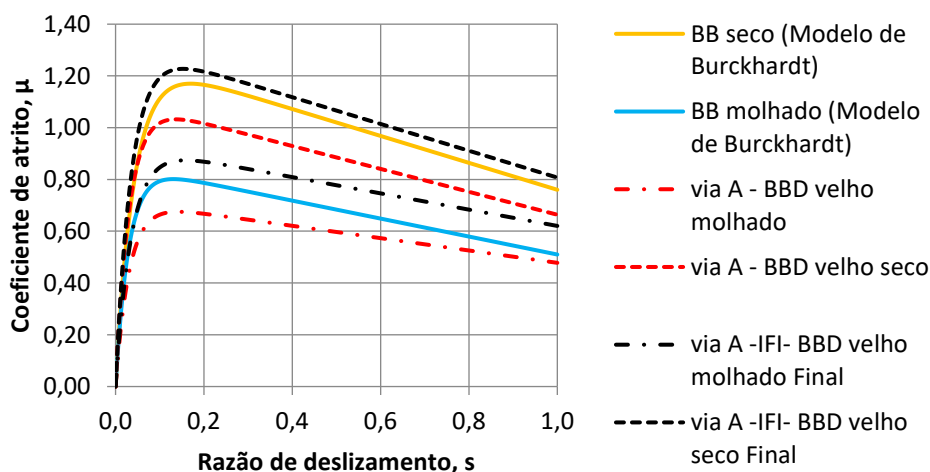


Gráfico 6.53 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via A do Troço BBD, considerando pavimento velho

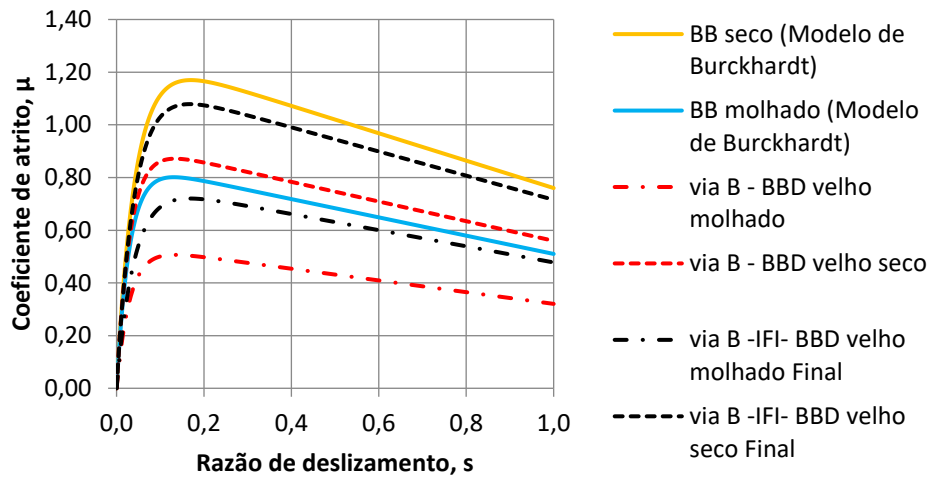


Gráfico 6.54 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via B do Troço BBD, considerando pavimento velho

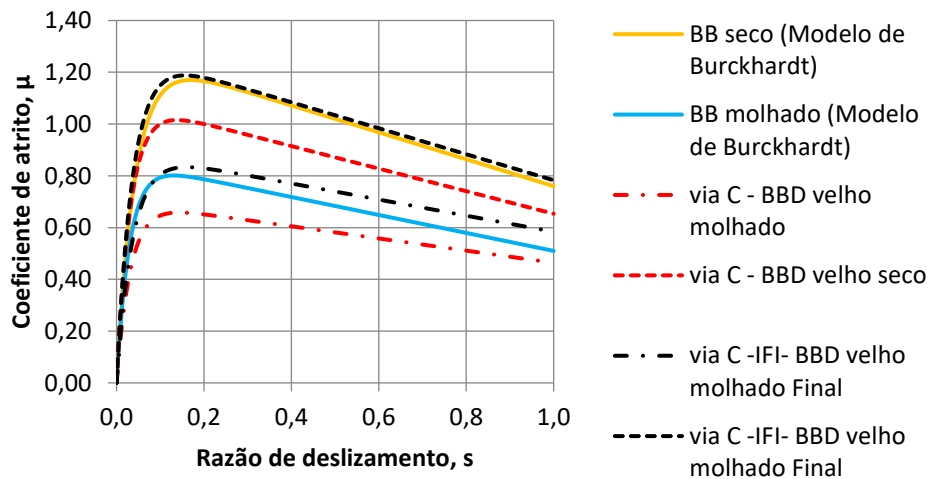


Gráfico 6.55 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via C do Troço BBD, considerando pavimento velho

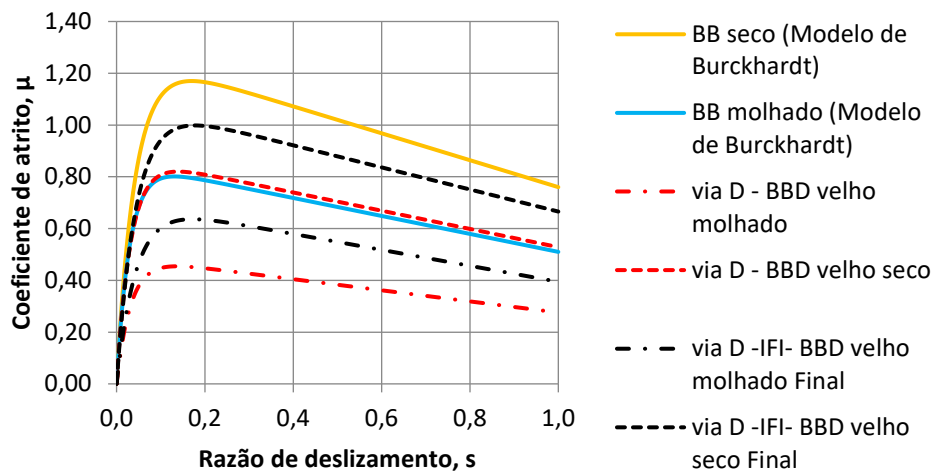


Gráfico 6.56 – Curvas  $\mu$ -s, dos modelos desenvolvidos, para a Via D do Troço BBD, considerando pavimento velho

Ao aplicar diretamente a Formulação 6 obtida ao longo deste subcapítulo, observa-se que as curvas  $\mu$ -s de IFI obtidas, para o Troço BBD, apresentam o mesmo comportamento das curvas  $\mu$ -s do Modelo de Burckhardt.

Numa primeira análise do gráfico, comparadas as curvas obtidas pela Formulação 1 (modelo desenvolvido por Silvério em 2015), e as curvas obtidas pela Formulação 6, verifica-se que estas apresentam valores mais altos que a Formulação 1.

Quando comparadas as curvas entre as 4 vias para camada de desgaste considerada como nova e considerada como velha, torna-se evidente o impacto que as causas externas têm na diminuição do coeficiente de atrito. Ainda assim, as curvas de IFI relativas às vias A e C, apresentam os resultados esperados, isto é, apresentam-se muito próximas e acima da curva de BB molhado do Modelo de Referência. Já as vias B e D, no caso das vias velhas e molhadas, estas encontram-se abaixo da curva de BB molhado do Modelo de Referência.

Estes resultados eram os esperados, a camada de desgaste em BBD ainda carece de estudo relativamente à avaliação da permeabilidade ao longo do tempo, mas que não foi possível de ser estudada ainda devido à falta de dados registados em diferentes anos.

Ainda assim, o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, baseado em parâmetros reais do pavimento, é aplicável para uma camada de desgaste em Betão Betuminoso Drenante.



## **7 Distância de Travagem**

A distância de travagem é influenciada pelas características de aderência oferecidas pela camada de desgaste do pavimento, quanto melhor forem os valores de atrito e textura, menor será a distância necessária para imobilizar o veículo. Dependendo do sistema de segurança ativa (ABS), e dos modelos de interação considerados em cada um, a distância de travagem será maior ou menor, uma vez que funcionam para diferentes percentagens de deslizamento longitudinal da roda.

Como referido no Subcapítulo 3.5, tem-se três sistemas de travagem diferentes para os veículos, veículo sem ABS, veículo com ABS e veículo com ABS modificado (que ainda não se encontra em vigor). Neste capítulo, supôs-se que o modelo de interação incorporado nos sistemas ABS tradicional e ABS modificado, é o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, cujas distâncias de travagem se pretende comparar com as distâncias de travagem obtidas pela Formulação de Burckhardt (Burckhardt, 1993, *cit. in* Silvério, 2015), e pela Norma de Traçado (InIR, 2010).

O sistema ABS tradicional entra em funcionamento para uma percentagem de deslizamento longitudinal da roda entre 10 a 25% e o sistema ABS modificado, que ainda requer implementação prática, entra em funcionamento para o deslizamento longitudinal ideal da roda, isto é, o deslizamento para o qual se verifica o máximo coeficiente de atrito da camada de desgaste, permitindo que seja determinado em tempo real o máximo atrito da camada de desgaste. (Silvério, 2015)

Este estudo foi elaborado tendo em consideração apenas manobras de travagem em estradas sem curvas e atendendo a coeficientes de atrito médios, obtidos a partir do tratamento de dados de ensaios de campo, de troços de estradas com camadas de desgaste em Betão Betuminoso Denso (BB), Betão Betuminoso Muito Delgado (BBTM) e Betão Betuminoso Drenante (BBD). Apresentam-se ainda as distâncias de travagem relativas às camadas de desgaste em Betão Betuminoso Rugoso (BBr) e *Stone Mastic Asphalt* (SMA), que foram obtidas com recurso a dados da bibliografia, mas que ainda carecem de um estudo mais aprofundado.

### **7.1 Formulação de Burckhardt**

De acordo com o estudo da formulação de Burckhardt apresentado por Silvério (2015), realizado para os tipos de pavimentos abrangidos pelo próprio modelo, determinaram-se as

distâncias de travagem para os três tipos de veículos em diferentes velocidades (50, 90, 120 e 140 km/h). Os tipos de pavimento abrangidos pelo modelo são: neve, betão, betão betuminoso seco, betão betuminoso molhado, paralelos secos e paralelos molhados, e os seus parâmetros encontram-se apresentados na Tabela 4.1.

Para a análise apresentada nos Subcapítulos 7.1.1, 7.1.2 e 7.1.3, admitiu-se que os veículos têm massa de 900 kg e um deslizamento total,  $s_t$ , de 0,1 m, que é fortemente influenciado pela força de atrito entre a roda e o pavimento. Quando a força de atrito anula a energia cinética que o veículo possui, dá-se a paragem do veículo. A energia cinética,  $E_c$ , é determinada pela Equação 3.6 e o trabalho da força de atrito,  $W_{F_a}$ , é dado pela Equação 3.7. (Silvério, 2015)

Dito isto, na Tabela 7.1 apresentam-se os valores determinados, para as diferentes velocidades, considerados no cálculo das distâncias de travagem.

Tabela 7.1– Valor da energia cinética e do trabalho da força de atrito para as diferentes velocidades

V (km/h)	P (N)	$E_c$ (kJ)	$W_{F_a}$ (kJ)
50	8820	86,806	86,806
90	8820	281,250	281,250
120	8820	500,000	500,000
140	8820	680,556	680,556

Para cada tipo de pavimento em estudo, calcularam-se as forças de atrito,  $F_a$ , através da Equação 7.1.

$$F_a = \mu \times P \quad (7.1)$$

Onde:

$F_a$  [N] – Força de atrito;

$\mu$  [adimensional] – Coeficiente de atrito calculado pelo modelo de Burckhardt;

$P$  [N] – Peso do veículo.

De notar que o coeficiente de atrito, mencionado na expressão anterior, é alusivo aos valores de  $\mu$  derivados da curva de Burckhardt do pavimento em análise.

### 7.1.1 Veículo sem ABS

Num cenário de emergência, em que o caso de um veículo sem ABS trava, as rodas ficam bloqueadas, o veículo desliza e perde a estabilidade lateral, ficando impossibilitado de responder aos comandos de manobra. Atendendo que o máximo coeficiente de atrito sucede entre 10 a 25% da razão de deslizamento longitudinal, a curva típica da força de atrito foi dividida em 3 regiões até ao bloqueio total da roda e, em seguida, numa região onde se considera a força de atrito constante, designada de região crítica. Na Figura 7.1 encontra-se explicitada essa divisão, em que a distância percorrida nas regiões A, B e C dizem respeito a determinada percentagem do deslizamento total adotado,  $s_t=0,1$  m.

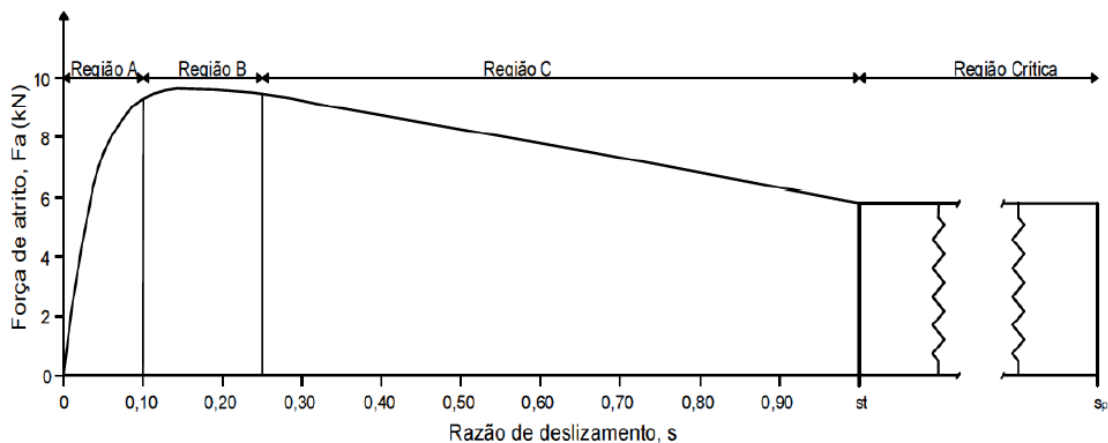


Figura 7.1 – Regiões que subdividem a distância de travagem de um veículo sem ABS (Silvério, 2015)

A região crítica,  $r_{crit}$ , diz respeito à distância que o veículo percorre a partir do momento que deixa de existir qualquer variação do coeficiente de atrito e alonga-se até à paragem do veículo. De acordo com o que foi referido anteriormente, a paragem do veículo ocorre quando o trabalho da força de atrito, por um deslizamento  $s_p$ , iguala a energia adquirida pelo veículo em movimento, correspondente à continuidade do bloqueio das rodas, desde  $s=1$ , em que o veículo derrapa até à paragem propriamente dita. Para o trabalho desenvolvido, assumiu-se que, a partir do momento em que as rodas ficam bloqueadas, o valor da força de atrito não sofre qualquer alteração. (Silvério, 2015)

As regiões designadas por A, B e C foram definidas pela Equação 7.2, e as distâncias de travagem nessas regiões,  $i$ , foram calculadas pela Equação 7.3. Assim, o trabalho da força de atrito nessas regiões foi obtido pela Equação 7.4.

$$r_i = \int_i^j \mu ds \quad (7.2)$$

$$d_i = s_t \times \Delta s_i \quad (7.3)$$

$$W_{Fa_i} = r_i \times P \times d_i \quad (7.4)$$

Onde:

$\mu$  [adimensional] – Coeficiente de atrito calculado pelo modelo de Burckhardt;

$d_i$  [m] – Distância percorrida nas regiões em análise dependendo do tipo de veículo;

$s_t$  [m] – Deslizamento total do veículo na travagem considerado para o cálculo ( $s_t = 0,1$ );

$\Delta s_i$  [adimensional] – Diferença da razão de deslizamento longitudinal na região em estudo e dependendo do tipo de veículo;

$W_{Fa_i}$  [J] – Trabalho da força de atrito nas regiões em análise, dependentes do sistema de travagem;

$r_i$  [adimensional] – Coeficiente de atrito ao longo da região em estudo;

$P$  [N] – Peso do veículo em estudo.

Como referido anteriormente, para um veículo sem ABS, a paragem do veículo ocorre quando o trabalho da força de atrito igualar a energia cinética. Nesta situação o trabalho da força de atrito foi obtido pela Equação 7.5, e a distância percorrida pelo veículo até parar, após o bloqueio das rodas, foi dada pela Equação 7.6.

$$W_{Fa_p} = E_c - \sum_{r=i}^{r=j} W_{Fa_i} \quad (7.5)$$

$$d_{crit} = \frac{W_{Fa_p}}{F_{a_p}} \quad (7.6)$$

Onde:

$W_{Fa_p}$  [J] – Trabalho da força de atrito com as rodas bloqueadas;

$E_c$  [J] – Energia cinética que anima o veículo a diferentes velocidades;

$W_{Fa_i}$  [J] – Trabalho da força de atrito nas regiões,  $i$ , em estudo, antes do bloqueio;

$d_{crit}$  [m] – Distância percorrida em derrapagem;

$F_{a_p}$  [J] – Força de atrito constante ao longo da distância percorrida com rodas bloqueadas.

Para finalizar, a distância de travagem total foi dada pela Equação 7.7.

$$d_t = \sum_{i=0}^{i=j} d_i + d_{crit} \quad (7.7)$$

Onde:

$d_t$  [m] – Distância de travagem;

$d_i$  [m] – Distância percorrida nas regiões em análise dependendo do tipo de veículo;

$d_{crit}$  [m] – Distância percorrida em derrapagem.

Dadas as expressões, foram calculadas as distâncias de travagem para as diferentes velocidades, num veículo sem ABS, das diversas camadas de desgaste abordadas no modelo de Burckhardt. O Gráfico 7.1 mostra a variação das distâncias de travagem obtidas. A tabela de resultados apresenta-se na Tabela E.I do Anexo E.

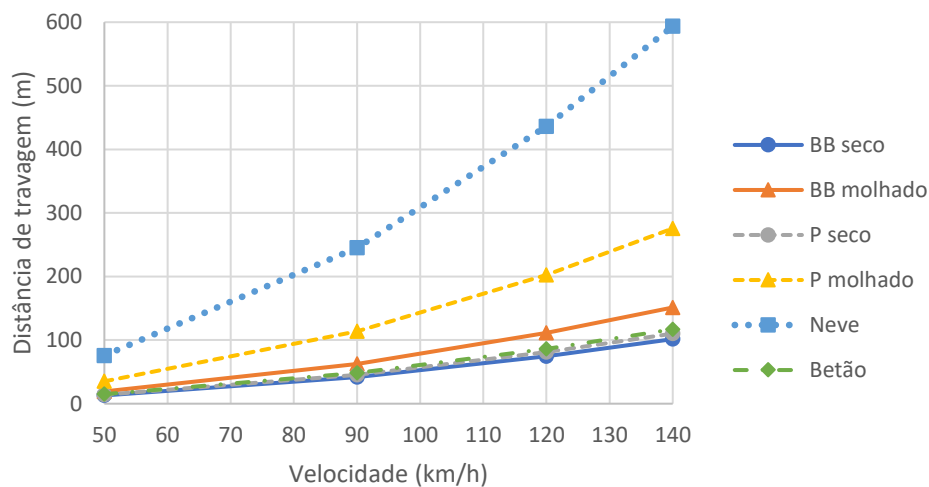


Gráfico 7.1 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para os pavimentos abordados no modelo de Burckhardt

Como se pode verificar, a distância de travagem aumenta com a velocidade. Atinge valores mais elevados para pavimentos molhados ou cobertos de neve, uma vez que os pneus perdem o contacto com a superfície do pavimento.

### 7.1.2 Veículo com ABS

O objetivo do sistema ABS é evitar o bloqueio da roda e a consequente derrapagem do veículo. Este sistema entra em funcionamento para uma razão de deslizamento longitudinal entre 10 a 25%, intervalo em que o coeficiente de atrito atingido é, regularmente, máximo nos diferentes tipo de pavimento. Em conformidade com o que foi apontado para os veículos sem ABS, a distância de travagem foi calculada de acordo com as regiões de travagem, que para o caso em que se tem um veículo com ABS, se encontram subdivididas de acordo com a Figura 7.2.

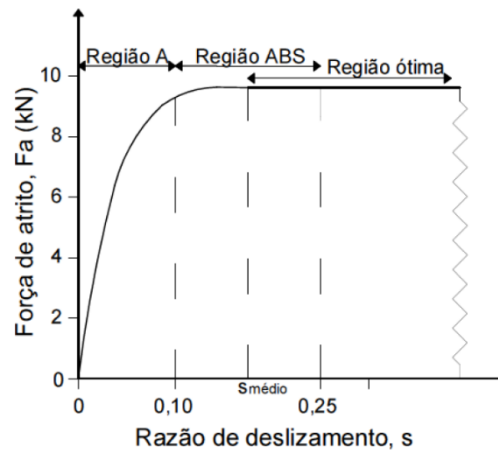


Figura 7.2 – Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo com ABS (Silvério, 2015)

A região denominada de “Região ABS” diz respeito ao intervalo de funcionamento dos ciclos de ABS e a região denominada de “Região ótima” retrata a distância que o veículo percorre a partir do momento em que se atinge um valor de coeficiente de atrito alto. Esse valor acontece para uma determinada percentagem de deslizamento longitudinal, designada de  $s_{médio}$ . (Silvério, 2015)

Uma vez que a força de atrito aumenta até ao valor da razão de deslizamento longitudinal de 10% e, os ciclos ABS ocorrem para uma razão de deslizamento que varia entre 10 a 25%, as regiões “Região A” e “região ABS”, foram determinadas com recurso à Equação 7.2. Pelo mesmo motivo, as distâncias percorridas, correspondente a essas regiões, foram calculadas de acordo com a Equação 7.3. Em relação ao trabalho da força de atrito, este é obtido para a região ótima e foi dado pela Equação 7.8, e a distância de travagem da região ótima foi dada pela Equação 7.9. A distância de travagem total foi dada pela Equação 7.10.

$$W_{Fa_{ótima}} = E_c - \sum_{r=i}^{r=j} W_{Fa_i} \quad (7.8)$$

$$d_{ótima} = \frac{W_{Fa_{ótima}}}{F_{ótima}} \quad (7.9)$$

$$d_t = \sum_{i=0}^{i=j} d_i + d_{ótima} \quad (7.10)$$

Onde:

$W_{Fa_{ótima}}$  [J] – Trabalho da força de atrito na região ótima;

$E_c$  [J] – Energia cinética que anima o veículo a diferentes velocidades;

$W_{Fa_i}$  [J] – Trabalho da força de atrito nas regiões,  $i$ , em estudo, antes do bloqueio (equação 7.4);

$d_{ótima}$  [m] – Distância de travagem ótima;

$F_{a_{ótima}}$  [J] – Força de atrito máxima considerada pelo sistema de travagem;

$d_t$  [m] – Distância de travagem;

$d_i$  [m] – Distância percorrida nas regiões em análise dependendo do tipo de veículo (equação 7.3).

Dadas as expressões, foram calculadas as distâncias de travagem para as diferentes velocidades, num veículo com ABS, das diversas camadas de desgaste abordadas no modelo de Burckhardt. O Gráfico 7.2 mostra a variação das distâncias de travagem obtidas. A tabela de resultados apresenta-se na Tabela E.I do Anexo E.

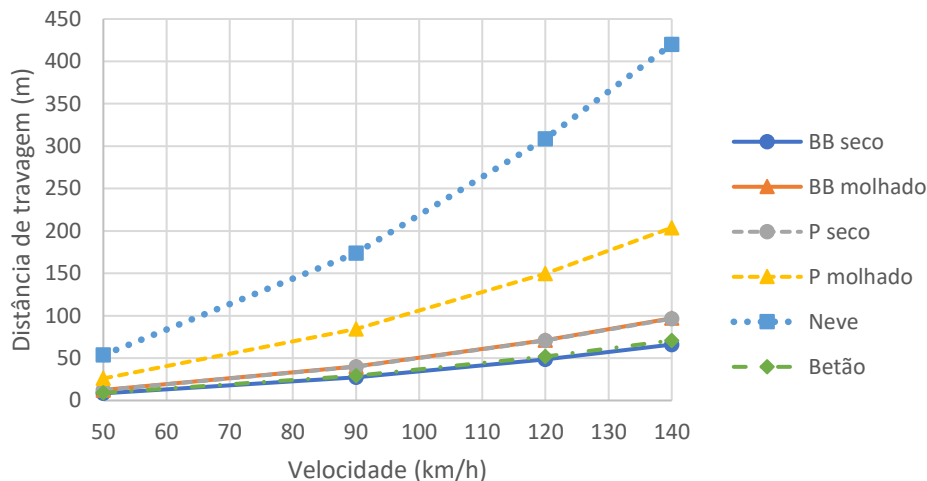


Gráfico 7.2 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para os pavimentos abordados no modelo de Burckhardt

Como se pode verificar, assim como para o veículo sem ABS, a distância de travagem aumenta com a velocidade. Atinge valores mais elevados para pavimentos molhados ou cobertos de neve, uma vez que os pneus perdem o contacto com a superfície do pavimento. Comparando as distâncias obtidas pelo veículo sem ABS e o veículo com ABS, verificou-se uma diminuição, em média, de 29,7% nas distâncias de travagem.

### 7.1.3 Veículo com ABS Modificado

O sistema de ABS modificado tem como principal função detetar em tempo real o tipo de pavimento e, dessa forma, identificar o valor ideal de percentagem de deslizamento

longitudinal,  $s_i$ . O sistema entra em funcionamento para essa razão de deslizamento longitudinal, em que o coeficiente de atrito máximo é atingido, para o pavimento em análise. Em conformidade com o que foi apontado para os veículos sem ABS e com ABS, a distância de travagem foi calculada de acordo com as regiões de travagem, que para o caso em que se tem um veículo com ABS modificado, se encontram subdivididas de acordo com a Figura 7.4. (Silvério, 2015)

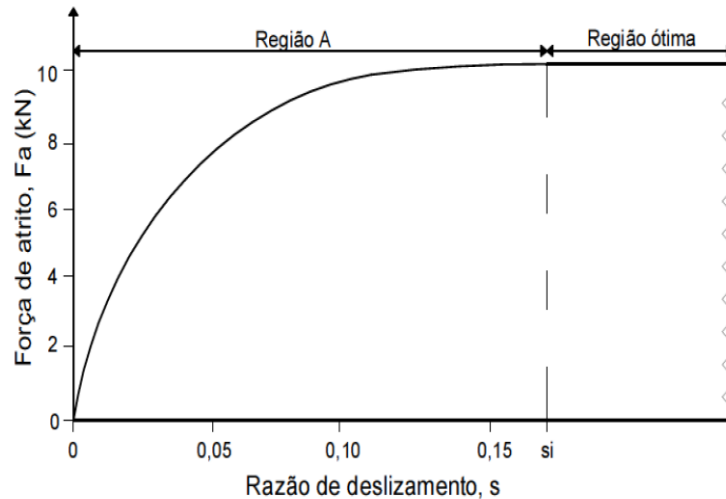


Figura 7.3 – Regiões que subdividem a distância de travagem num veículo com ABS modificado (Adaptado de Silvério, 2015)

A região denominada por “Região A” foi determinada pela Equação 7.2 e encontra-se limitada superiormente pelo valor de deslizamento ideal. A distância percorrida nessa região foi calculada pela Equação 7.3 e o trabalho da força de atrito foi dado pela equação 7.4. O trabalho da força de atrito na região ótima foi determinado de forma similar ao veículo com ABS, pela Equação 7.8, uma vez que a energia cinética é anulada ao longo da região A e da região ótima. Pelo mesmo motivo, a distância de travagem percorrida na região ótima e a distância de travagem total, foram obtidas pelas Equações 7.9 e 7.10, respetivamente.

Dadas as expressões, foram calculadas as distâncias de travagem para as diferentes velocidades, num veículo com ABS modificado, das diversas camadas de desgaste abordadas no modelo de Burckhardt. O Gráfico 7.3 mostra a variação das distâncias de travagem obtidas. A tabela de resultados apresenta-se na Tabela E.I do Anexo E.



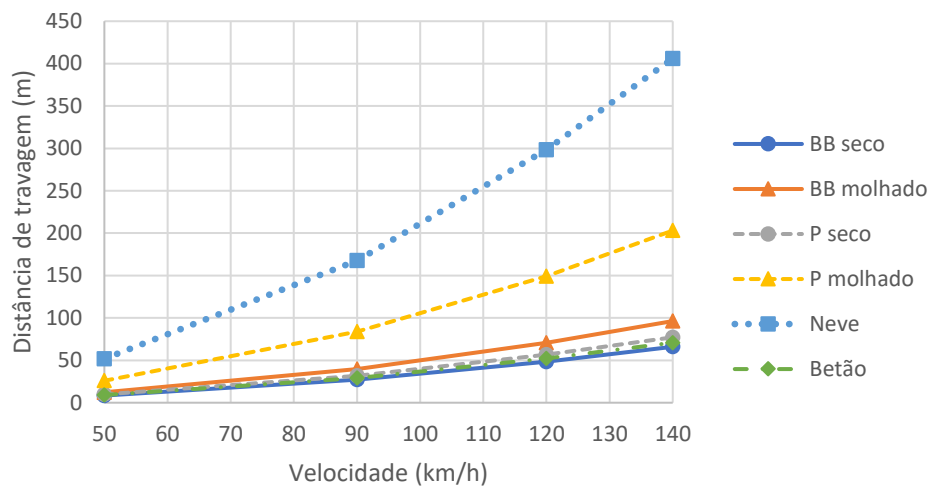


Gráfico 7.3 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para os pavimentos abordados no modelo de Burckhardt

Ao analisar os resultados obtidos para as distâncias de travagem, do veículo com ABS e do veículo com ABS modificado, verifica-se que não ocorreu grande alteração dos valores, à exceção do pavimento em paralelos secos, que diminuiu cerca de 20,0%.

Por sua vez quando se comparam os resultados obtidos para o veículo sem ABS e o veículo com ABS modificado, dá-se uma diminuição dos valores, em média, de 33,1%.

O facto de se usar o máximo coeficiente de atrito do pavimento para o processo de ciclos ABS, em vez de se considerar o intervalo pré-definido de 10 a 25% da razão de deslizamento longitudinal, é uma mais valia no aproveitamento dos sistemas ABS.

## 7.2 Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado

De forma análoga ao Modelo de Burckhardt, foram calculadas as distâncias de travagem do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, obtido no Capítulo 6, e foram de seguida confrontadas com as distâncias obtidas pelo Modelo de Burckhardt. Como já foi mencionado, o que distingue estes modelos é o facto de serem utilizadas as características superficiais existentes nas camadas de desgaste, o que resulta em valores para as distâncias de travagem mais próximos da realidade.

Para que exista conformidade e para que seja possível a comparação dos modelos, foram admitidos uma massa de 900 kg para o veículo e um deslizamento total de 0,1m, tornando válida a utilização da Tabela 7.1. Conforme o sistema de travagem em análise, as equações

a utilizar foram as apresentadas nos Subcapítulos 7.1.1, 7.1.2 e 7.1.3, aplicadas nas diversas camadas de desgaste que foram analisadas ao longo do Capítulo 6.

### 7.2.1 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Denso - BB

Para a camada de desgaste em BB foram disponibilizados dados de dois troços, como referido no capítulo anterior, o Troço BB e o Troço 2 (BB), com 4 vias (2 em cada sentido) e 2 vias (uma em cada sentido), respetivamente.

Obtidas as curvas  $\mu$ -s para o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado proposto, apresentadas em seguida nos Gráficos 7.4 a 7.7, foram calculadas as distâncias de travagem, para os três tipos de sistemas ABS, em condições molhadas e secas. As tabelas de resultados apresentam-se nas Tabelas E.II, E.III e E.IV do Anexo E.

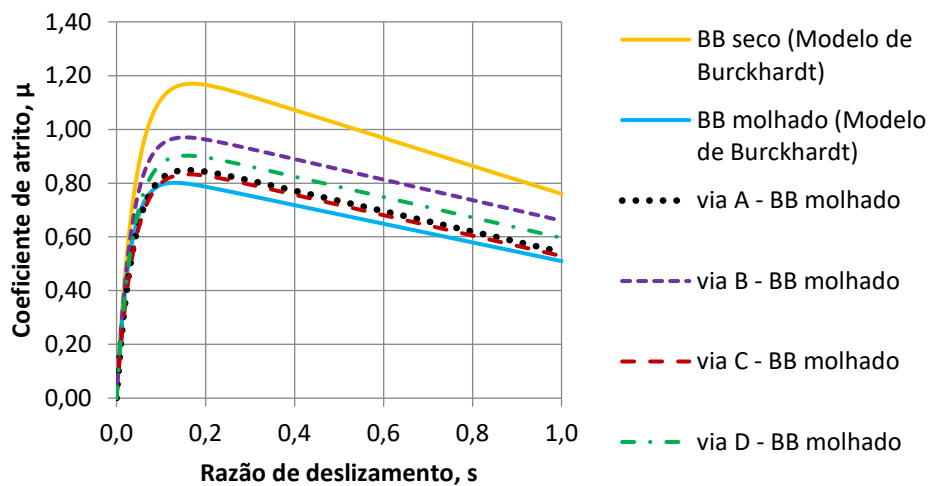


Gráfico 7.4 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BB com camada de desgaste molhada

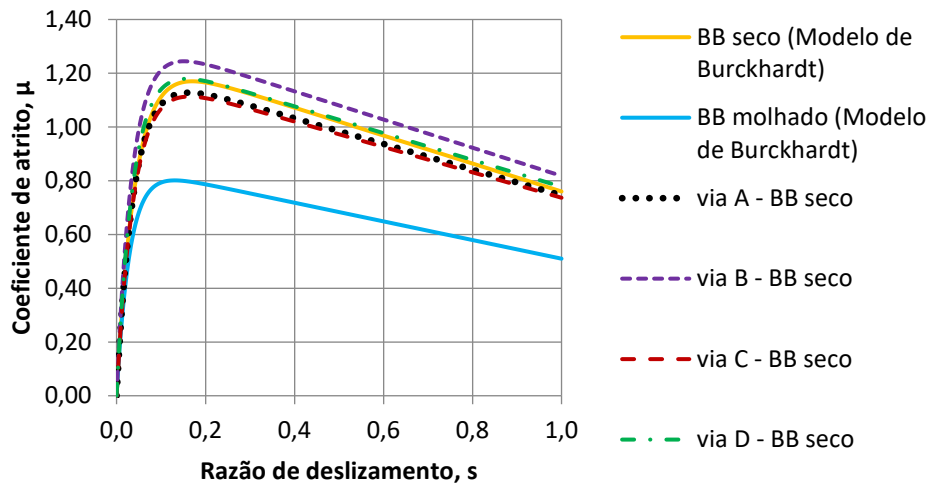


Gráfico 7.5 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BB com camada de desgaste seca

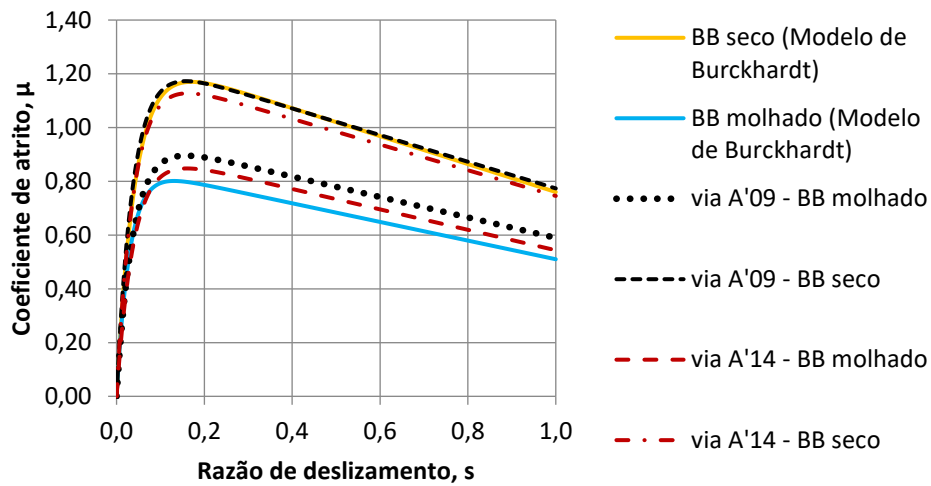


Gráfico 7.6 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da via A do Troço 2 (BB), nos anos 2009 e 2014

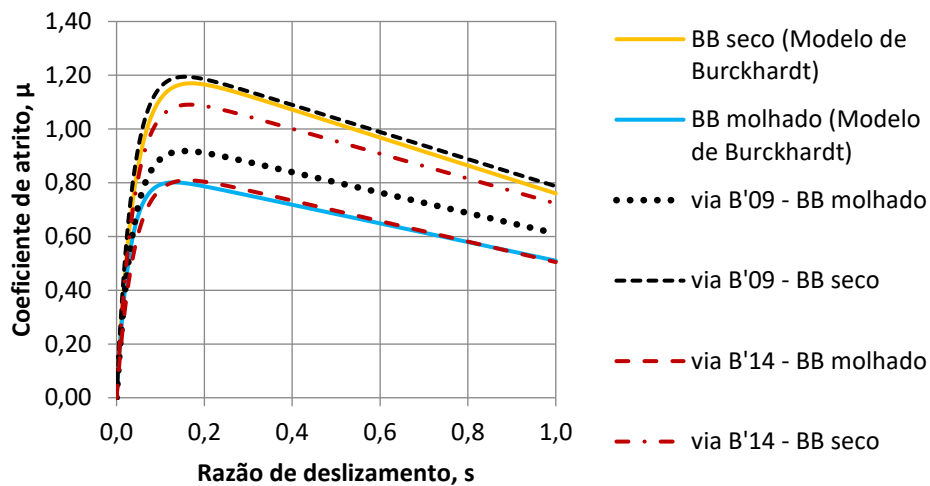


Gráfico 7.7 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da via B do Troço 2 (BB), nos anos 2009 e 2014

Para a análise apresentada em seguida, no caso do Troço BB, optou-se por seleccionar a via A, que teve maior valor no ensaio de medição do coeficiente de atrito, e a via D, que teve menor valor no ensaio de medição do coeficiente de atrito.

Relativamente ao Troço 2 (BB), foram calculadas as distâncias de travagem para o ano 2009 e para o ano 2014, sendo possível verificar o que sucede ao longo do tempo. Relativamente aos dados tratados de 2009, a via A teve menor valor no ensaio de medição do coeficiente de atrito e a via B teve maior valor no ensaio de medição do coeficiente de atrito, já para o ano de 2014, a via A teve maior valor e a via B teve menor valor. Tal deve-se ao facto da via B ter sido mais solicitada, a nível de tráfego, quando comparado à via A, este efeito só foi possível de verificar precisamente pelo facto de se ter dados de ensaios realizados em anos diferentes e foi bem evidente nos resultados das distâncias de travagem calculadas para os dois anos em questão.

Em seguida apresentam-se os gráficos relativos às distâncias de travagem, obtidas no caso do veículo sem ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado, onde o Gráfico 7.8 apresenta as distâncias de travagem para o Troço BB, o Gráfico 7.9 apresenta as distâncias de travagem para o Troço 2 (BB), no ano 2009, e o Gráfico 7.10 apresenta as distâncias de travagem para o Troço 2 (BB), no ano 2014.

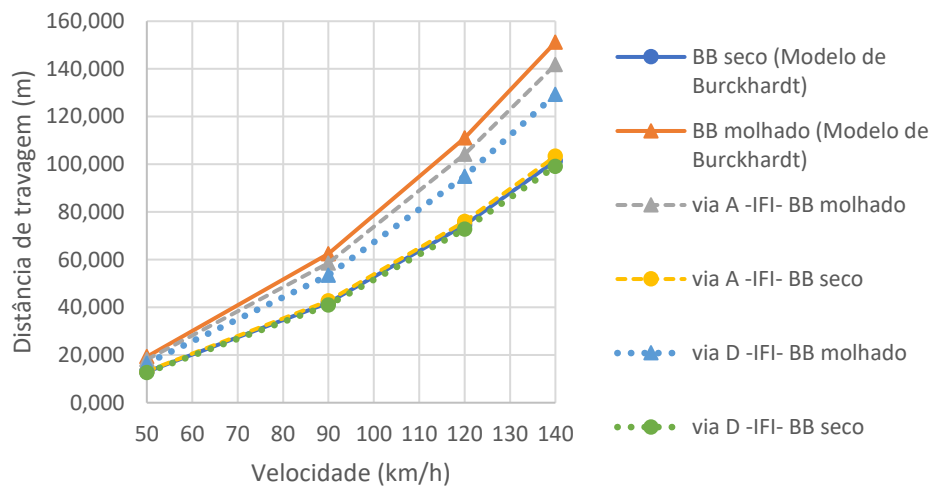


Gráfico 7.8 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço BB

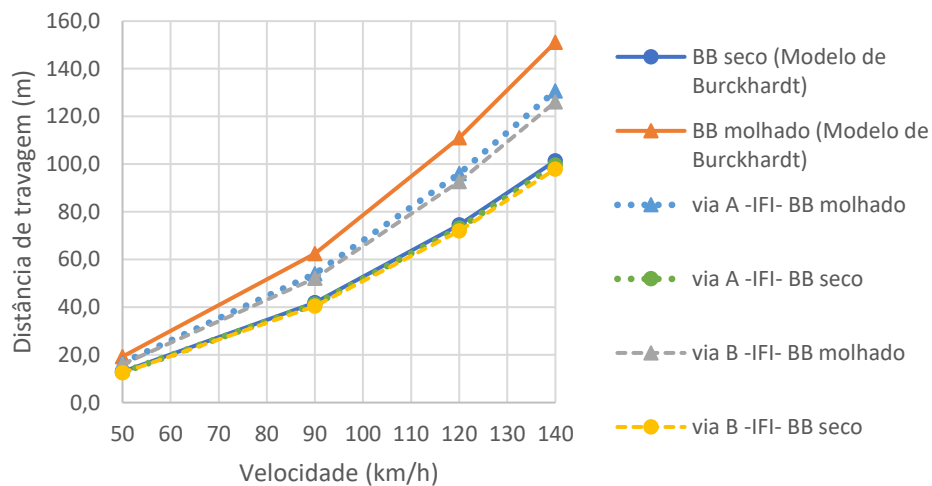


Gráfico 7.9 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço 2 (BB), no ano 2009

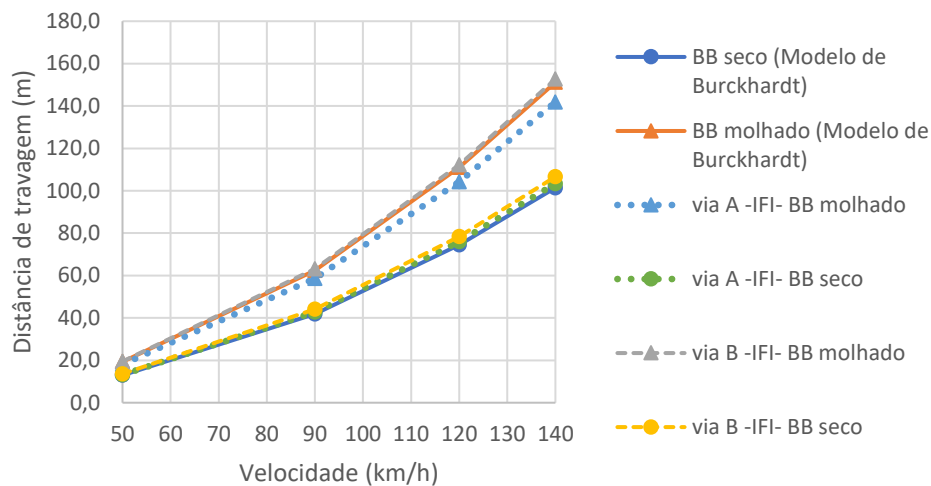


Gráfico 7.10 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço 2 (BB), no ano 2014

Pela análise dos gráficos, as distâncias de travagem obtidas encontram-se próximas do modelo de referência, tal como era pretendido. Para as vias em que foi considerado o maior valor do ensaio de medição do coeficiente de atrito, observa-se que as distâncias de travagem obtidas foram mais baixas em relação às vias com menor valor do ensaio. Esses valores eram os esperados uma vez que, quanto maior é o valor coeficiente de atrito obtido nas curvas  $\mu$ -s, menor é o valor para a distância de travagem.

Este efeito que os valores dos ensaios de medição do coeficiente de atrito causam nos resultados das distâncias de travagem foi bem evidente para o Troço 2 (BB). Ao se analisar as distâncias de travagem obtidas para um veículo sem ABS em 2014, quando comparadas ao ano 2009, para a via A, aumentaram cerca de 7,8% para condições molhadas e cerca de 3,6% para condições secas, já para a via B, aumentaram cerca de 17,4% para condições molhadas e cerca de 8,2% para condições secas. O maior aumento das distâncias ocorreu para a via B em consequência do decréscimo que o valor do ensaio teve em 5 anos (decreceu 14,4%), que foi superior ao decréscimo que ocorreu para o caso da via A (decreceu 10,8%). Em seguida apresentam-se os gráficos relativos às distâncias de travagem, obtidas no caso do veículo com ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado, onde o Gráfico 7.11 apresenta as distâncias de travagem para o Troço BB, o Gráfico 7.12 apresenta as distâncias de travagem para o Troço 2 (BB), no ano 2009, e o Gráfico 7.13 apresenta as distâncias de travagem para o Troço 2 (BB), no ano 2014.

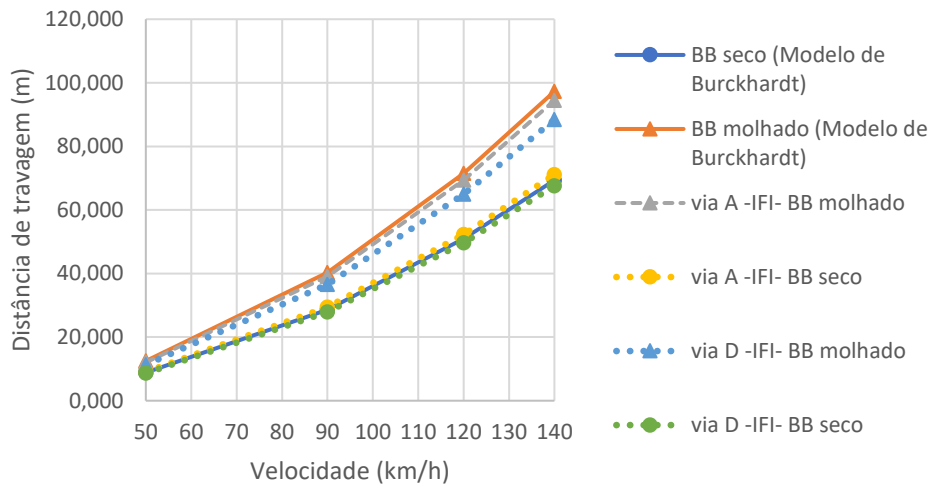


Gráfico 7.11 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço BB

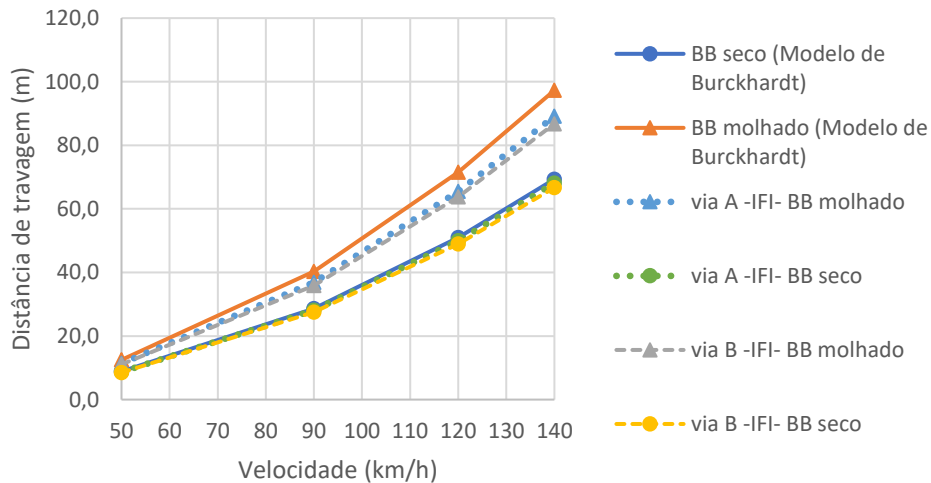


Gráfico 7.12 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço 2 (BB), no ano 2009

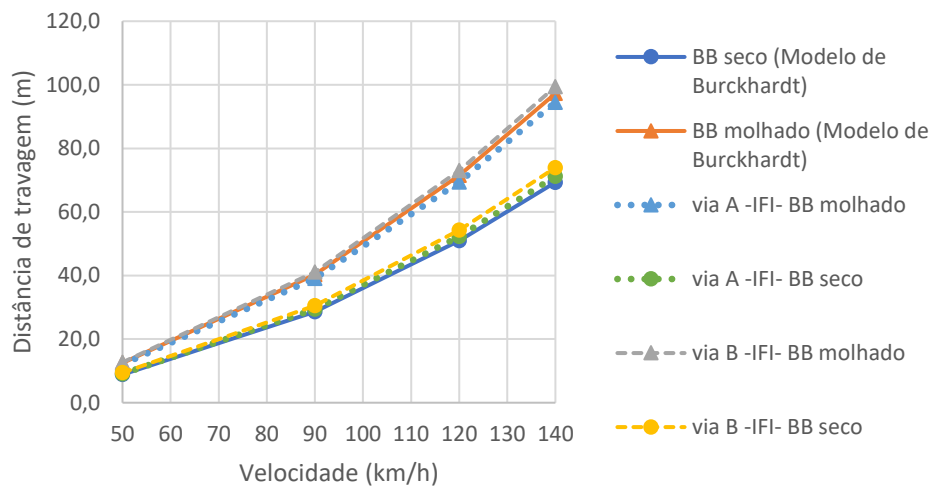


Gráfico 7.13 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço 2 (BB), no ano 2014

Ao analisar as distâncias de travagem obtidas para um veículo com ABS, relativas ao Troço 2 (BB), em 2014, quando comparadas ao ano 2009, para a via A, aumentaram cerca de 5,7% para condições molhadas e cerca de 4,4% para condições secas, já para a via B, aumentaram cerca de 12,7% para condições molhadas e cerca de 9,2% para condições secas.

Comparando as distâncias de travagem num veículo sem ABS com um veículo com ABS, relativas Troço BB, para condições molhadas diminuíram em média 32,5% e para condições secas diminuíram em média 31,5%; e as distâncias de travagem relativas ao Troço 2 (BB), no ano de 2014, para condições molhadas diminuíram em média 34,1% e para condições secas diminuíram em média 30,9%.

Em seguida apresentam-se os gráficos relativos às distâncias de travagem, obtidas no caso do veículo com ABS modificado, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado, onde o Gráfico 7.14 apresenta as distâncias de travagem para o Troço BB, o Gráfico 7.15 apresenta as distâncias de travagem para o Troço 2 (BB), no ano 2009, e o Gráfico 7.16 apresenta as distâncias de travagem para o Troço 2 (BB), no ano 2014.



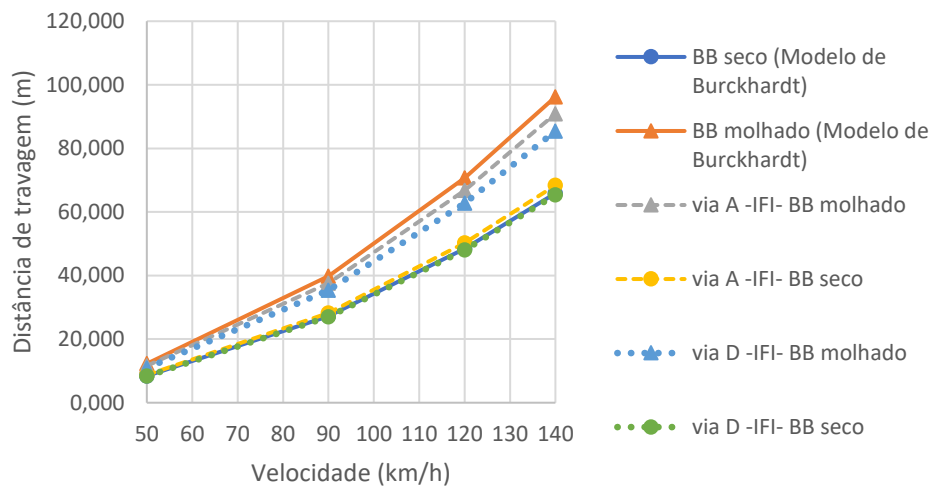


Gráfico 7.14 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço BB

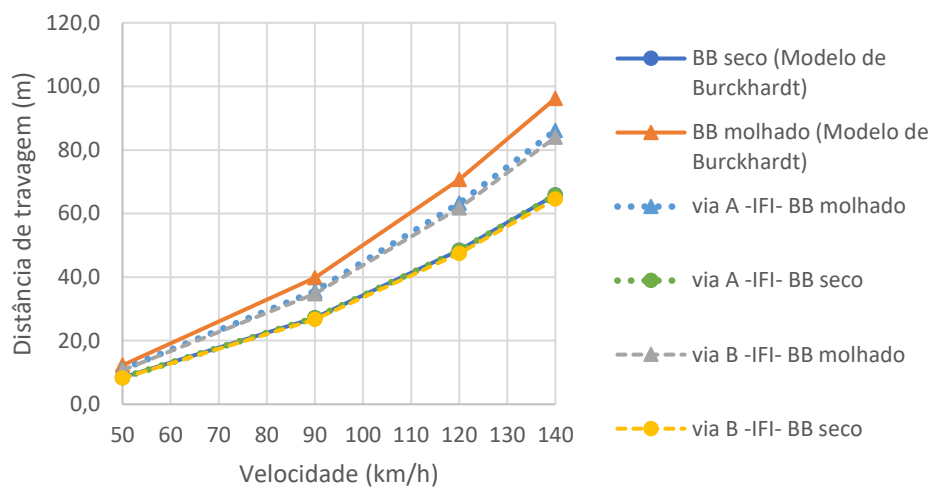


Gráfico 7.15 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço 2 (BB), no ano 2009

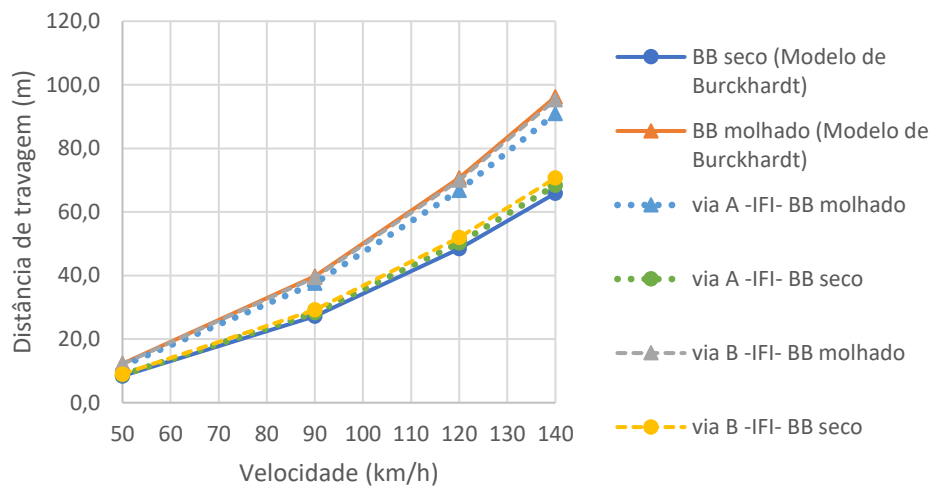


Gráfico 7.16 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço 2 (BB), no ano 2014

Ao analisar as distâncias de travagem obtidas para um veículo com ABS modificado, relativas ao Troço 2 (BB), em 2014, quando comparadas ao ano 2009, para a via A, aumentaram cerca de 5,3% para condições molhadas e cerca de 3,9% para condições secas, já para a via B, aumentaram cerca de 11,9% para condições molhadas e cerca de 8,7% para condições secas.

Comparando as distâncias de travagem num veículo com ABS e num veículo com ABS modificado, relativas ao Troço BB, para condições molhadas diminuíram em média 3,6% e para condições secas diminuíram em média 3,6%; e as distâncias de travagem relativas ao Troço 2 (BB), no ano de 2014, para condições molhadas diminuíram em média 4,0% e para condições secas diminuíram em média 4,2%.

Por fim, quando comparado o veículo sem ABS com o veículo com ABS modificado, relativamente ao Troço BB, para condições molhadas diminuíram em média 34,9% e para condições secas diminuíram em média 34,0%; e as distâncias de travagem relativas ao Troço 2 (BB), no ano de 2014, para condições molhadas diminuíram em média 36,7% e para condições secas diminuíram em média 33,8%.

## 7.2.2 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Muito Delgado - BBTM

Para a camada de desgaste em BBTM foram disponibilizados dados de um troço com duas vias (uma em cada sentido), como referido no capítulo anterior, o Troço 1 (BBTM).

Obtidas as curvas  $\mu$ -s para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto, apresentadas em seguida nos Gráficos 7.17 e 7.18, foram calculadas as distâncias de travagem, para os três tipos de sistemas ABS, em condições molhadas e secas. As tabelas de resultados apresentam-se nas Tabelas E.V e E.VI do Anexo E.

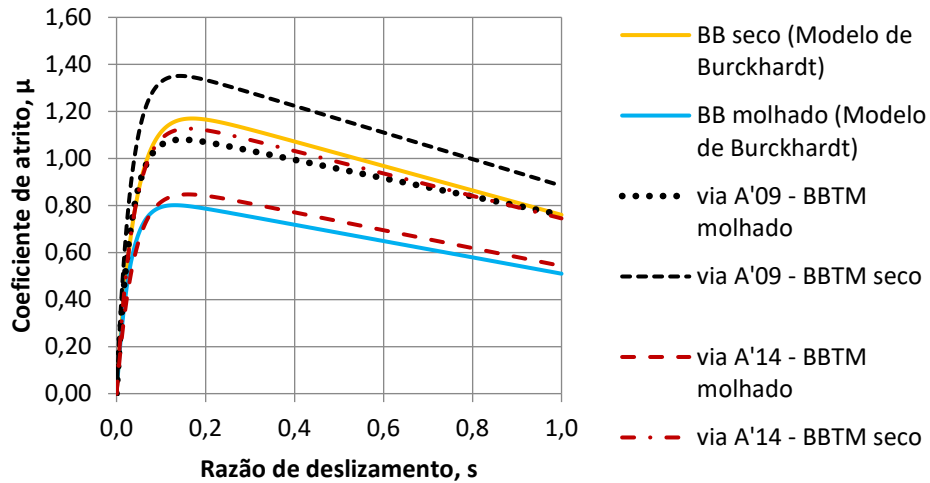


Gráfico 7.17 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da via A do Troço 1 (BBTM), nos anos 2009 e 2014

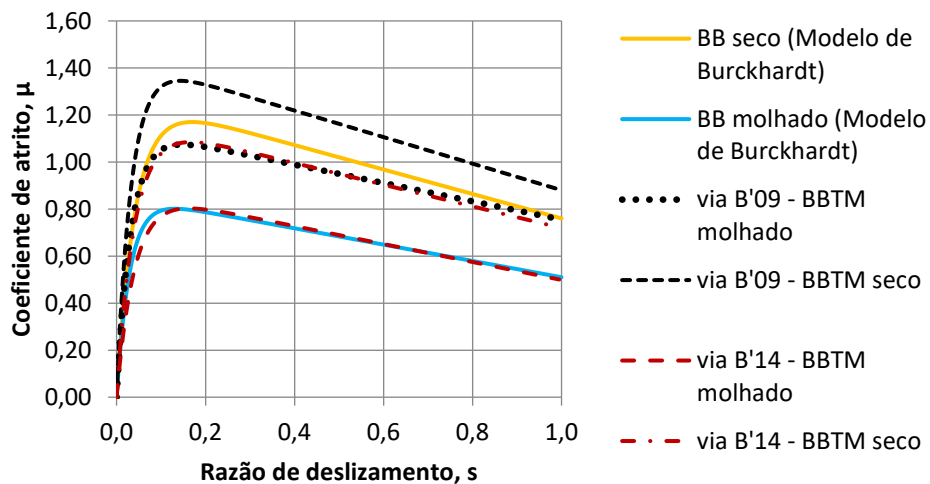


Gráfico 7.18 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da via B do Troço 1 (BBTM), nos anos 2009 e 2014

Relativamente ao Troço 1 (BBTM), pelos dados registados no ano 2009, a via A teve menor valor e a via B teve maior valor no ensaio de medição do coeficiente de atrito e, pelos dados registados no ano 2014, a via A teve maior valor e a via B teve menor valor no ensaio de medição do coeficiente de atrito. À semelhança do sucedido no Troço 2 (BB), este efeito foi

bem evidente nos resultados das distâncias de travagem calculadas para os dois anos em questão no Troço 1 (BBTM).

Os Gráficos 7.19 e 7.20 apresentam as distâncias de travagem relativas ao ano de 2009 e 2014 do Troço 1 (BBTM), respetivamente, obtidas no caso do veículo sem ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

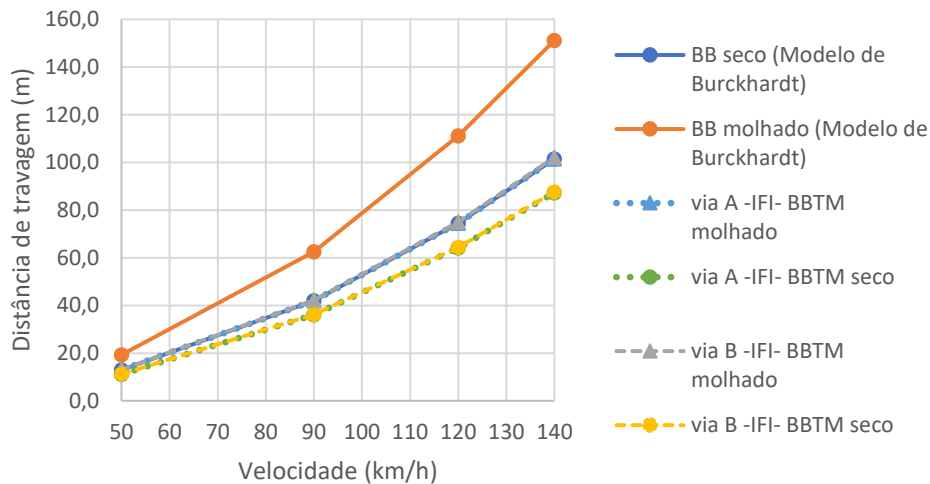


Gráfico 7.19 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço 1 (BBTM), no ano 2009

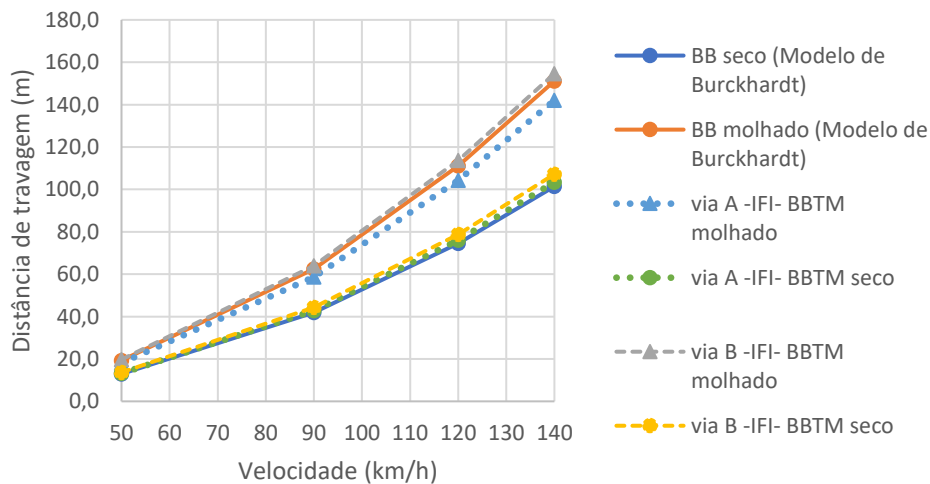


Gráfico 7.20 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para o Troço 1 (BBTM), no ano 2014

Pela análise do gráfico, as distâncias de travagem obtidas encontram-se próximas do modelo de referência, tal como era pretendido. À semelhança dos resultados da camada de desgaste em BB, para as vias em que foi considerado o maior valor do ensaio de medição do

coeficiente de atrito, observa-se que as distâncias de travagem obtidas foram mais baixas em relação às vias com menor valor.

Para o Troço 1 (BBTM), ao se analisar as distâncias de travagem obtidas para um veículo sem ABS em 2014, quando comparadas ao ano 2009, para a via A, aumentaram cerca de 28,6% para condições molhadas e cerca de 15,7% para condições secas, já para a via B, aumentaram cerca de 34,0% para condições molhadas e cerca de 18,3% para condições secas. O maior aumento das distâncias ocorreu para a via B em consequência do decréscimo que o valor do ensaio de medição do coeficiente de atrito teve em 5 anos (decreceu 23,5%), pouco superior ao decréscimo que ocorreu para o caso da via A (decreceu 20,0%).

Os Gráficos 7.21 e 7.22 apresentam as distâncias de travagem relativas ao ano de 2009 e 2014 do Troço 1 (BBTM), respetivamente, obtidas no caso do veículo com ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

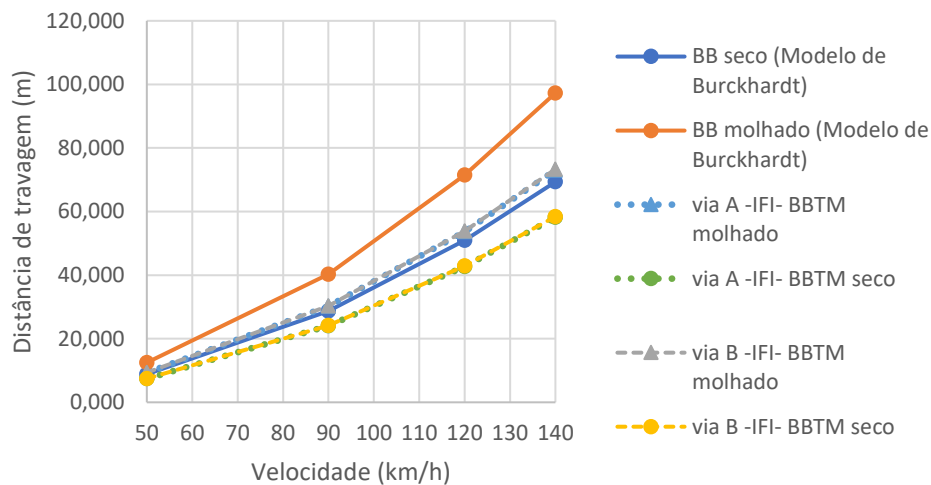


Gráfico 7.21 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço 1 (BBTM), no ano 2009

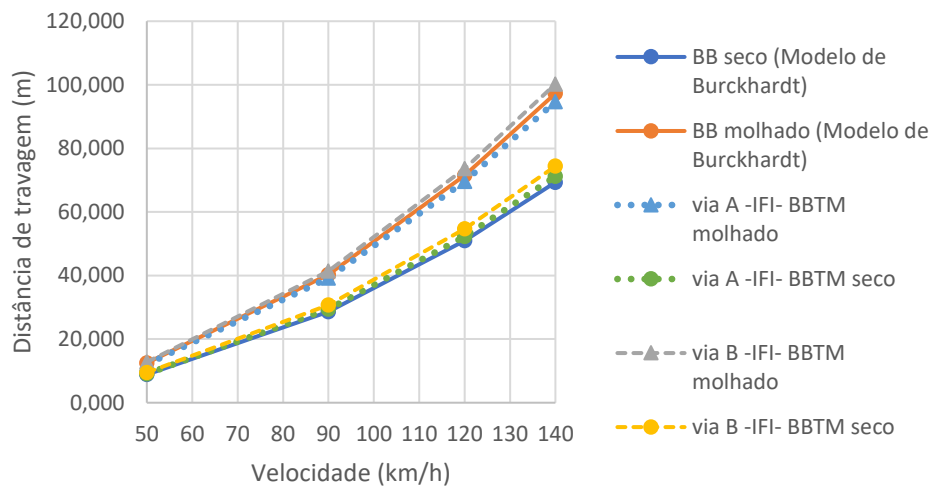


Gráfico 7.22 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para o Troço 1 (BBTM), no ano 2014

Ao analisar as distâncias de travagem obtidas para um veículo com ABS, relativas ao Troço 1 (BBTM), em 2014, quando comparadas ao ano 2009, para a via A, aumentaram cerca de 22,9% para condições molhadas e cerca de 18,3% para condições secas, já para a via B, aumentaram cerca de 26,3% para condições molhadas e cerca de 21,5% para condições secas.

Comparando as distâncias de travagem num veículo sem ABS com um veículo com ABS, relativas ao Troço 1 (BBTM), no ano de 2014, para condições molhadas diminuíram em média 34,2% e para condições secas diminuíram em média 30,9%.

Os Gráficos 7.23 e 7.24 apresentam as distâncias de travagem relativas ao ano de 2009 e 2014 do Troço 1 (BBTM), respetivamente, obtidas no caso do veículo com ABS modificado, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

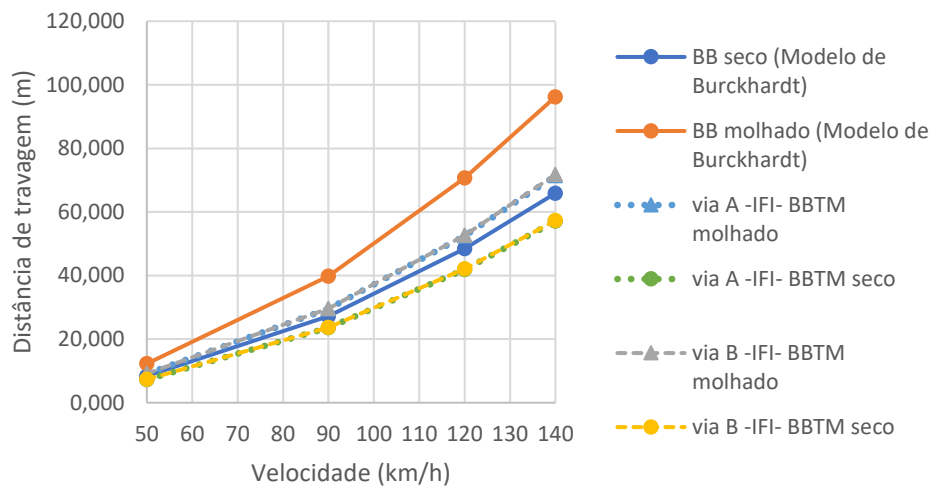


Gráfico 7.23 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço 1 (BBTM), no ano 2009

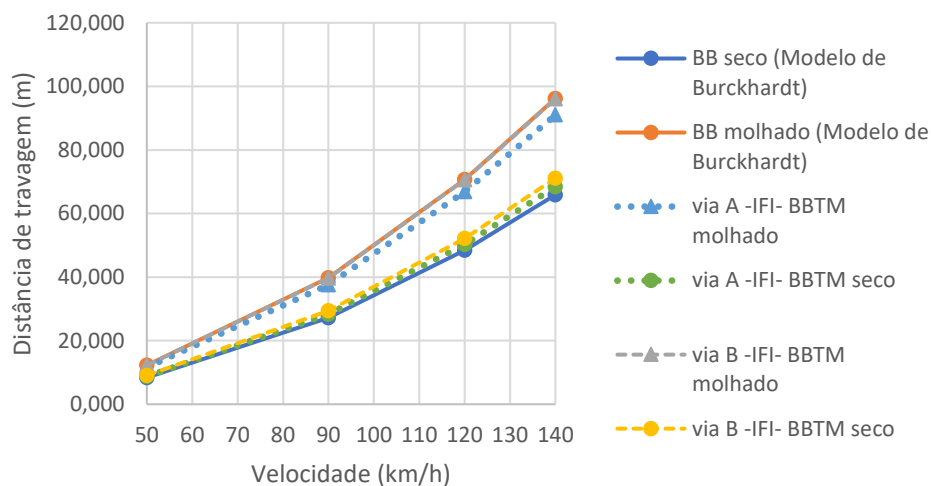


Gráfico 7.24 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para o Troço 1 (BBTM), no ano 2014

Ao analisar as distâncias de travagem obtidas para um veículo com ABS modificado, relativas ao Troço 1 (BBTM), em 2014, quando comparadas ao ano 2009, para a via A, aumentaram cerca de 21,6% para condições molhadas e cerca de 16,6% para condições secas, já para a via B, aumentaram cerca de 25,3% para condições molhadas e cerca de 19,4% para condições secas.

Comparando as distâncias de travagem num veículo com ABS e num veículo com ABS modificado, relativas ao Troço 1 (BBTM), no ano de 2014, para condições molhadas diminuíram em média 4,1% e para condições secas diminuíram em média 4,2%.

Por fim, quando comparado o veículo sem ABS com o veículo com ABS modificado, relativamente ao Troço 1 (BBTM), no ano de 2014, para condições molhadas diminuíram em média 36,9% e para condições secas diminuíram em média 33,8%.

### 7.2.3 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Drenante - BBD

Para a camada de desgaste em BBD foram disponibilizados dados de um troço com quatro vias (duas em cada sentido), como referido no capítulo anterior, do Troço BBD.

Obtidas as curvas  $\mu$ - $s$  para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto, apresentadas em seguida nos Gráficos 7.25 a 7.28, foram calculadas as distâncias de travagem, para os três tipos de sistemas ABS, em condições molhadas e secas, e ainda considerando a camada de desgaste como nova e velha. As tabelas de resultados apresentam-se nas Tabelas E.VII e E.VIII do Anexo E.

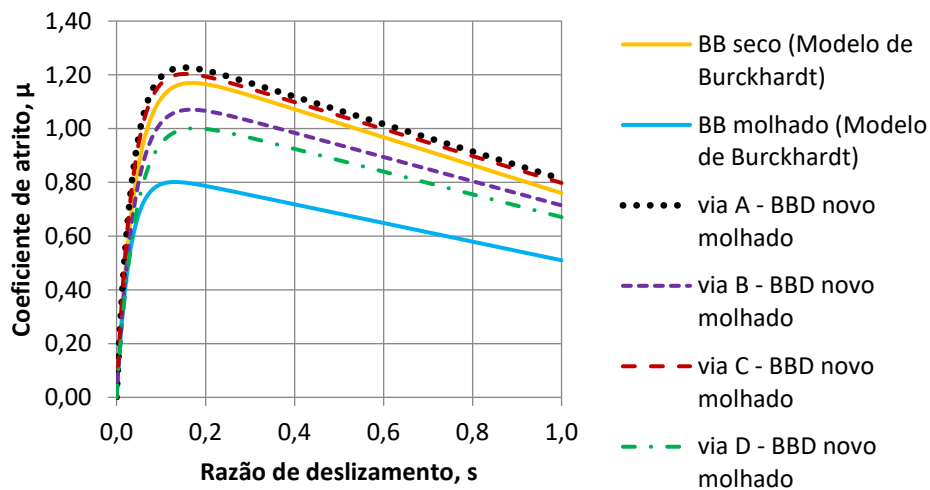


Gráfico 7.25 – Curvas  $\mu$ - $s$ , do modelo padronizado desenvolvido, das vias da do Troço BBD com camada de desgaste nova molhada



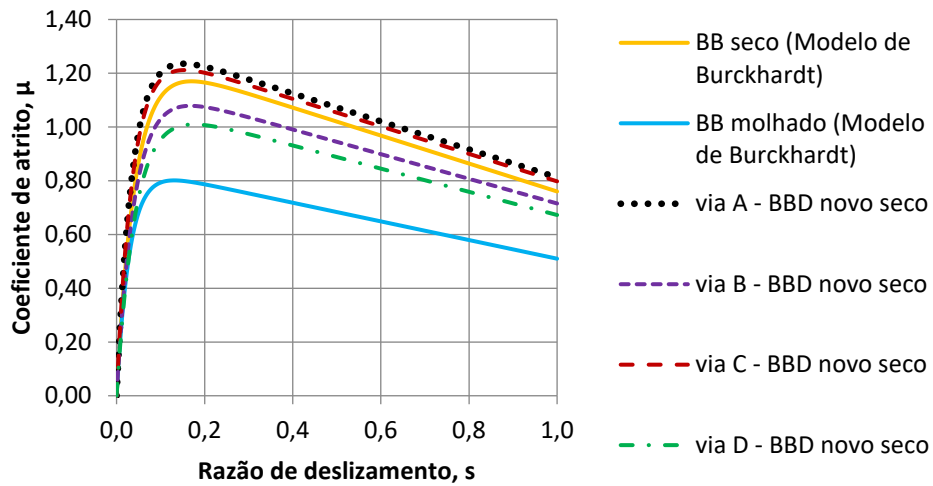


Gráfico 7.26 – Curvas  $\mu$ - $s$ , do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BBD com camada de desgaste nova seca

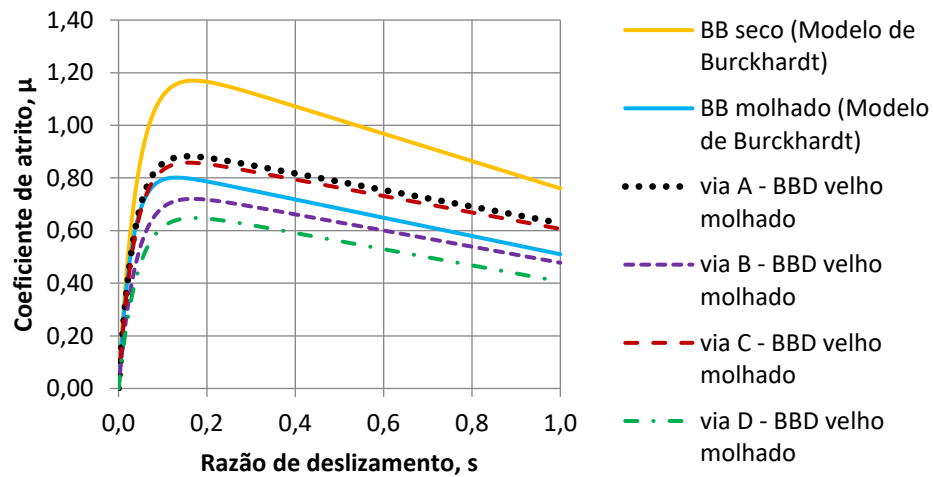


Gráfico 7.27 – Curvas  $\mu$ - $s$ , do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BBD com camada de desgaste velha molhada

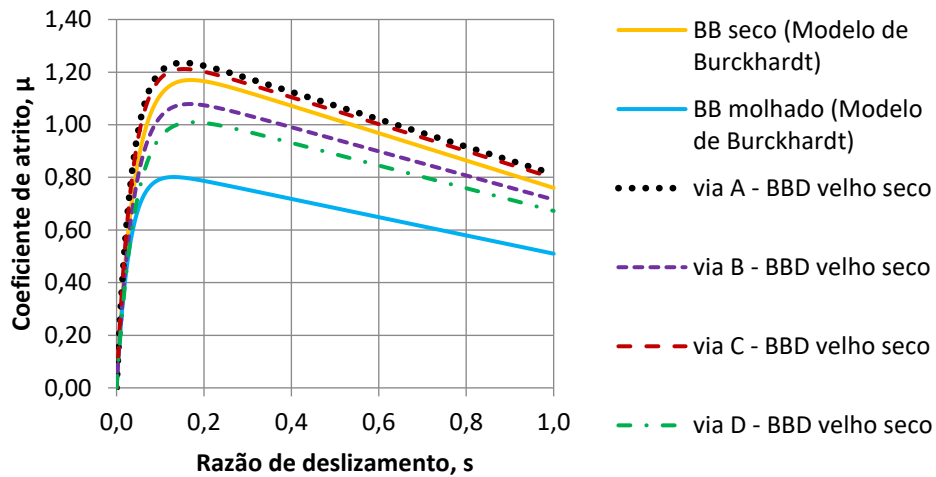


Gráfico 7.28 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, das vias do Troço BBD com camada de desgaste velha seca

Para a análise apresentada em seguida, no caso do Troço BBD, optou-se por selecionar a via C, que teve maior valor, e a via B, que teve menor valor no ensaio de medição do coeficiente de atrito.

Os Gráficos 7.29 e 7.30 apresentam as distâncias de travagem relativas às vias B e C, respectivamente, do Troço BBD, obtidas no caso do veículo sem ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

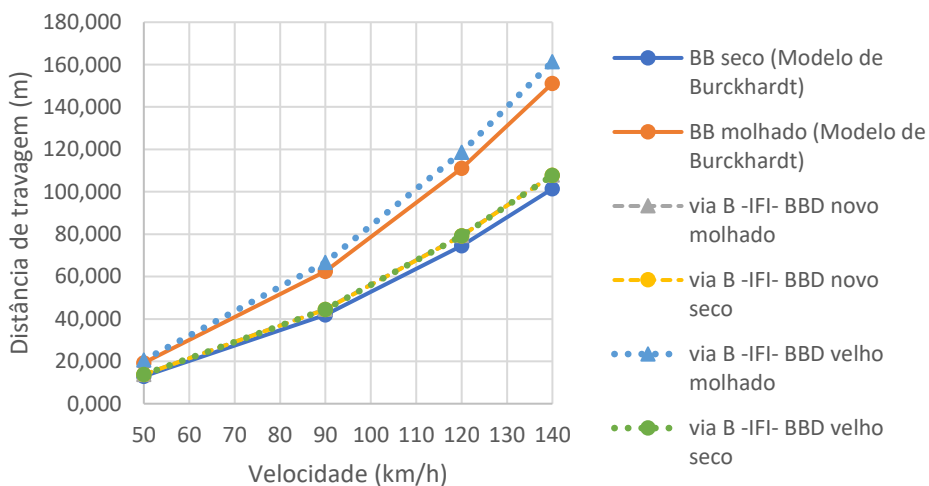


Gráfico 7.29 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para a via B do Troço BBD

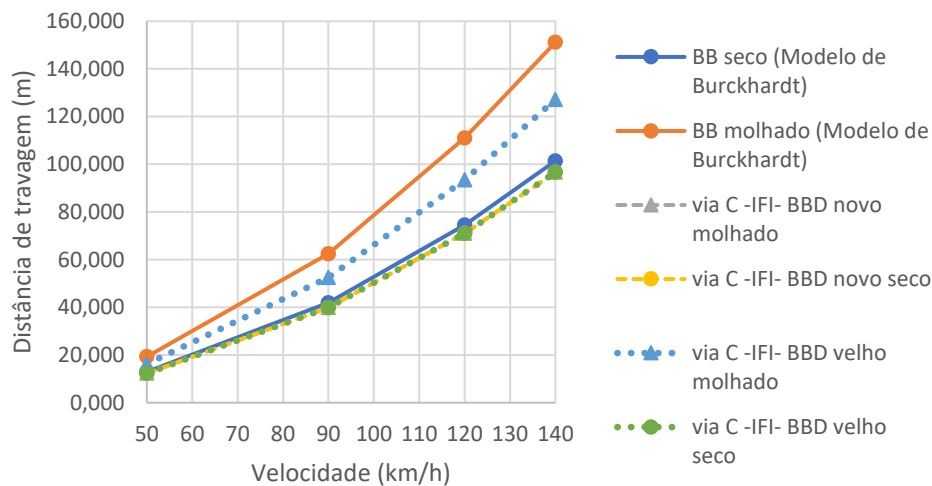


Gráfico 7.30 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para a via C do Troço BBD

Pela análise dos gráficos, as distâncias de travagem obtidas encontram-se próximas do modelo de referência, tal como era pretendido.

Comparando a situação de camada de desgaste nova, em condições secas e velhas, os valores obtidos para as distâncias de travagem foram muito idênticos, sobrepondo-se nos gráficos. Quando a camada de desgaste foi considerada velha e em condições secas, assumiu-se que tem um comportamento similar às condições secas e molhadas da camada nova, em função disso, os resultados obtidos foram muito próximos. Já no que diz respeito à camada de desgaste velha e em condições molhadas, esta apresentou valores para as distâncias de travagem mais elevados, em relação às outras condições, e próximos da camada de BB molhado do modelo de referência, resultado da colmatação de vazios que a camada drenante sofre devido ao tráfego ao longo dos anos de serviço.

Os Gráficos 7.31 e 7.32 apresentam as distâncias de travagem relativas às vias B e C, respetivamente, do Troço BBD, obtidas no caso do veículo com ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

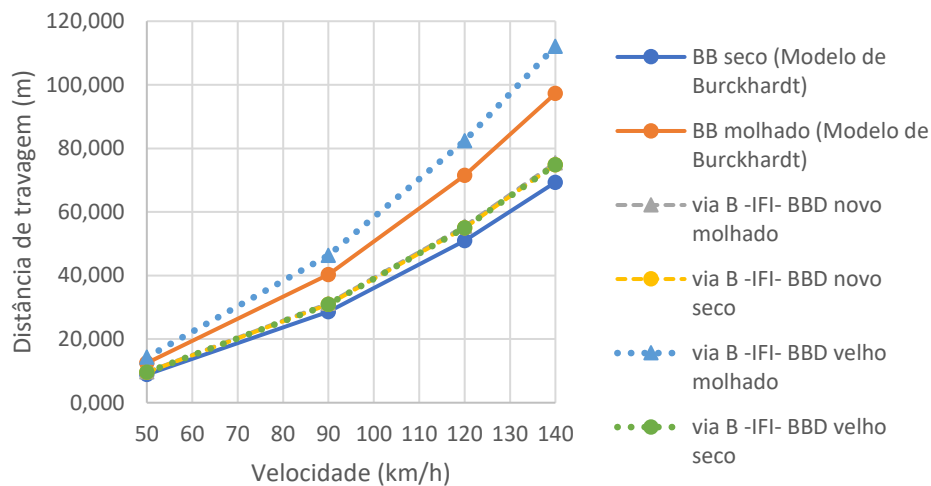


Gráfico 7.31 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para a via B do Troço BBD

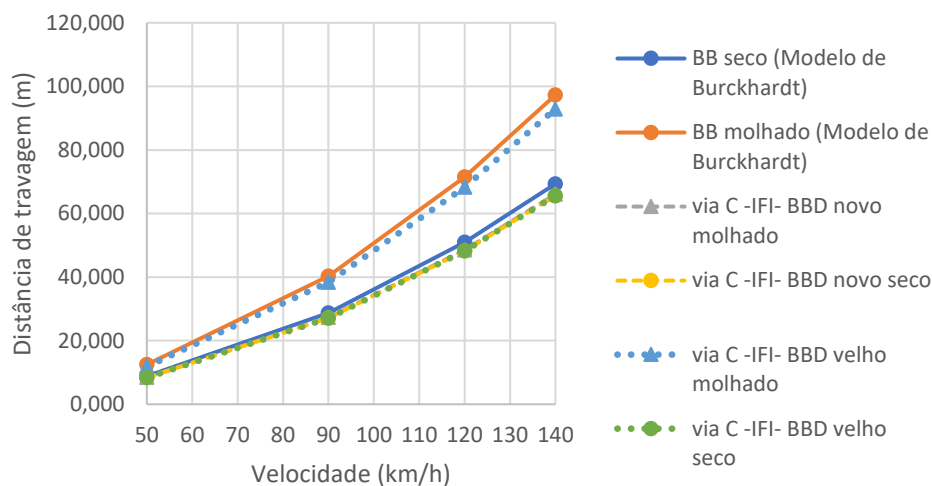


Gráfico 7.32 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para a via C do Troço BBD

As distâncias de travagem num veículo com ABS, para uma camada de desgaste nova, relativa ao Troço BBD, para condições molhadas diminuíram em média 30,8% e para condições secas diminuíram em média 31,3%. As distâncias de travagem para uma camada de desgaste velha, relativa ao Troço BBD, para condições molhadas diminuíram em média 28,7% e para condições secas diminuíram em média 31,3%.

Os Gráficos 7.33 e 7.34 apresentam as distâncias de travagem relativas às vias B e C, respetivamente, do Troço BBD, obtidas no caso do veículo com ABS modificado, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

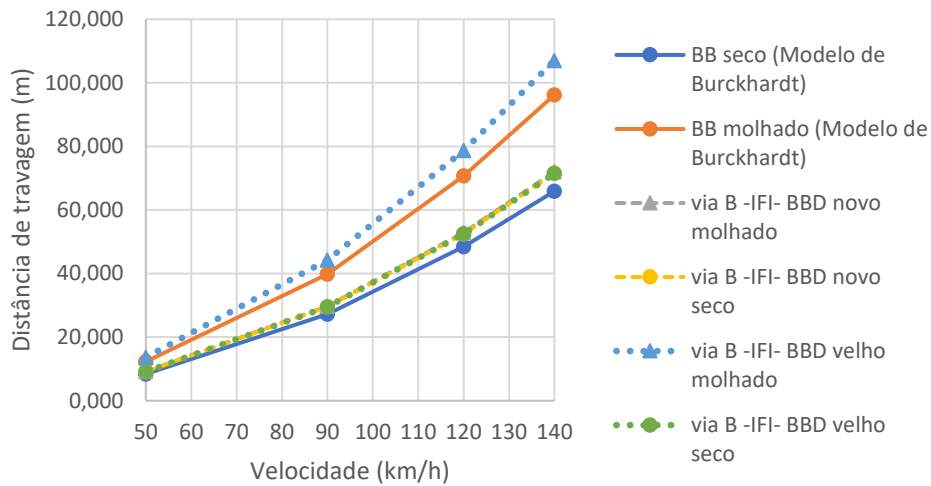


Gráfico 7.33 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para a via B do Troço BBD

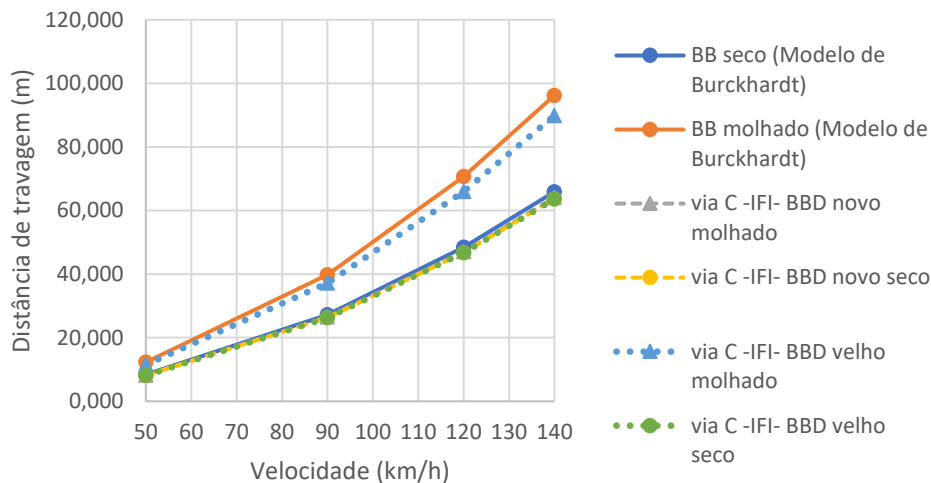


Gráfico 7.34 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para a via C do Troço BBD

Comparando as distâncias de travagem num veículo com ABS e num veículo com ABS modificado, para uma camada de desgaste nova, relativa ao Troço BBD, para condições molhadas diminuíram em média 3,8% e para condições secas diminuíram em média 3,8%. As distâncias de travagem para uma camada de desgaste velha, relativa ao Troço BBD, para condições molhadas diminuíram em média 3,9% e para condições secas diminuíram em média 3,8%.

Por fim, quando comparado o veículo sem ABS com o veículo com ABS modificado, para uma camada de desgaste nova, relativa ao Troço BBD, para condições molhadas diminuíram

em média 33,5% e para condições secas diminuíram em média 33,9%. As distâncias de travagem para uma camada de desgaste velha, relativa ao Troço BBD, para condições molhadas diminuíram em média 31,5% e para condições secas diminuíram em média 33,9%.

#### 7.2.4 Camada de Desgaste em Betão Betuminoso Rugoso - BBR

Para a camada de desgaste em BBR foram utilizados os dados do ensaio realizado com SCRIM, retirados da bibliografia. Obtidas as curvas  $\mu$ -s para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto, apresentadas em seguida no Gráfico 7.35, foram calculadas as distâncias de travagem, para os três tipos de sistemas ABS, em condições molhadas e secas, e ainda considerando a camada de desgaste como nova e velha. A tabela de resultados apresenta-se na Tabela E.IX do Anexo E.

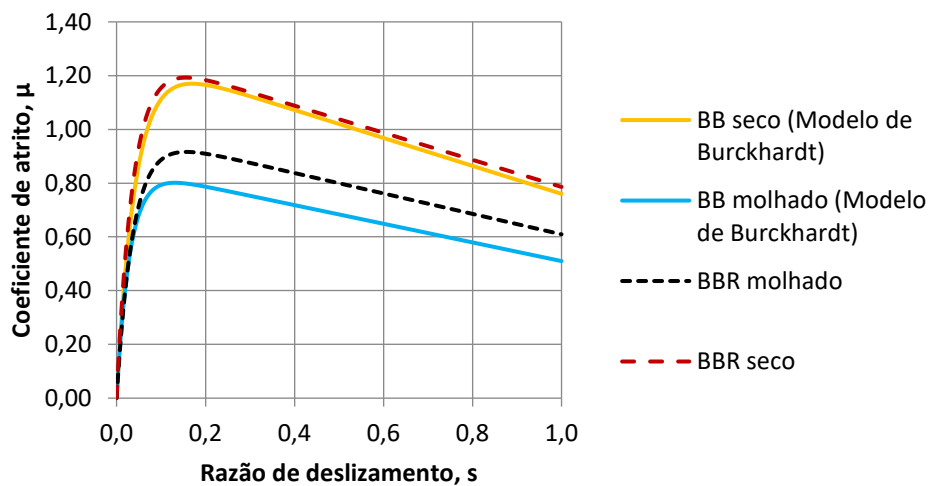


Gráfico 7.35 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da camada de desgaste BBR

O Gráfico 7.36 apresenta as distâncias de travagem obtidas no caso do veículo sem ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

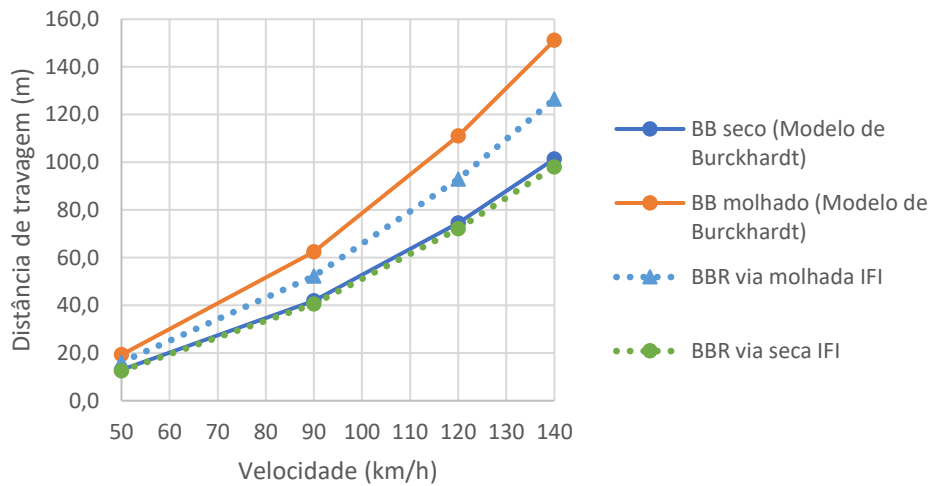


Gráfico 7.36 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para BBR

Uma vez que a camada de desgaste em BBR, quando comparada com uma camada de desgaste em BB, apresenta características superficiais um pouco melhores oferecendo maior coeficiente de atrito, então quando calculadas as distâncias de travagem obtidas num veículo sem ABS, estas eram de esperar que se encontrassem abaixo, mas ainda assim próximas, das distâncias de travagem do modelo de referência.

O Gráfico 7.37 apresenta as distâncias de travagem obtidas no caso do veículo com ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

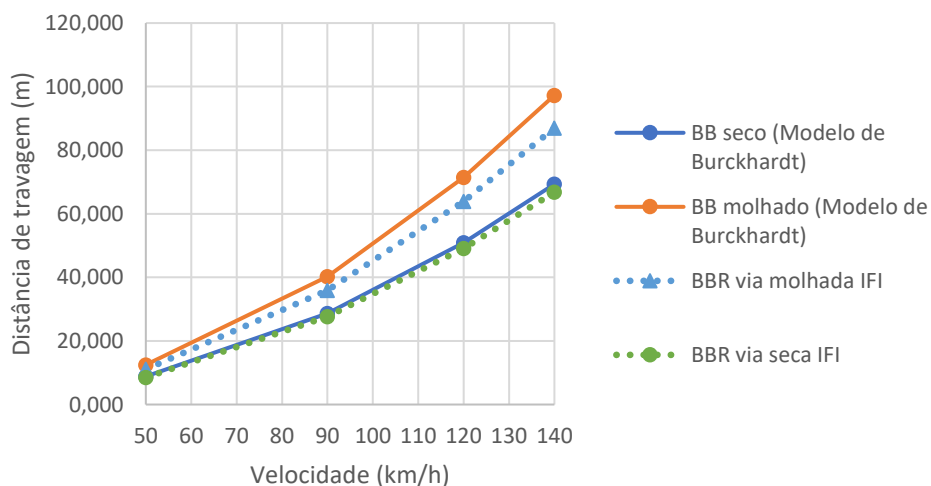


Gráfico 7.37 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para BBR

Comparando as distâncias de travagem num veículo sem ABS e num veículo com ABS, para a camada de desgaste BBR, para condições molhadas diminuíram em média 31,2% e para condições secas diminuíram em média 31,9%.

O Gráfico 7.38 apresenta as distâncias de travagem obtidas no caso do veículo com ABS modificado, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

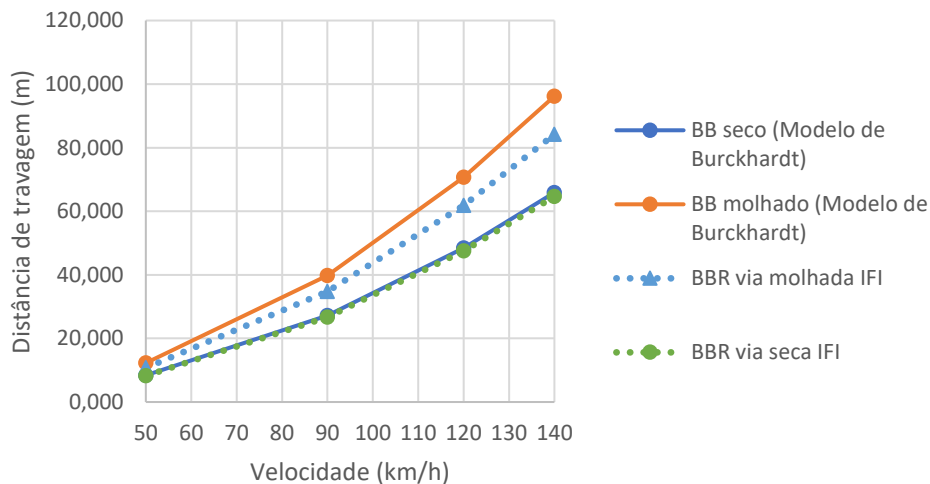


Gráfico 7.38 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para BBR

Comparando as distâncias de travagem num veículo com ABS e num veículo com ABS modificado, para a camada de desgaste BBR, para condições molhadas diminuíram em média 3,2% e para condições secas diminuíram em média 3,2%.

E ainda, quando comparado o veículo sem ABS com o veículo com ABS modificado, para uma camada de desgaste BBR, para condições molhadas diminuíram em média 33,5% e para condições secas diminuíram em média 34,1%.

Por fim, comparando as distâncias de travagem do modelo de Burckhardt com o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto, para a camada de desgaste em BBR, vem: para um veículo sem ABS as distâncias de travagem diminuíram cerca de 16,3% para condições molhadas e cerca de 3,3% para condições secas; para um veículo com ABS as distâncias de travagem diminuíram cerca de 10,7% para condições molhadas e cerca de 3,7% para condições secas e, para um veículo com ABS modificado as distâncias de travagem diminuíram cerca de 12,5% para condições molhadas e cerca de 1,9% para condições secas.



### 7.2.5 Camada de Desgaste em *Stone Mastic Asphalt* - SMA

Para a camada de desgaste em SMA foram utilizados os dados do ensaio realizado com *GripTester*, retirados da bibliografia. Obtidas as curvas  $\mu$ -s para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto, apresentadas em seguida no Gráfico 7.39, foram calculadas as distâncias de travagem, para os três tipos de sistemas ABS, em condições molhadas e secas. A tabela de resultados apresenta-se na Tabela E.X do Anexo E.

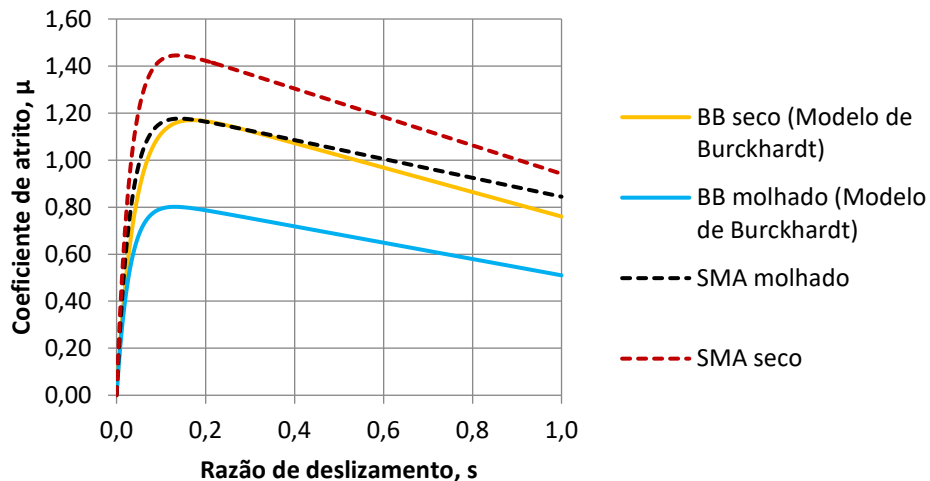


Gráfico 7.39 – Curvas  $\mu$ -s, do modelo padronizado desenvolvido, da camada de desgaste SMA

O Gráfico 7.40 apresenta as distâncias de travagem obtidas no caso do veículo sem ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

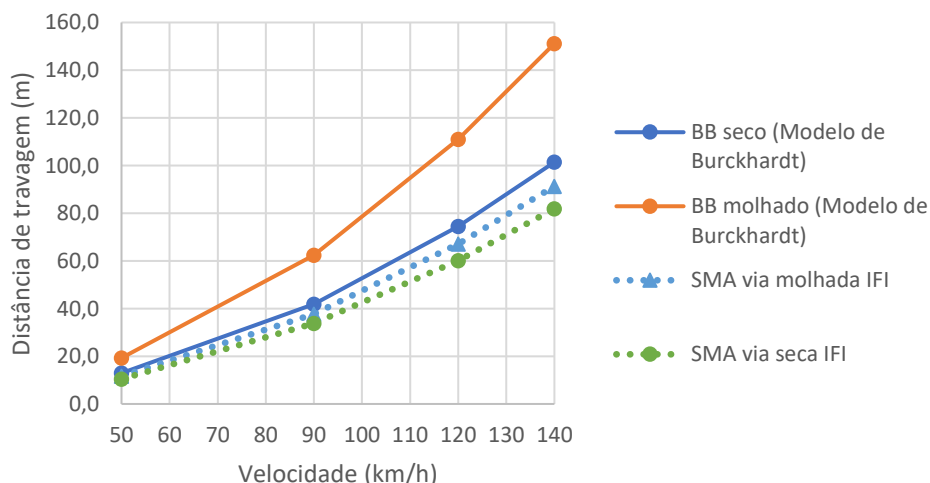


Gráfico 7.40 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo sem ABS para SMA

Uma vez que a camada de desgaste em SMA, quando comparada com uma camada de desgaste em BB, apresenta características superficiais muito melhores oferecendo maior coeficiente de atrito, então quando calculadas as distâncias de travagem obtidas num veículo sem ABS, estas eram de esperar que se encontrassem abaixo das distâncias de travagem do modelo de referência.

O Gráfico 7.41 apresenta as distâncias de travagem obtidas no caso do veículo com ABS, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

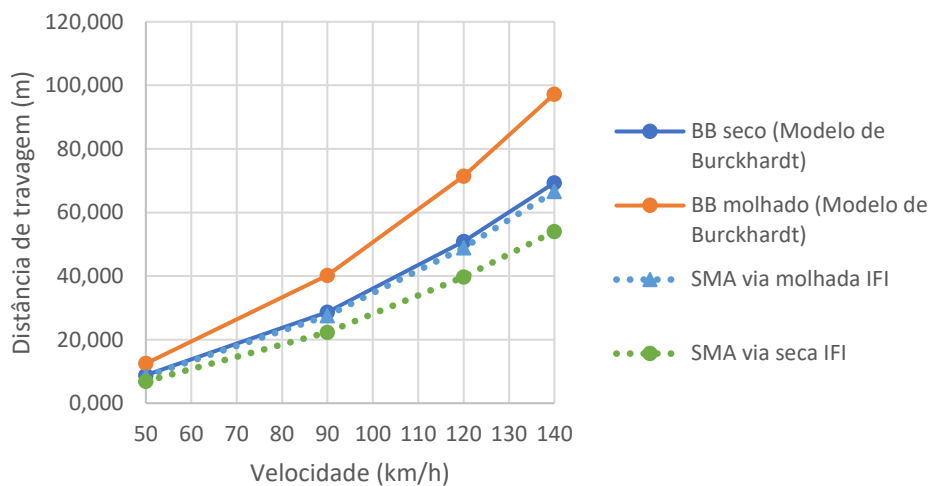


Gráfico 7.41 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS para SMA

Comparando as distâncias de travagem num veículo sem ABS e num veículo com ABS, para a camada de desgaste SMA, para condições molhadas diminuíram em média 27,1% e para condições secas diminuíram em média 33,9%.

O Gráfico 7.42 apresenta as distâncias de travagem obtidas no caso do veículo com ABS modificado, para o modelo de referência e para o modelo de interação pneu-pavimento padronizado.

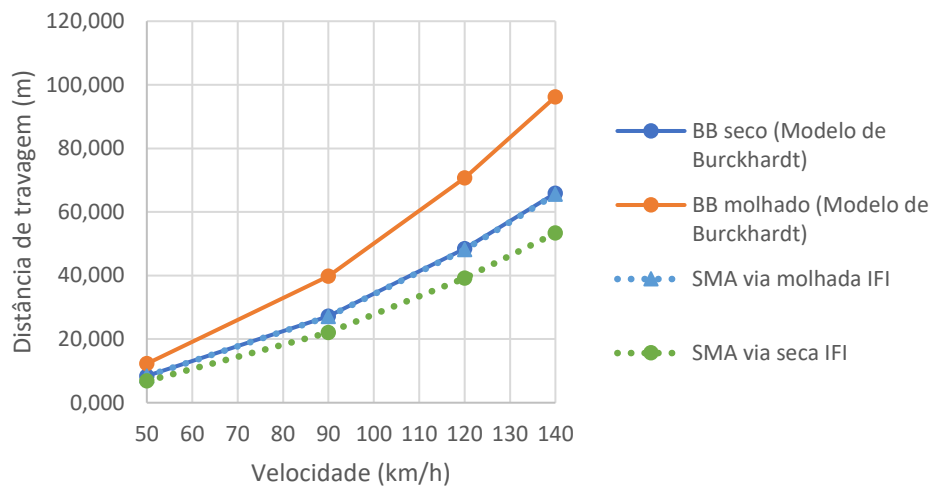


Gráfico 7.42 – Distância de travagem em função da velocidade do veículo com ABS modificado para SMA

Comparando as distâncias de travagem num veículo com ABS e num veículo com ABS modificado, para a camada de desgaste SMA, para condições molhadas diminuíram em média 1,6% e para condições secas diminuíram em média 1,3%.

E ainda, quando comparado o veículo sem ABS com o veículo com ABS modificado, para uma camada de desgaste SMA, para condições molhadas diminuíram em média 28,2% e para condições secas diminuíram em média 34,8%.

Por fim, comparando as distâncias de travagem do modelo de Burckhardt com o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto, para a camada de desgaste em SMA, vem: para um veículo sem ABS as distâncias de travagem diminuíram cerca de 39,6% para condições molhadas e cerca de 19,3% para condições secas; para um veículo com ABS as distâncias de travagem diminuíram cerca de 31,6% para condições molhadas e cerca de 22,0% para condições secas e, para um veículo com ABS modificado as distâncias de travagem diminuíram cerca de 31,9% para condições molhadas e cerca de 19,0% para condições secas.

### 7.3 Norma de Traçado

A norma de traçado tem como principal objetivo a conceção de projetos de estradas de acordo com bases constantes, incorporando princípios básicos, métodos e valores limite e de referência para os projetos de estradas, de acordo com a Rede Rodoviária Nacional (RRN). Na elaboração do projeto geométrico é condição fundamental a garantia da distância de visibilidade de paragem.

As distâncias de travagem tidas em consideração pelo projetista, de acordo com a norma de traçado em vigor em Portugal, e as distâncias de travagem, seleccionadas de entre as calculadas no Subcapítulo 7.2.1, para a camada de desgaste em Betão Betuminoso Denso (BB), encontram-se apresentadas na Tabela F.I do Anexo F. De notar que de acordo com o conjunto de dados fornecidos foram seleccionadas as vias em que se obteve melhor ou pior resultado. Ao analisar a tabela, verificou-se que os valores obtidos se encontram abaixo dos valores de projeto para os três tipos de sistemas de segurança ativa em estudo (sem ABS, com ABS e com ABS modificado), independentemente das características superficiais da camada de desgaste serem as melhores ou piores, isto é, em condições secas ou molhadas, respetivamente. O Gráfico 7.43 apresenta as distâncias de travagem para as vias com melhor e pior resultados (para o Troço BB e o Troço 2 (BB) dos anos de ensaio de 2009 e de 2014), obtidas pelo Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado proposto e pela Norma de Traçado em vigor.

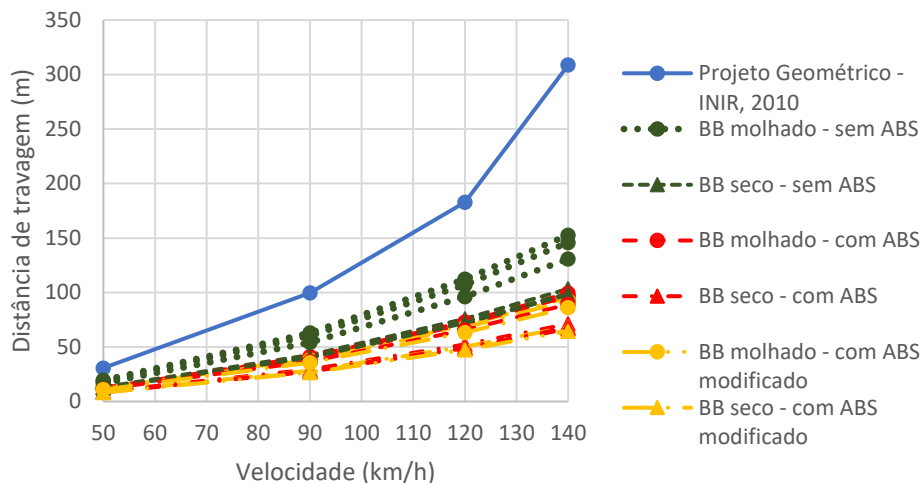


Gráfico 7.43 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em BB

Para o estudo exposto em seguida, foi seleccionado o caso mais desfavorável de entre os vários dados fornecidos para uma camada de desgaste em BB, sendo então a análise em relação à via B do Troço 2, em condições molhadas, relativa ao ano de ensaios de 2014. Os Gráficos 7.44 a 7.47 apresentam as distâncias de travagem calculadas de acordo com o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto (para a via mais desfavorável), o modelo de Burckhardt e a norma de traçado, para os três tipos de sistemas e a velocidades diferentes.

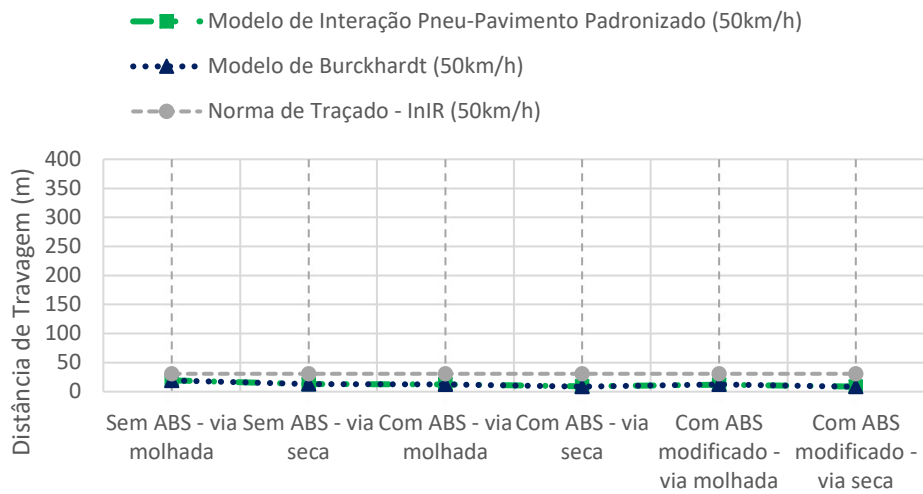


Gráfico 7.44 – Distâncias de travagem em BB para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 50 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

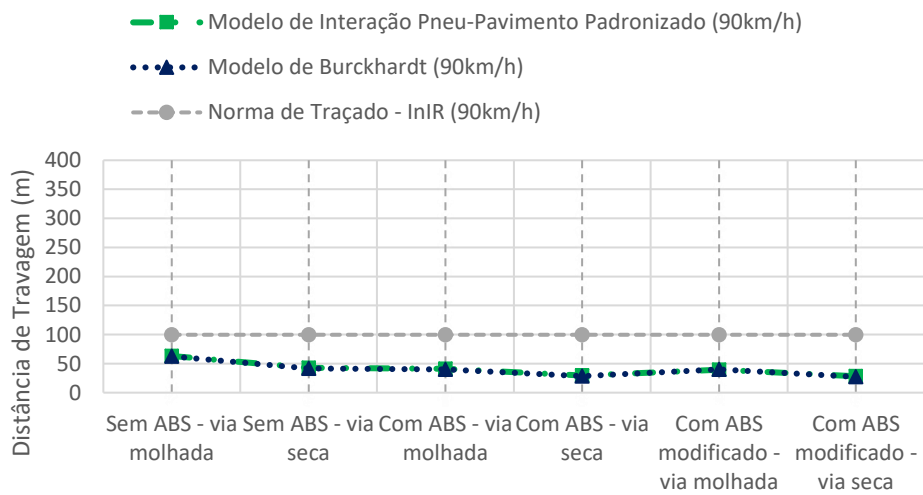


Gráfico 7.45 – Distâncias de travagem em BB para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 90 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

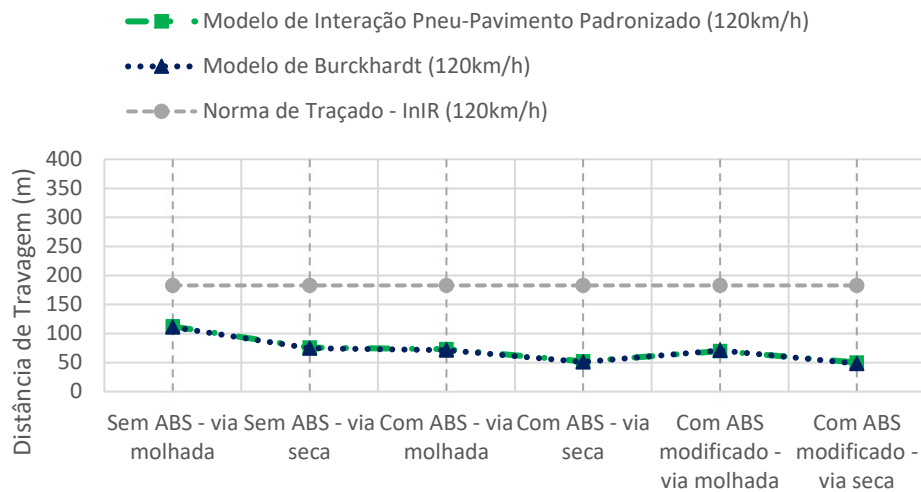


Gráfico 7.46 – Distâncias de travagem em BB para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 120 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

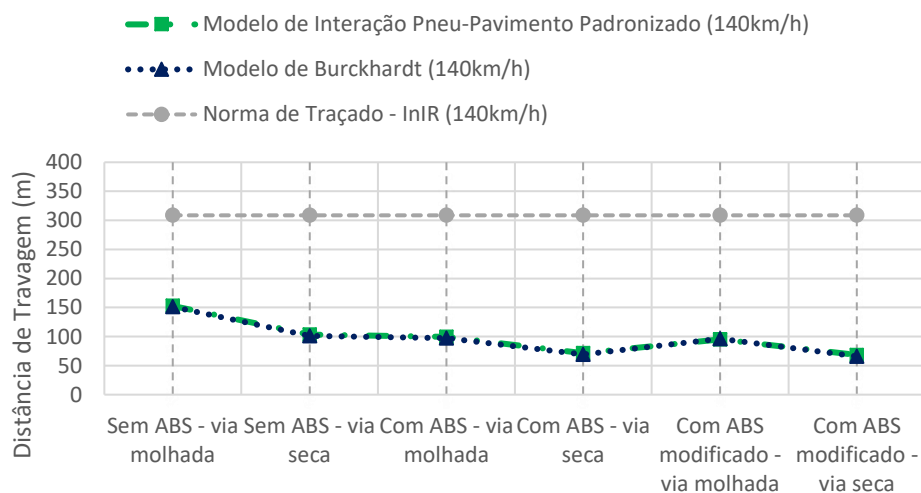


Gráfico 7.47 – Distâncias de travagem em BB para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 140 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

Como se pode observar, as distâncias obtidas pelo modelo de interação pneu-pavimento padronizado e pelo modelo de Burckhardt foram muito semelhantes, tal como esperado, uma vez que o modelo desenvolvido teve este como base. Com o aumento da velocidade também aumentou a distância de travagem, verificando-se que a menor distância de travagem ocorre para o veículo com ABS modificado em condições de camada de desgaste seca para as diferentes velocidades de circulação.

Relembrar que a altura de água considerada nesta análise foi de 0,6 mm, o que na verdade não reflete o estado hídrico mais grave da superfície da camada de desgaste. O modelo de

interação pneu-pavimento padronizado proposto, para além de incorporar as características superficiais da camada de desgaste, permite ainda o cálculo das distâncias de travagem de acordo com a altura de água presente na camada de desgaste, tornando-se outra vantagem da sua aplicação. Quanto maior for a altura de água presente, maiores as distâncias de travagem obtidas, que será refletida pela alteração das curvas para a proximidade das curvas da norma traçado. A outra razão para essa aproximação suceder é o resultado obtido nos ensaios de macrotextura.

De forma análoga ao estudo apresentado para uma camada de desgaste em BB, foram selecionadas as vias em que se obteve melhor ou pior resultado, de entre as distâncias de travagem calculadas no Subcapítulo 7.2, para as restantes camadas de desgaste retratadas.

Para a camada de desgaste em Betão Betuminoso Muito Delgado (BBTM), ao analisar a Tabela F.III disponível no Anexo F, verificou-se que os valores obtidos se encontram abaixo dos valores de projeto para os três tipos de sistemas de segurança ativa em estudo (sem ABS, com ABS e com ABS modificado), independentemente das características superficiais da camada de desgaste serem as melhores ou piores, isto é, em condições secas ou molhadas, respetivamente. O Gráfico 7.48 apresenta as distâncias de travagem para as vias com melhor e pior resultados (para o Troço 1 (BBTM) dos anos de ensaio de 2009 e de 2014), obtidas pelo Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado proposto e pela Norma de Traçado em vigor.

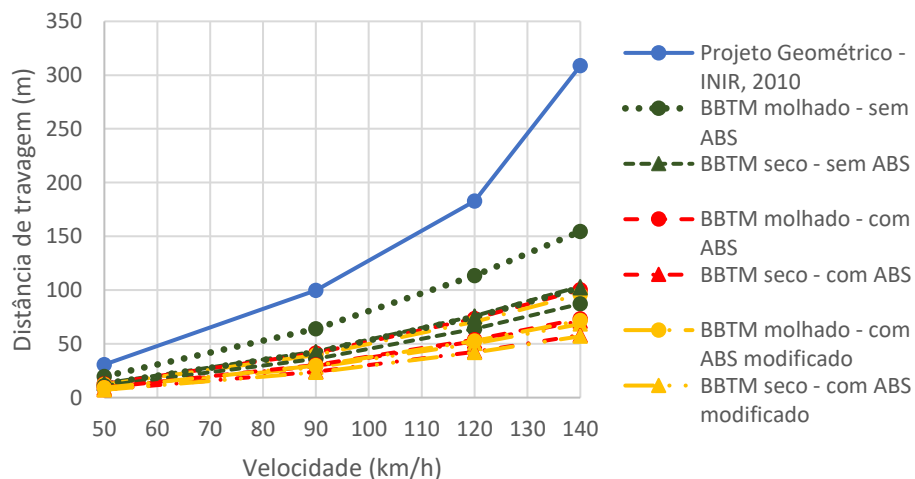


Gráfico 7.48 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em BBTM

O caso mais desfavorável de entre os vários dados fornecidos para uma camada de desgaste em BBTM sucedeu para a via B do Troço 1, em condições molhadas, relativa ao ano de ensaios de 2014. Os resultados obtidos para a via B, do Troço 1 de 2014, foram muito semelhantes aos resultados obtidos para a via selecionada na camada de desgaste em BB. Conclui-se que as distâncias obtidas pelo Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado e pelo Modelo de Burckhardt foram muito semelhantes, tal como esperado, uma vez que o modelo desenvolvido teve este como base. Com o aumento da velocidade também aumentou a distância de travagem, verificando-se que a menor distância de travagem ocorre para o veículo com ABS modificado em condições de camada de desgaste seca para as diferentes velocidades de circulação.

Dito isto, os Gráficos F.I, F.II, F.III e F.IV, que apresentam as distâncias de travagem calculadas de acordo com o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado proposto (para a via mais desfavorável), o Modelo de Burckhardt e a Norma de Traçado, para os três tipos de sistemas e a velocidades diferentes, encontram-se disponíveis no Anexo F.

Em relação à camada de desgaste em Betão Betuminoso Drenante (BBD), segundo o modelo proposto, as condições hídricas e as condições de estado da camada de desgaste apresentam-se na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Parâmetro k para o cálculo do coeficiente de permeabilidade e altura de água para Betão Betuminoso Drenante (Silvério, 2015)

Parâmetro		Pavimento Novo	Pavimento Velho
Condição de estado	k	1,0	1,3
Condição hídrica	$h_w$ (mm)	0,02	0,60

As distâncias para a camada de desgaste em BBD encontram-se apresentadas na Tabela F.II do Anexo F. Ao analisar a tabela, verificou-se que os valores obtidos se encontram abaixo dos valores de projeto para os três tipos de sistemas de segurança ativa em estudo (sem ABS, com ABS e com ABS modificado), independentemente das características superficiais da camada de desgaste serem as melhores ou piores, isto é, em condições secas ou molhadas, respetivamente. O Gráfico 7.49 apresenta as distâncias de travagem para as vias com melhor e pior resultados (para o Troço BBD), obtidas pelo modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto e pela norma de traçado em vigor.



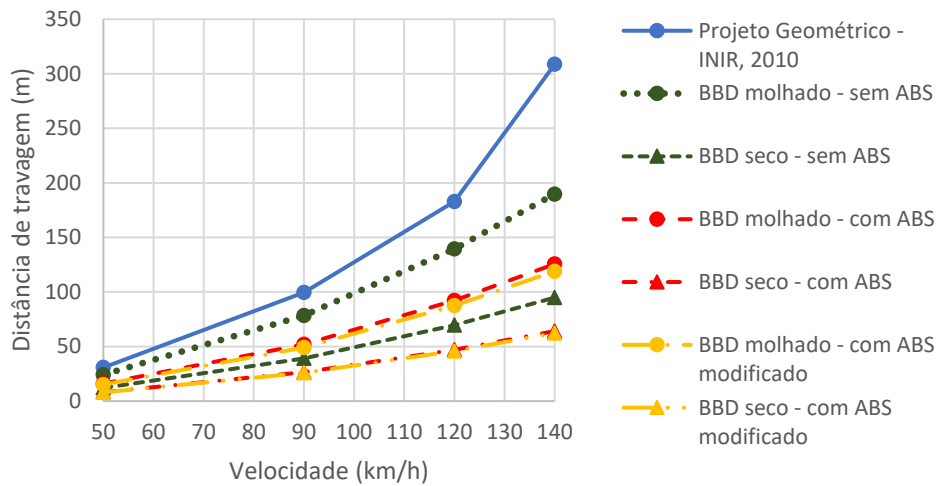


Gráfico 7.49 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em BBD

Para o estudo exposto em seguida, foi selecionado o caso mais desfavorável de entre os vários dados fornecidos para uma camada de desgaste em BBD, sendo então a análise em relação à via D do Troço BBD, em condições molhadas e com camada de desgaste considerada velha. Os Gráficos 7.50 a 7.53 apresentam as distâncias de travagem calculadas de acordo com o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto (para a via mais desfavorável), o modelo de Burckhardt e a norma de traçado, para os três tipos de sistemas e a velocidades diferentes.

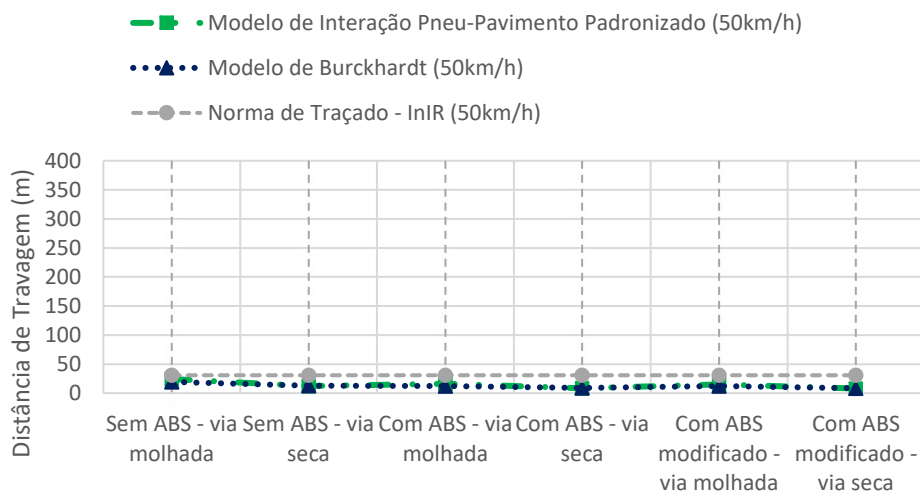


Gráfico 7.50 – Distâncias de travagem em BBD para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 50 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

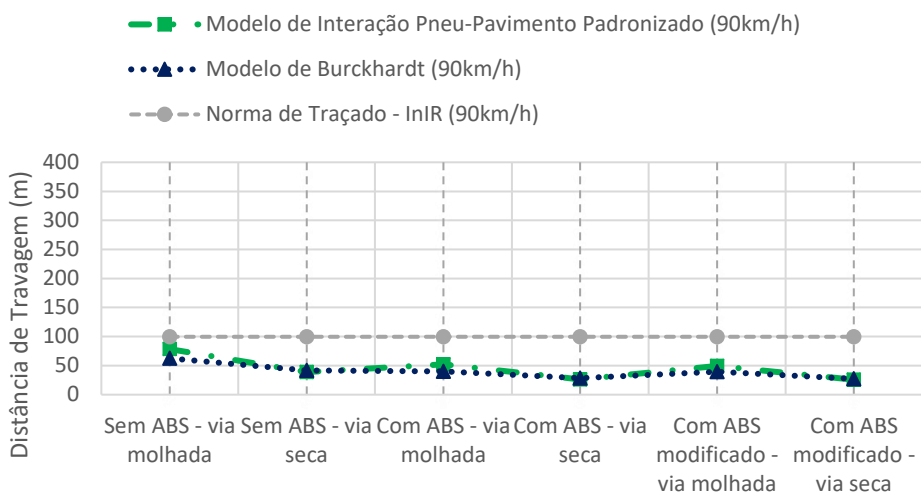


Gráfico 7.51 – Distâncias de travagem em BBD para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 90 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

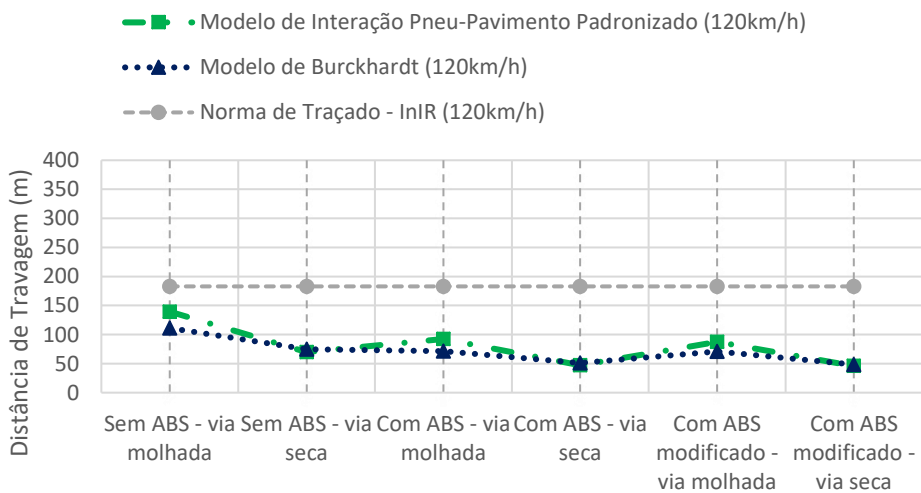


Gráfico 7.52 – Distâncias de travagem em BBD para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 120 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

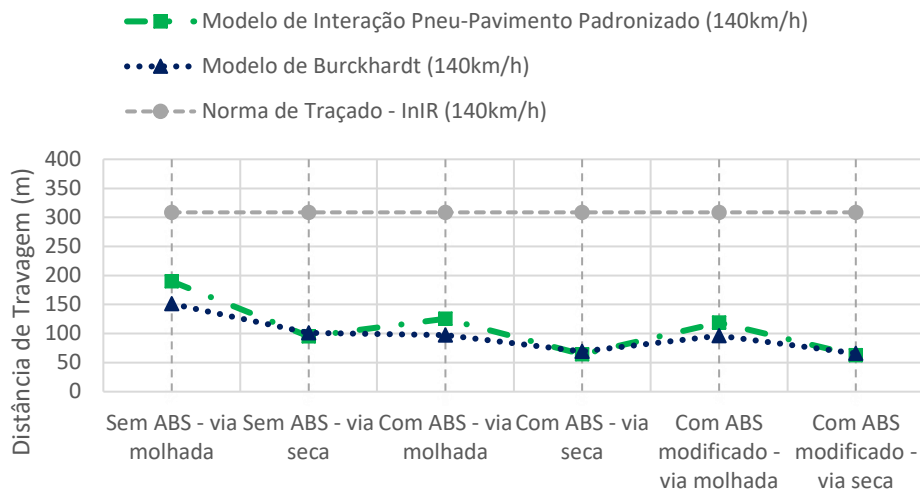


Gráfico 7.53 – Distâncias de travagem em BBD para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 140 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

Pela avaliação dos gráficos, as distâncias obtidas pelo Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado e pelo Modelo de Burckhardt foram muito semelhantes, tal como esperado, uma vez que o modelo desenvolvido teve este como base. Constatou-se que para o caso da camada de desgaste seca, os valores são muito próximos, já em condições molhadas, para o modelo proposto as distâncias de travagem obtidas foram mais elevadas, mas, ainda assim, para o caso mais desfavorável não excedeu as distâncias de travagem segundo a norma de traçado. Como observado para os casos anteriores, com o aumento da velocidade também aumentou a distância de travagem, verificando-se que a menor distância de travagem ocorre para o veículo com ABS modificado em condições de camada de desgaste seca para as diferentes velocidades de circulação. O Modelo de Interação Pneu-Pavimento proposto permite ainda avaliar o efeito da permeabilidade, ao longo dos anos, ao considerar esta camada de desgaste nova ou velha. De salientar que este efeito está relacionado com a colmatação dos vazios da camada, e que exerce grande influência nas distâncias de travagem obtidas.

Para a camada de desgaste em Betão Betuminoso Rugoso (BBR) e para a camada de desgaste em *Stone Mastic Asphalt* (SMA), ao analisar a Tabela F.IV disponível no Anexo F, verificou-se que os valores obtidos se encontram abaixo dos valores de projeto para os três tipos de sistemas de segurança ativa em estudo (sem ABS, com ABS e com ABS modificado), independentemente das características superficiais da camada de desgaste serem as melhores ou piores, isto é, em condições secas ou molhadas, respetivamente. Os Gráficos 7.54 e 7.55

apresentam as distâncias de travagem obtidas, com recurso a dados da bibliografia, pelo modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto e pela norma de traçado em vigor.

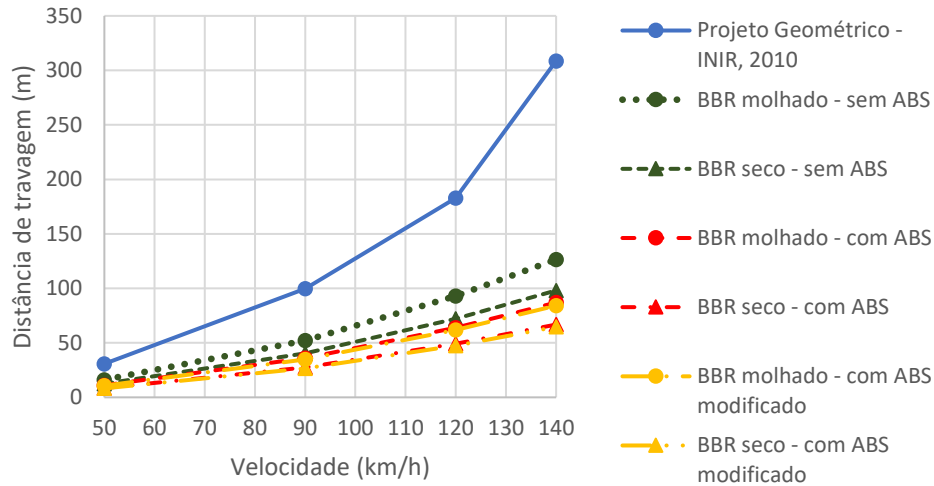


Gráfico 7.54 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em BBR

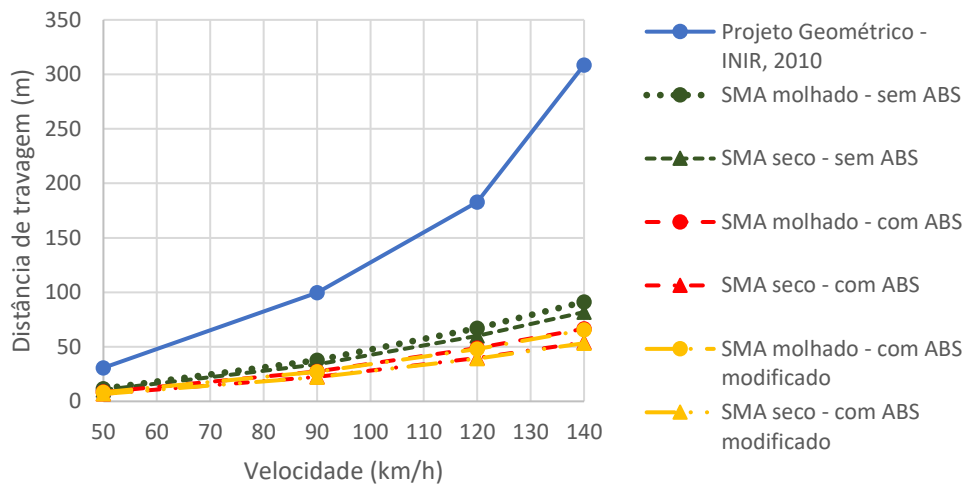


Gráfico 7.55 – Distância de travagem em função da velocidade dos três veículos segundo o modelo de interação proposto e a norma de traçado para uma camada de desgaste em SMA

Os resultados obtidos para a camada de desgaste em BBR, embora mais baixos, foram muito semelhantes aos resultados obtidos para a via selecionada na camada de desgaste em BB. Assim, teve-se que as distâncias obtidas pelo Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado e pelo Modelo de Burckhardt foram muito semelhantes, dos quais os valores obtidos para condições secas foram muito próximos, tal como esperado, uma vez que o

modelo desenvolvido teve este como base. Com o aumento da velocidade também aumentou a distância de travagem, verificando-se, também, que a menor distância de travagem ocorre para o veículo com ABS modificado em condições de camada de desgaste seca para as diferentes velocidades de circulação.

Dito isto, os Gráficos F.V, F.VI, F.VII e F.VIII, que apresentam as distâncias de travagem calculadas, em BBR, de acordo com o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado proposto, o Modelo de Burckhardt e a Norma de Traçado, para os três tipos de sistemas e a velocidades diferentes, encontram-se disponíveis no Anexo F.

Relativamente à camada de desgaste em SMA, os resultados obtidos para além de serem inferiores aos valores da norma de traçado, foram também inferiores aos valores do modelo de Burckhardt. Os Gráficos 7.56 a 7.59 apresentam as distâncias de travagem calculadas de acordo com o modelo de interação pneu-pavimento padronizado proposto, o modelo de Burckhardt e a norma de traçado, para os três tipos de sistemas e a velocidades diferentes.

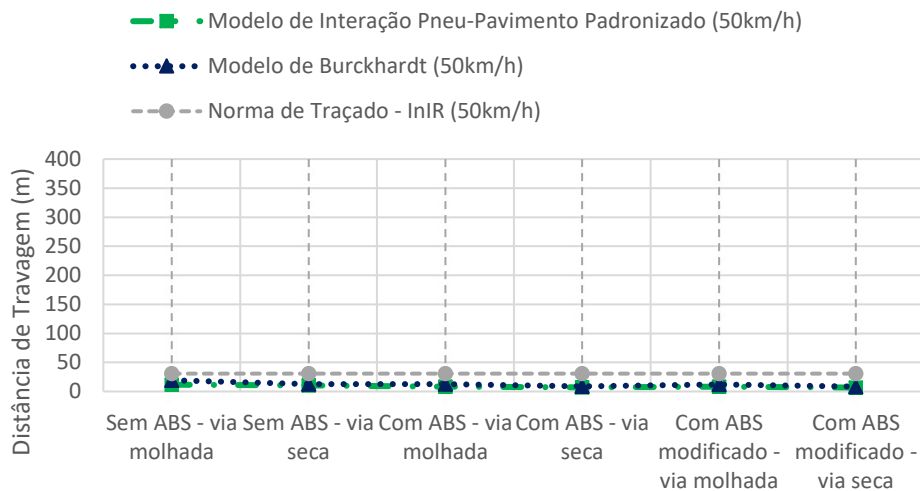


Gráfico 7.56 – Distâncias de travagem em SMA para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 50 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

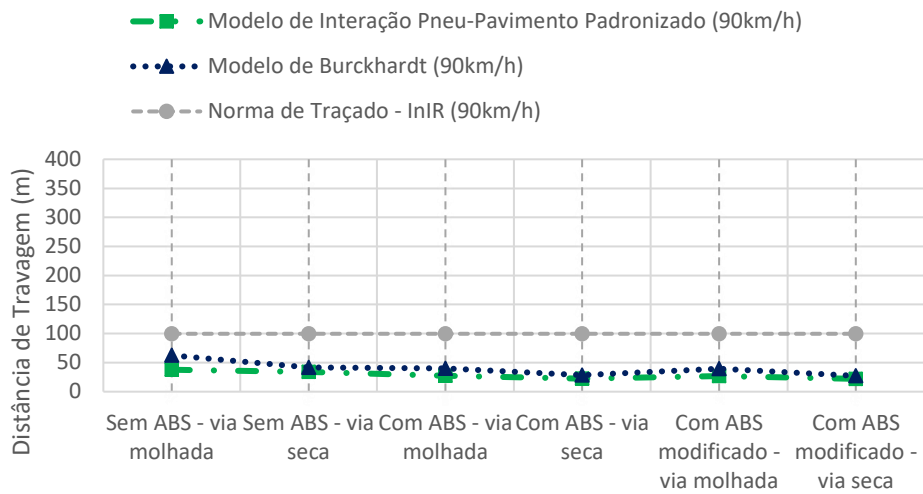


Gráfico 7.57 – Distâncias de travagem em SMA para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 90 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

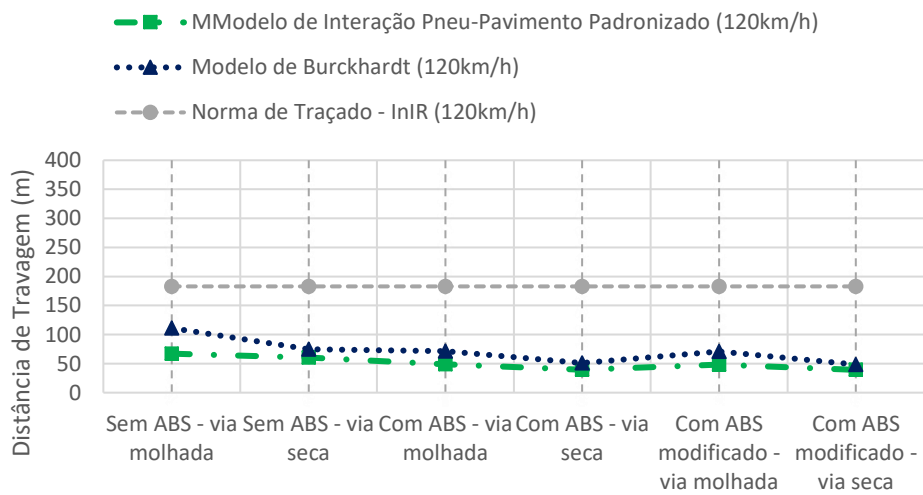


Gráfico 7.58 – Distâncias de travagem em SMA para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 120 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

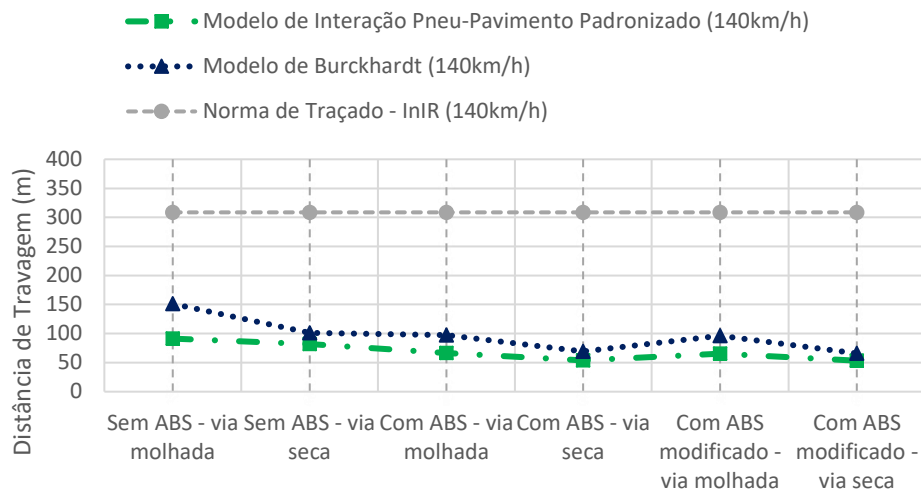


Gráfico 7.59 – Distâncias de travagem em SMA para as três formulações, nos três sistemas diferentes a 140 km/h e em condições de camada de desgaste seca e molhada

Como se pôde verificar pelas distâncias de travagem obtidas, a camada de desgaste em SMA apresenta muito boas características de aderência. Assim como as demais camadas de desgaste, com o aumento da velocidade também aumentou a distância de travagem, verificando-se, também, que a menor distância de travagem ocorre para o veículo com ABS modificado em condições de camada de desgaste seca para as diferentes velocidades de circulação.

Recapitulando, foi visível a semelhança das curvas obtidas, em condições secas e molhadas, entre o Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado e o Modelo de Burckhardt, tal como espectável. Esta semelhança torna evidente que a interação pneu-pavimento é dependente das características superficiais, das condições hídricas e das condições de estado da camada de desgaste, tal como já havia sido referido por Silvério (2015).

Para as diferentes camadas de desgaste, foram evidentes as vantagens que este modelo proposto teve ao fazer a incorporação, nas formulações dos parâmetros, o Índice Internacional de Atrito (IFI), permitindo a melhor aproximação dos modelos e, conseqüentemente, a harmonização de resultados.





## 8 Considerações Finais

Esta dissertação teve em vista o desenvolvimento de um Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado, com base no Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), que proporcionasse uma harmonização de valores. Neste capítulo será discutido, de modo global, os resultados, conclusões, e perspectivas futuras.

### 8.1 Conclusões

Atualmente, a exigência por parte dos utentes, em relação à segurança, conforto e economia, é cada vez mais elevada, levando a que a adequada execução dos pavimentos e a sua caracterização funcional (irregularidade, textura e atrito), sejam fatores cada vez mais relevantes. A caracterização superficial (textura e atrito), dos pavimentos é realizada com recurso a equipamentos de medição que permitem obter os valores de microtextura e macrotextura, estes são confrontados com os valores exigidos e, desta forma, é dado a conhecer as condições de segurança e conforto que aquele pavimento detém.

Um dos objetivos principais desta dissertação consistia na verificação do Modelo de Interação Pneu-Pavimento desenvolvido por Silvério (2015), em que o modelo foi desenvolvido em função das características das camadas superficiais dos pavimentos rodoviários. Como demonstrado no Capítulo 5, este modelo é exequível para diferentes camadas de desgaste, considerando a sua caracterização superficial, tornando os resultados mais próximos da realidade da interação pneu-pavimento. Tomando como base os princípios admitidos no desenvolvimento do modelo proposto por Silvério (2015), foi desenvolvido um modelo em que as formulações dos parâmetros dependessem apenas de uma variável, de modo a chegar a uma padronização do modelo.

Neste caso, essa variável diz respeito ao Índice Internacional de Atrito (IFI), onde este incorpora os efeitos da macrotextura, de acordo com os equipamentos de medição utilizados. Com as formulações obtidas foi possível a melhor aproximação das curvas de coeficiente de atrito *versus* razão de deslizamento longitudinal (curvas  $\mu$ -s), ao modelo de Burckhardt. Este modelo é um dos principais modelos utilizados para descrever a interação pneu-pavimento e serve de base a alguns modelos lineares de travagem como os que são empregues nos sistemas anti bloqueio de travagem (ABS) e ABS modificado. Com a incorporação das curvas  $\mu$ -s obtidas pelo Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado proposto nos

sistemas de travagem (ABS), decorre a otimização das suas funções aproximando dos valores da realidade, o que reflete a maior eficácia dos sistemas.

Nos pavimentos em que a camada de desgaste apresenta menor valor de medição do coeficiente de atrito, as distâncias de travagem obtidas são mais elevadas, quando comparadas às distâncias de travagem obtidas com maiores valores de medição do coeficiente de atrito. E ainda, pavimentos com camada de desgaste em condições molhadas apresentam distâncias de travagem maiores do que em condições secas, tal deve-se ao facto do pneu perder o contacto com o pavimento por causa da película de água presente.

A Norma de Traçado é parte fundamental na execução de um projeto de vias de comunicação, uma vez que fornece a base de valores mínimos a ter em conta de acordo com as condições oferecidas na execução do projeto. Os valores de coeficiente de atrito admitidos na Norma de Traçado são muito baixos em comparação com os valores obtidos pelo modelo padronizado proposto. Atualmente a maioria dos veículos inclui o equipamento de sistema ABS, isto significa que a Norma de Traçado propõe distâncias de paragem muito mais elevadas do que as necessárias na realidade.

Com este estudo, não só é possível a otimização dos sistemas de segurança ativa, como também a otimização de valores a considerar para a norma de traçado, uma vez que se viria a ter em consideração as características superficiais do pavimento, para determinadas alturas de água e também o tipo de sistema de segurança ativa que os veículos incorporam.

Para finalizar, com este trabalho é visível a importância de se conceber sistemas de segurança ativa que contemplem as características superficiais presentes no pavimento, visto que é clara a sua otimização, tornando mais realista o sucedido durante uma travagem.

## **8.2 Perspetivas Futuras**

O presente trabalho permite a futura avaliação das curvas de padronização considerando os mesmos tipos de camadas de desgaste. No caso de outros tipos de pavimentos, terá de se verificar a necessidade de ajuste dos coeficientes das formulações propostas para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  do Modelo de Interação Pneu-Pavimento Padronizado.

Com recurso à modelação num programa informático, propõe-se a análise da influência da água na drenagem entre o pneu e o pavimento, quando consideradas as características superficiais reais de cada tipo de camada de desgaste.

Posteriormente, realizar a formulação para os parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , com recurso a ensaios laboratoriais.

## Bibliografia

- Afonso, João, & Gomes, Luís (2016, Abril). *Misturas betuminosas do tipo SMA – a experiência da Mota-Engil Engenharia e Construção*. Artigo apresentado em 8º Congresso Rodoviário Português (CRP), Lisboa, Portugal
- Almeida, S. (2013). *Controlador tolerante a falhas para veículos elétrico Multi-Motor* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Almeida, Raul Tomaz (2016). *Homogeneidade do traçado de estradas interurbanas* (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, Viseu, Portugal.
- Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., Flintsch, G. W., Roosevelt, D. S., Decker, R., Wambold, J. C., & Nixon, W. A. (2002). *Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility* (Report N° 53, NCHRP Project 6-14, Contractor Final Report). Washington, DC, USA: Transportation Research Board.
- Aly, A., Zeidan, E., Hamed, A. & Salem F. (2011). An Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, 2, 186-195. DOI: 10.4236/ica.2011.23023
- Antunes, Daniela Sofia Campo (2014). *Misturas Betuminosas Temperadas, do tipo SMA, com Incorporação de Material Betuminoso Reciclado e Fibras Celulósicas – Contribuição para a sua caracterização* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Aps, Marcia (2006). *Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI - Internacional Friction Index para revestimentos asfálticos* (Tese de Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Araújo, João Paulo da Costa (2016). *Avaliação da sustentabilidade de estruturas e materiais de pavimentos rodoviários* (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Azurém, Guimarães, Portugal.

- Araújo J. P., Palha C., Oliveira J. R. M., Silva H. M. R. D., & Pereira P. (2015, Novembro). *Desenvolvimento de uma metodologia de avaliação da resistência ao rolamento de diferentes misturas betuminosas*. Artigo apresentado em XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Bariloche, Patagônia, Argentina.
- AASHTO (1994). *A Policy on Geometric Design of Highways and streets American*. Association of state Highway and transportation official, Washington, D.C., EUA.
- Barros, Rui (2004, Novembro). *Medição do coeficiente de atrito com o “Grip-Tester”*. Artigo apresentado em III Congresso Rodoviário Português – Estrada 2004 (CRP), Lisboa, Portugal.
- Bernucci, L. B., Motta, L. M. G. da, Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B., (2008). *Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro, Brasil: ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, Petrobras – Petróleo Brasileiro S. A.
- Branco, F., Pereira, P. & Picado-Santos, L. (2011). *Pavimentos Rodoviários*. (4ªed.). Coimbra, Portugal: Edições Almedina.
- Bucharles, Luciano Gardano Elias (2014). *Critérios para avaliação pericial da macro e microtextura de pavimento asfáltico em local de acidente de trânsito* (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil.
- Burckhardt, M. (1993). *Fahrwerktechnik: radschlupf-regelsysteme*. Wrzburg: Vogel Verlag, Germany (cit. in Zhang *et al.*, 2014; Hoàng, 2014; Pinto, 2014; Wang *et al.* 2014; Dousti *et al.*, 2015)
- Bustos, M, Echaveguren, T, Solminihac, H, & Caroca, A. (2006). Development of correlation equations between different measurements of skid resistance in pavements. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 13(1), 117-122.
- Castro, R. (2008). *Sistema de controlo de estabilidade para o ucar* (Relatório técnico). Laboratório de Sinais e Sistemas, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

- Couchinho, R. (2011). *Medição do coeficiente de atrito da superfície de pavimentos* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia, Instituto Politécnico de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Costa S. L., Castelo Branco V., & Freitas, E.F. (2017, Outubro). *Avaliação da aderência pneu-pavimento para diferentes tipos de pavimentos utilizando o International Friction Index (IFI)*. Artigo apresentado em XXXI Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em transporte (ANPET), Recife, Brasil.
- Dias, Jorge Martins Guimarães (2014). *Caraterização – Auscultação de Pavimentos Rodoviários Flexíveis* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Dousti, M., Baslamisli, S. C., Onder, E. T., & Solmaz, S. (2015). Design of a Multiple Model Switching Controller for ABS braking dynamics. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 37(5), 582-595. Doi: 10.1177/0142331214546522
- EAPA (2018). *Heavy Duty Surfaces. The Arguments for SMA*. Brussels, Belgium: European Asphalt Pavement Association.
- El-Hage, Robert Becerra (2012). *Estudo de misturas asfálticas tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) à luz dos compactadores Marshall e Superpave* (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil.
- Ferreira, Jaqueline Carvalho (2016). *Estudo e avaliação da influência da macrotextura e microtextura na aderência pneu-pavimento* (Dissertação de Mestrado). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Flintsch, G. W., León, E., McGhee, K. K., & Al-Qadi, I. L. (2003). Pavement Surface Macrotexture Measurement and Applications. *Transportation Research Record*, 1860(1), 168-177. Doi: 10.3141/1860-19
- Francisco, Vanessa Dias Lopes Fernandes (2009). *A drenagem superficial e o seu impacto funcional e estrutural na vida dos pavimentos rodoviários* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

- Freitas, Elisabete F. (2008). Contribuição da superfície dos pavimentos para a produção de ruído. *Revista de Engenharia Civil*, 30, 21-32. URL: <http://hdl.handle.net/1822/8434>
- Freitas, E. F., Pereira, Paulo A. A., Antunes, M. L., & Domingos, P. (2008, Novembro). Analysis of test methods for texture depth evaluation applied in Portugal. URL: <http://hdl.handle.net/1822/14550>
- Freitas, E. F., Santos, A., & Picado-Santos, L. (2008, Março). Estudo do efeito do tipo de pneu na geração de ruído rodoviário. URL: <http://hdl.handle.net/1822/17202>
- Galp Energia (2006, Dezembro). *Diferentes tipos de camadas de desgaste em prol da segurança e ambiente*. Artigo apresentado em II Encontro Nacional “Segurança em Estradas Municipais” (CRP), Figueira da Foz, Coimbra, Portugal.
- Guzmán, B. (1995). *Tratamientos y mezclas resistentes al deslizamiento EL Asfalto*. Boletín de la Comisión Permanente del Asfalto, n.º71 (1995), Buenos Aires, Argentina.
- Hall, J. W., Smith, K. L., Titus-Glover, L., Wambold, J. C., Yager, T. J., & Rado, Z. (2009). *Guide for Pavement Friction*. Washington, DC, USA: The National Academies Press. Doi: 10.17226/23038
- Henry, John J. (2000). *Evaluation of Pavement Friction Characteristics – A Synthesis of Highway Practice* (Project 20-5 FY 1998, Topic 30-11). Washington, D.C., USA: Transportation Research Board.
- Hoàng, T. (2014). *Switched observers and input – delay compensation for anti – lock brake systems* (Thèse de Doctorat). École Doctorale, STITS, Universidade Paris, Paris, France.
- IMTT (a). *Sistema de segurança Ativa* (Ficha técnica). Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres (IMTT), Infraestruturas de Portugal (IP). URL: <http://www.imtip.pt/sites/IMTT/Portugues/EnsinoConducao/ManuaisEnsinoConducao/Paginas/FichasdoManualdoEnsinodaConducao.aspx>
- IMTT (b). *Sistema de segurança Passiva* (Ficha técnica). Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres (IMTT), Infraestruturas de Portugal (IP). URL: <http://www.imtip.pt/sites/IMTT/Portugues/EnsinoConducao/ManuaisEnsinoConducao/Paginas/FichasdoManualdoEnsinodaConducao.aspx>
- InIR (a). *Construção e reabilitação de pavimentos – Indicadores de estado de conservação dos pavimentos*. Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres (IMTT),

- Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (InIR), Infraestruturas de Portugal (IP). URL: <http://www.imtip.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviarias/InovacaoNormalizacao/Paginas/DivulgacaoTecnica.aspx>
- InIR (b). *Diretivas para a conceção de pavimentos – Critérios de dimensionamento*. Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres (IMTT), Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (InIR), Infraestruturas de Portugal (IP). URL: <http://www.imtip.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviarias/InovacaoNormalizacao/Paginas/DivulgacaoTecnica.aspx>
- InIR (2010). *Norma de traçado – Revisão*. Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres (IMTT), Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (InIR), Infraestruturas de Portugal (IP). URL: <http://www.imtip.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviarias/InovacaoNormalizacao/Paginas/DivulgacaoTecnica.aspx>
- JAE, (1994). *Norma de traçado (JAE P3/94)*. Almada, Portugal: Edição JAE.
- Jiménez, Félix Edmundo Pérez (2014). *Manual de Pavimentação*. Lisboa, Portugal: CEPISA Portuguesa.
- Kreide, M., Budija, M., & Carswell, J. (2003, Maio). *The 'Original' Stone Mastic Asphalt: The German Experience*. Paper presented at the Proceedings of the 21st ARRB and 11th REAAA Conference: Transport: Our Highway to a Sustainable Future, Cairns, Australia.
- Leu, M. C., & Henry, J. J. (1983). Prediction of skid resistance as a function of speed from pavement texture measurements. *Transportation Research Board*, 946(666), 7-13. (cit. in Wilson, 2006)
- LNEC (1962). Vocabulário de Estradas e Aeródromos. Especificação E 1-1962. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. (cit. in Neves, 2009)
- Lugão, Wilson Gandini (2008). *Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG* (Tese de Doutoramento). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Martinho, F, Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., & Miranda, H. (2013, Abril). *A experiência portuguesa em misturas betuminosas do tipo SMA com fibras celulósicas*. Artigo

- apresentado em 7º Congresso Rodoviário Português - "Novos Desafios para a Atividade Rodoviária"(CRP), Lisboa, Portugal.
- Menezes, Miguel Vaz Preto (2008). *Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Meurer-Filho, Edelino (2001). Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes (Dissertação de Mestrado). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Mourão, Fabrício Augusto Lago (2003). *Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Neves, José (2009). *Construção e manutenção de infraestruturas de transportes: Módulo B – Pavimentação* (Folhas da disciplina). Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Nikolaides, Athanassios (2014). *Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press. Doi: 10.1201/b17690
- Peder, Marlon Alexandre de (2017). *Avaliação da macrotextura do pavimento asfáltico de um trecho de rodovia localizada no Noroeste do Estado do Paraná* (Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil.
- Pereira, C. A., Soares, J. B., Filho, I. D. da S. P., & Branco, V. T. F. C. (2012). Análise das correlações existentes entre as medidas de aderência pneu-pavimento avaliadas em campo e em laboratório. *Transportes*, 20(4), 44-53. Doi: 10.4237/transportes.v20i4.598
- Pereira, Fernanda Ribeiro de Araujo (2017). *Análise da relação entre as características técnicas da estrada e acidentes rodoviários* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto, Porto, Portugal.
- PIARC/AIPCR (1995). *International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Skid Resistance and Texture Measurements*. PIARC Publication nº01.04. (cit. in Pinto, 2003).



- PIARC/AIPCR (2000, Maio). *Pavement Surface Characteristics*. Paper presented at the IV<sup>th</sup> International Symposium “SURF 2000”, Nantes, France (*cit. in* Pinto, 2003).
- PIARC/AIPCR (2003). *Evaluation of Investigations into the Applications of the IFI*. Routes/Roads, 2003; n°318 – II. Paris (*cit. in* Menezes, 2008).
- Pinto, Joana Isabel Baptista Rua (2003). *Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Quiros, Silvia Barrantes (2017). *Practical method for locked-wheel and CFME friction measurement interconversion* (Master Thesis). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, USA.
- Rado, Z. (1994). *Analysis of Texture Profiles* (No. PTI Report 9510). Pennsylvania, USA: Pennsylvania Transportation Institute, State College. (*cit. in* Wilson, 2006)
- Ramos, Fábio Rangel Queiroz (2015). *Aplicação de SMA (Stone Matrix Asphalt) em pavimentos aeroportuários - estudo de caso: Aeroporto de Aracaju – SE* (Dissertação de Mestrado). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- Ranazzi, Paula Pompeo de Camargo (2016). *Estudo de misturas betuminosas do tipo CPA para revestimento de pavimentos aeroportuários* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Instituto Politécnico do Porto, Porto, Portugal.
- Reis, Rafael Marçal Martins de (2012). *Investigação de Campo e Laboratório sobre Revestimento Asfáltico Ultra Delgado* (Tese de Doutoramento). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

- Rodrigues-Filho, O. (2006). *Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários – Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas* (Dissertação de Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. (cit. in Lugão, 2008)
- Sampaio, João Manuel de Sousa (2012). *Influência das Propriedades das Misturas Betuminosas na Resistência ao Rolamento* (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Azurém, Guimarães, Portugal.
- Santos, Joana Rita Carvalho dos (2016). *Misturas betuminosas a quente. Uma análise à abordagem empírica e fundamental da norma de produto* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Seixas, P., Almeida, V., & Afonso, J. (2015, Abril). *Desempenho de betumes modificados com polímeros na A6*. PowerPoint apresentado em 4<sup>as</sup> Jornadas Betumes CEPESA/CRP – Inovação e Conservação (CRP), Lisboa, Portugal.
- Silva, João Paulo Souza (2008). *Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- Silva, L. (2009). *Pavimentos Aeroportuários: Análise de soluções rígidas e de soluções flexíveis* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Silvério, Catarina Rebelo (2015). *Características Superficiais de Pavimentos Betuminosos – Consequências na Interação Veículo-Pavimento* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Silvério, Catarina, & Benta, Agostinho (2019, Maio). *Modelo de Interação Pneu-Pavimento: consequências na distância de travagem*. Artigo apresentado em 9<sup>o</sup> Congresso Rodoviário Português (CRP), Lisboa, Portugal.
- Soares, A. (2011). *Análise da ocorrência de hidroplanagem num caso real* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Sullivan, Bevan W. (2003). *A Fundamental Approach to Skid Resistance Using IFI*. Paper presented at 1<sup>st</sup> Annual Friction Testing Workshop (SACL), Sydney, Australia.

- Unisesky, Claudia Regina (2018). *Proposta de formulação de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM* (Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel). Centro Tecnológico de Joinville, Universidade de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, Brasil.
- Videira, Fátima Isabel Baptista (2014). *Manual de Conservação de Pavimentos para Pequenas Redes Rodoviárias Municipais: bases para a sua elaboração* (Dissertação de Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Vieira, Tiago (2014). *Asphaltic Pavement Surface Analysis and its Effects on the Tyre-Pavement Friction Performance* (Master Thesis). Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Wang, B., Guan, H., Lu, P., & Zhang, A. (2014.) Road surface condition identification approach based on road characteristic value. *Journal of Terramechanics*, 56, 103-117. Doi: 10.1016/j.jterra.2014.09.001
- Wilson, Douglas James (2006). *An analysis of the seasonal and short-term variation of road pavement skid resistance* (Doctoral Dissertation). University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Zhang, X., Xu, Y., Pan, M., & Ren, F. (2014). A vehicle ABS adaptive sliding-mode control algorithm based on the vehicle velocity estimation and tyre/road friction coefficient estimations. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 52(4), 475-503. Doi: 10.1080/00423114.2013.864775

## Normas

- ASTM E-827 (2017). *Standard Practice for Identifying Elements by the Peaks in Auger Electron Spectroscopy*. American Society for Testing and Materials International (ASTM), Pennsylvania, USA. (*cit. in* Francisco, 2009)
- ASTM E-1960 (2015). *Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface*. American Society for Testing and Materials International (ASTM), Pennsylvania, USA. (*cit. in* Aps, 2006)
- BS 7941-1 (2006). *Methods for measuring the skid resistance of pavement surfaces. Sideway-force coefficient routine investigation machine*. British Standards Institution (BSI), London, United Kingdom.
- CEN/TS 15901-7 (2009). *Road and airfield surface characteristics. Procedure for determining the skid resistance of a pavement surface using a device with longitudinal fixed slip ratio (LFCG). The GripTester®*. Technical Specification (TS) – European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- EN 13036-1 (2001). *Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- EN 13036-4 (2011). *Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 4: Method for measurement of slip/skid resistance of a surface: The pendulum test*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- ISO 13473-1 (2019). *Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 1: Determination of mean profile depth*. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.