



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS

Estudo do equipamento GripTester

RUI PEDRO DOS SANTOS COUCHINHO
Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes

Orientadores:

Licenciada Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Prof. Adjunta (ISEL)
Doutor José Manuel Coelho das Neves, Prof. Auxiliar (IST)

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos, Prof. Coordenador (ISEL)
Vogais:

Doutora Ana Cristina Freire, Investigadora Auxiliar (LNEC)
Mestre Vânia Margarida da Silva Marecos, Bol. de Investigação (LNEC)

Dezembro de 2011

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação foi realizada no âmbito do protocolo de cooperação entre o Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e o Instituto Superior Técnico, e por isso o meu agradecimento às duas instituições pelo apoio institucional prestado.

Ao Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves, Professor Auxiliar do Instituto Superior Técnico, meu orientador científico, pela sugestão do tema para a dissertação, pelo interesse persistente que sempre demonstrou na materialização da presente dissertação e pelo tempo que disponibilizou ao longo do desenvolvimento da mesma.

À Eng^a. Luísa Ferreira Cardoso Teles Fortes, Professora Adjunta do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, minha orientadora principal, pela análise crítica e construtiva da presente dissertação, e ainda pelas informações disponibilizadas.

Ao Instituto Superior Técnico pela disponibilização dos meios que tornaram possível a realização da presente dissertação, nomeadamente pela disponibilização dos equipamentos do Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes. Ao Rui Garcia, técnico desta mesma instituição, pela experiência, disponibilidade, acompanhamento e partilha de informação relevante relativa ao ensaio de base da presente dissertação.

Ao Laboratório de Solos e Pavimentos da Força Aérea pela colaboração e disponibilização dos meios que tornaram possível a realização da presente dissertação, especialmente a disponibilização do local de ensaio e de um conjunto de informação necessária ao desenvolvimento da mesma, especialmente ao Capitão António Antunes, à Tenente Mariana Monteiro e ao 2^o Cabo Bruno Almeida.

À RELACRE pela promoção e colaboração no desenvolvimento do ensaio de base à presente dissertação, especialmente na pessoa da Eng^a. Ana Duarte e da Eng^a. Raquel Candeias.

À TECNILAB Portugal, SA, na pessoa do Eng. Rodrigo Palma, pelo fornecimento de um conjunto de informação prestada de apoio ao desenvolvimento da presente dissertação.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela participação no ensaio de base à presente dissertação.

Aos meus pais, irmã e família, pelo apoio, valores e incentivos que me transmitiram ao longo destes anos, fazendo de mim a pessoa que sou hoje.

O meu agradecimento a todos os que permitiram e desempenharam um papel determinante na concretização da presente dissertação.

RESUMO

Ao nível da segurança de circulação rodoviária e aeroportuária, a aderência entre os pneumáticos e a superfície do pavimento apresenta-se como uma das características superficiais mais importantes dos pavimentos em situações de piso molhado. Mundialmente, tem-se dado relevante importância a este facto, levando a que nas últimas décadas e anos, se tenham estudado diversos índices e equipamentos de medição do coeficiente de atrito de um dado pavimento aquando da presença de água.

O objectivo da presente dissertação é o de aprofundar o conhecimento sobre a medição do coeficiente de atrito da superfície dos pavimentos de infraestruturas rodoviárias e aeroportuárias, com a particular incidência no estudo do equipamento GripTester.

O trabalho realizado consistiu principalmente na análise de valores do coeficiente de atrito da camada de desgaste medidos no pavimento de um aeródromo, por três equipamentos GripTester, através de um ensaio de comparação interlaboratorial que foi organizado especificamente no âmbito desta dissertação.

O trabalho desenvolvido permitiu concluir que foi importante desenvolver este estudo comparativo.

Com efeito, a análise dos resultados do ensaio de comparação interlaboratorial mostrou que há diferenças no desempenho dos equipamentos participantes, que interessa aprofundar em estudos comparativos futuros.

PALAVRAS-CHAVE:

Pavimentos

Coeficiente de atrito

GripTester

Incerteza

Repetibilidade

Reprodutibilidade

ABSTRACT

At the level of safety of road traffic and airport, the adhesion between the tires and the deck surface presents as one of superficial characteristics most important of the pavements in situations of wet floor. Worldwide, it has given importance to this fact, leading to that in the last decades and years, have studied various indices and equipment for the measurement of the coefficient of friction of a given deck when the presence of water.

The objective of this thesis is to deepen the knowledge on the measurement of the coefficient of friction of the surface of the pavements of road infrastructure and airport, with a particular focus on the study of the equipment GripTester.

The work consisted mainly in the analysis of values of the coefficient of friction of the wear layer measured on the deck of an aerodrome, by three equipment GripTester, by means of a test for intercomparison that was organized specifically within the context of this thesis.

The work has led to the conclusion that it was important to develop this comparative study.

In fact, the analysis of the results of the test for intercomparison has showed that there are differences in the performance of the equipment participants, which is further in comparative studies future.

KEY WORDS:

Pavements

Coefficient of Friction

GripTester

Uncertainty

Repeatability

Reproducibility

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1 – 6
1.1. APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS	3
1.3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	3
1.4. ESTRUTURA	3
2. CARACTERÍSTICAS DA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS	7 – 32
2.1. GENERALIDADES	7
2.2. TEXTURA	9
2.3. ADERÊNCIA	13
2.4. ATRITO	17
2.5. REGULARIDADE	20
2.6. RUÍDO	23
2.7. CARACTERÍSTICAS REFLECTORAS	28
2.8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
3. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	33 – 54
3.1. GENERALIDADES	33
3.2. EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS	33
3.2.1. PÊNDULO BRITÂNICO	33
3.2.2. DYNAMIC FRICTION TESTER	35
3.3. EQUIPAMENTOS DE RODAS BLOQUEADAS	36
3.3.1. ADHERA	37
3.3.2. MADER	38
3.4. EQUIPAMENTOS DE RODAS OBLÍQUAS	39
3.4.1. MU-METER	39
3.4.2. STRADOGRAPH	40
3.4.3. ODOLIOPHAPH	41
3.4.4. SCRIM	42

3.5. EQUIPAMENTOS DE RODAS PARCIALMENTE BLOQUEADAS	43
3.5.1. DE DESLIZAMENTO FIXO	43
3.5.1.1. BV-11 SKIDDOMETER	43
3.5.1.2. GRIPTESTER	44
3.5.1.3. SURFACE FRICTION TESTER	47
3.5.2. DE DESLIZAMENTO VARIÁVEL	49
3.5.2.1. OSCAR	49
3.5.2.2. STUTTGARTER REIBUNGSMESSER	50
3.5.2.3. ROADSTAR	51
3.5.2.4. TATRA RUNWAY TESTER	52
3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
4. ENSAIO DE COMPARAÇÃO DE MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO COM O EQUIPAMENTO GRIPTESTER	55 – 70
4.1. GENERALIDADES	55
4.2. LOCAL DE ENSAIO	55
4.3. ENTIDADES PARTICIPANTES	56
4.4. ORGANIZAÇÃO E ESPECIFICAÇÕES	58
4.5. CONDIÇÕES DE REALIZAÇÃO E RESULTADOS	60
4.6. INSPECÇÃO VISUAL E ENSAIOS PONTUAIS	65
4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	71 – 86
5.1. GENERALIDADES	71
5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
5.3. ANÁLISE DAS GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA	73
5.3.1. VELOCIDADE	73
5.3.2. CAUDAL	75
5.4. ANÁLISE DA REPETIBILIDADE, REPRODUTIBILIDADE E INCERTEZA.....	76
5.4.1. REPETIBILIDADE	80
5.4.2. REPRODUTIBILIDADE	81
5.4.3. INCERTEZA	82

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
6. CONCLUSÃO	87 – 90
6.1. SÍNTESE DO TRABALHO	87
6.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	87
6.3. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91 – 96
ANEXOS	97
I. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPARAÇÃO	A.1 – A.73
1. LABORATÓRIO 1	A.1
2. LABORATÓRIO 2	A.25
3. LABORATÓRIO 3	A.50
II. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	A.74 – A.76
1. VELOCIDADE 30 KM/H	A.74
2. VELOCIDADE 50 KM/H	A.75
3. VELOCIDADE 65 KM/H	A.76

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS TEXTURAS DE SUPERFÍCIE DE UM PAVIMENTO EM FUNÇÃO DO SEU COMPRIMENTO DE ONDA E AMPLITUDE [ADAPTADO DE BRANCO, PEREIRA AND SANTOS, 2008]	9
FIGURA 2.2 – MICRO, MACRO E MEGATEXTURA NA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS [ADAPTADO DE BERNUCCI ET AL., 2010]	10
FIGURA 2.3 – ZONAS DE INTERACÇÃO PNEU/PAVIMENTO COM PISO MOLHADO [ADAPTADO DE PINTO, 2003]	14
FIGURA 2.4 – INFLUÊNCIA DA MICROTEXTURA NA ADERÊNCIA COM PISO MOLHADO [ADAPTADO DE VIEIRA, 2009]	15
FIGURA 2.5 – EVOLUÇÃO DO ATRITO NUM CURTO INTERVALO DE TEMPO [ADAPTADO DE BRANCO, PEREIRA AND SANTOS, 2008]	18
FIGURA 2.6 – EVOLUÇÃO DO ATRITO SOB ACÇÃO DO TRÁFEGO TOTAL ACUMULADO (TTA) [ADAPTADO DE BRANCO, PEREIRA AND SANTOS, 2008]	19
FIGURA 2.7 – MECANISMOS MECÂNICOS DO RUÍDO PNEU/PAVIMENTO [ADAPTADO DE SANTOS, 2007] ..	24
FIGURA 2.8 – MECANISMOS AERODINÂMICOS DO RUÍDO PNEU/PAVIMENTO [ADAPTADO DE SANTOS, 2007]	25
FIGURA 2.9 – MÉTODO ESTÁTICO DE PASSAGEM (SPB) [SANTOS, 2007; TYROSAFE, 2009]	27
FIGURA 2.10 – MÉTODO DE ESTRITA PROXIMIDADE (CPX) [SANTOS, 2007]	28
FIGURA 3.1 – a) PÊNDELO BRITÂNICO; b) EXEMPLO DO ENSAIO DO PÊNDELO BRITÂNICO [EASA, 2010]	34
FIGURA 3.2 – PORMENOR DA LEITURA DO VALOR DA MEDIÇÃO	34
FIGURA 3.3 – DYNAMIC FRICTION TESTER [RODRIGUEZ, 2009]	35
FIGURA 3.4 – PRINCÍPIO DE OPERACIONALIDADE DO DFT [ADAPTADO DE NIPPO, 2011]	36
FIGURA 3.5 – ADHERA [GDDKIA, 2009]	37
FIGURA 3.6 – MADER [DOMINGUES, 1997]	38
FIGURA 3.7 – MU-METER [EASA, 2010]	39
FIGURA 3.8 – a) STRADOGRAPH; b) PORMENOR DA RODA OBLÍQUA [SANTOS, 2004]	41
FIGURA 3.9 – ODOLIOGRAPH [TYROSAFE, 2008]	41
FIGURA 3.10 – SCRIM [VECTRA, 2011]	42
FIGURA 3.11 – ORGANIZAÇÃO DO SCRIM [ADAPTADO DE ALVES, 2007]	42
FIGURA 3.12 – BV-11 SKIDDOMETER [GDDKIA, 2009]	44

FIGURA 3.13 – GRIPTESTER [HARVERSON, 2003]	45
FIGURA 3.14 – MICRO GRIPTESTER [FINDLAY IRVINE, 2011]	45
FIGURA 3.15 – VERIFICAÇÃO PRÉVIA DO GRIPTESTER [ROMÃO, 2010]	46
FIGURA 3.16 – SURFACE FRICTION TESTER [AIRPORT SURFACE FRICTION TESTER, 2011]	48
FIGURA 3.17 – ORGANIZAÇÃO DO SFT [AIRPORT SURFACE FRICTION TESTER, 2011]	48
FIGURA 3.18 – OSCAR [TYROSAFE, 2008]	50
FIGURA 3.19 – Stuttgarter Reibungsmesser [TYROSAFE, 2008]	50
FIGURA 3.20 – a) ROADSTAR; b) RODA DE TESTE [TYROSAFE, 2008]	52
FIGURA 3.21 – TATRA RUNWAY TESTER [TYROSAFE, 2008]	52
FIGURA 4.1 – BASE AÉREA DE ALVERCA [ADAPTADO DE GOOGLE EARTH, 2011]	56
FIGURA 4.2 – GRIPTESTER DO LSP	57
FIGURA 4.3 – GRIPTESTER DO IST	57
FIGURA 4.4 – GRIPTESTER DO LNEC	58
FIGURA 4.5 – ALINHAMENTO LONGITUDINAL DE ENSAIO DE 1000M [ADAPTADO DE GOOGLE EARTH, 2011]	59
FIGURA 4.6 – VISTA GERAL DO LOCAL E DO PAVIMENTO	60
FIGURA 4.7 – a) ENSAIO EM CURSO NUM DOS SENTIDOS; b) MANOBRA DE INVERSÃO DA CORRIDA DE SD PARA SI	61
FIGURA 4.8 – GRIP NUMBER DA CORRIDA 1 À VELOCIDADE DE 30 KM/H, NO SENTIDO DIRECTO, LABORATÓRIO 1	62
FIGURA 4.9 – VELOCIDADE DA CORRIDA 1 À VELOCIDADE DE 30 KM/H, NO SENTIDO DIRECTO, LABORATÓRIO 1	63
FIGURA 4.10 – CAUDAL DA CORRIDA 1 À VELOCIDADE DE 30 KM/H, NO SENTIDO DIRECTO, LABORATÓRIO 1	63
FIGURA 4.11 – GRIP NUMBER À VELOCIDADE DE 30 KM/H, NO SENTIDO DIRECTO, LABORATÓRIO	64
FIGURA 4.12 – GRIP NUMBER À VELOCIDADE DE 30 KM/H, NO SENTIDO INVERSO, LABORATÓRIO	64
FIGURA 4.13 – DIFERENÇAS DA TEXTURA NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO	67
FIGURA 4.14 – REALIZAÇÃO DO ENSAIO DO PÊNDULO BRITÂNICO	68
FIGURA 5.1 – ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO SENTIDO NO GRIP NUMBER, POR VELOCIDADE	73
FIGURA 5.2 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE NO GRIP NUMBER	74
FIGURA 5.3 – INFLUÊNCIA DO CAUDAL NO GRIP NUMBER À VELOCIDADE DE 30 KM/H	75
FIGURA 5.4 – INFLUÊNCIA DO CAUDAL NO GRIP NUMBER À VELOCIDADE DE 50 KM/H	75
FIGURA 5.5 – INFLUÊNCIA DO CAUDAL NO GRIP NUMBER À VELOCIDADE DE 65 KM/H	76

FIGURA 5.6 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA REPETIBILIDADE (%)	81
FIGURA 5.7 – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE (%)	82

ÍNDICE DE QUADROS

QUADRO 2.1 – INFLUÊNCIA DAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS SUPERFICIAIS DOS PAVIMENTOS [ADAPTADO DE PINTO, 2003]	7
QUADRO 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DA TEXTURA SUPERFICIAL DOS PAVIMENTOS [ADAPTADO DE VIEIRA, 2009]	15
QUADRO 3.1 – RESUMO DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	53
QUADRO 4.1 – OBSERVAÇÕES DOS MODELOS DE GRIPTESTER [TECNILAB, 2011]	58
QUADRO 4.2 – SEQUÊNCIA HORÁRIA DA EXECUÇÃO DO ECI	61
QUADRO 4.3 – TEMPERATURAS MÍNIMA E MÁXIMA, REGISTRADAS NA EXECUÇÃO DO ECI [LSP, 2011] ...	62
QUADRO 4.4 – ENSAIO DA TÉCNICA VOLUMÉTRICA DA MANCHA NA ZONA 1 AO KM 0+600	66
QUADRO 4.5 – ENSAIO DA TÉCNICA VOLUMÉTRICA DA MANCHA NA ZONA 1 AO KM 0+650	66
QUADRO 4.6 – ENSAIO DA PÊNDELO BRITÂNICO NA ZONA 1 AO KM 0+600	67
QUADRO 4.7 – ENSAIO DA PÊNDELO BRITÂNICO NA ZONA 2 AO KM 0+650	68
QUADRO 5.1 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO GRIP NUMBER, EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE E DO SENTIDO	72
QUADRO 5.2 – VALORES DE PRECISÃO PARA AS VELOCIDADES DE ENSAIO (V30, V50, V65)	80
QUADRO 5.3 – INCERTEZA EXPANDIDA	84

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS – ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM
ASFT – AIRPORT SURFACE FRICTION TESTER
ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
BPN – BRITISH PENDULUM NUMBER
BRRL – BRITISH ROAD RESEARCH LABORATORY
BS – BRITISH STANDARD
CAL – COEFICIENTE DE ATRITO LONGITUDINAL
CAT – COEFICIENTE DE ATRITO TRANSVERSAL
CPX – CLOSE-PROXIMITY
 CV_r – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA REPETIBILIDADE
 CV_R – COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA REPRODUTIBILIDADE
DFT – DYNAMIC FRICTION TESTER
FAP – FORÇA AÉREA PORTUGUESA
FW – FRICTION WHEELS
GN – GRIP NUMBER
ECI – ENSAIO DE COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL
ECI's – ENSAIOS DE COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL
EP – ESTRADAS DE PORTUGAL, SA
EN – EUROPEAN STANDARD
ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION
IFI – INTERNATIONAL FRICTION INDEX
IPAC – INSTITUTO PORTUGUÊS DE ACREDITAÇÃO
IRI – INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX
ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION
ISEL – INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
IST – INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
LNEC – LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
LSP – LABORATÓRIO DE SOLOS E PAVIMENTOS DA FORÇA AÉREA
MTD – MEAN TEXTURE DEPTH

PIARC/AIPCR – PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES /
ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL PERMANENTE DE CONGRESSOS RODOVIÁRIOS

PTV – PENDULUM TEST VALUE

SCRIM – SIDEWAYS FORCE COEFFICIENT ROUTINE INVESTIGATION MACHINE

SD – SENTIDO DIRECTO

SFT – SURFACE FRICTION TESTER

SI – SENTIDO INDIRECTO

SPB – STATISTICAL PASS-BY

SRT – SKID RESISTANT TEST

SRM – STUTTGARTER REIBUNGSMESSER

TRRL – TRANSPORTATION RESEARCH ROAD LABORATORY

TRT – TATRA RUNWAY TESTER

USNBS – UNITED STATES NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

Nota: Relativamente às Siglas e Simbologia optou-se pela sua descrição ao longo do texto.

1 Introdução

O presente capítulo visa fazer uma sucinta apresentação do tema da dissertação a desenvolver e identificar o enquadramento geral da mesma. De seguida, é feita a descrição dos objectivos propostos do desenvolvimento da dissertação, faz-se a exposição da metodologia de investigação inerente à elaboração da mesma e, por último, descreve-se a forma em que está estruturada.

1.1 Apresentação e Enquadramento

Os pavimentos rodoviários e aeroportuários têm como principal função a de constituírem uma superfície livre e desempenada, adequada à circulação dos veículos e aeronaves em condições apropriadas de segurança, conforto e economia. Para isso, a superfície dos pavimentos terá de possuir certas características, denominadas por características funcionais, tais como, a aderência, a regularidade geométrica e a capacidade de drenagem das águas superficiais.

Nos últimos anos, verificou-se um significativo aumento do tráfego um pouco por todo o mundo, tanto no sector rodoviário como no aeroportuário. Actualmente conduzir e pilotar acarreta maiores riscos, e para minimizar alguns desses riscos, as condições do pavimento em geral e a resistência à derrapagem em particular são da maior importância. O utilizador deverá respeitar as regras de circulação e os engenheiros responsáveis pela construção e conservação dos pavimentos terão de elaborar projectos com segurança e intervir sempre que seja necessário.

Nos pavimentos rodoviários e aeroportuários, as características funcionais são cada vez mais da maior importância. Contudo, os métodos correntes de dimensionamento, têm apenas em consideração a capacidade estrutural dos mesmos. Cabe ao projectista conceber pavimentos com camadas de desgaste contemplando adequadamente os aspectos funcionais.

Actualmente, melhorias recentes no desempenho dos materiais betuminosos e de novas tecnologias geraram importantes benefícios, como por exemplo, maior aderência,

diminuição do desgaste, aplicações mais rápidas e de menor custo, produzindo melhores resultados em comparação com as técnicas anteriormente existentes.

A aderência de um pavimento é fundamental para as acções de aceleração, desaceleração e mudança de direcção sobre a superfície do pavimento e resulta do atrito entre os pneus dos veículos e a superfície do pavimento. As características dos veículos e as acções do condutor determinam a grandeza da força de atrito requerida para completar com sucesso a manobra.

Um baixo nível de atrito do pavimento influencia o número de acidentes especialmente em condições meteorológicas desfavoráveis (precipitação e humidade), logo o número de vítimas mortais e de feridos graves pode aumentar, assim como a ocorrência de congestionamentos.

Ultimamente têm sido desenvolvidas importantes investigações em termos das características funcionais dos pavimentos rodoviários e aeroportuários. Porém, é fundamental maior investigação para garantir uma informação mais detalhada da relação entre os acidentes e as características funcionais do pavimento. O objectivo passa por monitorizações mais frequentes das condições do pavimento e dos acidentes.

No que diz respeito ao atrito, dada a complexidade inerente aos factores que influenciam esta grandeza (pneus, pavimento), considera-se importante estudar com mais profundidade os equipamentos de ensaio.

A presente dissertação aborda as características funcionais dos pavimentos rodoviários e aeroportuários, descreve os principais equipamentos de ensaio e aborda, em particular, a medição do coeficiente de atrito da superfície de pavimentos com o equipamento GripTester, em termos comparativos da repetibilidade, da reprodutibilidade e da incerteza associada ao ensaio e a sua utilização no contexto nacional.

A elaboração da presente dissertação contou com a colaboração da RELACRE – *Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal*, entidade reconhecida no meio técnico nacional para a realização de ensaios de comparação interlaboratorial, e com o LSP – *Laboratório de Solos e Pavimentos da Força Aérea* que disponibilizou o local para a realização do ensaio de comparação interlaboratorial (ECI) de medição do coeficiente de atrito com o equipamento GripTester.

1.2 Motivação e Objectivos

A presente dissertação tem os seguintes objectivos gerais:

- a) Desenvolver o estado da arte sobre as características da superfície dos pavimentos.
- b) Aprofundar o conhecimento sobre a utilização do equipamento GripTester na medição do coeficiente de atrito.

1.3 Metodologia de Investigação

A metodologia de investigação seguida para o desenvolvimento da presente dissertação, teve por referência a execução de um ECI organizado em colaboração com a RELACRE no qual foram realizados ensaios de medição do atrito em contínuo com o equipamento GripTester, com a participação de três laboratórios nacionais.

Com base em toda a informação obtida do ECI, procedeu-se ao tratamento e análise estatística dos resultados, em termos da média, do desvio padrão, das variâncias da repetibilidade e da reprodutibilidade, das variâncias intralaboratorial e interlaboratorial, dos coeficientes de variação de repetibilidade e de reprodutibilidade, do limite de repetibilidade e por último do limite de reprodutibilidade. Procurou-se, ainda, estimar a incerteza do ensaio nas condições de realização do ECI.

1.4 Estrutura

Neste primeiro capítulo faz-se uma apresentação do tema da presente dissertação, clarifica-se o enquadramento geral da mesma, indicam-se os objectivos propostos da sua realização, refere-se a metodologia de investigação adoptada e por último, e para uma melhor compreensão e posterior análise do tema abordado, indica-se a estrutura geral da dissertação.

O segundo capítulo descreve as principais características da superfície dos pavimentos rodoviários e aeroportuários, como por exemplo, a textura, da aderência, o atrito, da regularidade, o ruído e as características reflectoras. Neste capítulo, e para cada uma destas características, é feita uma breve exposição da sua definição de forma a

compreender-se a sua importância para o assegurar ou o aumento das condições de segurança de circulação sobre os pavimentos.

O terceiro capítulo apresenta alguns dos equipamentos mundialmente utilizados na medição do coeficiente de atrito. Esta apresentação é estruturada tendo em conta as especificidades tipo em que se diferenciam os diversos equipamentos, os quais possuem a mesma finalidade que é a medição do coeficiente de atrito. Assim, foi feita uma divisão em equipamentos portáteis, equipamentos de rodas bloqueadas, equipamentos de rodas oblíquas e equipamentos de rodas parcialmente bloqueadas, e dentro destes últimos, diferenciando quanto ao tipo de deslizamento, se fixo ou variável.

No quarto capítulo é feita a apresentação pormenorizada do ECI desenvolvido especificamente para a presente dissertação. Apresenta-se o local de ensaio, os motivos pela escolha desse local e refere-se o tipo de pavimento de ensaio. Indicam-se também as entidades e os respectivos modelos de equipamentos que participaram no ECI. É referida a organização e as especificações adoptadas, apontando os critérios estabelecidos para a realização do ECI. Em seguida, são referidas as condições em que decorreu o ECI, nomeadamente o dia da realização, a sequência de horas em que decorreu o mesmo, e referidas as condições climatéricas (temperaturas máximas e mínimas) que se verificaram no decorrer do ensaio. Neste capítulo são indicados os resultados parciais de cada ensaio, em função do Laboratório, da Velocidade, do Caudal e do Sentido, e os primeiros resultados comparativos entre laboratórios. No fim deste capítulo é feita uma breve consideração sobre os resultados obtidos no ECI.

No quinto capítulo, faz-se a análise e interpretação dos resultados obtidos. Refere-se como foram tratados estatisticamente os resultados obtidos e em seguida apresentam-se os valores médios do Grip Number obtidos por cada um dos Laboratórios, em função da Velocidade e do Sentido, para cada uma das corridas, apresentando-se ainda o respectivo desvio padrão associado. Neste capítulo faz-se a análise das grandezas de influência, Velocidade e Caudal, no valor do Grip Number (GN). Neste quinto capítulo é feita também a análise da repetibilidade e da reprodutibilidade associada à medição do coeficiente de atrito com recurso ao equipamento GripTester. São ainda referidas as fontes de incertezas e é quantificada a incerteza associada a este equipamento, nas condições de realização do ECI.

No sexto capítulo e último, é feita uma síntese geral do trabalho desenvolvido, são apresentadas algumas conclusões mais importantes, baseadas nomeadamente no

capítulo 5. Para finalizar, são feitas algumas propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros, tendo por referência a experiência obtida na realização do ECI e, também no tratamento dos resultados obtidos.

Em anexos são apresentados graficamente todos os resultados do ECI por Laboratório (L1, L2, L3), em termos do Grip Number, da Velocidade e do Caudal. Igualmente são apresentados os gráficos de comparação de resultados em função da Velocidade de ensaio (V30, V50, V65) e do Sentido (Sentido Directo (SD) ou Sentido Inverso (SI) associado a cada laboratório).

2 Características da Superfície dos Pavimentos

2.1 Generalidades

Desde há muito tempo que existe a preocupação de construir infraestruturas rodoviárias e aeroportuárias cómodas para a movimentação do tráfego, através de pavimentos aptos a resistir às acções das cargas transmitidas pelos veículos, ao longo de duradouros períodos de tempo.

Às exigências de comodidade, resistência à acção do tráfego e durabilidade, é fundamental adicionar a segurança de circulação que, com o associar do aumento da velocidade a factores como o comportamento dos condutores, características dos veículos, traçado da infraestrutura e sinalização, tornou de uma importância fundamental a correcta execução dos pavimentos.

Desta forma, os pavimentos rodoviários e aeroportuários terão de apresentar determinadas características funcionais e estruturais para que satisfaçam adequadamente a sua função. O desempenho funcional ou superficial relaciona-se com factores de segurança, conforto e economia, afectando particularmente o utilizador, enquanto que o desempenho estrutural interessa mais do ponto de vista das operações de conservação e reabilitação dos pavimentos.

No Quadro 2.1, são indicadas a influência das principais características superficiais dos pavimentos nas exigências dos mesmos.

Quadro 2.1 – Influência das principais características superficiais dos pavimentos [*adaptado de Pinto, 2003*]

		Exigências				
		Segurança	Comodidade	Ambiente	Economia	
Factores de Influência	Aderência		●	○	○	○
	Regularidade	Longitudinal	●	●	○	◐
		Transversal	●	◐	○	○
	Resistência ao Rolamento		○	○	○	◐
	Ruído de Contacto Pneu/Pavimento		○	◐	●	○
	Características Reflectoras		●	●	○	◐

A resistência à derrapagem em condições de piso molhado é sem dúvida a característica superficial mais importante em termos da segurança de circulação. O risco resultante da escassez de aderência entre os pneumáticos e um pavimento molhado é particularmente importante e deve evitar-se para desta forma se conseguir reduzir o número de acidentes.

Em termos das irregularidades do pavimento, estas recaem, especialmente, no conforto dos utilizadores. Em menor proporção, influenciam os custos de circulação e, em situações extremas, a própria segurança.

Em função da exigência de uma melhor qualidade de vida pelo constante desenvolvimento da sociedade, o ruído é uma das características dos pavimentos que cada vez mais se tem em conta, particularmente em meios urbanos. Um pavimento gerador de muito ruído torna-se mais incomodativo não só para os utilizadores da via, mas também para os habitantes da área envolvente. Apesar do ruído não ter uma influência directa ao nível da segurança de circulação, somente de forma indirecta este pode afectar os níveis de cansaço dos condutores.

Verifica-se outro tipo de condições que não derivam directamente dos pavimentos mas sim dos equipamentos existentes sobre estes, casos da sinalização horizontal (ex. pintura), dos elementos de regulação da velocidade (ex. bandas sonoras), e os quais influenciam as características de segurança.

Características superficiais, como as propriedades ópticas dos pavimentos – maior ou menor visibilidade nocturna – e a rápida drenagem das águas superficiais, ganham cada vez mais uma maior relevância, dada a sua influência não só na comodidade e segurança de circulação, mas igualmente na sua possível acção na economia da iluminação da via, caso esta esteja presente.

A rápida drenagem da água da chuva e uma boa impermeabilização superficial reflectem-se igualmente na integridade estrutural do pavimento, contribuindo e favorecendo em termos da sua preservação. Esta característica, mesmo não sendo directamente vivida pelo utilizador, desempenha um enorme benefício económico globalmente.

2.2 Textura

Até aos dias de hoje, o perfil geométrico da superfície de um pavimento tem sido vulgarmente distribuído em distintas escalas, em termos da segurança, conforto, ruído e propriedades ópticas. Num pavimento a textura é caracterizada pelas irregularidades superficiais, que vão desde as minúcias da microtextura, passando pelas singularidades da macrotextura até às maiores variações da megatextura.

A textura apresenta-se como fundamental para a comodidade e segurança dos utilizadores, tornando-se num parâmetro necessário para a conservação das vias, uma vez que influencia indirectamente a aderência entre o pneumático e o pavimento, e directamente a drenagem da água presente na interface destes.

Na Figura 2.1, apresentam-se as distintas texturas superficiais para classificar a textura superficial dos pavimentos em função do seu comprimento de onda e amplitude, tendo em conta o definido pela PIARC/AIPCR – *Permanent International Association of Road Congresses / Associação Internacional Permanente de Congressos Rodoviários*.

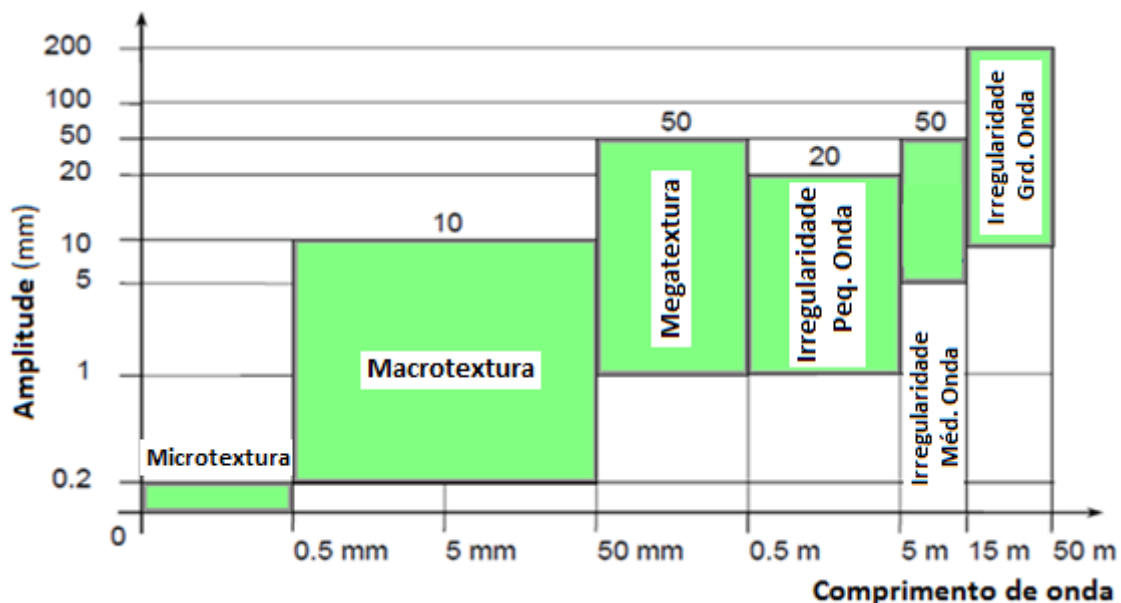


Figura 2.1 – Classificação das texturas de superfície de um pavimento em função do seu comprimento de onda e amplitude [adaptado de Branco, Pereira and Santos, 2008]

As acções entre o pavimento e os veículos estão dependentes quer das características mecânicas do veículo (suspensão e pneumáticos), como do movimento (velocidade e aceleração) e ainda do perfil da via (irregularidade e micro, macro e megatextura).

As consequências das irregularidades derivam da repetição das solicitações, que são função da velocidade do veículo e da gama de ondas que compõe o perfil do pavimento:

$$f = \frac{V}{\lambda}$$

(2.1)

Sendo:

f – Frequência (Hz);

V – Velocidade de deslocamento (m/s);

λ – Comprimento de onda (m).

Para rugosidades superficiais com comprimentos de onda menores que 0,5mm (partículas de forma, dimensão e distribuição idênticas) é fundamental obterem-se valores apropriados para a resistência à derrapagem em todas as situações de piso molhado, para as irregularidades devidas a ninhos e peladas, fendas, juntas, ondulações derivadas de má construção ou da acção do tráfego, com comprimentos de onda entre 50mm e 4m, registam-se efeitos negativos quer no conforto como na segurança, conduzindo ainda a uma rápida deterioração do pavimento.

Na descrição da textura superficial de um pavimento é vulgar considerarem-se três aspectos: a microtextura, a macrotextura e a megatextura (Figura 2.2).

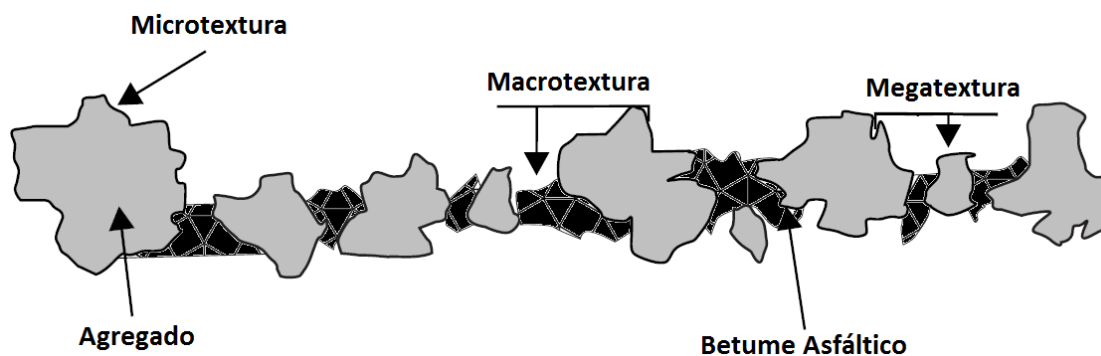


Figura 2.2 – Micro, Macro e Megatextura na superfície de pavimentos [adaptado de Bernucci et al., 2010]

A microtextura pode ser caracterizada pelo estado de polimento dos agregados, visto que se refere à rugosidade em pequena escala. De acordo com a classificação da PIARC/AIPCR, a microtextura corresponde a comprimentos de onda compreendidos entre 1 μ m e 0,5mm, com amplitudes verticais entre 1 μ m e 0,2mm, e deve-se às asperezas da superfície das partículas (Pinto, 2003; Branco, Pereira and Santos, 2008).

Com este nível de textura classifica-se a superfície de mais ou menos áspera, embora seja tão pequena que não se consegue observar a “olho nu”. A textura superficial é reconhecida por derivar da mineralogia e petrologia das partículas dos agregados, caracterizando-se como a irregularidade superficial dos componentes pétreos individuais da camada de desgaste do pavimento.

A microtextura é fundamental para a aderência entre o pneu e o pavimento, uma vez que influencia directamente as qualidades antiderrapantes do pavimento. Na nomenclatura, a microtextura classifica-se de áspera quando um pavimento acaba de ser construído e após a entrada em serviço da via, esta altera-se sob o efeito da passagem dos veículos e das condições atmosféricas, em função do tipo de agregado aplicado nas misturas e da velocidade de circulação, designando-se de polida.

A fina microtextura da superfície de um pavimento influencia os níveis de derrapagem para qualquer velocidade. As superfícies com partículas de microtextura angulosa possuem uma maior resistência à derrapagem com piso molhado, para velocidades baixas, mas na escassez de macrotextura, apresentam um decréscimo no valor do coeficiente de atrito à medida que a velocidade aumenta. Estas partículas mais angulosas estão associadas a um maior desgaste dos pneumáticos, e por outro lado a acção do tráfego facilita no polimento da superfície, atenuando a microtextura.

A macrotextura de acordo com a classificação da PIARC/AIPCR, corresponde a comprimentos de onda compreendidos entre 0,5 μ m e 50mm, com amplitudes verticais entre 1 μ m e 20mm, sendo caracterizada pelo estado do polimento dos agregados visto que se refere à rugosidade em pequena escala (*Pinto, 2003; Branco, Pereira and Santos, 2008*).

Está relacionada com a rugosidade da superfície dos pavimentos, influenciando a drenagem na superfície de contacto pneu/pavimento, as deformações e desgaste dos pneumáticos, as características antiderrapantes a velocidades elevadas e a variação do gradiente atrito/velocidade.

Salientar ainda a distinção existente entre macrotextura positiva, que é a mais vulgar e é típica dos microaglomerados betuminosos e dos *slurrys*, e negativa que se refere a misturas porosas. As duas proporcionam as vantagens referidas anteriormente, porém são bastante distintas no que respeita ao ruído. As primeiras amplificam o ruído em todas as frequências, enquanto que as segundas reduzem o nível de ruído, não só no

contacto pneu/pavimento, mas também por absorção acústica do som produzido pelo motor.

Analogamente à microtextura, a macrotextura é visível a “olho nu”, classificando-se em grosseira e fina, sendo a sua medição feita com recurso à utilização de diversos métodos e equipamentos.

A megatextura é já considerada uma irregularidade do pavimento, e de acordo com a classificação da PIARC/AIPCR, corresponde a comprimentos de onda compreendidos entre 50mm e os 500mm, com amplitudes verticais entre 1µm e 50mm, prejudicando as condições de segurança e de conforto dos utentes (*Pinto, 2003; Branco, Pereira and Santos, 2008*).

Esta tem comprimentos de onda a partir das que intervêm no contacto dos pneus com o pavimento. Normalmente resulta de deformações de pequeno comprimento, exemplo dos ninhos, peladas e pequenas depressões.

A megatextura é o resultado de deteriorações involuntárias da superfície do pavimento, que originam deformações pontuais nos pneumáticos, com comprimentos próximos dos modos de vibração. Estas vibrações transmitem-se pela propagação para o volante, dando origem à emissão de ruídos de baixa frequência, que se difundem no exterior e no interior do veículo.

No caso dos veículos motorizados de duas rodas, estes são caracteristicamente sensíveis a algumas irregularidades, aliadas a ondas curtas e muito curtas, inferiores a 1m, à presença de cavados de rodeira, efeito de carril, e à existência no pavimento de estriagem longitudinal.

Zonas localizadas de retenção de água equivalem muitas vezes a áreas de deformações em que a megatextura é considerável. Quando em tempo de chuva, estas deformações originam alterações da profundidade da água, modificando pontualmente de forma significativa as condições de aderência.

Logo, pode concluir-se que a megatextura relaciona-se directamente com o ruído, com o consumo de combustível e o ainda com o desgaste mecânico dos veículos.

2.3 Aderência

Como já foi dito anteriormente, a característica superficial mais importante de um pavimento em termos da segurança é a aderência entre os pneumáticos e a superfície, tendo esta propriedade repercussões directas ao nível dos custos de circulação, dada a sua influência directa na velocidade de circulação e nos acidentes.

A aderência, ou a característica antiderrapante, é uma das características que mais influencia a segurança dos utilizadores que circulam sobre o pavimento, pois permite que o veículo conserve, a todo o momento, a trajectória desejada e a velocidade, especialmente em curvas, e em reduzir a distância de travagem.

A aderência depende de vários factores, relacionados não só com as características dos pavimentos, casos da textura superficial e do atrito entre o pneu/pavimento, mas também do grau de desgaste, da pressão de enchimento e tipo dos pneus (estrutura, composição e qualidade da borracha), da velocidade de circulação, da presença de água no pavimento, outros tipos de depósitos existentes no pavimento (borracha, óleos, folhas, etc.), a época do ano (temperatura para além da pluviosidade), etc.

Devido à presença de água no pavimento, podem ocorrer dois fenómenos distintos: a hidroplanagem, que ocorre para espessuras de película de água superiores a 3mm, e que resulta do choque frontal da água sobre a roda, e a viscoplanagem que ocorre para espessuras de película de água inferiores a 3mm, e verifica-se quando não há contacto entre o pneu e o pavimento, devido ao facto de a água aprisionada entre eles não conseguir escapar instantaneamente.

Em tempo de chuva o risco de derrapagem é fundamental que seja minimizado de modo a evitar acidentes. Para isso desencadeiam-se complementarmente algumas medidas nesse sentido

- Primeiro, melhorando as propriedades dos pneus e os sistemas de travagem dos veículos;
- Segundo, aprofundando o conhecimento do mecanismo de aderência entre os pneumáticos e o pavimento, e dotando as superfícies do mesmo com elementos adicionais para uma melhor resistência à derrapagem.

Aderência no contacto entre o pneu e o pavimento

Para facilitar a compreensão do fenómeno de aderência, na Figura 2.3 exibem-se as condições de contacto pneu/pavimento, em situações de piso molhado.

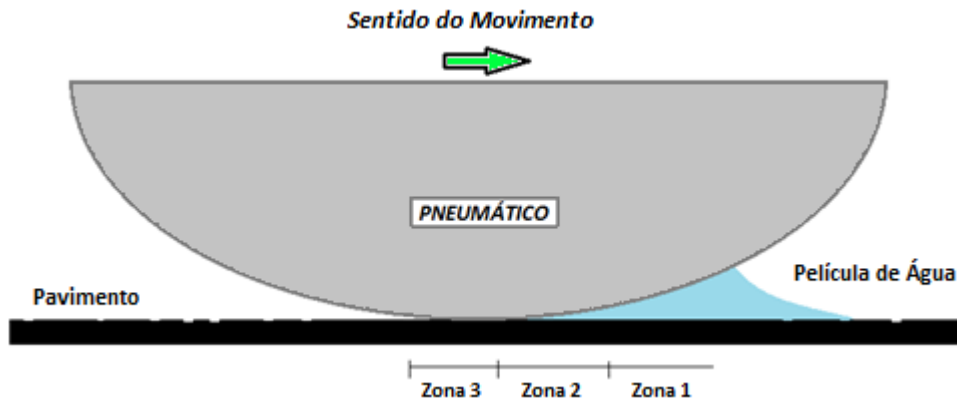


Figura 2.3 – Zonas de interacção pneu/pavimento com piso molhado [adaptado de Pinto, 2003]





A interacção entre o pneu e o pavimento divide-se nas seguintes zonas (Romão, 2010):

- Zona 1 - existe uma película de água contínua que impede o contacto;
- Zona 2 - a maior parte da água foi evacuada, restando ainda uma película descontínua atravessada por algumas irregularidades do pavimento, mas não por todas;
- Zona 3 - a água foi quase toda removida e existe um contacto praticamente em seco entre o pneumático e o pavimento, embora reste uma percentagem de água impossível de suprimir até que deixe de chover e se evapore.

A superfície de um pavimento deve igualmente ser grosseira (macrotextura) e áspera (microtextura) de forma a dispor de uma apropriada resistência à derrapagem para qualquer gama de velocidades de circulação dos veículos. Embora uma boa microtextura ser sempre indispensável, a sua acção isolada não é suficiente para garantir uma segurança aceitável para circulação a velocidades mais elevadas.

Conciliadas as diferentes características da macrotextura e da microtextura é possível diferenciar a aderência em distintos níveis, como é possível observar no Quadro 2.1 e na Figura 2.4.

Quadro 2.2 – Classificação da textura superficial dos pavimentos [*adaptado de Vieira, 2009*]

	Superfície	Textura	
		Macro	Micro
A		Áspero	Duro
B		Áspero	Polido
C		Liso	Duro
D		Liso	Polido

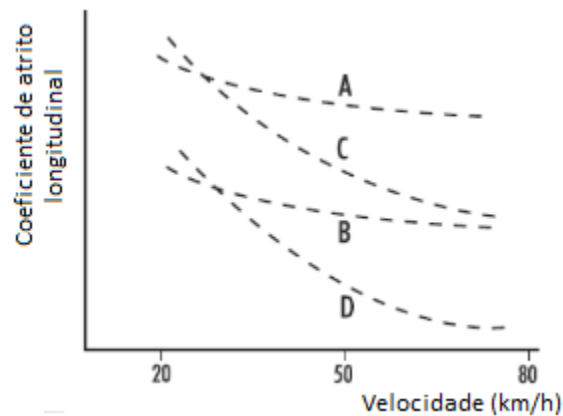


Figura 2.4 – Influência da microtextura na aderência com piso molhado [*adaptado de Vieira, 2009*]

Assegurar que exista uma boa aderência entre os pneumáticos e o pavimento tem como objectivos reduzir a distância de paragem quando se trava e permitir que o veículo conserve em todo o período de travagem a trajectória pretendida.

Para estes dois objectivos correspondem dois tipos de aderência – longitudinal e transversal – caracterizados pelo respectivo Coeficiente de Atrito.

Avaliação da aderência

Para a avaliação da aderência de um determinado pavimento, procede-se de duas formas distintas:

- Medindo o coeficiente de atrito entre o pneumático e o pavimento molhado, a uma determinada velocidade;
- Medindo a macrotextura ou a capacidade de drenagem superficial do pavimento.

O coeficiente de atrito a baixa velocidade é função da microtextura, dado que uma maior aspereza produz um maior número de pontos de contacto “em seco” entre o pneumático e o pavimento que surgem ao quebrar-se a película de água que os separa. Assim é fundamental fazer-se uma aproximação do valor da microtextura, que é uma característica nada fácil de medir directamente.

Aumentando a velocidade, diminui o atrito, tanto mais quanto menor for a capacidade de escoamento de água proporcionada pela macrotextura. De modo a evitar uma excessiva diminuição do atrito a velocidades elevadas, é necessária uma macrotextura grosseira.

Logo, de forma a caracterizar-se a aderência a qualquer velocidade são necessários dois procedimentos:

- Um relacionado com a microtextura, que determina as características antiderrapantes a baixas velocidades;
- E um com a macrotextura, que determina as características antiderrapantes a altas velocidades.

Diversos equipamentos e métodos foram desenvolvidos por todo o mundo para medir a textura e o atrito dos pavimentos rodoviários e aeroportuários.

Como consequência foi desenvolvido o IFI - *International Friction Index*, que consiste numa escala de referência baseada no Modelo da PIARC/AIPCR (relaciona o atrito com a velocidade de deslocamento), servindo para estimar uma constante de referência da velocidade (S_p - *Speed Constant*) e do atrito a 60 km/h (F_{60} - *Friction Number*) de um pavimento.

Por definição, o conjunto de valores (F_{60} , S_p), denomina-se como o IFI de um pavimento, o qual permite representar a Curva de Referência estimada de Atrito – Velocidade de Deslocamento de um determinado pavimento e, em consequência avaliar a aderência entre os pneumáticos e o pavimento molhado.

O valor do IFI é definido pela expressão:

$$IFI = A + B \times F \times e^{\frac{\tau \times V - S_p}{a + b \times T}} + C \times T \quad (2.2)$$

Sendo:

F – Coeficiente de atrito medido;

V – Velocidade a que foi realizada a medição;

S_r – Referência pneu/velocidade (60 km/h);

T – Medida da textura;

τ – Variância da velocidade;

a e b – Coeficientes determinados empiricamente para compensar a influência da velocidade no coeficiente de atrito e na medida da textura (T);

A, B e C – Coeficientes determinados empiricamente e especificamente para cada equipamento.

2.4 Atrito

O coeficiente de atrito é o parâmetro usado para determinar o nível de aderência entre o pneumático e o pavimento, sendo evolutivo no tempo em função de um conjunto de factores, alguns pertencentes às características do pavimento (tipo e estado), outros da responsabilidade do condutor (estado dos pneus e velocidade de circulação) e também às condições atmosféricas (chuva, neve, gelo, etc.) (Pinto, 2003).

No tipo e estado do pavimento, as condições que mais influenciam o valor do coeficiente de atrito dizem respeito ao desgaste dos agregados devido à acção do polimento dos pneus, à exsudação do betume na superfície da camada de desgaste, ao aparecimento de discontinuidades devidas ao fendilhamento, à existência de rodeiras que provocam acumulação de água e naturalmente à hidroplanagem e formação de gelo e à poluição devida ao derrame de hidrocarbonetos.

O desenvolvimento do atrito pode ser considerado num curto espaço de tempo, dada a queda de chuva ou, como em outras características superficiais, degradando-se com o passar do tempo face à acção repetitiva da passagem dos veículos.

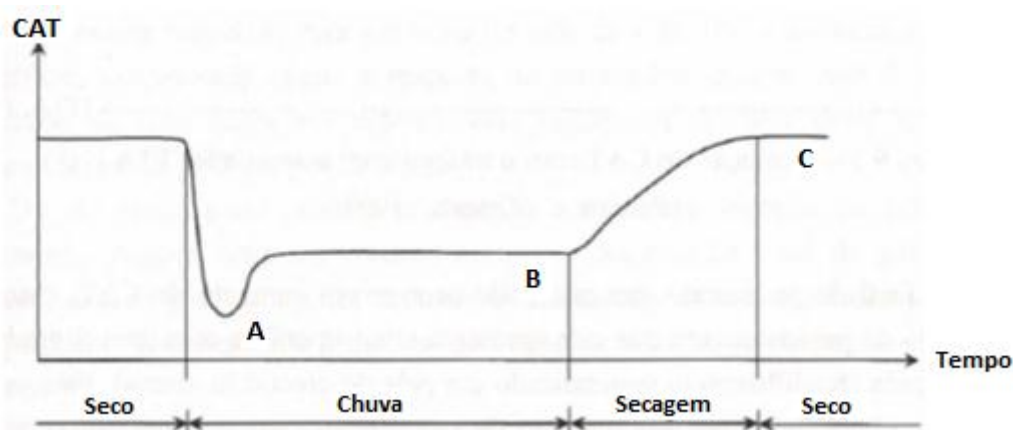


Figura 2.5 – Evolução do atrito num curto intervalo de tempo

[adaptado de Branco, Pereira and Santos, 2008]

Na Figura 2.5 pode observar-se a evolução dos valores do coeficiente de atrito, em curtos períodos de tempo. Na fase (A) o pavimento apresenta menor atrito, e corresponde ao início do período de chuva, momento em que as pequenas partículas existentes à superfície (resultantes do desgaste dos pneus e do próprio pavimento, e as poeiras) se misturam com a água formando uma "pasta fluida" muito fina.

Em seguida, esta "pasta" é deslocada pela chuva e pela passagem dos veículos, ampliando o valor do atrito para o que é normal na situação de pavimento molhado (B).

Terminada a precipitação, esta inicia o seu processo de escoamento e de evaporação, passando o coeficiente de atrito do pavimento a ter novamente o valor normal em período seco, fase (C).

O período necessário para a superfície secar depende de factores relacionados com o perfil transversal da via, a macrotextura e a permeabilidade da camada de desgaste do pavimento.

Na evolução do atrito ao longo do tempo face à acção repetida da passagem dos veículos, e como é notório na Figura 2.6, podem identificar-se duas fases distintas.

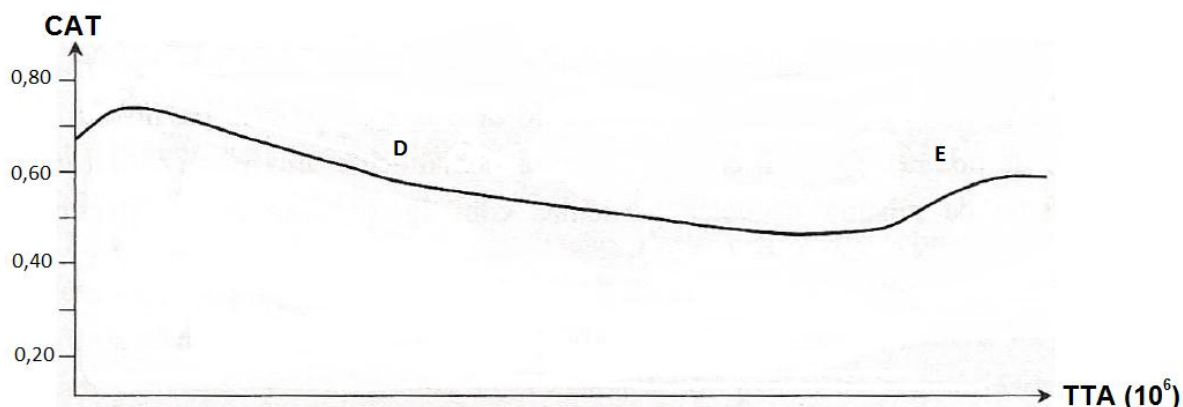


Figura 2.6 – Evolução do atrito sob acção do tráfego total acumulado (TTA)

[adaptado de Branco, Pereira and Santos, 2008]

Inicialmente durante alguns meses, o coeficiente de atrito cresce em função do desgaste da película betuminosa superficial, da acção dos pneus dos veículos, provocando acréscimos na macrotextura que de seguida vai diminuir dado o desgaste dos inertes mais grossos. Verifica-se assim uma diminuição lenta e gradual do coeficiente de atrito (D).

A fase final do pavimento (E), em que pode ocorrer um aumento do valor do coeficiente de atrito, coincide com o estado do pavimento em que este apresenta uma superfície com uma degradação bastante evoluída, idêntica ao fendilhamento generalizado em pele de crocodilo. Contribuindo para um aumento da macrotextura e da permeabilidade da camada de desgaste.

Normalmente, o atrito é medido em piso molhado, isto porque quase todas as camadas de desgaste disponíveis no mercado apresentam bons níveis de resistência à derrapagem em piso seco. Quando o pavimento está molhado, a água actua como lubrificante entre o pneu e a superfície do pavimento, tornando mais difícil controlar o veículo.

O atrito pode ser avaliado através da medição de dois parâmetros:

- **Coeficiente de Atrito Longitudinal (CAL)** – interessa sobretudo à distância de paragem, está associado à força que se desenvolve na área de contacto pneu/pavimento quando se arrasta uma roda travada.
- **Coeficiente de Atrito Transversal (CAT)** – avalia a segurança de circulação em curva, é o que mais influencia a velocidade de circulação e consequentemente os acidentes, está associado à força que se desenvolve na

área de contacto pneu/pavimento, perpendicular ao plano de rotação da roda, quando esta circula formando um ângulo em relação à sua direcção de rotação (forças tangenciais).

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

2.5 Regularidade

A irregularidade é descrita como “o desvio da superfície em relação a uma superfície plana com dimensões características que afectam a dinâmica do veículo, a qualidade de circulação, as cargas dinâmicas e a drenagem, por exemplo, do perfil longitudinal, do perfil transversal e da inclinação” segundo a norma ASTM E867-06.

A regularidade superficial é uma propriedade funcional com incidência directa na comodidade de circulação, ainda que em alguns casos extremos possa afectar a segurança e a economia.

A ausência de comodidade é sentida pelos utilizadores de forma muito diversificada, visto existirem grandes diferenças nas velocidades de circulação, nos hábitos de condução, das distâncias de percurso, nos tempos de paragem, etc.

De modo a avaliar-se a influência da irregularidade no conforto, é necessário ter em conta que os defeitos da regularidade superficial se mostram em ondas de diferente comprimento. As frequências das oscilações compreendidas entre 1 e 15 Hz são as que mais afectam o utilizador: as mais baixas podem levar a enjoos e dores de cabeça, enquanto que as mais elevadas afectam os órgãos internos e a coluna vertebral (*Pinto, 2003*).

Na segurança de circulação, a irregularidade estimula o condutor a perdas de atenção e de percepção da estrada. Por vezes, induz a situações de retenção de água que provocam falta de aderência entre os pneumáticos e o pavimento, fenómenos de hidroplanagem, perda do controlo do volante e da trajectória do veículo, instabilidade na circulação de motociclos, etc.

Ao nível de consequências económicas, as irregularidades são responsáveis por fenómenos como:

- Aumento do consumo de combustível;
- Agravamento do efeito das cargas transmitidas pelos pneus ao pavimento, aumentando o seu efeito dinâmico e reduzindo o período de vida útil dos mesmos, dada a diminuição das suas características estruturais.

As irregularidades superficiais surgem das diferenças que existem entre a superfície teórica do pavimento e a sua superfície real, e são vulgarmente provenientes da falta de capacidade de suporte da camada de fundação e/ou das deformações do terrapleno, da má colocação e compactação dos materiais em obra e da passagem ininterrupta dos veículos.

Regularidade longitudinal

A caracterização da irregularidade longitudinal pode ser feita com base na análise das sinusóides, caracterizadas pela função $Y(x)$ (Branco, Pereira and Santos, 2008).

$$Y = A.\text{sen}\left[\frac{2\pi}{\lambda} \cdot (X - X_0)\right]$$

(2.3)

Sendo:

- Y – Desnívelamento;
- A – Amplitude da irregularidade;
- X – Distância na horizontal;
- X_0 - Fase;
- λ – Comprimento de onda (m).

O estudo da regularidade longitudinal não é possível ser feito num ponto isolado, é fundamental considerar um determinado comprimento da avaliação, dado que ao longo de uma via podem existir distintos defeitos de regularidade para os quais deve ser definida a correspondente frequência de ocorrência.

É fundamental distinguir a regularidade longitudinal e a heterogeneidade do perfil longitudinal (Pinto, 2003):

- Na regularidade longitudinal os comprimentos estão compreendidos entre 0,7 e 50 metros, correspondendo a regularidades devidas às deficiências

construtivas, como deficiente nivelamento das camadas granulares e de má utilização dos equipamentos e técnicas de pavimentação;

- Na heterogeneidade do perfil longitudinal os comprimentos de onda superiores a 50 metros são característicos de deficiências de construção do perfil longitudinal. Regularmente designam-se por assentamentos, depressões e ondulações, caracterizando-se estas últimas por uma repetição de defeitos com uma determinada periodicidade. Este tipo de anomalias deve-se aos assentamentos do solo de fundação, dada a falta de compacidade do mesmo ou pela utilização de materiais inadequados, tendo tendência para evoluir com o passar do tempo.

Regularidade transversal

Além dos efeitos anteriormente referidos para a regularidade longitudinal, as irregularidades transversais também possuem influências negativas (*Pinto, 2003*):

- Condução forçada sobre as rodeiras, prejudicando a comodidade e a segurança, especialmente no caso de motociclos;
- Acumulação de água nas rodeiras, com conseqüente perigo de aquaplanagem;
- Variações na deformação e desgaste dos pneus, levando ao balançar dos veículos, causando incómodos aos utilizadores, ou transferência de carga de umas rodas para as outras, com o perigo de perda de controlo do veículo.

Avaliação da regularidade

As entidades responsáveis pela conservação de uma via tem como preocupações o projecto e a manutenção dos pavimentos, de forma a assegurar os níveis de funcionalidade aceitáveis para os utilizadores, com custos controlados. Este nível de qualidade é decretado através da percepção das características da via pelos utilizadores em termos de conforto, segurança, custos e impactes ambientais.

É assim fundamental fazer duas avaliações distintas: uma em termos do efeito da via sobre os utentes e outra sobre o estado do pavimento. Através desta informação é possível saber quando é que um pavimento não está a cumprir os níveis de funcionalidade exigidos e quais as características físicas que apresentam defeitos.

A avaliação da regularidade pode ser feita por um conjunto de técnicos, que operam uma viatura vulgar sobre a via a avaliar, ou por métodos de medição, que podem separar-se nas seguintes categorias (*Pinto, 2003*):

- ☞ Métodos geométricos;
 - Medição em relação a um plano móvel;
 - Medição da inclinação e do ângulo em relação ao plano horizontal;
 - Medição com sensores laser posicionados num plano horizontal;
- ☞ Medição da distância entre o eixo do veículo e os chassis;
- ☞ Sinais de acelerómetros;
- ☞ Combinação de métodos geométricos com acelerómetros.

A realização das medições pode ser feita com recurso a equipamento que determina o “verdadeiro” perfil geométrico da superfície do pavimento ou com equipamento do tipo “resposta”, com o qual se obtém uma expressão mais ou menos representativa da regularidade.

São vários os métodos e equipamentos usados actualmente na determinação da regularidade, bem como os índices que a expressam matematicamente, em seguida indicam-se alguns dos índices correntemente determinados:

- ☞ **Regularidade longitudinal**
 - IRI - *International Roughness Index*.
- ☞ **Regularidade transversal**
 - Inclinação Transversal;
 - Máxima profundidade do cavado de rodeira;
 - Máxima profundidade de água.

2.6 Ruído

Num estudo realizado na União Europeia, 186 milhões de pessoas consideram-se seriamente afectadas por problemas de saúde devido à poluição sonora. Desse número, 125 milhões culpabilizam o ruído produzido pelo tráfego viário. Os resultados prejudiciais do ruído sobre o ser humano podem provocar desde pequenas perturbações e cansaço, até ocorrências de problemas cardíacos e transtornos mentais (*Pinto, 2003*).

Assim, o ruído viário torna-se incomodativo não só para os utentes da via, como para os habitantes da área envolvente à mesma. Este ruído devesse ao motor do veículo e ao contacto pneu/pavimento.

Para casos de proximidade entre aglomerados habitacionais e grandes infraestruturas rodoviárias e aeroportuárias, o ruído pode ser minimizado com a colocação de barreiras acústicas, da escolha de materiais adequados para a camada de desgaste do pavimento, do isolamento das juntas de dilatação das obras de arte, etc. O recurso a este género de medidas deve ser sempre harmonizado por factores como a segurança e economia de circulação.

O ruído que é sentido no interior do veículo pelo condutor e pelos passageiros, é transmitido pela carroçaria e acessórios, e o seu nível é maior ou menor em função das condições de insonorização do habitáculo do veículo.

Produção e propagação de ruído

O ruído do contacto pneu/pavimento deriva da combinação de processos físicos que se classificam em três grupos distintos (*Pinto, 2003; Santos, 2007*):

⇒ [Impactes e choques consequentes do contacto entre o pneu e a superfície do pavimento;](#)

Este resulta da vibração induzida pelo choque que acontece quando as ranhuras do pneu tocam o pavimento e, imediatamente a seguir, perdem o contacto, à medida que o pneumático vai rodando. Resumidamente, o ruído é produzido pela vibração das ranhuras, que excitam o ar circundante, gerando ondas de pressão sonora que se propagam para longe do pneu.

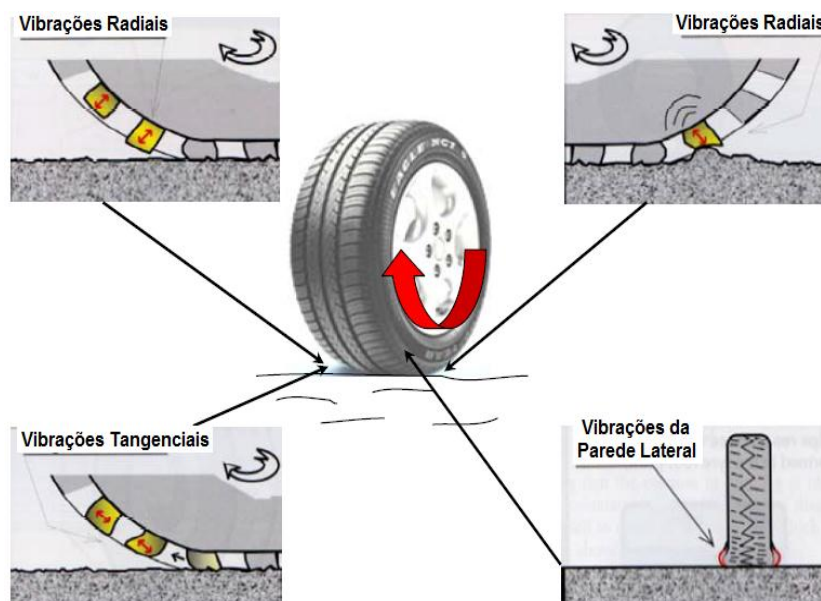


Figura 2.7 – Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento [*adaptado de Santos, 2007*]

Conforme a Figura 2.7, quando as ranhuras do pneu são comprimidas sobre o pavimento, as vibrações propagam-se radialmente ao resto do pneu. A tensão nas ranhuras vai crescendo e decrescendo função das forças de fricção entre o pneumático e o pavimento. O célere movimento de contacto/perda de contacto entre o pneu e o pavimento excita os modos de vibração radiais e tangenciais do pneumático.

O ruído provocado pelo pneu, resultante das vibrações e impactos, e sucede para frequências inferiores a 1 kHz.

⇒ Processos aerodinâmicos de “bombagem de ar” entre as ranhuras do pneumático e as irregularidades do pavimento;

O ruído pode igualmente ser originado por mecanismos de movimentação de ar, atravessando por entre as cavidades das ranhuras do pneumático, particularmente nas zonas de contacto deste com o pavimento. Este fenómeno é habitualmente conhecido por “bombagem de ar”.

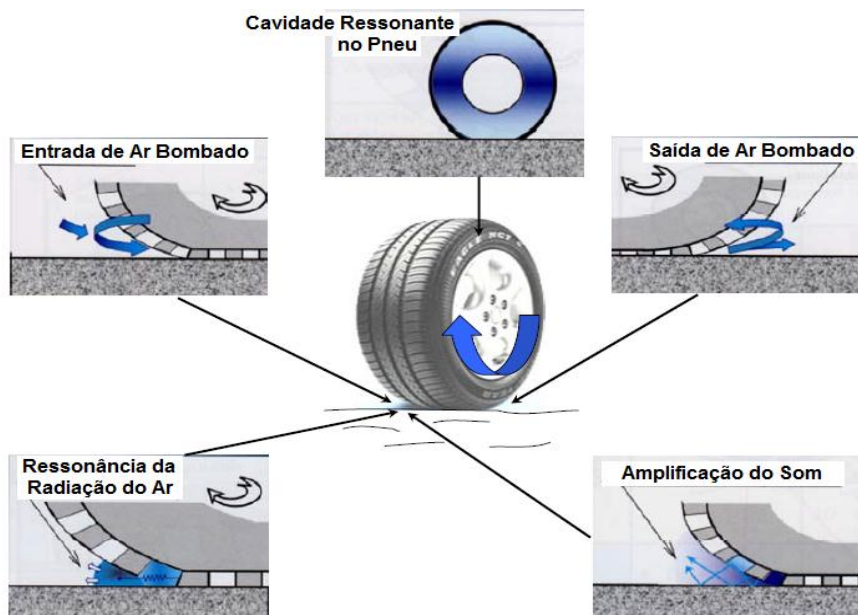


Figura 2.8 – Mecanismos aerodinâmicos do ruído pneu/pavimento [adaptado de Santos, 2007]

A referência teórica desta temática foi descrita como a súbita saída do ar “preso” nas ranhuras da borracha do pneumático e nos espaços da superfície do pavimento, e entrada de novo ar quando essa zona do pneu deixa de estar em contacto com a superfície do pavimento (Figura 2.8).

Os resultados da ressonância da bombagem de ar, geram ondas de som com frequências compreendidas entre 1 e 3 kHz.

⇒ [Adesividade e resultados de micro movimentos das ranhuras do pneu no seu contacto com o pavimento;](#)

A fricção entre as ranhuras e a superfície reparte-se em componentes de histerese e adesividade.

A adesividade surge em termos moleculares, e é influenciada pela microtextura do pavimento. Ao longo do deslize entre o pneu e o pavimento, as ligações de aderência entram em ruptura, perdendo-se quando o contacto entre estes termina.

A força de histerese devesse a um outro fenómeno existente nas superfícies de escorregamento. Na zona de contacto, quando as ranhuras da borracha se envolvem com as asperezas da superfície do pavimento, a pressão de distribuição em cada partícula é sensivelmente simétrica. Aquando do deslocamento, a borracha tende a acumular-se nas extremidades das irregularidades do pavimento, ocasionando a perda do contacto na face inferior. A distribuição assimétrica de pressões gera uma força que se opõe ao deslocamento. A componente da histerese da fricção pneu/pavimento é controlada pela macrotextura da superfície, que abrange os comprimentos de onda da textura correspondentes ao agregado usado na camada superficial do pavimento.

Verifica-se que não são apenas os elementos sozinhos que provocam a vibração dos pneus, mas sim a combinação do escorregamento com a perda de adesão, seguida da força de histerese durante a deformação nas ranhuras, provocando fenómenos de colagem/descolagem e conseqüente vibração.

A propagação do ruído, quando é produzido, transmite-se por fenómenos complexos – transmissão aérea, ressonâncias mecânicas e acústicas, interferências, efeito Doppler, etc. – que diminuem, amplificam ou modificam a sua composição espectral.

Se uma fonte de ruído está sobre uma superfície, as ondas de som que se reflectem do chão vão interferir na propagação. Dado que a maior parte dos pavimentos é reflector, e as ondas reflectidas são ainda modificadas pela sua interacção com a superfície do pavimento.

Logo a transmissão de ondas sonoras deriva dos seguintes factores:

- Propagação;
- Difracção (obstáculos encontrados);
- Absorção (pelo solo e vegetação);
- Difusão pelas turbulências atmosféricas.

Avaliação do ruído

Para a avaliação do ruído ou da pressão acústica de um som recorre-se à seguinte expressão logarítmica:

$$L_p(t) = 20 \cdot \log_{10} \frac{p(t)}{p_0} \quad (2.4)$$

Sendo que:

$p(t)$ – Valor da pressão acústica do ruído a medir;

p_0 – Valor da pressão de referência, igual a 2×10^{-5} Pa.

Para a determinação dos níveis de ruído, em termos de equipamento, utilizam-se os denominados sonómetros, que são formados por um microfone e diversos amplificadores e circuitos. Sendo possível instala-los num ponto fixo ou ser acoplados a um veículo.

O método mais recorrente é o do microfone instalado num ponto fixo, e designa-se de SPB (*Statistical Pass-By*). Este está descrito na norma ISO 11819-1: 1997 “*Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1 : Statistical Pass-By method*”, e consiste na colocação de um microfone a 7,5 metros de distância do centro da via a ensaiar (fora da faixa de rodagem), 1,2 metros acima da superfície, e vai captando o som dos veículos que vão passando (Figura 2.9).



Figura 2.9 – Método estático de passagem (SPB) [Santos, 2007; TYROSAFE, 2009]

Quanto à medição com equipamento móvel, o método mais conhecido é designado por CPX (*Close-Proximity*). Este é efectuado tendo em conta a norma ISO 11819-2: 2000 “*Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close – Proximity method*”.

Para a medição do ruído é utilizado um atrelado de teste normalizado (puxado por um veículo comum) onde são colocados pneus de ensaio e um ou mais microfones junto do pneu (Figura 2.10). O atrelado possui um compartimento, condicionado acusticamente, que protege o microfone de ruídos parasitas.



Figura 2.10 – Método de estria proximidade (CPX) [Santos, 2007]

2.7 Características Reflectoras

Entre as características funcionais responsáveis para garantir a segurança de circulação, têm-se as características reflectoras dos pavimentos, associadas aos aspectos da visibilidade diurna e nocturna, em condições de piso molhado e seco.

A camada superficial de um pavimento apresenta-se como um ponto relevante para o campo visual de todos os utentes da via, perturbando a visibilidade de diferentes formas:

- A claridade do pavimento influencia a adaptação da visão, o que é fundamental em situações de mudanças bruscas de luminosidade, exemplo, na entrada e saída de um túnel;
- O pavimento é o fundo visual dos obstáculos que podem interferir na circulação;
- O pavimento é também o fundo sobre o qual contrastam as marcas viárias presentes nele;

- O traçado da estrada é mais visível devido ao contraste existente entre as guias pintadas e os limites do pavimento, tendo assim um papel muito importante na perceptibilidade da estrada.

Na definição das propriedades ópticas dos pavimentos é fundamental considerar as diferentes possibilidades de reflexão da luz: difusão e reflexão. A luminosidade de um pavimento deriva da luz recebida, natural ou artificial, das características reflectoras do pavimento e das condições da direcção da luz incidente e direcção do ponto de observação.

Em pavimentos de texturas grossas, estas facilitam a difusão da luz, pelo que ficam menos luminosas quando a luz incide em sentido contrário ao da observação (exemplo desta situação, ocorre quando o sol está “baixo”, nas primeiras horas da manhã e ao fim da tarde).

Contrariamente, em texturas finas em tempo de chuva, devido à maior capacidade de retenção de água, ficam sobretudo brilhantes quando a luz incide sobre elas. Nestas situações é melhor adoptar um pavimento poroso uma vez que possui uma grande capacidade de eliminação da água da chuva, através da drenagem.

Para a visibilidade nocturna, quando existe iluminação artificial, por vezes pode ser vantajosa a adopção de pavimentos claros, pois absorvem menos luz e conseqüentemente carecem de menos iluminação. No caso de termos pavimentos de betão existe ainda a possibilidade de se obterem bons resultados de iluminação através da incrustação nos mesmos de agregados artificiais de cor branca ou clara.

À noite, e sem iluminação artificial, é relevante o contraste com a sinalização horizontal, o que é facilmente possível de conseguir num pavimento betuminoso de textura fina, todavia, este tipo de pavimento é o menos recomendável ao nível de resistência à derrapagem, especialmente em situações de ocorrência de precipitação. Logo, o melhor é garantir a boa visibilidade das marcas rodoviárias mediante a utilização de pinturas com elevado grau de reflexão.

A função das propriedades ópticas da superfície dos pavimentos não é negligenciável na segurança rodoviária e aeroportuária, pois permitem em tempo de chuva, evitar o encadeamento, principalmente de noite, e a projecção de água, ao mesmo tempo que garantem um bom contraste visual face aos obstáculos existentes e à

sinalização horizontal. Permitem ainda a poupança de energia, ao possibilitarem, a redução da intensidade de iluminação artificial pública.

Avaliação das características reflectoras

A avaliação das características ópticas da sinalização horizontal e vertical, pode ser feita com o recurso a equipamentos estacionários, os quais apresentam como inconvenientes um fraco rendimento e a interferência com a circulação do tráfego.

Contudo, para obter medidas mais contínuas e de maior rendimento, é possível socorrer-se a equipamentos acoplados a veículos, capazes de medir a grande velocidade a reflexão e o contraste, tanto diurno como nocturno.

2.8 Considerações Finais

O desempenho funcional dos pavimentos rodoviários e aeroportuários está relacionado com factores de segurança, conforto e economia, afectando especialmente o utente.

Com o evoluir das exigências de durabilidade, comodidade e segurança exigidas aos pavimentos rodoviários e aeroportuários, tornaram de uma importância notável a sua correcta execução, e consequente caracterização funcional.

A qualidade de um pavimento em termos funcionais é geralmente avaliada através da medição da regularidade, da textura e do atrito. Os valores obtidos nestas medições são comparados com os parâmetros exigidos nas especificações técnicas dos cadernos de encargos.

A aderência ou característica antiderrapante é uma das propriedades que mais influencia a segurança dos utentes que circulam sobre o pavimento, ao permitir que o veículo conserve, a todo o momento, a trajectória desejada e a velocidade, principalmente em curvas, e reduzir a distância de travagem. Esta característica depende de vários factores, associados não só às características dos pavimentos, mas também ao grau de desgaste, pressão de enchimento e tipo dos pneus (constituição, composição e qualidade da borracha), a velocidade de circulação, a presença de uma película de água no pavimento, outros tipos de depósitos existentes no pavimento (borracha, óleos, folhas, etc.), a época do ano (temperatura para além da pluviosidade), entre outros.

Para determinar o coeficiente de atrito da camada de desgaste, deverá ser efectuada uma campanha de medição em contínuo, com piso molhado, ao longo de um alinhamento previamente definido. Esta medição deverá ser feita, recorrendo preferencialmente a equipamentos de medição em contínuo, equipamentos esses que medem o coeficiente de atrito transversal através de rodas oblíquas ou equipamentos que efectuem a medição através de rodas parcialmente bloqueadas.

3 Equipamentos de Medição do Coeficiente de Atrito

3.1 Generalidades

Para a medição do coeficiente de atrito pode recorrer-se a diversos métodos e técnicas. A maioria dos equipamentos de medição do coeficiente de atrito é geralmente rebocável e possibilitam a medição do atrito de um ou mais pneus. Podem ter os pneus bloqueados e arrastados, simulando a travagem, ou ainda com pneus livres para circularem, tendo neste caso um certo ângulo em relação à direcção de deslocamento.

Os equipamentos de medição directa do coeficiente de atrito podem ser agrupados nos seguintes grupos.

- Equipamentos Portáteis;
- Equipamentos de Rodas Bloqueadas;
- Equipamentos de Rodas Oblíquas;
- Equipamentos de Rodas Parcialmente Bloqueadas:
 - De deslizamento fixo;
 - De deslizamento variável.

3.2 Equipamentos Portáteis

Os equipamentos portáteis são os recomendados para a medição em laboratório ou em ensaios pontuais, e como exemplos desses equipamentos têm-se o *Pêndulo Britânico* e o *Dynamic Friction Tester*, os quais de seguida se faz uma sucinta descrição.

3.2.1. Pêndulo Britânico

O Pêndulo Britânico (Figura 3.1a) consiste num equipamento portátil e a sua utilização é especificada pelo método estabelecido na norma ASTM E303-08, cujo princípio de ensaio se baseia num pêndulo padronizado com uma base de borracha, que é lançado na direcção do pavimento humedecido (Figura 3.1b). A perda de energia decorrente desse movimento serve como medida de atrito, sendo registada numa escala graduada, cujo valor é expresso em *BPN* (*British Pendulum Number*) ou *SRT* (*Skid Resistant Test*) (Figura 3.2).

O equipamento Pêndulo Britânico é um dos dispositivos mais difundidos internacionalmente, devido ao seu baixo custo e à facilidade de operação.

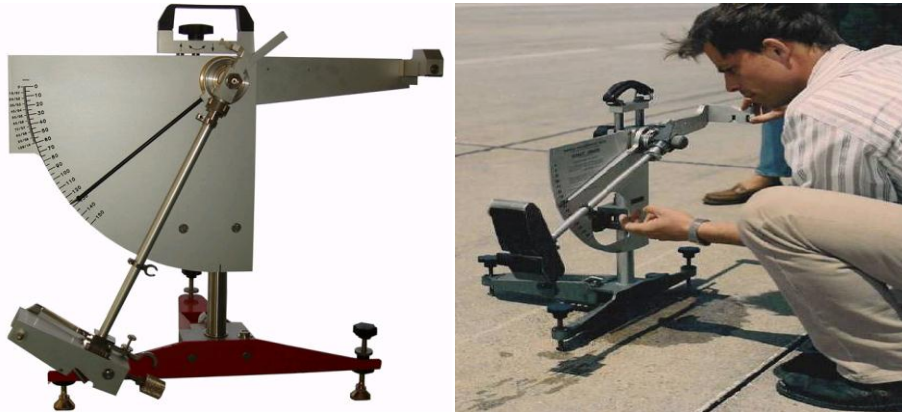


Figura 3.1 – a) Pêndulo Britânico (à esquerda); b) Exemplo do Ensaio do Pêndulo Britânico (à direita)
[EASA, 2010]



Figura 3.2 – Pormenor da Leitura do Valor da Medição

De acordo com *Menezes (2008)* o Pêndulo Britânico foi desenvolvido pelo USNBS - *United States National Bureau of Standards*, e posteriormente aperfeiçoado pelo BRRL - *British Road Research Laboratory*, com o objectivo de executar ensaios à derrapagem.

O pavimento a ensaiar deve ser previamente inspeccionado, para uma caracterização completa do seu estado de conservação. O equipamento tem de ser nivelado, através do nível de bolha, e calibrado para o valor “zero”, antes da execução dos ensaios.

O ensaio com o Pêndulo Britânico é iniciado movendo o braço do pêndulo da sua posição inicial (vertical) para a posição horizontal, de seguida a superfície do pavimento é molhada, e seguidamente o braço é libertado sendo fixo pelo operador depois de alcançar a altura máxima. A altura de máxima elevação é identificada por uma agulha posicionada verticalmente na frente do pêndulo, que indicará a leitura do coeficiente de atrito medido

pelo pêndulo ou o Valor de Teste do Pêndulo (PTV – *Pendulum Test Value*), representando indirectamente este valor o atrito longitudinal que se obteria entre o pneu e o pavimento.

Segundo *Menezes (2008)* os valores mínimos que devem ser obtidos, de acordo com a *Road Note 27 [TRRL -Transportation Road Research Laboratory, 1969]*, devem situar-se entre 45 (para estradas em geral) e 65 (para zonas particulares, como rotundas, trechos de forte inclinação e aproximação a semáforos). No caderno de encargos das Estradas de Portugal (EP) é estabelecido um valor de referência de 0,55 PTV.

As medidas do PTV estão amplamente correlacionadas como uma medida de microtextura da superfície do pavimento. Na prática o dispositivo é muito sensível a factores como a macrotextura e como tal deve ser usado com algum cuidado.

O facto de o pêndulo ser "portátil", este apresenta como grande vantagem a possibilidade de utilização em amostras de pavimentos em estudo no laboratório e, também poder ser usado em pontos específicos do pavimento em estudo. Contudo, apesar deste fornecer bons resultados, apresenta como limitação a obtenção de resultados lentamente, e de certa forma dependentes do operador do equipamento.

3.2.2. Dynamic Friction Tester

O Dynamic Friction Tester (DFT) é um equipamento portátil cujo método de ensaio está descrito na norma ASTM E1911-09 (Figura 3.3). Este equipamento permite realizar a medição directa do atrito, pontualmente, de vários tipos de superfícies pavimentadas.



Figura 3.3 – Dynamic Friction Tester [Rodriguez, 2009]

O equipamento DFT está equipado com três barras de borracha na parte inferior de um disco rotativo horizontal que gira em velocidade tangencial de 0 a 80 km/h. Este disco

incide sobre a superfície do pavimento sendo o seu contacto dado pelas corredeiras de borracha. O equipamento possui um reservatório que despeja água na superfície que está a ser ensaiada. Os coeficientes de atrito em cada velocidade, entre 0 e 80 km/h, são graficamente registados num espectro contínuo para cada medição.

As corredeiras de borracha são pressionadas contra a superfície do pavimento com uma força **W** perpendicular à superfície, e uma força horizontal **F** é aplicada para mover a borracha com uma velocidade **V** (exemplo ilustrativo da Figura 3.4). A velocidade linear **V** da barra é determinada a partir da velocidade de rotação do disco. A força **F**, necessária para vencer o atrito dinâmico é medida, **F** e **W** são conhecidos, o coeficiente de atrito (μ) é determinado a partir desta relação (NIPPO, 2011):

$$\mu = \frac{F}{W}$$

(3.1)

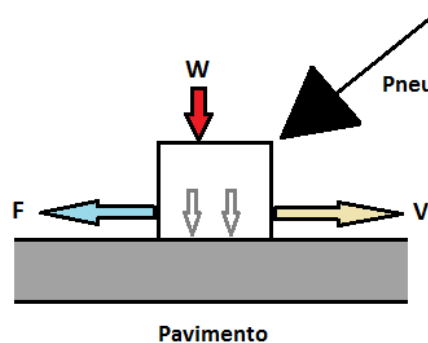


Figura 3.4 – Princípio de operacionalidade do DFT [adaptado de NIPPO, 2011]

3.3 Equipamentos de Rodas Bloqueadas

Os equipamentos de rodas bloqueadas foram desenvolvidos para a medição do coeficiente de atrito longitudinal com a aplicação do bloqueio das rodas medidoras. São equipamentos bem divulgados na Europa e nos Estados Unidos, já que são utilizados em grande parte do território de ambos. Estes equipamentos têm grande aplicação na avaliação do atrito, quer para a realização da inspecção anual da malha rodoviária, quer para a investigação de pontos críticos de ocorrência de acidentes, ou ainda para a realização de obras de reabilitação.

Equipamentos deste tipo permitem que a velocidade na interface pneu/pavimento seja a mesma do veículo, pois o travamento das rodas produz 100% de deslizamento. As

avaliações podem ser feitas em pavimentos secos ou húmidos, dado que grande parte destes equipamentos possui um sistema de espargimento que permite a aplicação de uma película de água de 1mm sobre o pavimento.

A medição inicia-se com o accionamento do travão das rodas, medindo-se a força de travagem quando a roda derrapa. O bloqueio das rodas persiste durante um curto intervalo de tempo (cerca de 2s), sendo aliviadas em seguida, proporcionando a obtenção de uma sucessão de leituras isoladas.

Em seguimento são apresentados dois equipamentos do tipo de rodas bloqueadas: o *Adhera* e o *MAder*.

3.3.1. Adhera

O *Adhera* (Figura 3.5) apresenta-se como um equipamento que é rebocado através de um veículo que contém no seu interior um reservatório de água e o equipamento registador dos dados de pesquisa, o método de ensaio está estabelecido na norma ASTM E274-11. Trabalha no princípio de atrito longitudinal com a roda bloqueada com deslizamento de 100% na sua configuração modelo. O reboque foi concebido para representar um quarto de veículo de passageiros vulgar.



Figura 3.5 – Adhera [GDDKiA, 2009]

A roda de medição permite a simulação e investigação de uma situação de travagem com a roda totalmente travada. O equipamento trabalha em velocidades que variam entre os 40 e os 120 km/h. Em projectos de pesquisa é possível executar medições com uma relação de deslize variável, as forças horizontais e verticais são medidas. Possui um sistema de fornecimento de água que capacita a indicação do filme de água a aplicar, sendo que a quantidade de água aplicada depende da lâmina especificada para a respectiva investigação.

3.3.2. MAder

O MAder (Figura 3.6) é um equipamento que efectua as medições do coeficiente de atrito longitudinal, cujo equipamento é um reboque, com duas rodas do tipo automóvel, rebocado por um veículo rebocador específico. Essas duas rodas foram projectadas para percorrer as rodeiras de rodas ocasionadas no pavimento pelo tráfego dos veículos. Na cabine do veículo rebocador está instalado um computador que comanda automaticamente todas as operações de medição e controle. O veículo rebocador transporta igualmente o reservatório de água e o sistema de ar comprimido, imprescindíveis à execução da avaliação.



Figura 3.6 – MAder [Domingues, 1997]

O equipamento MAder possui travões de disco, empregando o método de travamento rápido das rodas, por dois segundos ou por uma distância determinada com uma prévia molhagem do pavimento. O equipamento dispõe ainda de transdutores de força que são dispositivos que convertem a força de atrito medida em sinais eléctricos e que são transmitidos para o computador. A medição da força de atrito em cada roda é feita indirectamente pelo princípio do toque resistente. O método consiste em fazer a leitura da força de reacção que a estrutura da carreta impõe sobre a pinça do travão.

Um dispositivo auxiliar no MAder contém um sensor óptico para medir as velocidades, que é instalado no cubo da roda do reboque. Este dispositivo consiste num tacómetro óptico digital, que tem a função de indicar ao computador o instante do início das leituras das forças de travagem, a distância entre os ensaios e a velocidade do reboque. Com um sistema pneumático o MAder garante uma uniformidade do filme de água de 1mm, dispondo de um reservatório de 1000 Litros de água e um de ar comprimido.

3.4 Equipamentos de Rodas Oblíquas

Os equipamentos com ângulo de deslizamento lateral (rodas oblíquas) foram desenvolvidos para a medição do coeficiente de atrito transversal, registando o esforço lateral produzido pela roda que forma um ângulo variável com a direcção de avanço do equipamento. A Alemanha, a Bélgica, a Espanha, a França, a Itália e o Reino Unido são alguns dos países onde se utiliza com grande frequência este tipo de equipamento. Quando o veículo está em movimento mede-se a força lateral gerada, que é relacionada com o coeficiente de atrito.

Como exemplos deste grupo de equipamentos descrevem-se o *Mu-meter*, o *Stradograph*, o *Odoliograph*, e ainda, e talvez o mais difundido deste grupo, o *SCRIM*.

3.4.1 Mu-meter

O Mu-meter é um equipamento do tipo de ângulo de deslizamento lateral, ou seja, realiza a medição do atrito a partir de uma roda alinhada diagonalmente com a direcção de avanço, o método de ensaio está estabelecido na norma ASTM E670-09. Conforme um elemento da banda de rodagem avança dentro da zona de contacto, a estrutura vai sendo continuamente deflectida lateralmente, já que a zona de contacto desliza lateralmente. Essa deformação lateral do pneu gera uma força lateral, cujo momento em torno do ponto de articulação da roda actua para alinhar à mesma com a direcção de avanço.



Figura 3.7 – Mu-meter [EASA, 2010]

Pode-se observar de acordo com a Figura 3.7, que o Mu-meter é um equipamento rebocado, constituído por três rodas, duas destinadas a medir o coeficiente de travagem a partir da medida da força lateral nos eixos de duas rodas, designadas *Friction Wheels* (FW), instaladas num veículo. Em geral, as FW têm um alinhamento convergente em relação à direcção longitudinal do reboque, com um ângulo de convergência de aproximadamente $7,5^\circ$. A terceira roda alinhada mede as distâncias percorridas e estabiliza o movimento do reboque.

Quando um veículo reboca o Mu-meter para efectuar uma medição, o atrito gerado entre os pneus laterais e o pavimento força os membros laterais do chassi a se afastarem, o que gera forças de tensão na célula de carga ligada aos dois braços do chassi. O sinal de força e o sinal de distância percorrida medida são enviados para uma unidade de registo e processamento de dados. Nos modelos mais recentes, essa unidade de processamento de dados pode ser ligada a um computador portátil, que pode aceder às informações em tempo real, no interior do veículo que estiver a rebocar o Mu-meter.

Segundo a *TYROSAFE (2008)* um carregamento de 77,5 kgf é aplicado em cada FW através de um lastro colocado nos amortecedores. A velocidade do equipamento pode ser ajustável, entre os 20 e os 80 km/h, sendo a mais vulgar a de 65 km/h.

3.4.2 Stradograph

O Stradograph (Figura 3.8) é um veículo com a adaptação de um dispositivo que permite realizar medidas contínuas do coeficiente de atrito, através de duas rodas situadas em cada lado do eixo longitudinal do mesmo. A taxa de deslizamento das rodas pode variar de 0 a 15%, podendo também operar segundo ângulos de 0 a 15° em relação ao eixo longitudinal do equipamento. A carga que actua sobre as rodas “medidoras” pode variar de 100 a 400 kgf e a velocidade mais usual de teste varia de 20 a 60 km/h, podendo atingir 150 km/h. O equipamento pode registar até sete parâmetros simultaneamente, como força lateral, força lateral esquerda, força longitudinal direita, força longitudinal esquerda, velocidade de rotação das rodas esquerda e direita, cargas que actuam nas rodas esquerda e direita, e velocidade do veículo.

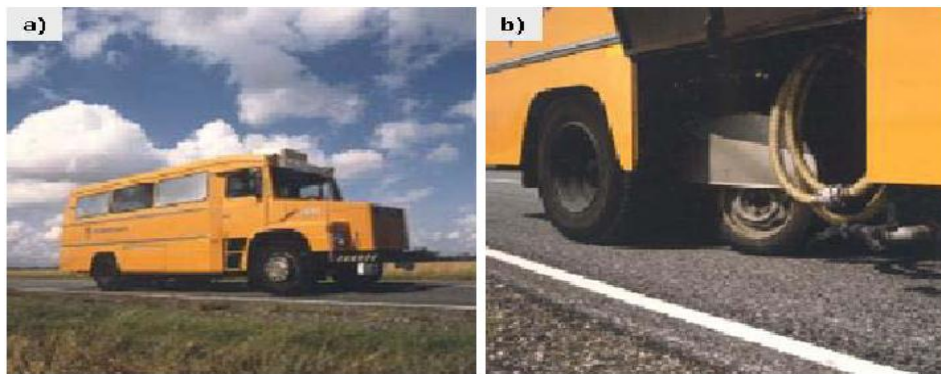


Figura 3.8 – a) Stradograph (à esquerda); b) Pormenor da Roda Oblíqua (à direita) [Santos, 2004]

3.4.3 Odoliograph

O Odoliograph (Figura 3.9) consiste num equipamento de roda oblíqua que foi desenvolvido na Bélgica, sendo muito utilizado no interior do território belga.

Trabalha no princípio da força transversal em que usa um pneu com tamanho do de um carro normal. A roda de teste está montada num veículo ligeiro vulgar, que não possui sistema de armazenamento de água acoplado, pelo qual é necessário um camião-cisterna separado para medições em pavimentos molhados.

Segundo a *TYROSAFE (2008)* o equipamento Odoliograph mede o atrito transversal com um ângulo de roda de 20° . A roda de teste utiliza um pneu liso, a carga vertical estática aplicada é de 2700 N e a velocidade operacional normal é de 80 km/h. O filme de água normalmente utilizado é de 0,5mm.



Figura 3.9 – Odoliograph [TYROSAFE, 2008]

3.4.4 SCRIM

O SCRIM – *Sideways Force Coefficient Routine Investigation Machine* (Figura 3.10), foi desenvolvido pelo TRRL - *Transportation Road Research Laboratory* e vem sendo utilizado em diversos países, como na Inglaterra, na França e nos Estados Unidos.



Figura 3.10 – SCRIM [VECTRA, 2011]

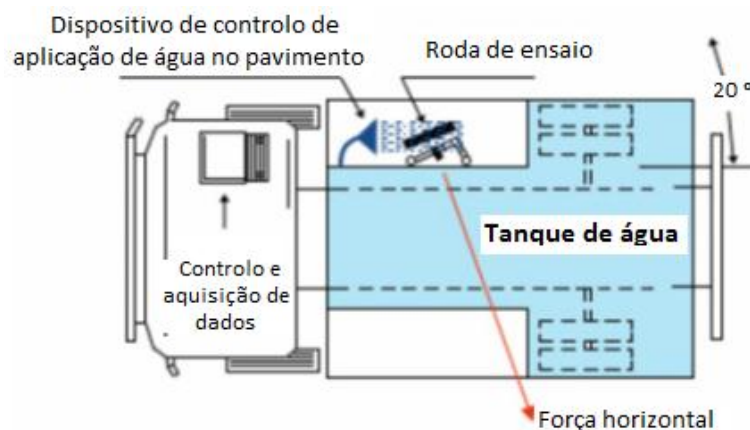


Figura 3.11 – Organização do SCRIM [adaptado de Alves, 2007]

O SCRIM consiste num sistema completamente auto-suficiente onde se tem um chassis de veículo comercial dotado com um tanque de água de grande capacidade (Figura 3.11), para medir o coeficiente de atrito da superfície do pavimento molhada, o método de ensaio está descrito na norma BS 7941-1:2006. Este equipamento é ideal para trabalhar em inspecções com grande capacidade de pesquisa diária da ordem dos 200 a 300 km, dependendo do tipo de pavimento.

O SCRIM necessita de um condutor, podendo actuar com uma velocidade de ensaio de 40 a 140 km/h, sendo que os dados do ensaio são registados e armazenados continuamente por um computador dentro do veículo. O sistema de aquisição e tratamento de dados determina, para cada intervalo mínimo de 10m, durante oito

intervalos de tempo iguais, os valores do coeficiente de atrito transversal, a velocidade real e a média destes valores.

O operador controla a pesquisa e acrescenta marcadores de localização dos dados que são obtidos durante o percurso. A roda de ensaio está localizada a meio do veículo, sendo aplicada na superfície do pavimento com uma determinada carga conhecida, onde durante a medição do coeficiente de atrito a roda trabalha inclinada 20° em relação ao eixo longitudinal do veículo podendo ser levantada quando não está em operação.

Estes equipamentos são dotados de dispositivo de espargimento de água, onde um fluxo controlado de água molha a superfície do pavimento imediatamente à frente da roda de teste, proporcionando um filme de 0,5 a 2mm de espessura nominal.

3.5 Equipamentos de Rodas Parcialmente Bloqueadas

O principal atributo destes equipamentos é o de permitir o registo em contínuo do coeficiente de atrito, operando com deslizamento fixo, casos do *BV11-Skiddometer*, do *GripTester* e do *Surface Friction Tester*, ou com deslizamento variável, como o *Oscar*, o *Stuttgarter Reibungsmesser*, o *RoadSTAR* e o *Tatra Runway Tester*.

3.5.1 De deslizamento fixo

3.5.1.1 BV-11 Skiddometer

O BV-11 Skiddometer consiste num reboque de medição contínua do coeficiente de atrito. Está projectado especificamente para este efeito, podendo ser usado em pavimentos rodoviários ou aeroportuários tanto no Inverno como no Verão, o método de ensaio está descrito na norma ASTM E274-11. Faz medições do atrito com a superfície do pavimento molhada com cerca de 1mm de filme de água, sendo necessário neste caso acoplar uma unidade de água no veículo rebocador. Está equipado com uma roda de teste para a medição do coeficiente de atrito, e é projectado para operar a uma taxa de deslizamento de 17%.

O reboque tem uma estrutura soldada apoiada por três rodas em linha (Figura 3.12). As duas rodas laterais são para garantir a estabilidade do conjunto do reboque e a roda intermediária para fazer as medições do coeficiente de atrito.

Uma força de 100 kgf é aplicada sobre a roda de medição que pode ser composta por pneus de baixa ou alta pressão. As medidas de resistência são levadas a cabo por um sensor, os dados são recolhidos, processados e armazenados por um computador no interior do veículo rebocador. O sistema faz o controlo da água de acordo com a especificação do filme de água definido.



Figura 3.12 – BV-11 Skiddometer [GDDKiA, 2009]

3.5.1.2 GripTester

O GripTester é um equipamento utilizado para determinar o coeficiente de atrito sobre pavimentos rodoviários e aeroportuários, cujo ensaio e metodologia são reconhecidos internacionalmente pela PIARC/AIPCR e pela ICAO – *International Civil Aviation Organization*.

Consiste num equipamento robusto, compacto e leve, fácil de operar e que realiza as medidas de atrito de modo contínuo, constituído por um reboque de três rodas do tipo deslizômetro (Figura 3.13), também pode ser utilizado numa versão onde é empurrado manualmente (Figura 3.14), sendo a sua utilização só aplicável no caso de estudos específicos ou em zonas de difícil acesso - *Micro GripTester*. A roda central que é a responsável pela medição do atrito tem a rotação retardada operando com uma taxa de deslizamento controlada de 15%, o equipamento quando rebocado pode atingir a velocidade de até 100 km/h.



Figura 3.13 – GripTester [Harverson, 2003]



Figura 3.14 – Micro GripTester [Findlay Irvine, 2011]

O funcionamento do GripTester obedece ao princípio da roda bloqueada e arrasto fixo, com forças verticais e horizontais sendo continuamente medidas e totalizadas a cada 10 ou 20 metros. O equipamento é rebocado por um veículo equipado com um depósito com capacidade de 400 a 1000 Litros de água e um dispositivo controlador da vazão. A água é proporcionalmente espalhada sob a roda de teste para cada velocidade de levantamento, de modo a garantir uma película de espessura mínima igual a 0,5mm.

Antes do início da medição com o equipamento, procede-se à sua verificação prévia (Figura 3.15). Este procedimento é fácil e rápido, e com a unidade de processamento de sinais ligada e virando o GripTester ao contrário (com as rodas para cima), consiste nos seguintes aspectos:



Figura 3.15 – Verificação prévia do GripTester [Romão, 2010]

1. **Alinhamento:** o eixo e a correia de transmissão tem que formar um ângulo recto, o dispositivo de saída de água deve ser alinhado com a roda de medição e situar-se a 20mm da superfície, e a roda dentada deve cobrir o sensor de proximidade.
2. **Correia de Transmissão:** deve verificar-se a sua tensão e lubrificação, a correia deve fazer um movimento vertical de 25 a 40mm no ponto médio entre os pneus, ao proceder-se à sua lubrificação deve ter-se o cuidado de não derramar óleo, especialmente sobre a roda de medição.
3. **Pneumáticos:** a pressão deve ser de 137,8 kPa em todo o pneumático e devem ser limpos, sem depósitos nem óleos, as ranhuras da borracha dos pneus das rodas motrizes devem ter, no mínimo, 2mm de altura, e as da roda de medição, 4mm.
4. **Suspensão,** deve verificar-se as condições dos amortecedores e das molas, que devem proporcionar um movimento suave quando solicitados.

Vistos todos estes aspectos, coloca-se o GripTester na posição de medição, empurrando-o seguidamente para a frente e para trás de modo a calibrar o sistema de medição.

A borracha do pneu da roda de ensaio é padronizada segundo normas internacionais: ASTM E274-11 e BS 7941-2:2000. As forças verticais e horizontais são medidas continuamente por tensiômetros, *strain gages*. Os valores médios calculados são exibidos no monitor do computador de bordo a cada 10 metros de levantamento, juntamente com os valores médios da velocidade desenvolvida pelo veículo rebocador do equipamento. O coeficiente de atrito entre duas superfícies é determinado pela natureza de cada uma das superfícies em atrito e pela força normal actuante no contacto.

A expressão utilizada pelo GripTester para o cálculo do coeficiente de atrito, no caso o valor do **Grip Number** (GN) é:

$$GN = \frac{F_v}{F_h} \quad (3.2)$$

Sendo:

GN – Grip Number (Coeficiente de atrito – adimensional);

F_v – Força Vertical (kgf);

F_h – Força Horizontal (kgf).

De realçar que as forças verticais e horizontais são as actuantes no GripTester no momento da medição no campo.

O Grip Number exhibe valores que variam entre 0 e 1,2 GN, associados à velocidade de ensaio (BS 7941-2:2000).

Para padronizar os resultados do ensaio, de acordo com o IFI – *International Friction Index*, estabeleceu-se a seguinte equação:

$$IFI = F_{60} = 0,0821 + 0,9104 \times GN \times e^{\frac{0,15S-60}{S_p}} \quad (3.3)$$

Sendo:

GN – Grip Number;

S – Velocidade de ensaio;

S_p – Constante da velocidade de referência;

F_{60} – Valor do atrito à velocidade de 60 km/h.

3.5.1.3 Surface Friction Tester

O Surface Friction Tester (SFT) consiste num veículo automóvel modificado que efectua a medição contínua do coeficiente de atrito que é realizada por uma quinta roda instalada no eixo traseiro, que opera com uma taxa de deslizamento de 15% (Figura 3.16), o método de ensaio está descrito na norma ASTM E1551-08. Tem um sistema de espargimento que permite a aplicação de uma lâmina de água de espessura média de 1mm, as velocidades de ensaio mais usuais são de 96 km/h. As informações obtidas são registadas e processadas por um computador portátil de bordo.



Figura 3.16 – Surface Friction Tester [Airport Surface Friction Tester, 2011]

De acordo com a *Airport Surface Friction Tester* (ASFT), o SFT é constituído pelas seguintes unidades (Figura 3.17):



Figura 3.17 – Organização do SFT [Airport Surface Friction Tester, 2011]

1. **Sistema Informático:** o sistema informático do SFT processa todas as medições e contempla uma impressora e um painel, com apenas seis teclas para facilitar a manipulação do sistema. O computador é pré-programado para a medição e apresentação dos resultados, o sistema controla o processo de medição e apresenta os resultados no painel do computador ou é impresso em papel.
2. **Reservatório de Água:** o SFT tem um auto-sistema de pulverização de água sobre a superfície do pavimento imediatamente à frente da roda de ensaio. O reservatório tem volume suficiente para medir mais de 6000 metros de pista com um filme de água de espessura de 1mm.
3. **Sistema de Medição Computorizado:** consiste num computador secundário que auxilia o computador principal fazendo medições que são depois convertidas em formato digital e enviadas para o computador principal, juntamente com os pulsos a partir do pulso transmissor. Este sistema também

é capaz de executar testes no sistema, o que torna desnecessário qualquer ajustamento.

- 4. Unidade Eléctrica:** é uma unidade eléctrica centralizada muito fácil de alcançar contendo componentes do sistema de medição.
- 5. Transmissor de Torção:** quando é realizada a medição a roda desliza sobre a superfície do pavimento, o atrito gera uma torção que é transferida para a cadeia e medida por um sistema sensor de carga.
- 6. Sensor de Carga Vertical:** este controla a pressão vertical para baixo criada pelo sistema hidráulico, e faz os ajustamentos necessários para ela. Garante um absoluto contacto com o terreno sendo a pressão mantida constante.
- 7. Roda de Teste:** a roda de teste situa-se no eixo traseiro e contempla um pneu que foi desenvolvido para fins específicos de medição em aeroportos correlacionando bem com as características das aeronaves. O pneu pode ser de baixa (200 kPa) ou alta pressão (700 kPa).
- 8. Sistema Hidráulico:** este sistema proporciona uma pressão constante na roda de teste.

3.5.2 De deslizamento variável

São capazes de medir o atrito com baixa e alta taxa de deslizamento, pois o travamento das rodas pode ser total (100% de deslizamento) ou parcial, permitindo-se obter o valor máximo e mínimo do coeficiente de atrito.

3.5.2.1 Oscar

O Oscar é habitualmente usado na Noruega e o equipamento de ensaio opera medindo o atrito longitudinal, o seu princípio recorre a um eixo de teste que leva a roda de medição do coeficiente de atrito, montado na parte traseira de um pequeno camião (Figura 3.18). O Oscar mede o atrito com uma taxa de deslize variável, podendo esta ser definida entre 3 e 75%.

O eixo de teste que pode ser elevado quando não está a realizar medições, tem uma roda de ensaio no lado esquerdo provida de um pneu liso padronizado pela norma ASTM E524-08. A roda direita realiza as medidas de velocidade e distância. Tem também um sistema que automaticamente ajusta a força de travagem para manter o deslizamento desejado. A espessura de filme de água utilizado normalmente é 0,5mm e a carga vertical na roda de teste é de 4826 N.



Figura 3.18 – Oscar [TYROSAFE, 2008]

3.5.2.2 Stuttgarter Reibungsmesser

O Stuttgarter Reibungsmesser (SRM) foi desenvolvido através da *Fahrzeugmotoren Stuttgart* (FKFS), este equipamento recorre ao princípio de atrito longitudinal com as rodas de teste montadas na parte traseira de um camião fazendo as medições, ensaio descrito na norma ASTM E1859-11, bem como contém um reservatório de água (Figura 3.19). As medições do coeficiente de atrito podem ser feitas pelos dois pneus, realizando-se em seguida, uma média dos valores tendo assim maior confiança no ensaio.

O SRM pode ser usado com uma roda bloqueada, com uma taxa de deslizamento fixa de 15% ou taxa de deslizamento variável, simulando condições de travagem ABS (*Anti-lock Braking System*). Uma unidade pneumática controla a carga na roda de teste. A lâmina de água aplicada pode variar se assim for necessário entre 0 e 3mm, embora 0,5mm seja a mais usual. A velocidade de medição pode ser seleccionada em 40, 60, 80 ou 100 km/h. Como o veículo de medição é um camião de grande porte, este apresenta limitações de velocidade aplicadas em curva.



Figura 3.19 – Stuttgarter Reibungsmesser [TYROSAFE, 2008]

3.5.2.3 RoadSTAR

O RoadSTAR trabalha no princípio do atrito longitudinal, o equipamento de medição é composto por uma roda montada na parte traseira do chassi de um camião modificado que também contém um reservatório de água e o equipamento de controlo de dados no interior da cabine (Figura 3.20a), o método de ensaio está descrito na norma ASTM E1859-11.

Em operação normal o equipamento obtém uma medida contínua do coeficiente de atrito longitudinal com uma roda do tamanho de um carro vulgar. A medição do atrito pode ser realizada com a roda bloqueada, com uma taxa de deslizamento fixa de 18% ou para outras medidas de comparação com a taxa de deslizamento variável (37,5%, 50% e 75%). O RoadSTAR também está provido de um sensor a laser na frente da roda de teste para medir a macrotextura na superfície seca.

A roda de teste está localizada no lado direito do veículo (Figura 3.20b) medindo o atrito na sua parte traseira. Podem-se realizar medições com taxas de deslizamento diferentes, usando uma caixa de engrenagem específica. Um fluxo controlado de água molha a superfície do pavimento imediatamente à frente da roda de teste de acordo com a lâmina de água teórica definida. A quantidade de água requerida é automaticamente ajustada para a lâmina de água desejada e para a velocidade de medição.

O filme de água geralmente utilizado varia entre 0,5 e 2mm e a velocidade de ensaio pode chegar a 120 km/h. A velocidade padrão é de 60 km/h permitindo medições do atrito longitudinal em curvas com um raio superior a 85 metros. Se o raio da curva for inferior a 85 metros, a velocidade operacional deve ser reduzida.



Legenda:

1. Roda de Teste
2. Cilindro Pneumático
3. Saída de água
4. Sistema Colector de Água
5. Caixa de Engrenagem
6. Reservatório de Água
7. Cabine de Armazenagem de Dispositivos
8. Cabine de Operador e Registo de Dados Digitais Recolhidos

Figura 3.20 – a) RoadSTAR (à esquerda); b) Roda de Teste (à direita) [TYROSAFE, 2008]

3.5.2.4 Tatra Runway Tester

O Tatra Runway Tester (TRT) foi desenvolvido na República Checa para efectuar medições de rotina, ao nível do coeficiente de atrito em estradas de grande extensão. O equipamento de medição está localizado por baixo do veículo especialmente modificado para o efeito (Figura 3.21), a especificação do ensaio está descrita na norma ASTM E1859-11. O TRT mede o atrito longitudinal com uma taxa de deslizamento fixa de 25% ou com deslizamento variável entre 0 e 100%.



Figura 3.21 – Tatra Runway Tester [TYROSAFE, 2008]

O TRT usa um cilindro hidráulico em combinação com um sensor de pressão aplicando e controlando a carga vertical na roda de teste durante uma medição. A carga vertical pode ser ajustada de 500 N a 1400 N, mas usualmente utiliza-se 1400 N.

O sistema de travagem pode ser fixado para providenciar uma taxa de deslizamento fixo entre 1% e 100%, embora 25% seja a normalmente usada para medidas rotineiras. O sistema também pode mudar automaticamente à taxa de deslizamento de 0 – 100% para

obter a curva da relação Atrito/Taxa de Deslizamento. Uma espessura de filme de água teórica pré-definida pode ser especificada para todas as medidas, normalmente usa-se 0,5mm.

3.6 Considerações Finais

No Quadro 3.1, como síntese, é apresentado o resumo das características funcionais dos diversos equipamentos de medição do coeficiente de atrito.

Quadro 3.1 – Resumo dos equipamentos de medição do coeficiente de atrito

Equipamento	Norma	Características
Portáteis	PÊNDULO BRITÂNICO	ASTM E303 - 08 Pêndulo padronizado com uma base de borracha Perda de energia é a medida de atrito Baixo custo e facilidade de operação Possibilidade de amostras em laboratório e pontos
	DYNAMIC FRICTION TESTER	ASTM E1911-09 Três barras de borracha na parte inferior Gira com velocidade tangencial de 0 a 80 km/h Disco incide sobre a superfície do pavimento
Rodas Bloqueadas	ADHERA	ASTM E274-11 Actua no princípio de atrito longitudinal Roda de medição simula e investiga a travagem Opera com velocidades entre 40 e os 120 km/h
	MADER	- Actua no princípio de atrito longitudinal Travões de disco, travamento rápido das rodas Transdutores de força
Rodas Oblíquas	MU-METER	ASTM E670-09 Medição a partir de roda alinhada diagonalmente Equipamento rebocado, constituído por três rodas
	STRADOGRAPH	- Adaptação de um dispositivo Taxa de deslizamento das rodas varia de 0 a 15% Carga nas rodas medidoras varia de 100 a 400 kgf Velocidade de 20 a 60 km/h, máximo de 15 km/h Pode registar até sete parâmetros
	ODOLOGRAPH	- Roda de teste está montada num veículo vulgar Mede atrito transversal com ângulo de roda de 20° Carga vertical estática de 2700N Velocidade de 80 km/h Filme de água de 0,5mm
	SCRIM	BS 7941-1:2006 Sistema completamente auto-suficiente Ideal em pesquisas diárias de 200 a 300 km/h Velocidade de 40 a 120 km/h Filme de água de 0,5 a 2mm

Rodas Parcialmente Bloqueadas	<i>Deslizamento Fixo</i>	BV-11 SKIDDOMETER	ASTM E274-11	Usado em pavimentos rodoviários e aeroportuários, no Inverno e/ou Verão Filme de água de 1mm Opera a uma taxa de deslizamento de 17% Força vertical de 100 kgf
		GRIPTESTER	ASTM E274-11 BS 7941-2:2000	Robusto, compacto e leve Fácil de operar Roda central é a medidora Medições a cada 10 ou 20m Filme de água de 0,5mm
		SURFACE FRICTION TESTER	ASTM E1551-08	Veículo automóvel Opera a uma taxa de deslizamento de 15% Filme de água de 1mm Velocidade de 95 km/h
	<i>Deslizamento Variável</i>	OSCAR	ASTM E524-08	Veículo automóvel Opera a uma taxa de deslizamento de 3 a 75% Filme de água de 0,5mm Carga vertical estática de 4826N
		STUTTGARTER REIBUNGSMESSER	ASTM E1859-11	Rodas de teste estão na parte traseira Medições podem ser feitas pelos dois pneus Taxa de deslizamento de 15% ou variável Filme de água de 0 e 3mm Velocidade de 40, 60, 80 ou 100 km/h Limitações de velocidade em curva
		ROADSTAR	ASTM E1859-11	Roda de teste na parte traseira Taxa de deslizamento de 18% ou variável Filme de água de 0,5 a 2mm Velocidade até 120 km/h Velocidade de 60 km/h para Raio > 85m Raio < 85m, reduzir velocidade operacional
		TATRA RUNWAY TESTER	ASTM E1859-11	Deslizamento de 25% ou variável entre 0 e 100% Carga vertical estática de 500 a 1400N Filme de água de 0,5mm

4 Ensaio de Comparação de Medição do Coeficiente de Atrito com o Equipamento GripTester

4.1 Generalidades

O ensaio de comparação interlaboratorial (ECI) teve por objectivo principal a realização de um conjunto de ensaios entre equipamentos idênticos de medição do coeficiente de atrito, GripTester, com a participação de algumas das entidades nacionais possuidoras deste equipamento, para desta forma se obterem resultados com a finalidade de análise do desempenho de cada equipamento mas também análise da repetibilidade, da reprodutibilidade e da estimativa da incerteza associadas à medição do coeficiente de atrito em pavimentos rodoviários e aeroportuários com este tipo de equipamento.

A execução do ECI foi estabelecida no sentido de estudar os seguintes factores de comparação:

- ☞ Análise e avaliação do desempenho dos diversos equipamentos;
- ☞ Estudo em termos da repetibilidade e da reprodutibilidade dos resultados obtidos;
- ☞ Identificação e análise das possíveis fontes de incerteza do ensaio bem como estimar essa mesma incerteza;

4.2 Local de Ensaio

O ensaio de comparação decorreu nas instalações militares da Força Aérea Portuguesa (FAP), em Alverca do Ribatejo, mais precisamente no caminho de apoio paralelo à pista principal da Base Aérea de Alverca (Figura 4.1), designado *Taxiway Foxtrot*.



Figura 4.1 – Base Aérea de Alverca [adaptado de Google Earth, 2011]

A escolha do *Taxiway Foxtrot* de Alverca para local de ensaio deveu-se à disponibilidade prestada por uma das entidades participantes no ensaio de comparação, LSP – *Laboratório de Solos e Pavimentos da Força Aérea*, em disponibilizar este seu espaço para a realização do ensaio. A escolha por este local deveu-se ainda, ao facto de este ser um espaço de reduzida utilização, ao nível aeroportuário, e de assim se poder fazer o ensaio sem qualquer intromissão no possível tráfego.

A realização do ECI neste local e nestas condições permitiu realizar um conjunto vasto de ensaios de repetição, para comparação dos ensaios feitos à mesma camada de superfície, quer este seja pavimento rodoviário ou aeroportuário, possibilitando obter valores de amostra mais esclarecedores de repetibilidade, de reprodutibilidade e ao nível da estimativa das incertezas.

O pavimento a ser ensaiado é do tipo flexível, com uma camada de desgaste de espessura de 80mm em mistura betuminosa.

4.3 Entidades Participantes

Em Portugal são cinco as entidades possuidoras do equipamento GripTester, segundo a informação dada pelo representante do fabricante a nível nacional, a Tecnilab Portugal, SA. Para a realização do ECI, foi feito o convite a todas as entidades detentoras do equipamento a nível nacional para participarem no mesmo, porém houve duas entidades que não puderam participar.

Desta forma, a realização do ECI, contou com a presença de apenas três das entidades nacionais possuidoras do equipamento GripTester, as quais efectuaram os ensaios com o equipamento próprio completo: veículo de reboque, reservatório de água e GripTester.

As entidades e os equipamentos (número de série e modelo) participantes no ensaio foram as seguintes:

- ☞ Laboratório de Solos e Pavimentos da Força Aérea (LSP) – **GT302 / MK2C** (Figura 4.2)



Figura 4.2 – GripTester do LSP

- ☞ Instituto Superior Técnico (IST), Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes – **GT421 / MK2D** (Figura 4.3)



Figura 4.3 – GripTester do IST

👉 Laboratório Nacional de Engenharia CIVIL (LNEC) – **GT264 / MK1C** (Figura 4.4)



Figura 4.4 – GripTester do LNEC

No Quadro 4.1 são apresentadas as observações dos equipamentos GripTester presentes no ECI.

Quadro 4.1 – Observações dos modelos de GripTester [TECNILAB, 2011]

Equipamento	Modelo	Observações
GT 302	<i>MK2C</i>	Jipe de reboque - LAND ROVER <i>Discovery</i> Reservatório atrelado de 1000 Litros
GT 421	<i>MK2D</i>	Carrinha adaptada de reboque – FIAT <i>Doblò</i> Reservatório flexível de 500 Litros
GT 264	<i>MK1C</i>	Carrinha adaptada de reboque – FORD <i>Transit</i> Reservatório rígido de 1000 Litros

4.4 Organização e Especificações

A organização e as especificações do ECI, tiveram por base o modelo do programa de execução do ECI, definido pela entidade promotora do ensaio, a RELACRE e, mais especificamente, *ENSAIOS DE CAMPO – Medição do Atrito em contínuo com GripTester*.

A norma *British Standard*, BS 7941-2:2000 e as especificações ICAO - *International Civil Aviation Organization*, dado serem os documentos de referência para a realização destes ensaios em Portugal, no que diz respeito, respectivamente, aos pavimentos rodoviários e aeroportuários.

Assim, o ECI foi realizado tendo em conta os seguintes critérios previamente estabelecidos:

- ☞ 1 alinhamento longitudinal de ensaio, com o início e o fim visivelmente marcados sobre o pavimento, com uma extensão de 1000m, seleccionado no perfil transversal do *Taxiway Foxtrot* (Figura 4.5);
- ☞ 2 sentidos de medição do atrito ao longo do alinhamento de ensaio, sentido directo (SD) e sentido inverso (SI);
- ☞ 3 velocidades distintas de corridas de ensaio, 30 (V30), 50 (V50) e 65 (V65) km/h;
- ☞ 3 corridas de repetição, na medição do atrito no alinhamento de ensaio, para V30 e V65;
- ☞ 6 corridas de repetição, na medição do atrito no alinhamento de ensaio, para V50;
- ☞ Troços de medição de 10m para cada equipamento;
- ☞ Lâmina de água de 1mm;
- ☞ Para cada repetição, os equipamentos registam os valores de:
 - Grip Number (GN);
 - Força (*Load*);
 - Velocidade (*Speed*);
 - Caudal (*Flow*).



Figura 4.5 – Alinhamento longitudinal de ensaio de 1000m [adaptado de Google Earth, 2011]

Uma vez que um dos equipamentos participante não permitiu a medição da Força (*Load*), este parâmetro não foi apresentado nem analisado.

4.5 Condições de Realização e Resultados

O ensaio de comparação decorreu no dia 14 de Julho de 2011 e teve início com o primeiro ensaio a meio da manhã, sensivelmente às 10:36h e terminou com o último ensaio às 17:30h.

No dia da realização do ECI, estava um dia de Sol quente, tempo seco, com o céu limpo e com vento de fraca intensidade. Em resultado destas condições climatéricas, o pavimento a ensaiar apresentava-se completamente seco (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Vista geral do local e do pavimento

Inicialmente, tentou-se fazer todos os ensaios recorrendo sempre com o mesmo veículo de reboque e reservatório de água, de forma a agilizar a realização das diversas corridas do ensaio. Porém, através de uma análise dos resultados obtidos nas primeiras corridas, constatou-se que existia uma incompatibilidade entre o sistema operativo do computador de bordo e os diferentes equipamentos GripTester, nomeadamente no dispositivo controlador da vazão de água.

Face a esta incompatibilidade, cada entidade com os seus próprios meios completos (veículo de reboque, reservatório de água e GripTester) executou os seus ensaios de forma ininterrupta, fazendo a corrida num dado sentido, por exemplo SD (Figura 4.7.a) e, logo em seguida, invertendo para a corrida em SI (Figura 4.7.b).

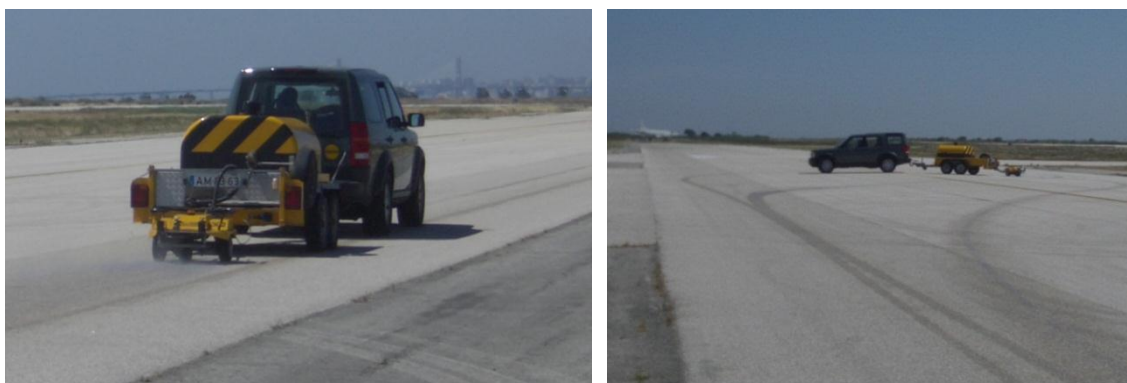


Figura 4.7 – a) Ensaio em curso num dos sentidos; b) Manobra de inversão da corrida de SD para SI

Visto tratar-se de um ensaio de comparação de equipamentos idênticos na medição do coeficiente de atrito, foi garantida a confidencialidade dos mesmos. Sendo assim, os resultados apresentados não nomeiam a entidade à qual pertencem, pois são identificados por Laboratório 1 (**L1**), Laboratório 2 (**L2**) e Laboratório 3 (**L3**).

Os resultados obtidos pelos equipamentos são apresentados como valores médios do GN por troços de 10m, referenciados em relação ao ponto de início do ECI em cada sentido, sendo também indicado o valor da Velocidade média do equipamento e o Caudal nesse troço de 10m. Acresce ainda que no decorrer do ECI nem sempre foi possível manter a velocidade do equipamento constante, procurando-se como critério que esta nunca tivesse um afastamento superior a 10% da velocidade de ensaio, o que se conseguiu cumprir ao longo de todo o ECI.

No Quadro 4.2 são apresentadas a hora de início e fim das diversas corridas realizadas, por Laboratório (L1, L2, L3) e por Velocidade (V30, V50, V65).

Quadro 4.2 – Sequência horária da execução do ECI

Hora Inicio / Hora Fim	L1	L2	L3
V30	16:12 / 16:30	12:38 / 12:52	10:36 / 10:49
V50	16:33 / 17:11	12:54 / 14:03	10:52 / 11:11
V65	17:16 / 17:30	14:05 / 14:14	11:14 / 11:22

No Quadro 4.3 estão indicadas as temperaturas do ar, mínima e máxima, registadas pela estação meteorológica da Base Aérea de Alverca, que se verificaram no decorrer das diversas corridas do ECI, igualmente, por Laboratório (L1, L2, L3) e por Velocidade (V30, V50, V65).

Quadro 4.3 – Temperaturas mínima e máxima do ar, registadas na execução do ECI [LSP, 2011]

Temperatura (°C)	L1	L2	L3
V30	$T_{\min} = 29$	$T_{\min} = 28$	$T_{\min} = 26$
	$T_{\max} = 30$	$T_{\max} = 28$	$T_{\max} = 27$
V50	$T_{\min} = 28$	$T_{\min} = 28$	$T_{\min} = 27$
	$T_{\max} = 30$	$T_{\max} = 29$	$T_{\max} = 28$
V65	$T_{\min} = 28$	$T_{\min} = 29$	$T_{\min} = 28$
	$T_{\max} = 28$	$T_{\max} = 29$	$T_{\max} = 28$

No **Anexo I** são apresentados graficamente todos os resultados dos valores médios do GN, da Velocidade e do Caudal, registados por cada Laboratório (L1, L2, L3), pela velocidade de ensaio (V30, V50, V65), pelo Sentido (SD ou SI) e pelo número da corrida, ao longo dos 1000m do alinhamento de ensaio.

Nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam-se graficamente como exemplo, os valores médios do GN, da Velocidade e do Caudal, registados pelo Laboratório 1 (L1), para a velocidade de ensaio de 30 km/h (V30), e Sentido Directo (SD) para a primeira corrida, ao longo dos 1000m do alinhamento de ensaio.

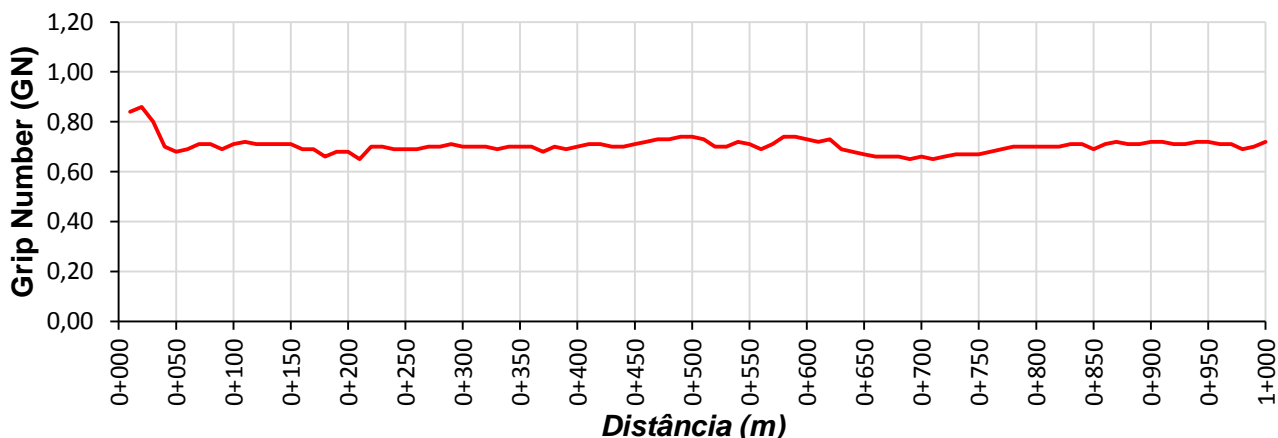


Figura 4.8 – Grip Number da corrida 1 à Velocidade de 30 km/h, no Sentido Directo, Laboratório 1

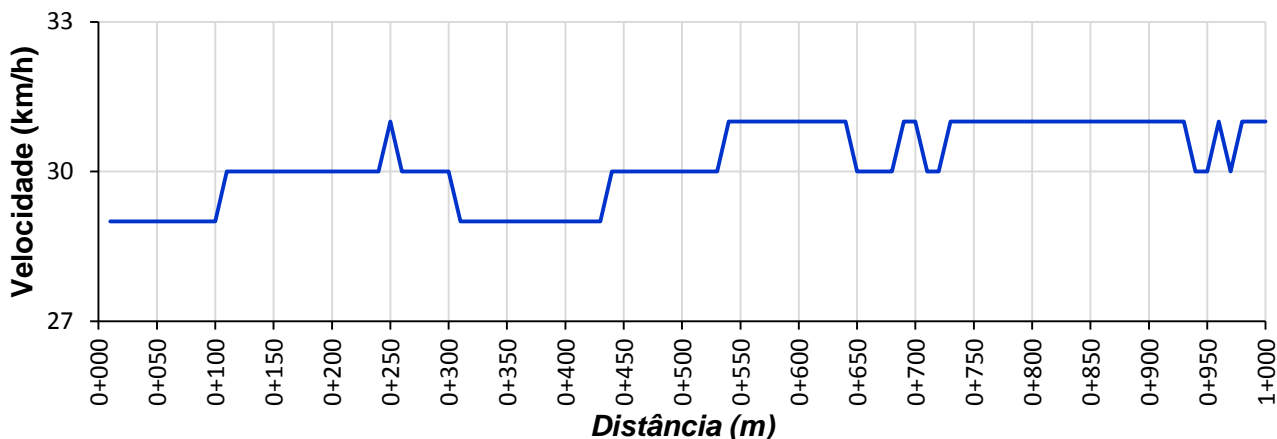


Figura 4.9 – Velocidade da corrida 1 à Velocidade de 30 km/h, no Sentido Directo, Laboratório 1

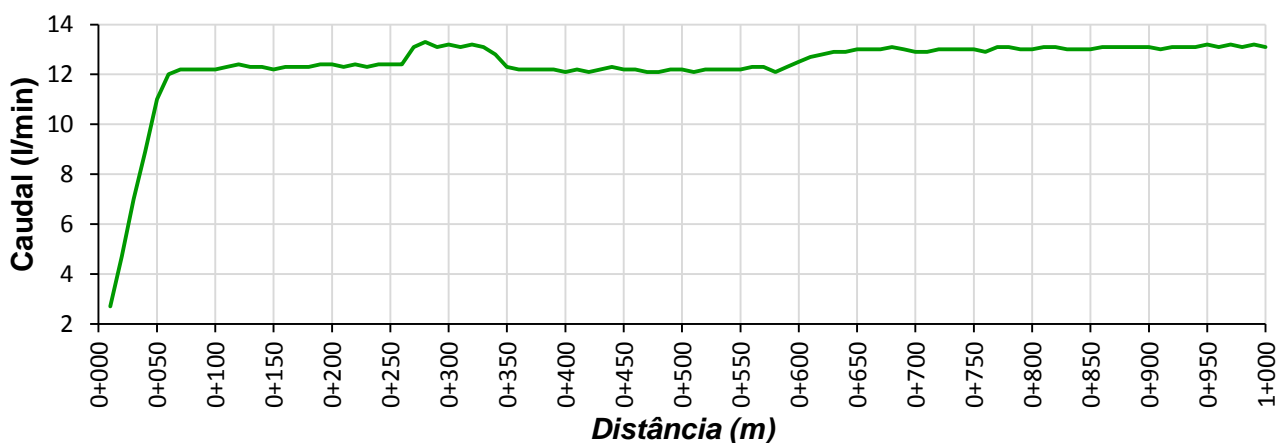


Figura 4.10 – Caudal da corrida 1 à Velocidade de 30 km/h, no Sentido Directo, Laboratório 1

No **Anexo II** são apresentados graficamente todos os resultados dos valores médios do GN, em relação ao número total de corridas, registadas por cada Laboratório (L1, L2, L3), para a mesma velocidade de ensaio (V30, V50, V65) e para o mesmo Sentido, Sentido Directo (SD) e Sentido Inverso (SI), ao longo dos 1000m do alinhamento de ensaio.

Nas Figuras 4.11 e 4.12 são também apresentados graficamente, como exemplo os valores médios do GN, em relação ao número total de corridas, registados pelo Laboratório 1 (L1), Laboratório 2 (L2) e Laboratório (L3), para a mesma velocidade de ensaio de 30 km/h (V30), e para o mesmo Sentido, Sentido Directo (SD) e Sentido Inverso (SI), ao longo dos 1000m do alinhamento de ensaio.

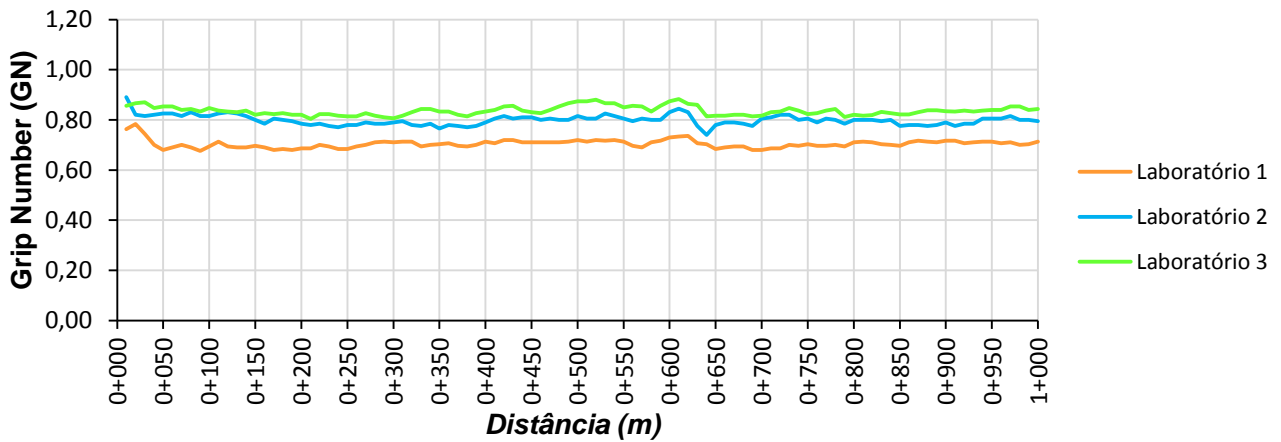


Figura 4.11 – Grip Number à Velocidade de 30 km/h, no Sentido Directo, por Laboratório

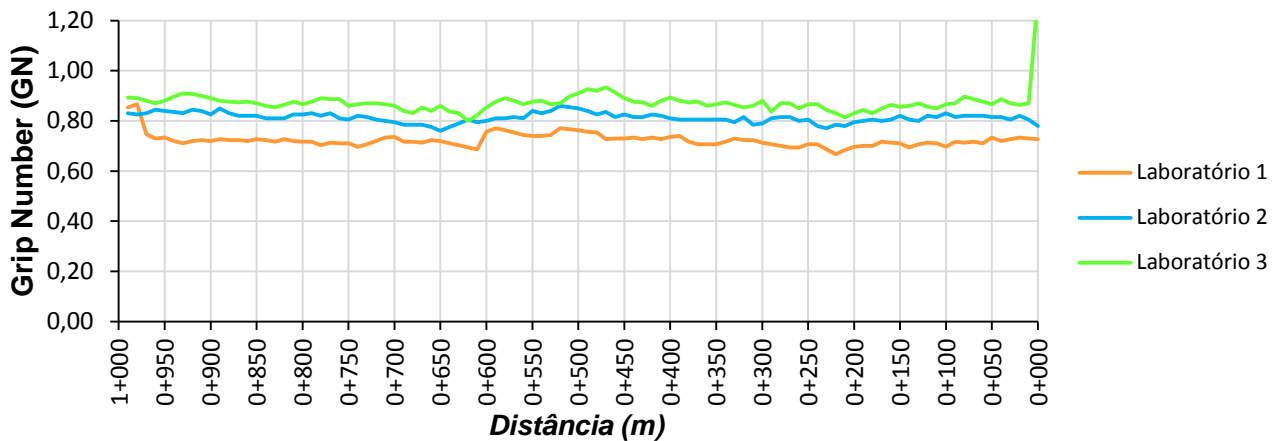


Figura 4.12 – Grip Number à Velocidade de 30 km/h, no Sentido Inverso, por Laboratório

Analisando a Figura 4.11, Figura 4.12 e as figuras do Anexo II, é possível verificar que entre o ponto quilométrico 0+600 e 0+650km, ambos os Laboratórios (L1, L2, L3) registaram a presença de uma descontinuidade ou irregularidade no valor do GN nessa zona.

Em consequência desta análise, entendeu-se que era essencial voltar ao local do ensaio, para realizar uma breve inspecção visual e proceder a eventuais ensaios pontuais na tentativa de perceber o motivo do registo de tal descontinuidade ou irregularidade. No ponto 4.6 deste capítulo é descrito com maior detalhe a inspecção visual realizada e apresentados os resultados dos ensaios pontuais realizados em consequência da inspecção visual.

Igualmente, através de uma análise breve dos valores graficamente registados relativos ao Caudal, consta-se que existiu uma descontinuidade no sistema de vazão de

água por parte dos três equipamentos. Verificou-se que ambos tanto na fase inicial como na fase final do alinhamento de ensaio, registaram valores bastante diferentes em comparação com o que registaram de forma contínua e sem grande disparidade no restante alinhamento de ensaio.

Em consequência desta situação, e para se evitar trabalhar com valores de grande disparidade entre si, optou-se por não se considerarem os valores dos 50m iniciais e dos 50m finais do alinhamento estabelecido de 1000m, passando a partir desta fase, a apresentarem-se dados relativos a um alinhamento de ensaio de 900m de extensão.

4.6 Inspeção Visual e Ensaio Pontuais

Face ao que já foi referido anteriormente do registo de uma certa descontinuidade ou irregularidade, decidiu-se voltar ao local do ensaio a fim de perceber quais os possíveis motivos para tal registo.

Assim, através de uma inspeção visual, apenas se pode constatar que na zona existe uma junta de pavimentação, podendo recair sobre esse elemento o motivo para tal ocorrência da descontinuidade nos valores do GN. Desta forma, em seguida procedeu-se à realização de alguns ensaios pontuais na zona envolvente à junta de pavimentação, com recurso ao Método Volumétrico da Mancha e ao Pêndulo Britânico. Estes ensaios foram realizados pelo Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes, do Instituto Superior Técnico.

Como procedimento para a organização dos ensaios pontuais, tanto para o ensaio do Método Volumétrico da Mancha como para o Pêndulo Britânico, optou-se por estudar em duas zonas distintas (Zona 1 e Zona 2), ambas localizadas respectivamente antes e depois da junta de pavimentação, quatro pontos ao km 0+600 (Zona 1), Sentido Directo / Sentido Inverso, e quatro pontos ao km 0+650 (Zona 2), Sentido Directo / Sentido Inverso. De referir que a inspeção visual e os respectivos ensaios pontuais decorreram no dia 22 de Setembro de 2011, sensivelmente por volta das 17:00hrs, e a essa hora registou-se uma temperatura superficial do pavimento de 30,8 °C.

Em seguida indicam-se os resultados obtidos e as respectivas conclusões, tendo em conta os resultados dos ensaios pontuais realizados.

Ensaio da Técnica Volumétrica da Mancha

Este ensaio, descrito na norma EN 13036-1 “*Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric technique*”, foi utilizado com o objectivo de determinar a profundidade média da textura da camada de desgaste do pavimento, e o resultado do ensaio é constituído pela profundidade média de material espalhado, MTD, obtido através da seguinte expressão:

$$MTD = \frac{4.V}{\pi.D^2} \tag{4.1}$$

Sendo que:

MTD – *Mean Texture Depth*, Profundidade média da textura superficial (mm);

V – Volume de material espalhado (mm³);

D – Diâmetro médio da área coberta pelo material (mm).

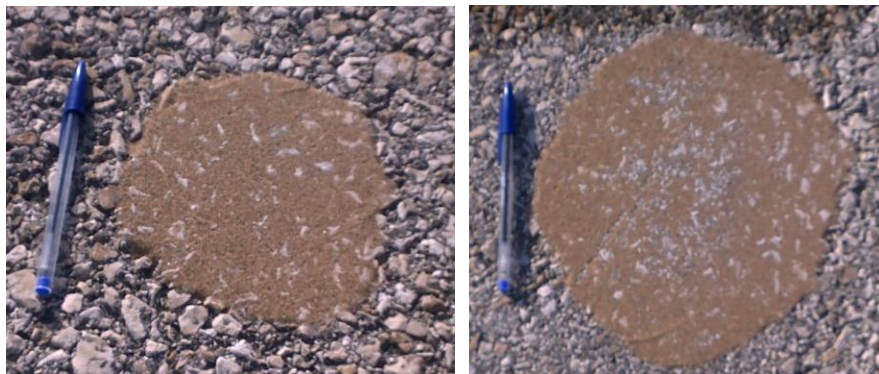
No Quadro 4.4 e Quadro 4.5 são apresentados os valores da profundidade média da textura superficial para os quatro pontos de ensaio, das duas zonas distintas (Zona 1 e Zona 2), e na Figura 4.13 ilustra-se as diferenças da textura na superfície do pavimento verificadas através do ensaio da Técnica Volumétrica da Mancha.

Quadro 4.4 – Ensaio da Técnica Volumétrica da Mancha na Zona 1 ao km 0+600

Ponto de Ensaio	D _{médio} (mm)	V (mm ³)	MTD (mm)
1.1	176	25000	1,03
1.2	169		1,11
1.3	164		1,18
1.4	178		1,00

Quadro 4.5 – Ensaio da Técnica Volumétrica da Mancha na Zona 2 ao km 0+650

Ponto de Ensaio	D _{médio} (mm)	V (mm ³)	MTD (mm)
2.1	188	25000	0,90
2.2	220		0,66
2.3	158		1,28
2.4	161		1,23



Zona 1

Zona 2

Figura 4.13 – Diferenças da textura na superfície do pavimento

Ensaio do Pêndulo Britânico

O ensaio, descrito na norma EN 13036-4 “*Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 4: The pendulum test*”, teve por objectivo a medição localizada do coeficiente de atrito cinemático, através da avaliação da energia absorvida por atrito, quando a superfície de borracha do pêndulo desliza sobre o pavimento. Em seguida indicam-se os valores médios para as duas zonas em estudo, de referir que se fizeram dois ensaios com a superfície da borracha a deslizar no Sentido Directo e dois no Sentido Inverso, para cada uma destas duas zonas.

O Quadro 4.6 e Quadro 4.7 expõem os valores do atrito cinemático gerado através da superfície da borracha do pêndulo ao deslizar sobre o pavimento, tendo sido feitos em dois pontos de ensaio no Sentido Directo e dois no Sentido Inverso, isto para cada uma das zonas de ensaio (Zona 1 e Zona 2), antes e depois da junta de pavimentação. Na Figura 4.14 ilustra-se um exemplo da realização do ensaio da avaliação do coeficiente de atrito pelo procedimento do Pêndulo Britânico.

Quadro 4.6 – Ensaio do Pêndulo Britânico na Zona 1 ao km 0+600

Ponto de Ensaio	Sentido	BPN
1.1	Inverso	75
1.2		75
1.3	Directo	80
1.4		75

Quadro 4.7 – Ensaio do Pêndulo Britânico na Zona 2 ao km 0+650

Ponto de Ensaio	Sentido	BPN
2.1	Inverso	70
2.2		70
2.3	Directo	70
2.4		80



Figura 4.14 – Realização do ensaio do Pêndulo Britânico

Face aos resultados apurados com base nos ensaios pontuais realizados, e relacionando os valores dos dois tipos de ensaios pontuais realizados para as duas zonas distintas em estudo, próximas da junta de pavimentação, pode concluir-se que as duas zonas se diferenciam em termos da textura superficial do pavimento, especialmente ao nível da microtextura. Uma das zonas, Zona 2, apresenta um pavimento com características da microtextura de média a medianamente grossa em comparação com o da Zona 1, que apresenta uma microtextura grosseira ou aberta, sendo claramente possível distinguir o tipo de textura que ambas as zonas apresentam.

Fica reforçada a ideia da necessidade de uma prévia inspeção visual ao pavimento de ensaio antes da realização do ECI, na tentativa de aperceber se existem ou não zonas susceptíveis de se registarem valores anormais ou irregulares.

4.7 Considerações Finais

Apesar de só haver a participação de três entidades no ECI conclui-se que é possível uma análise de resultados com vista aos objectivos propostos. Ao mesmo tempo resulta uma experiência que é importante para edições futuras que se deseja virem a ocorrer.

Igualmente importante é garantir as condições de operação dos equipamentos durante o ECI. A este respeito é fundamental assegurar que os equipamentos estão calibrados e que as verificações prévias foram realizadas. Também se considera importante que a Velocidade e o Caudal apresentem a menor dispersão possível durante a execução dos ensaios por cada um dos equipamentos. De salientar que um dos equipamentos apresentou uma variação do caudal que não é desejável que aconteça.

5 Análise e Interpretação dos Resultados

5.1 Generalidades

A análise e interpretação dos resultados do ensaio de comparação interlaboratorial teve por base os valores obtidos no local de ensaio, ao longo do conjunto dos diversos Ensaios de Comparação Interlaboratorial (ECI's) realizados pelos três equipamentos presentes no ensaio de comparação.

Em seguida pretende-se fazer a análise e interpretação dos resultados obtidos pelos diferentes Laboratórios (L1, L2, L3), no que diz respeito às recomendações habitualmente seguidas pelas entidades organizadoras deste tipo de ECI's.

Em primeiro lugar foi necessário identificar os valores considerados aberrantes, provenientes de erros de medição, anomalias do equipamento ou da execução dos ensaios, os quais afectam a análise e que por isso tem de ser eliminados. Para este efeito, considerou-se adequado recorrer aos testes estatísticos de *Cochran* e *Grubbs*, sendo inicialmente avaliada a atipicidade das dispersões e de seguida das médias:

- i. Eliminação dos valores anormais, atípicos a 99% da probabilidade;
- ii. Marcação dos valores atípicos a 95% da probabilidade.

Desta primeira análise, verificou-se que não era necessário eliminar nenhum dos resultados dos ensaios dos laboratórios participantes, dado que todos eles passaram nos critérios de selecção anteriormente referidos.

Na análise estatística dos resultados, calculou-se primeiramente o valor médio, o desvio padrão e o intervalo de confiança a 95%. Para cada um dos laboratórios participantes, foram calculadas as estatísticas habituais (média e desvio padrão), o que permitiu numa primeira análise confirmar as grandezas de influência - Velocidade e Caudal - e analisar a sua importância de acordo com o programa de execução, previamente estabelecido.

Em seguida, procurou-se fazer uma análise mais aprofundada dos resultados em termos da repetibilidade, da reprodutibilidade e da incerteza.

5.2 Análise dos Resultados

No Quadro 5.1 apresentam-se os valores da média das médias (*M*) do Grip Number (GN), obtidos por cada Laboratório (L1, L2, L3), para cada Velocidade de ensaio (V30, V50, V65) e para cada Sentido (Sentido Directo (SD) ou Sentido Inverso (SI) associado a cada corrida) e do respectivo desvio padrão (*Dpa*) associado à média.

Quadro 5.1 – Média e Desvio Padrão do Grip Number, em função da Velocidade e do Sentido

Corridas	Sentido Directo						Sentido Inverso						
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SI1	SI2	SI3	SI4	SI5	SI6	
Velocidade 30 km/h (V30)													
L1	<i>M</i>	0,70	0,71	0,69	<i>b)</i>			0,72	0,72	0,72	<i>b)</i>		
	<i>Dpa</i>	0,0213	0,0216	0,0183				0,0201	0,0263	0,0267			
L2	<i>M</i>	0,79	0,80	<i>a)</i>				0,82	0,81	<i>a)</i>			
	<i>Dpa</i>	0,0253	0,0193	<i>a)</i>				0,0278	0,0205	<i>a)</i>			
L3	<i>M</i>	0,84	0,83	0,83				0,87	0,87	0,86			
	<i>Dpa</i>	0,0199	0,0220	0,0235				0,0269	0,0248	0,0263			
Velocidade 50 km/h (V50)													
L1	<i>M</i>	0,66	0,68	0,67	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69	0,69	0,68	0,68	0,68
	<i>Dpa</i>	0,0320	0,0254	0,0228	0,0197	0,0218	0,0195	0,0241	0,0210	0,0210	0,0239	0,0249	0,0228
L2	<i>M</i>	0,78	0,78	0,79	0,78	0,76	<i>a)</i>	0,74	0,77	0,79	0,77	0,76	0,76
	<i>Dpa</i>	0,0290	0,0296	0,0240	0,0280	0,0331	<i>a)</i>	0,0165	0,0216	0,0390	0,0298	0,0264	0,0255
L3	<i>M</i>	0,81	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,85	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85
	<i>Dpa</i>	0,0221	0,0253	0,0260	0,0214	0,0219	0,0196	0,0237	0,0250	0,0206	0,0222	0,0219	0,0244
Velocidade 65 km/h (V65)													
L1	<i>M</i>	0,61	0,62	0,61	<i>b)</i>			0,61	0,61	0,61	<i>b)</i>		
	<i>Dpa</i>	0,0373	0,0298	0,0329				0,0276	0,0249	0,0188			
L2	<i>M</i>	0,70	0,72	0,72				0,69	0,75	0,71			
	<i>Dpa</i>	0,0347	0,0406	0,0206				0,0320	0,0305	0,0281			
L3	<i>M</i>	0,77	0,76	0,81				0,77	0,76	0,84			
	<i>Dpa</i>	0,0276	0,0293	0,0187				0,0240	0,0227	0,0254			

Notas:

- a) Os valores registados nesta corrida não foram considerados válidos para a análise estatística, uma vez que esta foi feita com outro veículo e outro sistema de vazão de água.
- b) Uma vez que para V30 e V65 se estabeleceu, como critério, apenas 3 corridas de repetição para cada um dos sentidos, logo não se apresentam quaisquer valores para as corridas 4, 5 e 6.

Tendo em consideração as diversas médias das médias do GN obtidas em função da variação da Velocidade e do Caudal, pode constatar-se que o facto de se medir o atrito em sentidos diferentes, SD e SI, não revela diferenças significativas nos valores obtidos em função do Sentido da corrida de ensaio.

Apesar de se constatar uma ligeira tendência para os valores obtidos no SI serem em geral um pouco superiores conforme mostra a Figura 5.1, considerou-se, no entanto, que os valores medidos em sentidos diferentes podem ser analisados em conjunto.

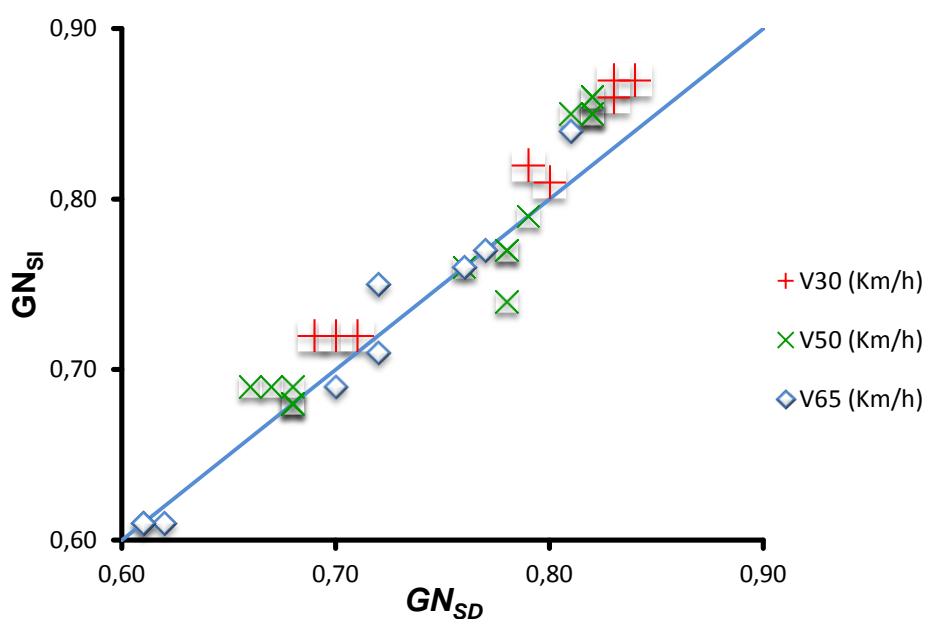


Figura 5.1 – Análise da influência do Sentido no Grip Number, por Velocidade

5.3 Análise das Grandezas de Influência

O ensaio de comparação interlaboratorial (ECI) foi conduzido de forma a permitir avaliar a influência da Velocidade e do Caudal de água, no valor do GN medido pelos diferentes equipamentos. Procede-se em seguida à análise da influência destas grandezas nos resultados obtidos.

5.3.1. Velocidade

A Figura 5.2 mostra graficamente a influência da Velocidade nos valores do GN, por Laboratório (L1, L2, L3), e nela estão representadas a média das médias do GN, de todas

as corridas, para a respectiva Velocidade de ensaio (V30, V50, V65), e no respectivo desvio padrão associado à média.

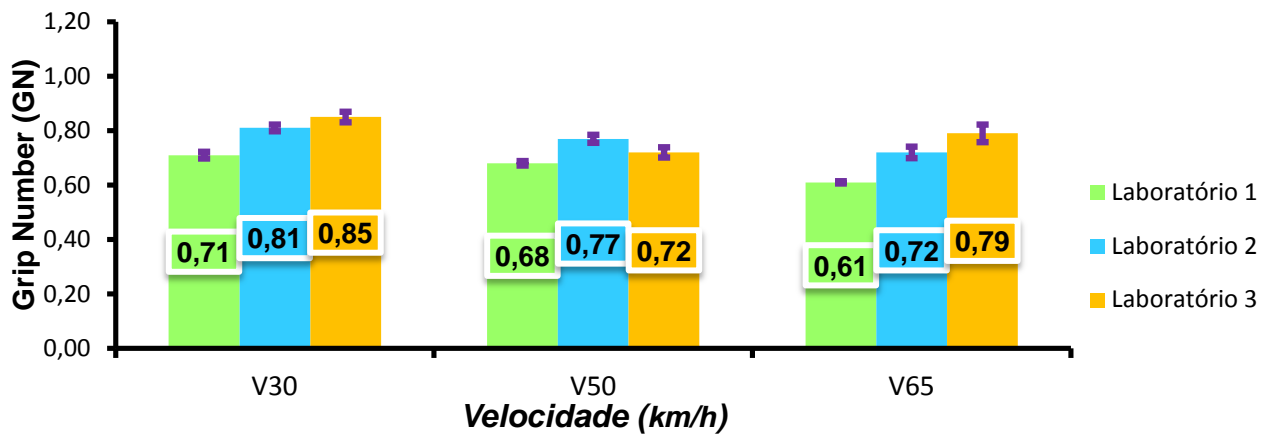


Figura 5.2 – Influência da Velocidade no Grip Number

Observando a figura anterior e relacionando-a com os valores do Quadro 4.1, do capítulo anterior, parece confirmar-se que o horário de realização do ensaio tem uma considerável influência nos resultados obtidos, por influência da temperatura.

Veja-se por exemplo, o caso do Laboratório 1. Esta entidade foi a que realizou os ensaios entre as 16:12hrs e as 17:30hrs, período em que foi expectável em condições normais que o pavimento apresentasse uma temperatura à superfície mais elevada. Para este caso constata-se que os valores do GN são inferiores aos registados pelos Laboratórios 2 e 3, sendo as diferenças entre os Laboratórios 1 e 3, mais significativas, dado que o Laboratório 3 realizou os seus ensaios entre as 10:36hrs e as 11:22hrs, e neste período o pavimento teve muito provavelmente a menor temperatura à superfície, em comparação com a que provavelmente se verificava na altura da realização dos ensaios do Laboratório 1. Estas constatações carecem obrigatoriamente de uma validação futura mais fundamentada, tendo em conta as conclusões de experiências anteriores de investigação documentadas na bibliografia, como por exemplo as obtidas por Romão (2010) acerca da influência da temperatura na medição do coeficiente de atrito.

Dado tratar-se da primeira experiência na realização deste ECI não foi possível a medição directa da temperatura da superfície do pavimento o que, em conjunto com o facto de terem sido utilizados equipamentos distintos, leva a que a informação disponível não permita a análise da influência desta grandeza nos resultados obtidos.

Constata-se ainda que a realização de ensaios à Velocidade de 30 km/h (V30), proporcionou resultados aceitáveis quando comparados com os associados às velocidades normalizadas e estabelecidas para este tipo de ensaios de comparação (V50 para pavimento rodoviário e V65 para pavimento aeroportuário), uma vez que não se verificou resultados significativamente diferentes.

5.3.2. Caudal

Nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 mostra-se a influência do Caudal nos valores do GN, por Laboratório (L1, L2, L3), através da representação da média das médias do GN de todas as corridas, para a Velocidade de ensaio (V30, V50, V65), respectivamente.

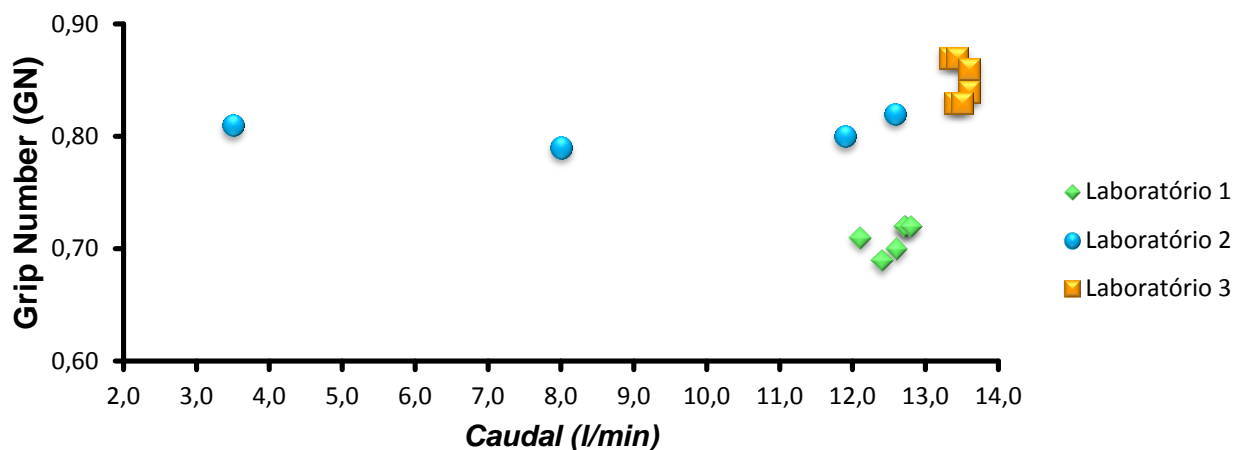


Figura 5.3 – Influência do Caudal no Grip Number à de Velocidade 30 km/h

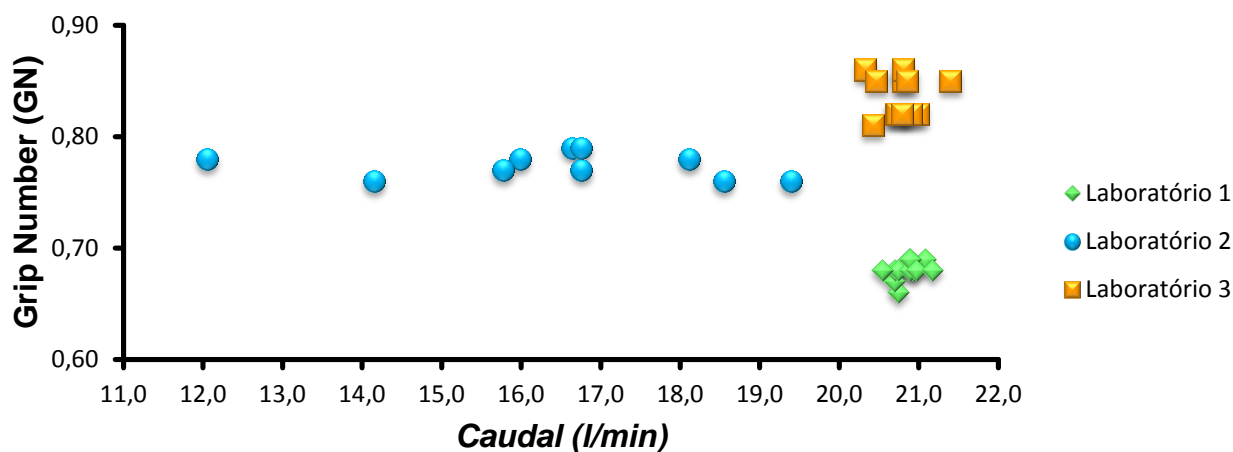


Figura 5.4 – Influência do Caudal no Grip Number à de Velocidade 50 km/h

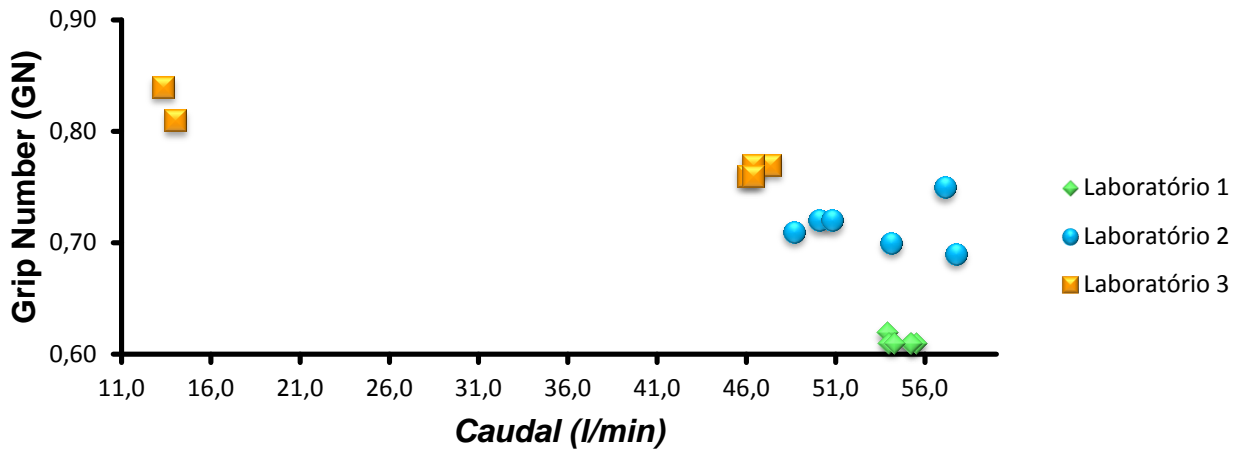


Figura 5.5 – Influência do Caudal no Grip Number à de Velocidade 65 km/h

Analisando as três figuras anteriores em conjunto, verifica-se que o Laboratório 1 obteve valores bastante mais próximos ou repetitivos entre si, sem revelar uma grande disparidade entre os valores medidos nas diversas corridas para a mesma Velocidade de ensaio (V30, V50, V65). Pelo contrário, o Laboratório 2 foi aquele que apresentou maior irregularidade de resultados, dado ter registado valores bastante diferentes uns dos outros, para distintas Velocidades de ensaio (V30, V50, V65), muito provavelmente associada à irregularidade do seu sistema de vazão de água.

Observando ainda as três figuras e o facto de se ter para os Laboratórios 2 e 3 uma acentuada irregularidade no sistema de vazão de água, nota-se que à medida que o Caudal de água aumenta o valor do GN tende a diminuir, embora de forma não muito significativa, o que era perfeitamente expectável, dada a influência do grau de molhagem no nível de atrito sobretudo para caudais pequenos.

5.4 Análise da Repetibilidade, Reprodutibilidade e Incerteza

A repetibilidade apresenta-se como a fidelidade de medição para um conjunto de condições de repetibilidade segundo o *IPQ (2008)*, está associada a leituras repetidas de um mesmo parâmetro, pelo mesmo equipamento exprime a variação das medições efectuadas, sendo vulgarmente utilizada na avaliação do desempenho de um determinado equipamento. Neste trabalho, adoptou-se para a sua caracterização, o Coeficiente de Variação da Repetibilidade (CV_r).

Quanto à análise da reprodutibilidade que se apresenta como a fidelidade de medição para um conjunto de condições de reprodutibilidade segundo o *IPQ (2008)*, está associada a leituras de um mesmo parâmetro mas medida por equipamentos diferentes, esta foi analisada com base no Coeficiente de Variação da Reprodutibilidade (CV_R).

No Quadro 5.2 são apresentados em função da Velocidade de ensaio (V30, V50, V65) os *Valores de Precisão* calculados de acordo com o estabelecido pela norma ISO 5725: 1994 “*Accuracy – Trueness and Precision – Part 2 : Basic method for the determination of Repeability and Reproducibility of a standard measurement method e Part 3 : Intermediate measures of the precision of a standard measurement method*”:

☞ Média (Y)

$$Y = \frac{1}{p} \sum_i^p Y_i \quad \text{com} \quad Y_i = \frac{(y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})}{n} \quad (5.1)$$

Sendo:

Y – Média;

Y_i – Média amostral;

p – Número de laboratórios;

n – Número de ensaios do laboratório.

☞ Desvio Padrão (s)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (Y_i - Y)^2}{p-1}} \quad (5.2)$$

Sendo:

s – Desvio Padrão.

Y – Média;

Y_i – Média amostral;

p – Número de laboratórios;

☞ **Variância da Repetibilidade (S_r^2)**

$$S_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_i - 1) \cdot s_i^2}{\sum_{i=1}^p (n_i - 1)} \quad \text{com} \quad s_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n_i} (y_{ik} - Y_i)^2}{(n_{ik} - 1)} \quad (5.3)$$

Sendo:

S_r^2 – Variância da Repetibilidade;

n_i – Número de ensaios do laboratório i ;

s_i – Desvio Padrão do laboratório i .

n_{ik} – Número do ensaio k do laboratório i ;

y_{ik} – Resultado k do laboratório i .

☞ **Variância Intralaboratorial (S_d^2)**

$$S_d^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (5.4)$$

Sendo:

S_d^2 – Variância Intralaboratorial;

p – Número de laboratórios;

n_i – Número de ensaios do laboratório i .

\bar{y}_i – Média dos resultados do laboratório i ;

\bar{y} – Média das médias dos resultados de todos os laboratórios.

☞ **Variância Interlaboratorial (S_L^2)**

$$S_L^2 = \frac{S_d^2 - S_r^2}{n} \quad \text{com} \quad n = \frac{1}{p-1} \left[\sum_{i=1}^p n_i - \frac{\sum_{i=1}^p n_i^2}{\sum_{i=1}^p n_i} \right] \quad (5.5)$$

Sendo:

S_L^2 – Variância Interlaboratorial;

S_d^2 – Variância Intralaboratorial;

S_r^2 – Variância da Repetibilidade.

☞ **Variância da Reprodutibilidade (S_R^2)**

$$S_R^2 = S_L^2 + S_r^2 \quad (5.6)$$

Sendo:

S_R^2 – Variância da Reprodutibilidade;

S_L^2 – Variância Interlaboratorial;

S_r^2 – Variância da Repetibilidade.

☞ **Coefficiente de Variação da Repetibilidade (CV_r)**

$$CV_r = \frac{S_r}{Y} \quad (5.7)$$

Sendo:

CV_r – Coeficiente de Variação da Repetibilidade;

S_r – Variância da Repetibilidade;

Y – Média.

☞ **Coefficiente de Variação da Reprodutibilidade (CV_R)**

$$CV_R = \frac{S_R}{Y} \quad (5.8)$$

Sendo:

CV_R – Coeficiente de Variação da Reprodutibilidade;

S_R – Variância da Reprodutibilidade;

Y – Média.

☞ **Limite de Repetibilidade (r)**

$$r = 2,83 \times S_r \quad (5.9)$$

Sendo:

r – Limite de Repetibilidade;

S_r – Variância da Repetibilidade.

☞ **Limite de Reprodutibilidade (R)**

$$R = 2,83 \times S_R \tag{5.10}$$

Sendo:

R – Limite de Reprodutibilidade;

S_R – Variância da Reprodutibilidade.

Quadro 5.2 – Valores de Precisão para as Velocidades de ensaio (V30, V50, V65)

Valores de Precisão		V30	V50	V65
Média	Y	0,70	0,76	0,71
Desvio Padrão	s	0,0721	0,0802	0,0907
Variância da Repetibilidade	S_r^2	0,000238	0,000218	0,000506
Variância Intralaboratorial	S_d^2	0,0308	0,0773	0,0495
Variância Interlaboratorial	S_L^2	0,005821	0,006617	0,008166
Variância da Reprodutibilidade	S_R^2	0,0061	0,0068	0,0087
Coeficiente de Variação da Repetibilidade	CV_r	2,0%	1,9%	3,2%
Coeficiente de Variação da Reprodutibilidade	CV_R	9,9%	10,9%	13,1%
Limite de Repetibilidade	r	0,0437	,0418	0,0636
Limite de Reprodutibilidade	R	0,202	0,234	0,264

5.4.1. Repetibilidade

A variável sobre a qual incidiu a análise da repetibilidade, está associada ao número de corridas de ensaio realizadas para cada Velocidade de ensaio (V30, V50, V65). Seguidamente, mostra-se graficamente na Figura 5.6, os Coeficientes de Variação da Repetibilidade (CV_r), tendo em conta o número de corridas e a Velocidade de ensaio.

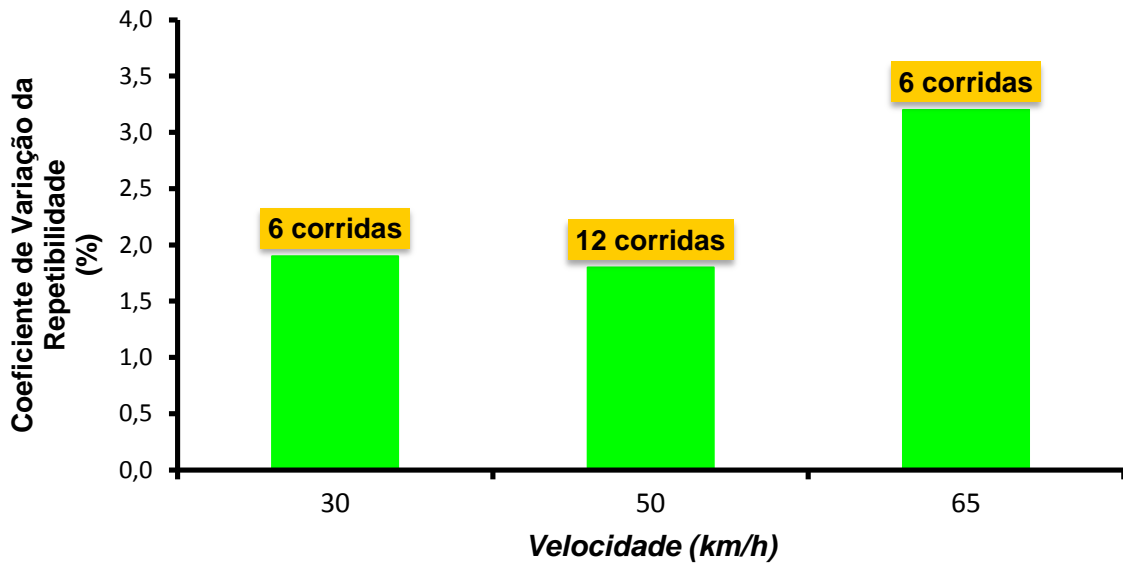


Figura 5.6 – Coeficiente de Variação da Repetibilidade (%)

O gráfico da figura anterior permite-nos concluir que é para a Velocidade de 65 km/h (V65), que os três equipamentos apresentam maior variação nas medições efectuadas, no caso 3,2%. Para as Velocidades de 30 e 50 km/h (V30 e V50), os três equipamentos apresentam idêntica variação nas medições, independentemente do número de corridas do ensaio.

5.4.2. Reprodutibilidade

Tal como para a repetibilidade, a variável analisada na reprodutibilidade foi o número de corridas de ensaio associadas à Velocidade de ensaio (V30, V50, V65). Apresentam-se graficamente na Figura 5.7, os Coeficientes de Variação da Reprodutibilidade (CV_R), tendo em conta o número de corridas e a Velocidade de ensaio.

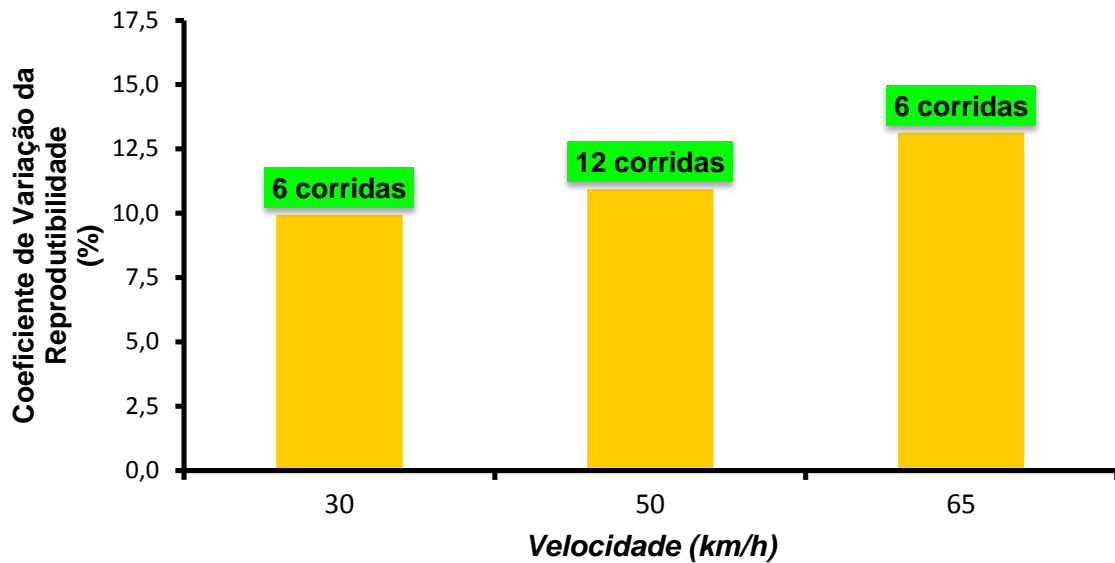


Figura 5.7 – Coeficiente de Variação da Reprodutibilidade (%)

Para a Velocidade mais baixa de 30 km/h (V30), de 6 corridas de ensaio, a variação nas medições efectuadas devido ao equipamento aparenta ser a menor (9,9%). Contudo os resultados obtidos não nos permitem tirar conclusões acerca da influência do número de corridas e da Velocidade na reprodutibilidade.

5.4.3. Incerteza

De acordo com o *IPQ (2008)* a incerteza de uma medição é o parâmetro associado ao resultado dessa medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à mensurada a partir das informações usadas.

Embora, a representatividade dos equipamentos e das condições de análise das grandezas de influência do ECI seja limitada, procura-se em seguida efectuar uma análise das fontes de incerteza e uma estimativa da incerteza do ensaio de medição do coeficiente de atrito com o equipamento GripTester.

A análise realizada é muito simplificada e baseia-se apenas na repetibilidade e reprodutibilidade obtida no ECI.

Fontes de Incerteza

Fontes de incerteza são as grandezas que se consideram contribuir para a dispersão dos resultados da medição em causa.

Tendo em conta a experiência do ECI e alguma da experiência relatada pelos operadores dos três laboratórios participantes, identificam-se as seguintes fontes de incerteza:

- Velocidade de ensaio, que indirectamente pode estar associada ao operador;
- Caudal, igualmente como para a velocidade, cujo sistema deve estar calibrado;
- Temperatura da superfície do pavimento, visto que se notou alguma influência nos valores obtidos;
- Equipamento, uma vez que este carece de calibração (correia de transmissão, roda de ensaio);
- Sentido de ensaio.

Estimativa da Incerteza

Existem diversos métodos de estimativa da incerteza de medição de determinada grandeza. Tendo em conta o trabalho realizado, adoptou-se um cálculo simplificado com base na repetibilidade e reprodutibilidade.

Assim, considerou-se que as fontes de incerteza anteriormente referidas contribuem para o cálculo da *Incerteza Padrão Combinada* (I_C), com base na variância da repetibilidade e na variância da interlaboratorial conforme é apresentado na seguinte expressão:

$$I_C = \sqrt{S_R^2} \quad (5.11)$$

Sendo:

S_R^2 – Variância da Reprodutibilidade.

Adopta-se esta equação uma vez que a Variância da Reprodutibilidade, como se pode constatar na equação 5.6, inclui quer a Variância da Repetibilidade (S_r^2) quer a Variância Interlaborial (S_L^2).

A transformação da I_C na *Incerteza Expandida* (I_{NC}) é feita pela aplicação do factor de expansão (K), que consiste num factor numérico utilizado como multiplicador da incerteza padrão combinada para obtenção da I_C ($2 \geq K \leq 3$), e é calculada pela seguinte expressão:

$$I_{NC} = \pm K \times I_C \quad (5.12)$$

Sendo:

K – Factor de expansão (considerou-se $K=2$ admitindo um número de graus de liberdade infinito para um intervalo de confiança de 95%).

I_C – Incerteza Padrão Expandida.

No Quadro 5.3 são apresentados os valores da I_{NC} do GN para as respectivas Velocidades de ensaio (V30, V50, V65).

Quadro 5.3 – Incerteza Expandida

Velocidade (km/h)	Incerteza Expandida ($\pm I_{NC}$)
V30	0,16
V50	0,17
V65	0,19

5.5 Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos nas diversas corridas de ensaio e em função da variação da Velocidade e do Caudal, constatou-se que o facto de se medir o atrito em sentidos distintos, SD e SI, não teve neste caso significativa relevância nos resultados obtidos, visto se terem obtido valores praticamente semelhantes, apesar de num dos sentidos, SI, se terem registado valores um pouco superiores aos do SD.

Constatou-se que a execução do ECI em horários diferentes, levou a uma significativa diferença nos resultados obtidos, dado que as temperaturas da superfície do pavimento são diferentes. Recomenda-se que em edições futuras, o ECI contemple a análise mais aprofundada do grau de influência desta grandeza.

Foi ainda possível perceber que a variação do Caudal de água não tem uma significativa influência no valor do GN medido, apesar de se ter constatado uma ténue tendência de diminuição do GN em função de um aumento do Caudal.

Em termos da repetibilidade na variação das medições efectuadas por um dado equipamento, verificou-se que quanto maior for a Velocidade de ensaio maior é o Coeficiente de Variação da Repetibilidade, e que quanto maior for o número de corridas de ensaio menor é o Coeficiente de Variação de Repetibilidade desse equipamento.

Em termos da reprodutibilidade, apesar de apenas participarem três entidades, não é clara a influência do número de corridas e da Velocidade de ensaio na reprodutibilidade. Constatando-se que é para a menor Velocidade que se obteve a menor reprodutibilidade.

Ao nível das fontes de incerteza associadas a este ECI, confirmou-se que aspectos como, a velocidade de ensaio por cada corrida, o caudal de água debitado pelo sistema de vazão, a temperatura da superfície do pavimento, as possíveis anomalias do equipamento na falta de verificação prévia, e ainda o sentido são as potenciais fontes de incerteza inerentes à utilização deste equipamento.

6 Considerações Finais

6.1 Síntese do Trabalho

A presente dissertação focalizou-se no estudo da medição do coeficiente de atrito da superfície de pavimentos com o equipamento GripTester, com base na realização de um ensaio de comparação interlaboratorial (ECI) e na respectiva análise e tratamento estatístico dos resultados obtidos.

A componente prática do trabalho consistiu na realização do ECI que teve por objectivo principal a análise do desempenho de equipamentos idênticos através da participação de algumas das entidades possuidoras deste equipamento em Portugal.

Com este ECI foi possível obter resultados para análise da repetibilidade, da reprodutibilidade e da incerteza associada à medição do coeficiente de atrito em pavimentos rodoviários e aeroportuários, através do equipamento GripTester.

Tendo em conta as condições de realização do ECI, também se pretendeu estudar alguns factores com influência no ensaio, como por exemplo a Velocidade e o Caudal.

6.2 Principais Conclusões

Apontam-se em seguida as principais conclusões obtidas tendo por base o ensaio prático desenvolvido e a análise e tratamento estatístico dos resultados do mesmo.

A realização de ensaios à Velocidade de 30 km/h (V30), proporcionou resultados aceitáveis quando comparados com os associados às velocidades normalizadas e estabelecidas para este tipo de ensaios de comparação (V50 para pavimento rodoviário e V65 para pavimento aeroportuário), uma vez que não se verificou resultados significativamente diferentes.

Constatou-se que o facto de se fazer variar o Caudal de água, não tem uma grande influência no valor do GN registado, apesar de se verificar uma ligeira tendência de à medida que o Caudal aumenta, o valor do GN vai diminuindo.

Ao nível da repetibilidade na variação das medições efectuadas por um dado equipamento, concluiu-se que quanto maior for a Velocidade de ensaio, maior é o Coeficiente de Variação da Repetibilidade, e quanto maior for o número de corridas de ensaio, menor será o Coeficiente de Variação de Repetibilidade desse equipamento.

Em relação à reprodutibilidade, foi possível verificar que quanto maior for a Velocidade de ensaio, as alterações do comportamento do operador terão uma maior influência nas medições efectuadas pelos equipamentos.

Quanto às fontes de incerteza associadas a este ECI, constatou-se que aspectos relacionados com o desempenho do operador do equipamento no manuseamento do sistema informático, a velocidade, o caudal, as temperaturas do ar e do pavimento, o equipamento, e o sentido constituem as principais fontes de incerteza na execução deste ensaio.

6.3 Propostas de Trabalhos Futuros

Considera-se que os resultados obtidos constituem um valioso contributo para o conhecimento da medição do coeficiente de atrito da superfície de pavimentos rodoviários e aeroportuários através do equipamento GripTester.

No entanto, considera-se ainda que é fundamental aprofundar o trabalho já desenvolvido pelo que se propõe para trabalhos futuros, o seguinte:

1. Garantir que é feita a verificação prévia dos equipamentos presentes no ensaio de comparação, no próprio local de ensaio. Considera-se que as entidades têm garantidas as calibrações dos equipamentos pelo fabricante.
2. Medir a temperatura superficial do pavimento.
3. Realizar os ensaios da mesma velocidade de ensaio, para os diferentes equipamentos, de forma a minimizar as diferenças nos valores do GN por influência da temperatura.
4. Fazer uma prévia inspecção visual ao local de ensaio, na tentativa de perceber se poderá ou não existir alguma característica do pavimento que possa ter influência nos resultados obtidos.
5. Variar a espessura da lâmina de água, para analisar a ideia de que a influência do Caudal não é significativa nos valores do GN.
6. Maior número de equipamentos participantes.

7. Prévia calibração pelo fabricante.

Ainda como recomendações para a execução de futuras edições que não estejam relacionados com o ECI, é fundamental atender aos seguintes aspectos:

1. Comparação dos valores obtidos pelo GripTester com os valores de outros equipamentos com a mesma finalidade de medição do coeficiente de atrito.
2. Relacionar os valores do Grip Number com a medição directa da textura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, T.S.F. (2007) – “Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários – Aplicação Prática do Radar de Prospecção e do Deflectómetro de Impacto”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

ASTM, American Society for Testing and Materials (2006) – “Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems”. ASTM E867-06. United States of America

ASTM, American Society for Testing and Materials (2008) – “Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester”. ASTM E303-08. United States of America

ASTM, American Society for Testing and Materials (2008) – “Standard Specification for Standard Smooth Tire for Pavement Skid-Resistance Tests”. ASTM E524-08. United States of America

ASTM, American Society for Testing and Materials (2008) – “Standard Specification for Special Purpose, Smooth-Tread Tire, Operated on Fixed Braking Slip Continuous Friction Measuring Equipment”. ASTM E1551-08. United States of America

ASTM, American Society for Testing and Materials (2009) – “Standard Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-meter”. ASTM E670-09. United States of America

ASTM, American Society for Testing and Materials (2009) – “Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties using the Dynamic Friction Tester”. ASTM E1911-09. United States of America

ASTM, American Society for Testing and Materials (2009) – “Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method”. ASTM E1911-09. United States of America

ASTM, American Society for Testing and Materials (2011) – “Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire”. ASTM E274-11. United States of America

ASTM, American Society for Testing and Materials (2011) – “Standard Test Method for Friction Coefficient Measurements Between Tire and Pavement Using a Variable Slip Technique”. ASTM E1859-11. United States of America

Barbosa, F.; Matos, L.; Santos, P. (2009) – “Análise das fontes de incerteza e cálculo da incerteza expandida em ensaios para a determinação da concentração de partículas totais e respiráveis em suspensão no ambiente de trabalho”. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, Lisboa, Portugal

Bernucci, L.B.; Motta, L.M.G. da; Ceratti, J.A.P.; Soares, J.B. (2010) – “Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros”. 3ª Reimpressão, PROASFALTO, Rio de Janeiro, Brasil

Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L.P. (2008) – “Pavimentos Rodoviários”. 3ª Reimpressão, Livraria Almedina, Coimbra, Portugal

BS, British Standard Institution (2000) – “Methods for measuring the skid resistance of pavement surfaces. Test method for measurement of surface skid resistance using the GripTester braked wheel fixed slip device”. BS 7941-2:2000, London, United Kingdom

EASA, European Aviation Safety Agency (2010) – “RuFAB – Runway Friction Characteristics Measurement and Aircraft Braking”. Final Report Volume 3 – Functional Friction, EASA, Cologne, Germany

EN, European Standard (2010) – “Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric technique”. EN 13036-1. CEN, Brussels, Belgium.

EN, European Standard (2009) – “Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 4: The pendulum test”. EN 13036-4. CEN, Brussels, Belgium.

Domingues, F.A.A. (1997) – “Medição da Aderência entre o Pneu e o Pavimento em Pistas Molhadas da Rede Dersa”. EPUSP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

Fernandes, C.I.C.S.H. (2010) – “Sistemas de Gestão de Pavimentos Aeroportuários – Caracterização e Aplicabilidade”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

Fontul, S. (2005) - “Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

GDDKiA (2009) - “Análise sobre pavimentos voláteis, propriedades do desgaste no período inicial de serviço”. Relatório sobre o trabalho de implementação TD-88. Instituto de Investigação de Estradas e Pontes, Varsóvia, Polónia

Harverson, D. (2003) – “International Runway Friction Testing”. PHAROS Enterprises. ICAO Airport PMS seminar, Lima, Perú

IPQ, Instituto Português da Qualidade (2008) – “Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos Básicos, Conceitos Gerais e Termos Associados”. Caparica, Portugal

ISO, International Organization of Standardization (1994) – “Accuracy – Trueness and Precision – Part 2 : Basic method for the determination of Repeability and Reproducibility of a standard measurement method e Part 3 – Intermediate measures of the precision of a standard measurement method”. ISO 5725:1994. Genève, Switzerland

ISO, International Organization of Standardization (1997) – “Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1 : Statistical Pass-By method”. ISO 11819-1:1997. Genève, Switzerland

ISO, International Organization of Standardization (2000) – “Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close – Proximity method”. ISO 11819-2:2000. Genève, Switzerland

Menezes, M.V.P. (2008) – “Estudo das Características de Superfície de Pavimentos Rodoviários Para Análise da Segurança do Tráfego”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

NIPPO, Nippo Sangyo Co., Ltd (2011) – “Product Guide – Dynamic Friction Tester”. Tokyo, Japan

NCHRP, National Cooperative Highway Research Program (2009) – “Guide for Pavement friction”. Project 01-43. The National Academies, Washington, United States of America

Pinto, J.I.B.R. (2003) – “Caracterização Superficial de Pavimentos Rodoviários”. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

Rado, Z.; Radone, E.F. (2003) – “Repeatability and Reproducibility of Saab Friction Measurement Devices in Self-Wet Mode”. Transportation Development Centre of Transport Canada, National Aeronautics and Space Administration. Québec, Canada

RELACRE, Associação de Laboratórios Acreditados de Portugal (2011) – “ENSAIOS DE CAMPO – Medição do Atrito em contínuo com GripTester”. Ensaio de Comparação Interlaboratorial. RELACRE, Lisboa, Portugal

Rodriguez, O.D.G. (2009) – “Evaluation of Pavement Surface Friction Seasonal Variations”. Master Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, United States of America

Romão, J.P.M. (2010) – “Atrito em Pavimentos Aeronáuticos – Estudo de propostas de intervenção na pista 01L – 19R da BA11 - Beja”. Tese de Mestrado. Academia da Força Aérea – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

Santos, A.P.S. (2007) – “Estudo da Eficácia na Redução do Ruído de Tráfego em Pavimentos Drenantes”. Tese de Mestrado. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal

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

Silva, J.P.S. (2008) – “Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários”. Tese de Mestrado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, Brasil

Spielhofer, R. (2009) – “SPENS – Guidelines of a complex methodology for non-destructive pavement measuring techniques”. Sixth Framework Programme – Sustainable Surface Transport. European Commission, DG Research, Austria

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

TYROSAFE (2009) – “Low noise road surfaces: current practices in Europe”. Tyre and Road Surface Optimisation for Skid Resistance and Further Effects, Tire Technology – EXPO 2009, TYROSAFE, Vienna, Austria

Vieira, S.D. (2009) – “Simulação do Comportamento do Tráfego em Ambientes Específicos de Circulação Rodoviária”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

Sítios da Internet

<http://sm.vectweb.pt/media/33/File/Flyers/GripTester.pdf> (Dezembro 2011)

http://sm.vectweb.pt/media/33/File/Flyers/Micro_GripTester.pdf (Dezembro 2011)

http://www.airport-int.com/gallery/asft_airport_surface_friction_tester/asftvolvo-rear-s_01.html
(Dezembro 2011)

<http://www.cpe.vt.edu/pavementevaluation/presentations/Najafi.pdf> (Dezembro 2011)

http://www.findlayirvine.com/uploads/MicroGTData100_8.pdf (*Dezembro 2011*)

<http://www.findlayirvine.com/uploads/documents/GripTester%20Airport.pdf> (*Dezembro 2011*)

http://www.ggm-ev.de/en/system_srtp.html (*Dezembro 2011*)

<http://www.ivt.ethz.ch/iv/measuring/srm> (*Dezembro 2011*)

<http://www.nippou.com/en/products/dft.html> (*Dezembro 2011*)

<http://www.skynet.eng.br/projetos/dec/downloads/13052331666507.pdf> (*Dezembro 2011*)

<http://www.spmet.pt/conceitos%20basicos.pdf> (*Dezembro 2011*)

http://www.tecnilab.pt/content/default.asp?idcat=Betuminosos_prod&idCatM=PRODUTOS&idContent=8D533D17-208A-4560-A8A3-924BCADC685C (*Dezembro 2011*)

<http://www.tecnilab.pt/content/default.asp?idcat=GripTester%20&idCatM=PRODUTOS&idContent=17945C26-82B0-4CD9-86BE-42E0FFC8D84A> (*Dezembro 2011*)

<http://www.tecnilab.pt/content/default.asp?idcat=GripTester%20&idCatM=PRODUTOS&idContent=C10322BC-5E2A-4DAC-BBA0-C8A69743ED98> (*Dezembro 2011*)

<http://www.tyrosafe.fehrl.org> (*Dezembro 2011*)

<http://www.vectra.fr/sites/fr/materiels-et-solutions/auscultations-des-chaussees/scrim.html>
(*Dezembro 2011*)

Anexos
