

# MODELO DE INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO: CONSEQUÊNCIAS NA DISTÂNCIA DE TRAVAGEM

Catarina Silvério<sup>1</sup> e Agostinho Benta<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, 3810-193 Aveiro, Portugal

email: catarina.rsilverio@ua.pt

<sup>2</sup> Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil e RISCO, 3810-193 Aveiro, Portugal

---

## Sumário

*A aderência dos veículos ao pavimento é um dos fatores mais determinantes na segurança rodoviária. Este mecanismo possibilita a mobilização de forças de atrito entre as duas superfícies resultante dos efeitos de aceleração, travagem e mudanças de direção durante a condução. Neste trabalho apresenta-se um modelo de interação pneu-pavimento, baseado no modelo de Burckhardt, que toma em consideração as características das camadas superficiais dos pavimentos rodoviários e, deste modo, torna possível a avaliação das distâncias de travagem em diferentes tipos de camadas de desgaste e em diferentes tipos de veículos (sem ABS, com ABS e com um ABS inteligente).*

---

**Palavras-chave:** Pavimentos Rodoviários; Segurança Rodoviária; Atrito; ABS; Distância de Travagem.

## 1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários devem garantir características funcionais essenciais para proporcionarem boas condições de circulação sendo a contribuição do atrito para a aderência dos veículos ao pavimento um dos fatores mais determinantes na segurança dos utilizadores das estradas.

As condições meteorológicas, tais como a temperatura, a precipitação, a neve, o gelo, o vento e também a contaminação da superfície afetam diretamente a aderência e a probabilidade de ocorrência de acidente [1, 2]. Vários autores [3, 4, 5] têm discutido a relação entre o número de acidentes em condições de tempo húmido e o valor de coeficiente de atrito, demonstrando a forte influência que esta característica do pavimento tem na segurança rodoviária.

Por outro lado, os sistemas ativos de segurança integrados nos veículos, particularmente o sistema anti-bloqueio de travagem (ABS) e o sistema de controlo de estabilidade (ESP), têm como objetivo assegurar que a interação veículo-pavimento aproveite as melhores condições de aderência, garantindo que a operação do veículo ocorra num valor de coeficiente de atrito próximo do máximo. No entanto, do ponto de vista mecânico, a tarefa de manter as rodas que operam na aderência máxima é complicada, principalmente, porque, a curva de atrito *versus* deslizamento muda para os diferentes pavimentos, pneus e veículos.

Neste trabalho apresenta-se um modelo de interação pneu-pavimento, baseado no modelo de Burckhardt um dos modelos mais implementados nos sistemas de segurança ativa, que toma em consideração as características das camadas superficiais dos pavimentos rodoviários e, deste modo, torna possível a avaliação das distâncias de travagem em diferentes tipos de camadas de desgaste e em diferentes veículos (sem ABS, com ABS e com um novo sistema de ABS que designamos de ABS modificado).

A diferença significativa entre o modelo de interação na travagem que se pretende estabelecer e os demais já existentes [6, 7, 8, 9, 10], reside, por um lado, na análise integrada de parâmetros intrínsecos e de estado e, por outro, na consideração da interação com os mecanismos ativos de controlo de travagem ou de estabilidade do veículo, uma vez que a existência destes sistemas modifica a ação do veículo sobre a superfície do pavimento.

## 2 MODELOS DE INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO

Existem vários modelos desenvolvidos para descrever o fenómeno de interação pneu-pavimento [11, 12]. Os primeiros modelos foram desenvolvidos a partir de 1930 pelo laboratório de investigação de transportes do Reino Unido. Estes modelos foram desenvolvidos e fundamentados em dispositivos de ensaio, como por exemplo o SCRIM.

Por serem os modelos de atrito considerados mais ajustados e credíveis para utilizar nos sistemas de ABS, os modelos de Burckhardt e de Pacejka foram também aqui adotados como referência.

### 2.1 Modelo de Burckhardt

O modelo de atrito de Burckhardt [13] serve de base a alguns modelos lineares de travagem como os utilizados nos sistemas anti-bloqueio de travagem (ABS). Foi desenvolvido tendo como base resultados experimentais ajustados de um grande número de testes em diferentes tipos de pavimentos e é amplamente utilizado em estudos de dinâmica do veículo [14]. Este modelo utiliza funções lineares e exponenciais para simular a relação entre o coeficiente de atrito,  $\mu$ , e o deslizamento dos pneus,  $s$ , (equação 1). Este modelo permite estabelecer a relação entre o coeficiente de atrito e o deslizamento relativo com base nos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ , que podem ser obtidos de ensaios experimentais.

Na Fig. 1 apresentam-se sete diferentes curvas  $\mu$ - $s$  correspondem a sete situações diferentes de ensaio, tendo sido as respetivas curvas obtidas com os parâmetros de  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  definidos por Wang *et al.* [14]. Sendo que  $C_1$  está relacionado valor máximo da curva de atrito;  $C_2$ , dependente da forma da curva de atrito e  $C_3$  está relacionado com a diferença entre o valor máximo da curva de atrito e o valor para  $s=1$ . A designação BB refere-se a pavimento com camada de desgaste de betão betuminoso denso.

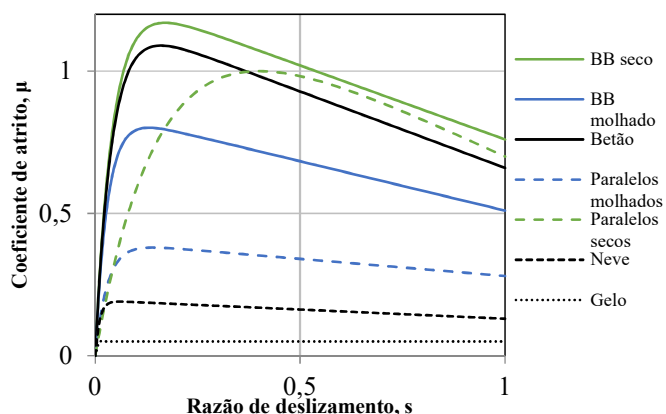


Fig. 1. Curvas  $\mu$ - $s$  do modelo de Burckhardt

$$\mu = C_1(1 - e^{(-C_2s)}) - C_3s \quad (1)$$

Onde:

$\mu$  – coeficiente de atrito;

$s$  – razão de deslizamento do pneu;

$C_1$ ,  $C_2$ , e  $C_3$  são parâmetros do modelo obtidos experimentalmente

### 2.2 Modelo da Fórmula Mágica

O modelo da fórmula mágica foi proposto por Pacejka [15] e relaciona o coeficiente de atrito longitudinal, com a razão de deslizamento através da equação 2 [16]. Tal como o modelo de Burckhardt, este modelo apenas considera a componente longitudinal do deslizamento,  $\mu$ , desprezando o deslizamento lateral sendo esta a abordagem mais comum para os projetos de sistemas de ABS.

$$\mu = \mu_{xm} \sin\{C \tan^{-1}[Bs(1 - E) + E \tan^{-1}(Bs)]\} \quad (2)$$

Onde:  $\mu_{xm}$  é coeficiente de atrito longitudinal máximo;  $C$ ,  $B$ ,  $E$  são parâmetros do modelo obtidos experimentalmente.

Pacejka [16] defende que os quatro fatores fundamentais na modelação da interação pneu-pavimento são: a propriedade de adesão na interface entre as superfícies do pneu e do pavimento; a distribuição da pressão no contacto; a rigidez da borracha e a rigidez da estrutura (pavimento). Com estes quatro fatores identificados e a partir da análise das forças longitudinais, laterais e verticais que atuam nos pneus, Pacejka elaborou a expressão

anteriormente apresentada (equação 2) baseada num modelo empírico de um pneu que representa o comportamento dinâmico em várias condições de circulação.

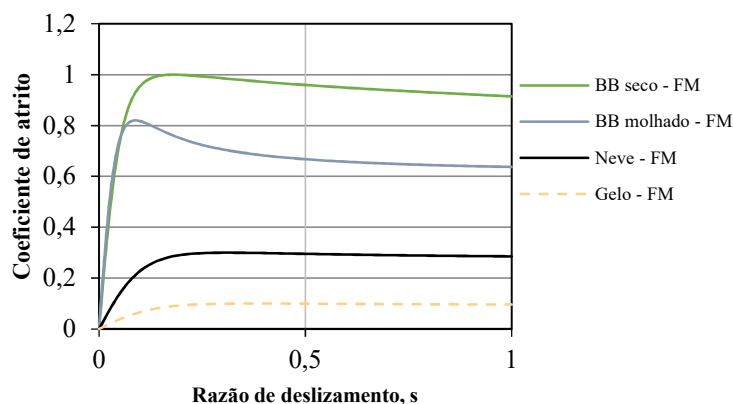


Fig. 2. Curvas  $\mu$ -s do modelo de Pacejka (Fórmula Mágica)

### 3 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DE ATRITO NO PAVIMENTO

O atrito da superfície da camada de desgaste de um pavimento pode ser avaliado pontualmente ou com recurso a equipamento em movimento de registo contínuo. A medição do atrito pontual é efetuada geralmente com recurso ao Pêndulo Britânico. Por outro lado, os equipamentos de registo contínuo são rebocáveis e fornecem valores de atrito pneu-pavimento de um ou mais pneus. Estes equipamentos podem ter pneus bloqueados ou pneus livres que circulam com um certo ângulo em relação à direção de deslocamento do veículo.

#### 3.1 Grip Test

O *GripTest* é um ensaio que permite a medição em contínuo do coeficiente de atrito, através de uma roda parcialmente bloqueada de deslizamento fixo. O ensaio consiste na medição das forças horizontais e verticais que são exercidas num pneu liso e parcialmente bloqueado, quando este se desloca sobre um pavimento em condições normalizadas, quanto à velocidade e espessura da película de água. A expressão utilizada pelo GripTester para o cálculo do coeficiente de atrito, dado pelo valor do *Grip Number* (GN) é:

$$GN = \frac{F_z}{F_x} \quad (3)$$

Onde: GN – *Grip Number* (coeficiente de atrito);  $F_z$  [kgf] – Força vertical;  $F_x$  [kgf] – Força horizontal.

#### 3.2 Ensaio de Mancha de Areia

O ensaio da Mancha de areia permite a determinação da macrotextura, parâmetro fundamental na avaliação das características superficiais do pavimento. Este ensaio baseia-se na avaliação da profundidade média da altura de uma mancha de areia na superfície da camada de desgaste. Consiste no preenchimento dos espaços vazios da textura superficial do pavimento recorrendo à utilização de pequenas esferas de vidro de dimensão normalizada, ou areia de granulometria normalizada. O resultado do ensaio é dado pela profundidade média de material espalhado, MTD, através da equação 4 [17].

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

Onde:

MTD [mm] – profundidade média da textura superficial;  $V$  [mm<sup>3</sup>] – volume de material espalhado

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

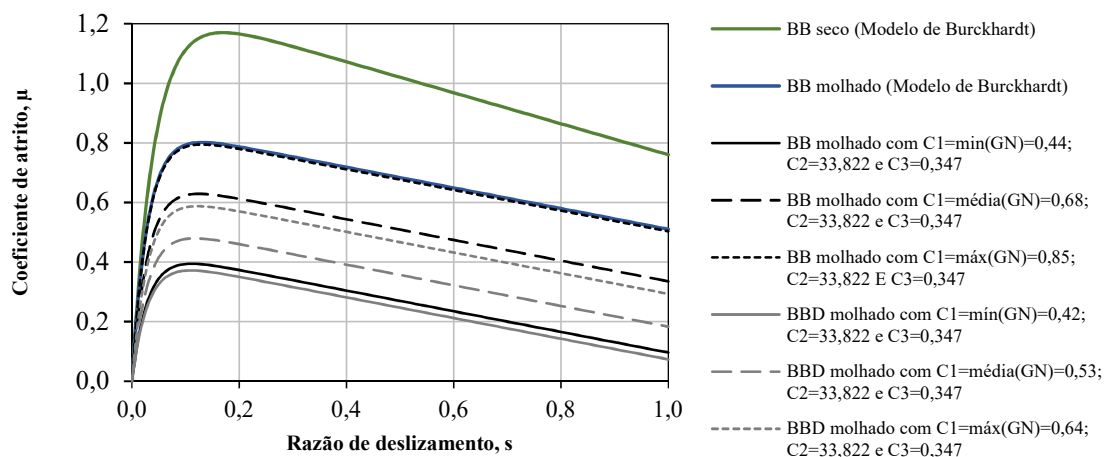
O modelo de interação pneu-pavimento apresentado neste trabalho baseia-se principalmente em dois ensaios de superfície: o ensaio de macrotextura pelo método da Mancha de areia e o ensaio de *Grip Test*.

## 4 MODELO DE INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO

### 4.1 Metodologia

O modelo de Burckhardt é um dos principais modelos usados para representar a interação pneu-pavimento, no entanto, apresenta a limitação de definir as constantes  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  a partir de ensaios com veículos de teste, dos quais se obtêm tais valores. Com este estudo, demonstra-se que parâmetros equivalentes podem ser obtidos a partir dos ensaios de caracterização superficial, nomeadamente a Mancha de Areia (MTD) e o *Grip-Test* (GN).

O desenvolvimento das formulações para obtenção dos parâmetros citados anteriormente, tiveram, inicialmente, como base, apenas dados dos pavimentos betuminosos densos (BB) e drenantes (BBD) da bibliografia, que foram organizados por tipologia de pavimento e analisados na tentativa de relacionar os tipos de camadas de desgaste em cada estudo com os diferentes resultados de ensaios (*Grip-Test*, Mancha de Areia). A análise conjunta de todos os estudos foi crucial para definir uma primeira relação entre a tipologia dos pavimentos e os respectivos parâmetros caracterizadores das superfícies de pavimento.



**Fig. 3. Verificação gráfica da substituição do parâmetro  $C_1$  do modelo de Burckhardt pelo valor de GN**

A exploração teórica sobre a interdependência dos parâmetros de Burckhardt e os valores obtidos através de ensaios de caracterização da superfície do pavimento envolveu o estudo das relações entre os resultados dos ensaios, o seu significado e o significado dos coeficientes de Burckhardt.

Na Fig. 3 apresenta-se a hipótese da substituição direta de  $C_1$  pelos valores de GN obtidos a partir dos valores médios, máximos e mínimos resultantes dos estudos consultados [18]. Pode, então, verificar-se que existe uma distinção entre as curvas  $\mu$ - $s$  de pavimentos molhados e pavimentos seca, que tem de ser tomado em consideração na formulação a desenvolver.

Em relação ao parâmetro  $C_2$ , relativo à forma da curva, tal como previsto pelo modelo de Burckhardt, verificou-se que é sensivelmente igual para os mesmos materiais de pavimentação. Como se verá a seguir, para pavimento cujo padrão das curvas de Burckhardt se enquadra em “betão betuminoso”, verificou-se que  $C_2$  pode ser estimado a partir de MTD.

Por último,  $C_3$ , que segundo o modelo de Burckhardt, representa a diferença entre o coeficiente de atrito máximo (valor de pico da curva) e o coeficiente de atrito para  $s=1$  (coeficiente de atrito no bloqueio), afigura-se como sendo o mais difícil de derivar a partir dos valores dos ensaios GN e MTD. O valor deste parâmetro na fórmula de Burckhardt, em pavimentos secos, é inferior em comparação com o valor nos pavimentos molhados, portanto dependerá da altura de água sobre o pavimento.

Sabendo que o parâmetro  $C_3$  está relacionado com a degradação do coeficiente de atrito durante a travagem, é esperado que a macrotextura do pavimento desempenhe um papel importante na sua definição, mas verificou-se

que o comportamento de  $C_3$ , embora relacionado com o valor de MTD, estende-se muito para além do efeito direto da macrotextura [18].

Tendo por base os princípios de dependência assumidos anteriormente e com dados de ensaios de *Grip-Test* e Mancha de Areia de um estudo realizado em condições bem conhecidas, sob pavimentos de dois troços de autoestrada cujas características são bem definidas [18], aproximaram-se às curvas do modelo de Burckhardt de betão betuminoso (seco e molhado) as curvas resultantes de princípios físicos relacionados com o comportamento mecânico da interação pneu-pavimento de betão betuminoso. Os dados recolhidos foram registados em oito vias de dois lanços de autoestrada, um com camada de desgaste em betão betuminoso denso (BB– Vias A, B, C, D) e outro com camada de desgaste em betão betuminoso drenante (BBD – Vias E, F, G, H).

Inicialmente, obtiveram-se as relações apresentadas nas equações 5, 6 e 7 para pavimentos em BB considerados “secos” até uma altura de água,  $h_w$ , 60% do valor de MTD. Os valores de ensaios utilizados foram os valores médios dos ensaios caracterizadores (GN e MTD) para a via A em betão betuminoso denso.

As expressões 8, 9 e 10 foram obtidas para pavimentos molhados. Para aplicação destas expressões assumiu-se que o pavimento estará em condições molhadas com uma altura de água superior a 60% do valor de MTD, isto é, estas equações apenas se empregam quando a altura de água é superior à percentagem enunciada.

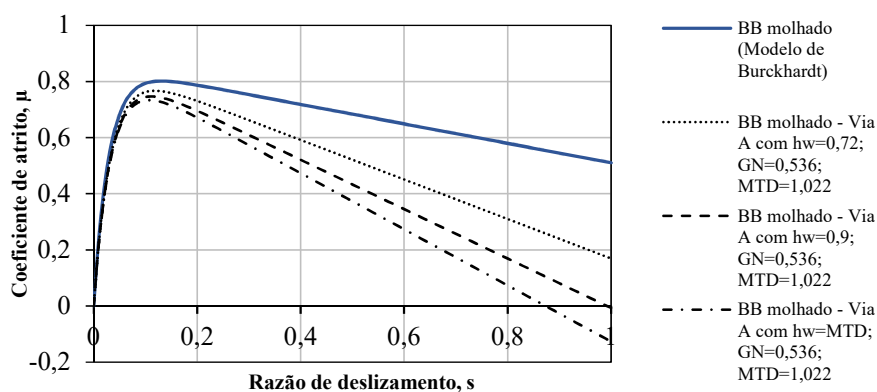
$$C_1 = 2,4GN \quad (5) \quad C_1 = 1,63GN \quad (8)$$

$$C_2 = 24MTD \quad (6) \quad C_2 = 30MTD \quad (9)$$

$$C_3 = \frac{h_w}{MTD} \quad (7) \quad C_3 = \frac{h_w}{MTD} \quad (10)$$

Nesta abordagem o  $C_3$  para além de se relacionar com o MTD relacionou-se com a altura efetiva de água,  $h_w^*$ . Este parâmetro foi introduzido de modo a caracterizar a altura de água equivalente que contribui no processo de interação pneu-pavimento, traduzida pela equação 11. Esta é a altura assumida como a altura de água à pressão originada pela interação veículo-pavimento na camada de desgaste, num valor máximo igual à unidade para um valor de  $h_w$  igual à profundidade da macrotextura obtida do ensaio mancha de areia.

$$h_w^* = \frac{h_w}{MTD} \quad (11)$$



**Fig. 4. Curvas  $\mu$ -s para pavimentos molhados - primeira proposta**

A Fig. 4 permite analisar a evolução da curva  $\mu$ -s situações de pavimento molhado. Verifica-se que quando a altura de água é igual ao valor de MTD, os coeficientes de atrito correspondentes, a partir de um deslizamento elevado (aproximadamente  $s=0,87$ ), decrescem para valores próximos de zero ou negativos significando que a altura de água que se está a considerar é uma altura de efeito efetivo na pressão da água na interface pneu-pavimento, a qual se pode designar por  $h_w^*$  para distinguir da altura água livre,  $h_w$  existente no pavimento. Quando esta altura de água é igual ou superior o valor de MTD, ou seja, quando  $h_w^*$  toma valores iguais ou superiores a 1, o pneu deixa de estar em contacto com o pavimento dando origem ao efeito de hidroplanagem, pois o pneu deixa de interpenetrar

na textura do pavimento e, nessas condições,  $\mu$  tende para “0”. Os valores negativos apresentados na figura em análise são apenas ilustrativos da influência da altura de água efetiva na interação do pneu-pavimento, sendo que a curva apenas deverá alcançar o valor nulo de coeficiente de atrito.

Como já mencionado, pelo modelo de Burckhardt verifica-se que o comportamento de  $C_3$  em pavimento seco e molhado é distinto, significando que  $C_3$  depende da altura de água, como já comprovado, mas constata-se também que a intervenção da altura de água no parâmetro  $C_3$  é insuficiente para descrever o comportamento das curvas de Burckhardt, como se verifica nas curvas apresentadas, não é apenas a degradação do valor do coeficiente de atrito na travagem que é influenciado, também, o valor de pico (proporcional a  $C_1$ ), que se viu ser fortemente influenciado por GN, é afetado pela altura de água sobre o pavimento.

Estudado o efeito da altura de água nos coeficientes de ajuste de GN, formularam-se expressões iguais para o mesmo tipo de camada de desgaste dependentes apenas da altura de água  $h_w$ . Finalmente, normalizaram-se as expressões para que em condições secas a altura de água seja de 0 mm, chegando-se às expressões 12, 13 e 14

$$C_1 = 2GN - \frac{h_w}{2} \quad (12)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (13)$$

$$C_3 = \frac{4}{5} (n^2 GN) + \frac{h_w}{3MTD} \quad (14)$$

$MTD$  [mm] – profundidade média da textura superficial (valor da Mancha de Areia);

$GN$  – Grip Number;

$n$  – altura da macrotextura não preenchida com água (equação 15)

No parâmetro  $C_1$ , o coeficiente de ajuste foi decomposto considerando a altura de água, de modo a validar este parâmetro para condições secas e molhadas. O parâmetro  $C_2$  foi assumido como dependente apenas do tipo de material da camada de desgaste em análise, ou seja, como estamos na presença de betão betuminoso este valor apresenta-se invariável, considerando-se na equação 13 um valor médio dos assumidos anteriormente pelas equações [18] que apresentam semelhante concavidade.

O fator “n” surge da necessidade de assumir a contribuição da altura da macrotextura não preenchida com água, sendo  $n = \frac{1}{\gamma}$ , e  $\gamma$  o grau de saturação da superfície da camada de desgaste do pavimento traduzido pela equação 15. Este fator contribui de uma forma quadrática no parâmetro ( $C_3$ ).

$$n = \frac{(MTD - w)}{MTD} \quad (15)$$

As Fig. 5 e Fig. 6 ilustram as curvas obtidas através das expressões anteriores.

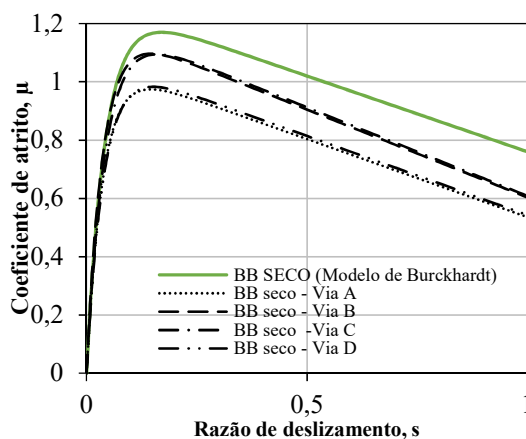


Fig. 5. Curvas  $\mu$ -s para BB seco (via A, B, C e D)

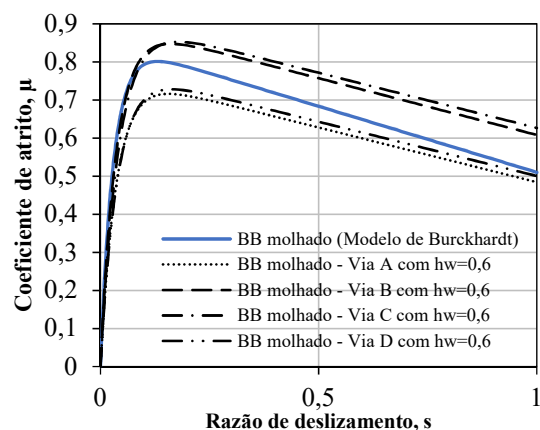


Fig. 6. Curvas  $\mu$ -s para BB molhado (via A, B, C e D)

#### 4.2 Aplicação do Modelo a Camada de Desgaste em Betão Betuminosos Drenante (BBD)

Assumindo, os valores dos ensaios fornecidos para o tipo de camada de desgaste de betão betuminoso drenante, foram aplicadas as mesmas formulações, no entanto, foi tida em conta a evolução da permeabilidade deste tipo de

pavimento. Esta diminui com o tempo devido à colmatagem de vazios, causando uma diminuição da velocidade de percolação. Esta situação é traduzida pelo coeficiente permeabilidade,  $\lambda$ , (equação 16) onde  $k$  assume o valor de 1 em pavimento novo e o valor de 1,3 em pavimento “velho” (colmatado).

$$\lambda = \frac{1}{k} \quad (16)$$

Uma vez que não se teve acesso a valores de ensaios da superfície do pavimento em camadas de desgaste com vários anos de serviço, os valores de “ $k$ ” foram meramente indicativos do efeito teórico do tempo na colmatagem da camada de desgaste, assumindo neste caso, que a camada estudada, a que se refere os ensaios, está praticamente 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. Caso se dispusesse de series temporais de dados, o fator tempo estaria refletido nos resultados dos ensaios de *Grip-Test* e de Mancha de Areia.

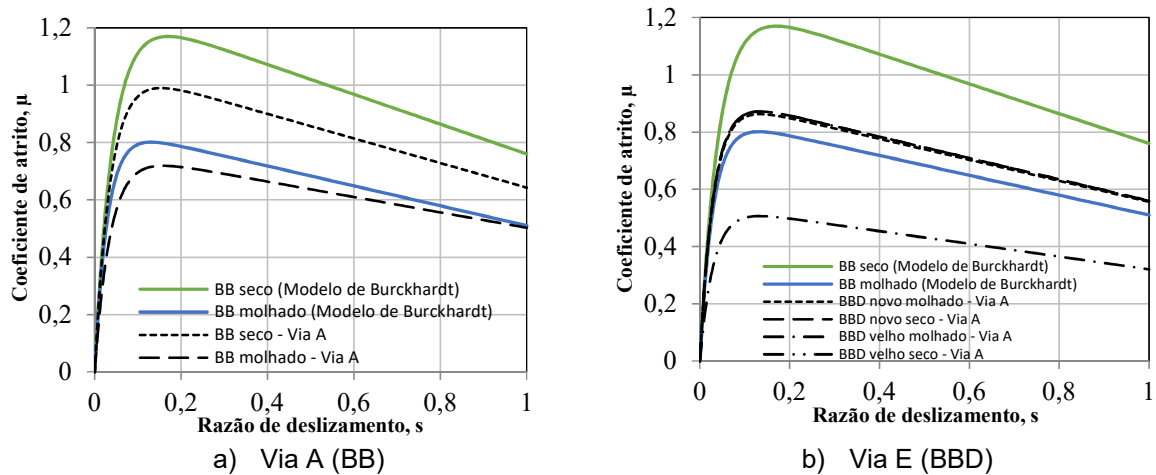
As formulações obtidas para este tipo de camada de desgaste na determinação dos parâmetros  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são apresentadas nas equações 17, 18 e 19.

$$C_1 = 2GN - \left(\frac{h_w}{2}\right) \frac{1}{\lambda} \quad (17)$$

$$C_2 = 27MTD \quad (18)$$

$$C_3 = \frac{4}{5}(n^2GN) + \frac{\lambda h_w}{3MTD} \quad (19)$$

Onde:  $MTD$  [mm] – profundidade média da textura  $GN$  – *Grip Number*;  $h_w$  [mm] – altura de água no pavimento ;  $n$  – altura da macrotextura não preenchida com água (equação 15);  $\lambda$  – coeficiente dependente da permeabilidade da camada de desgaste do pavimento.



**Fig. 7. Curvas  $\mu$ - $s$  do modelo desenvolvido para as vias de BB e BBD**

Note-se que os resultados apresentados na Fig. 7 consideram as mesmas formulações base das misturas densas, o que se revela na diferença generalizada, para baixo, nas curvas obtidas em relação às curvas de BB do modelo de Burckhardt. Para fazer o ajuste mais perfeito seria necessário alterar coeficientes de ajustes para além dos incorporados nos “efeitos de  $k$ ”. Contudo, para a análise do comportamento da formulação proposta em pavimentos drenantes, torna-se mais elucidativo avaliar o desempenho no modelo agora proposto, verificando que em pavimentos molhados e velhos o coeficiente de atrito assume valores mínimos.

## 5 DISTÂNCIA DE TRAVAGEM

As distâncias de travagem são influenciadas fortemente pelas características de aderência fornecidas pelo pavimento. Assim, pretende-se comparar as distâncias de travagem obtidas pelo modelo de interação pneu-pavimento desenvolvido, com a formulação de Burckhardt e com a norma de traçado [19], para os diferentes sistemas de travagem dos veículos, sem ABS, com ABS e com ABS modificado.

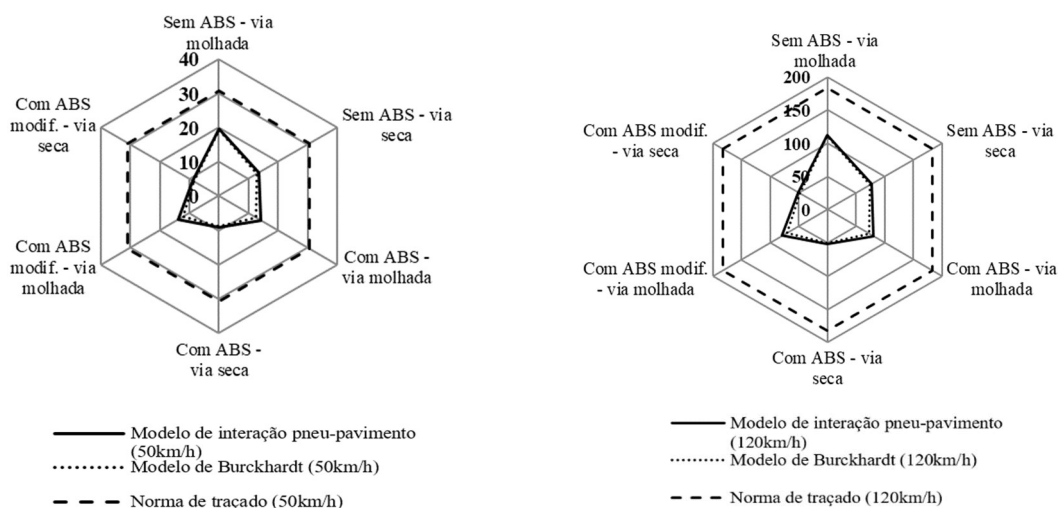
Neste sub-capítulo é admitido que o modelo desenvolvido, dependente dos dados de ensaio de *Grip-Test* e Mancha de Areia, integra o sistema ABS dos veículos, do tipo ABS tradicional, em que o seu funcionamento ocorre para uma percentagem de deslizamento longitudinal da roda entre os 10 e os 25% e para o tipo de ABS modificado. Assim, tomaram-se em consideração três tipos de veículos: veículo sem ABS (A); veículo com ABS (B) e veículo com ABS modificado (C).

O presente estudo foi realizado considerando apenas manobras de travagem de um veículo de 900 kg, em estrada sem curvas, horizontal e com um deslizamento de referência,  $s$ , assumido de 0,1 m. Nestas condições a distância de travagem é fortemente influenciado pela força de atrito entre a roda e o pavimento. Na aplicação do modelo de interação proposto, consideraram-se os coeficientes de atrito médios (GN) obtidos a partir de ensaios em troços de estradas de dois tipos de pavimento, betão betuminoso denso (BB) e betão betuminoso drenante (BBD), os valores médios obtidos no ensaio de Mancha de areia (MTD), assim como as condições do hídricas do pavimento (seco ou molhado).

Quando um veículo sem ABS trava numa situação de emergência, as rodas ficam bloqueadas, o veículo desliza e perde a estabilidade lateral ficando impossibilitado de responder aos comandos de manobra. Considerando que o máximo de coeficiente de atrito ocorre entre os 10 e 25% da razão de deslizamento longitudinal, dividiu-se a curva típica da força de atrito em três regiões até ao bloqueio completo da roda e numa quarta região (região crítica) onde se considera a força de atrito constante. Note-se que a região crítica,  $r_{crit}$ , corresponde à distância que o veículo percorre a partir do momento em que deixa de haver qualquer variação do coeficiente de atrito e estende-se até à paragem do veículo que ocorre quando o trabalho da força de atrito, por um deslizamento,  $s_p$ , iguala a energia adquirida pelo veículo em movimento, que na verdade, corresponderá à continuidade do bloqueio das rodas (desde  $s=1$ ) em que o veículo derrapa até à paragem (região correspondente ao estado crítico) [18].

O sistema ABS evita o bloqueio da roda e a derrapagem do veículo. Este sistema entra em funcionamento para uma razão de deslizamento longitudinal entre 0,1 e 0,25, situados no intervalo em que o coeficiente de atrito é, geralmente máximo nos diferentes tipos pavimento.

O sistema ABS modificado identifica em tempo real o tipo de pavimento e entra em funcionamento no valor ideal de percentagem de deslizamento longitudinal ( $s_i$ ).



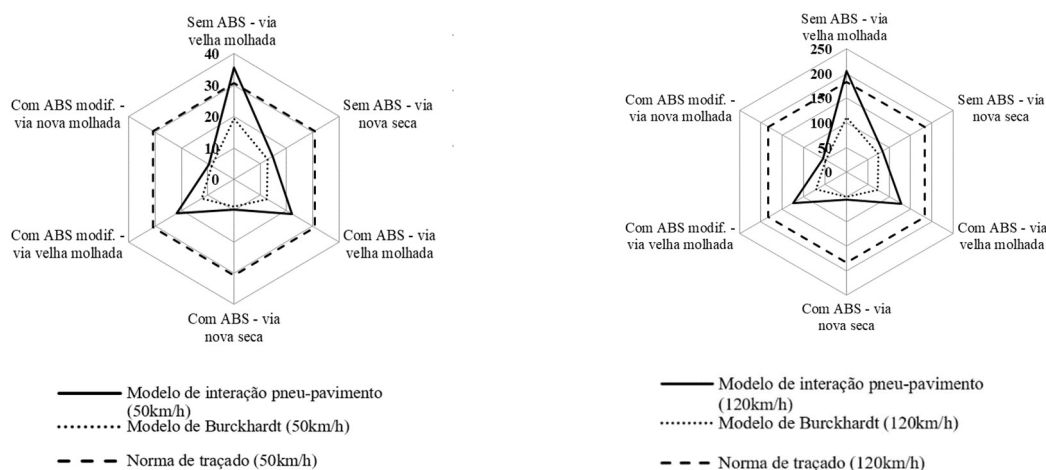
**Fig. 8. Distâncias de travagem em BB para a formulação proposta, o modelo de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes sistemas de travagem e condições do pavimento**

A Fig. 8 apresentam as distâncias de travagem calculadas segundo o modelo de interação pneu-pavimento proposto, o modelo de Burckhardt e segundo a norma de traçado em usada em Portugal, para os três sistemas de travagem em análise e diferentes velocidades (50 km/h e 120 km/h).

Deve ter-se em conta que as análises das distâncias de travagem foram realizadas considerando uma altura de água de 0,6 mm, situação que na verdade, não corresponde ao estado hídrico da superfície mais gravoso. Por isso, revela-se aqui a vantagem da utilização do modelo de interação proposto, que possibilita o cálculo das diferentes

distâncias de travagem conforme a altura de água do pavimento. Uma maior quantidade de água existente no pavimento irá provocar a deslocação das curvas do “Modelo de interação pneu-pavimento” para uma zona mais próxima da curva da norma de traçado. Este efeito também poderá ocorrer com a diminuição dos valores dos ensaios de *Grip-Test* e de Mancha de Areia.

A Fig. 9 ilustra, esquematicamente, a variação das distâncias de travagem conforme a aplicação das três metodologias (modelo de interação, modelo de Burckhardt e norma do traçado) nos diferentes sistemas de travagem do veículo e com a variação da velocidade (50 km/h e 120 km/h) onde é possível verificar, mais uma vez, que a menor distância em BBD ocorre nos pavimentos novos secos para veículos com ABS modificado e as maiores para veículos sem ABS, em pavimentos BBD molhados e com alguns anos de serviço, sendo este valor até é superior ao valor considerado pela Norma de projeto.



**Fig. 9. Distâncias de travagem em BBD para a formulação proposta, a fórmula de Burckhardt e a norma do traçado nos três diferentes sistemas de travagem e diferentes condições do pavimento (novo seco e velho molhado) a 50 km/h e 120 km/h**

## 6 CONCLUSÕES

O modelo de interação pneu-pavimento desenvolvido, baseado em resultados de ensaios de caracterização da superfície do pavimento, apresenta um bom desempenho na previsão da aderência dos veículos ao pavimento na situação de travagem. Os ensaios “Grip Test” e de “Mancha de Areia”, de entre todos os ensaios inicialmente considerados, revelaram-se, pelas propriedades que determinam os seus resultados, os mais indicados para servirem de base ao desenvolvimento das formulações.

Através deste estudo conclui-se que os modelos de interação pneu-pavimento e veículo-pavimento otimizados devem estar relacionados com as características mecânicas da camada de desgaste, apresentando-se uma proposta dessa dependência para cada um dos tipos de pavimento em análise (betão betuminoso denso e betão betuminoso drenante), deste modo, torna-se mais realista a descrição da relação entre o pavimento e o veículo. Este modelo revela-se, portanto, um progresso no estudo do contacto entre os veículos e as exigidas características superficiais do pavimento, ajudando a clarificar a influência de cada uma destas características na distância de travagem, podendo incorporar características intrínsecas, características de estado ou mesmo a fatores representativos da previsão da evolução no tempo de algumas propriedades dos pavimentos.

Os fatores dependentes dos pavimentos não podem, de maneira alguma, serem excluídos da formulação dos modelos matemáticos presentes nos sistemas de segurança ativa. A sua incorporação levará à criação de sistemas mais eficazes na previsão das distâncias de travagem (e de paragem) dos veículos do futuro.

## 7 REFERÊNCIAS

1. M. Wilson, R. Brannen, S. Hague & P. Doherty, *Design Manual for Roads and Bridges – Pavement Design and Maintenance*, Highways England, Vol.7; Sec.3, Parte I, TSO, Norwich, 2015.

2. C. Wallman & H. Aström , *Friction Measurement Methods and the Correlation between Road Friction and Traffic Safety: A literature Review*, VTI, Linköping, 2001.
3. R. Rizenbergs, J. Burchett & C. Napier, *Skid Resistance of Pavements*, University de Kentucky , Kentucky, 1972.
4. B. Mccullough & D. Hankins, Skid Resistance Guidelines for surface improvements on Texas Highways, *Journal of Transportation Research Board*, 131, 204-217, 1966.
5. P. Gandhi, B Colucci & S. Gandhi, Polishing of Aggregates and Wet-Weather Accident Rates for Flexible Pavement, *Transportation Research Record* 1300, 71-79, 1991.
6. D. Wilson, Tese de doutoramento, *An Analysis of the Seasonal and Short-Term Variation of Road Pavement Skid Resistance*, Universidade de Auckland, Nova Zelândia, 2006.
7. H. Azimi, K. Galal & O. Pekau, A modified numerical VBI element for vehicles with constant velocity including road irregularities, *Engineering Structures*, 33, 2212-2220, 2011. DOI:10.1016/j.engstruct.2011.03.012.
8. A. Hamersma & S. Els, Improving the braking performance of a vehicle with ABS and a semi active suspension system on a rough road, *Journal of Terramechanics*, 56 ,91-101, 2014. DOI:10.1016/j.jterra.2014.09.004.
9. L. Andersen, J. Larsen, E. Fraser, B. Schmidt & J. Dyre, Rolling Resistance Measurement and a Model Development, *Journal of Transportation Engineering*, 141(2) 1-10, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000673.
10. M. Dousti, S. Baslamisli, E. Onder, & S. Solmaz, Design of a multiple-model switching controller for ABS braking dynamics. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 37(5) 582-595, 2015. DOI: 10.1177/0142331214546522.
11. J. Henry, Evaluation of pavement friction characteristics, *Synthesis of Highway Practice* No 291, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2000.
12. J. Wambold, C. Antle, J. Henry, & Z. Rado, International PIARC experiment to compare and harmonise texture and skid resistance measurements. *PIARC Publication*, França, 1995.
13. M. Burckhardt, *Fahrwerktechnik: radschlupf-regelsysteme*, Wrzburg: Vogel Verlag, Alemanha 1993
14. B. Wang, H. Guan, P. Lu & A. Zhang, Road surface condition identification approach based on road characteristic value, *Journal of Terramechanics*, 56, 103-117, 2014. DOI:10.1016/j.jterra.2014.09.001.
15. H. Pacejka, *Tyre and vehicle dynamics*, Butterworth-Heinemann, 156-172, Oxford, 2006
16. X. Zhang, Y. Xu, M. Pan & F. Ren, 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*, vol. 52, n.º4, 475 – 503, 2014. DOI:10.1080/ 00423114.2013.864775
17. EN 13036-1:2001, *Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 1: Measurement of surface macrotexture depth using a volumetric patch technique* Norma CEN, 2001.
18. C. Silvério, Dissertação de mestrado, *Características Superficiais de Pavimentos Betuminosos – Consequências na interação Veículo-Pavimento*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2015.
19. INIR (2010). *Norma de traçado – Revisão*, INIR - Instituto de Infraestruturas Rodoviárias IP, 2010