

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

JOÃO BERTOLDO KOERICH DE ABREU

AVALIAÇÃO DE INTERVALO DE CONFIANÇA DE VELOCIDADE EM COLISÃO DE
VEÍCULO COMERCIAL COM PEDESTRE

Joinville

2021

JOÃO BERTOLDO KOERICH DE ABREU

AVALIAÇÃO DE INTERVALO DE CONFIANÇA DE VELOCIDADE EM COLISÃO DE
VEÍCULO COMERCIAL COM PEDESTRE

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Alexandre Mikoswki

Joinville

2021

JOÃO BERTOLDO KOERICH DE ABREU.

AVALIAÇÃO DE INTERVALO DE CONFIANÇA DE VELOCIDADE EM COLISÃO DE
VEÍCULO COMERCIAL COM PEDESTRE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Mikoswki
Orientador e Presidente da banca
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro titular
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Membro titular
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Me. Thiago de Lima Gontarski
Membro externo titular
Engenheiro Ferroviário e Metroviário

Dedico este trabalho a Altamiro Arlindo De Abreu Junior (*in memoriam*), que foi pai, amigo e que sempre me motivou a trilhar o caminho até aqui.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ser a energia que cria e amplifica o valor da vida.

Ao professor Alexandre Mikoswki pela orientação no decorrer deste e de outros trabalhos que também tive a felicidade de realizar em conjunto, agregando muito conhecimento e tornando muito mais vasta a minha formação acadêmica.

Ao Laboratório de Modelagem e Análise de Dados (LabMAD) por disponibilizar o espaço físico para a análise de dados, modelagem matemática e discussão de assuntos teóricos e resultados pertinentes ao estudo deste tema.

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e seus docentes por terem me proporcionado a oportunidade de realizar um sonho de infância.

Aos colegas e amigos de graduação e em especial ao Flávio Martins pelo companheirismo e conselhos, acerca da vida e também do tema do presente estudo.

Por fim, meus agradecimentos a minha mãe Mirian, minha irmã Joana, minha namorada Letícia Valtrick e meu cunhado Anacleto. Vocês foram peças fundamentais na minha missão acadêmica. Meu muito obrigado, do fundo do meu coração.

“Aqui, o conhecimento de homem algum pode ir além de sua experiência.”

John Locke

RESUMO

As velocidades calculadas para acidentes de trânsito dependem fortemente do valor de atrito da interface entre o pneu e pavimento. O valor de atrito medido para uma mesma superfície e condição de pavimento varia entre os dispositivos utilizados para a aferição. A caracterização da superfície pavimentada se dá por meio do índice combinado chamado de *IFI* (International Friction Index) que leva em conta valores de macro e microtextura e para o estudo o valor adotado é de $IFI (F60, S_p) = IFI (0,5, 124,76)$. Desse modo, este trabalho destina-se a apresentar o estudo e análise dos dispositivos que podem ser utilizados em locais de acidente de trânsito, visando auxiliar no levantamento de dados e vestígios. Foram analisados 31 dispositivos de medição de atrito diferentes, cujos valores de coeficiente de atrito de cada um foram gerados a partir de dados das constantes para regressão de *GF60* usando o modelo PIARC F60 e que são encontradas no Experimento Internacional de Comparação e Harmonização das Medidas de Textura e Resistência ao Deslizamento, cujo relatório foi publicado em 1995. O delineamento da pesquisa terá como principais estratégias a pesquisa bibliográfica e documental e o estudo de caso, baseado na comparação entre os dispositivos de avaliação de coeficiente de atrito no cálculo de velocidade bem como de seu intervalo de confiança, em caso de colisão de veículo comercial contra pedestre.

Palavras-chave: Coeficiente de atrito. Interface Pneu-Pavimento. Dinâmica de acidentes. *International Friction Index*.

ABSTRACT

The speeds calculated for traffic accidents depend heavily on the friction value of the interface between the tire and the pavement. The friction value measured for the same surface and pavement condition varies between the devices used for measurement. The characterization of the paved surface takes place through the combined index called *IFI* (International Friction Index) that takes into account macro and microtexture values and for the study the adopted value is $IFI(F60, Sp) = IFI(0.5, 124.76)$. Thus, this work aims to present the study and analysis of devices that can be used in traffic accident sites, aiming to assist in the collection of data and traces. That analyzed 31 different friction measuring devices, whose friction coefficient values of each one were generated from constant data for the *GF60* regression using the PIARC F60 model and which are found in the International Measurement Comparison and Harmonization Experiment of Texture and Slip Resistance, whose report was published in 1995. The research outlining will have as main strategies bibliographic and documentary research and the case study, based on the comparison between the devices for assessing friction coefficient in the calculation of speed as well as of its confidence interval in a case of collision of commercial vehicle against a pedestrian.

Keywords: Friction coefficient. Tire-Pavement interface. Accident dynamics. International Friction Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores causais de acidentes de transito.....	18
Figura 2 - Mecanismos de geração de atrito entre do pneu e pavimento.	22
Figura 3 - Deformação devido à frenagem no ponto de contato.	23
Figura 4 - Variação do coeficiente de atrito com o escorregamento.	24
Figura 5 - Coeficientes de aderência para pneus em alguns tipos de pista em variadas condições climáticas.	24
Figura 6 - Dependência do coeficiente de atrito de escorregamento com a velocidade para diferentes condições de pista.	25
Figura 7 - Deslocamento da água pelo pneu de acordo com o conceito das zonas.	29
Figura 8 - Dependência do coeficiente de atrito para um pneu com 8 mm de profundidade de sulcos em relação a velocidade para diferentes níveis de lamina d'água.	30
Figura 9 - Variação do coeficiente de aderência com o tempo durante uma chuva fraca.	31
Figura 10 - Pneus padrão utilizados nos principais dispositivos de medição de atrito. a) ASTM E1136 b) ASTM E501 c) ASTM E524 d) Trelleborg T49.....	32
Figura 11 - Influência da textura nas características da superfície de rolamento.....	33
Figura 12 - Valor de atrito de escorregamento em diferentes situações climáticas como função da velocidade.	34
Figura 13 - Advertência de recomendação do uso de corrente nos pneus.....	34
Figura 14 - Representação de uma colisão genérica.....	35
Figura 15 - Modelo esquemático de um veículo em frenagem.	36
Figura 16 - Desenho esquemático de iminência de atropelamento.	37
Figura 17 - Levantamento do atrito com Pêndulo Britânico.	41
Figura 18 - <i>Dynamic Friction Tester (DFT)</i> - a) Equipamento montado; b) Vista inferior com as três sapatas de borracha.	41
Figura 19 - Planta esquemática do <i>Mu-meter</i>	42
Figura 20 - <i>Mu-meter</i> montado no veículo rebocador pronto para o início do teste.	43
Figura 21 - Vista geral do <i>Stradograph</i> em estrada.....	44
Figura 22 - <i>Odoliograph</i> seguindo caminhão-cisterna.	44
Figura 23 - Montagem da roda a 20° e equipamentos <i>SCRIM</i>	45
Figura 24 - <i>Drag Sled</i> sendo usado.	46
Figura 25 - <i>Locked wheel Skid Tester</i>	47
Figura 26 - <i>Adhera</i>	47

Figura 27 - Vista Inferior do equipamento <i>Griptester</i>	48
Figura 28 - <i>Griptester</i> movido por veículo genérico adaptado.	49
Figura 29 - Micro <i>Griptester</i> acionado manualmente.	49
Figura 30 - <i>SRM</i> com as rodas medidoras em solo.....	50
Figura 31 - BV-11 em operação rebocado por pickup média.....	51
Figura 32 - <i>BV-8</i> em operação.	51
Figura 33 - DWW pronto para teste	52
Figura 34 - Norsemeter <i>OSCAR</i> em pista de teste.....	52
Figura 35- Curvas de atrito.....	56
Figura 36 - Croqui do acidente de trânsito hipotético para o estudo de caso.....	63
Figura 37 - Caminhão VW Worker 13.190.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dispositivos de medição de atrito participantes no experimento da PIARC.....	54
Quadro 2 - Identificação dos equipamentos por siglas.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Avaliação das Condições de Aderência Pneu Pavimento ou Resistência à Derrapagem.	26
Tabela 1 - Avaliação das Condições de Aderência Pneu Pavimento ou Resistência à Derrapagem.	27
Tabela 2 - Valores do <i>IFI</i>	27
Tabela 3 - Coeficientes de correlação das regressões lineares dos equipamentos de medição de atrito.....	55
Tabela 4 - Valores das constantes para regressão de <i>GF60</i> usando o modelo PIARC $F60 = A + B \cdot FRS \cdot \exp[(S-60)/S_p]$, onde S_p foi determinado usando MPD (Método Profundidade Média de Perfil para avaliação da textura do pavimento).	58
Tabela 5 - Valores de atrito medidos para uma pista de <i>IFI</i> (0,5, 124,76) com deslizamento próprio de cada equipamento.....	61
Tabela 6 – Valores numéricos das variáveis e erros.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Anti-lock Braking System
ASTM	American Society for Testing and Materials
BPN	<i>British Number Pendulum</i>
CAL	Coefficiente de Atrito Lateral
CAT	Coefficiente de Atrito Transversal
CG	Centro de Gravidade
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
<i>DFT</i>	<i>Dynamic Friction Tester</i>
DNTI	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transporte
DPRF	Departamento da Polícia Rodoviária Federal
ED	Eixo Dianteiro
ET	Eixo Traseiro
FKFS	<i>Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart</i>
FN	<i>Friction Number</i>
<i>FR</i>	<i>Valor de atrito medido</i>
HS	Altura de Areia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFI	<i>International Friction Index</i>
MPD	Método Profundidade Média de Perfil para avaliação da textura do pavimento
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PBT	Peso Bruto Total
PIARC	<i>Permanent International Association for Road Congresses</i>
SC	Sítio de Colisão
SCRIM	<i>Sideways Force Coefficient Routine Investigation Machine</i>
SFN	<i>Slip Friction Number</i>
SN	<i>Skid Number</i>
SRM	Stuttgarter Reibungsmesser
SRT	<i>Skid Resistent Test</i>
TRRL	<i>Transportation Road Research Laboratory</i>

VDR	Valor de Resistência à derrapagem
Z1	Zona 1
Z2	Zona 2
Z3	Zona 3

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante de linearização do equipamento de medição
a	Constante de linearização do equipamento de medição textura
B	Constante de linearização do equipamento de medição
b	Constante de linearização do equipamento de medição de textura
C	Constante de linearização do equipamento de medição
E_r	Erro relativo
F	Força de atrito
F_{fI}	Força de frenagem dianteira
F_{fII}	Força de frenagem traseira
$F60$	Valor estimado do valor de referência (GF60)
$FR60$	Valor de atrito medido convertido para 60 km/h
FRS	Medida de atrito à uma determinada velocidade de deslizamento S
g	Aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$)
GF	Valor de atrito na curva de referência para uma velocidade de deslizamento S
$GF60$	Valor de atrito na Curva de referência em $S=60 \text{ km/h}$
GS	Parâmetro da influência da velocidade em km/h
N	Força Normal
r	Raio do pneu
R_I	Reação no eixo dianteiro
R_{II}	Reação no eixo traseiro
S	Velocidade de Deslizamento
S_p	Estimativa da Constante de velocidade da curva de referência usando o modelo
T_x	Textura
v	Velocidade do veículo.
v_{ic}	Velocidade de impacto
s	Distância de frenagem (Comprimento das marcas de frenagem)
β	Inclinação da pista
μ	Coefficiente de atrito
μ_a	Coefficiente de aderência
μ_e	Coefficiente de escorregamento
ω	Velocidade rotacional do pneu
X	Grandeza

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.2.1 Objetivos Específicos.....	20
2 INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ATRITO NA DINÂMICA DE ACIDENTES	21
2.1. CONCEITO FÍSICO DO COEFICIENTE DE ATRITO.....	21
2.2. RECOMENDAÇÕES DE ADERÊNCIA RELACIONADA À SEGURANÇA.....	25
2.3. HIDROPLANAGEM	27
2.4 FATORES QUE MODIFICAM O ATRITO ENTRE O PNEU E O PAVIMENTO	31
2.4.1 Pneus.....	31
2.4.2 Textura do pavimento	32
2.4.3 Condições climáticas e sujilidade	33
2.5. CÁLCULO DE VELOCIDADES EM ACIDENTES DE COLISÃO DE VEÍCULO COM PEDESTRE	35
2.5.1 Velocidade com vestígios de frenagem.....	36
2.5.2 Velocidades em atropelamentos	37
3 DISPOSITIVOS PARA A AFERIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	39
3.1 EQUIPAMENTOS ESTÁTICO.....	40
3.1.1 Pêndulo Britânico	40
3.1.2 Dynamic Friction Tester – DFT	41
3.2 EQUIPAMENTOS DE RODA OBLÍQUA	42
3.2.1 Mu – meter	42
3.2.2 Stradograph	43
3.2.3 Odoliograph	44
3.2.4 SCRIM.....	45
3.3 EQUIPAMENTOS DE RODA BLOQUEADA	45
3.3.1 drag sled	46
3.3.2 Locked wheel Skid Tester	46
3.3.3 Adhera	47
3.4 EQUIPAMENTOS DE RODA PARCIALMENTE BLOQUEADA.....	47

3.4.1 Griptester (Deslizamento Fixo)	48
3.4.2 Stuttgarter Reibungsmesser ou SRM (Deslizamento Fixo ou variável)	50
3.4.3 Skiddometers BV-11 e BV-8 (Deslizamento fixo)	50
3.4.4 DWW Skid Resistance Trailer (Deslizamento fixo)	51
3.4.5 Norsemeter OSCAR (Deslizamento variável)	52
3.5. SÍNTESE INTEGRADORA DOS DISPOSITIVOS DE AFERIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	53
4 METODOLOGIA.....	54
4.1 BANCO DE DADOS DE COEFICIENTE DE ATRITO	54
4.2 ANÁLISE DE DADOS	58
5 VELOCIDADE EM COLISÃO DE VEÍCULO COMERCIAL COM PEDESTRE....	61
5.1. COEFICIENTES DE ATRITO CALCULADOS COM O BANCO DE DADOS	61
5.2. LOCAL DO ACIDENTE DE TRÂNSITO	62
5.3. INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A VELOCIDADE	64
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
6.1. CONCLUSÕES	68
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A – PLANILHA ELETRÔNICA PARA O CÁLCULO DOS VALORES DE ATRITO E DO INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A VELOCIDADE.	74

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, no decorrer do ano de 2020 foram registrados 63.447 acidentes de trânsito somente em rodovias federais. Estes dados fazem parte das estatísticas do Departamento da Polícia Rodoviária Federal (DPRF, 2021). As causas destas ocorrências são variadas e vão desde a simples distração do motorista, passando pela má conservação da via até o completo desrespeito ao Código de Trânsito Brasileiro (CTB) (BRASIL, 1997). Fatores relacionados aos veículos são de extrema influência na causa de acidentes rodoviários, principalmente no que se refere às questões de manutenção preventiva, preditiva e corretiva (BOSCH, 2005).

Na ocorrência de óbito no local do acidente de trânsito é solicitada a presença dos peritos criminais, agentes públicos, cuja função é a de determinar as causas do incidente bem como avaliar a dinâmica do mesmo, elaborando ao fim do processo um laudo pericial que será entregue ao juiz. Este tomará as medidas cabíveis nas esferas cível ou criminal (ALMEIDA, 2011, p. 3).

Dados levantados por Bucharles (2014) demonstraram que em acidentes de trânsito com vítimas fatais, não são realizadas análises de cunho técnico no pavimento asfáltico em que os acontecimentos estiveram inseridos. Dados de aderência bem como fatores relacionados ao atrito de contato pneu-pavimento não são coletados no local do acidente. Cada pavimento possui suas peculiaridades, estas estão relacionadas com a macro ou microtextura do pavimento bem e também com as condições de temperatura, umidade e possível existência de elementos redutores de atrito como óleos e detritos em geral. Dessa forma é desejável saber de fato, no local, características suficientes para determinar com certa precisão o coeficiente de atrito estático e dinâmico entre as partes do automóvel que tocam a estrada de rolamento (BUCHARLES, 2014, p.7).

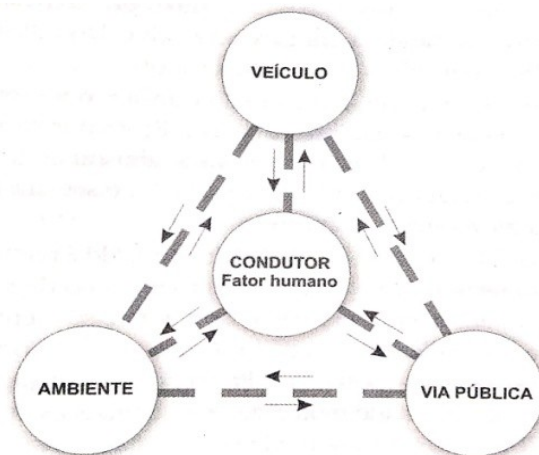
Um dos principais parâmetros de atrito utilizados pelos peritos no cálculo da dinâmica de acidentes de trânsito para a reconstrução do ocorrido é o coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento. A avaliação do mesmo não é realizada no local, a ação tomada pelos agentes é a obtenção de valores da literatura, e estes são encontrados em manuais de perícia de acidentes de trânsito de vários autores, como proposta de ação pode-se utilizar equipamentos específicos para este fim (medição do atrito no local) (LUTY, 2013).

Os acidentes em geral podem ser caracterizados como eventos que possuem sua construção baseada na casualidade, tendo elementos difíceis de serem previstos e ou imaginados (ALMEIDA, 2011, p. 18). Dessa forma, limitando o conceito ao tema do estudo, Aragão define:

Acidente de trânsito (sic) é acontecimento involuntário, inevitável e imprevisível, ou inevitável, mas previsível, ou seja, imprevisível mas evitável, do qual participa, pelo menos um veículo em movimento, pedestres e obstáculos fixos, isoladamente ou em conjunto (sic), ocorrido em via terrestre, e resultando danos ao patrimônio, lesões físicas ou morte (ARAGÃO, 2003).

Deste modo, fica evidente a noção básica de que os acidentes de trânsito em geral são ocorrências rápidas, momentâneas, fortuitas, e que de alguma forma causem danos a outrem. A literatura disponível que versa sobre os acidentes de trânsito têm como causas principais aquelas mostradas na Fig. 1.

Figura 1 - Fatores causais de acidentes de transito.



Fonte: Aragão (2016, p. 22).

Segundo a agência de tráfego australiana Austroads (1994), e baseando-se no modelo sistêmico de análise de causas, 95% dos acidentes de trânsito são causados por ações humanas sendo estas diretas ou indiretas. O condutor, geralmente não se vê como causa do problema de tráfego, assim este comportamento torna-se um problema de cunho social (NEGRINI; KLEINÜBING, 2012, p. 18).

Segundo DaMatta (2010, p. 60) "O comportamento do brasileiro no trânsito é reflexo de sua carga cultural forjada por uma sociedade historicamente aristocrática e escravista." Deste modo, é imperativo que o condutor tome nota de suas responsabilidades e limitações de suas ações no trânsito, permitindo uma redução nos acidentes, e proteção dos bens materiais e humanos dele próprio e de outros.

Em respeito a presente classificação causal podemos citar a condição da pista de rodagem e de seu entorno logo antes e momentos depois do acidente. Fatores como os geométricos, tipos de trajetória (retilínea, curvilínea), formatos de desnível (aclive ou declive), estado de conservação da via, sentidos de circulação possíveis (mão única, mão dupla), sinalização, fiscalização, velocidade máxima permitida são determinantes no que se enquadra em características viárias passíveis de causas de acidentes de trânsito (ARAGÃO, 2016, p. 23).

Todo dispositivo, seja ele, elétrico, mecânico e ou eletrônico possui determinada confiabilidade em relação a possuir falha pontual ou catastrófica. Deste modo, os veículos podem falhar sob várias condições. A principal causa de falhas em automóveis é a falta de manutenção preventiva, principalmente em quesitos de segurança como pneus e freios. As montadoras também são passíveis de erros em seus projetos, sendo esta parcela a mais difícil de ser solucionada, necessitando de *recalls* quando a falha de projeto referencia-se à questões de segurança (NEGRINI; KLEINÜBING, 2012, p. 18).

Dentro do exposto, diante da importância da temática, a proposta deste trabalho compreende investigar a influência do coeficiente de atrito entre pneu e pavimento no cálculo de velocidade de acidente de trânsito em sítio de colisão entre veículo comercial e pedestre.

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática apresentada, propõe-se neste trabalho os objetivos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar e tratar dados da literatura de coeficiente de atrito em pavimento asfáltico para previsão de intervalo de confiança de velocidade em sítio de acidente de trânsito envolvendo veículo comercial e pedestre.

1.2.1 Objetivos Específicos

- i. Elaborar uma fundamentação teórica a partir dos conceitos teóricos da influência do coeficiente de atrito, aderência, hidroplanagem e fatores que modificam o atrito entre pneu-pavimento na dinâmica de acidentes de trânsito, com base na aplicação das metodologias de pesquisa documental e bibliográfica;
- ii. Construir uma fundamentação teórica a partir dos conceitos práticos dos dispositivos utilizados na aferição do coeficiente de atrito entre pneu-pavimento asfáltico, conforme as metodologias de pesquisa documental e bibliográfica;
- iii. Calcular o coeficiente de atrito entre pneu-pavimento asfáltico a partir de dados da literatura das constantes para regressão de GF60 usando o modelo PIARC F60;
- iv. Estimar intervalos de confiança para velocidades de colisão entre veículo comercial e pedestre em sítios de acidentes de trânsito, utilizando os coeficientes de atrito calculados.

2 INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ATRITO NA DINÂMICA DE ACIDENTES

Nesta seção será desenvolvida a fundamentação teórica, que permite realizar a contextualização do problema de pesquisa, conceituando os acidentes de trânsito e suas causas comuns. Os métodos de avaliação do coeficiente de atrito em superfícies pavimentadas e normas referentes ao tema serão abordados. A utilização do coeficiente de atrito em cálculos de dinâmica de acidentes de trânsito também será discutida, com base em equações de dinâmica veicular e mecânica newtoniana clássica.

2.1. CONCEITO FÍSICO DO COEFICIENTE DE ATRITO

O atrito entre o pneu e o pavimento também pode ser entendido como aderência. Esta característica de interface é um dos fatores que permitem a segurança viária. Pistas de rolagem com boa aderência possibilitam distâncias de frenagem mais seguras, realização de curvas com maior controle, boa condução dinâmica em estados de pavimento molhado bem como a constância de trajetória do veículo (APS, 2006, p. 10). A seguir, alguns conceitos e definições serão elucidados para melhor entendimento do assunto.

Baseando-se na norma de terminologia G40 da ASTM (2001), pode-se definir coeficiente de atrito como a razão da força de atrito (F) entre dois corpos e a força normal (N) que os mantém juntos. A Eq. 1 demonstra essa relação. A aderência é caracterizada como a capacidade do pneu fornecer dirigibilidade sem derrapar.

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (1)$$

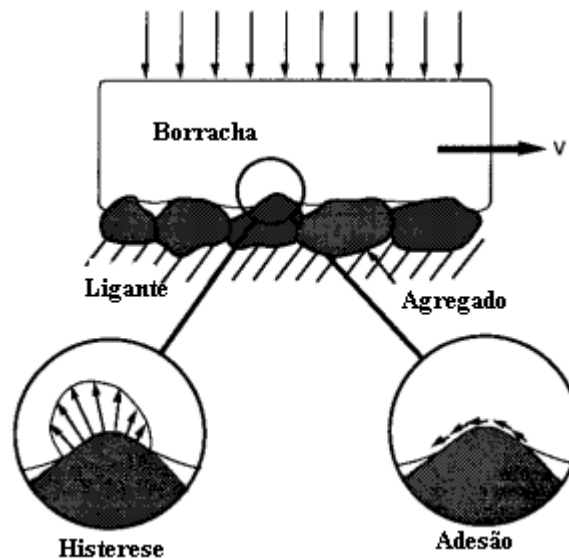
em que F é a força de atrito, N é a força normal e μ é o coeficiente de atrito.

De acordo com Gillespie (1992), os mecanismos que geram o atrito entre o pneu e pavimento são basicamente dois: adesão e histerese. A adesão está baseada em forças fracas, também conhecidas como forças de Van Der Waals, presentes nas ligações intermoleculares entre o material do pneu e o composto agregado da via. Quando a via está contaminada com compostos que enfraqueçam estas ligações, como por exemplo, óleo, sujeira e ou água percebe-se substancial redução do atrito que gera as forças entre o pneu e pavimento. Já a

histerese representa a perda de energia resultante da deformação da borracha do pneu no contato enquanto o mesmo gira sobre a superfície de rolagem. A Fig. 2 ilustra os dois principais mecanismos de geração de atrito.

O coeficiente de atrito pneu-pavimento de determinado local está relacionado aos equipamentos de medição de atrito utilizados. Estes dispositivos têm seu funcionamento baseado em rodas livres, parcialmente bloqueadas ou bloqueadas, assim pode-se classificar o coeficiente de atrito, de acordo com Poncino (2001), em dois modos: Coeficiente de atrito longitudinal (CAL) e Coeficiente de atrito transversal (CAT). O CAL tem relação com ao atrito gerado quando a situação dinâmica do movimento do veículo permite arrasto do pneu, seja ele travado em uma frenagem ou girando em falso no pavimento durante uma aceleração brusca, ambas no sentido longitudinal (APS, 2006, p.14). Já o CAT faz referência a força de atrito gerada no plano perpendicular ao sentido de movimento do veículo, como por exemplo em curvas ou derrapagens (APS, 2006, p. 14).

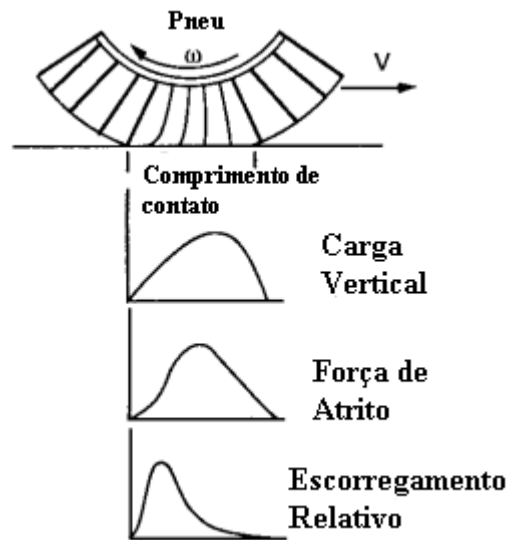
Figura 2 - Mecanismos de geração de atrito entre do pneu e pavimento.



Fonte: Adaptado e traduzido de Gillespie (1992, p. 54).

A medida que o pneu gira, enquanto sofre uma determinada força de frenagem por exemplo, pode-se verificar que ao longo do comprimento do contato pneu-pavimento o escorregamento relativo varia, fornecendo um ponto de máximo para a força de atrito, o que está representado na Fig. 3.

Figura 3 - Deformação devido à frenagem no ponto de contato.



Fonte: Adaptado e traduzido de Gillespie (1992, p. 55).

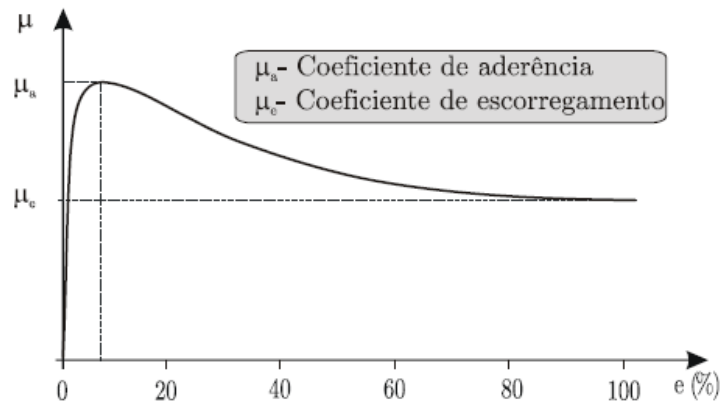
As forças de atrito, baseadas na histerese e adesão, são funções da taxa de escorregamento do pneu em relação ao pavimento, e o escorregamento é função da velocidade rotacional do pneu durante a frenagem, o que pode ser obtido da Eq. 2, extraída de Gillespie (1992, p. 55), mostrada a seguir.

$$\text{Taxa de escorregamento} = \frac{v - \omega r}{v} \quad (2)$$

em que v é a velocidade linear do veículo, ω é a velocidade angular do pneu e r é o raio do pneu.

Nicolazzi *et al.* (2008, p. 16) define a variação do coeficiente de atrito entre o pneu e pavimento como uma função da taxa de escorregamento, ficando exposta na Fig. 4.

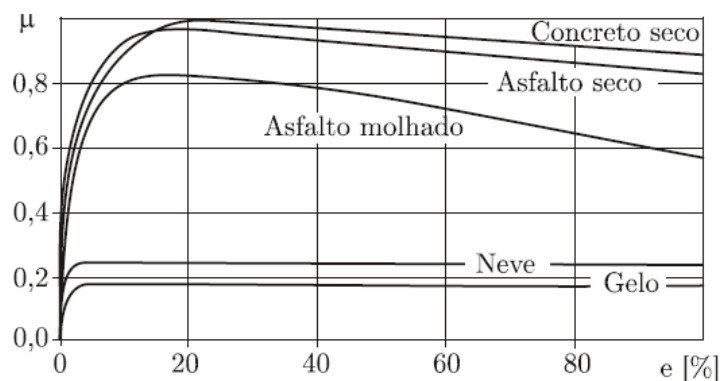
Figura 4 - Variação do coeficiente de atrito com o escorregamento.



Fonte: Nicolazzi *et al.* (2008, p. 16).

O comportamento característico do coeficiente de atrito pneu-pavimento em função do escorregamento varia de acordo com o material da pista e das condições da mesma (NICOLAZZI *et al.*, 2008, p. 17). A Fig. 5 mostra as curvas para o coeficiente de aderência para diferentes condições de pista.

Figura 5 - Coeficientes de aderência para pneus em alguns tipos de pista em variadas condições climáticas.



Fonte: Nicolazzi *et al.* (2008, p. 17).

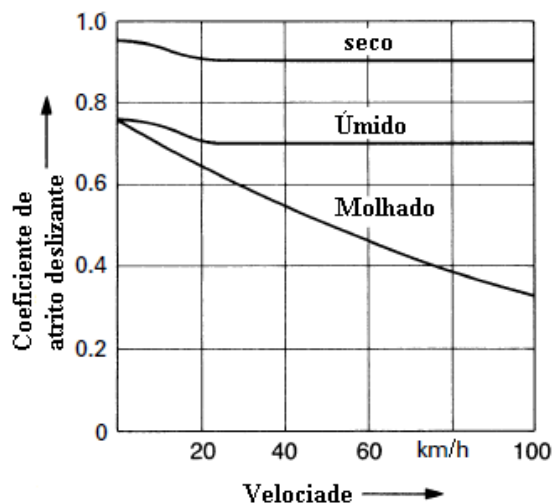
De acordo com a Fig.5, o coeficiente de aderência em pista de asfalto seco cresce rapidamente e atinge seu máximo no intervalo de 11 a 20 % de escorregamento. Quanto maior for a aceleração ou frenagem maior será o escorregamento, logo o coeficiente de atrito apresentará comportamento específico em cada situação, seja ela normal ou severa.

Quando em uma frenagem o pneu está bloqueado temos uma taxa de escorregamento alta, fazendo reduzir o coeficiente de atrito (aderência) para valores iguais ou próximos a μ_c (Coeficiente de escorregamento), assim, para reduzir as distâncias de parada e permitir manobras de emergência em condições de altas cargas de frenagem.

As montadoras adotaram uma forma de aproximar as condições de atrito para valores de quase pico ou μ_a (Coeficiente de aderência) por meio do sistema de freios ABS (Anti-lock Braking System), que controlando um módulo eletro-hidráulico por uma unidade eletrônica reduzem e aumentam a pressão nas linhas hidráulicas de cada roda independentemente conforme necessário, não deixando os pneus travarem por completo.

A velocidade do veículo interfere no coeficiente de atrito deslizante ou de escorregamento (μ_e) do contato pneu-pavimento, como pode ser observado na Fig. 6, a seguir.

Figura 6 - Dependência do coeficiente de atrito de escorregamento com a velocidade para diferentes condições de pista.



Fonte: Adaptado e traduzido de Reimpell *et al.* (2001, p.126).

Conforme a Fig. 6 percebe-se que abaixo de 20 km/h ocorre uma transição do valor do atrito de escorregamento para as três condições mostradas. Esta variação tem relação direta com a mudança do raio de rolamento dinâmico para o raio de rolamento estático do conjunto pneu-roda, sendo que a diminuição do raio de rolamento permite um aumento da área de contato pneu-pavimento (REIMPELL *et al.*, 2001, p. 126).

2.2. RECOMENDAÇÕES DE ADERÊNCIA RELACIONADA À SEGURANÇA

Cada país possui órgãos regulamentadores que recomendam ou normatizam aspectos acerca da qualidade de aderência e textura dos pavimentos asfálticos, principalmente em rodovias, visando sempre a segurança. Frequentemente, são executados testes e estudos de

valores de atrito e textura para que políticas para pavimentações sejam realizadas (APS, 2006, p. 82).

No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de transporte (DNIT), determina em seu manual de restauração de pavimentos asfálticos valores mínimos para o Valor de Resistência à Derrapagem (VDR) via método do Pêndulo Britânico, valores aceitáveis de macrotextura via método de altura de areia utilizando dados da profundidade média de areia (HS, do inglês *Height of Sand*) e valores do International Friction Index (IFI), que para o português pode ser entendido como o Índice Internacional de atrito. O IFI foi criado com o objetivo de capturar a influência da macro e da microtextura do pavimento e sua influência na aderência (BRASIL, 2006, p. 109). O IFI é calculado com base na Norma ASTM E1960-07 (2015). Os limites sugeridos para o VDR e o HS são mostrados na Tabela 1 bem como a classificação dos pavimentos de acordo com a magnitude dos parâmetros citados. A Tabela 2 mostra os limites para o IFI.

Tabela 1 - Avaliação das Condições de Aderência Pneu Pavimento ou Resistência à Derrapagem.

CLASSES DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM/MÉTODO DO PÊNDULO BRITÂNICO	
CLASSES	VDR – VALOR DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM
1 Perigosa	< 25
2 - Muito Lisa	25 – 31
3 – Lisa	32 – 39
4 - Insuficientemente Rugosa	40 – 46
5 - Medianamente Rugosa	47 -54
6 – Rugosa	55 – 75
7 - Muito Rugosa	>75
AValiação da Macrotextura/Método da Altura de Areia	
Profundidade média em (mm)	Textura superficial
HS < 0,20 mm	Muito fina ou muito fechada
0,20 mm < 0,40 mm	Fina ou fechada
0,40 mm < HS < 0,80 mm	Média

Tabela 2 - Avaliação das Condições de Aderência Pneu Pavimento ou Resistência à Derrapagem.

Continuação

0,50 mm < HS < 1,20 mm	Grosseira ou aberta
HS > 1,20 mm	Muito grosseira ou aberta

Fonte: Brasil (2006, p. 107).

Os limites sugeridos para o valor de resistência à derrapagem devem ser maiores ou iguais a 55, ou seja, $VDR \geq 55$. Para a macrotextura temos o intervalo em que $0,6 \text{ mm} < HS < 1,2 \text{ mm}$.

Tabela 3 - Valores do *IFI*.

Valores do IFI	Mínimo	Máximo
Péssimo	< 0,06	
Ruim	0,06	0,12
Regular	0,13	0,16
Bom	0,20	0,30
Ótimo	> 0,30	

Fonte: Brasil (2006, p.109).

Assim sendo, é possível estabelecer o grau de segurança que as várias rodovias brasileiras apresentam e a influência da macro e microtextura no atrito entre o pneu e pavimento.

2.3. HIDROPLANAGEM

As autoridades de trânsito recomendam a diminuição das velocidades de rodagem quando em condições de pista molhada, isto se deve ao fato de os pneus dos veículos não conseguirem drenar totalmente a água na interface pneu-pavimento durante o percurso. A película de água reduz de forma significativa o atrito devido à adesão por meio do mecanismo de diminuição da área de contato entre os pneus e o pavimento e quanto maior a velocidade do veículo, maiores são as reduções de atrito, devido à razão de os pneus não conseguirem gerar drenagem de água suficiente por meio de suas ranhuras. Assim como pneus com sulcos de profundidade adequada a macrotextura da pista têm grande influencia na manutenção de certo atrito em condições de molhamento severas (PEREIRA, 1998, p. 17).

Estando presente película de água na pista, e com o rolar dos pneus, são geradas pressões hidrodinâmicas na área de contato dos mesmos contra a superfície e em condição limite (velocidade crítica), a força gerada pelo deslocamento da água para fora dos pneus pode ocasionar a separação do contato pneu-pavimento, gerando uma componente de força para cima levando à possível perda de controle do veículo, cuja direção e frenagem ficam extremamente comprometidas, fazendo o veículo deslizar. Este fenômeno é caracterizado como *hidroplanagem* ou *aquaplanagem* (PEREIRA, 1998, p. 18).

De acordo com Rodrigues Filho (2006, p. 86), existem basicamente três tipos de hidroplanagem, são elas: viscosa, dinâmica e por desvulcanização.

O mesmo autor afirma que a existência de unicamente uma forma de hidroplanagem é extremamente rara, o que ocorre de fato é a coexistência de hidroplanagem viscosa e dinâmica, ou seja, uma hidroplanagem combinada. Pesquisas realizadas pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), mostram a região de contato pneu-pavimento em situação de pista molhada existem três zonas diferentes. São portanto:

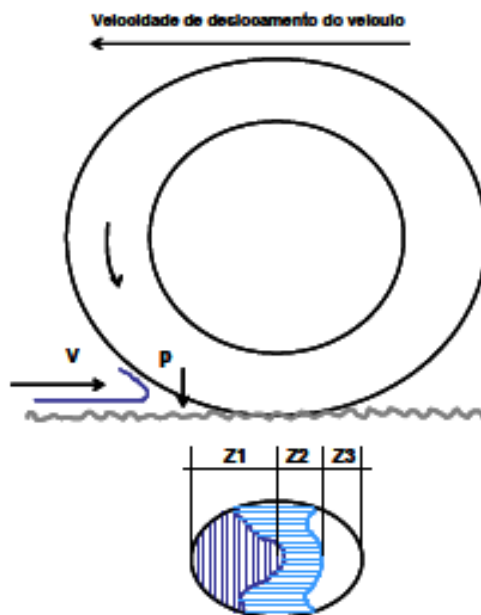
Zona 1 (Z1): Nessa área há uma espessa lâmina de água, que está exposta a hidroplanagem dinâmica. Uma espécie de onda é formada pela ação do pneu em empurrar a água para frente. Esta região também é denominada de “zona molhada” (APS, 2006, p. 16);

Zona 2 (Z2): Zona caracterizada por conter uma fina camada de água, também chamada de zona de hidroplanagem viscosa (RODRIGUES FILHO, 2006, p. 90);

Zona 3 (Z3): Pode ser considerada como uma zona teoricamente seca em que a água é totalmente liberada e que as forças de atrito contribuem consideravelmente para a estabilização direcional do veículo (PEREIRA, 1998, p. 20).

A seguir, a Fig. 7 mostra as três regiões distintas representadas esquematicamente. A distribuição das zonas varia de acordo com a velocidade do veículo, das condições de textura do pavimento, da pressão de enchimento dos pneus e da dinâmica de manobra do veículo (APS, 2006, p. 16).

Figura 7 - Deslocamento da água pelo pneu de acordo com o conceito das zonas.



Fonte: APS (2006, p. 17).

Baseado em Reimpell *et al.* (2001, p. 126) quanto maior for o nível (espessura da película de água) maior será a tendência de aquaplanagem. Os principais fatores que influenciam neste fenômeno são: i) Pista de rodagem (textura do pavimento e espessura do filme de água); ii) Pneus (profundidade dos sulcos e morfologia); iii) Velocidade (Fator crítico para a aquaplanagem).

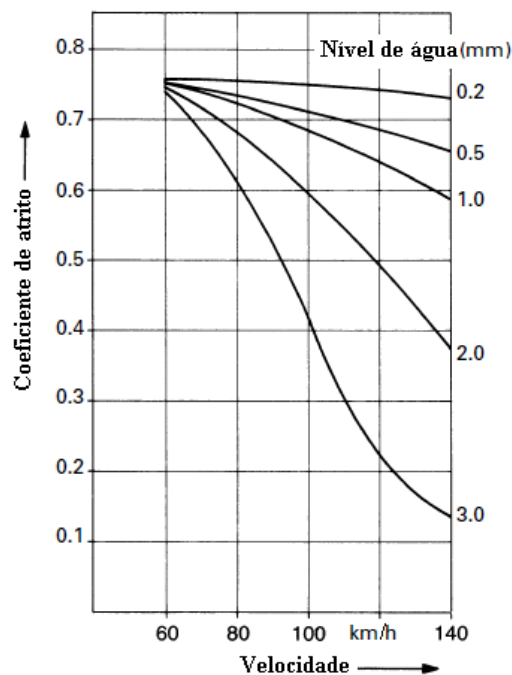
A medida em que o pneu se desloca, na Zona 1 (Z1), parte significativa do fluido é direcionada para frente e para os lados em formato de *spray*, a outra quantia de líquido escoam nas ranhuras e sulcos do pneu e também por entre as vias como canais e microcanais da textura do pavimento (RODRIGUES FILHO, 2006, p. 91).

Ao passar por Z1, a banda de rodagem sofre deformações específicas entrando na região de transição Z2 que contém uma quantidade delgada de fluido remanescente. A macrotextura do pavimento torna-se responsável por fornecer alguns poucos pontos de contato, em que a tensão de toque do pneu supera a pressão do fluido existente na interface, gerando atrito por histerese (RODRIGUES FILHO, 2006, p. 91).

Quanto maior for a velocidade menor será a região seca (Zona 3, Z3), responsável pelo mecanismo de geração de atrito por histerese e adesão combinadas. O atrito total combinado pode ser entendido como a participação proporcional respectivamente de Z1, Z2 e Z3 (APS, 2006, p. 18).

Cada tipo e condição de pneu tem uma determinada capacidade de drenagem de água, tomando isso em conta, e buscando base em Reimpell *et al.* (2001, p. 127), quanto maior for o nível de água (espessura do filme líquido sobre a superfície de rodagem) maior será a tendência à hidroplanagem em velocidades maiores. O coeficiente de atrito tem grande redução de sua magnitude em velocidades acima de 60 km/h para espessuras de filme líquido maiores que aproximadamente 0,2 mm, comportamento observado na Fig. 8.

Figura 8 - Dependência do coeficiente de atrito para um pneu com 8 mm de profundidade de sulcos em relação a velocidade para diferentes níveis de lamina d'água.

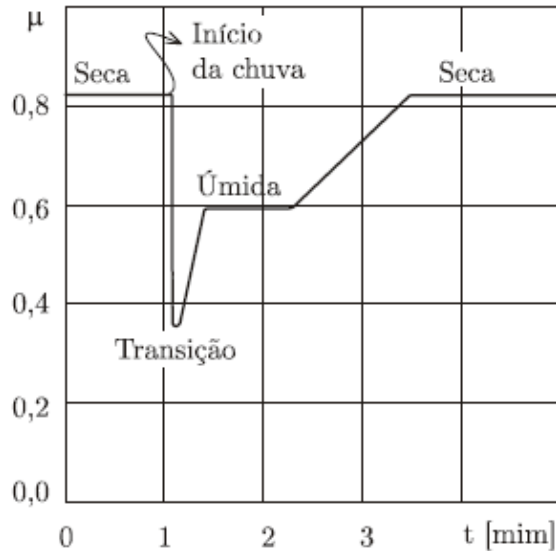


Fonte: Reimpell *et al* (2001, p.127).

Fica evidente a verificação de que o nível de água é um fator crítico de redução do atrito em pistas molhadas. Abaixo de 60 km/h, a influência da água é menos crítica devido a sua drenagem na banda de rodagem ser mais efetiva, por causa das imperfeições da pista e sulcos dos pneus. Considerações levantadas por Reimpell *et al.* (2001, p. 127) mostram que logo após as chuvas, o nível de água nas pistas geralmente está em torno de 2 mm, e em tempestades ou quando chove há muito tempo são facilmente encontradas filmes d'água com profundidades maiores, a depender de fatores de drenabilidade das pistas e outros. Assim, a velocidade reduz drasticamente o atrito e conseqüentemente a capacidade de frenagem e manobra do veículo, principalmente em condições adversas de tempo.

Outro fator inerente ao mecanismo de redução de atrito está ligado à cronologia de ação da chuva. A Fig. 9 ilustra o fato.

Figura 9 - Variação do coeficiente de aderência com o tempo durante uma chuva fraca.



Fonte: Nicolazzi *et al.* (2008, p. 20).

Percebe-se uma queda abrupta logo após o primeiro minuto de uma chuva fraca, de acordo com Nicolazzi *et al.* (2008, p. 19) este fenômeno está relacionado com a mistura das primeiras porções de chuva com poeira e outros contaminantes que estavam presentes na pista, essa mistura atua como um lubrificante na interface de contato dos pneus com o solo, diminuindo consideravelmente a aderência. Após a “limpeza” dos contaminantes, o comportamento do atrito volta a ser influenciado normalmente, pelos mecanismos para pistas úmidas e molhadas.

2.4 FATORES QUE MODIFICAM O ATRITO ENTRE O PNEU E O PAVIMENTO

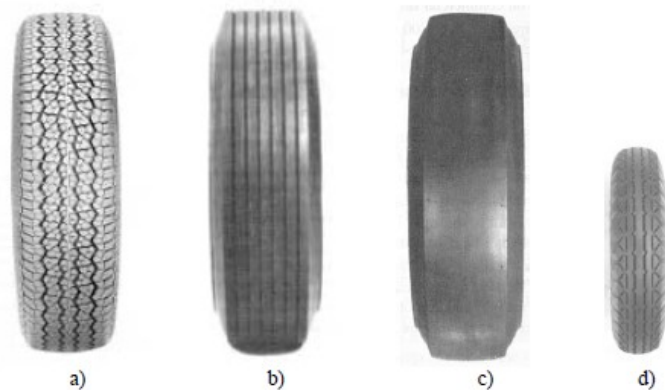
A seguir serão apresentados alguns dos fatores que influenciam o valor e as medições de atrito entre o pneu e o pavimento de uma maneira geral.

2.4.1 Pneus

Os pneus (Fig. 10), obviamente, influenciam diretamente no valor de atrito. O material, dimensão, pressão de enchimento, alinhamento, construção (Radial ou Diagonal), desenho e profundidade dos sulcos, balanceamento, velocidade, rigidez, dureza, carga

aplicada, entre outros, são fatores de qualidade que determinam o grau de aderência dos pneus na superfície de rolamento (GILLESPIE, 1992, p. 340).

Figura 10 - Pneus padrão utilizados nos principais dispositivos de medição de atrito. a) ASTM E1136 b) ASTM E501 c) ASTM E524 d) Trelleborg T49.



Fonte: Wallman (2001, p. 10).

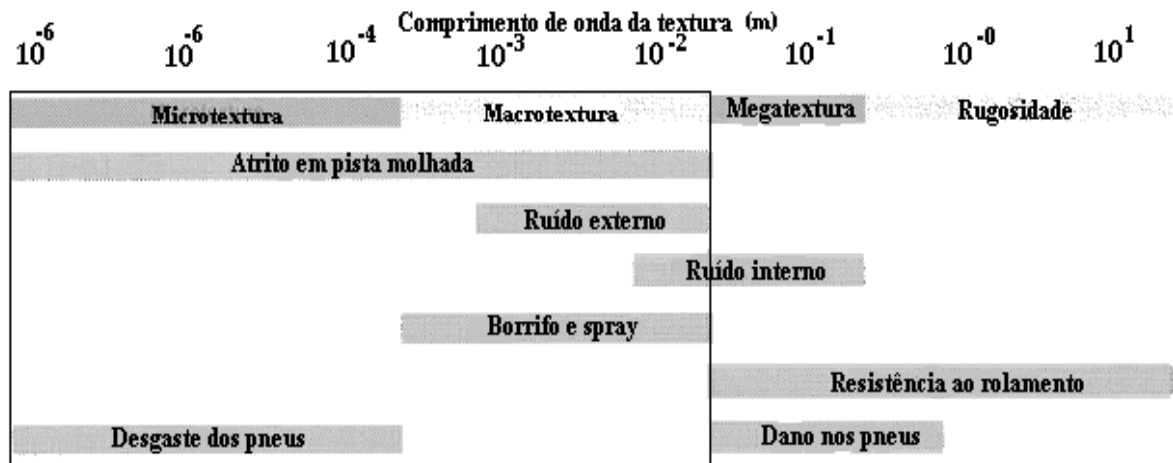
A Fig. 10 apresenta as diferenças relatadas quanto ao tamanho e desenho de sulcos de pneus.

2.4.2 Textura do pavimento

A textura é a característica que identifica a disposição e o tamanho dos agregados (granulometria) que compõem a camada asfáltica. De acordo com Henry (2000, p. 19) os níveis de textura que influenciam o valor do coeficiente de atrito são a microtextura, com comprimentos de onda de 1 μm a 0,5 mm e a macrotextura, com comprimentos de onda 0,5 mm a 50 mm.

A textura de uma forma geral exerce grande influência sobre o atrito. A macrotextura é usada de forma a garantir aderência em pisos molhados. A Fig. 11 mostra a influência da textura não somente no atrito, mas também em fatores de atenção acerca da rodagem dos automóveis.

Figura 11 - Influência da textura nas características da superfície de rolamento.



Fonte: Adaptado e traduzido de Henry (2000, p. 19).

Fica claro, a partir da figura acima que a micro e macrotextura influem diretamente sobre o atrito entre o pneu e o pavimento, não obstante ocorre a variação de outros parâmetros de superfície com a textura da mesma.

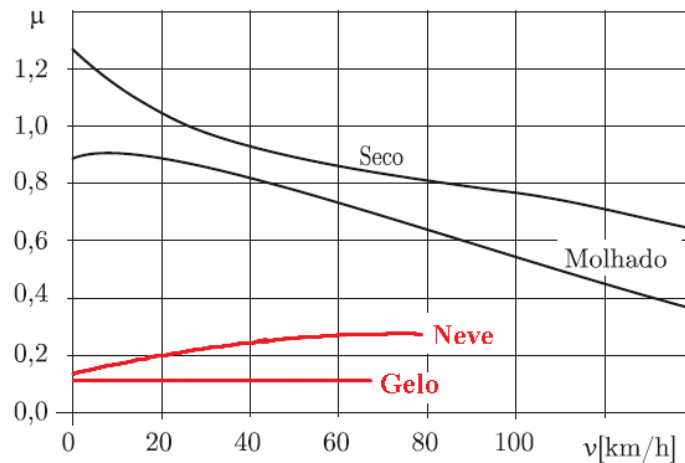
2.4.3 Condições climáticas e sujilidade

Em condições de molhamento severas como no caso de chuvas torrenciais é evidente a redução de atrito e o fenômeno de aquaplanagem, exclusivamente explicada na seção 2.3. De acordo com Pereira (1998, p. 44) a temperatura do pavimento causa um aumento no valor de μ bem como a presença de contaminantes também influenciam as condições de aderência.

A presença e acúmulo de borracha causa flutuações no valor de atrito, e também outros contaminantes como alguns fungos, poeira e óleo.

Em casos de neve ou gelo, o atrito também é afetado, como mostrado na Fig. 12.

Figura 12 - Valor de atrito de escorregamento em diferentes situações climáticas como função da velocidade.



Fonte : Adaptado de Nicolazzi *et al.* (2008, p. 18).

É evidente o baixo valor de atrito em condições de neve e gelo. Este fato pode ser explicado pela existência de uma fina película de água sobre esses dois substratos de rolamento. Em algumas regiões da Europa recomenda-se o uso de correntes próprias nos pneus para aumento de aderência, como pode ser observado na Fig. 13.

Figura 13 - Advertência de recomendação do uso de corrente nos pneus.



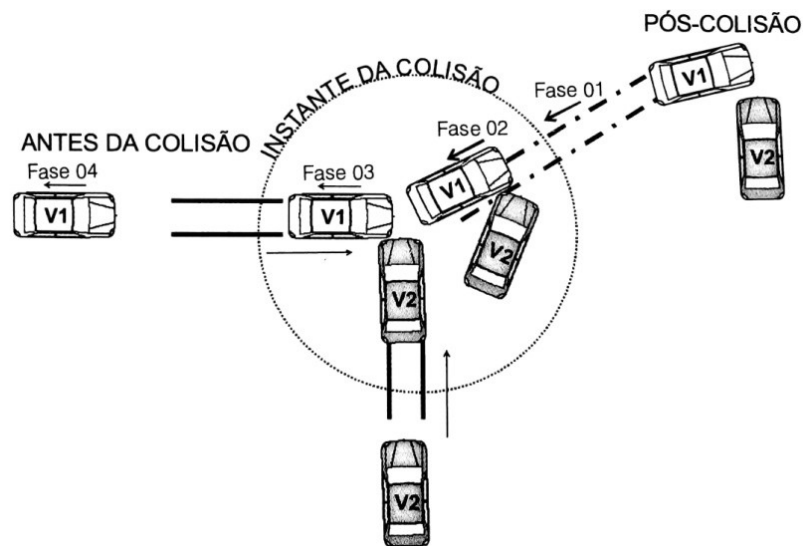
Fonte: The Telegraph (2018).

De acordo com Kogbara et al. (2016, p. 612) a adição de contaminantes de grão fino reduzem significativamente a medição de resistência ao deslizamento em agregados asfálticos enquanto que a adição de contaminantes mais espessos (grossos) auxiliam no aumento da resistência à derrapagem.

2.5. CÁLCULO DE VELOCIDADES EM ACIDENTES DE COLISÃO DE VEÍCULO COM PEDESTRE

Um dos principais dados que interessam às autoridades de trânsito em um evento de trânsito, mostrado na Fig.14, é a velocidade em que estava um ou mais veículos imediatamente antes de um acidente e imediatamente após a colisão, ou antes da frenagem, seja ela contra um objeto fixo, um pedestre ou animal, ou principalmente contra outro veículo. Existem várias metodologias de cálculo da velocidade em acidentes, que se baseiam em princípios da física fundamental, entre as principais, de acordo com Almeida (2011, p. 123), são: Princípio da conservação da energia e o Princípio da conservação da quantidade de movimento.

Figura 14 - Representação de uma colisão genérica.

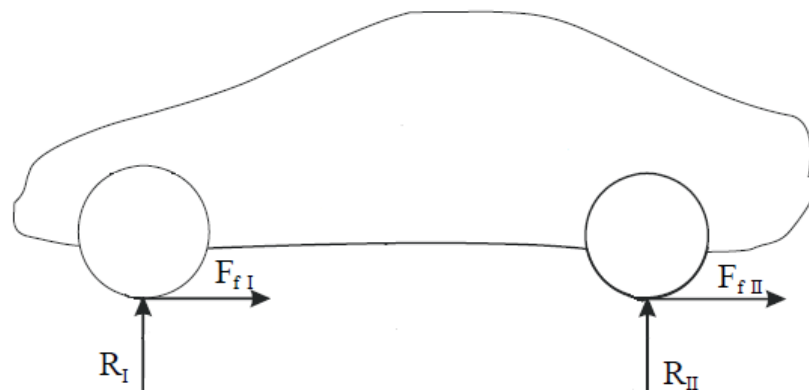


Fonte: Almeida (2011, p. 181).

2.5.1 Velocidade com vestígios de frenagem

Em uma frenagem de emergência os freios são solicitados quase que em seu limite, permitindo o travamento das rodas (veículos sem ABS) ou realizando o limiar do travamento (veículos com ABS). De acordo com Negrini e Kleinübing (2012, p. 280) para a realização do cálculo das velocidades em que estavam os veículos no momento antes de um acidente de trânsito é de fundamental importância a análise dos vestígios de frenagem deixados pelos mesmos no pavimento. Desse modo, o comportamento do veículo, mostrado na Fig. 15, durante a frenagem será analisado, de forma a realizar o cálculo da velocidade inicial do veículo como função das marcas de frenagem e do coeficiente de atrito da pista de rolamento.

Figura 15 - Modelo esquemático de um veículo em frenagem.



Fonte: Adaptado de Nicolazzi *et al* (2008, p. 93).

A Fig. 15, mostra as reações nos eixos dianteiro (R_I) e no eixo traseiro (R_{II}). Mostra também as forças de frenagem, dianteira (F_{fI}) e traseira (F_{fII}). A velocidade que o veículo desenvolvia antes de frear pode ser obtida pela seguinte equação, adaptada de Negrini e Kleinübing (2012, p. 280).

$$v = \sqrt{v_{ic}^2 + 2gs(\mu - \text{sen}\beta)} \text{ [m/s]}$$

(3)

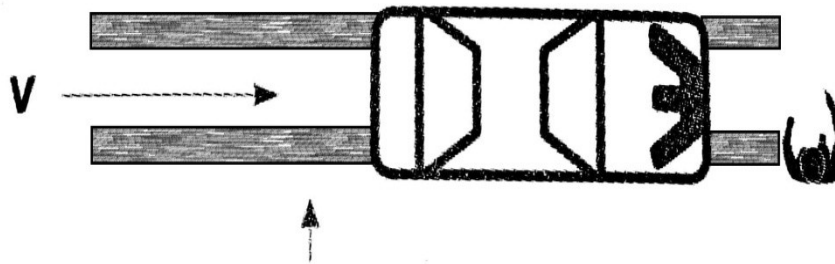
em que v é a velocidade inicial do veículo, v_{ic} é velocidade de impacto, μ é o coeficiente de atrito entre o pneu e a pista, g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), s é a distância de frenagem (Comprimento das marcas de frenagem) e β é a inclinação da pista.

Como toda modelagem matemática de um fenômeno físico, esta também possui incertezas e simplificações. Adota-se desaceleração constante bem como perdas por calor e outras desprezíveis.

2.5.2 Velocidades em atropelamentos

O evento de tráfego conhecido por atropelamento (Fig. 16) é caracterizado pelo choque de um veículo contra uma ou mais pessoas ou animais, levando a lesões graves e até mesmo a morte. É um acontecimento de difícil análise, devido à falta de vestígios e muitas vezes modificação da cena do ocorrido, seja por populares ou por ação de agentes de emergências médicas (ARAGÃO, 2016, p. 387).

Figura 16 - Desenho esquemático de iminência de atropelamento.



Fonte: Adaptado de Aragão (2016, p. 407).

De acordo com Negrini e Kleinübing (2012, p. 124), o atropelamento ocorre basicamente nas fases mostradas, como segue:

- i. Impacto: instante no qual o pedestre é submetido às forças de superfície do veículo;
- ii. Movimento inicial: o corpo do pedestre sofre giro sobre o capô do veículo;

- iii. Movimento intermediário: Fase de lançamento do corpo até a superfície da pista (chão).
- iv. Movimento Final: processo de movimento do corpo no chão, com ou sem deslizamento do mesmo sobre a superfície de contato.

Faz-se a análise do atropelamento pelo caso simples, onde o motorista aciona os freios deixando marcas de frenagem sendo avistado o pedestre. O pedestre continua sua trajetória partindo do meio fio até o sítio de colisão. A frenagem é constante, consolidando o impacto contra a vítima até a imobilização dos corpos. Esta análise é explicada por Aragão (2016 p. 411).

Calcula-se a velocidade do veículo na iminência do evento de colisão (v), partindo do pressuposto que o mesmo percorreu todo o trecho até o atropelamento e posterior a ele realizando frenagem em uma pista cuja inclinação é nula. E considerando a imobilização no final do evento, temos:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot s \cdot \mu} \text{ [m/s]} \quad (4)$$

em que g é a aceleração da gravidade, s é a distância total de frenagem e μ é coeficiente de atrito do pneu-pavimento no local.

3 DISPOSITIVOS PARA A AFERIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Assim como o Capítulo 2, este Capítulo 3 apresenta-se como uma pesquisa bibliográfica. Bem como um estudo comparativo utilizando um estudo de caso. Segundo Gil (2009, p. 44), a pesquisa bibliográfica “...é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos.”. Assim, foi realizada uma busca em artigos, livros, teses, normas e demais portfólios técnicos dos dispositivos existentes para a aferição do atrito entre pneu e pavimento.

Quantificar e avaliar as condições do atrito pneu-pavimento nas vias em geral, e principalmente em pontos de ocorrência de acidentes de trânsito é de suma importância na realização de estatísticas, que visam elucidar possíveis causas de acidentes, bem como buscar medidas para evitá-los. A otimização das características de aderência de determinado local, aumenta a segurança, seja este propício à ocorrências de trânsito ou não, aumenta a segurança, pois permite um maior controle dos veículos que ali trafegam (PEREIRA, 2010, p. 28).

O valor de atrito do pneu-pavimento de determinada via está intimamente relacionado com o grau de resistência à derrapagem da mesma. Sabendo disso, é necessário, segundo Pereira (1998, p. 23) que sejam aferidas medidas de atrito uniformes, precisas e confiáveis para que assim seja possível compará-las com valores mínimos de segurança.

Mesmo com dispositivos e métodos confiáveis, as medidas geradas por todos eles estão sujeitas à incertezas em menor ou maior grau, causadas pela variabilidade e inconstância natural da obtenção dos dados. Não obstante, cada revestimento asfáltico, devido à sua fabricação, localização geográfica, modo de uso, carregamentos, condições climáticas entre tantos outros fatores apresentam características intrínsecas influenciando diretamente em valores de atrito medidos (PEREIRA, 1998, p. 24).

A seguir, serão apresentados os principais equipamentos disponíveis para a aferição do atrito em pistas, principalmente aqueles utilizados no “Experimento Internacional PIARC de Comparação e Harmonização das Medidas de Textura e Resistência ao Deslizamento” cujo relatório foi publicado em 1995. A *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) em seu guia para atrito em pavimentos asfálticos, cita que, para medidas de atrito somente, podem ser utilizados equipamentos portáteis, cuja metodologia de uso está submetida à normas, principalmente da ASTM e da *American Association of State Highway Transportation Officials* (AASHTO). Existem diversos tipos de equipamentos disponíveis no mercado, cuja operação pode se dar com deslizamento fixo ou variável, com velocidades de

até 161 km/h e com condições de pneu também variáveis como carga, pressão, tamanho, perfil de sulco entre outros (HALL *et al.*, 2009, p. 34).

Aps (2006, p. 40) classifica os equipamentos de medida de atrito em quatro classes: i) Estático; ii) Roda oblíqua; iii) Roda bloqueada; iv) Roda parcialmente bloqueada.

Os dispositivos serão apresentados a seguir.

3.1 EQUIPAMENTOS ESTÁTICO

Os equipamentos estáticos são aqueles cuja aplicação não possui movimento relativo dos mesmos como um todo com a superfície da pista. Há o movimento relativo com a pista somente de subsistemas. A seguir os equipamentos estático serão descritos.

3.1.1 Pêndulo Britânico

O mecanismo de obtenção do valor de atrito se dá pelo princípio da perda de energia cinética que é transformada em energia de trabalho da força de atrito (APS, 2006, p.40). Um pêndulo padronizado, cuja extremidade possui uma sapata de borracha, de material também normalizado é solto de uma altura determinada entrando em contato com a superfície molhada a ser analisada (ASTM, 1998). Este dispositivo é utilizado em medidas de atrito de baixa velocidade (FERREIRA, 2016, p. 51).

As diretrizes de utilização do equipamento baseiam-se na Norma ASTM E-303-93 (1998), cuja utilização pode ser realizada tanto em ambiente controlado quanto em análises externas. O valor de medida é mostrado em BPN (*British Number Pendulum*) ou SRT (*Skid Resistent Test*). A Fig. 17 mostra o dispositivo, utilizado em pesquisa de campo.

Figura 17 - Levantamento do atrito com Pêndulo Britânico.

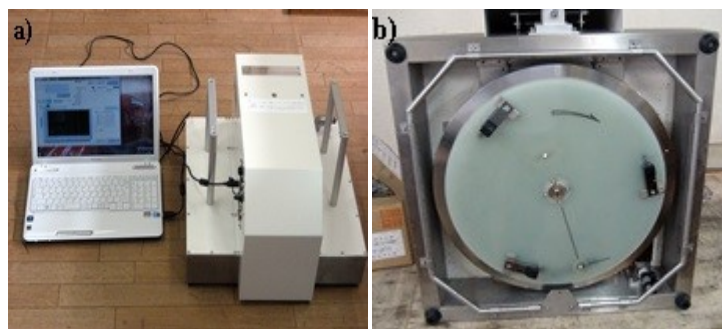


Fonte: Ramos (2012, p. 41).

3.1.2 Dynamic Friction Tester – DFT

Este dispositivo é portátil e seu uso é regulamentado sob a Norma ASTM E 1911, 2002 (APS, 2006, p. 41). De acordo com Hall et al. (2009, p.40) o atrito é medido indiretamente, por meio de obtenção eletrônica, do torque angular, da velocidade rotacional, e do carregamento vertical gerado pelo movimento de três sapatas de borracha carregadas sob a força de molas cuja trajetória é circular e de mesmo centro na superfície a ser avaliada. As velocidades lineares de teste vão de 5 a 89 km/h. O teste é realizado com uma taxa de suprimento de água de 3 l/min. A Fig. 18 mostra o dispositivo e sua vista inferior, para melhor entendimento do equipamento.

Figura 18 - *Dynamic Friction Tester (DFT)* - a) Equipamento montado; b) Vista inferior com as três sapatas de borracha.



Fonte: Nippo (2020).

3.2 EQUIPAMENTOS DE RODA OBLÍQUA

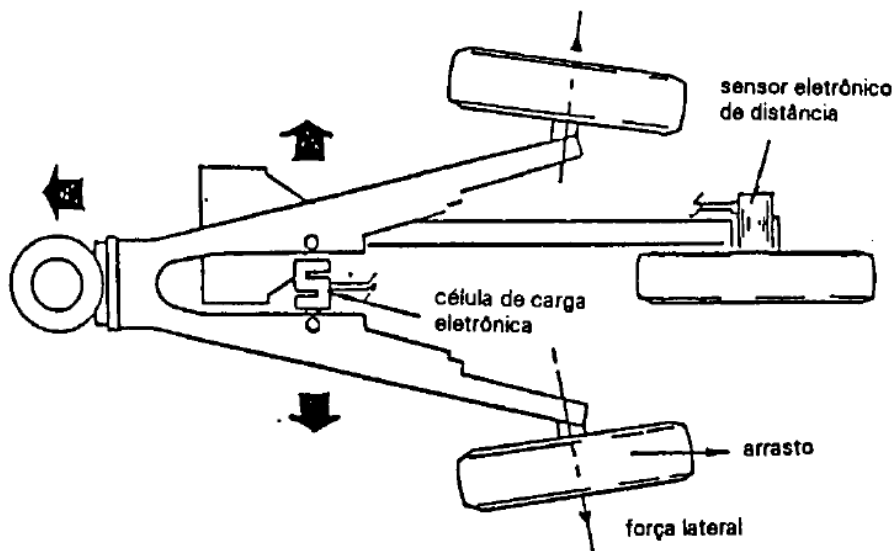
Os equipamentos de roda oblíqua funcionam com a trajetória de reboque possuindo um ângulo específico em relação à linha média da roda de medição. A seguir os equipamentos de roda oblíqua serão descritos.

3.2.1 Mu – meter

O *Mu-meter* é um dispositivo que funciona sendo rebocado, possui três rodas, sendo uma para medir deslocamentos e as restantes para aferir o atrito. A medida em que o dispositivo é rebocado, as forças laterais que surgem nas rodas devido à inclinação em relação a trajetória de reboque são transmitidas aos braços de ligação para serem medidas com uma célula de carga, funcionando eletronicamente. Os pneus montados nas rodas são de perfil liso e sua fabricação tem um rígido controle de qualidade (RODRIGUES FILHO, 2006, p. 138).

A Fig. 19 mostra esquematicamente o dispositivo.

Figura 19 - Planta esquemática do *Mu-meter*.



Fonte: Pereira (1998, p. 30).

De acordo com Aps (2006, p. 42) este tipo de equipamento é largamente utilizado em aeroportos no Brasil, porém pode ser utilizado também em estradas. As medições se dão tanto em condições de pista seca, quanto molhada. Quando é necessário testes com pista molhada, um mecanismo espargidor realiza uma película de água em torno de 1 mm de frente para as

rodas sensoras. A norma que submete os testes do equipamento é a Norma ASTM E670-94, 2000 (APS, 2006, p. 42). O rebocamento pode ser feito por praticamente qualquer veículo adaptado e com capacidade de reboque de aproximadamente 250 kg (RODRIGUES FILHO, 2006, p. 138). A Fig. 20 ilustra o uso do equipamento por meio de uma pick-up.

Figura 20 - *Mu-meter* montado no veículo rebocador pronto para o início do teste.



Fonte: Rodrigues Filho (2006, p. 139).

Os dados adquiridos do equipamento são transmitidos a um computador no interior do veículo. Uma calibração é realizada antes do teste por meio de uma placa padrão (PEREIRA, 1998, p. 27).

3.2.2 Stradograph

Este dispositivo (Fig. 21), é capaz de realizar medidas contínuas de atrito por meio de duas rodas, colocadas uma de cada lado no veículo equipado. As rodas tem capacidade de girar de 0 a 15° em relação ao eixo longitudinal do veículo e, também, permitem um deslizamento com uma taxa que varia de 0 a 15 %. As rodas de medição podem ser carregadas de 100 a 400 kgf e, usualmente, são operadas com velocidade de 20 a 60 km/h, porém podem chegar a até 150 km/h (CONCHINHO, 2011, p. 40).

Figura 21 - Vista geral do *Stradograph* em estrada.



Fonte: Nielsen (1994, p. 13).

O equipamento contém reservatórios de água para simulação de pista molhada. Possui também aparelho microprocessado capaz de colher dados de força, velocidade, momento, entre outros, das rodas oblíquas cujo tratamento fornece os dados de atrito de interesse (NIELSEN, 1994, p. 13).

3.2.3 Odoliograph

É um equipamento de roda oblíqua (Fig. 22), que não possui mecanismo espargidor de água acoplado, sendo necessário um caminhão-cisterna de apoio (APS, 2006, p. 44). Possui em seu equipamento um pneu suave padrão da *Permanent International Association for Road Congresses* (PIARC). É carregado verticalmente com uma carga de 2700 N cuja velocidade de operação gira em torno de 80 km/h. O caminhão de apoio objetiva uma criação de película d'água em torno de 0,5 mm (TYROSAFE, 2008, p. 56).

Figura 22 - *Odoliograph* seguindo caminhão-cisterna.



Fonte: TYROSAFE (2008, p. 56).

3.2.4 SCRIM

O SCRIM – Sideways Force Coefficient Routine Investigation Machine (Fig. 23) foi desenvolvido inicialmente pelo *Transportation Road Research Laboratory* (TRRL) e é comumente encontrado na França, Inglaterra e Estados Unidos (COUCHINHO, 2011, p. 42). De acordo com Kogbara et al. (2016, p. 605) este dispositivo trabalha com pneu de perfil liso com pressão de 350 kPa e carga vertical de 1960 N, velocidade de teste de 50 km/h e consegue medir também a macrotextura do pavimento.

Figura 23 - Montagem da roda a 20° e equipamentos SCRIM.



Fonte: W.D.M. (2017).

Ele é capaz de realizar uma película d'água em torno de 0,5 mm.

3.3 EQUIPAMENTOS DE RODA BLOQUEADA

Os equipamentos de roda bloqueada, do inglês *Locked wheel testers* como o próprio nome representa, introduzem aos testes um bloqueio de 100% das rodas medidas. A norma regulamentadora para o uso destes dispositivos é a Norma ASTM E274-97 (2002). Baseado em Henry (2000, p. 7), pode-se afirmar que a velocidade relativa entre a superfície de contato do pneu e a superfície da pista é igual a velocidade do automóvel. Para a mensuração do atrito, a roda é totalmente travada e é medida a força gerada depois de 1 segundo da aplicação do freio. O resultado da medição é expresso em SN (*Skid Number*) ou FN (*Friction Number*) (HENRY, 2000, p. 8). A seguir serão apresentadas ilustrações dos principais dispositivos de roda bloqueada, usados principalmente para medir o atrito em condições de frenagem de emergência, sem ABS. Geralmente, aplica-se uma película de água de 0,5 mm na superfície a ser medida (KUTTESCH, 2004, p. 11).

3.3.1 drag sled

O *Drag sled* (Fig. 24) é um equipamento de construção simples e custo baixo, feito basicamente de uma parte de um pneu automotivo preenchido com material denso (aumentar peso) combinado com um dinamômetro encaixado no mesmo. O indivíduo (operador) puxa o mesmo e verifica a força necessária para tal, a razão entre seu peso e essa força dá o coeficiente de atrito (NEGRINI; KLEINÜBING, 2012, p. 300).

Figura 24 - *Drag Sled* sendo usado.



Fonte: Kwasnoski (2012, p. 1).

O *Drag Sled* não faz parte dos dispositivos usados pela PIARC, porém seu uso é aceito em algumas situações. De acordo com Kwasnoski (2012, p. 2) o valor de arrasto medido pelo *Drag Sled* subestima as velocidades do veículo em quaisquer testes.

3.3.2 Locked wheel Skid Tester

É um dispositivo rebocado que conta com sistema de aspersão de água e possui travamento controlado das rodas. Conta com pneus de veículos de passeio compactos.

Figura 25 - *Locked wheel Skid Tester.*



Fonte: Kuttesch (2004, p. 11).

Para evitar o desgaste do pneu de teste em uma única região, este deve permanecer travado por somente alguns instantes.

3.3.3 Adhera

O *Adhera* (Fig. 26) utiliza pneus padrão da PIARC de perfil liso, ou pneus comerciais com medidas possíveis de 155/65R15 a 205/45R16 com carga vertical de 2500 N (BEAUTRU; CERZO; DO; KANE, 2012, p. 7).

Figura 26 – *Adhera.*



Fonte: Beautru, Cerezo, Do e Kane (2012, p.7).

3.4 EQUIPAMENTOS DE RODA PARCIALMENTE BLOQUEADA

Estes dispositivos foram concebidos de forma a gerar deslizamento variável da roda medidora, sendo um escorregamento baixo ou alto. Podem ter de 0 a 100 % de deslizamento ou possuírem uma taxa fixada, variando de acordo com o equipamento ou teste (COUCHINHO, 2011, p. 49). A norma regulamentadora para a execução de procedimentos com estes equipamentos é a Norma ASTM E1859-11. Os resultados são mostrados em

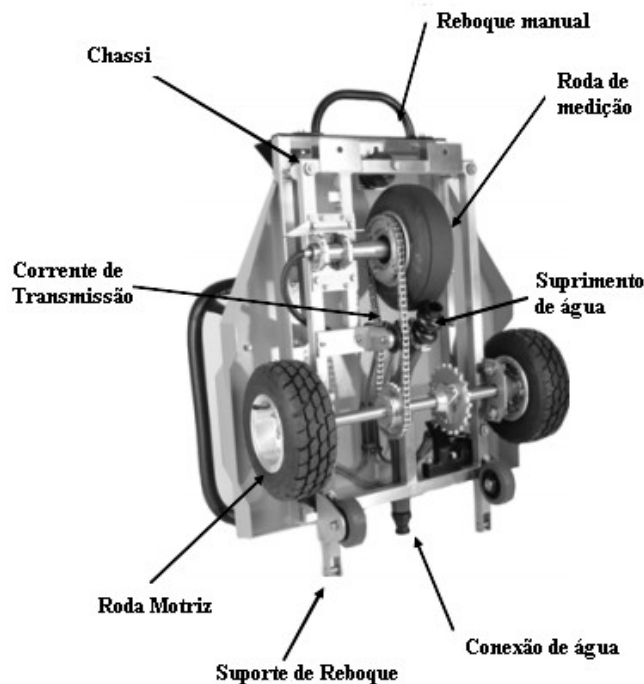
termos de *Slip Friction Number* (SFN), e são tomados em várias velocidades de deslizamento, gerando gráficos específicos de atrito (KUTTESCH, 2004, p. 10).

São capazes de realizar medidas contínuas de atrito, funcionando com deslizamento fixo ou variável (COUCHINHO, 2011, p. 43).

3.4.1 Griptester (Deslizamento Fixo)

O *Griptester* (Fig. 27) é composto por três rodas, sendo duas nas extremidades, direita e esquerda, e a terceira é a geradora de medidas. É capaz de gerar uma taxa de deslizamento de 15% e alcançar velocidades de até 100 km/h (BUCHARLES, 2014, p. 34).

Figura 27 - Vista Inferior do equipamento *Griptester*.



Fonte: Adaptado de TYROSAFE (2008, p. 32).

O *griptester* pode ser rebocado por um veículo adaptado (Fig.28) ou rebocado manualmente (Fig. 29), a depender do tipo de ensaio.

Figura 28 - *Griptester* movido por veículo genérico adaptado.



Fonte: Ferreira (2016, p. 107).

Para a realização de testes com pista molhada, o dispositivo conta com espargidor de água, permitindo uma película em torno de 0,5 mm na pista. A carga vertical aplicada está em torno de 250 N e os pneus são normalizados de acordo com a Norma ASTM E 1551 cujo diâmetro mede 254 mm (medida próxima a um pneu de *Kart*) e são inflados com 0,14 MPa (TYROSAFE, 2008, p. 33).

Figura 29 - Micro *Griptester* acionado manualmente.



Fonte: Findlay Irvine (2020).

A versão manual é de menor tamanho, e o acumulador de água é carregado junto ao operador.

3.4.2 Stuttgarter Reibungsmesser ou SRM (Deslizamento Fixo ou variável)

O Stuttgarter Reibungsmesser (RSM) (Fig. 30) foi projetado pela *Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart* (FKFS), baseia-se no princípio do atrito longitudinal, cuja medição se dá por meio de duas rodas montadas atrás de um caminhão propriamente adaptado, sendo carregadas verticalmente com 3500 N. A lamina d'água gerada pode variar de 0 a 3 mm, porém 0,5 mm é a mais comumente empregada. Os pneus empregados são normalizados pela PIARC e possuem sulcos longitudinais. Uma condição de teste aplicável neste equipamento é a de ABS (Anti-lock Brake System) que se torna útil em algumas situações. As velocidades de medição podem ser de 40, 60, 80 e até 100 km/h (TYROSAFE, 2008, p. 48).

Figura 30 - SRM com as rodas medidoras em solo.



Fonte: TYROSAFE (2008, p. 48).

A taxa de deslizamento é de 15 % (COUCHINHO, 2011, p. 50).

3.4.3 Skiddometers BV-11 e BV-8 (Deslizamento fixo)

O BV-11 é um dispositivo (Fig. 31), capaz de obter medidas de atrito de forma contínua, por meio do princípio do coeficiente de atrito longitudinal. O equipamento possui três rodas, sendo uma a medidora, funcionando como um deslizômetro (Skiddometer) cuja taxa de escorregamento é de 17 % (APS, 2006, p. 47).

Figura 31 - BV-11 em operação rebocado por pickup média.



Fonte: OPAL (2019).

A velocidade de medição gira em torno de 70 km/h, e se necessário é gerada uma película d'água de 0,5 a 1 mm de espessura nominal. A roda medidora é carregada verticalmente com 1000 N, e tem um pneu do tipo *trelleborg T49* inflado com 0,14 MPa (KOGBARA *et al.*, 2016, p. 605). A seguir, o BV-8 (Fig. 32) é apresentado.

Figura 32 - BV-8 em operação.



Fonte: TYROSAFE (2008, p. 44).

Utiliza-se do mesmo princípio de medição do *BV-11*, com deslizamento de 14% ou 100 %, filme de água nominal de 0,5 mm, carga vertical de 3500 N e utiliza um pneu padrão PIARC 165R15 com quatro sulcos longitudinais. As velocidades de teste são 40, 60 e 80 km/h (TYROSAFE, 2008, p. 45).

3.4.4 DWW Skid Resistance Trailer (Deslizamento fixo)

Com operações concentradas na Holanda este dispositivo (Fig.33) possui um único eixo solidário para as três rodas, duas de apoio e uma medidora, cujo pneu é um PIARC liso inflado com 0,2 MPa e carregado com 1962 N . Possui uma taxa de deslizamento de 86 %,

podendo gerar uma espessura de água nominal de 0,5 mm. As velocidades de teste são de 50 e 70 km/h (KOGBARA *et al.*, 2016, p. 605).

Figura 33 - DWW pronto para teste



Fonte: TYROSAFE (2008, p. 40)

3.4.5 Norsemeter OSCAR (Deslizamento variável)

Este dispositivo (Fig. 34) possui deslizamento variável, sendo possível o *setup* de várias taxas de deslizamento (HENRY, 2000, p. 9). É montado na parte traseira de um caminhão de pequeno porte, possuindo um pneu da Norma ASTM E-524 de perfil liso. A principal taxa de deslizamento empregada é de 18 %, podendo empregar também taxas que variam de 3 a 75 %. A roda responsável pela geração de dados de atrito longitudinal é carregada verticalmente com 4826 N e pode ser girada sob uma película d'água de 0,5 mm de profundidade nominal (TYROSAFE, 2008, p. 57).

Figura 34 - Norsemeter OSCAR em pista de teste.



Fonte: TYROSAFE (2008, p. 57).

3.5. SÍNTESE INTEGRADORA DOS DISPOSITIVOS DE AFERIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

O Quadro 1 a seguir sintetiza os dispositivos apresentados e mostra todos os dispositivos utilizados no experimento internacional de harmonização da PIARC de 1995.

Quadro 1 - Dispositivos de medição de atrito participantes no experimento da PIARC.

Nome	Pneu	Metodo de Medição	País
Stuttgarter Reibungsmesser (SRM)	Nervurado	Deslizamento Fixo (20 %) ou roda bloqueada	CH
Skiddometer BV-8	Nervurado	Deslizamento Fixo (20 %)	CH
Skiddometer BV-8	Estampado	Deslizamento Fixo (17 %)	S
Norsemeter Oscar	Liso	Deslizamento Variável	N
ASTM E274 trailer	Liso	Roda Bloqueada	US
SRT Pendulum tester	Liso	Estático (Deslizante)	CH
MuMeter	Estampado	Roda Oblíqua	E
SCRIM	Liso	Roda Oblíqua	B
Skid Resistance Tester	Estampado	Roda Bloqueada	PL
Komatsu Skid Tester	Liso	Deslizamento Variável	J
DWW Trailer	Liso	Deslizamento Fixo (86 %)	NL
Stradograph	Liso	Roda Oblíqua	DK
Odoliograph	Liso	Roda Oblíqua	B
SUMMS	Liso	Roda Oblíqua	I
SCRIMTEX	Liso	Roda Oblíqua	UK
Adhera	Liso	Roda Bloqueada	F
Dagmar/Petra Trailer	Estampado	Deslizamento Variável	D
Griptester	Liso	Deslizamento Fixo (14,5 %)	UK

Fonte: Adaptado de Wallman e Aström (2001, p. 18).

4 METODOLOGIA

A comparação dos dispositivos será realizada de forma quantitativa, por meio da utilização dos valores de atrito gerados como será explicado na seção 4.1 e inserindo-os no cálculo de velocidade inicial de rodagem em acidente caracterizado pela colisão de veículo comercial com pedestre em pavimento asfáltico molhado. As condições do pavimento em que os valores de atrito foram calculados serão fixadas, de forma a comparar somente os dispositivos e não as condições em que foram submetidos os testes.

Ao fim será definido o intervalo de confiança para a mesma velocidade.

4.1 BANCO DE DADOS DE COEFICIENTE DE ATRITO

Objetivando harmonizar as medidas de textura e atrito foi realizado em 1992 o *Experimento internacional de Comparação e Harmonização das Medidas de Textura e Atrito* pelo Comitê técnico de características superficiais (C.1) da *Permanent International Association for Road Congresses* (PIARC). Os valores de resistência ao deslizamento de um determinado pavimento sob a influência da macro e microtextura podem ser concatenados em um único parâmetro o índice denominado *IFI* (International Friction Index), que contém um valor de atrito medido (*FR*) e um de textura (T_x) (APS, 2006, p. 69).

O experimento testou 47 equipamentos de 16 países, cujas medidas de atrito e textura totalizaram 67, sendo 33 de textura e 34 de atrito. As velocidades empregadas nos ensaios foram de 30, 60 e 90 km/h. Para cada uma, duas medidas foram tomadas. Foi constatado que para relacionar os dados de atrito advindos de equipamentos com princípios de obtenção de dados diferentes, como os de roda bloqueada, roda oblíqua ou roda parcialmente bloqueada era expressamente recomendado inserir os efeitos da textura da camada superficial da pista de rolamento (WAMBOLD *et al.*, 1995, p. 31).

Correlações lineares entre os equipamentos de medição de atrito foram obtidas, tanto para equipamentos com o mesmo princípio de medição quanto para equipamentos com princípios de medição distintos. A Tabela 3 mostra um resumo dos coeficientes de correlação das regressões lineares entre os pares de equipamentos (WAMBOLD *et al.*, 1995, p. 73).

Tabela 4 - Coeficientes de correlação das regressões lineares dos equipamentos de medição de atrito.

TIPO	Roda oblíqua	Deslizamento fixo	Roda bloqueada
Roda oblíqua	0,863	0,819	0,795
Deslizamento fixo	0,819	0,834	0,703
Roda bloqueada	0,795	0,783	0,843
Pêndulo	0,665	0,732	0,670

Fonte: Adaptado de Walbold *et al.* (1995, p. 120).

O modelo PIARC, segundo Wambold *et al.* (1995, p. 130), é o modelo que proporciona excelentes resultados. Para gerar uma *referência* de atrito, uma espécie de valor real, foram tomadas as medidas de todos os equipamentos em várias velocidades de deslizamento gerando uma “curva de referência” cujos parâmetros são o $GF60$ e GS que pode ser estimada de acordo com a equação a seguir (APS, 2006, 75).

$$GF(S) = GF60 \left[\frac{60-S}{GS} \right] \quad (6)$$

Em que S é a velocidade de deslizamento em km/h, $GF60$ é o valor de atrito na curva de referência em $S = 60$ km/h e GS é o parâmetro da influência da velocidade em km/h.

O modelo PIARC usa a constante S_p para ajustar a medida de atrito à uma determinada velocidade de deslizamento S (FRS) para 60 km/h ($FR60$). Assim.

$$S_p = a + bT_x \quad (7)$$

Em que T_x é o valor de textura do pavimento (obtido por equipamentos e técnicas específicas), a e b são constantes próprias do equipamento utilizado.

O valor de atrito medido à uma determinada velocidade de deslizamento é convertido para 60 km/h ($FRS60$), como segue.

$$FR60 = FRS \exp \left[\frac{(S - 60)}{S_p} \right] \quad (8)$$

Em que FRS é a medida de atrito à uma determinada velocidade de deslizamento S . E S possui três especificações, são elas: i) S é a Velocidade do veículo (v) para roda bloqueada; ii) S é a porcentagem de deslizamento (e)/100 para equipamentos de deslizamento fixo; S é $V_{sen}(\alpha)$, para equipamentos de roda oblíqua, $\alpha =$ ângulo de deslizamento.

O valor estimado ($F60$) do valor de referência ($GF60$) é obtido de acordo com a expressão a seguir.

$$F60 = A + B FR60 \quad (9)$$

Em que A e B são constantes próprias dos equipamentos de medição. e $FR60$ é calculado a partir da Eq. (8).

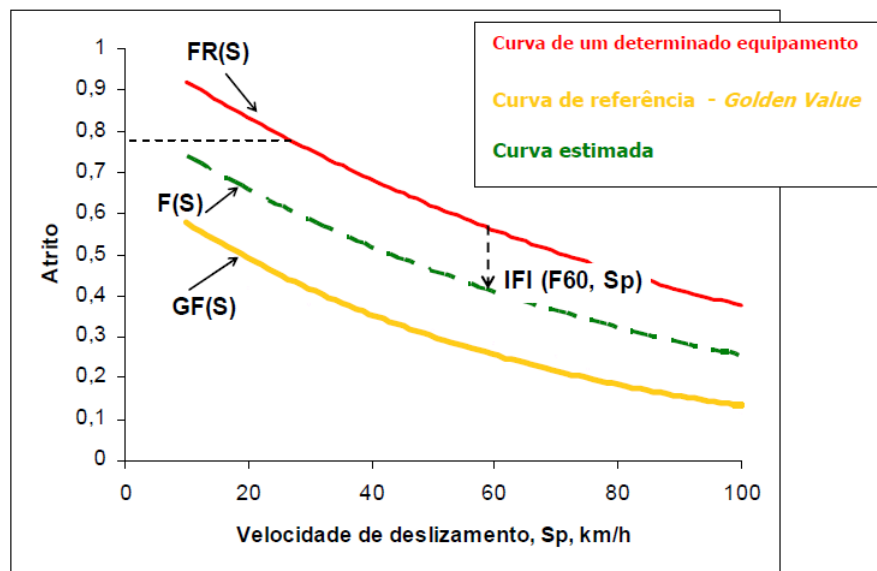
E quando o dispositivo usa pneus são nervurados ou estampados é utilizada a expressão a seguir.

$$F60 = A + B FR60 + C T_x \quad (10)$$

Em que C é a constante própria do dispositivo utilizado, T_x é o parâmetro de textura do pavimento de interesse. Os parâmetros A , B e C podem ser obtidos a partir da Tabela 4.

Por meio dessa formulação obtém-se o IFI ($F60, S_p$) como uma escala universal de atrito bem definida. De acordo com Aps (2006, p. 77) os valores podem ser convenientes em estudos de acidentes, recomendações de manutenção em pavimentos, análises aeroportuárias, entre outras. A Fig. 35 mostra as curvas principais de valores de atrito em função da velocidade de deslizamento.

Figura 35- Curvas de atrito.



Fonte: Aps (2006, p. 78).

Os equipamentos e códigos que os representam são mostrados no Quadro a seguir.

Quadro 2 – Identificação dos equipamentos por siglas.

Equipamento	Código PIARC	Tipo de Pneu	Método	Taxa de Deslizamento (%)
ASTM E-274 TRAILLER	B6.524	Liso	Roda Bloqueada	100
ADHERA-LCPC	D6	Liso	Roda Bloqueada	100
NORSEMETER OSCAR	B4SLP-86	Liso	Roda Parcialmente Bloqueada	20
NORSEMETER OSCAR	B4SLP-20	Liso	Roda Parcialmente Bloqueada	0-90
KOMATSU SKID TESTER	C4	Liso	Roda Parcialmente Bloqueada	10-30
DWW TRAILER	C5	Liso	Roda Parcialmente Bloqueada	86
GRIPTESTER	D8	Liso	Roda Parcialmente Bloqueada	14,5
STRADOGRAPH	C8	Liso	Roda Oblíqua	21 (12°)
WALOON ODOLIOGRAPH	C9	Liso	Roda Oblíqua	26 (15°)
CRR ODOLIOGRAPH	C10	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
FLEMISH SCRIM	C3B	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
CEDEX SCRIM	C3E	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
MOPT SCRIM	C6E	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
SCRIM	D1E	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
SCRIM-GEOCISA	D2	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
SCRIM	D3	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
SUMMS	D4	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
SCRIMTEX	D5	Liso	Roda Oblíqua	34 (20°)
STUTT. REIBUNGSMESSER	B1LKD	Nervurado	Roda Bloqueada	100
SKIDDOMETER BV-8	B2LKD	Nervurado	Roda Bloqueada	100
STUTT. REIBUNGSMESSER	B5LKD	Nervurado	Roda Bloqueada	100
ASTM E-274 TRAILLER	B6-501	Nervurado	Roda Bloqueada	100
SKID RESISTANCE TESTER	C1	Nervurado	Roda Bloqueada	100
STUTT. REIBUNGSMESSER	B1SLP	Nervurado	Roda Parcialmente Bloqueada	20
SKIDDOMETER BV-8	B2SLP	Nervurado	Roda Parcialmente Bloqueada	20
SKIDDOMETER BV-11	B3	Nervurado	Roda Parcialmente Bloqueada	20
STUTT. REIBUNGSMESSER	B5SLP	Nervurado	Roda Parcialmente Bloqueada	20
DF TESTER	A13.60	N/A	Estático	100
DF TESTER	A13.20	N/A	Estático	100
BRITISH PENDULUM	A14-BPT	N/A	Estático	100
BRITISH PENDULUM	B7-SRT	N/A	Estático	100

Fonte: Adaptado e traduzido de Wambold *et al.* (1995, p. 18)

Tabela 5 - Valores das constantes para regressão de $GF60$ usando o modelo $PIARC F60 = A + B FRS \exp[(S-60)/S_p]$, onde S_p foi determinado usando MPD (Método Profundidade Média de Perfil para avaliação da textura do pavimento).

Equipamento	A	B	C
B6.524	0,04461	0,92549	0
D6	0,00226	1,00762	0
B4SLP-86	-0,03033	0,86411	0
B4SLP-20	0,11917	0,64319	0
C4	0,04195	0,84865	0
C5	0,01883	0,8678	0
D8	0,08209	0,9104	0
C8	0,05436	0,7702	0
C9	0,1134	0,7291	0
C10	0,1135	0,74581	0
C3B	0,04912	0,96738	0
C3E	0,0188	0,8127	0
C6E	0,0319	0,8734	0
D1E	0,0165	0,8495	0
D2	0,02102	0,9276	0
D3	-0,00594	0,86211	0
D4	0,00195	0,9867	0
D5	0,03258	0,8717	0
B1LKD	0,02204	0,50025	0,082158
B2LKD	0,02634	0,5042	0,099195
B5LKD	-0,07215	0,76744	0,085505
B6-501	-0,02283	0,60682	0,097589
C1	-0,02534	0,80685	0,067724
B1SLP	0,14107	0,32256	0,07388
B2SLP	0,02968	0,91848	-0,01362
B3	0,03964	0,85618	-0,01589
B5SLP	0,01962	0,8673	-0,00588
A13.60	-0,03365	0,77098	0
A13.20	0,08114	0,73158	0
A14-BPT	0,05626	0,00756	0
B7-SRT	0,0436	0,00953	0

Fonte: Adaptado de Wambold *et al.* (1995, p. 20).

4.2 ANÁLISE DE DADOS

Como a documentação do experimento internacional não possui todos os valores diretos para o atrito medido de todos os equipamentos, para efeito de comparação serão fixados valores de $IFI (F60, S_p)$ da região do acidente de trânsito. Em seguida, por meio das equações de harmonização extraídas de Wambold *et al.* (1995, p. 25) serão obtidos valores de

FRS (valor medido à uma determinada velocidade) e estes substituídos nas equações de velocidade de acidentes de trânsito. Assim:

$$B FRS EXP\left[\frac{S - 60}{S_p}\right] = F60 - A \quad (11)$$

Resolvendo para *FRS* tem-se:

$$FRS = \frac{F60 - A}{B EXP\left[\frac{S - 60}{S_p}\right]} \quad (12)$$

Reescrevendo *FRS* , que é o valor de atrito medido no experimento como o coeficiente de atrito no local (μ) tem-se:

$$\mu = \frac{F60 - A}{B EXP\left[\frac{S - 60}{S_p}\right]} \quad (13)$$

Os valores calculados e medidos de determinada grandeza, neste caso, do coeficiente de atrito pneu-pavimento, da distância de frenagem e da aceleração da gravidade são diferentes dos valores reais devido a inúmeros fatores, sejam eles controláveis ou não. Uma forma de quantificar o quão distante os valores experimentais medidos e ou calculados estão do valor verdadeiro, é utilizar a teoria da propagação de erros (VUOLO, 2005, p.113). Essa teoria permite estabelecer uma relação entre as incertezas conhecidas e concatená-las em uma função matemática específica que leva em consideração a contribuição adequada de cada erro associado a cada variável (incerteza). Segundo Vuolo (2005, p. 113) o objetivo da teoria de erros consiste em determinar o melhor valor possível para determinada grandeza a partir das medições e determinar quanto o melhor valor obtido pode ser diferente do valor verdadeiro. Ainda segundo o mesmo autor a propagação de incertezas para uma função genérica $\omega = \omega(x, y, z, \dots)$, e verificando a independência estatística de suas variáveis pode-se definir a expressão para incerteza padrão em ω como pode ser verificado na Eq. 14:

$$\delta^2 \omega = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \omega}{\partial x_i}\right)^2 \delta^2 x_i \quad (14)$$

Pode-se qualificar δ como sendo a incerteza e $\delta\omega$ como a incerteza propagada da função $\omega = \omega(x_1, x_2, x_3, \dots)$. Já $\delta x_i/x_i$ são os erros relativos das variáveis. A derivada parcial da função ω em respeito as variáveis x_1, x_2, x_3, \dots são $\frac{\partial\omega}{\partial x_1}, \frac{\partial\omega}{\partial x_2}, \frac{\partial\omega}{\partial x_3}, \dots$, respectivamente.

Com a teoria da propagação de erros explicitada, o cálculo das velocidades em acidentes de trânsito envolvendo veículo comercial e pedestre será propagado para vários valores de atrito (aderência) e gerará resultados cuja magnitude apresentará uma faixa de incerteza (erro).

5 VELOCIDADE EM COLISÃO DE VEÍCULO COMERCIAL COM PEDESTRE

De acordo com a Tabela 1 e considerando uma textura considerada aceitável e com um valor de atrito também em concordância com os termos de segurança da Tabela 2, avaliar-se-ão o comportamento dos dispositivos em uma pista de $IFI (F60, S_p) = IFI (0,5, 124,76)$.

5.1. COEFICIENTES DE ATRITO CALCULADOS COM O BANCO DE DADOS

Os valores de FRS são os valores que seriam medidos na pista sem a harmonização, visando demonstrar a aplicação dos valores de atrito gerados no local. Reescrevendo FRS como μ e para a pista caracterizada acima e aplicando a Eq. 13 e implementando-a em planilha eletrônica (Apêndice A) foi gerada a Tabela 5 com os valores de atrito de cada equipamento.

Tabela 6 - Valores de atrito medidos para uma pista de $IFI (0,5, 124,76)$ com deslizamento próprio de cada equipamento.

Equipamento	S (%)	μ
B6.524	100	0,36
D6	100	0,36
B4SLP-86	20	0,85
B4SLP-20	90	0,47
C4	30	0,69
C5	86	0,45
D8	14,5	0,66
C8	21	0,79
C9	26	0,70
C10	34	0,64
C3B	34	0,57
C3E	34	0,73
C6E	34	0,66
D1E	34	0,70
D2	34	0,64
D3	34	0,72
D4	34	0,62
D5	34	0,66
B1LKD	100	0,69
B2LKD	100	0,68
B5LKD	100	0,54
B6-501	100	0,63
C1	100	0,47
B1SLP	20	0,79
B2SLP	20	0,71

Tabela 5 - Valores de atrito medidos para uma pista de *IFI* (0,5, 124,76) com deslizamento próprio de cada equipamento.

Continuação.

B3	20	0,74
B5SLP	20	0,76
A13.60	100	0,50
A13.20	100	0,42
A14-BPT	100	0,43
B7-SRT	100	0,35

Fonte: O Autor (2021).

O valor esperado (nesta situação, a média aritmética simples) para o coeficiente de atrito é de $\mu = 0,61$ com um erro padrão (ou incerteza) de $\delta\mu = 0,1406$.

O erro relativo (E_r , também conhecido por coeficiente de variação) para determinada grandeza pode ser calculado, de acordo com a equação a seguir.

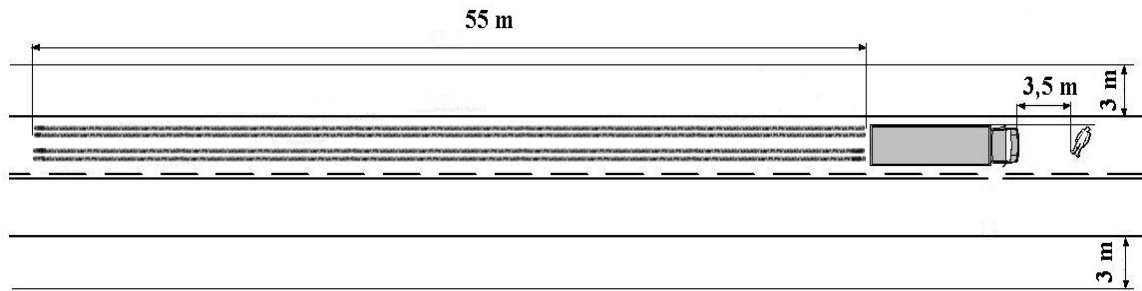
$$E_r = \frac{\delta X}{X} \quad (15)$$

Em que δX é o erro (incerteza) da grandeza e X é o valor esperado da grandeza.

5.2. LOCAL DO ACIDENTE DE TRÂNSITO

O presente estudo fará a análise das velocidades em um caso de acidente caracterizado pela colisão de caminhão contra pedestre em pista molhada e com vestígios de frenagem em uma pista com velocidade máxima permitida de 80 km/h, cujo croqui está na Fig. 36.

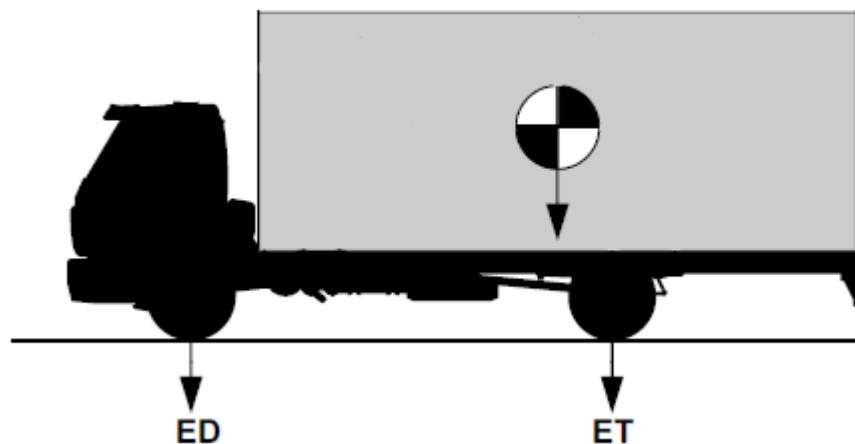
Figura 36 - Croqui do acidente de trânsito hipotético para o estudo de caso.



Fonte: O Autor (2021).

O veículo comercial envolvido neste caso é um Caminhão Volkswagen Worker 13.190 (Figura 37), considerando o mesmo com a carga máxima permitida pelo CTB.

Figura 37 - Caminhão VW Worker 13.190.



Fonte: Adaptado de Volkswagen Caminhões e Ônibus (2016, p. 337).

O veículo comercial ilustrado acima possui tração traseira e dois eixos, o eixo dianteiro (ED) e o eixo traseiro (ET). O ED possui dois conjuntos de roda e pneu enquanto que o ET possui quatro conjuntos de roda e pneu. O veículo possui um Peso Bruto Total (PBT) de 16.000 kg, valor de massa muito superior ao de uma pessoa de porte médio (pedestre).

5.3. INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A VELOCIDADE

Considerando que o caminhão freou ao avistar o pedestre calcula-se a velocidade do veículo na iminência do evento de colisão (v), ou seja, a velocidade que o veículo trafegava antes da colisão. Partindo do pressuposto que o mesmo percorreu todo o trecho até o atropelamento e posterior a ele realizando frenagem.

Para a equação da velocidade em atropelamento na eminência de colisão:

$$v = \sqrt{2 g s \mu} \quad (4)$$

Definindo v como uma função de três variáveis:

$$v = f(g, s, \mu) \quad (16)$$

E na forma geral para a propagação de incertezas (ou erros) para variáveis independentes:

$$\delta^2 v = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial v}{\partial x_i} \right)^2 \delta^2 x_i \quad (14)$$

Expandindo o somatório para as três variáveis da função velocidade:

$$\delta^2 v = \left(\frac{\partial v}{\partial g} \delta g \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial s} \delta s \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \mu} \delta \mu \right)^2 \quad (17)$$

Cálculo das derivadas parciais, com o auxílio da regra da cadeia, obtemos:

$$\frac{\partial v}{\partial g} = \frac{\partial v}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial g} = \frac{1}{2\sqrt{2 g s \mu}} 2s \mu = \frac{s \mu}{\sqrt{2 g s \mu}} \quad (18)$$

Logo,

$$\frac{\partial v}{\partial g} = \frac{s \mu}{\sqrt{2 g s \mu}} = \frac{v}{2g} \quad (19)$$

E

$$\frac{\partial v}{\partial s} = \frac{\partial v}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial s} = \frac{1}{2\sqrt{2 g s \mu}} 2g \mu = \frac{g \mu}{\sqrt{2 g s \mu}} \quad (20)$$

Logo,

$$\frac{\partial v}{\partial s} = \frac{g \mu}{\sqrt{2 g s \mu}} = \frac{v}{2s} \quad (21)$$

E

$$\frac{\partial v}{\partial \mu} = \frac{\partial v}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \mu} = \frac{1}{2\sqrt{2 g s \mu}} 2g s = \frac{g s}{\sqrt{2 g s \mu}} \quad (22)$$

Logo,

$$\frac{\partial v}{\partial \mu} = \frac{g s}{\sqrt{2 g s \mu}} = \frac{v}{2\mu} \quad (23)$$

Substituindo os resultados obtidos com as derivadas parciais na propagação de incertezas (ou erros) para variáveis independentes para a velocidade na eminência da colisão, obtemos:

$$\delta^2 v = \left(\frac{v}{2g} \delta g \right)^2 + \left(\frac{v}{2s} \delta s \right)^2 + \left(\frac{v}{2\mu} \delta \mu \right)^2 \quad (24)$$

Ou

$$\delta^2 v = \frac{v^2}{4} \left[\left(\frac{\delta g}{g} \right)^2 + \left(\frac{\delta s}{s} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 \right]$$

(25)

Ou ainda:

$$\delta v = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{\delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\delta s}{s}\right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right)^2}$$

(26)

O intervalo de confiança para 95 % (Aproximadamente), o que representa dois desvios padrão, na curva de distribuição de probabilidade, é dado por:

$$v = v \pm 2 \delta v = \sqrt{2 g s \mu} \pm 2 \frac{\sqrt{2 g s \mu}}{2} \sqrt{\left(\frac{\delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\delta s}{s}\right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right)^2}$$

(27)

E por fim,

$$v \pm 2 \delta v = \sqrt{2 g s \mu} \left[1 \pm \sqrt{\left(\frac{\delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\delta s}{s}\right)^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right)^2} \right]$$

(28)

A Tabela 6 mostra os valores esperados para as variáveis e seus respectivos erros (incertezas). O erro para a variável s (distância de frenagem) foi fixado em 5 % devido as imprecisões de medição no local do acidente de trânsito. A aceleração da gravidade não é constante em todo o globo, portanto foi atribuído a ela um erro de 2,5 %. O erro relativo para o coeficiente de atrito foi calculado por meio da Eq. 15 e utilizando o desvio padrão para a amostra dos coeficientes de atrito calculados da Tabela 6 e tem magnitude de 0,14.

Tabela 7 – Valores numéricos das variáveis e erros.

Variável	Valor esperado (X)	Erro (δX)	Erro relativo (E_r)
s	55 m	2,75 m	0,05 (5 %)
g	9,81 m/s ²	0,24 m/s ²	0,025 (2,5 %)
μ	0,61	0,14	0,23 (23 %)

Fonte: O Autor (2021).

Utilizando os dados da Tabela 6 e aplicando na Eq. 28 o intervalo de confiança para a velocidade é obtido.

$$v \pm 2 \delta v = \sqrt{2(9,81)(55)(0,61)} \left[1 \pm \sqrt{(0,025)^2 + (0,05)^2 + (0,23)^2} \right]$$

Resolvendo a equação numericamente obtém-se:

$$v \pm 2 \delta v = 92,49 \pm 21,26 \text{ km/h}$$

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção, serão apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

6.1. CONCLUSÕES

Foi elaborada uma fundamentação teórica a partir dos conceitos teóricos da influência do coeficiente de atrito, aderência, hidroplanagem e fatores que modificam o atrito entre pneu-pavimento na dinâmica de acidentes de trânsito, com base na aplicação das metodologias de pesquisa documental e bibliográfica.

Foi possível determinar a funcionalidade e características gerais de 31 dispositivos de medição de atrito por meio de pesquisa documental e bibliográfica, bem como determinar o valor de atrito para cada um deles utilizando um $IFI (F60, S_p) = IFI (0,5, 124,76)$ com deslizamento característico de cada equipamento. O erro relativo para o coeficiente de atrito foi de 14,06 % e seu valor esperado com valor de 0,61.

Aplicou-se a teoria de propagação de incertezas para a velocidade em atropelamentos obtendo assim a formulação necessária para o cálculo da faixa de incerteza para a mesma.

Por fim o desenvolvimento deste trabalho possibilitou encontrar a faixa de incerteza para a velocidade em caso de acidente de trânsito caracterizado pela colisão de veículo comercial contra pedestre em pista molhada com IFI fixado em valor constante. A velocidade no estudo de caso está entre 71,23 km/h e 113,75 km/h, desse modo não é possível afirmar, de acordo com a modelagem realizada e com 95 % de confiança que o veículo trafegava abaixo da velocidade máxima permitida, impossibilitando gerar prova em laudo técnico que possibilite alguma acusação legal para o motorista.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, foi estabelecida a faixa de incerteza para a velocidade em colisão de veículo comercial contra pedestre. Para estudos posteriores recomenda-se determinar as faixas de incertezas para outros tipos de acidentes de trânsito bem como em outros tipos de pavimento e ou em outras condições.

Convém realizar uma pesquisa sobre a influência dos dados de velocidade em julgamentos de crimes de trânsito.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Lino. Leite. **Manual de perícias em acidentes de trânsito**. Campinas: Millennium, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM E1337 (1999)** : Determinining Longitudinal Peak Braking Coefficient of Paved Surfaces Using a Standard Reference Tire. West Conshohocken: ASTM Standards, 1999, vol. 04.03.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM E1960-07 (2015)**: Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface. West Conshohocken. ASTM Standads, 2015, vol. 04.03, 5p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E G40-02 (2001)**: Standard Terminology Relating to Wear Erosion. West Conshohocken. ASTM Standards, vol.03.02, 8p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1859-11 (2011)**: Standard Test Method for Friction Coefficient Measurements Between Tire and Pavement Using a Variable Slip Technique. West Conshohocken. ASTM Standads, 2011, vol. 04.03, 8p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1911-98 (2002)**: Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester. West Conshohocken: ASTM Standards, 2002, 8p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E303-93 (1998)**: Standard Method for Measuring Frictional Properties Using The British Pendulum Tester. West Conshohocken: ASTM Standards, 1998, vol. 04.03, 5p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E670-94 (2000)**: Standard Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-meter. West Conshohocken: ASTM Standards, 2000, vol. 04.03, 11 p.
- AMERICAN SOCIETYFOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E274-97 (2002)**: Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire. West Conshohocken: ASTM Standards, 1997, 5p.
- APS, Marcia. **Classificação da Aderência PneuPavimentopelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos**. 2006. 179 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ARAGÃO, Ranvier Feitosa. **Acidentes de trânsito: análise da prova pericial**. 6.ed. Campinas, SP: Millennium, 2016.

_____, Ranvier Feitosa. **Acidentes de trânsito: aspectos técnicos e jurídicos**. 3.ed. Campinas, SP: Millennium, 2003.

AUSTROADS, 1994. **Road Safety Audit**. Sydney.

BEAUTRU, Yannick; CERESO, Véronique; DO, Minh Tan; KANE, Malal. **Influence of thin water film on skid resistance**. In: Symposium On Pavement Surface Characteristics, 7., 2012, Lyon. **Anais [...]**. Lyon: Hal, 2013. p. 1-15.

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Bosch**. 25. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2005. 317 p.

BRASIL, Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Código de Trânsito Brasileiro (CTB)**. Lei Nº 9.503 de 23 de Setembro de 1997. Brasília: 1997.

BRASIL. Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. (Publicação IPR, 720).

BUCHARLES, Luciano Gardano Elias. **Critérios Para Avaliação Pericial Da Macro E Microtextura De Pavimento Asfáltico Em Local De Acidente De Trânsito**. 2014 Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2014

COUCHINHO, Rui Pedro dos Santos. **Medição Do Coeficiente De Atrito Da Superfície De Pavimentos: estudo do equipamento griptester**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011.

DAMATTA, Roberto; VASCONCELLOS, João Gualberto M.; PANDOLFI, Ricardo. **Fé em Deus e pé na tábuas: ou como e por que o trânsito enlouquece no Brasil**. Rio de Janeiro: Rocco, 2010.

DPRF. Departamento de Polícia Rodoviária Federal. **Dados de Acidentes de trânsito de 2020**. Disponível em:

<<https://arquivos.prp.gov.br/arquivos/index.php/s/jdDLrQIf33xXSCe/download>>. Acesso em: 15 abr. 2021.

FEHRL. 2009. **Forum of European National Highway Research Laboratories**. Disponível em: <http://www.fehrl.org/facilities/detail/217>. Acesso em: 09 abr. 2020.

FERREIRA, Jaqueline Carvalho. **Estudo E Avaliação Da Influência Da Macrotextura E Microtextura Na Aderência Pneu-Pavimento**. 2016. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

FINDLAY IRVINE (Reino Unido). **Micro GripTester for highways**. 2020. Disponível em: <http://www.findlayirvine.com/capabilities/skid/micro-griptester-roads.php>. Acesso em: 20 abr. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GILLESPIE, T.D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. USA: SAE – Inc. 1992.

Hall, J.W., K.L. Smith, L. Titus-Glover, L.D. Evans, J.C. Wambold, T.J. Yager, et al., **Guide for Pavement Friction** Contractor's Final Report for National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Project 01-43, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009. Disponível em: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w108.pdf (Acesso em Março de 2020).

HENRY, John J.. **Evaluation of Pavement Friction Characteristics: a synthesis of highway practice**. Washington, D.c: National Cooperative Highway Research Program, 2000. 80 p. (NCHRP Synthesis 291).

Kogbara, R.B.; Masad, E.A.; Kassem, E.; Scarpas, A.; Anupam, K. **A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements**. *Constr. Build. Mater.* 2016, *114*, 602–617.

KUTTESCH, Jeffrey S.. **Quantifying the Relationship between Skid Resistance and Wet Weather Accidents for Virginia Data**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Virginia Polytechnic Institute And State University, Blacksburg, 2004.

KWASNOSKI, John B.. **Crash Reconstruction: The Drag Factor**. : The Drag Factor. Driven: to successfully prosecute DUI cases in Mississippi. Palo Alto, p. 1-8. fev.

2012. Disponível em: http://www.msstorm.org/news/pdfs/driven_newsletter91.pdf. Acesso em: 26 maio 2020.

LUTY, Witold. **The [Mu]-Pw Friction Tester As A New Device To Assess The Value Of Friction Coefficient Between Vehicle Wheels And The Road Surface At The Traffic Accident Scene**. In: Transbaltica. Proceedings of the International Scientific Conference. Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2013. p. 111.

NEGRINI NETO, Oswaldo; KLEINÜBING, Rodrigo. **Dinâmica dos acidentes de trânsito**. 4.ed. Campinas, SP: Millennium, 2012.

NICOLAZZI, Lauro Cesar *et al.* **Uma Introdução à modelagem quaseestática de veículos automotores de rodas**: publicação interna do grante departamento de engenharia mecânica da ufsc. Florianópolis: Ufsc, 2008. 314 p.

NIELSEN, Carsten Bredahl. **Road Paviment Maintenance Monitoring, Management and Techniques**: state of the art report. Dinamarca: Sprint, 1994. 59 p.

NIPPO Sangyo Co.,Ltd. 2020. Disponível em: <http://www.nippou.com/en/products/dft.html>. Acesso em: 08 abr. 2020.

OPAL. **Runway Calibration**. 2019. Disponível em: http://opal-m.com/wp-content/uploads/2017/07/Friction_Measuring.jpg. Acesso em: 21 abr. 2020.

PEREIRA, C.A. (2010) **Análise Da Aderência Pneu-Pavimento Em Rodovias Do Estado Do Pernambuco E Da Paraíba Com Elevado Índice De Acidentes**. Tese De Doutorado. Ctg/Ufpe, Recife, Pe.

PEREIRA, MTTQ. (1998). **Avaliação da resistência à derrapagem de pavimentos asfálticos urbanos**. Tese De Doutorado. Tese De M. Sc., Coppe/Ufrj, Rio De Janeiro–Rj.

PONCINO, H. 2001. **Adherencia Neumático-Pavimento. Conceptos Generales. Estado del Conocimiento**. Boletín de la Comisión Permanente del Asfalto N°94, Buenos Aires, Argentina, 2001.

RAMOS, Kleberson de Oliveira. **Estudo sobre mistura asfáltica tipo stone matrix asphalt (sma) para pavimento aeroportuário**. 2012. 197p. Dissertação (mestrado) –Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro , 2012.

REIMPELL, JörnSEN *et al.* **The Automotive Chassis: engineering principles**. 2. ed. Woburn: Elsevier, 2001. 456 p.

RODRIGUES FILHO, Oswaldo Sansone. **Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários: estudo de caso do aeroporto internacional de são paulo / congonhas**. 2006. 290 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

THE TELEGRAPH. **Everything you should know before hiring a car for a ski holiday**. 2018. Disponível em: <https://www.telegraph.co.uk/travel/ski/articles/booking-ski-car-hire/>. Acesso em: 25 jan. 2018.

TYROSAFE (2008) – d04 - **Report on state-of-the-art of test methods: tyre and road surface optimisation for skid resistance and further effects**, Theme 7: Transport, TYROSAFE, Vienna, Austria

VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS. **Diretrizes de Implementação: delivery / worker / constellation**. São Paulo: Departamento de Marketing do Produto, 2016. 500 p.

VUOLO, J. H. **Fundamento da teoria dos erros**. 2. ed. [s.l.]: Blucher, 2005

W.D.M.. **SCRIM**. 2017. Disponível em: <https://www.wdm.co.uk/equipment/scrim-scrimtex>. acesso em: 11 abr. 2020.

WALLMAN, Carl; ASTRÖM, Henrik. **Friction Measurement Methods and the Correlation between Road Friction and Traffic Safety: A literature Review**, VTI, LinkÖping, 2001.

WAMBOLD, J. C., and HENRY, J. J., **Nasa Wallops Tire/Runway Friction Workshops 1993-2002, Tp 14190e**, Transportation Development Centre (Tdc) Of Transport Canada (Tc), Set. 2002.

WAMBOLD, J.C; ANTLE, C. E.; HENRY, J. J.; RADO, Z. **International Piarc Experience To Compare And Harmonize Texture And Skid Resistance Measurements**. Paris: Piarc, 1995. 423 P. (Publication, 0.04.T).

APÊNDICE A – PLANILHA ELETRÔNICA PARA O CÁLCULO DOS VALORES DE ATRITO E DO INTERVALO DE CONFIANÇA PARA A VELOCIDADE.

a	-11,6		Equipamento	A	B	C	S	μ (S)
b	114		B6,524	0,04461	0,93	0	100	0,36
Tx	1,2		D6	0,00226	1	0	100	0,36
Sp	125		B4SLP-86	-0,03033	0,86	0	20	0,85
F60	0,5		B4SLP-20	0,11917	0,64	0	90	0,47
g	9,81	m/s ²	C4	0,04195	0,85	0	30	0,69
s	55	m	C5	0,01883	0,87	0	86	0,45
μ S=equip	0,61		D8	0,08209	0,91	0	14,5	0,66
v S = equip	92,5	km/h	C8	0,05436	0,77	0	21	0,79
δv S= equip	21,9	km/h	C9	0,1134	0,73	0	26	0,70
δg/g	0,03		C10	0,1135	0,75	0	34	0,64
δs/s	0,05		C3B	0,04912	0,97	0	34	0,57
δμ/μ	0,23		C3E	0,0188	0,81	0	34	0,73
δμ (S=equi	0,14		C6E	0,0319	0,87	0	34	0,66
			D1E	0,0165	0,85	0	34	0,70
			D2	0,02102	0,93	0	34	0,64
			D3	-0,00594	0,86	0	34	0,72
			D4	0,00195	0,99	0	34	0,62
			D5	0,03258	0,87	0	34	0,66
			B1LKD	0,02204	0,5	0,082158	100	0,69
			B2LKD	0,02634	0,5	0,099195	100	0,68
			B5LKD	-0,07215	0,77	0,085505	100	0,54
			B6-501	-0,02283	0,61	0,097589	100	0,63
			C1	-0,02534	0,81	0,067724	100	0,47
			B1SLP	0,14107	0,62	0,07388	20	0,79
			B2SLP	0,02968	0,92	-0,01362	20	0,71
			B3	0,03964	0,86	-0,01589	20	0,74
			B5SLP	0,01962	0,87	-0,00588	20	0,76
			A13,60	-0,03365	0,77	0	100	0,50
			A13,20	0,08114	0,73	0	100	0,42
			A14-BPT	0,05626	0,76	0	100	0,43
			B7-SRT	0,0436	0,95	0	100	0,35
						μ média	0,61	
							0,14058	
						erro	0,2298	
			Número de equipamentos		31			