

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO EM REVESTIMENTOS**  
**ASFÁLTICOS AEROPORTUÁRIOS.**

**JOÃO PAULO SOUZA SILVA**

**ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.**

**DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: G. DM 165/2008**

**BRASÍLIA / DF: MARÇO/2008**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO EM REVESTIMENTOS  
ASFÁLTICOS AEROPORTUÁRIOS.**

**JOÃO PAULO SOUZA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MÁRCIA APS, DsC. (IPT/SP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 05 de Março de 2008.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, JOÃO PAULO SOUZA. Aderência Pneu-pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários.[Distrito Federal] 2008 xix, 134 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2008) Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Pavimentação	2. Aeroportos
3. Aderência pneu-pavimento	4. Aeroporto Internacional de Brasília/DF
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, J.P.S. (2008). Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-165/2008, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: João Paulo Souza Silva.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Aderência Pneu-pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários.

GRAU / ANO: Mestre / 2008

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

João Paulo Souza Silva

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia

Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e Ambiental – Prédio SG-12, Universidade de Brasília.

CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

jpss@unb.br

## ***DEDICATÓRIA***

**À minha mãe, Maria de Fátima, que colocou os estudos como prioridade em minha vida e acreditou no meu sucesso; meus irmãos Robson e Patrícia que sempre me deram carinho, admiração, respeito e dignidade pessoal.**

## ***AGRADECIMENTOS***

Gostaria de expressar profunda gratidão à minha família pelo apoio e estímulo com que sempre me incentivou durante meses de pesquisa, organização e desenvolvimento deste trabalho.

Estou especialmente grato à Universidade de Brasília, pela oportunidade que me foi concedida.

Aos amigos Ângela, Cláudia Champi, Davi Pantoja, Janaína Lima, Joseleide, Maria Tâmara e tantos outros que colaboraram, profissional e pessoalmente através de sua compreensão e amizade para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da TQA, Alexandre Resque, Aureliano, Gregório e Luiz Gustavo, amigos e irmãos de coração, eternos e verdadeiros.

Tenho o privilégio e o prazer de agradecer meu orientador, Professor Márcio Muniz de Farias, pelos valiosos ensinamentos, dedicação e pela presteza, que foram fundamentais para o início e término desse trabalho.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília pelo excelente curso.

Ao Laboratório de Engenharia Rodoviária do CEFTRU/UnB pela disponibilização dos equipamentos utilizados nos ensaios de campo.

Á Infraero pelo constante apoio durante a campanha experimental.

E, principalmente, a Deus que me possibilitou ter e estar entre a minha família e os meus amigos.

Foi uma excelente e gratificante experiência de vida.

Esta dissertação apresenta o estudo das condições de aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários, propriedade de maior interesse para a segurança das aeronaves quanto à hidroplanagem em condições de pista molhada. Ainda que estatisticamente o transporte aéreo possua baixo índice de acidentes quando comparado com outras modalidades de transporte terrestre, quando estes ocorrem, apresentam características de catástrofes com grandes efeitos sociais. Neste sentido, este trabalho abordará tópicos importantes e necessários para melhor compreensão dos fenômenos que envolvem esse tema, apresentando conceitos relativos ao atrito em pavimentos aeroportuários e algumas recomendações normatizadas sobre a frequência e medição de atrito e remoção de borracha do pavimento, empregadas com finalidades antiderrapantes. A avaliação da aderência pneu-pavimento foi realizada por meio da avaliação da macrotextura (método Mancha de Areia), microtextura (atrito medido com Pêndulo Britânico), drenabilidade (Vazão obtida com Drenômetro) e atrito dinâmico, medido pela Infraero utilizando o MuMeter. A antiga pista do Aeroporto Internacional de Brasília/DF foi escolhida para o estudo de caso, pois conta com tráfego de aeronaves suficiente para promover os problemas relacionados à aderência, relatados na literatura. Os ensaios de campo levantados nesta pesquisa indicam que o volume de tráfego provoca grande acúmulo de borracha, principalmente na região onde foi executado o *grooving*, influenciando nas condições de drenabilidade superficial e no desempenho da pista relacionado às condições de aderência pneu-pavimento.

## **ABSTRACT**

---

This dissertation presents a study about adherence between tire and surface layer of airport pavements. This property is of major interest concerning safety against aquaplaning in wet conditions. Although the number of accidents in air transport is statistically low, their occurrence is generally catastrophic and presents a high social impact. Therefore this study focus on some import topics which are necessary for a better understanding of the phenomena related to theme. The concepts relative to friction in airport pavements are reviewed, as well as the regulations that set recommendations about the frequency of friction surveys and tire rubber cleaning and others anti skidding measures. The evaluation of tire-pavement adherence was based on the following procedures: macro-texture with Sand Patch Test, micro-texture using British Pendulum, Drainability using the Flowmeter, and Dynamic Friction using a MuMeter owned by Infraero (Brazilian Airport Infra-structure Agency). The old runway of Brasilia International Airport was chosen as a case study, considering its number of landing and take-off operations to be high enough as to cause most adherence related problems reported in the specialized literature. The in situ surveys carried out during this research showed that the volume of aircrafts traffic provoked a severe deposition of rubber on the pavement surface, mainly in the regions with grooving, thus influencing on the surface water run-off and on the overall performance of the pavement with respect to tire-surface adherence.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - JUSTIFICATIVA DO TEMA .....	2
1.1.1 - IMPORTÂNCIA.....	2
1.1.2 - OPORTUNIDADE .....	3
1.1.3 - VIABILIDADE .....	3
1.2 - OBJETIVOS.....	3
1.2.1 - OBJETIVO GERAL .....	3
1.2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1 - INTRODUÇÃO.....	7
2.2 - O SURGIMENTO DO AEROPORTO .....	7
2.3 - ACIDENTES AERONÁUTICOS .....	8
2.3.1 - FATOR HUMANO .....	9
2.3.2 - FATOR METEOROLÓGICO.....	10
2.3.3 - A AERONAVE.....	10
2.3.4 - A INFRA-ESTRUTURA.....	10
2.3.5 - ACIDENTES NA AVIAÇÃO BRASILEIRA .....	11
2.4 - AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES FUNCIONAIS .....	15
2.5 - O ATRITO.....	16
2.5.1 - ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO .....	17
2.5.1.1 - O DESLIZAMENTO.....	18
2.5.1.2 - RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO .....	22
2.5.2 - INTERAÇÃO PNEU-PISTA MOLHADA.....	26
<b>CAPÍTULO 3 - PARÂMETROS DE PROJETO E MANUTENÇÃO .....</b>	<b>37</b>
3.1 - INTRODUÇÃO.....	37
3.2 - AVALIAÇÃO DE DEFEITOS FUNCIONAIS .....	37
3.3 - VARIÁVEIS QUE AFETAM NO ATRITO.....	41
3.4 - ÍNDICE INTERNACIONAL DE ATRITO (IFI) .....	48
3.5 - TECNOLOGIA ANTIDERRAPANTE .....	50
3.6 - RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS DE AERÓDROMOS .....	54
3.6.1 - CÁLCULO DO ACN/PCN .....	55
<b>CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>58</b>
4.1 - PLANO DE AMOSTRAGEM .....	59

4.2 - LEVANTAMENTO DE DEFEITOS FUNCIONAIS.....	69
4.3 - LEVANTAMENTO DA TEXTURA.....	72
4.3.1 - MACROTEXTURA – MÉTODO MANCHA DE AREIA.....	72
4.3.2 - MICROTEXTURA – MÉTODO PÊNULO BRITÂNICO.....	74
4.3.3 - MEDIÇÃO DA CAPACIDADE DE DRENAGEM DA SUPERFÍCIE.....	75
4.3.4 - CÁLCULO DO IFI.....	77
4.3.5 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS LEVANTADOS.....	78
4.3.6 - MEDIÇÃO CONTÍNUA DE ATRITO – MÉTODO MUMETER.....	80
4.4 - REMOÇÃO DE BORRACHA.....	81
4.5 - LEVANTAMENTO DA RESISTÊNCIA DA PISTA – MÉTODO ACN/PCN.....	83
4.5.1 - AVALIAÇÃO O PAVIMENTO.....	83
<b>CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>86</b>
5.1 - INTRODUÇÃO.....	86
5.2 - LEVANTAMENTO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS.....	86
5.3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	91
5.3.1 - MACROTEXTURA.....	91
5.3.2 - MICROTEXTURA.....	95
5.3.3 - DRENABILIDADE.....	98
5.4 - ATRITO DA PISTA.....	102
5.4.1 - MEDIÇÃO DE ATRITO COM MU-METER.....	104
5.5 - CORRELAÇÕES ENTRE OS ENSAIOS.....	105
5.5.1 - DRENABILIDADE <i>VERSUS</i> MANCHA DE AREIA.....	106
5.5.2 - MANCHA DE AREIA <i>VERSUS</i> PÊNULO BRITÂNICO.....	107
5.5.3 - DRENABILIDADE <i>VERSUS</i> PÊNULO BRITÂNICO.....	108
5.5.4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO LINEAR.....	109
5.6 - AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA PISTA (ACN/PCN).....	110
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>113</b>
6.1 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	115
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>124</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>134</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Vista aérea do Aeroporto Internacional de Brasília em 2007.....	7
Figura 2.2. Aeronaves a Jato em operação .....	11
Figura 2.3. Acidentes aéreos x Frota de aeronaves no Brasil. ....	12
Figura 2.4. Acidentes e Fatalidades de Aeronaves por Fases de Vôo no período 1959 – 2005.....	13
Figura 2.5. Esquema do conceito de atrito.....	17
Figura 2.6. Efeito do deslizamento no coeficiente de atrito.....	19
Figura 2.7. Mecanismos do atrito ao deslizamento de um pneu sobre um pavimento. ....	20
Figura 2.8. Variação do coeficiente de atrito com a velocidade .....	21
Figura 2.9. Participação da adesão, histerese e desgaste no atrito de deslizamento. ....	21
Figura 2.10. Deformação de um pneu estático sob condições de carregamento.....	22
Figura 2.11. Forças atuantes num pneu durante deslocamento.....	23
Figura 2.12. (a) Estrutura de um pneu diagonal; (b) Estrutura de um pneu radial.....	25
Figura 2.13. Variação do coeficiente de atrito ao rolamento com a velocidade. ....	25
Figura 2.14. Efeito da pista molhada e pista seca sobre o coeficiente de atrito.....	26
Figura 2.15. Tendência global do atrito em pavimento molhado <i>versus</i> velocidade.....	27
Figura 2.16. Fenômeno da hidroplanagem.....	28
Figura 2.17. Pista aeroportuária com caimento satisfatório.....	29
Figura 2.18. Banda de rodagem de um pneu aeronáutico após hidroplanagem por desvulcanização.....	29
Figura 2.19. Modelo de hidroplanagem combinada: 3 zonas, 4 fases. ....	31
Figura 2.20. (a) Trem de pouso principal; (b) Área de contato pneu-pavimento.....	32
Figura 2.21. Efeito da banda de rodagem sobre a tração em condições de hidroplanagem.....	33
Figura 2.22. Velocidade de hidroplanagem <i>versus</i> pressão do pneu. ....	33
Figura 2.23. Arrasto hidrodinâmico. ....	34
Figura 2.24. Acúmulo de água na superfície do pavimento.....	35
Figura 2.25. Lâmina d'água <i>versus</i> deslocamento do pneu. ....	36
Figura 3.1. Desempenho de um pavimento.....	41
Figura 3.2. Diferença entre microtextura e macrotextura .....	42
Figura 3.3. Flow-meter.....	44
Figura 3.4. Correlação entre drenabilidade e mancha de areia. ....	45

Figura 3.5. (a) SCRIM ; (b) MuMeter.....	45
Figura 3.6. Ensaio de Pêndulo Britânico.....	46
Figura 3.7. Grooving em pavimento aeroportuário.....	50
Figura 3.8. (a) Aeronave pousando; (b) Grooving emborrachado. ....	52
Figura 3.9. (a) Shot Blast; (b) Esferas de aço (granalha); (c) Pavimento desemborrachado. ..	53
Figura 3.10. (a) Jato d'água; (b) remoção de resíduos de borracha. ....	53
Figura 3.11. Restrições da relação ACN/PCN. ....	57
Figura 4.1. Distribuição dos afastamentos laterais em relação ao eixo da pista. ....	60
Figura 4.2. Distribuição dos desvios das trajetórias das aeronaves, zona intermediária.....	60
Figura 4.3. Efeito dos dispositivos de desaceleração sobre a distância de parada.....	61
Figura 4.4. Forças de desaceleração durante a rolagem nas operações de pouso. ....	62
Figura 4.5. Efeito combinado dos trens de pouso do Airbus A-320. ....	63
Figura 4.6. Efeito combinado dos trens de pouso do Boeing 737.....	64
Figura 4.7. Efeito combinado dos trens de pouso do Fokker 100.....	64
Figura 4.8. Efeito combinado para o grupo de aeronaves que pousam na cabeceira 11L. ....	65
Figura 4.9. Probabilidade acumulada para o grupo de aeronaves que pousam na cabeceira 11L. ....	65
Figura 4.10. Expectativa de utilização da pista: divisão em faixas para amostragem. ....	66
Figura 4.11. Localização dos pontos analisados. ....	67
Figura 4.12. Seleção do número mínimo de amostras a serem inspecionadas.....	68
Figura 4.13. Plano de amostragem dos defeitos de superfície. ....	68
Figura 4.14. Levantamento de defeitos de superfície.....	70
Figura 4.15. Módulo de avaliação do pavimento no software MicroPAVER. ....	71
Figura 4.16. Planilha de dados resultante da avaliação do pavimento. ....	71
Figura 4.17. Esquema do ensaio de mancha de areia na Pista do AIB (2007).....	73
Figura 4.18. Mancha de areia na pista do AIB (a) situação emborrachada; (b) pavimento desemborrachado.....	74
Figura 4.19. Pêndulo Britânico na Pista do AIB: situação emborrachada (2007). ....	75
Figura 4.20. Drenômetro (LER-CEFTRU/UnB). ....	75
Figura 4.21. MuMeter: (a) calibração; (b) aquisição de dados. ....	80
Figura 4.22. MuMeter (Infraero).....	81
Figura 4.23. Desemborrachamento da pista do AIB: (a) chuveiro rotativo; (b) remoção dos dejetos na Pista do AIB (2007).....	82

Figura 4.24. Diferença entre locais contaminados e locais recém desemborrachados na pista do AIB: (a) perfil longitudinal; (b) perfil transversal.....	82
Figura 4.25. Módulo de avaliação do PCASE .....	85
Figura 5.1. (a) e (b) Trincas longitudinais na pista do AIB; (c) processo de medição.....	87
Figura 5.2. (a) e (b) Desgaste no pavimento do AIB (2007).....	88
Figura 5.3. (a) Afundamento de trilha de roda na pista do AIB; (b) medição do defeito. ....	88
Figura 5.4. Buracos na superfície do pavimento: (a) devido ao desgaste; (b) devido à presença de objetos estranhos. ....	89
Figura 5.5. Identificação de pequenos buracos na pista do AIB (2007). ....	89
Figura 5.6. Processo de recuperação dos buracos: (a) material utilizado; (b) compactação manual.....	90
Figura 5.7. Índice de Condição do pavimento: (a) seções individuais; (b) condição geral. ....	90
Figura 5.8. Macrotextura antes do desemborrachamento da pista. ....	92
Figura 5.9. Macrotextura após desemborrachamento da pista.....	93
Figura 5.10. Comportamento da macrotextura antes e após desemborrachamento. ....	94
Figura 5.11. Microtextura (BPN) antes do desemborrachamento da pista. ....	96
Figura 5.12. Microtextura (BPN) após desemborrachamento da pista. ....	97
Figura 5.13. Comportamento da microtextura antes e após desemborrachamento.....	97
Figura 5.14. Drenabilidade superficial antes do desemborrachamento da pista. ....	99
Figura 5.15. Drenômetro na Pista do AIB (a) grooving emborrachado; (b) grooving desemborrachado.....	99
Figura 5.16. Drenabilidade superficial após desemborrachamento da pista. ....	100
Figura 5.17. Comportamento da drenabilidade superficial antes e após desemborrachamento.....	100
Figura 5.18. Comportamento do atrito – Faixa A. ....	102
Figura 5.19. Comportamento do atrito – Faixa BE/BD. ....	102
Figura 5.20. Comportamento do atrito – Faixa CD/CE. ....	103
Figura 5.21. Comportamento do atrito global da região estudada. ....	103
Figura 5.22. Relação entre os ensaios de Mancha de areia e Drenabilidade.....	107
Figura 5.23. Relação entre os ensaios de Mancha de areia e Pêndulo Britânico. ....	108
Figura 5.24. Relação entre os ensaios de Pêndulo Britânico e Drenabilidade. ....	108
Figura 5.25. Seção Típica do pavimento do AIB.....	110
Figura 5.26. Avaliação da resistência da pista do AIB. ....	111
Figura A.1. Trinca longitudinal/transversal .....	123

Figura A.2. Desgaste/desagregação .....	123
Figura A.3. Afundamento de Trilha de roda. ....	123
Figura B.1. (a) Função densidade de Probabilidade A-320; (b) Probabilidade acumulada A-320. ....	125
Figura B.2. (a) Função densidade de Probabilidade Boeing 737; (b) Probabilidade acumulada Boeing 737. ....	125
Figura B.3. (a) Função densidade de Probabilidade Fokker 100; (b) Probabilidade acumulada Fokker 100. ....	125
Figura B.4. (a) Função densidade de Probabilidade: Efeito combinado; (b) Probabilidade acumulada: Efeito combinado.....	126
Figura D.1. Relatório do MuMeter na pista do AIB – antes do desemborrachamento, corrida a 3m lado direito e esquerdo do eixo da pista (19/07/2007). ....	131
Figura D.2. Relatório do MuMeter na pista do AIB – 4 meses após desemborrachamento, corrida a 3 m lado direito (11/12/2008). ....	132
Figura D.3. Relatório do MuMeter na pista do AIB – 4 meses após desemborrachamento, corrida a 3 m lado esquerdo (11/12/2008). ....	133

## ***ÍNDICE DE TABELAS***

Tabela 2.1. Complexo aeroportuário de Brasília. ....	8
Tabela 2.2. Acidentes e incidentes recentes ocorridos no Brasil devido à derrapagem em pista .....	14
Tabela 3.1. Impacto dos defeitos superficiais do desempenho de um pavimento. ....	38
Tabela 3.2. Defeitos de pavimentos aeroportuários e critério de medição. ....	40
Tabela 3.3. Variáveis que afetam no coeficiente de atrito durante a frenagem. ....	42
Tabela 3.4. Classificação da Macrotextura segundo a altura da Mancha de Areia .....	43
Tabela 3.5. Classificação da microtextura com Pêndulo Britânico. ....	47
Tabela 3.6. Frequência de avaliação do coeficiente de atrito.....	48
Tabela 3.7. Valores de referência de coeficientes de atrito medidos com o MuMeter. ....	48
Tabela 3.8. Classificação do índice de atrito.....	49
Tabela 3.9. Frequência de remoção de contaminantes.....	52
Tabela 3.10. Classificação do CBR para cálculo do ACN/PCN.....	55
Tabela 3.11. ACN para grupo de aeronaves . ....	56
Tabela 5.1. Valores médios da macrotextura – condição emborrachada. ....	92
Tabela 5.2. Valores médios da macrotextura – condição desemborrachada.....	92
Tabela 5.3. Níveis de Significância (p%) de valores de macrotextura antes do desemborrachamento.....	94
Tabela 5.4. Níveis de Significância (p%) de valores de macrotextura após desemborrachamento.....	94
Tabela 5.5. Valores médios da microtextura – condição emborrachada.....	96
Tabela 5.6. Valores médios da microtextura – condição desemborrachada. ....	96
Tabela 5.7. Níveis de Significância (p%) de valores de microtextura antes do desemborrachamento.....	98
Tabela 5.8. Níveis de Significância (p%) de valores de microtextura após desemborrachamento.....	98
Tabela 5.9. Valores médios da drenabilidade superficial – condição emborrachada. ....	99
Tabela 5.10. Valores médios da drenabilidade superficial – condição desemborrachada. ....	99
Tabela 5.11. Níveis de Significância (p%) de valores de drenabilidade superficial antes do desemborrachamento.....	101

Tabela 5.12. Níveis de Significância (p%) de valores de drenabilidade superficial após desemborrachamento.....	101
Tabela 5.13. Atrito dinâmico medido com MuMeter (Julho/2007).....	104
Tabela 5.14. Atrito dinâmico medido com MuMeter (Janeiro/2008).....	105
Tabela 5.15. Classificação subjetiva da correlação dos parâmetros avaliados. ....	106
Tabela 5.16. Matriz de Correlação Linear para a pista do AIB. ....	109
Tabela A.1. Exemplo de uma planilha de cálculo do valor de PCI.....	123
Tabela B.1. Densidade de Probabilidade e Probabilidade acumulada em função do afastamento do eixo da pista. ....	124
Tabela C.1. Resumo dos resultados de atrito obtidos com Pêndulo Britânico. ....	127
Tabela C.2. Resumo dos resultados da macrotextura obtidos com Mancha de areia. ....	128
Tabela C.3. Resumo dos resultados de drenabilidade obtidos com Drenômetro.....	129
Tabela C.4. Resumo dos resultados de atrito – IFI (F <sub>60</sub> ).....	130
Tabela E.1. Distribuição <i>t de Student</i> para macrotextura obtida com Mancha de Areia. ....	134
Tabela E.2. Distribuição <i>t de Student</i> para atrito obtido com Pêndulo Britânico. ....	134
Tabela E.3. Distribuição <i>t de Student</i> para drenabilidade obtida com Drenômetro.....	134

## ***LISTA DE NOMENCLATURA E ABREVIACÕES***

AIB	Aeroporto Internacional de Brasília
ACN	Aircraft Condition Number (Número de condição da aeronave)
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASG	Air Safety Group
A-320	Aeronave de transporte da Airbus (consórcio europeu fabricante de aeronaves)
Boeing 737	Aeronave de transporte da Boeing (fabricante norte-americana de aeronaves)
BPN	British Pendulum Number
CAB	Cabeceira de pista de pouso/decolagem aeroportuária.
CEFTRU	Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes
CERL	Construction Engineering Research Laboratory
DAC	Departamento de Aviação Civil do Comando da Aeronáutica do Brasil
DCP	Dynamic Cone Penetration
et al.	E outros
FAA	Federal Aviation Administration (Agência Federal de Aviação dos Estados Unidos)
Fokker 100	Aeronave de transporte da Fokker (fabricante holandesa de aeronaves)
GOODYEAR	Fabricante de pneus (inclusive aeronáuticos)
IAC	Instrução de Aviação Civil
ICAO	International Civil Aviation Organization (Organismo das Nações Unidas para assuntos de aviação civil no mundo todo)
IGG	Índice de Gravidade Global
IFI	International Friction Index
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária
LER	Laboratório de Engenharia Rodoviária
MuMeter	Equipamento inglês de medição contínua de atrito
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NOTAM	Notice to Airmen (Aviso aos Aeronavegantes)
PCASE	Pavement Transportation Computer Assisted Structural Engineering

PCI	Pavement Condition Index (Índice de Condição do Pavimento)
PCN	Pavement Condition Number (Número de condição do pavimento)
SCRIM	Sideways Force Coefficient Routine Investigation
UnB	Universidade de Brasília
29R	Cabeceira 29, direita
11L	Cabeceira 11, esquerda

## ***LISTA DE SÍMBOLOS***

A	Área da Mancha de Areia
a e b	Constantes determinadas em função do equipamento utilizado
A, B e C	Constantes de calibração próprias para um determinado equipamento
CBR	Capacidade de Suporte
CBR <sub>SL</sub>	Capacidade de Suporte do Subleito
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
D <sub>m</sub>	Diâmetro médio da Mancha de Areia
e	Distância horizontal entre o eixo da roda e o centro de pressão da área de contato
E	Módulo de Elasticidade
F <sub>D</sub>	Força de arrasto
F <sub>R</sub>	Resistência ao rolamento
FRS	Valores de atrito medidos com Pêndulo Britânico
FR <sub>60</sub>	Fator ajustado de atrito para a velocidade de 60 km/h
F <sub>L</sub>	Força de ascensão
gl	Graus de liberdade
HS	Altura média da Mancha de Areia
k	Módulo de reação do Subleito
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
km/h	Quilômetro por hora
lb/pol <sup>2</sup>	Libra por polegada quadrada
l/s	Litros por segundo
mm	Milímetro
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
MPa	Mega Pascal
MN	Mega Newton

$n$	Número de determinações
$N$	Força Normal
$p$	Nível Observado de Significância
$P$	Carga aplicada
$r$	Raio do pneu sob condições de carregamento
$s$	Desvio Padrão
$S$	Velocidade de deslocamento
$S'$	Taxa de deslizamento medido
$Sp$	Constante de velocidade
$T_x$	Parâmetro de textura, determinado a partir de valores obtidos para determinação da macrotextura em função do equipamento utilizado.
$V$	Volume de areia
$V_h$	Velocidade de hidroplanagem dinâmica para roda girando sem deslizamento
$Z_1$	Zona de hidroplanagem dinâmica
$Z_2$	Zona de hidroplanagem viscosa
$Z_3$	Zona teoricamente seca
$\alpha$	Nível de confiança da distribuição $t$ de <i>Student</i> .
$\mu$	Coefficiente de atrito
$\mu_a$	Atrito devido à adesão
$\mu_D$	Coefficiente de atrito ao deslizamento
$\mu_h$	Atrito devido à histerese
$\mu_{m\acute{a}x}$	Coefficiente de atrito máximo
$\mu_R$	Coefficiente de atrito ao rolamento
$\omega$	Velocidade angular da roda em situação livre
$\omega_R$	Velocidade angular da roda no momento da freada
$\bar{x}$	Média amostral
%	Porcentagem
°C	Grau Celsius

# **CAPÍTULO 1**

## ***Introdução***

---

O Aeroporto Internacional de Brasília (AIB) começou a ganhar a forma atual em 1990, com um corpo central e dois satélites para embarque e desembarque de passageiros. O sítio aeroportuário possui uma área de 28.930.835 m<sup>2</sup> e o pátio de aeronaves 57.113 m<sup>2</sup>. A pista antiga, ainda em operação, tem dimensões de 3.200 m de comprimento por 45 m de largura. Em dezembro de 2005 foi inaugurada uma nova pista, com 3.300 m de extensão por 45 m de largura.

Atualmente o Aeroporto Internacional de Brasília (AIB) é o terceiro em movimentação de passageiros e aeronaves do Brasil, com quase dez milhões de passageiros por ano (Infraero, 2007). Por sua localização estratégica é considerado um “hub”, ou seja, um ponto de conexão para destinos em todo o país.

Neste sentido, com o aumento vertiginoso do número de pousos e decolagens, surge a necessidade de avaliação da condição operacional da pista, pois é necessário que ela seja adequada com vistas a determinar as possíveis técnicas de recuperação.

Quanto aos aspectos funcionais, os parâmetros mais relevantes estão relacionados à segurança contra a derrapagem das aeronaves, a qual é função de uma boa interação pneu-pavimento. Esta interação depende da macrotextura e microtextura do revestimento, bem como de boas condições de drenagem superficial. Quanto aos aspectos estruturais, a deterioração por fadiga dos revestimentos asfálticos aeroportuários tem se acelerado em função do acréscimo de carga e mudança nos padrões das aeronaves, cada vez mais pesadas.

Verifica-se um aumento da necessidade de realização de ações de conservação para repor a qualidade, quer estrutural, quer funcional, pois é notório que os pavimentos apresentam uma degradação prematura da sua qualidade.

O desempenho dos pavimentos, entendido como a capacidade de suportar as cargas do tráfego e como a capacidade de oferecer uma superfície de circulação confortável e segura, é estudado atualmente quanto à sua componente estrutural através da vida residual. Quanto à componente funcional o desempenho é estudado a partir da observação dos parâmetros de estado da superfície, além das condições de atrito pneu-pavimento.

A vida residual de um pavimento é uma medida da sua capacidade de suportar cargas, definida pelo número de passagens de um eixo de referência que o conduzirá à ruína, em um determinado momento da sua vida.

Para calcular a vida residual, é fundamental caracterizar-se, através de metodologias adequadas, quer o estado superficial dos pavimentos, quer a sua deformabilidade, assim como definir os parâmetros de caracterização mecânica dos materiais constituintes das camadas.

Assim, é necessário fazer uso de metodologias de avaliação acerca das características geométricas, estruturais e funcionais, que subsidiarão a realização de inferências coerentes conduzindo à identificação das reais necessidades de manutenção e do nível de serventia com que o pavimento está atendendo às exigências para as quais fora concebido (Gonçalves, 1997).

## 1.1 - JUSTIFICATIVA DO TEMA

### 1.1.1 - IMPORTÂNCIA

A preocupação geral quanto às condições geométricas, funcionais e estruturais das pistas de aeroportos, relacionadas principalmente ao fator segurança nas decolagens e, mais ainda nas aterrissagens das aeronaves, desperta cada vez mais o interesse em estudar os fatores que levam à diminuição da vida de serviço destas pistas.

Sob o ponto de vista de segurança das operações, é importante reconhecer e manter satisfatórios os níveis de serviço destes aeroportos, pois, sabe-se que um número expressivo de acidentes aéreos, cerca de 52% está relacionado aos momentos de aproximação final e pouso das aeronaves (Boeing, 2007). Em muitos casos a causa principal, ou pelo menos um fator contribuinte se deve às características da infra-estrutura da pista no que se refere às condições de atrito e eficácia de frenagem da aeronave.

Assim, estes fatores, aliados ao aumento vertiginoso de operações nos aeroportos brasileiros e também do mundo todo, fazem com que a necessidade de monitoramento e estudo das condições da pista sejam cada vez mais relevantes no contexto da segurança do transporte aéreo.

#### 1.1.2 - OPORTUNIDADE

Este trabalho traz a oportunidade de apresentar metodologias internacionais e tecnologia nacional de avaliação de pavimentos aeroportuários, uma vez que há carência de normas e especificações nacionais para controle e avaliação do sistema aeroportuário brasileiro.

#### 1.1.3 - VIABILIDADE

A elaboração desta dissertação foi viabilizada pelos fatores listados a seguir:

- Acesso fácil a estudos realizados no país e no exterior, relacionados ao assunto;
- Interesse por parte da Infraero que administra os principais aeroportos brasileiros, incluindo o Aeroporto Internacional de Brasília, objeto de estudo desta pesquisa;
- Disponibilidade de realização do trabalho nos momentos de interdição para manutenção na pista;
- Disponibilidade de recursos materiais para o desenvolvimento da pesquisa, tais como, Pêndulo Britânico, MuMeter, Mancha de areia, programas computacionais de avaliação funcional (MicroPAVER) e de análise estatística.

### 1.2 - OBJETIVOS

#### 1.2.1 - OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve o objetivo geral de investigar as condições funcionais de pavimentos aeroportuários, tomando-se como estudo de caso a antiga pista do Aeroporto Internacional de Brasília, ainda em funcionamento.

### 1.2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A antiga pista do Aeroporto Internacional de Brasília foi escolhida para o estudo de caso, pois se encontra em operação e conta com revestimento asfáltico com *grooving*, além de possuir tráfego de aeronaves com intensidade suficiente para promover os problemas funcionais e estruturais relatados na literatura.

Assim, os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Baseado em metodologias nacionais e internacionais, avaliar as condições funcionais de pavimentos aeroportuários, tomando-se como estudo de caso a antiga pista do Aeroporto Internacional de Brasília;
- Analisar parâmetros de atrito, textura e drenabilidade, além da deterioração superficial provocado pela ação do tráfego e condições climáticas a que o pavimento está submetido;
- Verificar as condições de segurança da pista nos quesitos relacionados ao atrito pneu-pavimento por meio de relações obtidas pela textura, atrito e drenabilidade, identificando possíveis efeitos da ação do tráfego e das práticas de manutenção aplicadas ao pavimento;
- Determinar a frequência de avaliação para a pista do Aeroporto Internacional de Brasília;
- Determinar o potencial de uso desta avaliação como ferramenta para subsidiar a tomada de decisões relativas aos investimentos em manutenção, momento ideal para intervir e condições da pista.

Os quesitos relacionados acima serão determinados por meio de ensaios de Mancha de areia, Pêndulo Britânico, Drenabilidade e Levantamento Visual contínuo de defeitos na superfície da pista.

### 1.3 - ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se estruturado em capítulos conforme descrito a seguir:

## *Capítulo 1 - Introdução*

Este capítulo apresenta o problema, a importância de se analisar o atrito em pistas aeroportuárias, apresentando a oportunidade, viabilidade e objetivos da pesquisa. Ainda neste capítulo é descrita a organização da dissertação.

## *Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica*

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos, propiciando ao leitor familiarizar-se com o tema, bem como introduzindo os conceitos básicos para a compreensão do trabalho.

Inicialmente é apresentado um breve histórico sobre o surgimento do Aeroporto Internacional de Brasília, objeto de estudo desta pesquisa. São apresentados conceitos acerca dos acidentes aeronáuticos tais como a forma de ocorrência, o que são e quais os fatores contribuintes, além de um breve histórico de acidentes ocorridos no Brasil, cujas causas estão relacionadas ao tema central desta pesquisa.

Por fim é ainda abordado pormenorizadamente o fenômeno da hidroplanagem, principal responsável pelos acidentes aeronáuticos ocorridos durante as manobras de pouso, além dos fatores que influenciam sua ocorrência.

## *Capítulo 3 – Parâmetros de Projeto e Manutenção*

São abordados assuntos como aderência pneu-pavimento, hidroplanagem, microtextura, macrotextura, atrito, etc. além das variáveis que afetam o atrito e esforços resultantes desenvolvido na área de contato pneu-pavimento.

Apresenta-se ainda tecnologia antiderrapante, avaliação de atrito e desemborrachamento constante, relacionando à metodologia empregada para controle e manutenção das superfícies de pistas aeroportuárias.

## *Capítulo 4 – Materiais e Métodos*

Este capítulo refere-se aos conceitos e critérios utilizados no planejamento e execução dos Ensaio de Campo. Especificam-se os trechos ensaiados e os aparelhos utilizados, fazendo-se referências às normas regulamentadoras dos mesmos. Os ensaios são ilustrados com fotografias, e têm seus funcionamentos descritos.

### *Capítulo 5 - Apresentação e Análise de resultados*

Aqui são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos Ensaio de Campo. Esses resultados são analisados estatisticamente por meio de Análise de Variância, a fim de se observar a maior ou menor relação entre eles. O pavimento é estudado, de acordo com os resultados obtidos, quanto aos quesitos de textura, drenabilidade e atrito.

### *Capítulo 6 - Conclusões*

Refere-se às conclusões obtidas a partir dos dados referentes aos Ensaio de Campo além de sugestões para pesquisas futuras.

# CAPÍTULO 2

## *Revisão Bibliográfica*

---

### 2.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um breve histórico do Aeroporto Internacional de Brasília, objeto de estudo desta pesquisa, bem como conceitos sobre os mecanismos e causas de acidentes aeronáuticos.

Apresentam-se também conceitos importantes utilizados para desenvolvimento e entendimento desta dissertação com base em levantamentos de dados existentes na literatura nacional e internacional.

### 2.2 - O SURGIMENTO DO AEROPORTO

De acordo com a Infraero (2007), a construção do primeiro Aeroporto de Brasília (Aeroporto de Vera Cruz) ocorreu em 1955, na região onde atualmente está situada a Estação Rodoferroviária de Brasília. Entretanto as instalações eram provisórias, pois no ano seguinte seria construído um aeroporto definitivo, com projeto de uma pista de 3,3 mil metros de comprimento. A forma atual (Figura 2.1) se deu a partir de 1990, quando o complexo aeroportuário recebeu um corpo central e um satélite para embarque e desembarque de passageiros.



Figura 2.1. Vista aérea do Aeroporto Internacional de Brasília em 2007.

Segundo dados estatísticos apresentados pela Infraero (2007), com 62.175 pousos e decolagens, o Aeroporto Internacional de Brasília teve o terceiro maior movimento de aeronaves do país entre Janeiro e Junho/2007, abaixo apenas do Aeroporto Internacional de São Paulo/Guarulhos, que teve neste período 90.388 pousos e decolagens, e do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas, que liderou, com 106.743 operações. A Tabela 2.1 mostra as características técnicas atuais do complexo aeroportuário de Brasília.

Tabela 2.1. Complexo aeroportuário de Brasília.

Área do Sítio Aeroportuário: 28.995.153,00 m <sup>2</sup>
Dimensões da Pista (m): 3.200 x 45/segunda pista: 3.300 x 45
Capacidade do terminal de passageiros/ano: 7.400.000
Movimento em 2006: 9.700.000
Capacidade do estacionamento de Aeronaves: 32 posições

*Modificado de Infraero (2007)*

Atualmente o Aeroporto tem capacidade de atendimento simultâneo de 16 aeronaves do porte do Fokker 100 e acima, atendendo em suas horas de pico, cerca de mil passageiros.

### 2.3 - ACIDENTES AERONÁUTICOS

Toda ocorrência relacionada com a operação de uma aeronave, havida entre o período em que uma pessoa embarca com a intenção de realizar um voo, até o momento em que todas as pessoas tenham dela desembarcado e, durante o qual, ocorra algum evento que não promova o sucesso do trajeto, pode ser internacionalmente enquadrado, segundo a ICAO, como um incidente ou acidente (Merighi *et. al.* 2006).

Acidentes são ocorrências associadas com a operação de uma aeronave, que resultem em uma das seguintes situações:

- Lesão grave ou morte de uma ou mais pessoas como resultado de estar na aeronave, em contato direto com qualquer uma de suas partes;
- A aeronave sofra dano ou falha estrutural que afete adversamente a resistência estrutural, o seu desempenho ou as suas características de voo; exija a substituição de grandes componentes ou a realização de grandes reparos no componente afetado (CENIPA, 2007).
- A aeronave seja considerada desaparecida ou o local onde se encontre seja absolutamente inacessível.

Quando se fala em incidente, relaciona-se a fatos ou ocorrências que afetam a segurança de operação de uma aeronave, quando há intenção de vôo, entretanto não chegam a se caracterizar como acidente.

Durante muitos anos, acidentes aeronáuticos eram tratados como resultado único de falhas do avião (equipamento) ou do piloto. Mas, com o passar do tempo, este conceito foi modificado devido a um melhor entendimento das falhas inerentes à aviação. Atualmente, sabe-se que um acidente é resultado de inúmeras causas, também conhecidas como *fatores contribuintes*, que juntos desencadeiam uma série de eventos que acabam por ocasioná-lo (ASG, 2007).

Os acidentes aéreos envolvem características específicas em cada caso. Entretanto, podem-se distinguir quatro fatores freqüentemente relacionados a este tipo de ocorrência, descritos a seguir.

### 2.3.1 - FATOR HUMANO

O homem possui três principais fontes de informação pelas quais é capaz de manter o equilíbrio em relação à superfície da Terra: o sistema visual, o aparelho vestibular (ouvido interno) e o sistema proprioceptivo (pele e articulações).

Em terra, estes sistemas funcionam de maneira satisfatória, entretanto, em vôo, o corpo pode ser afetado por uma variedade de acelerações fazendo com que somente os olhos sejam confiáveis para fornecer uma verdadeira imagem da altitude do corpo no espaço, isto claro, se receber informações corretas do mundo externo ou dos instrumentos de vôo. Entretanto, as mais variadas ilusões de ótica podem acontecer, prejudicando sua interpretação (ASG, 2007).

Um exemplo prático disto é o efeito da observação fixa de uma luz durante vários segundos no escuro, esta produzirá a impressão de estar se movendo. De maneira similar, durante a aproximação para pouso à noite, quando, em determinadas circunstâncias, a pista parece se mover para o piloto. Este problema é agravado quando está chovendo, pois a luz ao passar pela água, sofre distorções que geram uma imagem errada para o piloto de seu posicionamento com relação à pista, elevando substancialmente a possibilidade de ocorrência de um pouso ruim. Desta forma, o fator humano é, então de extrema importância na ocorrência de um acidente aeronáutico (Rodrigues Filho, 2006).

### 2.3.2 - FATOR METEOROLÓGICO

Este é o único fator contribuinte para ocorrência de acidente aeronáutico sobre o qual o homem não exerce nenhum controle. As constantes variações e às vezes a violência fazem com que o homem tenha certa dificuldade em lidar com condições meteorológicas. Apesar de o homem possuir mecanismos de previsão com certa exatidão de quando determinado fenômeno vai ocorrer, esta em termos de aviação, principalmente quando se considera o grau de exatidão de determinada informação, nem sempre se torna útil ao piloto.

O piloto necessita de informações sobre as reais condições de tempo que irá encontrar quando estiver efetuando uma aproximação para pouso. A falta de precisão faz com que muitas vezes o piloto encontre condições adversas com a qual não contava e, conseqüentemente, para qual não estava preparado e dependendo das circunstâncias, um acidente pode ser algo inevitável.

### 2.3.3 - A AERONAVE

Um dos maiores problemas encontrados pelos pilotos pioneiros era a falta de confiabilidade dos motores. Atualmente eles raramente falham devido ao elevado nível tecnológico empregado no seu desenvolvimento e construção. Entretanto, quando, por algum motivo ocorre falha em um dos motores da aeronave, imediatamente cria-se um desbalanceamento de forças, reduzindo seu desempenho, além de gerar sérios problemas de controlabilidade, exigindo o máximo de habilidade do piloto.

Da mesma forma, vários instrumentos existentes na cabine do avião moderno permitem que ele seja operado com maior segurança nas mais variadas condições meteorológicas. Mas, apesar de toda eficiência, é possível a ocorrência de operação errada por parte do piloto.

### 2.3.4 - A INFRA-ESTRUTURA

A infra-estrutura aeronáutica, por ser bastante complexa, apresenta um potencial gerador de vários fatores contribuintes de acidentes aeronáuticos. Talvez os mais importantes relacionem-se às pistas de pouso e auxílios à navegação.

Um exemplo prático do grau de exigência da infra-estrutura é a operação de pouso de uma aeronave do tipo Boeing 737, que pesa 50.000 kg, a uma velocidade de 240 km/h. Quando o

pouso ocorre no período noturno sob condições meteorológicas adversas, o nível de exigência pode até triplicar (ASG, 2007).

Neste sentido, quanto maior a exigência de uma pessoa em se executar determinada tarefa, maiores serão as chances de falhar, a não ser que se criem condições adequadas para que a operação ocorra de maneira segura. O que o piloto precisa, neste caso específico, é de pistas de pouso suficientemente longas, permitindo a operação facilitada devido à criação de margens de segurança mais adequadas.

Com relação aos auxílios de navegação, estes devem gerar informações suficientemente precisas para que o piloto possa conduzir a aeronave com segurança durante todo trajeto.

O atrito desenvolvido entre pneu-pavimento aeroportuário, também considerado fator contribuinte que integra a infra-estrutura, será abordado com maiores detalhes no decorrer deste trabalho.

### 2.3.5 - ACIDENTES NA AVIAÇÃO BRASILEIRA

Estatísticas sobre a atividade do transporte aéreo no mundo indicam que os índices de acidentes têm uma relação direta com a evolução do número de aeronaves comerciais de grande porte em operação e a atividade do transporte aéreo no mundo. Neste sentido, a Boeing (2007) apresenta o número de aeronaves em operação, certificadas, com mais de 30.000 kg, conforme ilustra a Figura 2.2.

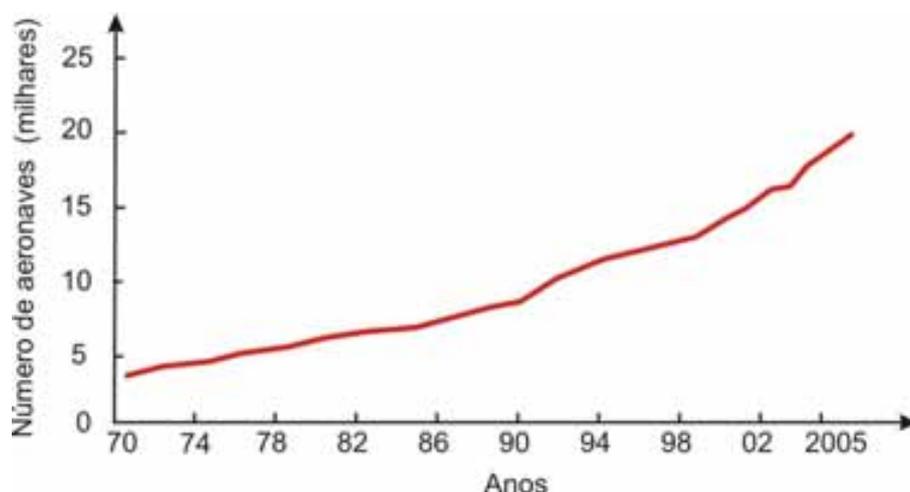


Figura 2.2. Aeronaves a Jato em operação (Modificado: Boeing, 2007).

Existem em operação, 7 fabricantes, sendo 33 tipos de aeronaves disponíveis no mercado, registrando no ano de 2005, 19,2 milhões de decolagens – sendo automaticamente contabilizados o mesmo número de pousos – e cerca de 40 milhões de horas de voo. Neste mesmo ano, ocorreram 1452 acidentes com aeronaves, resultando na morte de 528 pessoas (Boeing, 2007).

No Brasil, segundo a Infraero (2007), durante o ano de 2005 foi transportado um total de cerca de 84 milhões de passageiros. Apesar do crescente número de passageiros, o número de acidentes sofreu decréscimo ao longo dos anos, como pode ser verificado na Figura 2.3. Esta redução no número de ocorrências pode ser atribuída ao aparato tecnológico disponível nas aeronaves além de adequações na infra-estrutura e mão de obra qualificada.



Figura 2.3. Acidentes aéreos x Frota de aeronaves no Brasil (CENIPA, 2007).

Apesar da redução do número de acidentes, os fatores que os desencadeiam (já relatados) devem ser analisados para que não surjam novas ocorrências. Assim, sob o ponto de vista de segurança das operações, Macedo (2005) relata ser importante reconhecer e manter satisfatórios os níveis de serviço dos aeroportos, pois, um número expressivo de acidentes aéreos está relacionado às manobras de decolagem e, mais ainda, ao pouso das aeronaves.

Segundo dados registrados pela Boeing (2007), apresentados na Figura 2.4, cerca de 17% dos acidentes no período compreendido entre 1959 – 2005 com aeronaves comerciais a jato ocorreram em função das operações de decolagem e início de subida, momento em que a aeronave necessita de uma força de atrito substancialmente alta que garanta impulso suficiente para decolagem confortável e segura.

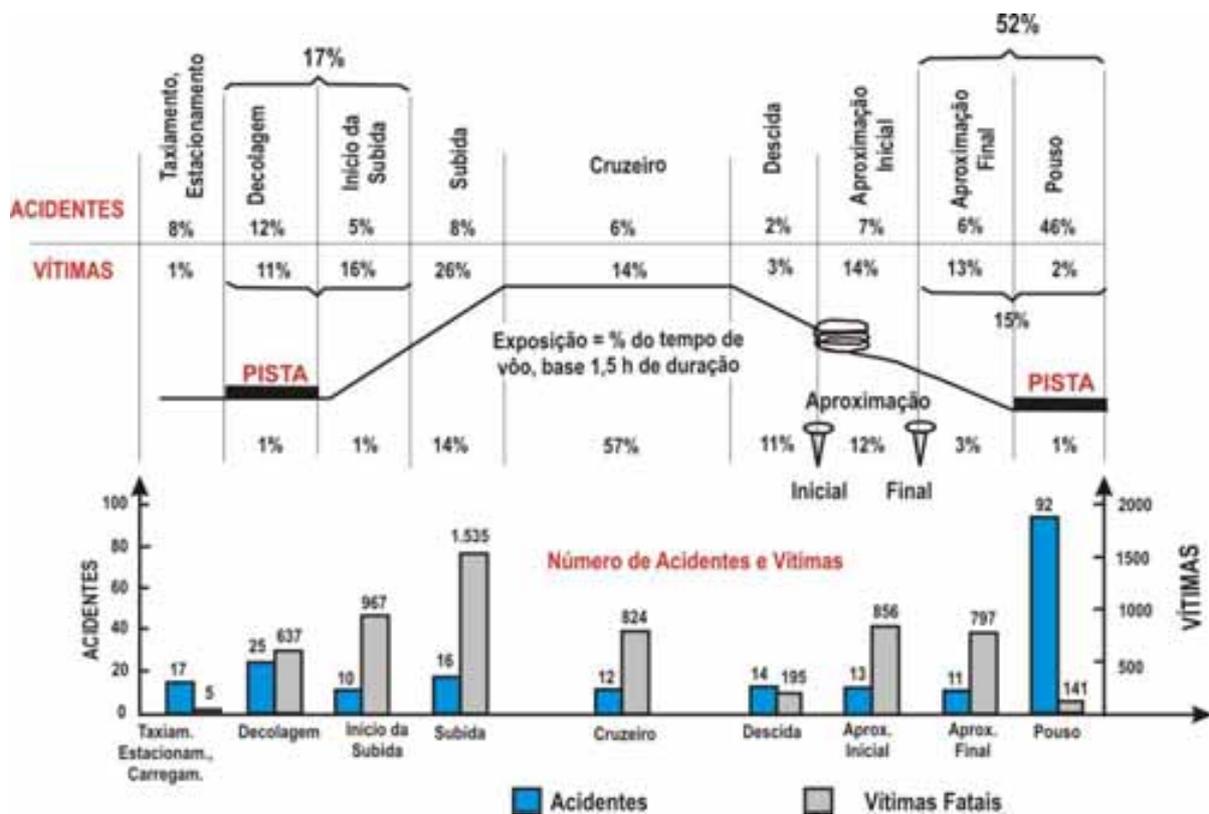


Figura 2.4. Acidentes e Fatalidades de Aeronaves por Fases de Voo no período 1959 – 2005 (Modificado de Boeing, 2005).

De forma semelhante, nas manobras de pouso, as aeronaves também se encontram numa velocidade elevada e necessitam que a pista possua resistência à derrapagem suficiente que garanta segurança no momento do contato entre pneu-pavimento. Entretanto, como pode ser comprovado na Figura 2.4, 52% dos acidentes estão relacionados aos momentos de aproximação final e pouso das aeronaves, daí a necessidade de verificações constantes das condições da pista.

Alguns acidentes ocorridos no Brasil, cujas causas são principalmente derrapagem e perda de controle durante os momentos de aproximação e pouso das aeronaves podem ser conferidos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Acidentes e incidentes recentes ocorridos no Brasil devido à derrapagem em pista

	<p>27/02/2000 - Boeing 737-400 - Transbrasil Aeroporto Salgado Filho - Porto Alegre (RS) Motivo: hidroplanagem, saída da pista, vindo a parar somente quando encontrou um grande buraco.</p>
	<p>07/10/2002 - Learjet 60 - American Virginia Aeroporto de Santa Cruz do Sul (RS) A derrapagem do avião causou a morte uma pessoa e ferimento de outras quatro.</p>
	<p>04/01/2003 - Cessna 525 - Julio Simões Trasportes Aeroporto de Congonhas (SP). O jato após aterrissar, derrapou indo parar na calçada da Av. dos Bandeirantes. Um dos passageiros e um pedestre que passava na hora do acidente sofreram ferimentos leves.</p>
	<p>22/03/2006 – Boeing – BRA Linhas Aéreas Aeroporto de Congonhas (SP). Na aterrissagem o avião fez um ziguezague na pista e chegou até a ponta, entrando em parte do gramado. A ponta da aeronave pode ser avistada da avenida que passa ao lado do aeroporto.</p>
	<p>06/10/2006 - Boeing 737-300 – GOL Linhas Aéreas Aeroporto de Congonhas (SP) Ao pousar, a aeronave só parou ao atingir o final da pista, em trecho de grama, onde ficou atravessada, impedindo pousos e decolagens por cerca de uma hora.</p>
	<p>17/01/2007 – Boeing 737 - Varig Aeroporto de Congonhas (SP) Após o pouso, a aeronave foi obrigada a realizar uma freada brusca em virtude da água presente na pista.</p>
	<p>07/03/2007 – Bimotor – Abaeté Táxi Aéreo Aeroporto Internacional de Salvador (BA) A aeronave derrapou na pista depois do pouso, por volta das 20 horas. Apenas o piloto e o co-piloto estavam no avião, mas ninguém ficou ferido.</p>
	<p>21/04/2007 – Boeing 737 – Gol Linhas Aéreas Aeroporto Internacional de Fortaleza (CE) A aeronave levava 118 pessoas e deslizou durante o procedimento de pouso devido a chuvas intensas, ninguém ficou ferido.</p>
	<p>17/07/2007 - ATR42 – Pantanal Linhas Aéreas Aeroporto de Congonhas (SP) O avião derrapou na hora do pouso. Dois pneus furaram e a aeronave foi parar na grama. Ninguém ficou ferido.</p>

## 2.4 - AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES FUNCIONAIS

O estabelecimento das necessidades atuais de manutenção de uma determinada via consiste na identificação da medida de conservação ou de restauração de menor custo que seja suficiente para colocar o pavimento em condições funcionais adequadas ou aceitáveis e de modo que essas condições se mantenham durante um período de tempo mínimo especificado. Para tanto, é preciso elaborar o diagnóstico do pavimento, ou seja, esclarecer os mecanismos através dos quais a sua deterioração vem se processando ao longo do tempo.

É através desse diagnóstico que se podem selecionar as medidas de manutenção capazes de não apenas solucionar as deficiências funcionais, mas também de representarem um investimento economicamente eficaz, o que será função do desempenho que o pavimento restaurado irá apresentar (Gonçalves, 1997).

O diagnóstico deve ser efetuado considerando-se todas as informações levantadas e os resultados das avaliações realizadas no pavimento, de modo a se defrontar um dado contra outro com o objetivo de interpretar o desempenho que o pavimento vem apresentando. É deste modo que se poderá detectar as deficiências reais do pavimento.

A avaliação das condições funcionais compreende o levantamento a partir de medições diretas (ensaios de campo), inspeções visuais, ou uma combinação destas duas, quanto ao conforto ao rolamento, e segurança, sendo que na maioria dos levantamentos, as medições das investigações são expressas na forma de índices de qualidade (Macedo, 2005).

Shahin (1994) comenta que os problemas funcionais da pista afetam diretamente o usuário da via, seja ela rodoviária ou aeroportuária, na forma de conforto ao rolamento (relacionado aos custos operacionais dos veículos), tempo de viagem (que também pode ter um custo associado) e segurança (custo de acidentes).

O autor ainda comenta que esta avaliação é geralmente aceita como sendo um processo de avaliação racional e que o desempenho funcional de um pavimento deve estar baseada na análise da resistência ao deslizamento (atrito) e potencial de danos por objetos estranhos (FOD - *Foreign Object Damage*) às aeronaves. Devem-se considerar ainda os defeitos de superfície tais como trincas e afundamentos de trilha de roda. Em se tratando de pavimentos aeroportuários, o índice usado em muitos países é o PCI (*Pavement Condition Index*), o qual foi indicado pela FAA (*Federal Aviation Administration*) para uso em aeroportos civis e está

centrado em um índice de condição geral de superfície. A necessidade de avaliar um pavimento é baseada em razões específicas, tais como:

- Estimar a vida restante de um pavimento, que sofreu interferências das intempéries do meio físico, como chuvas e incidência de raios ultravioletas, levando a uma tomada de decisão correta;
- Propor possíveis necessidades de reforço estrutural da pista, principalmente àquelas que passaram a suportar operações de aeronaves cada vez mais pesadas, acima do limite para o qual foi dimensionada.

A avaliação dos pavimentos consiste, portanto, na primeira fase do processo de seleção de medidas de manutenção da pista, ou seja, a partir da sua realização é possível identificar a necessidade de intervenção oferecida (Gonçalves, 1997). Isto requer a coleta de dados substanciais das condições do pavimento a ser analisado, que, segundo Macedo (2005) pode ser dividido em dois tipos:

- Funcional: verifica se o pavimento cumpre a função em relação à operação segura e confortável das aeronaves e veículos.
- Estrutural: relativo às condições estruturais, como tensões limites, deformações e deflexões em uma ou mais camadas críticas.

## 2.5 - O ATRITO

O conceito de atrito, em física, é denominado como sendo uma força natural que atua quando um objeto está em contato com outro e sofre a ação de outra força que tende a colocá-lo em movimento. Depende da Força Normal que age num corpo em contato com a superfície; quanto maior for a Força Normal maior será o atrito (Halliday, 2006).

Sem o atrito, todas as formas de transporte que se deslocam sobre rodas não poderiam mover-se, pois é o atrito entre as rodas e o solo que permite às primeiras agarrarem-se ao solo, produzindo movimento pela troca de forças, conforme ilustra a Figura 2.5.

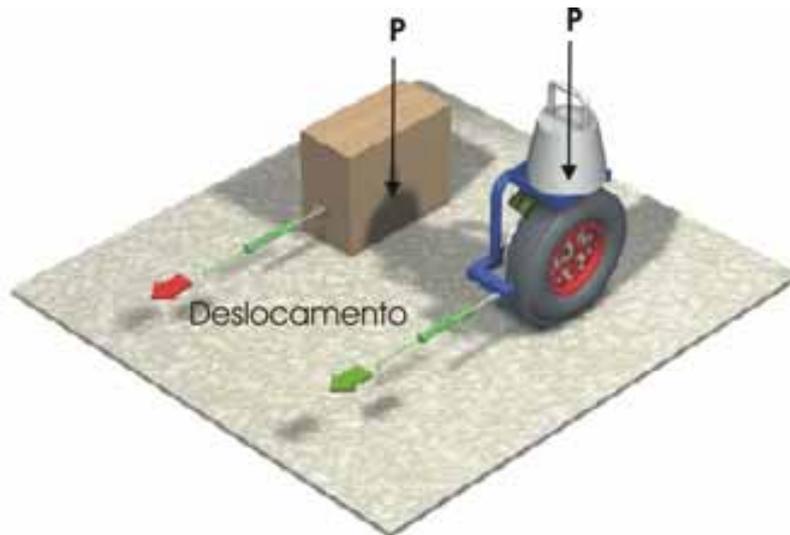


Figura 2.5. Esquema do conceito de atrito (Modificado: Andresen & Wambold, 1999).

Assim, o atrito pode ser melhor representado por um índice, denominado *coeficiente de atrito* que demonstra o grau de rugosidade entre dois corpos. Trata-se de uma grandeza adimensional, ou seja, não apresenta unidade. Pode ser diferenciado em:

- Coeficiente de atrito dinâmico: presente a partir do momento que o corpo efetua deslocamento;
- Coeficiente de atrito estático: presente quando o corpo se encontra na iminência do movimento, ou seja, no princípio da atuação da força externa.

### 2.5.1 - ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

Quando se trata de segurança aeroviária, um dos principais aspectos a ser levado em conta é a condição de atrito da pista, pois este é um dos fatores determinantes na prevenção de acidentes aéreos nas manobras de pouso e decolagem. É devido ao atrito que uma aeronave consegue realizar o procedimento de decolagem, no qual esta parte do repouso e atinge a velocidade ideal para levantar vôo, bem como o procedimento de pouso, em que a aeronave se aproxima a uma determinada velocidade e tem de parar com conforto e segurança (Santos, 2004).

Uma adequada operação de pouso ou decolagem depende, além de outros fatores, do contato pneu-pavimento e da aderência de ambos. O atrito é fortemente influenciada pela qualidade da área de contato pneu-pavimento, sendo que a presença de água ou não é um fator

importante a ser considerado. Assim, uma boa interação pneu-pavimento pode ser conseguida por meio de uma boa macrotextura<sup>1</sup> e drenagem adequada, pois, o pavimento da pista de pouso molhado é um aspecto contribuinte para a ocorrência do fenômeno da hidroplanagem<sup>2</sup> (ou aquaplanagem), onde ocorre perda de tração, resultando em frenagem deficiente, com possibilidade de perda do controle da aeronave pelo piloto e assim desencadeando um acidente aéreo.

As forças de atrito pneu-pavimento são de grande importância para a segurança da aeronave. Em pistas curtas, onde a extensão disponível é próxima da distância operacional requerida, as forças de atrito constituem o principal meio de parada da aeronave após um pouso ou decolagem interrompida, uma vez que a reversão dos motores – muito embora possa contribuir significativamente na ação de frenagem em pistas com pouco atrito – é considerado apenas um complemento.

Dentre várias razões para se realizar essas medidas de atrito, podem-se destacar:

- Verificar características do atrito de pistas novas ou reformadas;
- Avaliar periodicamente o coeficiente de atrito para verificar se está acima do valor mínimo exigido para aquela pista;
- Determinar a época de ser feito algum tipo de intervenção no pavimento;
- Avaliar o coeficiente de atrito quando as características de drenagem são ruins.

Neste sentido é necessário entender as variáveis que afetam na interação pneu-pavimento durante o rolamento e dirigibilidade das aeronaves durante o período em que efetivamente ocorre o contato com a superfície. A seguir serão apresentadas com detalhes todas as variáveis, bem como a descrição detalhada de sua influência durante o rolamento.

#### 2.5.1.1 - O DESLIZAMENTO

Quando ocorre a frenagem de um pneu, se a velocidade periférica for inferior à velocidade horizontal do eixo, provocará uma força de deslocamento da roda que por sua vez está sendo freada, desencadeando um processo de deformação horizontal na área de contato.

---

<sup>1</sup> Macrotextura é definida no Capítulo 3, item 3.1.2.

<sup>2</sup> Hidroplanagem é melhor definida no item 2.5.2.

A definição de deslocamento relativo que ocorre entre a banda de rodagem do pneu e a superfície da pista utiliza-se o conceito de *taxa de deslizamento* ( $S'$ ), representado pela seguinte equação:

$$S' = 1 - \frac{\omega_R}{\omega} \quad (2.1)$$

Onde:

$\omega_R$  = velocidade angular da roda no momento da freada;

$\omega$  = velocidade angular da roda em situação livre.

A força de tração que se desenvolve na banda de rodagem a partir do torque de frenagem aplicado ao eixo da roda provoca o deslizamento do pneu sobre o pavimento. De acordo com a Figura 2.6 é possível verificar que no início do fenômeno, o coeficiente de atrito aumenta linearmente com o deslizamento.

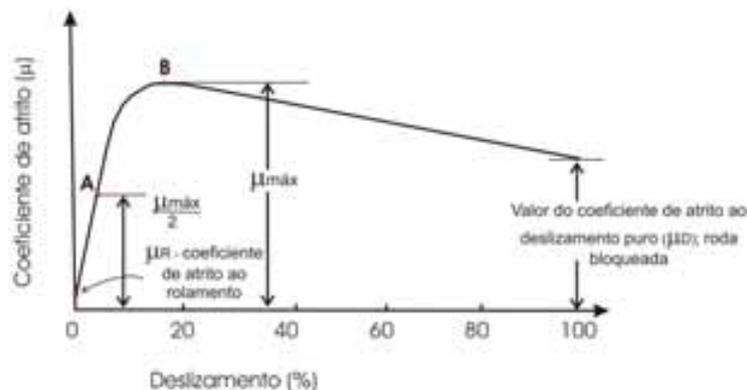


Figura 2.6. Efeito do deslizamento no coeficiente de atrito (ICAO, 1994-a *apud* Rodrigues Filho, 2006).

De acordo com a Figura 2.6 ainda é possível verificar que o coeficiente de atrito de deslizamento máximo ocorre numa taxa de deslizamento variando na faixa de 15 a 20%. É importante ressaltar que acima do valor máximo, o veículo tende a apresentar condição instável, tendo um decréscimo de atrito até a condição conhecida como *coeficiente de atrito de deslizamento puro* ( $\mu_D$ ), onde a roda é totalmente bloqueada fazendo com que o veículo derrape.

Andresen e Wambold (1999) descrevem que o atrito resultante do deslizamento real refere-se àquele que se produz em razão do movimento relativo entre a banda de rodagem do pneu e a superfície da pista, sendo consequência de três fenômenos:

- *Adesão*: na interface das duas superfícies surgem forças adesivas entre as moléculas dos dois materiais, cuja magnitude depende do tempo de contato, e, portanto, da velocidade de deslizamento, além da composição da borracha do pneu e microtextura<sup>3</sup> da superfície. Esta sofre influência se for levemente separada por algum contaminante.
- *Histerese*: está relacionada com a macrotextura da superfície, pois, é consequência da deformação que ocorre na borracha do pneu, quando a banda de rodagem desliza sobre as irregularidades da pista. Sua magnitude aumenta com velocidade de deslizamento, e seu valor máximo ocorre para maiores velocidades quando a temperatura aumenta, entretanto não são influenciadas quando as superfícies de contato são levemente separadas por algum contaminante.
- *Desgaste*: consequência do “arrancamento” de partículas do pneu na superfície de contato com o pavimento, também conhecido como “emborrachamento” da pista.

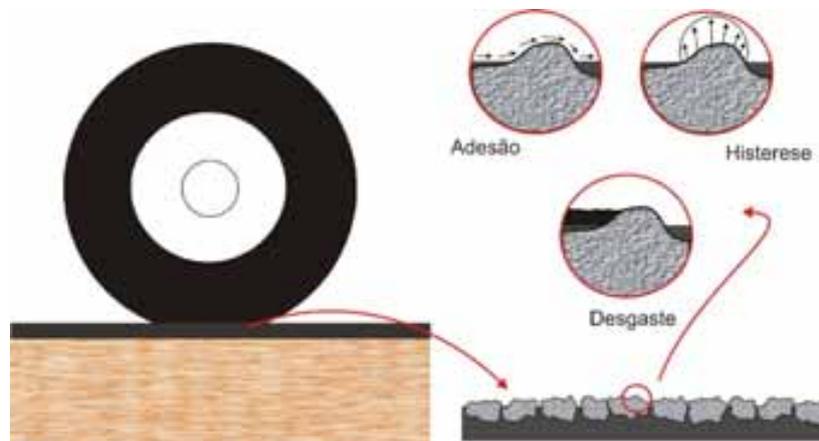


Figura 2.7. Mecanismos do atrito ao deslizamento de um pneu sobre um pavimento.

De acordo com estudos realizados por Fristedt & Norrbom (1980), a parcela do coeficiente de atrito devido à adesão cresce com a velocidade de deslizamento até atingirem um máximo e, então decresce. Este comportamento foi verificado quando um bloco de borracha sobre uma superfície seca, apresentou variação do coeficiente de atrito e seus componentes com a velocidade de deslizamento, apresentado na Figura 2.8.

<sup>3</sup> Microtextura é definida no Capítulo 3, item 3.1.2.

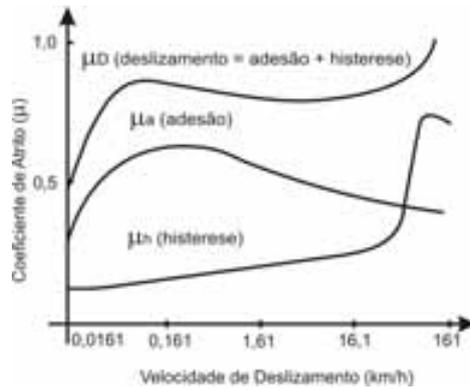


Figura 2.8. Variação do coeficiente de atrito com a velocidade

A Figura 2.9 apresenta os três mecanismos responsáveis pela resistência ao deslizamento para duas diferentes superfícies interagindo com o mesmo pneu.

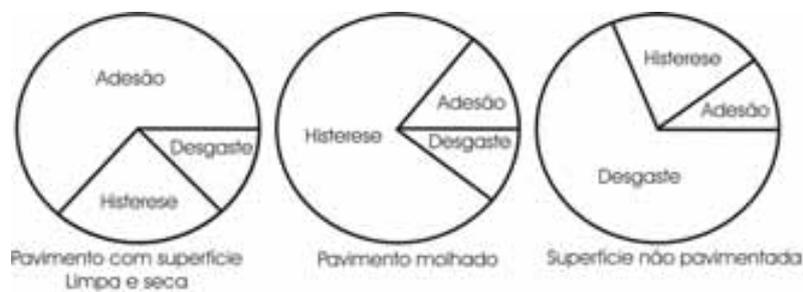


Figura 2.9. Participação da adesão, histerese e desgaste no atrito de deslizamento.

(Adaptado de Andresen e Wambold, 1999).

De acordo com a Figura 2.9, nota-se que para uma pista cuja superfície encontra-se num estado limpo e seco, a participação do desgaste é relativamente pequena se comparada às participações da histerese e da adesão. Entretanto, numa situação em que a pista encontra-se molhada, a participação da adesão é substancialmente reduzida, o desgaste é ainda menor, cabendo à histerese o papel de responder quase que integralmente pela resistência ao deslizamento.

Este fato pode ser explicado devido à presença de um terceiro elemento presente entre a área de contato pneu-pavimento, reduzindo as forças de adesão e lubrificando o contato e assim diminuindo o desgaste. Numa condição em que a superfície não está pavimentada a maior participação é do desgaste, que certamente ocorrerá de forma mais acentuada no solo e não no pneu do veículo.

### 2.5.1.2 - RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

O deslizamento do pneu sobre o pavimento é provocado pela força de tração que se desenvolve na banda de rodagem a partir do toque de frenagem aplicado ao eixo da roda, entretanto este deslizamento pode ser afetado por fenômenos conhecidos como adesão e histerese, já relatadas anteriormente.

Quando um pneu encontra-se estático, sobre uma superfície rígida, não contaminada, submetido a uma força vertical, apresenta uma configuração de deformação conforme mostra a Figura 2.10.

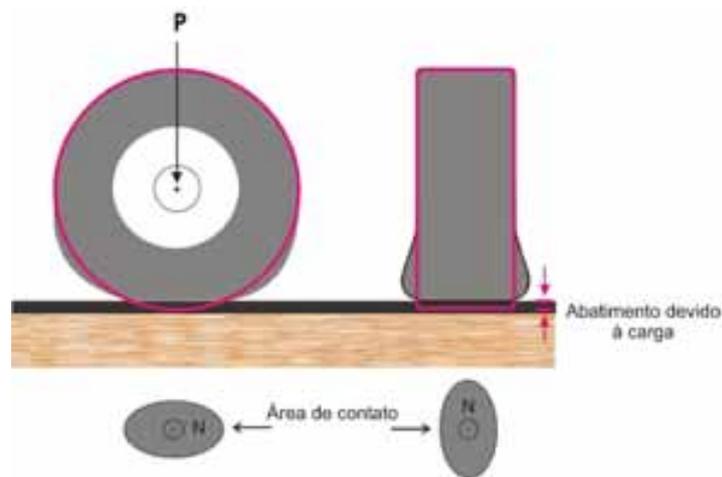


Figura 2.10. Deformação de um pneu estático sob condições de carregamento.

Além das forças horizontais locais (devido à flexão do pneu) também está presente uma força vertical que passa pelo centro da roda, resultante da distribuição de pressões que se forma na área de contato.

As tensões normais desenvolvidas na área de contato pneu-pavimento não apresentam distribuição uniforme. Apesar disto, Rodrigues Filho (2006) afirma que diversos autores apresentaram em suas pesquisas a consideração de valores médios, sendo representados pela seguinte equação:

$$P = pA \quad (2.2)$$

Onde:  $P$  = carga de Roda;  $p$  = pressões do pneu;  $A$  = área de contato pneu-pavimento.

Wong (2001) afirma que a resistência ao rolamento de um pneu é causada, principalmente pela ação da histerese, devido à deformação da carcaça (cujo comportamento é visco-

elástico), durante o movimento, fazendo com que a distribuição de pressões na área de contato seja alterada.

Diversos resultados experimentais disponíveis na literatura mostram o atrito total verificado no rolamento de um pneu, nas velocidades de 120 e 150 Km/h, são 90 e 95% respectivamente, devido à histerese, 2 a 10% devidas ao atrito entre pneu e superfície do pavimento, além de 1,5 a 3,5% em consequência da resistência do ar no ambiente de rolamento.

Durante o rolamento, a força vertical resultante se move para frente, em relação ao centro da roda, opondo-se a rotação. Se a rotação é mantida em consequência da ação de uma força de tração no eixo da roda, forma-se, na área de contato, uma força horizontal equivalente com sentido contrário, conforme ilustrado na Figura 2.11.

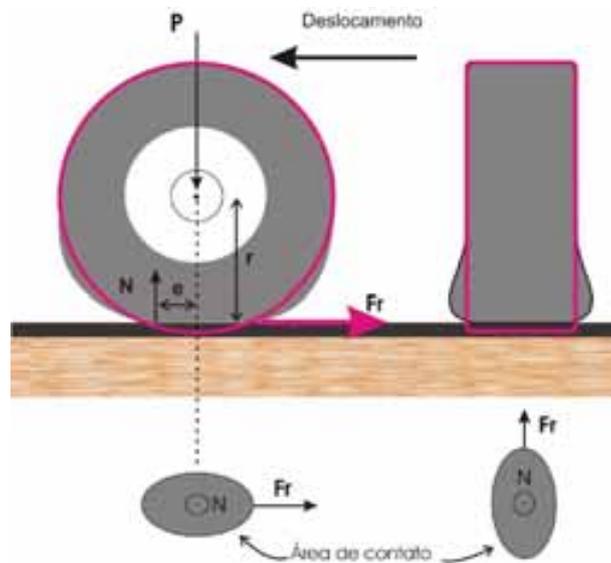


Figura 2.11. Forças atuantes num pneu durante deslocamento.

Assim, esta força, em sentido contrário ao rolamento, causada pela deformação da banda de rodagem também conhecida como *resistência ao rolamento* da roda do veículo é determinada pela seguinte equação:

$$F_R = N \frac{e}{r} \quad (2.3)$$

Onde:

$F_R$  = resistência ao rolamento;

$e$  = distância horizontal entre o eixo da roda e o centro de pressão da área de contato;

$r$  = raio do pneu sob condições de carregamento.

É importante ressaltar que a velocidade com que a roda é submetida durante o rolamento, faz com que as variáveis “*e*” e “*r*” tenham seus valores levemente aumentados durante a rotação. Neste sentido, define-se o coeficiente de atrito ao rolamento como:

$$\mu_R = \frac{F_R}{N} \text{ ou } \mu_R = \frac{e}{r} \quad (2.4)$$

Onde:

$\mu_R$  = *coeficiente de atrito ao rolamento;*

$F_R$  = *resistência ao rolamento.*

Para que se entenda os diversos fatores que afetam a resistência ao rolamento de um pneu é necessário conhecer as principais funções que esta estrutura, em forma de tiróide e cheia com ar comprimido, desempenha num veículo:

- Permitir o deslocamento do veículo transferindo carga ao pavimento pela ação do rolamento;
- Prover atrito com a superfície do pavimento, de modo a garantir dirigibilidade e respostas eficientes nas freadas e acelerações;
- Contribuir, junto com a suspensão, para o conforto dos ocupantes.

A estrutura de um pneu é basicamente dividida em duas categorias:

- Pneu diagonal (Figura 2.12-a), também chamado convencional, possui uma carcaça formada por lonas têxteis cruzadas uma em relação à outra;
- Pneu radial (Figura 2.12-b) possui estrutura têxtil ou de aço cujos cordonéis estão dispostos no sentido do raio. Cinturas de aço colocadas debaixo da banda de rodagem que complementam sua estrutura.

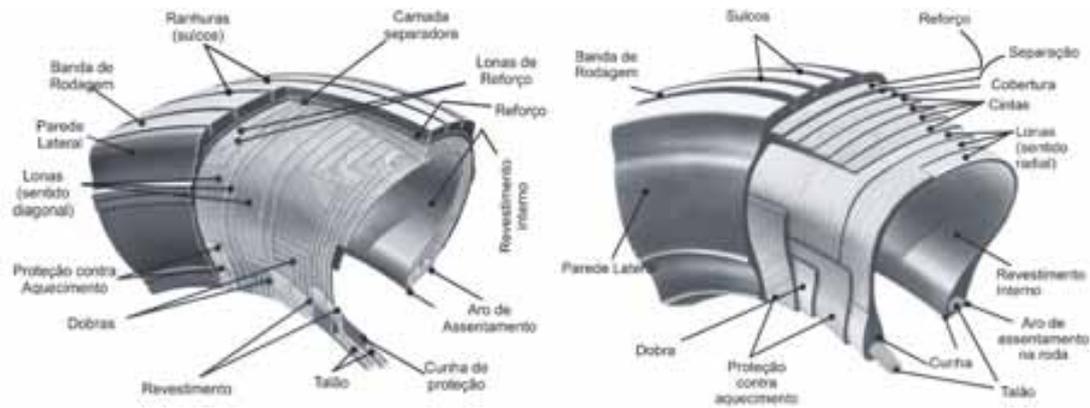


Figura 2.12. (a) Estrutura de um pneu diagonal; (b) Estrutura de um pneu radial. (Goodyear, 2004).

Um pneu tem sua resistência ao rolamento afetado por diversos fatores como:

- Estrutura: materiais constituintes, tipo de construção;
- Condições de operação: pressão de enchimento, velocidade aplicada, temperatura e superfície de rolamento.

A influência significativa da construção do pneu sobre a resistência ao rolamento pode ser verificada na Figura 2.13, onde Wong (2001) verificou a variação do coeficiente de atrito ao rolamento com a velocidade, em pneus diagonal e radial de veículos de passeio, em pavimento suave e plano, com a mesma pressão e carga de enchimento.

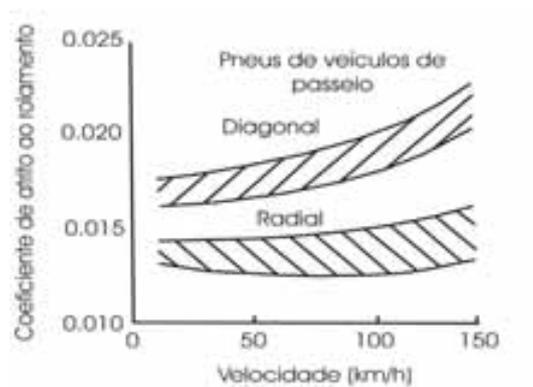


Figura 2.13. Variação do coeficiente de atrito ao rolamento com a velocidade (Wong, 2001).

Além destes fatores, pode ser destacada a velocidade de deslocamento como um fator importante presente na resistência ao rolamento. Isto ocorre devido ao aumento da energia dissipada por deformação e do aumento das vibrações na estrutura do pneu.

## 2.5.2 - INTERAÇÃO PNEU-PISTA MOLHADA

O atrito disponível em uma pista molhada é consideravelmente inferior àquele encontrado quando a pista está seca. Isto decorre do fato de não se poder expulsar completamente o fluido contaminante que se encontra entre o pneu e a superfície da pista. A fina película de água que permanece na área de contato reduz substancialmente a adesão, componente importante da resistência à derrapagem.

Na medida em que a velocidade aumenta, o tempo de contato da banda de rodagem com o pavimento se reduz, diminuindo, também o tempo disponível para que o processo de expulsão do fluido se complete.

Horne e Dreher (1963) mostraram o efeito da pista molhada e da pista seca sobre o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) para a aeronave 880 Jet, em pista de concreto com sistema antiderrapante ativado, com pressão de 1034 kPa e pneus ranhurados, conforme mostrado na Figura 2.14.

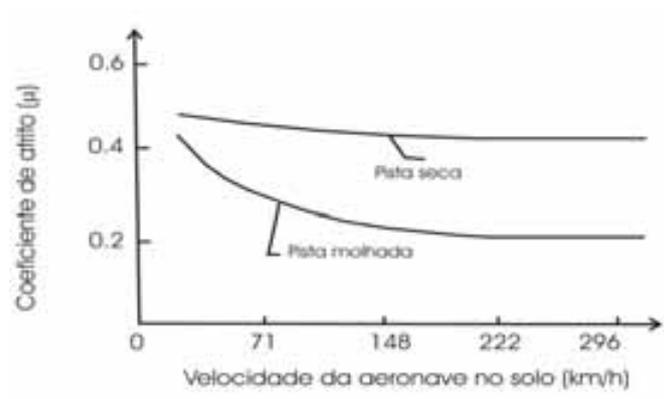


Figura 2.14. Efeito da pista molhada e pista seca sobre o coeficiente de atrito (Adaptado de Horne e Dreher, 1963).

Por esse motivo o atrito em pistas molhadas diminui com a velocidade e é proporcional à área da zona de contato onde ocorre efetivamente o contato direto entre o pneu e pavimento.

Diversos são os fatores que afetam o desempenho dos pneus em pista molhada, a destacar:

- Textura do pavimento;
- Profundidade da lâmina d'água;
- Velocidade de deslocamento;

- Aspecto da área de contato.

Desde cedo foi percebido que a segurança de vôo requer um mínimo de controle necessário da incerteza na decolagem ou aterrissagem de aviões. Segurança de vôo é a razão principal de se medir o atrito. Como as aeronaves de transporte ficaram cada vez maiores e, portanto, exigindo uma melhor aderência com o pavimento, a medição do atrito passou a ser um item importantíssimo no que diz respeito à manutenção dos aeroportos.

Neste sentido, Comfort (2001) estudou o comportamento do atrito em função da velocidade de deslocamento, na presença de água sobre a superfície do pavimento. A Figura 2.15 mostra a envoltória deste comportamento. Nota-se que a partir da velocidade de hidroplanagem ( $V_h$ ) o atrito é praticamente nulo.

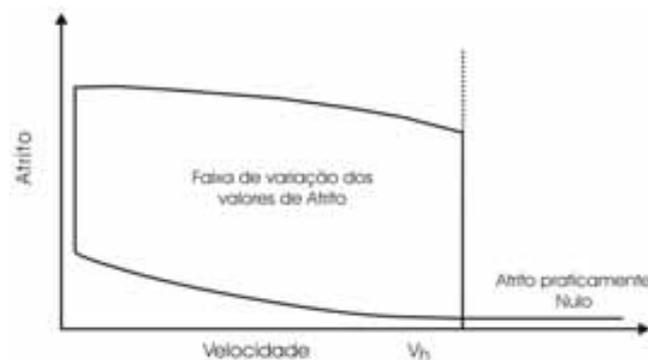


Figura 2.15. Tendência global do atrito em pavimento molhado *versus* velocidade (Adaptado de Comfort, 2001).

Para obter-se atrito necessário à frenagem de uma aeronave em pistas molhadas é necessário que se desloque ou se rompa a película de fluido contaminante que se interpõe entre o pneu e a pista, de forma a obter contato semelhante ao obtido com pista seca.

Entende-se por fluido contaminante, como sendo qualquer material que possa afetar o contato pneu-pavimento, dentre os mais significantes, encontrados na literatura, destacam-se a água, o gelo e a neve. Entretanto, devido às condições climáticas predominantes no Brasil, a presente pesquisa dará ênfase somente à água.

Devido à presença de uma película de água que se interpõe entre o pneu e o pavimento pode ser iniciado um dos principais fatores influenciadores de acidentes aeroportuários conhecido como hidroplanagem (ou aquaplanagem), que ocorre quando os pneus da aeronave perdem

totalmente o contato com a superfície do pavimento, pois, a viscosidade e a massa do fluido afetam o desempenho do atrito entre pneu e pavimento (Figura 2.16).

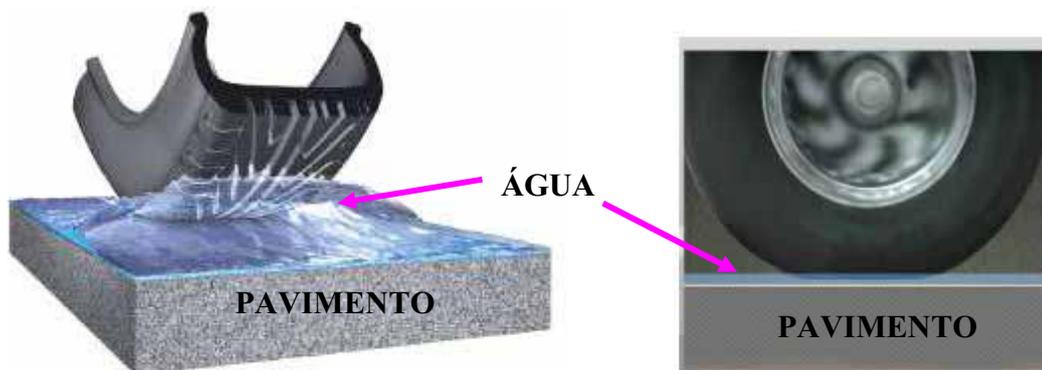


Figura 2.16. Fenômeno da hidroplanagem

Nessas condições a força de atrito é praticamente nula e insuficiente para manter a roda girando. Uma vez iniciada a hidroplanagem, a velocidade em que a aeronave encontra-se em relação ao solo deve imediatamente ser reduzida sensivelmente para que a roda volte a girar (ICAO, 1994).

Atualmente, são conhecidos basicamente três tipos de hidroplanagem: viscosa, dinâmica e por desvulcanização, apresentadas a seguir:

- *Hidroplanagem viscosa*: ocorre quando uma fina película de contaminante (água) age como lubrificante em uma superfície asfáltica, assim reduzindo o atrito entre pneu-pavimento, mesmo em baixas velocidades. É muito comum a ocorrência deste tipo de hidroplanagem, principalmente em cabeceiras e zonas de toque emborrachadas durante períodos longos de precipitação, podendo ser desencadeada em velocidades menores que as dos outros tipos de hidroplanagem.
- *Hidroplanagem dinâmica*: ocorre, ao contrário da viscosa, sob condições de velocidade maior, quando a água não consegue escapar dos sulcos dos pneus, fazendo com que as rodas do trem de pouso girem sem a menor tração, literalmente sobre a camada de água. Segundo Silva (1981), a espessura crítica da lâmina de água necessária para desencadear este processo, em superfície onde a macrotextura é enquadrada como fechada ou fina, é de aproximadamente 2 a 3,0 mm, chegando até a 10 mm em pistas cuja macrotextura é considerada aberta. Neste sentido, para diminuição da probabilidade de ocorrência deste fenômeno é necessário manter satisfatório o caimento transversal das pistas para que a água proveniente de chuvas de curta ou longa duração, seja completamente escoada para os

dispositivos de captação devidamente projetados e instalados nas laterais da pista, ao longo de toda sua extensão, conforme ilustrado na Figura 2.17.

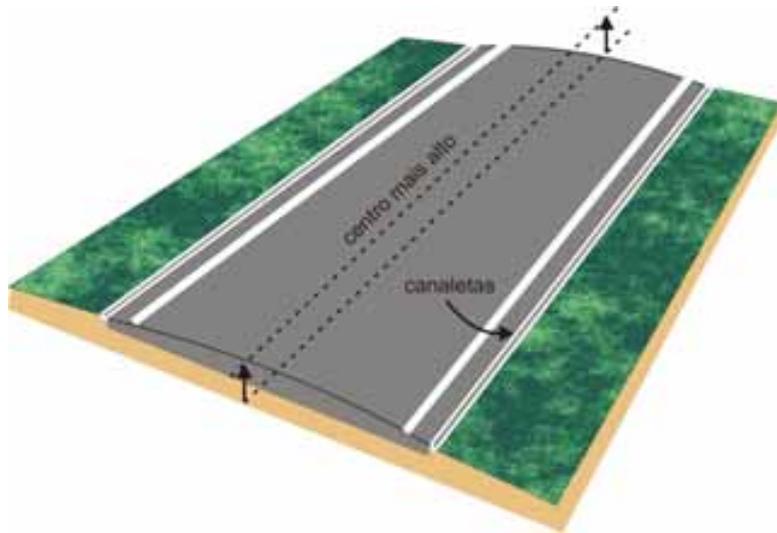


Figura 2.17. Pista aeroportuária com caimento satisfatório.

- *Borracha revertida*: Também conhecida como hidroplanagem por desvulcanização, ocorre quando os freios são travados em uma pista molhada ou úmida, o que super aquece a banda de rodagem, gerando vapor na área de contato, fazendo com que a borracha do pneu entre no processo de fundição (Figura 2.18) enquanto o pneu roda, sobe o vapor, deixando marcas de derrapagem na pista. É uma ocorrência rara resultante de um mau funcionamento dos freios ou do sistema anti-derrapante (*anti skid system*).



Figura 2.18. Banda de rodagem de um pneu aeronáutico após hidroplanagem por desvulcanização (Goodyear, 2004).

Cardoso *et al.* (1995) afirmam que um veículo quando se desloca sobre uma pista, na condição molhada, desencadeia o surgimento de três zonas de contato com quatro fases, denominada hidroplanagem combinada, na interface pneu-pavimento.

Este fato também foi verificado por Balkwill (2003) que caracterizou estas zonas de contato, ilustradas na Figura 2.19, descritas com detalhes a seguir.

- Zona molhada (Zona 1): localizada na frente da zona de contato pneu-pavimento, onde ocorre maior concentração de água e o risco de hidroplanagem dinâmica é acentuado. A maior parte do fluido contaminante (água) é deslocada para frente e para os lados, sob a forma de spray, além é claro de boa parte ser forçada a se deslocar através das ranhuras da banda de rodagem dos pneus e micro-canais formadas pela macrotextura da superfície da pista.
- Zona intermediária (Zona 2): conhecida como zona de transição, recoberta por uma fina lâmina d'água, onde o risco de hidroplanagem viscosa é alta. Nesta região ainda há água presente na pista, que sob pressão, impede o contato direto entre as superfícies do pneu e pavimento.
- Zona seca ou de contato pleno (Zona 3): região onde a água é totalmente expulsa, ocorrendo perfeito contato entre a superfície e a banda de rodagem do pneu.

Um dos fatores fundamentais para determinação das dimensões nas Zonas 1, 2 e 3 é o efeito da velocidade de deslocamento, conforme ilustrado na Figura 2.19. Outro fato a se destacar é a magnitude dos coeficientes de atrito (adesão e histerese) que são totalmente dependentes da espessura da lâmina d'água e da microtextura da superfície analisada.

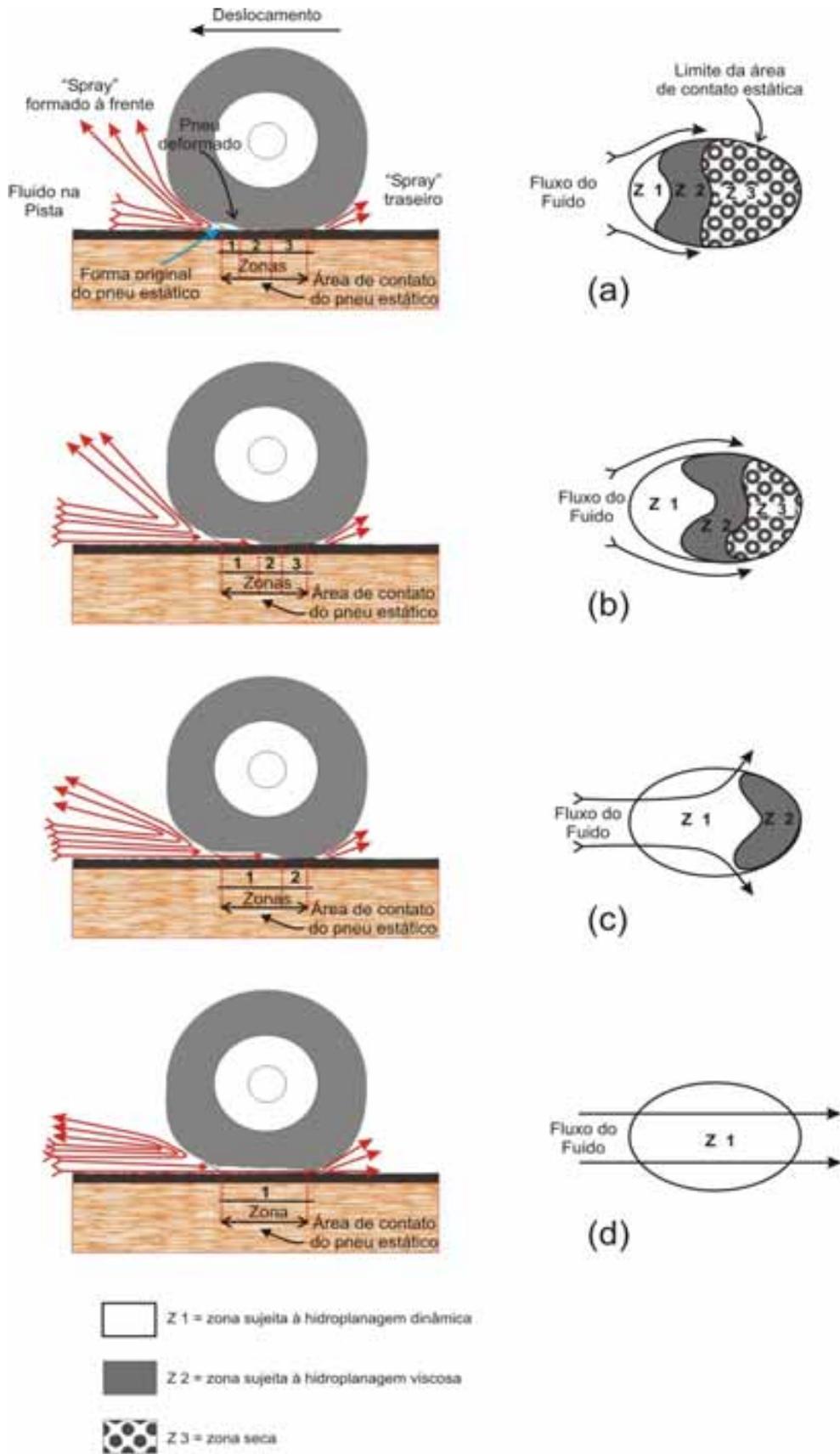


Figura 2.19. Modelo de hidroplanagem combinada: 3 zonas, 4 fases (Modificado: Balkwill, 2003).

Numa situação onde o pneu perde totalmente o contato com a superfície do pavimento, devido à hidroplanagem dinâmica completa (Figura 2.19-d), o atrito é reduzido a valores insignificantes, provocando momentos de guinada, desencadeando a perda de controle da aeronave, e um possível acidente.

Para entender melhor o fenômeno da hidroplanagem é necessário conhecer os fatores influenciadores, agrupados em quatro grupos principais:

a) *O Pneu*

A velocidade de hidroplanagem é influenciada pela pressão de enchimento do pneu, pois, quanto maior a pressão, menor a deformação da banda de rodagem, dificultando uma maior penetração de água na área de contato.

Este fato pode ser observado na Figura 2.20, onde Horne *et al.* (1986) mostram que aumentando a pressão de enchimento do pneu, eleva-se a pressão na área de contato e a extensão de penetração de água diminui, então o veículo poderá chegar numa velocidade maior até que se inicie a hidroplanagem. O experimento foi realizado com aeronave de transporte a jato, onde se observou a área de contato do pneu do trem de pouso principal (Figura 2.20), com pressão de enchimento de 965kPa (140 lb/pol<sup>2</sup>).



Figura 2.20. (a) Trem de pouso principal; (b) Área de contato pneu-pavimento (Modificado: Rodrigues Filho, 2006).

O desenho da escultura da banda de rodagem de um pneu também influencia na velocidade de ocorrência do fenômeno, pois, pneus lisos tendem a diminuir a velocidade de hidroplanagem, se comparados com pneus com raias contínuas ao longo de todo perímetro.

Segundo Horne (1963), estas raias ou ranhuras aumentam a profundidade mínima de fluido contaminante necessário para ocorrência da hidroplanagem parcial, em pneu aeronáutico, com lâmina conforme ilustrado na Figura 2.21.

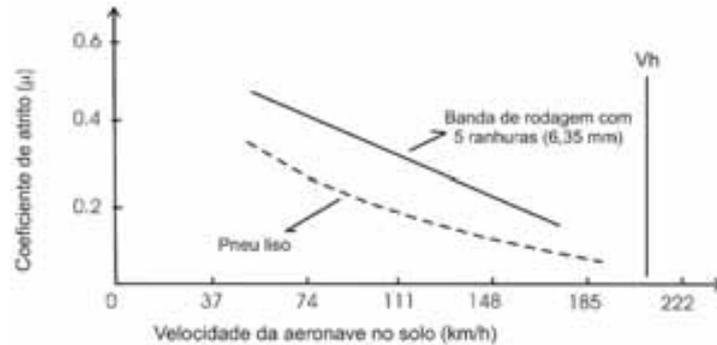


Figura 2.21. Efeito da banda de rodagem sobre a tração em condições de hidroplanagem (Modificado: Horne, 1963).

Outro fato importante é o efeito do tipo de pneu: diagonal ou radial, na relação da velocidade de início da hidroplanagem. Van Es *et al.* (2001) demonstraram que pneus radiais (utilizados nas aeronaves) apresentam velocidades de hidroplanagem em torno de 27% abaixo do que o pneus diagonais, isto claro, submetidos às mesmas condições de operação, conforme observado na Figura 2.22.

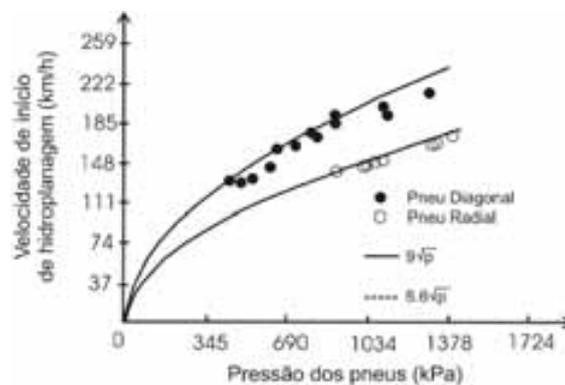


Figura 2.22. Velocidade de hidroplanagem *versus* pressão do pneu (Modificado: Van Es *et al.*, 2001).

#### b) Fluido contaminante

Uma pista pode ser considerada contaminada quando mais de 25% de sua superfície (área contínua ou não) dentro do comprimento e da largura sendo utilizada está coberta por uma lâmina d'água > 3,0 mm, neve compactada ou mesmo gelo misturado com água.

Como o clima do Brasil pode ser classificado, em geral como equatorial, tropical e subtropical, o fluido contaminante considerado nesta pesquisa será apenas água proveniente de precipitações locais.

As duas características básicas de um fluido, que afetam a aderência pneu-pavimento e influem no potencial de ocorrência de hidroplanagem são a massa específica e a viscosidade. A água, aqui destacada como fluido contaminante, possui baixa viscosidade e massa específica, resultando numa velocidade relativamente baixa para promover a deformação da banda de rodagem, permitindo a penetração de uma fina película de água na área de contato.

A profundidade da película d'água também é um fator importante na determinação do potencial de hidroplanagem, pois, quanto maior a profundidade do fluido (acima da macrotextura da superfície) maiores serão as forças inerciais que vão agir no pneu:  $F_D$  (arrasto) e  $F_L$  (ascensão), apresentado na Figura 2.23. Entretanto, esta profundidade da lâmina d'água não tem relação direta com a velocidade de início da hidroplanagem. Esta por sua vez ocorre a partir de uma profundidade mínima denominada profundidade crítica.

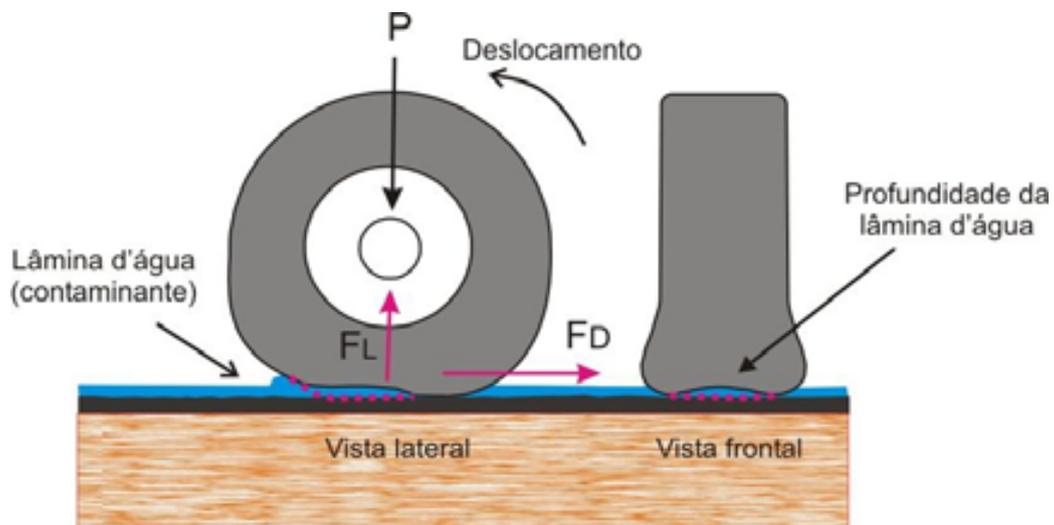


Figura 2.23. Arrasto hidrodinâmico (Rodrigues Filho, 2006).

Balkwill (2003) verificou, a partir de observações realizadas numa pista de testes, que uma mesma roda com carga de 441 kgf, disposta sob diferentes profundidades de fluido contaminante (água), apresentou arrasto hidrodinâmico crescente com a velocidade até atingir um valor máximo (início da hidroplanagem).

Apesar de o arrasto hidrodinâmico apresentar valores crescentes com a profundidade de água, a velocidade de início da hidroplanagem apresenta valores bastante similares nas observações por ele realizadas.

### c) Pavimento

A declividade transversal de uma pista tem influência direta sobre o fenômeno da hidroplanagem, pois, de fato, ela favorece ou dificulta a ocorrência do fenômeno, uma vez que, influi sobre as condições de drenagem da superfície do pavimento, resultando na formação de poças na superfície durante os períodos de chuvas de maior intensidade.

Essas poças geralmente apresentam dimensões que atingem apenas um dos trens de pouso da aeronave que se desloca na pista. Assim, é grande a probabilidade de que se produzam momentos de guinada como resultado da frenagem diferencial em trens de pouso diferentes ou quando algumas rodas entram em hidroplanagem e outras não.

Neste sentido, a declividade transversal deve ser corrigida, principalmente quando se evidencia a formação de poças durante a chuva (Figura 2.24), devendo ser adequada à declividade transversal mínima de 2% a 2,5% na região da pista e de 3% a 5% na região do acostamento (ABPv, 1996).

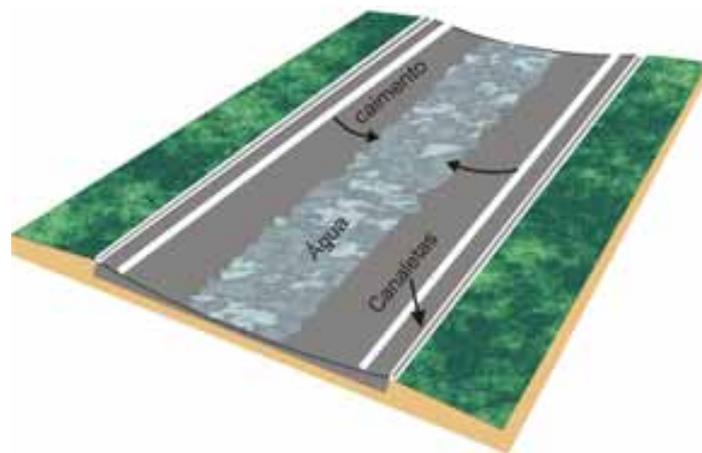


Figura 2.24. Acúmulo de água na superfície do pavimento.

Horne e Dreher (1963) apresentam resultados experimentais de Gray, W.E (1963), onde foi verificado que a profundidade mínima necessária para ocorrência do fenômeno da hidroplanagem é consideravelmente maior em pistas que receberam tratamento antiderrapante, conhecidos como *grooving*, conforme ilustrado na Figura 2.25.



Figura 2.25. Lâmina d'água *versus* deslocamento do pneu (Modificado: Horne, 1963).

#### d) Aeronave

As condições operacionais da aeronave, como modo de operação, velocidade, carga imposta nos pneus do trem de pouso e condições de tráfego também podem ser destacadas como fatores importantes para ocorrência da hidroplanagem.

Horne (1963) observou que a hidroplanagem pode ser retardada, e até eliminada, nos trens de pouso com configuração em tandem. Seus experimentos demonstram que a roda da frente desempenha dentre outras, a função de abrir caminho através da água, reduzindo significativamente sua profundidade logo à frente dos trens de pouso traseiros.

Outro fato importante a se destacar é a carga imposta aos pneus do trem de pouso. A magnitude da carga pode fazer com que a área de contato aumente, diminuindo a velocidade para a qual ocorre a hidroplanagem. Além disso, o estreitamento das ranhuras da banda de rodagem ocasionada devido ao incremento de pressão de contato nas raia externas, reduz significativamente a capacidade de drenagem na área de contato, diminuindo a velocidade de hidroplanagem.

# **CAPÍTULO 3**

## ***Parâmetros de Projeto e Manutenção***

---

### 3.1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da indústria aeroespacial levou, sem dúvida, a um considerável aumento na capacidade de transporte e, conseqüentemente, no porte médio dos aviões mais modernos disponíveis ao uso comercial e doméstico. Este ganho de desempenho se deu num momento em que grande parte da malha aeroviária brasileira já estava implantada, obedecendo a conceitos geométricos, funcionais e estruturais por vezes incompatíveis com as características apresentadas pelos aviões, cada vez mais modernos (Santos, 2004).

Ainda, segundo Santos (2004), todos estes condicionantes, entre outros, fizeram com que os aeroportos se adequassem a essa nova ordem mundial, realizando as intervenções mais apropriadas a cada aeroporto. Na medida em que essas intervenções possam minimizar os efeitos das condições climáticas e de tráfego e possam ainda, manter os níveis de serviço dentro de faixas e limites toleráveis contribui-se certamente, para que diminuam as ocorrências de acidentes e, complementarmente, diminui a gravidade daquelas que não se pode evitar, aumentando assim, o nível de segurança da atividade aeroportuária.

Neste sentido, serão apresentados a seguir os fundamentos teóricos capazes de explicar os fenômenos e mecanismos que desencadeiam acidentes relacionados à infra-estrutura de pistas aeroportuárias.

### 3.2 - AVALIAÇÃO DE DEFEITOS FUNCIONAIS

O levantamento de defeitos funcionais consiste no registro da extensão, frequência e severidade apresentada pelos defeitos de superfície existentes. Comumente é realizado visualmente, embora já existam equipamentos automatizados que efetuam as leituras por meio de sensores. Para sua completa caracterização, Macedo (2005) sugere que os defeitos superficiais sejam descritos quanto aos seguintes parâmetros:

- Tipo de Defeito: dentre trincas, desgaste, exsudação de asfalto ou de água, afundamento localizado, agregado polido, remendos e painéis;
- Grau de severidade: retrata o grau com que aquele defeito afeta a estrutura do pavimento ou compromete seu desempenho. É usual, em diversas metodologias, avaliá-la por meio de três níveis de gravidade: baixa, média e elevada;
- Frequência: é a distribuição da ocorrência do defeito ao longo de um segmento ou trecho da via, sendo expressa pela relação percentual entre o número de seções onde ocorre o defeito e o número total de seções existentes dentro do segmento;
- Extensão: área ocupada pelo defeito.

O levantamento de defeitos de superfície tem a finalidade de avaliar as medidas de conservação necessárias evitando assim uma deterioração acelerada no futuro, ou para determinação das medidas de restauração requeridas para se melhorar a condição do pavimento. A Tabela 3.1 apresenta como vários defeitos presentes numa pista aeroportuária afetam em 5 características básicas necessárias para que se obtenha uma operação com aeronaves de maneira segura e confortável.

Tabela 3.1. Impacto dos defeitos superficiais do desempenho de um pavimento.

Defeitos	Conforto	Resistência à derrapagem	Integridade Estrutural	Drenagem Superficial
Trinca transversal	X	-----	X	-----
Trinca longitudinal	-----	-----	X	-----
Trinca couro-de-jacaré	-----	-----	X	-----
Trinca em bloco	X	-----	X	-----
Afundamento de trilha de roda	X	X	-----	X
Exsudação	-----	X	-----	-----
Buraco/painel	X	-----	X	-----
Remendo	X	-----	X	-----

Fonte: Transport Canada (2007).

A aplicação mais imediata de uma avaliação de defeitos de superfície ocorre dentro de projetos de restauração de pavimentos deteriorados, quando os registros efetuados serão utilizados para:

- Selecionar as medidas necessárias para correção das deficiências funcionais detectadas;

- Dimensionar as espessuras das camadas de recapeamento, se esta solução for aplicável, levando-se em conta o fenômeno da reflexão de trincas;
- Elaborar-se um diagnóstico para o pavimento, por meio de uma análise conjunta dos defeitos levantados, do histórico de manutenção e de tráfego do pavimento, de sua condição estrutural e de sua idade, esclarecendo-se os mecanismos através dos quais se deu a sua deterioração.

No Brasil, geralmente avalia-se o pavimento flexível para fins rodoviários em termos de Índice de Gravidade Global (IGG). Para sua determinação, são realizadas medidas de afundamentos em trilhas de roda e levantamentos visuais da superfície do pavimento, efetuados com o propósito de se identificar e quantificar os defeitos existentes na superfície do pavimento.

Em se tratando de pavimentos aeroportuários, o Brasil ainda é incipiente no que diz respeito à metodologias de avaliação, uma vez que o tráfego e solicitações do pavimento são bastante diferentes de pavimentos rodoviários. Assim, é necessário utilizar metodologias internacionais, como o método PCI (*Pavement Condition Index*) que surgiu após estudos desenvolvidos por Shahin no CERL “*Construction Engineering Research Laboratory*”, publicado em julho de 1979, pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE), por meio do documento CERL-TR-M268.

Shahin (1994) descreve que o uso do PCI para pavimentos aeroportuários, rodoviários e áreas de estacionamento foi recebido e formalmente adotado como procedimento padrão por muitas agências mundiais, incluindo:

- Administração de Aviação Federal (FAA) em 1982;
- Departamento de Defesa dos Estados Unidos em 1981 e Exército dos Estados Unidos, em 1982;
- Associação de Obras Públicas Americanas (APWA) em 1984, e muitos outros.

O PCI para aeroportos, também foi publicado como metodologia de teste pela ASTM em 1993 (ASTM D 5340-04e1, revisada em 2003). Segundo Shahin e Khon (1979), citados por Aps *et al.* (1998), o método tem como objetivo obter um Índice numérico da Condição do Pavimento (PCI), no qual os valores variam entre 0 (ruim) e 100 (condição excelente).

Para calcular o PCI, a pista deve ser dividida em seções de inspeção para então determinar o número de amostras a inspecionar. A quantidade de amostras requeridas depende do uso do pavimento, sendo que esta divisão deve ser mantida para eventuais inspeções futuras.

A inspeção deve identificar todas as unidades de amostras “incomuns” e inspecioná-las como unidades “adicionais” incluindo a seção no cálculo do PCI, alterando-o ligeiramente. Para superfícies aeroportuárias com pavimento flexível, Shahin (1994) recomenda amostras com área de  $5.000 \pm 2000$  sq ft. ( $465 \pm 186$  m<sup>2</sup>).

Uma unidade de amostra é inspecionada medindo o tipo e a severidade do defeito, identificado de acordo com o manual de defeitos do PCI, e os dados são anotados na planilha de dados correspondente. Deve ser utilizada uma planilha de dados (conforme Apêndice A) para cada unidade de amostra, onde são anotados os tipos, quantidades e os graus de severidade de cada defeito identificado.

A descrição e identificação dos tipos de defeitos passíveis de ocorrência em pavimentos, e a definição dos níveis de severidade (baixa, média e alta) de cada tipo de defeito e o critério de medição, são apresentados, resumidamente, na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Defeitos de pavimentos aeroportuários e critério de medição.

Defeito	Forma de medição	Defeito	Forma de medição
Trinca “couro de jacaré”	Área (m <sup>2</sup> )	Derramamento de óleo/contaminantes	Área (m <sup>2</sup> )
Exsudação	Área (m <sup>2</sup> )	Remendos	Área (m <sup>2</sup> )
Trinca tipo “bloco”	Área (m <sup>2</sup> )	Agregado Polido	Área (m <sup>2</sup> )
Ondulação/Corrugação	Área (m <sup>2</sup> )	Desgaste/Desagregação	Área (m <sup>2</sup> )
Afundamento localizado	Área (m <sup>2</sup> )	Afundamento de Trilha de Roda	Área (m <sup>2</sup> )
Desgaste causado por queima de Jato	Área (m <sup>2</sup> )	Fissuras devido ao escorregamento de massa	Área (m <sup>2</sup> )
Trinca Longitudinal / Transversal	Metro linear	Expansão	Área (m <sup>2</sup> )

O PCI é calculado com base em valores deduzíveis, com fatores de peso de 0 a 100, que indicam o impacto de cada defeito na condição do pavimento. Na seqüência, classifica-se o pavimento por meio de uma escala graduada que permite a comparação entre diferentes pavimentos, conforme a Figura 3.1, a seguir.

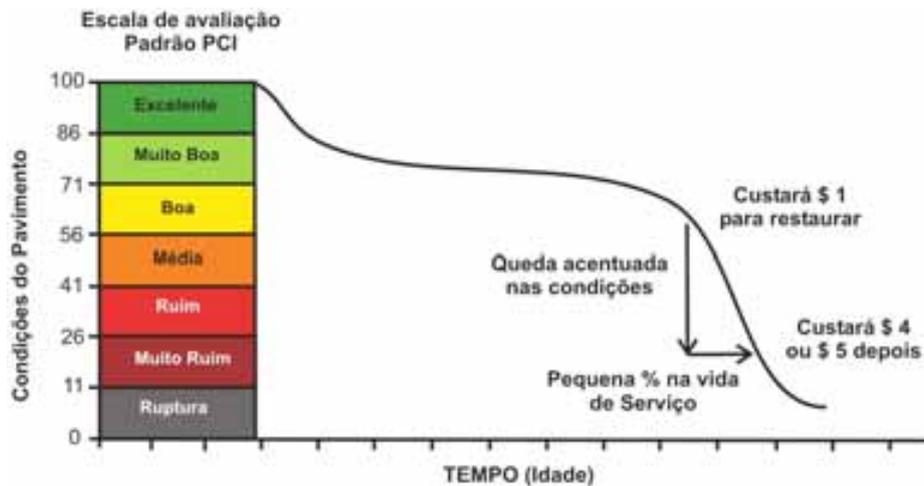


Figura 3.1. Desempenho de um pavimento (Modificado: Shahin 1994)

Shahin mostra por meio da Figura 3.1 que o desempenho de um pavimento tem queda acentuada a partir do momento em que for enquadrado numa condição “Média”, momento em que os custos com reparos ainda são baixos em relação à vida de serviço. Assim, um pavimento com  $PCI \leq 56$  deverá ser imediatamente reparado, pois poderá chegar à condição de ruptura num curto período de tempo, com custos de reparo chegando a 5 vezes o valor dos reparos quando em condições ainda satisfatórias.

O PCI pode ser calculado manualmente ou com auxílio de software, desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano (*U.S. Army Corps of Engineers*), denominado MicroPaver®, apresentado no Capítulo 4.

### 3.3 - VARIÁVEIS QUE AFETAM NO ATRITO.

Com o passar do tempo e a ocorrência de diversos acidentes e incidentes tornou-se necessário se dispor de um método para avaliar o atrito das superfícies das pistas. A segurança de vôo foi a maior razão para isso. À medida que as aeronaves tornaram-se maiores e mais velozes ficou mais importante avaliar o atrito de uma maneira mais objetiva, assim torna-se necessário conhecer os mecanismos e as variáveis que interferem na ocorrência deste fenômeno.

A capacidade de uma superfície de pavimento prover boa resistência à derrapagem para operações seguras com aeronaves está usualmente expressa em termos "coeficiente de atrito". Este por sua vez é expresso como a relação da força horizontal e força normal (ou vertical) da carga agindo sobre um pneu freando. Porém, o coeficiente de atrito desenvolvido a partir da frenagem de uma aeronave é uma função complexa de muitas variáveis relacionadas à

superfície de pavimento, o pneu de aeronave e outros fatores operacionais da aeronave, resumidos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Variáveis que afetam no coeficiente de atrito durante a frenagem.

<i>Características do pavimento</i>	<i>Propriedades do pneu da aeronave</i>	<i>Fatores operacionais da aeronave</i>
Macrotextura da superfície e microtextura da superfície dos agregados	Tipo e composição da borracha do pneu	Velocidade operacional
Tipo e grau de contaminantes dos agregados e da superfície do pavimento	Tipo e configuração do pneu	Pressão de inflação dos pneus
Profundidade de água na superfície (hidroplanagem)	Grau de uso do pneu	Sistema de freios anti-derrapagem (Anti-Skid) e Freios adicionais (Aerodinâmicos e Reversor de empuxo)

A principal maneira de caracterizar a superfície de um pavimento é por meio da avaliação da textura, reconhecida em quatro escalas: microtextura e macrotextura, megatextura e irregularidade. Na presente pesquisa será tratada apenas da microtextura e macrotextura (Figura 3.2).

A macrotextura é função do tipo de mistura e traço adotados para o revestimento betuminoso enquanto a microtextura é função principalmente da rugosidade superficial dos agregados utilizados (Merighi *et al.* 2006).

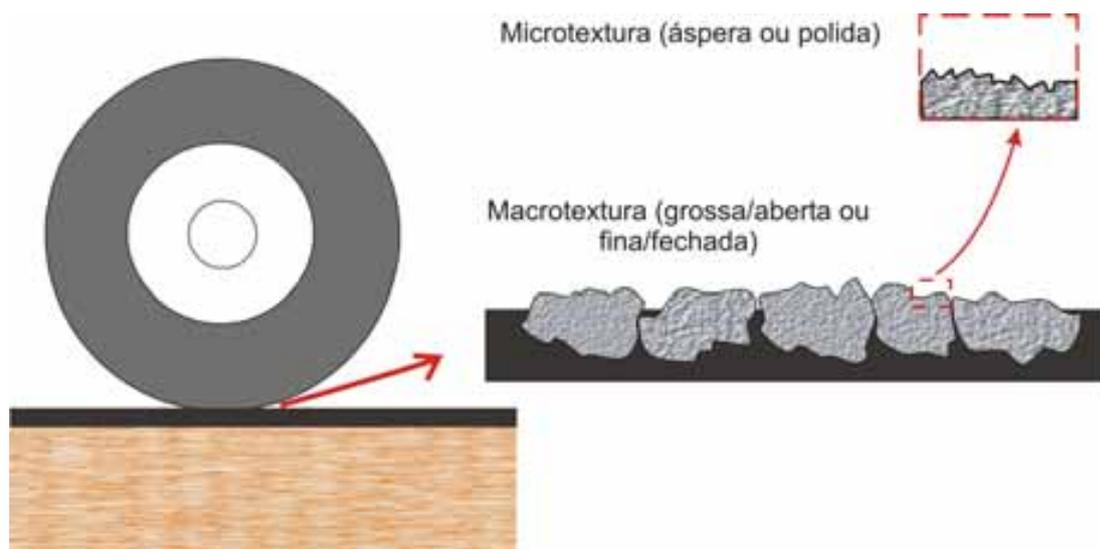


Figura 3.2. Diferença entre microtextura e macrotextura

A macrotextura influencia nas condições de rolamento e resistência à derrapagem. A forma de medição mais simples é por meio do ensaio de Mancha de Areia, que consiste em colocar sobre a superfície do pavimento um volume pré-determinado de areia fina e espalhá-la circularmente utilizando-se um disco especial. Então, com a medida da área da mancha de areia sobre o pavimento e o volume de areia utilizado, calcula-se uma profundidade média dos vazios preenchidos por areia, valor utilizado como medida de macrotextura superficial.

De acordo com DAC (2001), devem-se fazer no mínimo três medições de profundidade da textura do pavimento por ensaio nas áreas consideradas deterioradas. Uma profundidade média da textura (média das três medições) deve ser calculada para cada área. Um maior número de medições deve ser feito, sempre que óbvias deficiências da textura superficial do pavimento forem observadas.

Entretanto, um dos problemas da utilização do Método da Mancha de Areia em revestimentos asfálticos drenantes ou locais com tecnologia antiderrapante como grooving<sup>4</sup>, pois ocorre penetração excessiva dos grãos de areia nos poros vazios, o que leva à redução da área da mancha de areia e à maximização da medida de macrotextura.

A profundidade média da macrotextura do pavimento de uma pista de pouso e decolagem, medida de acordo com a metodologia da “mancha-de-areia”, não deverá ser inferior a 0,50 mm, enquadrada com base nas informações contidas na Tabela 3.4 a seguir.

Tabela 3.4. Classificação da Macrotextura segundo a altura da Mancha de Areia (Aps, 2006).

<i>Profundidade Média</i>	<i>Textura Superficial</i>
HS < 0,20 mm	Muito Fina ou Muito Fechada
0,20mm < HS < 0,40 mm	Fina ou Fechada
0,40mm < HS < 0,60mm	Medianamente Fina
0,60mm < HS < 0,80 mm	Média
0,80mm < HS < 1,0mm	Medianamente Grossa
1,0mm < HS < 1,20 mm	Grosseira ou Aberta
HS > 1,20 mm	Muito Grosseira ou Muito Aberta

Segundo o DAC (2001) as medições de textura superficial devem ser realizadas no mínimo a cada 100 metros de pista, em pontos localizados a 3 metros do eixo, alternadamente à esquerda e a direita deste, distando o primeiro ponto de medição 100 metros de uma das cabeceiras. As medições de textura deverão ser efetuadas sempre que forem realizadas medições de atrito, de acordo com a tabela estabelecida para as medições de atrito.

<sup>4</sup> Grooving é definido no item 3.5.

Uma medida indireta de macrotextura pode ser obtida por meio da drenabilidade superficial do pavimento. Esta é medida com um aparelho padronizado conhecido com drenômetro ou “flow-meter”, desenvolvido pelo ISETH - Institute for Highway, Railroads and Rock Engineering (Doty, 1975).



Figura 3.3. Flow-meter.

Este ensaio permite, através da avaliação da capacidade de escoamento da água superficial por entre os canais da rugosidade, caracterizar a textura do revestimento.

O tempo de escoamento para um volume de água de 730ml, medido com um cronômetro comum, representa uma medida da textura, pois são as características da textura (macrotextura) que determinam a vazão da água. A duração do escoamento será tanto maior quanto mais lisas forem as superfícies, verificando-se o contrário com superfícies extremamente rugosas.

Existe uma correlação inversa entre a macrotextura medida pela altura de areia e o tempo (ou correlação direta com a vazão) de drenagem no flow-meter. Entretanto, esta correlação não é muito forte, principalmente quando a textura é muito lisa. A Figura 3.4 ilustra este tipo de correlação para dados obtidos em 50 pontos ao longo do Eixão Sul, em Brasília (Farias & Valadão Jr., 2004).

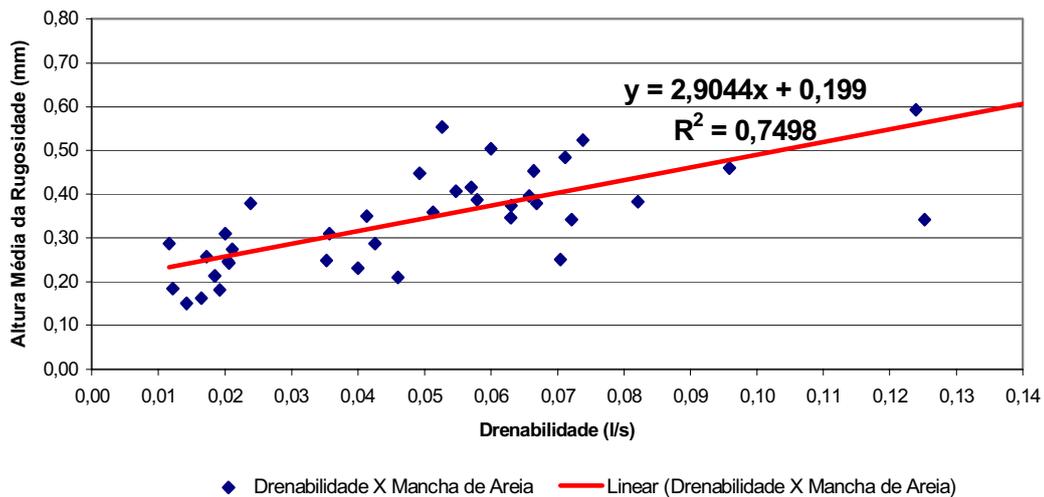


Figura 3.4. Correlação entre drenabilidade e mancha de areia (Farias & Valadão Jr., 2004).

Segundo Santos (2004), a determinação da microtextura pode ser obtida por meio de equipamentos de medição contínua ou mesmo equipamentos portáteis.

Dentre os equipamentos de medição contínua mais conhecidos no mercado, destacam-se o SCRIM (Sideway force Coefficient Routine Investigatio Machine) ilustrado na Figura 3.5-a, que trabalha com rodas com ângulo de inclinação de 20° e atinge uma velocidade máxima de 60 km/h e o MuMeter (Figura 3.5-b), padronizado como método de ensaio pela ASTM E 670 (ASTM, 2000), que trabalha com rodas com ângulo de inclinação de, aproximadamente, 7,5° e velocidade de operação de 65 km/h. O MuMeter é o aparelho mais utilizado no território nacional brasileiro pela DIRENG e pela Infraero. Ambos fornecem bons resultados da microtextura do pavimento analisado.



Figura 3.5. (a) SCRIM ; (b) MuMeter (Infraero).

O processo de medição do MuMeter, além de ser simples e de boa precisão, utiliza uma programação de computador para auxiliar o operador em suas medições. O MuMeter é um

aparelho do tipo de ângulo de deslizamento lateral, ou seja, realiza a medição de atrito a partir de uma roda alinhada diagonalmente com a direção de avanço.

Conforme um elemento da banda de rodagem avança dentro da zona de contato, a carcaça vai sendo continuamente defletida lateralmente, já que a zona de contato desliza lateralmente. Essa deformação lateral do pneu gera uma força lateral, cujo momento em torno do ponto de articulação da roda atua para alinhar a mesma com a direção de avanço, inferindo um valor de coeficiente de atrito de frenagem a partir da medida da força lateral nos eixos de duas rodas, chamadas *friction wheels (FW)*, instaladas num veículo de reboque, conforme ilustrado na Figura 3.5-b.

Em se tratando de equipamentos portáteis para medição do atrito, o principal representante é o Pêndulo Britânico. Padronizado de acordo com a norma ASTM E-303-93 (ASTM, 2003-a), este equipamento consiste num pêndulo, cuja haste possui em sua extremidade uma sapata de borracha (Figura 3.6).



Figura 3.6. Ensaio de Pêndulo Britânico

O princípio de funcionamento é muito simples. Ao soltar-se a haste do pêndulo sobre o pavimento, a sapata desliza sobre o mesmo. A perda de energia decorrente desse movimento serve como medida de atrito, e é registrada numa escala graduada. É um dos dispositivos mais difundidos internacionalmente devido ao seu baixo custo e facilidade de operação.

De maneira semelhante ao ensaio de mancha de areia, o ensaio com Pêndulo Britânico deve ser realizado nos mesmos pontos de amostragem, pois se espera determinar um índice de

atrito composto por um par de valores relativos a macrotextura e microtextura do pavimento, assim verificando as condições de atrito da superfície da pista.

Neste sentido, em cada ponto da amostragem devem ser realizadas 5 determinações, sendo o valor de BPN respectivo, a média entre os valores obtidos. Os resultados obtidos são classificados em função da rugosidade, conforme apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Classificação da microtextura com Pêndulo Britânico (Aps, 2006).

<i>Limites (BPN)</i>	<i>Classificação</i>
BPN < 25	Perigosa
25 < BPN < 31	Muito Lisa
32 < BPN < 39	Lisa
40 < BPN < 46	Insuficientemente Rugosa
47 < BPN < 54	Medianamente Rugosa
55 < BPN < 75	Rugosa
BPN > 75	Muito Rugosa

Algumas das recomendações do DAC, em sua instrução normativa IAC 4302, inerentes a aos estudos da macrotextura e microtextura são descritas a seguir:

- Deve ser considerado como *nível de manutenção* o valor de atrito de 0,52, medido com o aparelho MuMeter, exceto o caso de aeroportos que possuam planos especiais de manutenção, nos quais o nível de manutenção passa a ser aquele definido nesses planos;
- O valor mínimo admissível para o atrito médio de qualquer segmento do pavimento, com mais de 100 metros de comprimento, medido de acordo com a metodologia estabelecida, não poderá ser inferior ao nível de manutenção;
- Sempre que uma extensão de mais de 100 metros de pista apresentar atrito inferior ao nível de manutenção, a Administração Aeroportuária deverá providenciar: (1) a solicitação de expedição de NOTAM (*Notice To AirMen* – Aviso aos Aeronavegantes), com informações de que a pista, quando molhada, encontra-se escorregadia; e (2) iniciar, prontamente, as ações corretivas apropriadas, visando a restaurar o nível de atrito exigido.

Uma outra recomendação importante diz respeito à frequência de verificação do coeficiente de atrito. A Tabela 3.6, retirada da Instrução de aviação civil (IAC 4302), serve como referência para o agendamento das inspeções do nível de atrito. Ela foi elaborada levando-se em consideração um mix de aeronaves a jato, sendo em sua maioria de médio porte e algumas de grande porte.

Tabela 3.6. Frequência de avaliação do coeficiente de atrito (DAC, 2001).

<i>Pousos diários de aeronaves à reação</i>	<i>Pavimentos não Estriados (Sem tratamento complementar superficial)</i>	<i>Pavimentos com “grooving” ou com Camada Porosa de Atrito</i>
Menos de 50	Cada 12 meses	Cada 12 meses
51 a 250	Cada 6 meses	Cada 9 meses
251 a 450	Cada 4 meses	Cada 6 meses
451 a 700	Cada 3 meses	Cada 4 meses
701 ou mais	Cada 3 meses	Cada 3 meses

Os valores de atrito obtidos com o MuMeter são usados como diretriz para avaliar a deterioração do atrito da superfície de pavimentos de pistas, bem como para identificar ações corretivas adequadas para a realização de operações aéreas seguras. A Tabela 3.7 mostra a classificação do nível de atrito pela FAA.

Tabela 3.7. Valores de referência de coeficientes de atrito medidos com o MuMeter (FAA, 2004-a)

MuMeter	65 km/h			95 km/h		
	Mínimo	Manutenção / Planejamento	Projeto Novo / construção	Mínimo	Manutenção / Planejamento	Projeto Novo / construção
	0,42	0,52	0,72	0,26	0,38	0,66

### 3.4 - ÍNDICE INTERNACIONAL DE ATRITO (IFI)

Em decorrência da série de fatores que podem comprometer a segurança das operações de pousos e decolagens nos aeroportos, relacionadas às condições de atrito nas pistas aeroportuárias, várias pesquisas foram conduzidas por agências especializadas de diferentes países do mundo, entre os quais os Estados Unidos da América, por meio da “*National Aeronautics and Space Agency (NASA)*”, da “*Federal Aviation Administration (FAA)*” e da “*United States Air Force (USAF)*” (Santos, 2004).

Um dos objetivos desses estudos é definir requisitos de atrito e de textura superficial para pavimentos aeroportuários resistentes à derrapagem, e estabelecer alguns procedimentos para o monitoramento contínuo da evolução de tais requisitos, com intuito de implementar medidas preventivas e corretivas que possam assegurar pousos e decolagens com níveis de atrito adequados às operações aeroportuárias, sob condições meteorológicas normais e adversas.

Os métodos e sistemas usados para medir textura e resistência à derrapagem das superfícies de pavimentos variam significativamente, conforme o país. Isso dificulta sobremaneira o intercâmbio de informações entre os países, no que diz respeito à comparação destes parâmetros. Em 1992, o Comitê Técnico da PIARC (World Road Association) apresentou uma escala de referência internacional, visando a avaliação global da superfície de um pavimento. Esta escala é representada pelo IFI (*Internacional Friction Index*), que avalia o atrito e a textura da superfície (FAA, 2004-a).

Para obtenção do IFI é necessária realização de ensaio com qualquer equipamento ou técnica, a partir de critérios estabelecidos no experimento internacional, determinando dois tipos de medidas relativas ao pavimento analisado, uma de atrito (FR) e outra de textura (Tx), utilizando por exemplo, resultados obtidos por meio de ensaios como Pêndulo Britânico e Mancha de areia (Aps, 2006). A metodologia de cálculo será explicada com maiores detalhes no Capítulo 4.

O IFI é representado por dois números situados entre parênteses e separados por uma vírgula, com o primeiro referindo-se ao atrito e o segundo a textura. O primeiro número é adimensional ( $F_{60}$ ) e o segundo é expresso em km/h (Sp). Ambos fornecem os parâmetros relativos para uma velocidade padrão de 60 km/h e por meio deles pode-se calcular o valor de atrito  $F(S)$ , a qualquer velocidade de deslocamento (S).

Aps (2006) propõe uma classificação do IFI por meio de faixas, conforme mostrado na Tabela 3.8, onde o índice de atrito é composto por meio de medições com aparelhagem portátil.

Tabela 3.8. Classificação do índice de atrito (Aps, 2006).

<i>Limites (IFI)</i>	<i>Classificação</i>
IFI < 0,05	Péssimo
0,06 < IFI < 0,08	Muito Ruim
0,09 < IFI < 0,11	Ruim
0,12 < IFI < 0,14	Regular
0,15 < IFI < 0,21	Bom
0,22 < IFI < 0,35	Muito Bom
IFI > 0,35	Ótimo

É importante ressaltar que há diferença entre as medições com aparelhagem portátil, onde as determinações são pontuais e medição realizada com equipamento de medição contínua, como o MuMeter. Assim, devem ser realizadas considerações distintas conforme a

metodologia utilizada para determinação dos parâmetros, observando as especificações pertinentes para pistas aeroportuárias.

Aps (2006) chama a atenção para o fato de que os valores de atrito, determinados por meio de medições pontual ou contínua podem ser utilizados em estudos de acidentes, avaliações para sistemas de gerência de pavimentos além de manutenção das pistas aeroportuárias.

### 3.5 - TECNOLOGIA ANTIDERRAPANTE

Uma das formas mais conhecidas para auxiliar a redução das derrapagens nos aeródromos é a execução de ranhuras transversais (*grooving*) na superfície do revestimento com intuito de favorecer a drenagem da água superficial do pavimento, melhorando as condições de atrito pneu-pavimento, diminuindo o potencial de ocorrência da hidroplanagem e conseqüentemente os acidentes aeronáuticos ocorridos em solo. A técnica pode ser utilizada tanto no pavimento rígido quanto no flexível.

Resultados experimentais apresentados por Hachiya e Mizukami (2006) sugerem que o modo mais eficaz de entalhe da superfície deve ser realizado em misturas asfálticas com asfalto modificado e agregado grosso com dimensões máximas de 20 mm, além de ser respeitado um tempo mínimo de 2 meses desde a pavimentação da superfície e o entalhe do grooving, resultando numa maior estabilidade do revestimento.

Segundo FAA (1997), o grooving deve ser construído de forma contínua em todo o comprimento da pista e transversal ao sentido de pouso e decolagem, conforme ilustrado na Figura 3.7.

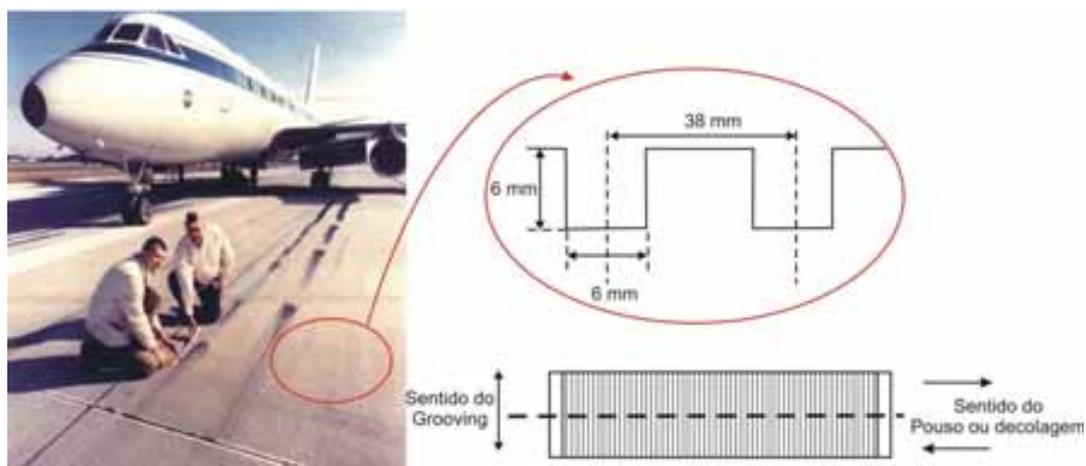


Figura 3.7. Grooving em pavimento aeroportuário.

A necessidade de construção do grooving é baseada em alguns fatores, a saber:

- Qualidade da textura superficial contra derrapagem em condições de pista molhada ou seca;
- Limitação da drenagem;
- Contaminação da superfície em condições que prejudiquem a condição de atrito;
- Redução do potencial de acidentes e incidentes relacionados a hidroplanagem no aeroporto.

Apesar de apresentar melhoras significativas na drenagem superficial da água, algumas dúvidas surgem sobre a área de contato pneu-pavimento que sofre alteração devido ao entalhe dos canais na superfície do pavimento (grooving).

Ao contrário do que se imagina, a área de contato entre as superfícies da banda de rodagem e a pista é bastante elevada, pois os canais de escoamento gerados pela implantação do grooving fazem com que a espessura de lâmina d'água necessária para desencadear o fenômeno de hidroplanagem seja elevada sobremaneira, ou seja; a água escoar pelos canais e os pneus aderem à superfície, resultando numa condição mais segura em situações de pista molhada.

Entretanto, devido ao número acentuado de pousos e decolagens nas pistas aeroportuárias, ocorre constante processo de emborrachamento devido ao atrito pneu-pavimento, que por sua vez fecha as ranhuras, reduzindo significativamente os valores da macrotextura, fazendo com que a superfície perca suas qualidades drenantes, que é a característica mais importante do *grooving*.

O estrangulamento das aberturas das ranhuras ou total fechamento delas se dá principalmente no pouso (Figura 3.8-a), quando a borracha dos pneus atinge temperaturas elevadas devido ao atrito, causando a polimerização da borracha ou desencadeando uma reação química, levando à alteração de estado sólido para viscoso, tornando a borracha acumulada um material fino, muito duro distribuído na superfície e adentre as ranhuras (Figura 3.8-b) (Rodrigues Filho *et al.* 2006).



Figura 3.8. (a) Aeronave pousando; (b) Grooving emborrachado.

Segundo Speidel (2002), uma aeronave do porte do Boeing 747 deposita cerca de 700 gramas de borracha por pneu/pouso, fazendo com que as medidas da condição de atrito aproximem-se ou fiquem abaixo do nível de Planejamento e Manutenção.

O Apêndice 4 do Manual de Servicios de Aeropuertos (ICAO, 1994-b), sugere a Tabela 3.9 como referência para planejar a freqüência de remoção de contaminantes.

Tabela 3.9. Freqüência de remoção de contaminantes

Número de aterrissagens diárias de aeronaves a jato por cabeceira	Freqüência sugerida de remoção de depósito de borracha
Menor que 15	2 anos
De 16 a 30	1 ano
De 31 a 90	6 meses
De 91 a 150	4 meses
De 151 a 210	3 meses
Maior que 210	2 meses

O Aeroporto de Brasília por receber tráfego intenso de aeronaves em suas duas pistas, tem plano de remoção de borracha com freqüência mínima de 6 meses e máxima de 1 ano, dependendo do número de aterrissagens e nível de contaminação da pista.

Uma alternativa para correção destes problemas de emborrachamento pode ser a limpeza ou retexturização das pistas aeroportuárias. Diversas são as maneiras utilizadas para retexturização do pavimento e um bom exemplo é utilização de uma técnica, denominada ShotBlasting a qual utiliza o equipamento mostrado na Figura 3.9-a.

Este equipamento promove a retexturização da superfície e remove a borracha de pneus e resíduos oleosos, melhorando as condições de macro e microtextura sem dano prejudicial à integridade estrutural do pavimento. Segundo a Blastrac (2007), a retexturização é obtida por meio de um jato de esferas de aço, conhecida como granalha (Figura 3.9-b) sob pressão, as

quais são aspiradas de volta juntamente com os resíduos retirados da pista. Neste processo as granalhas são automaticamente separadas para reutilização e o resíduo é acomodado em containeres para posterior descarte.



Figura 3.9. (a) Shot Blast; (b) Esferas de aço (granalha); (c) Pavimento desemborrachado (Blastrac, 2007).

Outra maneira de remoção de borracha em pavimentos aeroportuários, utilizada pela Infraero é o processo de jateamento d'água sob pressão com chuveiro rotativo (Figura 3.10-a), de maneira a cobrir toda área emborrachada, em seguida a borracha removida, ainda solta sobre a superfície da pista é recolhida por um equipamento acoplado em um trator, conforme ilustrado na Figura 3.10-b.



Figura 3.10. (a) Jato d'água; (b) remoção de resíduos de borracha.

A eficácia de remoção da borracha não deve ser avaliada por inspeção visual, mas sim por meio do uso de equipamentos de medição da condição do atrito da superfície do pavimento antes e depois do desemborrachamento.

### 3.6 - RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS DE AERÓDROMOS

A condição estrutural de um pavimento denota sua adequação ou sua capacidade de resistir à deterioração provocada pela passagem das cargas do tráfego. Esta avaliação consiste na determinação das características físicas dos materiais componentes da estrutura do pavimento (CBR, módulo de elasticidade -  $E$ , módulo de reação do subleito -  $k$ , etc) e então analisar os efeitos do carregamento sobre a estrutura de forma a obter-se a resposta a estas deformações (Macedo, 2005).

Uma condição estrutural inadequada ou uma capacidade estrutural insuficiente, para o tráfego atuante, acelerará a geração de defeitos de superfície (trincas de fadiga nas camadas asfálticas e cimentadas), bem como a queda do nível de serventia com o tempo (em decorrência da geração de afundamentos plásticos em trilha de roda e ondulações). Ao mesmo tempo, a existência de trincas no revestimento asfáltico permite a entrada de águas pluviais no pavimento, gerando bombeamento de finos e enfraquecimento do solo de subleito, o que degrada a condição estrutural do pavimento, acelerando, por sua vez, a queda do nível de serventia e a própria deterioração superficial.

Neste sentido, uma ferramenta bastante difundida no sistema aeroportuário do Brasil e do mundo é a avaliação da resistência da pista destinada a aeronaves de massa superior a 5.700 kg por meio de um método onde se determina a relação entre a classificação da aeronave e o número de classificação de pavimentos.

Este método, segundo ICAO-Anexo 14 (ICAO, 2004) é denominado ACN/PCN, onde:

- ACN – Número de condição da aeronave, que exprime o efeito relativo de uma aeronave sobre um pavimento, para determinada resistência normalizada do terreno de fundação. O método faz uso de uma Carga de Roda Simples Equivalente, derivada matematicamente, para definir a iteração trem de pouso/pavimento. Isto é feito igualando a espessura dada pelo modelo matemático para um trem de pouso de uma aeronave, com a espessura para uma carga de roda simples sob a pressão padronizada de 1,25 MPa.
- PCN – Número de classificação do pavimento, que indica a resistência de um pavimento para operações sem restrições. O PCN é determinado para a máxima carga admissível no pavimento e deve levar em consideração fatores tais que representam o tráfego (frequência de operações) e tensões e deformações admissíveis no pavimento.

O método ACN/PCN objetiva a difusão de dados sobre a resistência dos pavimentos em publicações aeronáuticas; onde esta determinação é utilizada como parâmetro para os usuários avaliarem se é possível ou não a utilização de uma determinada pista por um determinado tipo de aeronave, prevendo a notificação das seguintes informações sobre o pavimento:

a) PCN: indica que as aeronaves com ACN igual ou inferior ao PCN notificado, podem operar sem restrições sobre o pavimento, obedecidas as limitações relativas à pressão dos pneus.

b) Tipo de pavimento: flexível ou rígido.

c) Resistência do subleito: representa a capacidade de carga do terreno de fundação, conforme mostra a Tabela 3.10.

Tabela 3.10. Classificação do CBR para cálculo do ACN/PCN.

Capacidade de carga do terreno de fundação	CBR% efetivo	Fator padronizado para subleito (CBR %) – Pavimentos flexíveis	Valor de $K$ (MN/m <sup>3</sup> ) – Pavimentos rígidos
Alta	CBR > 13	CBR <sub>SL</sub> = 15	150
Média	8 < CBR < 13	CBR <sub>SL</sub> = 10	80
Baixa	4 < CBR < 8	CBR <sub>SL</sub> = 6	40
Ultra baixa	CBR < 4	CBR <sub>SL</sub> = 3	20

d) Pressão máxima admissível dos pneus: Alta (sem limite de pressão); Média (1,50 MPa); Baixa (1,00 MPa) ; Muito baixa (0,50 MPa). *NOTA: 1MPa = 145 psi (lb/pol<sup>2</sup>)*

e) Método de avaliação:

- Técnica (T): consiste no estudo específico das características do pavimento e na aplicação da tecnologia do comportamento dos pavimentos.
- Prática (U): consiste na utilização do conhecimento do tipo e peso de aeronaves que, em condições normais de emprego, o pavimento resiste satisfatoriamente.

### 3.6.1 - CÁLCULO DO ACN/PCN

Segundo Roehrs (2002), o ACN das aeronaves deverá ser determinado segundo o método ACN/PCN, utilizando informações dispostas em uma listagem de vários tipos de aeronaves atuais para pavimentos rígidos e flexíveis, nas quatro categorias de resistência do terreno de fundação das aeronaves, exemplificados pela Tabela 3.11 para algumas aeronaves comuns no

Brasil. Além das duas cargas totais, a tabela traz para cada tipo de aeronave, o peso máximo de decolagem e o peso operacional vazio.

Tabela 3.11. ACN para grupo de aeronaves (Transport Canada, 2004).

Tipo de aeronave	Carga total máxima decolagem (kN)	ACN para terrenos de fundação de pavimentos flexíveis (CBR em %)				ACN para terrenos de fundação de pavimentos rígidos (K em MPa/m)			
	Operação vazio (kN)	Alta	Média	Baixa	Ultra Baixa	Alta	Média	Baixa	Ultra Baixa
		15	10	6	3	150	80	40	20
A320-100	667	35	36	40	46	38	41	43	45
	390	19	19	21	24	20	22	23	24
B737-700	690	38	40	44	49	43	46	48	50
	370	18	19	20	23	21	22	23	24
F-100	452	25	27	31	33	28	30	31	33
	243	12	13	14	16	13	14	15	16

Para se determinar o ACN de uma aeronave com peso médio de decolagem diferente dos valores dispostos na tabela acima, basta realizar interpolação dos dados utilizando a seguinte equação:

$$ACN = ACN_{m\acute{a}x} - \frac{(CT - CP)}{(CT - OV)} \times (ACN_{m\acute{a}x} - ACN_{m\grave{i}n}) \quad (3.1)$$

Onde:

CT = Carga total ; CP = Carga pretendida ; OV = Operação Vazio.

Segundo Grätz & Riedl (2006), para calcular o PCN somente leva-se em consideração a espessura do pavimento, inclusive revestimento, bem como CBR padronizado de acordo com o subleito (Tabela 3.10).

A equação utilizada pela Infraero que determina o valor de PCN, consta no Boletim Técnico nº 17 (ABPv, 1996), sendo apresentada a seguir:

$$PCN = \frac{h_{avaliado}^2}{\frac{878}{CBR_{SL}} - 12,49} \quad (3.2)$$

Onde:

$h_{avaliado}$  = espessura do pavimento avaliado em cm;

$CBR_{SL}$  = Fator padronizado do CBR (%) do subleito (Tabela 3.10).

A relação ACN/PCN deve estar numa faixa onde  $ACN < PCN$ , pois o pavimento nesta condição poderá ser utilizado para o Padrão de tráfego analisado, sem restrições. A Figura 3.11, baseada nas restrições da Força Aérea e Exército Americano, retirada do Software PCASE<sup>5</sup>, demonstra como devem ser analisadas as restrições caso esta relação ACN/PCN esteja fora dos limites de segurança (PCASE, 2005).

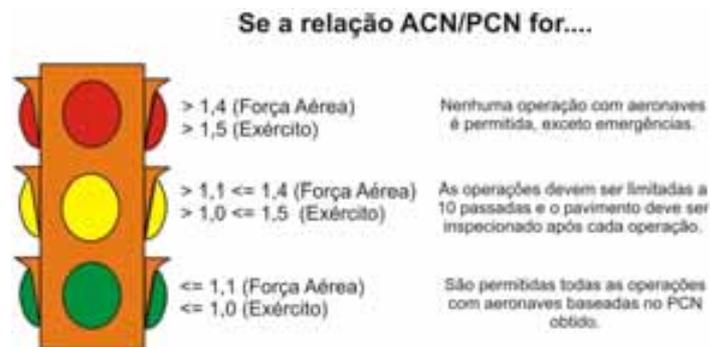


Figura 3.11. Restrições da relação ACN/PCN.

Caso a relação  $ACN/PCN > 1$ , a espessura requerida do pavimento deverá ser reforçada para que o tráfego seja liberado sem restrições, refletindo em operações confortáveis e seguras.

Apesar da grande difusão do método ACN/PCN, é necessária atenção para utilização dos resultados obtidos pela análise, pois a avaliação técnica do PCN é geralmente elaborada com base no projeto de dimensionamento do pavimento. Assim, os valores determinados nem sempre são coerentes, pois as metodologias de projeto não consideram a fadiga do pavimento causada pela ação do tráfego.

Quando se reavalia um pavimento aeroportuário que já possua algum tempo de uso, ou seja, em que já ocorreu um certo consumo à fadiga, a metodologia PCN não deveria ser a mesma utilizada para um pavimento novo, onde se pressupõe que o PCI esteja próximo de 100, e que poderá receber um tráfego mais intenso ao longo da sua vida de serviço. Portanto, a utilização do método fica a critério dos órgãos responsáveis pela administração aeroportuária.

<sup>5</sup> O Software PCASE é descrito no Capítulo 4.

# CAPÍTULO 4

## *Materiais e Métodos*

---

Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, foram realizados ensaios de campo em locais definidos por meio de um plano baseado no tipo de pavimento estudado, no tráfego, condições climáticas e disponibilidade de tempo, materiais e equipamentos.

O plano de trabalho também foi determinado em função do tempo disponível na Pista do Aeroporto, em função do NOTAM (*Notice To AirMen* – Aviso aos Aeronavegantes) expedido pela Infraero, para processo de limpeza da pista (desemborrachamento), num período de 15 dias úteis, a partir do dia 17 de Setembro de 2007.

Este período foi favorável às análises de campo que foram então realizadas durante o período vespertino, num total de 3 horas diárias, isto claro, quando as condições climáticas eram favoráveis.

Neste sentido, a metodologia utilizada para desenvolvimento da campanha experimental constitui nas seguintes etapas:

- Elaboração do plano de amostragem em função do tipo de análise a ser realizada;
- Revisão de normas e procedimentos para realização dos ensaios:
  - Levantamento visual contínuo da condição superficial do pavimento, método PCI (*Pavement Condition Index*) (ASTM D 5340-04e1, revisada em 2003);
  - Mancha de areia (ASTM E 965-96, revisada em 2006 e IAC 4302, implantada pelo DAC em 2001);
  - Pêndulo Britânico (ASTM E 303-93, revisada em 2003);
  - Drenabilidade (ASTM E 2380-05);
  - MuMeter (ASTM E 670-94, revisada em 2000);

O Aeroporto Internacional de Brasília foi escolhido para realização dos ensaios de campo, pois possui duas pistas de pouso e decolagem, sendo determinada como estudo de caso a Antiga Pista, ainda em funcionamento, submetida a tráfego intenso, pois possui todo aparato de aeronavegabilidade necessários para funcionamento inclusive durante a noite e em dias nublados.

Optou-se por realizar os ensaios de campo na região de influência da Cabeceira 11 L, pois é a mais solicitada, recebendo em torno de 85% das operações que ocorrem no sentido Norte-Sul, fato este, decorrente da influência dos ventos predominantes na região do Aeroporto, assim 85% dos pousos e decolagens ocorrem nesta cabeceira.

Antes do início das análises em campo, foi necessário determinar o plano de amostragem, onde são discriminados os locais que merecem maior atenção quanto à segurança das operações de decolagem e principalmente dos pousos das aeronaves. Este plano é apresentado com detalhes a seguir.

#### 4.1 - PLANO DE AMOSTRAGEM

O tráfego e metodologia de manutenção são fatores intimamente associados à capacidade funcional de uma pista aeroportuária. Além disso, verifica-se que as operações de pouso são as que mais solicitam o pavimento, assim refletindo na deterioração das condições superficiais e estruturais, principalmente no que se refere à contaminação por borracha desprendida dos pneus das aeronaves (ICAO, 1994-b).

Neste sentido, esta pesquisa teve como foco principal as operações de pouso, atentando-se para os locais de maior utilização ao longo do sentido transversal e longitudinal da pista. Para determinação dos pontos de maior utilização em relação ao eixo da pista, a amostragem foi baseada em estudos realizados por HoSang (FAA, 1975), onde o autor coletou e analisou dados referentes à distribuição dos desvios laterais de aeronaves em nove aeroportos selecionados, sendo um deles o Aeroporto Internacional de Cleveland, no Estado Norte-Americano de Ohio. Suas observações partiram de estudos com aeronaves comerciais mais utilizadas no transporte aéreo com massa superior a 20.000 kg.

A Figura 4.1 apresenta a distribuição dos afastamentos laterais em relação ao eixo da pista medidos logo após a zona de toque, para situações de pouso de aeronaves em todos os aeroportos analisados por HoSang (FAA, 1975).

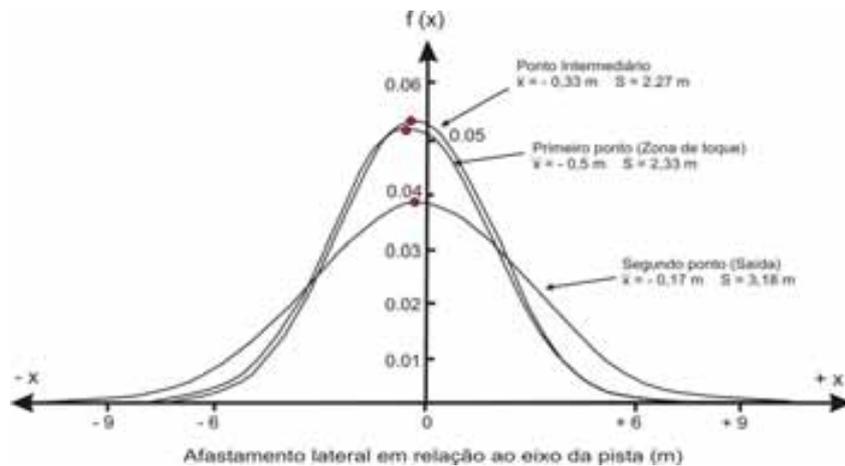


Figura 4.1. Distribuição dos afastamentos laterais em relação ao eixo da pista (Modificado: FAA, 1975).

Considerando o desvio médio das trajetórias das aeronaves, situado na região do eixo da pista, chega-se à conclusão de que 77% das operações de pouso situa-se na região compreendida entre os 6 metros centrais, e praticamente 100% dos pousos ocorrem numa faixa aproximada de 20 m, conforme ilustra a Figura 4.2.

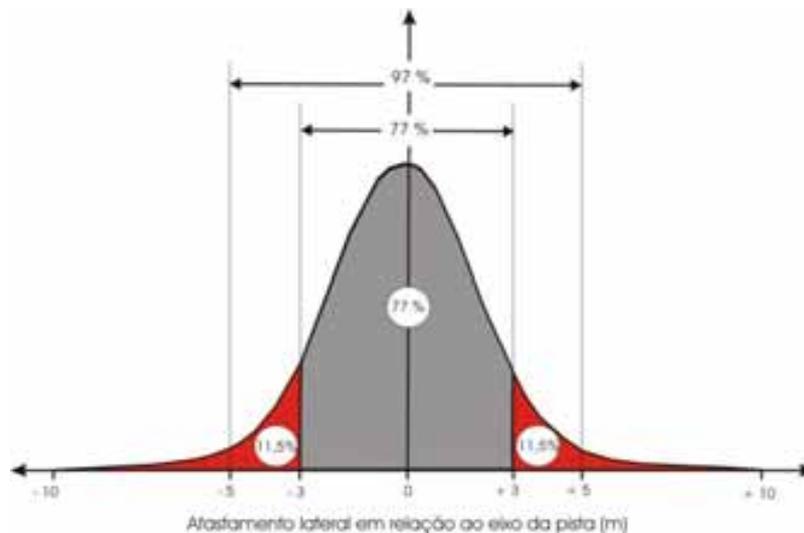


Figura 4.2. Distribuição dos desvios das trajetórias das aeronaves, zona intermediária.

Outro fato a ser analisado é o resultado da ação de cada roda dos trens de pouso, conhecido como efeito combinado, sendo que as passagens de cada uma das rodas sobre o pavimento possuem uma Distribuição Normal decorrente da aplicação do modelo apresentado por HoSang (FAA, 1975).

Desta forma, o efeito combinado de todas as rodas pode ser expresso pela soma dos efeitos individuais, analisados estatisticamente de acordo com a soma das ordenadas das funções

Densidade de Probabilidade, localizadas segundo a configuração dos trens de pouso de cada tipo de aeronave que compõe o tráfego naquela pista.

HoSang ainda demonstra que aeronaves com porte equivalente ao Boeing 737 tocam a pista, durante as operações de pouso, da seguinte forma:

- Aproximadamente 25% das aeronaves tocam a pista numa região localizada a menos de 300 m da cabeceira, ou seja, dentro da Zona de Toque;
- Cerca de 85% (acumulados) das aeronaves tocam a pista na região situada nos 600 m após a cabeceira, ou seja; parte da Zona de Toque + Zona intermediária;
- Cerca de 96% (acumulados) tocam a pista até uma distância menor que 900 metros da cabeceira.

Considerando estas afirmações, aliado ao fato de que os auxílios de navegação conduzem a aeronave a pousar tocando a pista na região denominada Zona de Toque, um estudo desenvolvido pela *Flight Safety Foundation* (FSF ALAR, 2000), demonstrou que para uma condição em que a aeronave pousa sob condição automática, no modo “Autobrake Alto” (condição de desaceleração e parada na menor extensão), a energia dissipada pelo atrito representa cerca de 45% da energia total necessária para parada da aeronave, assim a participação do reverso dos motores e da resistência aerodinâmica correspondem a 20% e 35% da energia total dissipada até parada da aeronave, conforme apresentada na Figura 4.3.

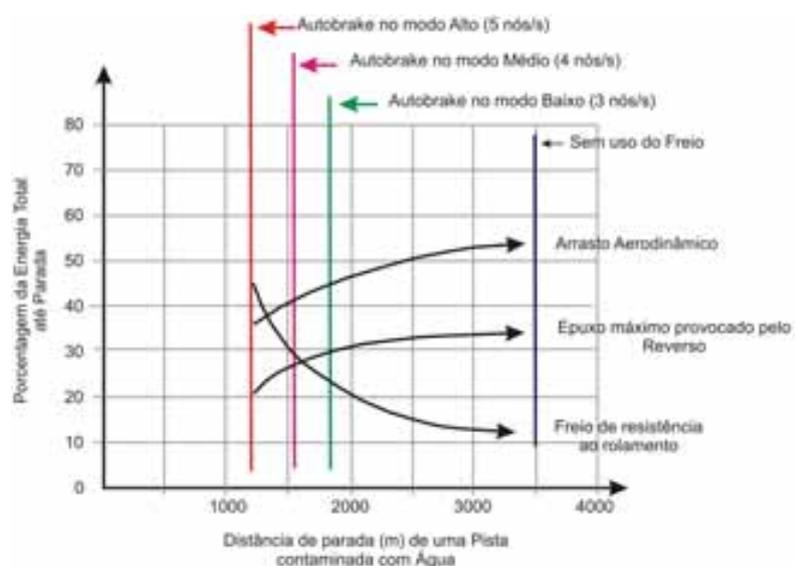


Figura 4.3. Efeito dos dispositivos de desaceleração sobre a distância de parada (Modificado: FSF ALAR, 2000).

Verifica-se ainda, de acordo com a Figura 4.3 que a distância percorrida por uma aeronave até parada total depende completamente do atrito, variando de 1.200m até cerca de 1.500m, respectivamente, nos modos “Autobrake Alto e Médio”, crescendo para cerca de 1.800m (Autobrake baixo), chegando a valores extremos de 3.500m para uma operação sem uso dos freios de roda. Assim, uma aeronave com sistema de freios comprometido necessita do dobro de extensão das pistas, demonstrando a importância do sistema de freios e do atrito durante operações de pouso.

As forças desenvolvidas durante a rolagem nas operações de pouso, com sistema de pouso automático ativo no modo “Autobrake Baixo” podem ser verificadas na Figura 4.4.

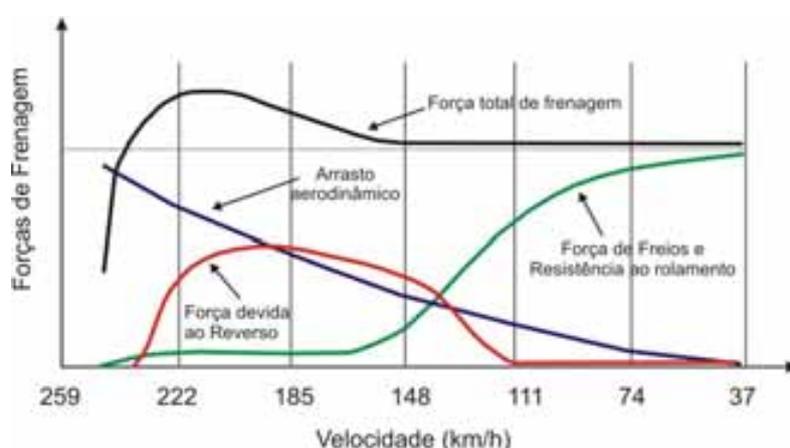


Figura 4.4. Forças de desaceleração durante a rolagem nas operações de pouso (Modificado: FSF ALAR, 2000).

Com base nas informações expostas, os ensaios de campo foram realizados na região localizada, no sentido longitudinal e transversal, conforme esquema apresentado a seguir.

- Considerando estudos realizados por HoSang (1963) e FSF ALAR (2000), foi definido no sentido longitudinal (ao longo do eixo da pista), a região compreendida nos 660m iniciais a partir da Cabeceira 11L, cujo movimento operacional é intenso. A região escolhida é subdividida de acordo com sinalização luminosa ao longo de toda pista, onde os pontos de amostragem são distantes 55m uns dos outros, satisfazendo o limite máximo de 100 m de distância preconizado na IAC 4302 (DAC, 2001).
- No sentido transversal, optou-se por avaliar pontos pré-determinados compreendidos na região de maior influência de toque das rodas dos trens de pouso das aeronaves. Para determinação destes pontos foi realizado estudo estatístico aplicando o modelo de Distribuição Normal proposto por HoSang (FAA, 1975), apresentado a seguir.

O movimento operacional no Aeroporto de Brasília é composto por diversos tipos de aeronaves, sendo o tráfego de grande porte predominante de aeronaves Boeing 737 (200 a 800), Airbus (A318 a A320) e Fokker 100, responsáveis por aproximadamente 73% do tráfego, outras aeronaves comerciais de pequeno porte participam de forma pouco representativa, 27%.

O plano de amostragem foi desenvolvido por meio de estudo estatístico, aplicando modelo de HoSang (FAA, 1975) para Zona de Toque, com desvio padrão de 2,27m e para Zona intermediária, com desvio padrão de 2,33m.

De acordo com movimento operacional Agosto/2007, pousaram 5.797 aeronaves, sendo 2.225 Boeing, 1.697 Airbus, 311 Fokker e outras 1.564 aeronaves de pequeno porte. Para o estudo em questão, consideraram-se apenas as aeronaves comerciais de grande porte, e desvio padrão de 2,33m (para Zona Intermediária), determinada como condição mais crítica do estudo estatístico.

Assim, o tráfego analisado para este estudo apresenta 52,6% Boeing, 40,1% Airbus e 7,3% Fokker, representado no modelo de distribuição dos desvios laterais de cada roda dos trens de pouso principais em relação ao eixo da pista e seu efeito combinado, para as aeronaves do grupo analisado, decorrente da aplicação do modelo de HoSang (FAA, 1975), conforme ilustrado na Figura 4.5, Figura 4.6 e na Figura 4.7.

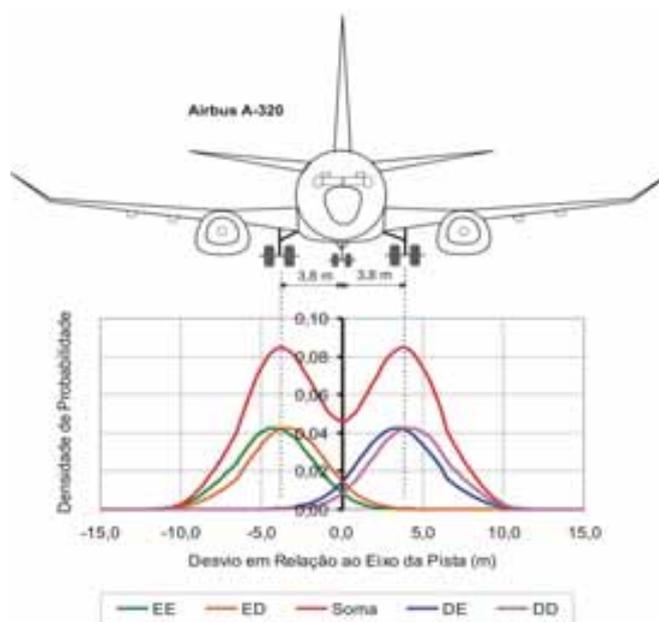


Figura 4.5. Efeito combinado dos trens de pouso do Airbus A-320.

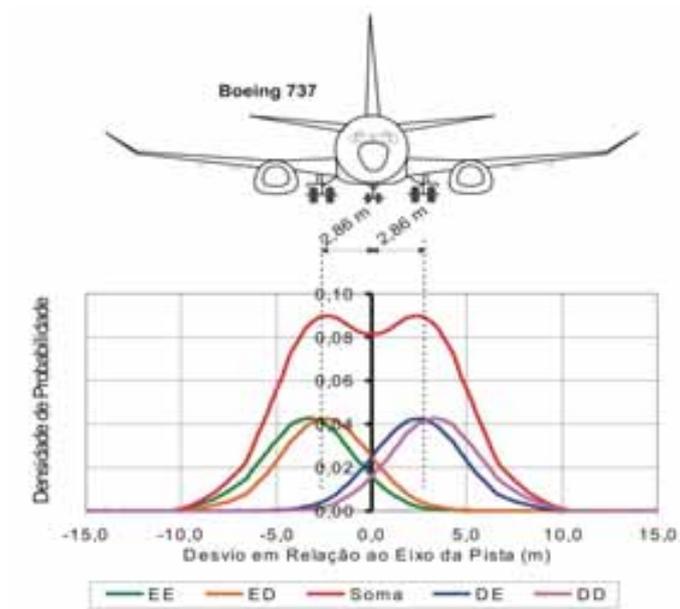


Figura 4.6. Efeito combinado dos trens de pouso do Boeing 737.

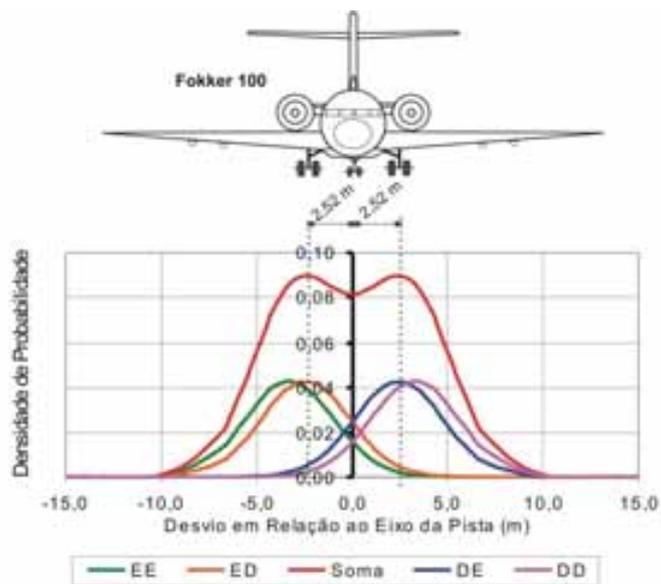


Figura 4.7. Efeito combinado dos trens de pouso do Fokker 100.

A partir das distribuições Normais dos desvios de cada roda é possível analisar a Distribuição dos Desvios Laterais conforme indicado na Figura 4.8.

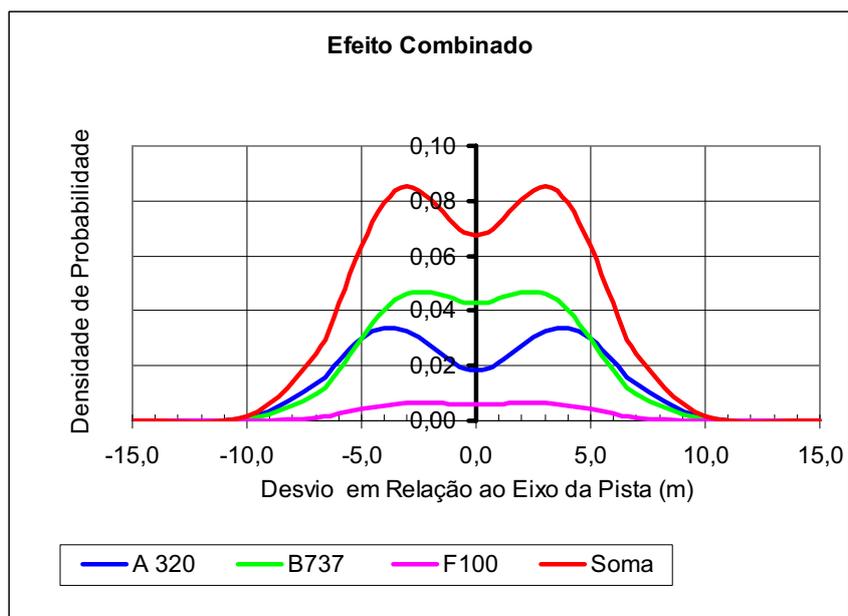


Figura 4.8. Efeito combinado para o grupo de aeronaves que pousam na cabeceira 11L.

A Probabilidade Acumulada da passagem das rodas dos trens de pouso das aeronaves em função do afastamento ao eixo permite determinar a expectativa de utilização em cada faixa transversal da pista, conforme ilustrado na Figura 4.9.

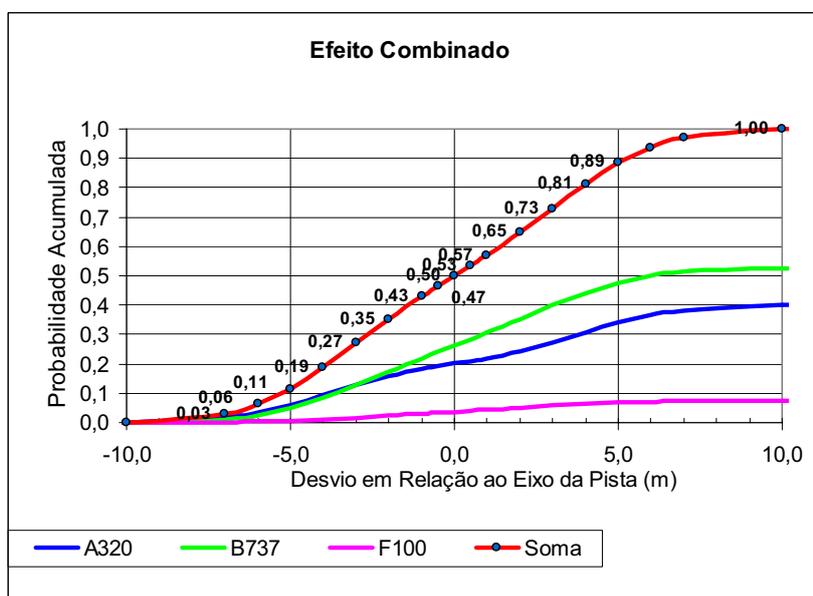


Figura 4.9. Probabilidade acumulada para o grupo de aeronaves que pousam na cabeceira 11L.

A expectativa de utilização em cada faixa transversal de pista pôde ser quantitativamente definida com auxílio do gráfico de Probabilidade Acumulada, onde foi determinado o efeito combinado dos trens de pouso do Boeing 737, Airbus A320 e Fokker 100, estabelecendo o critério de divisão da pista em faixas, conforme ilustra a Figura 4.10.

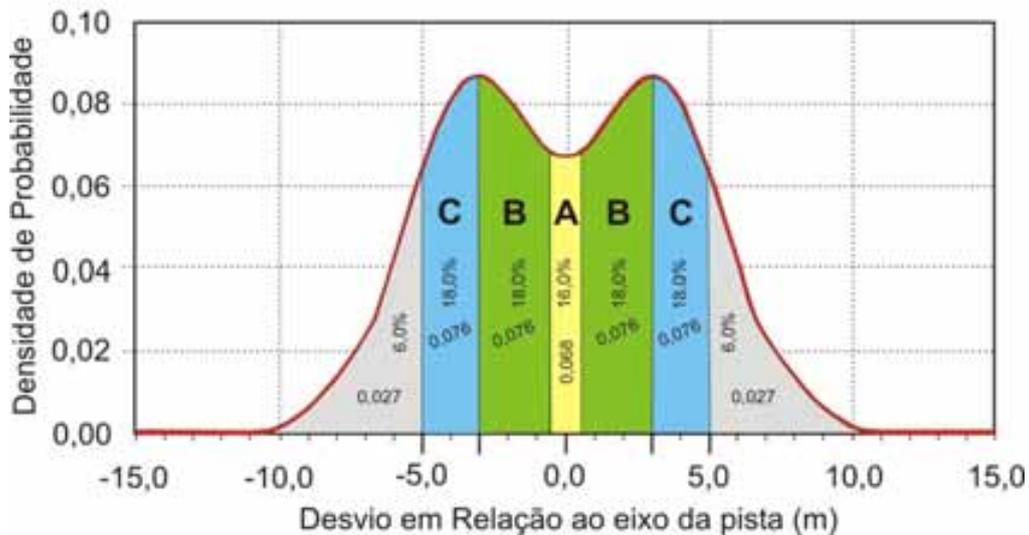


Figura 4.10. Expectativa de utilização da pista: divisão em faixas para amostragem.

Os dados brutos do estudo estatístico para determinação das faixas do plano de amostragem encontram-se no Apêndice B.

- A Faixa A, representada pela faixa central, possui 1m de largura (0,5 m para cada lado), com incidência média de 0,068 passagens/m/pouso das rodas do trem de pouso, correspondendo a 16% das operações.
- A Faixa B, região formada por duas faixas com 2,5m cada uma, representa 18% das operações, com incidência média de 0,076 passagens/m/pouso.
- Na Faixa C, foram determinadas duas faixas com 2m cada uma, onde a incidência média de 0,076 passagens/m/pouso corresponde a 18% das operações de pouso.

O restante da pista, representada pela região onde 12% dos pousos ocorrem, não foram levados em consideração para esta pesquisa devido à baixa incidência de passagens/m/pouso, assim as faixas A, B e C, situadas numa região onde há presença de grooving, que por sua vez encontrava-se contaminado, apresentava potencial influência nas operações de pouso, onde os riscos de acidentes ocasionados por interferência da pista são elevados. Neste sentido, o esquema de localização dos pontos ensaiados é ilustrado por meio da Figura 4.11, a seguir.

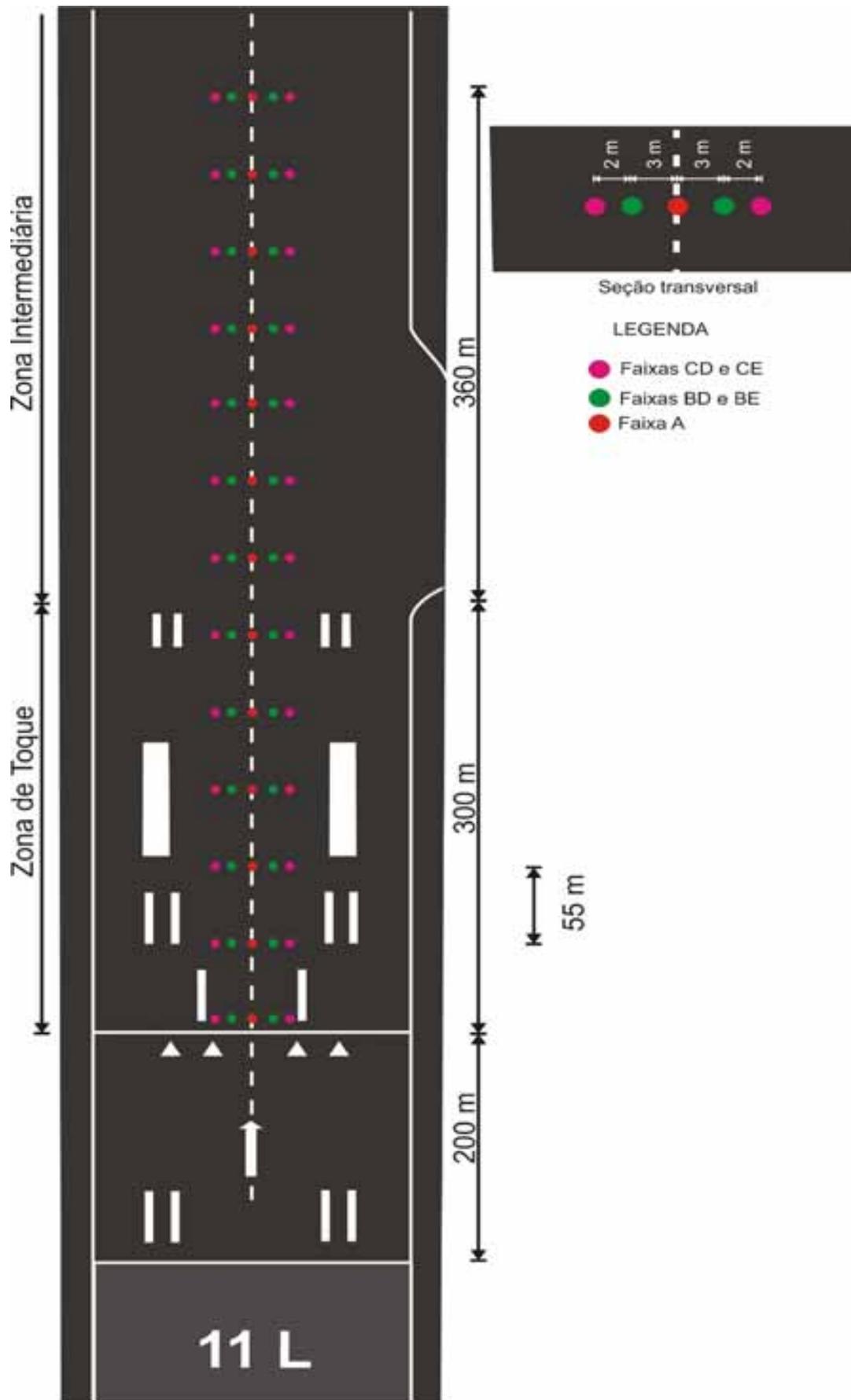


Figura 4.11. Localização dos pontos analisados.

Devido ao fato de que o atrito é a componente principal de análise desta pesquisa, este plano de amostragem será utilizado para determinação dos parâmetros de macrotextura, microtextura e capacidade drenante para toda a campanha experimental que também avaliará a diferença de comportamento dos parâmetros citados em função do processo de desemborrachamento.

Para determinação da condição superficial do pavimento, método PCI, o plano de amostragem levou em consideração toda extensão da pista (3.200m), dividido em seções de 550 m<sup>2</sup> de área, calculada a nível de projeto, conforme recomendação de Shahin (1994), utilizando o gráfico apresentado na Figura 4.12.

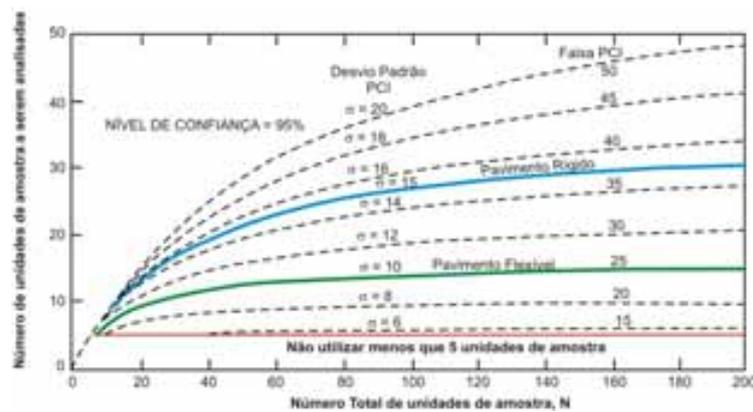


Figura 4.12. Seleção do número mínimo de amostras a serem inspecionadas.

A divisão da pista resultou num plano de amostragem composto por um total de 18 seções, alternando as faixas a 10 m à esquerda e à direita da faixa central, seguindo toda extensão longitudinal de 55m da sinalização luminosa presente nas laterais da pista, conforme apresentado num esquema prático sem escala, na Figura 4.13 a seguir.

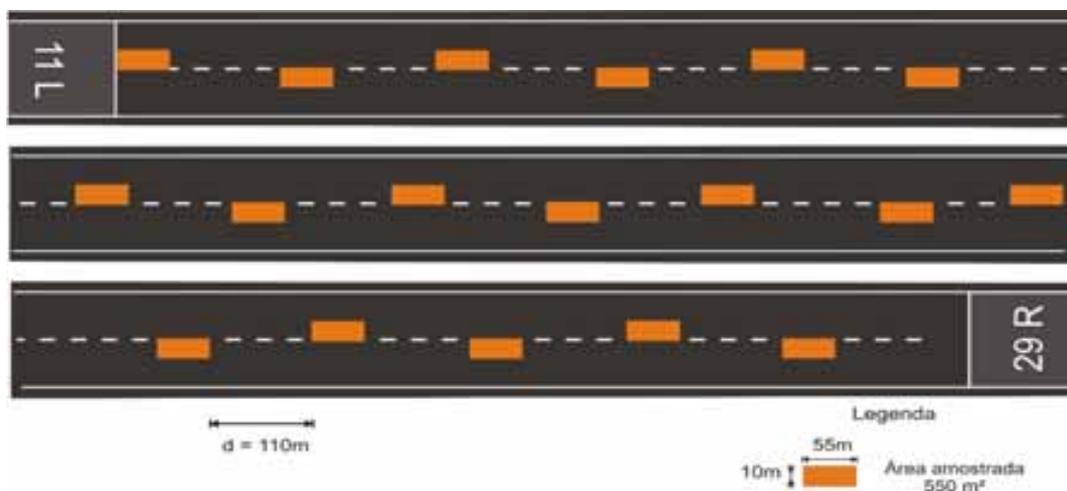


Figura 4.13. Plano de amostragem dos defeitos de superfície.

Shahin (1994) propõe o cálculo do PCI de uma amostra por meio da Equação 4.1, subtraindo-se de 100 (que é o valor do PCI quando não há nenhum defeito visível na amostra), um somatório de “valores deduzíveis corrigidos” (VDC), que são obtidos em função dos tipos de defeitos, dos graus de severidade e das densidades de defeitos nas seções defeituosas visíveis registradas na ficha de inspeção da amostra.

$$PCI = 100 - VDC \quad VDC = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{m_i} A(T_i, S_j, D_{ij}) F(t, q) \quad (4.1)$$

Onde:

$p$  = número total de defeitos para o pavimento analisado;

$i$  = contador para tipos de defeitos;

$m_i$  = número de graus de severidade para o tipo de defeito;

$j$  = contador para graus de severidade;

$A( )$  = valor deduzível, dependente do tipo do defeito ( $T_i$ ), do grau de severidade ( $S_j$ ) e da densidade de defeitos ( $D_{ij}$ );

$F(t, q)$  = uma função de ajustamento para defeitos múltiplos que varia com o valor deduzível somado ( $t$ ) e o número de deduções ( $q$ )

## 4.2 - LEVANTAMENTO DE DEFEITOS FUNCIONAIS

Os procedimentos básicos empregados na avaliação superficial dos pavimentos asfálticos nesta pesquisa foram os seguintes:

- Realização de vistoria cuidadosa da área da amostra selecionada, caminhando dentro da seção avaliada;
- Os tipos de defeitos observados foram registrados manualmente em planilhas apropriadas, anotando-se também a severidade (baixa, média e alta), extensão e quantidade de ocorrência de cada defeito, conforme ilustrado na Figura 4.14.



Figura 4.14. Levantamento de defeitos de superfície.

Os resultados de campo foram transferidos para o software de Gerenciamento de Pavimento desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA conhecido como MicroPAVER®, adquirido pelo Programa de Pós-graduação em Geotecnia-UnB, disponibilizado para esta pesquisa.

O software ajuda na decisão sobre quando e onde são necessárias manutenção e reabilitação promovendo o desenvolvimento e organização de um inventário do pavimento, além da avaliação da condição atual do pavimento, de acordo com escala adequada, com valores variando de 0 a 100, onde o valor máximo representa um pavimento em excelente estado de conservação.

Na seqüência foi montado um inventário da superfície da pista do Aeroporto de Brasília, onde cada unidade de amostra foi inserida no software para avaliação dos defeitos encontrados. Para avaliar a condição do pavimento, o software utiliza o Índice de Condição de Pavimento (PCI) como padrão assim como a ASTM adotou o PCI como prática comum de acordo com a norma ASTM D-6433-03 e para aeródromos a norma ASTM D-5340-04.

Nesta análise, o software permite que o usuário visualize a condição da rede de pavimento ou algum subconjunto especificado da rede, devendo para isto ser inseridas todas as datas de inspeção do pavimento além do tipo de superfície e tamanho respectivo.

Cada unidade de amostra poderá apresentar vários tipos de defeitos com seus respectivos níveis de severidade e tamanho, ou seja, cada defeito tem um tamanho menor ou igual ao tamanho da amostra, conforme ilustrado na Figura 4.15.

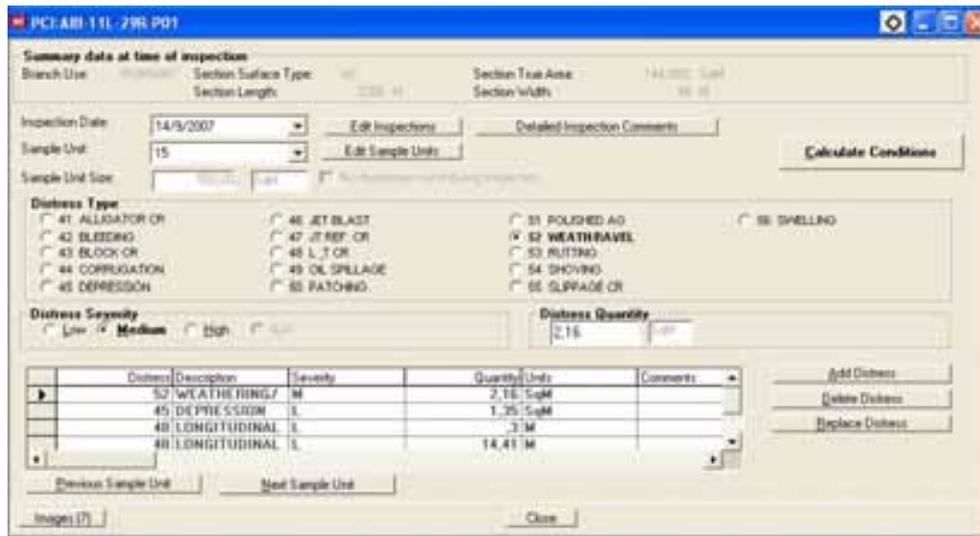


Figura 4.15. Módulo de avaliação do pavimento no software MicroPAVER.

Ainda é oferecida uma opção para que o usuário adicione ao inventário, fotos e observações das unidades amostradas, compondo um verdadeiro banco de dados da análise realizada. O resultado da avaliação pode ser demonstrado em forma de planilha (Figura 4.16) ou ainda utilizando a opção de visualização de gráficos com a condição atual bem como uma previsão para um determinado período que o usuário tem liberdade de adotar.

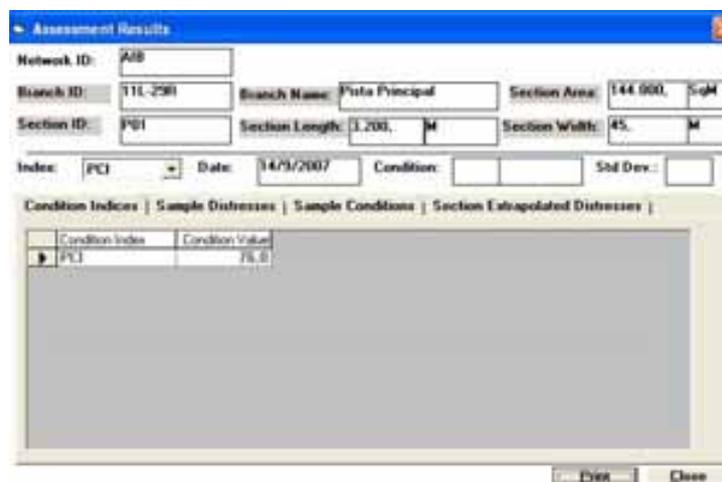


Figura 4.16. Planilha de dados resultante da avaliação do pavimento (PCASE, 2005).

A análise, bem como detalhes da utilização do software nesta etapa de avaliação foram plotados graficamente para facilitar a interpretação dos resultados que serão apresentados no Capítulo 5.

### 4.3 - LEVANTAMENTO DA TEXTURA

A presente pesquisa tem foco principal avaliar as duas principais componentes da textura do pavimento: a microtextura e macrotextura. Serão apresentados a seguir, os principais métodos utilizados na pista do AIB para determinação de tais características.

#### 4.3.1 - MACROTEXTURA – MÉTODO MANCHA DE AREIA

Para determinação da característica da macrotextura da seção analisada, foi utilizado método Mancha de Areia. O ensaio de mancha de areia avalia a macrotextura e caracteriza a superfície do pavimento quanto à sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento e quantifica a distância média entre os grânulos individuais de agregados aflorados na superfície do pavimento.

A execução deste ensaio é regulamentada por três normas, uma francesa (Mode Opérateires du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – Mesure de la Profondeur 40 au Sable – Mode Opérateur RG-2/Paris – 1971), uma americana (ASTM E-965-1996, reprovada em 2006) e outra brasileira, especificamente para pavimentos aeroportuários (IAC 4302 - DAC, 2001), utilizada nesta pesquisa.

Todas respeitam os mesmos princípios e limites de classificação, com uma pequena diferença na granulometria exigida pela norma brasileira que preconiza utilização de areia passada na peneira #50 e retida na #100, diferente das demais que indicam areia passada na #60 e retida na #80, respectivamente. O volume de areia utilizado no ensaio (24 cm<sup>3</sup>) também sofre pequena alteração se comparado com metodologias internacionais (25 cm<sup>3</sup>). A areia utilizada, como preconiza a norma, foi lavada, seca em estufa, isenta de impurezas e matéria orgânica, preparada no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER/CEFTRU-UnB) que também disponibilizou demais materiais para realização do ensaio.

A Instrução Normativa IAC 4302 preconiza as medições de textura superficial deverão ser realizadas a cada 100 metros de pista, em pontos localizados a 3 metros do eixo, alternadamente à esquerda e à direita deste, distando o primeiro ponto de medição 100 metros de uma das cabeceiras.

Entretanto, a presente pesquisa teve como plano de amostragem, aquele demonstrado na Figura 4.11, onde são determinados 65 pontos, localizados no eixo, a 3 m e 5 m à esquerda e à

direita do eixo e no eixo, distantes 55 metros uns dos outros, superando o plano de amostragem utilizado pela Infraero preconizado na IAC 4302, pois o enfoque deste trabalho é mapear a região de maior influência durante as operações de pouso, verificando as condições de atrito e segurança daquela região.

Dando início ao ensaio, procedeu-se à limpeza da superfície, a fim de garantir que a mesma estivesse isenta de partículas soltas. Foi despejada areia sobre a superfície, espalhando-a em movimentos circulares com soquete indicado na norma, até que toda areia preenchesse os espaços vazios entre os granulares do revestimento. Após espalhamento, mostrado na Figura 4.17, iniciaram-se as medidas dos diâmetros do círculo formado, onde foram efetuadas três medidas com um ângulo de defasagem aproximadamente 60°, tendo como diâmetro final aquele determinado pela média dos três valores obtidos.

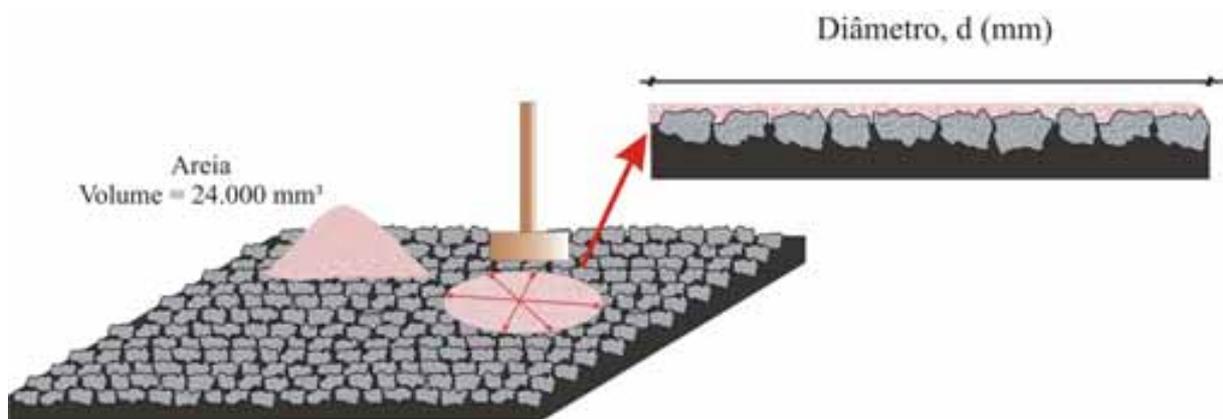


Figura 4.17. Esquema do ensaio de mancha de areia na Pista do AIB (2007).

Para obter-se a altura média de areia (HS) foi utilizada a seguinte equação:

$$HS = \frac{V}{A} = \frac{V}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad (4.2)$$

Onde:

HS: Altura de areia (mm);

V: Volume de areia (mm<sup>3</sup>), igual a 24.000 mm<sup>3</sup>;

A: Área da mancha circular de areia (mm<sup>2</sup>);

D<sub>m</sub>: Diâmetro médio da mancha (mm).

As análises foram realizadas sob duas situações extremas: pavimento emborrachado (Figura 4.18-a) e logo após passar por processo de desemborrachamento (Figura 4.18-b) por jateamento d'água.



Figura 4.18. Mancha de areia na pista do AIB (a) situação emborrachada; (b) pavimento desemborrachado.

A profundidade média da macrotextura do pavimento foi enquadrada com base na classificação proposta por Aps (2006), apresentada no Capítulo 3.

Os resultados e comentários são apresentados e analisados com detalhes no Capítulo 5.

#### 4.3.2 - MICROTTEXTURA – MÉTODO PÊNDULO BRITÂNICO

Desenvolvido na década de 50 e especificada pelo método da ASTM E-303-93, reprovada em 2003, consiste num Pêndulo, cuja haste possui em sua extremidade uma sapata de borracha que, ao soltar-se sobre o pavimento, desliza sobre o mesmo. A perda de energia decorrente desse movimento serve como medida de atrito e é registrada numa escala graduada. O valor é expresso em BPN (*British Pendulum Number*).

De maneira semelhante ao ensaio de mancha de areia, o ensaio com Pêndulo Britânico foi realizado em 65 pontos de amostragem antes (Figura 4.19) e após processo de desemborrachamento da superfície, pois se espera determinar um índice de atrito composto por um par de valores relativos a macrotextura e microtextura do pavimento, assim verificando as condições de atrito nas condições antes e depois da limpeza da pista.

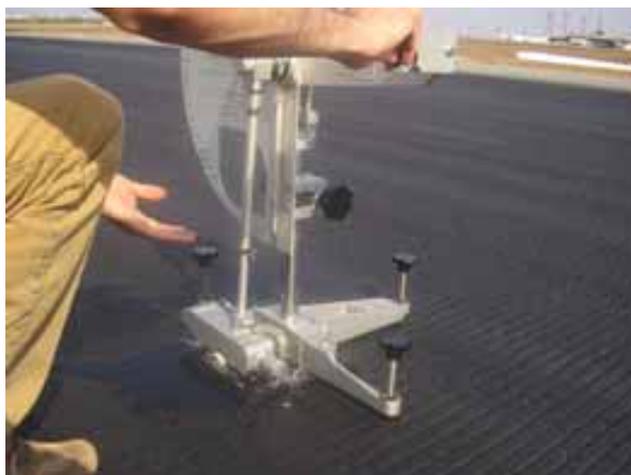


Figura 4.19. Pêndulo Britânico na Pista do AIB: situação emborrachada (2007).

Neste sentido, em cada ponto da amostragem foram realizadas 5 determinações, sendo o valor de BPN respectivo, a média entre os valores obtidos. Os resultados obtidos foram classificados em função da rugosidade, conforme informações apresentadas no Capítulo 3.

A análise detalhada dos resultados, bem como comparação das condições de atrito antes e após processo de desemborrachamento são apresentadas no Capítulo 5.

#### 4.3.3 - MEDIÇÃO DA CAPACIDADE DE DRENAGEM DA SUPERFÍCIE

A avaliação da capacidade de drenagem da superfície da pista do AIB foi realizada com equipamento conhecido como “Drenômetro” ou “Flow-meter”, construído no Laboratório de Engenharia Rodoviária da Universidade de Brasília (LER-CEFTRU/UnB), seguindo as mesmas características do Drenômetro do Institute for Highways, Railroads and Rock Engineering (ISETH), apresentado na Figura 4.20.



Figura 4.20. Drenômetro (LER-CEFTRU/UnB).

O Drenômetro possui as seguintes características:

- a) Cilindro de acrílico transparente;
- b) Existem duas linhas que delimitam um volume conhecido de água (0,73 litros), cujo tempo de escoamento é registrado;
- c) Para fixar o cilindro sobre a superfície do pavimento o aparelho possui uma base de aço;
- d) No fundo o cilindro existe um furo com 5cm de diâmetro, pelo qual a água é escoada;
- e) A parte inferior da base do cilindro é revestida por uma lâmina de borracha, cuja função é aderir à superfície;
- f) Para evitar que a água escoe sem o devido registro do tempo, uma rolha de borracha é acoplada ao furo no fundo do cilindro.

O ensaio consiste em posicionar o drenômetro sobre a superfície do pavimento, previamente molhado durante o período de um minuto, e enchê-lo com água, que será drenada pelos canais existentes na superfície que a borracha não vedar. Mede-se então, o tempo necessário para a água ser escoada, na pressão atmosférica (Yager e Buhlmann, *apud* Momm, 1998).

Foram avaliadas situações extremas da capacidade de drenagem da pista do Aeroporto de Brasília, a saber:

- Avaliação dos 65 pontos de amostragem na situação onde as ranhuras (*grooving*) encontravam-se completamente comprometidos por detritos de borracha desprendida dos pneus de aeronaves durante contato com a pista e momentos de frenagem no pouso;
- Avaliação dos mesmos pontos, entretanto numa situação onde aparentemente havia sido retirado todo o detrito de borracha da pista.

Em cada ponto amostrado, foram realizadas 3 medidas de tempo de escoamento, com precisão de milésimos de segundo, afim de determinar a capacidade drenante como sendo a média entre as leituras.

Esta avaliação consistiu em verificar o comportamento da superfície do pavimento em presença de água e identificar as diferenças de superfície e capacidade de escoamento de água da chuva. No Capítulo 5 são apresentados e discutidos com detalhes os resultados desta

análise que serão confrontados com altura média de rugosidade superficial (macrotextura) para verificação da correlação existente para pista do AIB.

#### 4.3.4 - CÁLCULO DO IFI

Após determinação dos parâmetros de textura da superfície de rolamento, procedeu-se ao cálculo do IFI ( $Sp$ ,  $F_{60}$ ) para cada faixa do pavimento analisado, conforme plano de amostragem já apresentado.

A constante de velocidade  $Sp$  foi determinada por meio de uma medida de macrotextura, onde se determinou a altura média da rugosidade ( $HS$ ) utilizado na equação a seguir:

$$Sp = a + b \cdot Tx \quad (4.3)$$

Onde:

$Sp$  = Constante de Velocidade;

$Tx$  = valores da altura média da rugosidade ( $HS$ ), em mm;

$a$ ,  $b$  = constantes dependentes do método utilizado (No caso da Mancha de Areia, tem-se  $a = -11,6$  e  $b = 113,6$ ).

A partir daí é então obtido o  $FR_{60}$  (Fator ajustado de atrito para a velocidade de 60 km/h) pela equação:

$$FR_{60} = FRS \times e^{\left(\frac{S-60}{Sp}\right)} \quad (4.4)$$

Onde:

$FR_{60}$  = fator ajustado de atrito para a velocidade de 60 km/h;

$FRS$  = valores de BPN medidos com o Pêndulo Britânico;

$Sp$  = Constante de Velocidade obtida pela Equação (4.3);

$S$  = velocidade em que é medido o atrito de acordo com o equipamento utilizado, que no caso do Pêndulo Britânico é igual a 10 km/h.

O próximo passo é a obtenção o Número de Atrito,  $F_{60}$  (*Friction Number*) pela equação:

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot Tx \quad (4.5)$$

Onde:

F60 = Número de Atrito;

FR<sub>60</sub> = Fator ajustado de atrito para a velocidade de 60 km/h obtido pela Equação 3.3;

Tx = Valores da altura média da Rugosidade, em mm;

A, B e C = constantes dependentes do Método utilizado (No caso do Pêndulo Britânico, tem-se A=0,056; B=0,008; C=0,0).

Definidos Sp e F<sub>60</sub>, pode-se finalmente calcular o IFI de um pavimento a qualquer velocidade de passeio S, por meio da seguinte equação:

$$IFI(S) = F_{60} \times e^{\left(\frac{60-S}{Sp}\right)} \quad (4.6)$$

Foram determinados valores de IFI para as Faixas A, BD, BE, CD e CE conforme plano de amostragem, classificados de acordo com proposta de Aps (2006), apresentada no Capítulo 3. Os resultados são apresentados e comentados no Capítulo 5.

#### 4.3.5 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS LEVANTADOS

Os dados de atrito e textura levantados em cada faixa do pavimento consistem em observações sobre respostas de indivíduos ou objetos experimentais selecionados aleatoriamente de uma única população.

Visto que estas faixas levantadas apresentavam populações com  $n$  pequeno (<30) não seria possível determinar um intervalo de confiança baseado numa Distribuição Normal. Assim, foi realizada análise estatística utilizando a Distribuição “ $t$ ” de *Student*, onde foi calculado o intervalo de confiança com base na média e desvio padrão amostral, pela seguinte equação:

$$X_{min} = \bar{x} - \left( t_{\alpha,gl} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.7)$$

$$X_{max} = \bar{x} + \left( t_{\alpha,gl} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (4.8)$$

Onde:

$t$  = valor obtido na tabela “*t de Student*”, dependente de  $\alpha$  e  $gl$ ;

$\alpha$  = nível de significância da análise estatística;

$gl$  = graus de liberdade, determinado por  $n - 1$  ;

$n$  = número de determinações;

$S$  = desvio padrão amostral;

$\bar{x}$  = média amostral.

Foi determinado um nível de confiança de 95% ( $\alpha=0,05$ ) por apresentar um intervalo mais restrito, pois intervalos maiores exigem uma perda de precisão (Devore, 2006).

Após realização do teste “ $t$ ” procedeu-se à Análise de Variância (*ANOVA-Fator único*) com nível de confiança de 95% ( $\alpha=0,05$ ), utilizando valores determinados nos ensaios de campo, relativos à textura e atrito, concentrando-se na comparação de duas médias populacionais, ou seja, de dois pares de faixas do pavimento.

As hipóteses testadas para cada par de faixas, relativos ao atrito (BPN), macrotextura (HS) e drenabilidade (FM), são respectivamente:

$$H_0: (V)_i = (V)_j \quad (4.9)$$

$$H_1: (V)_i \neq (V)_j \quad (4.10)$$

Onde:

$$V = \begin{cases} \text{BPN: valor do atrito medido com Pêndulo Britânico;} \\ \text{HS: valor da altura da macrotextura medida com Mancha de areia;} \\ \text{FM: vazão (l/s) medida com Flow-meter.} \end{cases}$$

$i$  = Faixa da pista: A, BD, BE, CD e CE;

$j$  = Faixa da pista: A, BD, BE, CD e CE.

A seguir, foram determinadas matrizes, informando o Nível observado de significância (probabilidade de hipótese verdadeira) também conhecido como “ $p$ ” (nível descritivo do teste), onde foram comparados cada par de faixas, para cada tipo de levantamento realizado em campo.

Os resultados, bem como as devidas considerações são apresentados no Capítulo 5.

#### 4.3.6 - MEDIÇÃO CONTÍNUA DE ATRITO – MÉTODO MUMETER

Com intuito de verificar as características do atrito ao longo da superfície da pista foi então realizada medição utilizando MuMeter, disponibilizado pela Infraero. O equipamento disponível no Aeroporto de Brasília é do tipo rebocado por um veículo com tambores cheios d'água que será utilizada para espargimento durante o ensaio, simulando as condições de pista molhada.

Antes da realização do ensaio, procedeu-se à calibração do equipamento, feita sobre uma placa nova, especificamente para esta etapa, com coeficiente de atrito de 0,77. O equipamento realiza várias passadas sobre a placa (Figura 4.21-a), que são monitoradas por um sistema de aquisição de dados instalado no computador (Figura 4.21-b) acoplado ao veículo de reboque, que por sua vez indica o momento de liberação para início da verificação das condições de atrito da pista.



Figura 4.21. MuMeter: (a) calibração; (b) aquisição de dados (Modificado: Rodrigues Filho, 2006).

O atrito máximo da pista foi obtido após calibração foi iniciado o ensaio com trailer rebocado a uma velocidade de 65 km/h, pressão de pneus de 70 kPa e sistema espargidor mantendo uma lâmina de água de 1 mm de espessura em frente a cada uma das rodas medidoras, conforme ilustrado na Figura 4.22.



Figura 4.22. MuMeter (Infraero)

A medição foi realizada antes da remoção da borracha da pista, anteriormente a esta pesquisa, com finalidade de acompanhamento da situação do atrito ao longo do tempo, verificando as condições de frenagem da pista além de ser um indicativo da eficácia da remoção da borracha. Os resultados e gráficos são apresentados e discutidos no Capítulo 5.

#### 4.4 - REMOÇÃO DE BORRACHA

Existem alguns procedimentos disponíveis capazes de remover os detritos de borracha que fecham os canais formados pela macrotextura e também pelo grooving; comprometendo não só a drenagem superficial, mas também as condições de atrito.

No Aeroporto de Brasília, o processo utilizado pela Infraero consiste no jateamento de água sob alta pressão com uso de motobomba e saída do tipo barra giratória, conhecida como chuveiro rotativo (Figura 4.23-a). Este equipamento é acoplado a um caminhão que possui um sistema de armazenamento de água utilizada durante o processo. A aplicação da técnica é feita de maneira empírica, onde o operador aplica uma pressão de 21 a 24,5 MPa, de modo a cobrir toda área a ser desemborrachada e os detritos soltos sobre a superfície (Figura 4.24-a) são retirados por outro equipamento conhecido como escova giratória, acoplado à um trator, conforme ilustra a Figura 4.23-b.



Figura 4.23. Desemborrachamento da pista do AIB: (a) chuveiro rotativo; (b) remoção dos detritos na Pista do AIB (2007).

A Cabeceira 11L, por ser a mais utilizada, recebe tratamento prolongado de retirada de borracha, pois possui uma área e densidade de contaminação maior que a Cabeceira 29R. Os serviços foram realizados durante o período de 10/09/2007 a 28/09/2007 das 13:30 h às 17:30 h, horário de menor movimento operacional, o qual teve todo tráfego transferido para a segunda pista do AIB durante a execução desta intervenção.

A largura da pista que recebeu o tratamento de retirada de borracha foi 14m (7m para cada lado do eixo), com avanço longitudinal de aproximadamente 50 m/dia, tratando uma área de  $\pm 700\text{m}^2$ , consolidando o plano de manutenção que preconizava limpeza de uma extensão de  $\pm 750\text{m}$ . A Figura 4.24-a e Figura 4.24-b mostra a diferença de uma área com grooving contaminada por borracha e área recém desemborrachada na pista do AIB, utilizando processo de jateamento d'água.



Figura 4.24. Diferença entre locais contaminados e locais recém desemborrachados na pista do AIB: (a) perfil longitudinal; (b) perfil transversal.

A eficácia da remoção da borracha foi determinada pela comparação dos valores encontrados nos ensaios de Mancha de Areia, Pêndulo Britânico e Drenômetro, realizados nos 65 pontos de amostragem, antes e após desemborrachamento. Os resultados e comentários acerca desta etapa são apresentados no Capítulo 5.

#### 4.5 - LEVANTAMENTO DA RESISTÊNCIA DA PISTA – MÉTODO ACN/PCN

Este levantamento é fundamental para se verificar a adequação da estrutura do pavimento às solicitações do tráfego atual e para fazer previsão da vida restante, além de subsidiar possíveis dimensionamentos de reforços, caso sejam necessários.

A resistência do pavimento foi calculada com base na metodologia ACN/PCN por meio de um processo iterativo, utilizando o programa computacional PCASE disponibilizado gratuitamente no sítio das Forças Armadas Americanas.

O software PCASE (*Pavement Transportation Computer Assisted Structural Engineering*) foi desenvolvido pela U.S. Army Corps of Engineers - Transportation Systems Center. Em sua versão 2.08 o software incorpora todos os projetos de transporte e critérios de avaliação num pacote independente.

O PCASE Automatiza tarefas do dia-dia, permitindo que a equipe de Engenharia tenha múltiplos argumentos de avaliação do pavimento. Inclui avaliações de pavimentos rígidos e flexíveis, baseado em critérios convencionais (CBR) ou mesmo metodologias baseado em sistemas de múltiplas camadas elásticas, sendo:

- Pavimentos Rodoviários: Pavimento rígido e flexível;
- Pavimentos Aeroportuários: Pavimentos flexíveis, rígidos e áreas não pavimentadas.

##### 4.5.1 - AVALIAÇÃO O PAVIMENTO

A avaliação do pavimento seja ele flexível, rígido, rodoviário ou aeroportuário, é baseado num conjunto de tráfego planejado, determinado pelo módulo de construção de padrão de tráfego já discutido anteriormente.

Antes de iniciar a avaliação do pavimento é importante dividi-lo em regiões com características comuns: tipo de pavimento, espessura, condição de superfície, dados históricos

da construção, dados disponíveis do subleito, uso do pavimento e tipo de tráfego. Entretanto, esta divisão é realizada de acordo com a necessidade do usuário, podendo ser modificada a qualquer instante, assim, uma análise é então apresentada para cada característica individual da região escolhida.

A etapa seguinte refere-se à composição do tráfego, onde o usuário tem opção de selecionar o tipo de pavimento do aeródromo, categoria do subleito e área de tráfego analisado, de acordo com opções disponíveis no banco de dados do software. Assim, o software determina a aeronave crítica e número de passadas equivalente para o padrão de tráfego analisado.

Após determinação do tráfego deverá ser iniciado o Módulo de Avaliação onde será apresentada uma análise da avaliação para a situação atual do pavimento. Agora, o usuário tem a possibilidade de escolher os critérios que serão utilizados para calcular o carregamento permitido que passa pelo pavimento. A primeira escolha é para usar CBR ou critérios empíricos e, secundariamente, para uso de critérios elásticos.

A condição do pavimento também é requerida (Bom, médio ou ruim). Caso a opção seja “Ruim”, uma notificação será apresentada ao usuário, indicando Redução de 25% do efeito do carregamento.

Para construir a estrutura do pavimento, o usuário dispõe de duas opções: baseado em análises de DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) ou manualmente, inserindo todos os parâmetros da estrutura como:

- Tipo da camada: revestimento, base, sub-base, subleito;
- Tipo de material que compõe a camada respectiva;
- Espessura da camada e respectivo CBR,  $K$  ou módulo elástico.

Finalmente após o usuário ter completado a construção da estrutura, esta poderá ser analisada pelo software, conforme ilustrado na Figura 4.25.

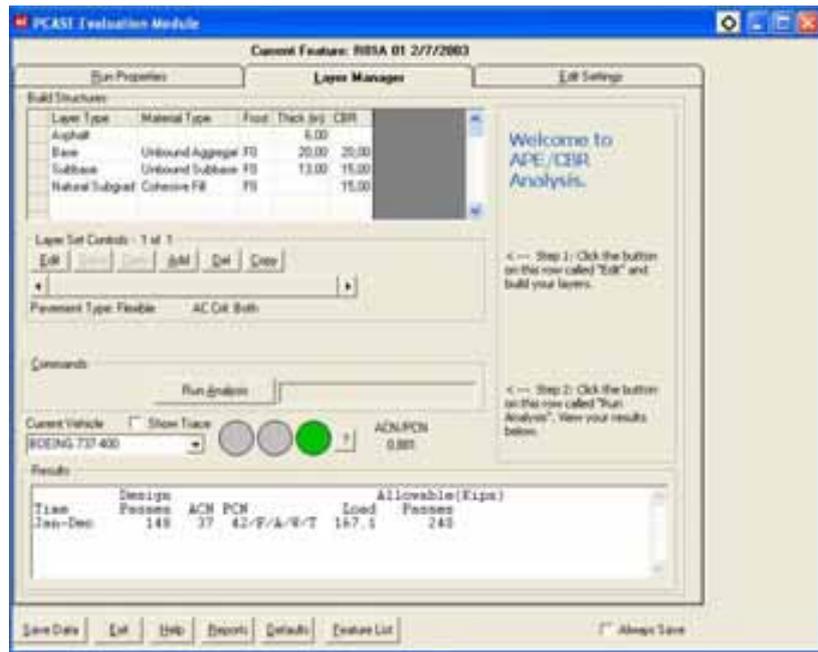


Figura 4.25. Módulo de avaliação do PCASE (PCASE, 2005).

De acordo com resultados apresentados pelo Módulo de Avaliação, o usuário poderá interpretá-los da seguinte maneira:

Exemplo de notificação publicada – PCN 42/F/A/W/T

Interpretação:

- resistência do pavimento: PCN 42
- tipo de pavimento: Flexível
- resistência do terreno de fundação: Alta
- pressão máxima dos pneus: Sem limite de pressão
- método de avaliação: Técnica

O ACN também é apresentado, sendo também determinada a relação ACN/PCN, onde o usuário verifica se a estrutura do pavimento suporta o tráfego representado pela aeronave equivalente.

Os resultados de avaliação da estrutura da pista do Aeroporto de Brasília são apresentados e discutidos no Capítulo 5.

# **CAPÍTULO 5**

## ***Apresentação e Análise de Resultados***

---

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as análises e discussões dos resultados experimentais obtidos por meio de ensaios de campo realizados na antiga pista do Aeroporto Internacional de Brasília.

Os ensaios foram realizados nos mesmos pontos de amostragem em duas campanhas experimentais: situação onde o pavimento encontrava-se emborrachado e ensaios após desemborrachamento.

Em ambas as situações o tempo era ensolarado (temperatura aproximada de 34°C) e a pista encontrava-se seca, sendo molhada apenas nos pontos de ensaio em que a metodologia utilizada assim requeria, o que foi o caso do Pêndulo Britânico e da Drenabilidade.

São apresentados resumos dos resultados da condição superficial da pista além de resultados experimentais realizados em 65 pontos de amostragem onde foram levantados 195 valores de altura da rugosidade da macrotextura por meio do ensaio de Mancha de areia, 195 tempos de drenabilidade utilizando Drenômetro e 325 medidas de BPN utilizando o Pêndulo Britânico, resultados estes apresentados a seguir.

Serão ainda apresentados resultados de medição contínua de atrito realizada pela Infraero, antes do desemborrachamento e medição realizada 4 meses após limpeza da pista.

### 5.2 - LEVANTAMENTO DE DEFEITOS SUPERFICIAIS

Para avaliar a condição superficial da pista do AIB foi utilizando o método PCI com auxílio do software MicroPAVER, onde determinou-se a divisão da pista em 3 segmentos de mesmo tamanho, sendo:

- 1º terço: 1066m de extensão, a partir da Cabeceira 11L, compreendendo as amostras de 01 a 06;

- 2º terço (centro): 1066m de extensão, a partir da amostra nº 6, compreendendo as amostras de 07 a 13;
- 3º terço: 1068 m de extensão, a partir da amostra nº 13 até Cabeceira 29R, compreendendo as últimas cinco amostras, de 14 a 18.

A pista foi dividida em segmentos, pois o objetivo é avaliar o comportamento funcional de cada região que recebe diferentes densidades de tráfego. Os defeitos foram levantados após análise visual sendo anotados em planilhas apropriadas. Estes defeitos identificados são apresentados a seguir.

- *Trinca longitudinal/transversal*: este tipo de defeito foi localizado na região compreendida no 1º e 3º terço da pista, onde foram verificadas ocorrência de trincas com comprimentos 10cm, e em alguns casos até 16m, conforme ilustra a Figura 5.1.



Figura 5.1. (a) e (b) Trincas longitudinais na pista do AIB; (c) processo de medição.

Estas trincas ocorrem no sentido paralelo ao eixo da pista, fato este comprovado nas inspeções realizadas no local. A causa provável do surgimento deste defeito pode ser atribuída à má execução da junta longitudinal de concretagem entre as faixas de tráfego.

Uma vez que o nível de severidade das ocorrências é ainda baixo, a correção deste defeito pode ser feita por meio de selagem das trincas com ligante betuminoso.

- *Desgaste/desagregação*: das 18 seções analisadas, 16 apresentaram este tipo de defeito. O nível de severidade variava entre baixo a médio, com algumas exceções como por exemplo a região do 1º terço onde o desgaste é acentuado com nível de severidade médio a alto, apresentado na Figura 5.2.



Figura 5.2. (a) e (b) Desgaste no pavimento do AIB (2007).

Este tipo de ocorrência acentuada na região do 1º terço se deve ao fato de que a Cabeceira 11L é a mais utilizada recebendo tráfego intenso de aeronaves, ação das intempéries além de longos períodos de desemborrachamento que também influenciam na perda de agregados e/ou argamassa fina do revestimento asfáltico.

A construção de uma capa selante na região afetada apresenta-se como a solução mais adequada e eficiente para este tipo de ocorrência, entretanto a mesma provocaria fechamento parcial ou até mesmo total do grooving, reduzindo a capacidade drenante da superfície.

- *Afundamento de trilha de roda:* a ocorrência deste defeito foi observada somente na região do 1º e do 3º terço, onde estão situadas as cabeceiras da pista. Estas regiões, por receberem o impacto direto das aeronaves durante as manobras de decolagem e pouso, acabam por provocar estas depressões ao longo das trilhas de roda, conforme ilustra a Figura 5.3.

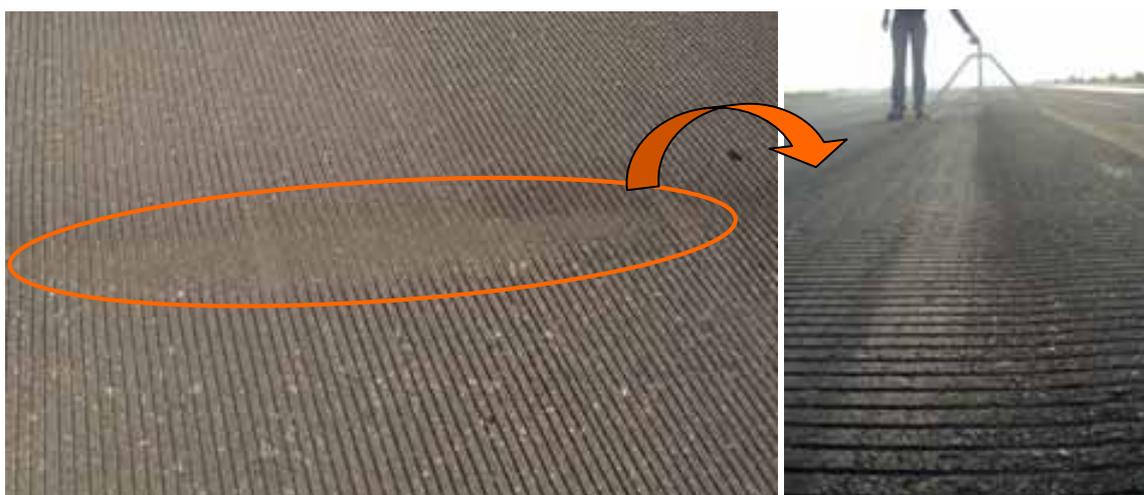


Figura 5.3. (a) Afundamento de trilha de roda na pista do AIB; (b) medição do defeito.

Os afundamentos identificados apresentavam níveis de severidade baixos, com desgaste na superfície do pavimento. Entretanto, ações corretivas como restabelecimento da seção transversal projetada devem ser aplicadas para que esses afundamentos não alcancem um estado que gere um acúmulo de água superficial, colocando em risco o conforto e segurança dos usuários.

- *Buraco*: durante todo levantamento visual foram detectadas cavidades formadas no revestimento do pavimento, com dimensões variadas, causadas principalmente por desgaste superficial (Figura 5.4-a) e em alguns casos devido à presença de pedaços de madeira compactados juntamente com o concreto asfáltico, mostrado na Figura 5.4-b.



Figura 5.4. Buracos na superfície do pavimento: (a) devido ao desgaste; (b) devido à presença de objetos estranhos.

A solução para ambos os casos de cavidades na superfície do pavimento é a execução de um pequeno remendo. A Infraero utiliza um processo simples onde uma equipe vasculha a pista, identificando os buracos (Figura 5.5) e posteriormente preenchendo-as com concreto asfáltico, sendo conformado com auxílio de soquete manual (Figura 5.6).



Figura 5.5. Identificação de pequenos buracos na pista do AIB (2007).



Figura 5.6. Processo de recuperação dos buracos: (a) material utilizado; (b) compactação manual.

Os resultados obtidos para cada segmento foram analisados com auxílio do software MicroPAVER, e são apresentados sob forma de gráficos a seguir.

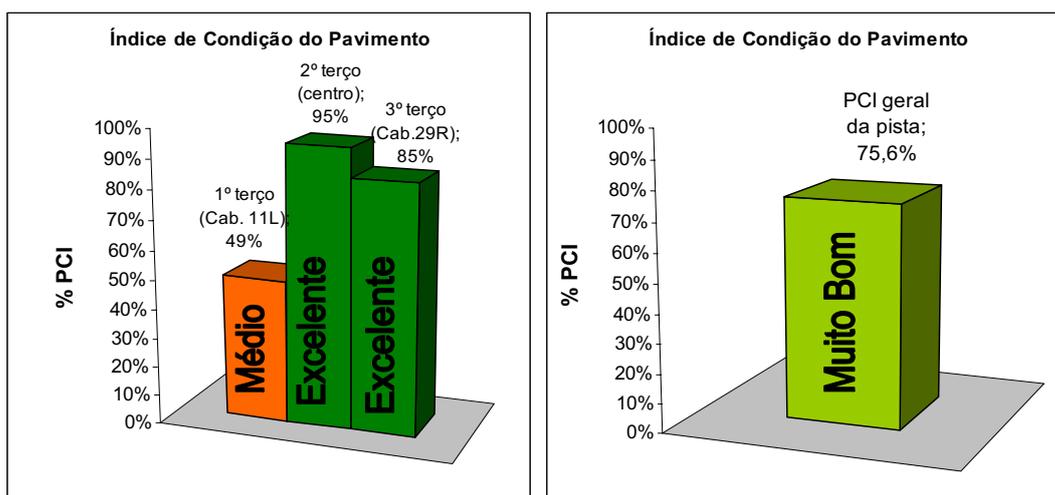


Figura 5.7. Índice de Condição do pavimento: (a) seções individuais; (b) condição geral.

- O 1º terço da pista apresentou PCI = 49 (Figura 5.7-a), o que representa uma Condição Média, resultado direto da ação do tráfego que se concentra naquela cabeceira, agredindo com maior intensidade a superfície do pavimento. Deve ser adotado procedimento imediato para recuperação da condição, ou seja; aplicar medidas corretivas afim de amenizar ou eliminar os defeitos encontrados, para que a vida de serviço daquela região não chegue à ruptura em curto período de tempo.

- O 2º terço assim como o 3º, apresentaram valores de PCI enquadrados como Excelentes (Figura 5.7-a), ou seja; as condições superficiais atuais naquelas regiões encontram-se em condições suficientes para garantir o conforto e segurança durante o rolamento.

Apesar de um dos segmentos ter apresentado condição diferente dos demais, quando se calcula o PCI geral para a pista do AIB, obtém-se um valor cuja condição é Muito Boa, do ponto de vista funcional, conforme mostrado na Figura 5.7-b.

Neste sentido, é possível concluir que as condições superficiais são satisfatórias, devendo apenas ser aplicada medida corretiva em pontos isolados, que futuramente poderão comprometer a pista, gerando altos custos de recuperação.

### 5.3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os conceitos e métodos estatísticos não são apenas úteis, como também indispensáveis na tomada de decisões na presença de incertezas e variações.

Assim, o objetivo central desta avaliação é fornecer métodos para organizar, resumir e tirar conclusões com base em informações contidas nos dados obtidos por meio dos ensaios de campo Mancha de Areia, Pêndulo Britânico e Drenabilidade. Foram utilizados testes de hipóteses, utilizando a Distribuição “t” de *Student* e Análise de Variância (ANOVA), envolvendo comparações entre as grandezas levantadas durante a pesquisa de campo.

#### 5.3.1 - MACROTEXTURA

Os valores de altura média de rugosidade da macrotextura obtidos por meio do ensaio de Mancha de Areia foram avaliados para cada faixa da pista, com finalidade de verificar se os mesmos faziam parte da mesma população, além dos desvios de amostragem.

Com nível de confiança de 95%, os resultados mostram que os valores levantados pertencem à mesma população, podendo então ser utilizados nas demais análises estatísticas que forem necessárias. Os resumos dos resultados para as condições de pista emborrachada e logo após remoção dos detritos, são apresentados na Tabela 5.1 e Tabela 5.2. Os dados brutos encontram-se no Apêndice C.

Tabela 5.1. Valores médios da macrotextura – condição emborrachada.

<i>Faixas</i>	<i>CE</i>	<i>BE</i>	<i>A</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>HS média (mm)</i>	0,91	0,73	0,67	0,69	0,93
<i>s (Desvpad)</i>	0,13	0,04	0,07	0,07	0,08
<i>Classificação</i>	Medianamente Grossa	Média	Média	Média	Medianamente Grossa

Tabela 5.2. Valores médios da macrotextura – condição desemborrachada.

<i>Faixas</i>	<i>CE</i>	<i>BE</i>	<i>A</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>HS média (mm)</i>	1,43	1,33	1,35	1,32	1,43
<i>s (Desvpad)</i>	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02
<i>Classificação</i>	Muito Grosseira ou Muito aberta				

Verifica-se que antes do desemborrachamento a macrotextura nas faixas CE e CD tem comportamento semelhante, enquadrada como “Medianamente Grossa”, diferentemente das demais que apresentaram macrotextura “Média” conforme ilustrado na Figura 5.8. Isto pode ser explicado pelo fato de que a densidade de tráfego está concentrada na região dos 6 metros centrais da pista, abrangendo as faixas A, BE e BD que, conseqüentemente são as faixas onde ocorre o maior acúmulo de borracha e maior desgaste do pavimento.

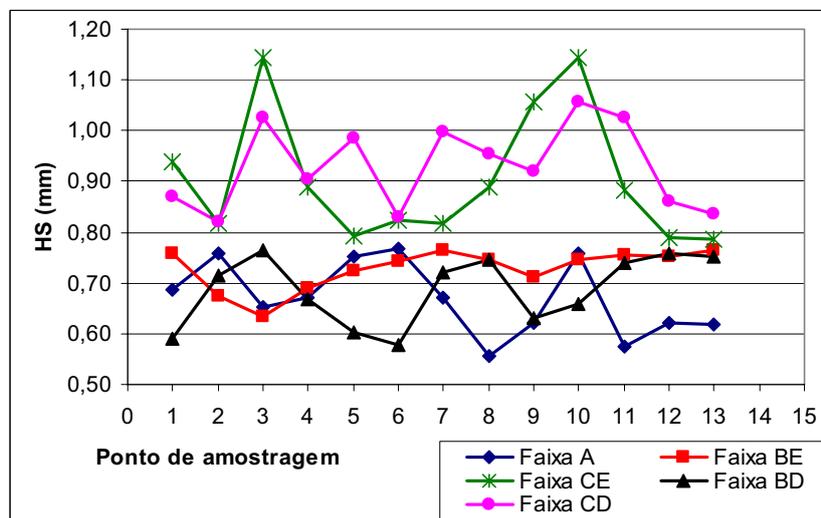


Figura 5.8. Macrotextura antes do desemborrachamento da pista.

Teoricamente é questionável se classificar a textura de uma superfície asfáltica com *grooving*, pois os canais formados pela execução das ranhuras tendem a “mascarar” os resultados, dando uma falsa idéia de macrotextura favorável.

A textura é resultado da graduação dos agregados utilizados na mistura asfáltica, portanto o *grooving* não poderia ser adotado como parcela da macrotextura, apesar de forçar a formação de canais de escoamento de água.

Rodrigues Filho (2006) afirma que a altura média da macrotextura (HS) obtida pelo ensaio de Mancha de areia está diretamente relacionada com a capacidade de escoar água superficial para fora da área de contato pneu-pavimento, mesmo quando se avalia pavimento com *grooving*.

Entretanto, aplicando a classificação convencional para os resultados encontrados após desemborrachamento, é possível verificar que a textura superficial apresenta uma melhoria, sendo que as faixas A, BE e BD passam da condição “Média” para condição “Muito Grosseira ou Muito Aberta”. Esta melhoria na textura também pode ser observada nas faixas CD e CE, antes classificadas como “Medianamente Grossa” e depois numa condição “Muito Grosseira ou Muito Aberta”, como apresentado na Figura 5.9, o que atenderia às exigências e recomendações do DAC, FAA e ICAO.

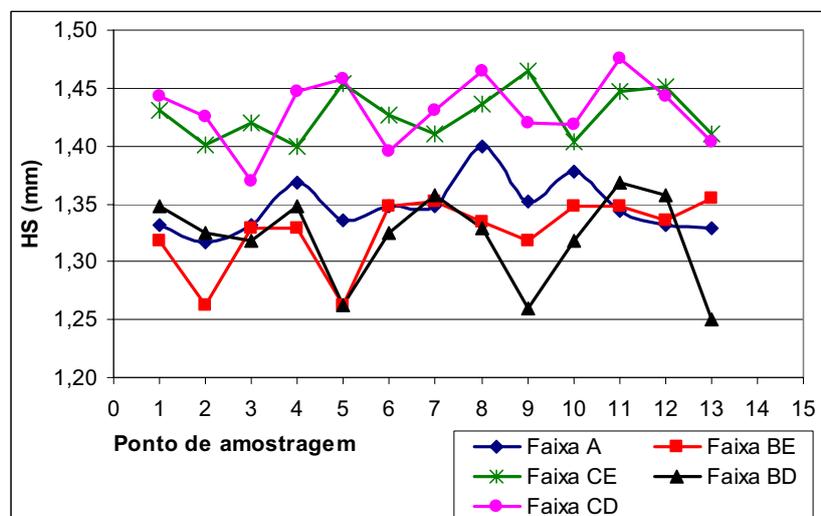


Figura 5.9. Macrotextura após desemborrachamento da pista.

Esta mudança na classificação da macrotextura ocorre devido à retirada de borracha que antes comprometia os canais formados pelo *grooving*, sendo um indicador da capacidade de drenagem dessa superfície, reduzindo o potencial de ocorrência de hidroplanagem, além de ser um forte indicativo da eficiência da remoção de borracha pelo processo de jateamento d’água sob alta pressão.

Esta melhoria significativa pode ser observada no Gráfico apresentado na Figura 5.10, onde são mostrados e comparados os perfis de macrotextura no sentido transversal da pista para situações de pista emborrachada (antes) e desemborrachada (depois).

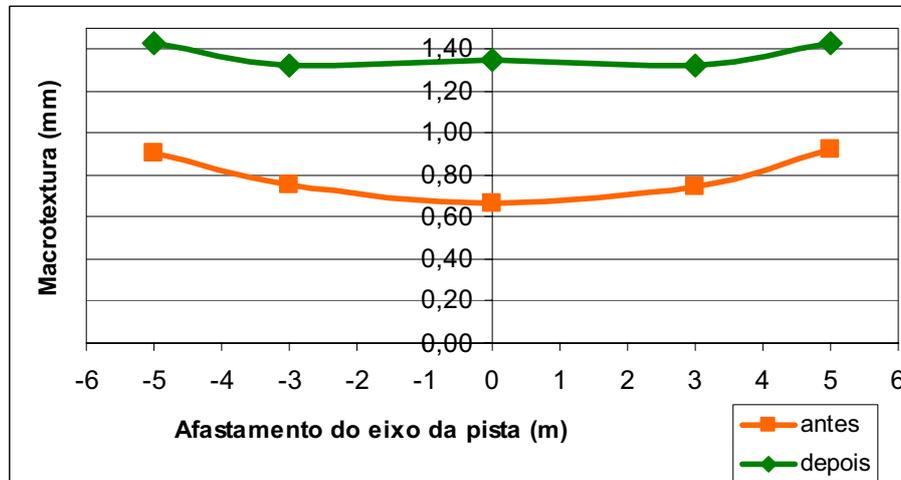


Figura 5.10. Comportamento da macrotextura antes e após desemborrachamento.

Os valores levantados antes e após desemborrachamento foram combinados em pares de faixas, na expectativa de verificação do nível de significância, ou seja; o quanto os resultados de uma faixa se aproximam de outra pelo método *ANOVA*. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4, em forma de matrizes, informando o *Nível Observado de Significância "p"*, obtido na análise para cada um dos pares encontrados.

Tabela 5.3. Níveis de Significância (p%) de valores de macrotextura antes do desemborrachamento.

<i>Faixas</i>	<i>CE</i>	<i>BE</i>	<i>A</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>CE</i>					
<i>BE</i>	0,2%				
<i>A</i>	0%	0,7%			
<i>BD</i>	1,2%	84,7%	15,4%		
<i>CD</i>	63,4%	0%	0%	0,2%	

Tabela 5.4. Níveis de Significância (p%) de valores de macrotextura após desemborrachamento.

<i>Faixas</i>	<i>CE</i>	<i>BE</i>	<i>A</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>CE</i>					
<i>BE</i>	0%				
<i>A</i>	0%	5,6%			
<i>BD</i>	0%	68,7%	4,4%		
<i>CD</i>	76,8%	0%	0%	0%	

O cruzamento da Faixa BE com a Faixa BD indica que antes do desemborramento, há 84,7% de probabilidade de as macrotexturas serem fisicamente iguais, fatos estes decorrentes do tráfego na pista, com densidades iguais na região BD/BE.

Isto pode ser observado também para o par de Faixas CD/CE cujas densidades de tráfego também são semelhantes, daí a forte relação entre os valores de macrotextura levantados durante os ensaios de campo.

Outros pares de faixas não apresentam média e variância próximos, assim a probabilidade de serem iguais é reduzida, como verificado na Tabela 5.3.

Esta forte evidência encontrada para os pares BD/BE e CD/CE foi mantida após desemborramento da pista, tendo leve redução no par BD/BE em relação à condição emborrachada, decorrente do processo de limpeza que pode não ter sido completamente homogêneo na região que abrange estas faixas.

A relação entre as demais combinações de pares de faixas apresentou baixos Níveis de Significância, tanto para condição de pista emborrachada quanto limpa, devido à não homogeneidade na distribuição tráfego no sentido transversal na pista, que conseqüentemente atinge a superfície da pista de maneira heterogênea para diferentes afastamentos em relação ao eixo da pista.

### 5.3.2 - MICROTTEXTURA

De maneira semelhante à macrotextura, foram avaliados os resultados da microtextura obtidos por meio do ensaio Pêndulo Britânico para cada faixa da pista com finalidade de verificar se os valores pertenciam à mesma população, além dos desvios de amostragem.

Os resultados da análise pela distribuição “t” de *Student* mostraram que com 95% de confiança, os dados levantados pertenciam à mesma população. Os resultados são apresentados na Tabela 5.5 e Tabela 5.6 onde consta um resumo da análise. O resumo dos dados brutos obtidos nos ensaios de campo estão disponíveis no Apêndice C.

Tabela 5.5. Valores médios da microtextura – condição emborrachada.

<i>Faixas</i>	<i>CE</i>	<i>BE</i>	<i>A</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>Média (BPN)</i>	74,4	53,7	56,2	51,5	72,9
<i>s (Desvpad)</i>	3,9	4,5	10,1	5,9	4,6
<i>Classificação</i>	Rugosa	Medianamente Rugosa	Rugosa	Medianamente Rugosa	Rugosa

Tabela 5.6. Valores médios da microtextura – condição desemborrachada.

<i>Faixas</i>	<i>CE</i>	<i>BE</i>	<i>A</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>Média (BPN)</i>	105,3	106,2	105,0	106,0	105,4
<i>s (Desvpad)</i>	0,9	0,9	1,2	1,0	0,7
<i>Classificação</i>	Muito Rugosa				

Segundo classificação proposta por Aps (2006), o comportamento da microtextura da pista numa condição emborrachada para as faixas CD, CE e A são semelhantes, enquadradas como “Rugosa”, diferentemente das demais que apresentaram microtextura “Medianamente Rugosa”, conforme mostrado na Figura 5.11.

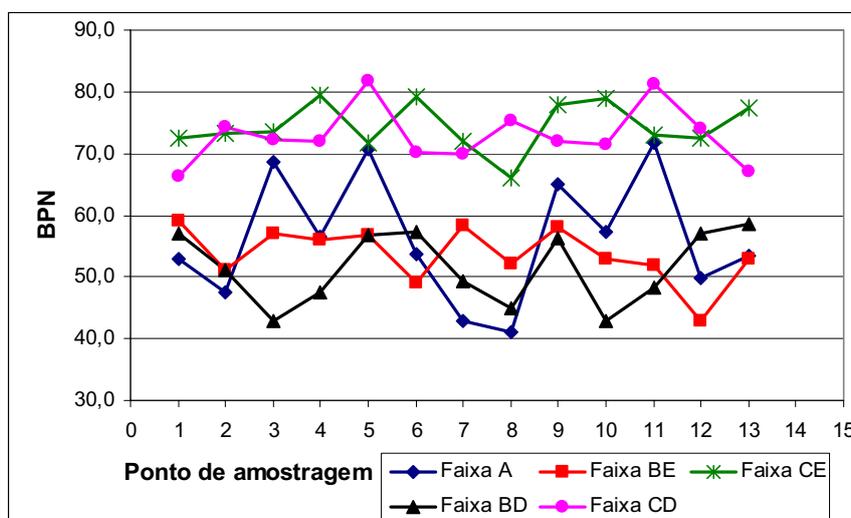


Figura 5.11. Microtextura (BPN) antes do desemborrachamento da pista.

Este comportamento é explicado pelo fato de que o tráfego concentra-se na região central atingindo principalmente as faixas BE e BD. Entretanto, após o desemborrachamento, o comportamento da microtextura é muito semelhante em todas as faixas de tráfego (Figura 5.12), sendo classificadas, de acordo com Aps (2006) numa condição “Muito Rugosa”, o que favorece o atrito durante as operações de frenagem na pista.

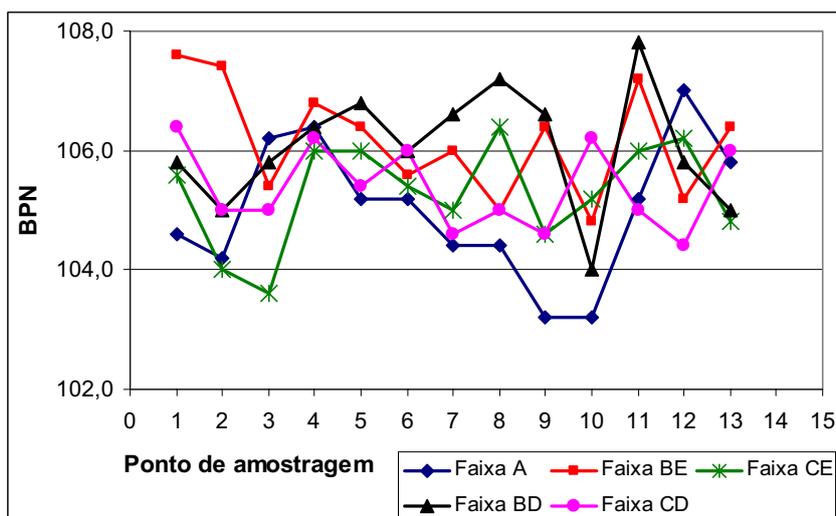


Figura 5.12. Microtextura (BPN) após desemborrachamento da pista.

O comportamento dos perfis de microtextura podem ser verificados na Figura 5.13 onde observa-se a variação pontual do atrito longitudinal (mesmo sentido do tráfego) medido com o Pêndulo Britânico no período em que a pista encontrava-se emborrachada, passando para condição homogênea após o processo de desemborrachamento, evidenciando a eficácia da limpeza realizada.

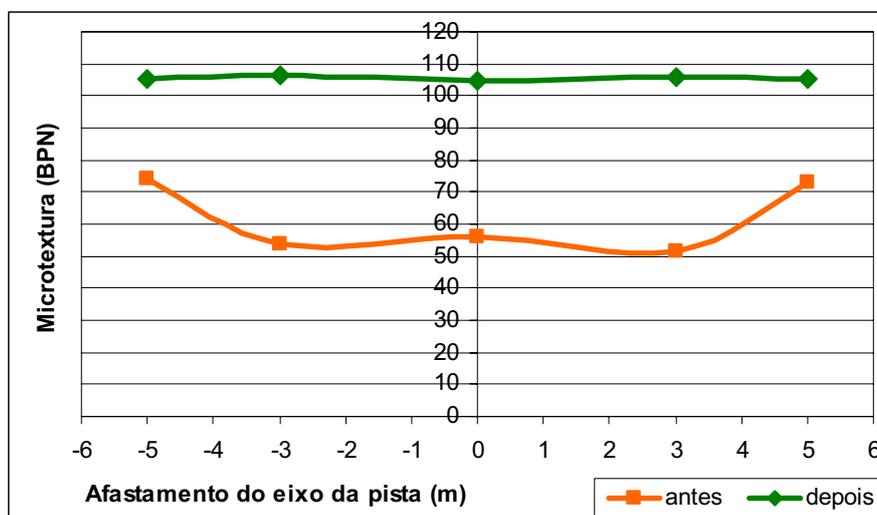


Figura 5.13. Comportamento da microtextura antes e após desemborrachamento.

Os valores de atrito obtidos com Pêndulo Britânico foram combinados em pares de faixas, compondo matrizes com os valores dos níveis de significância observados na expectativa de verificar o quanto uma faixa se aproximada da outra pelo método ANOVA. A Tabela 5.7 e a Tabela 5.8 apresentam os resultados encontrados.

Tabela 5.7. Níveis de Significância (p%) de valores de microtextura antes do desemborrachamento.

<b><i>Faixas</i></b>	<b><i>CE</i></b>	<b><i>BE</i></b>	<b><i>A</i></b>	<b><i>BD</i></b>	<b><i>CD</i></b>
<b><i>CE</i></b>					
<b><i>BE</i></b>	0%				
<b><i>A</i></b>	0%	41,74%			
<b><i>BD</i></b>	0%	30,12%	16,05%		
<b><i>CD</i></b>	38,35%	0%	0%	0%	

Tabela 5.8. Níveis de Significância (p%) de valores de microtextura após desemborrachamento.

<b><i>Faixas</i></b>	<b><i>CE</i></b>	<b><i>BE</i></b>	<b><i>A</i></b>	<b><i>BD</i></b>	<b><i>CD</i></b>
<b><i>CE</i></b>					
<b><i>BE</i></b>	2,0%				
<b><i>A</i></b>	47,4%	0,9%			
<b><i>BD</i></b>	4,8%	77,9%	2,0%		
<b><i>CD</i></b>	80,6%	2,0%	33,6%	5,4%	

As combinações realizadas a partir de valores obtidos antes do processo de desemborrachamento indicam que a probabilidade de o atrito ser fisicamente igual é muito baixa, em algumas combinações até impossíveis. Este comportamento é fortemente relacionado ao nível de emborrachamento que não é homogêneo e que compromete o atrito ao longo da pista.

Diferentemente das observações antes do desemborrachamento, os níveis de significância obtidos a partir de resultados após limpeza da pista foram satisfatórios nos pares de faixas BD/BE e CD/CE, o que era esperado uma vez que após a limpeza, o comportamento deveria ser o mesmo nas faixas cujas distâncias do eixo eram iguais, indicando que o tráfego exerce mesma influência em ambos os lados da pista.

### 5.3.3 - DRENABILIDADE

Como medida indireta da macrotextura, os valores obtidos por meio da drenabilidade também foram avaliados com intuito de verificar a possibilidade de os mesmos não pertencerem à mesma população amostrada.

O resumo dos resultados obtidos para condição de pista emborrachada e após processo de limpeza, são apresentados na Tabela 5.9 e na Tabela 5.10.

Tabela 5.9. Valores médios da drenabilidade superficial – condição emborrachada.

<i>Faixas</i>	<i>CE</i>	<i>BE</i>	<i>A</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>Vazão média (l/s)</i>	0,11	0,08	0,08	0,07	0,12
<i>s (Desvpad)</i>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabela 5.10. Valores médios da drenabilidade superficial – condição desemborrachada.

<i>Faixas</i>	<i>CE</i>	<i>BE</i>	<i>A</i>	<i>BD</i>	<i>CD</i>
<i>Vazão média (l/s)</i>	0,16	0,14	0,14	0,14	0,16
<i>s (Desvpad)</i>	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01

A drenabilidade superficial média nas faixas CD e CE têm comportamento semelhante, assim como as faixas A, BE e BD, como ilustrado na Figura 5.14.

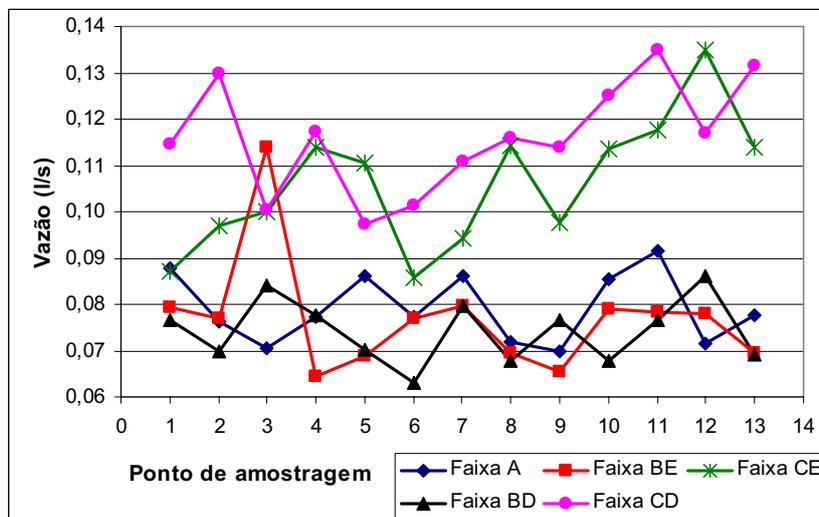


Figura 5.14. Drenabilidade superficial antes do desemborrachamento da pista.

Entretanto os resultados não foram satisfatórios, pois em alguns pontos de amostragem foi verificado acúmulo de água decorrente do emborrachamento que comprometia os canais de escoamento formados pelo *grooving*, ilustrado na Figura 5.15-a.



Figura 5.15. Drenômetro na Pista do AIB (a) grooving emborrachado; (b) grooving desemborrachado.

Após a limpeza da pista, com praticamente total desobstrução do *grooving*, a drenagem superficial ocorria muito rapidamente dentro dos canais do *grooving* não sendo observado acúmulo de água em pontos isolados da pista (Figura 5.15-b).

Além disto, verifica-se que em todas as faixas avaliadas os valores de drenabilidade são muito próximos e satisfatórios quando correlacionados com os valores de macrotextura obtidos pelo método Mancha de Areia, apresentados no item 5.5. O comportamento da drenabilidade das faixas ao longo da pista pode ser observado na Figura 5.16.

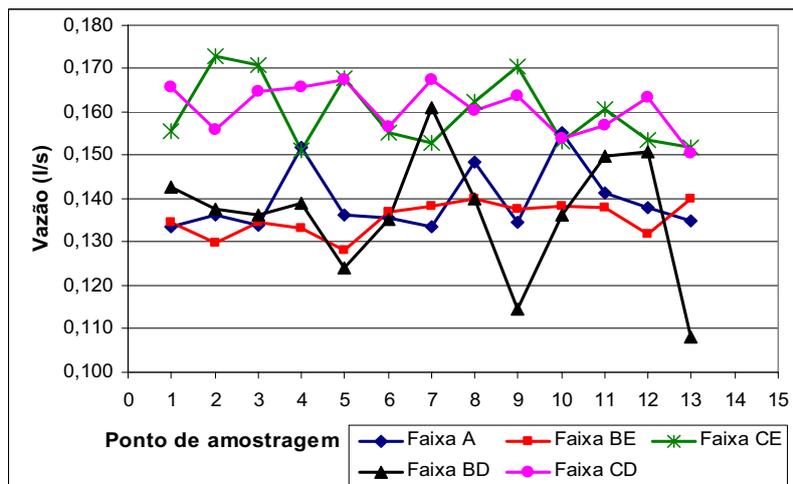


Figura 5.16. Drenabilidade superficial após desemborrachamento da pista.

Esta proximidade dos valores obtidos após desemborrachamento se deve ao fato de que as faixas avaliadas receberam tratamento homogêneo de limpeza além de estarem compreendidas na mesma região de caimento transversal. Os perfis de drenabilidade no sentido transversal da pista para situação de pista emborrachada (antes) e desemborrachada (depois), podem ser observados na Figura 5.17.

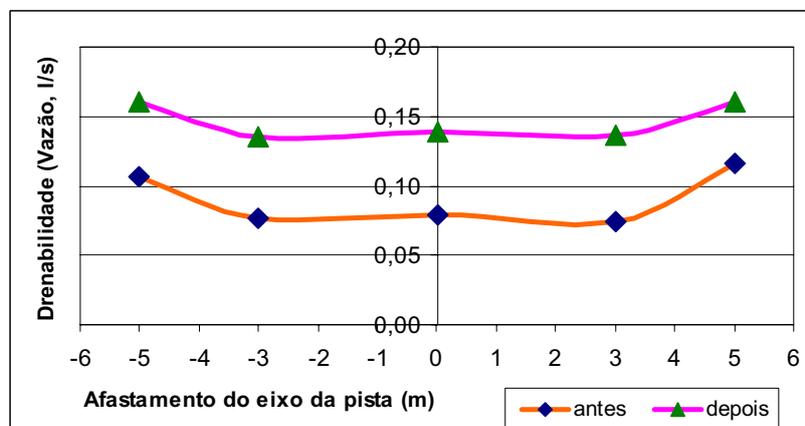


Figura 5.17. Comportamento da drenabilidade superficial antes e após desemborrachamento.

Novamente, no intuito de verificar o quanto os resultados de uma faixa se aproximava de outra, foi utilizada análise estatística pelo método *ANOVA*. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 5.11 e na Tabela 5.12.

Tabela 5.11. Níveis de Significância (p%) de valores de drenabilidade superficial antes do desemborrachamento.

<b>Faixas</b>	<b>CE</b>	<b>BE</b>	<b>A</b>	<b>BD</b>	<b>CD</b>
<b>CE</b>					
<b>BE</b>	0%				
<b>A</b>	0%	57,1%			
<b>BD</b>	0%	51,1%	9,4%		
<b>CD</b>	6,3%	0%	0%	0%	

Tabela 5.12. Níveis de Significância (p%) de valores de drenabilidade superficial após desemborrachamento.

<b>Faixas</b>	<b>CE</b>	<b>BE</b>	<b>A</b>	<b>BD</b>	<b>CD</b>
<b>CE</b>					
<b>BE</b>	0%				
<b>A</b>	0%	10,1%			
<b>BD</b>	0%	79,4%	52,7%		
<b>CD</b>	70,9%	0%	0%	0%	

O cruzamento da Faixa BE com a Faixa A e BE com a faixa BD, indica que antes do desemborrachamento existe a possibilidade de a drenabilidade superficial dos pares de faixas serem fisicamente iguais.

Isto se deve ao fato de BE, BD e A serem faixas muito próximas e receberem tráfego com intensidade semelhante, e conseqüentemente mesma intensidade de emborrachamento, o que influenciar nas condições de drenabilidade superficial.

A limpeza da pista fez com que as combinações BE/BD e CE/CD apresentassem Níveis de Significância satisfatórios, o que era esperado, uma vez que após desemborrachamento, os canais formados pelo *grooving* foram desobstruídos.

Outras combinações apresentam baixos Níveis de Significância, tanto para condição de pista emborrachada quanto limpa.

#### 5.4 - ATRITO DA PISTA

Após levantamento e análise estatística dos parâmetros de microtextura e macrotextura obtidos em ensaios de campo com Pêndulo Britânico e Mancha de Areia, foi verificado que as faixas BD e BE tiveram comportamento semelhante antes e após desemborramento, assim como as faixas CD e CE.

Neste sentido, foi calculada uma média dos componentes  $S_p$  e  $F_{60}$  para cada faixa, tanto para condição emborrachada quanto após limpeza. Visando conhecer o comportamento do atrito para diferentes velocidades, foi determinado o  $IFI$  para cada faixa avaliada, sendo os gráficos apresentados na Figura 5.18, Figura 5.19 e Figura 5.20.

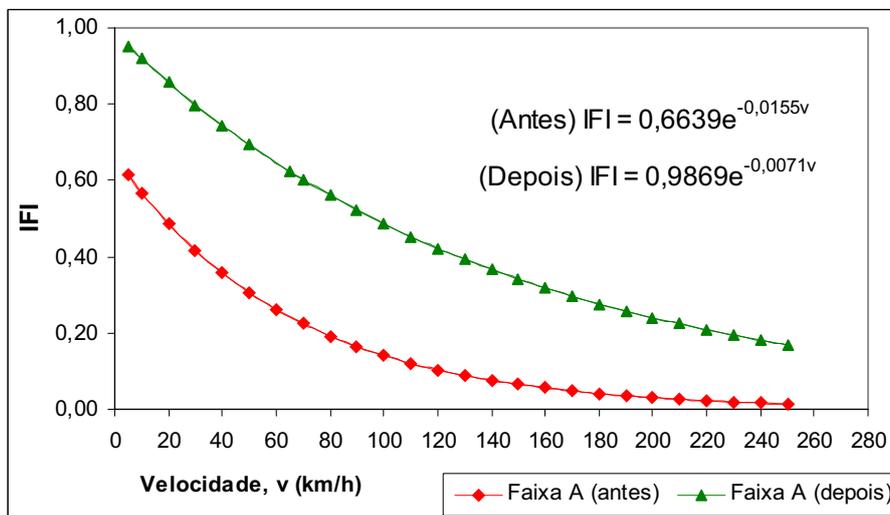


Figura 5.18. Comportamento do atrito – Faixa A.

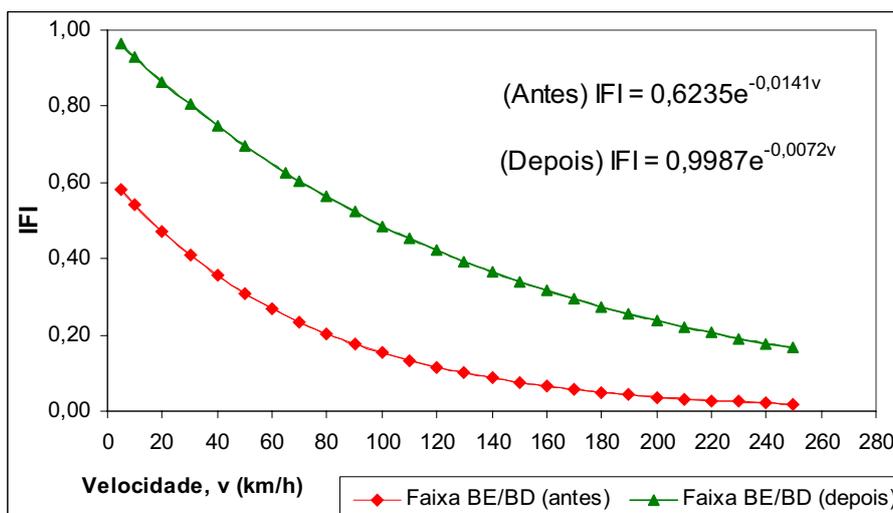


Figura 5.19. Comportamento do atrito – Faixa BE/BD.

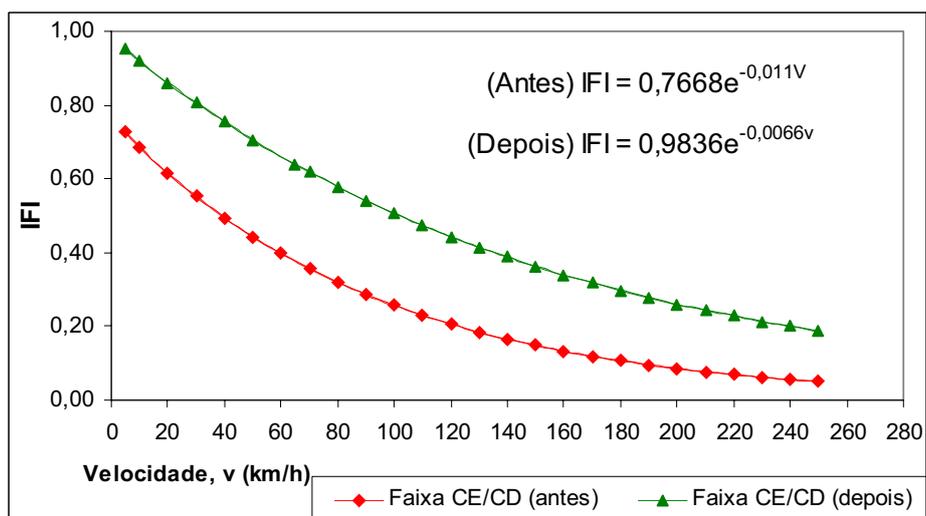


Figura 5.20. Comportamento do atrito – Faixa CD/CE.

Verifica-se que o comportamento do atrito para cada par de faixas antes do desemborrachamento é bastante semelhante, com melhor desempenho para o par CD/CE, devido à intensidade de tráfego naquela região que afeta com menor intensidade a macrotextura e microtextura, assim resultando em melhores condições de aderência pneu-pavimento. Os pares de faixa após limpeza da pista apresentaram comportamento semelhante e superiores às condições antes do desemborrachamento.

Verificada a condição de atrito para cada par de faixas, foi então realizada avaliação do atrito global para a região estudada na pesquisa. Para tanto, uma média de todas as faixas, antes e após desemborrachamento é apresentada na Figura 5.21.

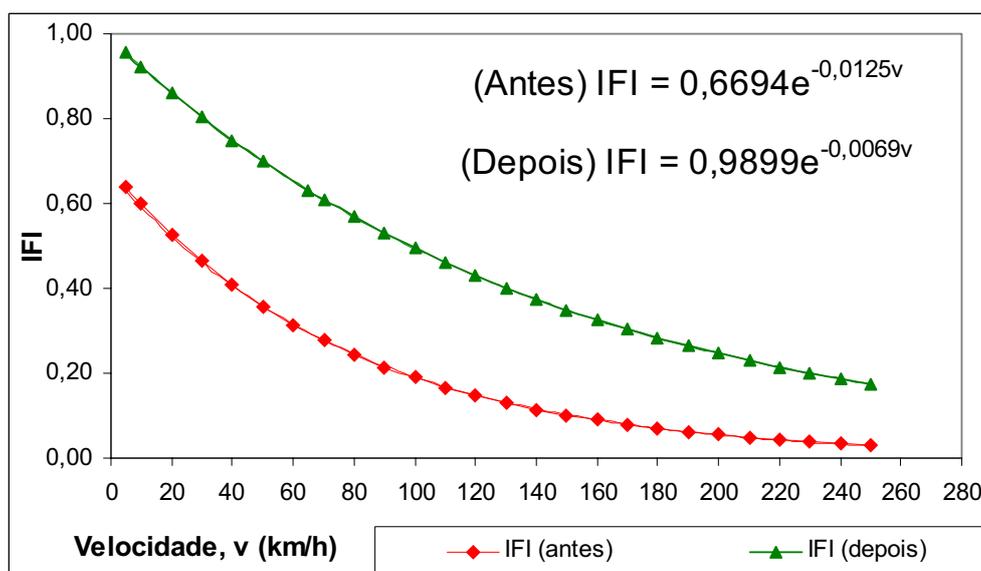


Figura 5.21. Comportamento do atrito global da região estudada.

Observando o comportamento após processo de desemborrachamento é possível avaliar que as condições de atrito melhoraram sobremaneira, apresentando resultados até cinco vezes superiores às condições antes da limpeza.

Esta melhoria pode ser comprovada quando se imagina uma aeronave em condições normais pousando a uma velocidade aproximada de 200 km/h. Neste momento o coeficiente de atrito disponível na pista seria de 0,05 enquanto que após desemborrachamento o valor aproximado seria de 0,25.

Assim, é notório que antes do desemborrachamento o atrito disponível para uma velocidade de 200 km/h é cinco vezes inferior se comparado aos resultados encontrados após limpeza, ou seja, a probabilidade de ocorrência de um incidente ou acidente devido à derrapagem na pista é maior quando a pista encontra-se emborrachada.

De um modo geral, analisando este comportamento, pode-se observar que a necessidade de controle das condições de macrotextura e microtextura são de extrema importância para que não seja reduzida a capacidade operacional da pista, mesmo em condições de precipitação, uma vez que a grande maioria dos acidentes e incidentes em pista ocorrem durante as manobras de pouso em dias de chuva.

#### 5.4.1 - MEDIÇÃO DE ATRITO COM MU-METER

A medição de atrito com MuMeter foi realizada no dia 19 de julho de 2007 antes do processo de desemborrachamento, com medições de acordo com a norma a 3 m para cada lado do eixo, na região compreendida nas faixas BD e BE. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 5.13, sendo o relatório original da medição realizada pela Infraero disponível no Apêndice D.

Tabela 5.13. Atrito dinâmico medido com MuMeter (Julho/2007).

<i>Faixas</i>	<i>BE (3m esquerda)</i>	<i>BD (3m direita)</i>
<i>1º terço (CAB 11L)</i>	0,54	0,54
<i>2º terço (Região central)</i>	0,52	0,52
<i>3º terço (CAB 29R)</i>	0,56	0,56
<i>Atrito médio (MuMeter)</i>	0,54	0,54

É possível verificar a proximidade dos valores encontrados com o nível de manutenção de 0,52 previsto em norma. Neste sentido, o processo de desemborrachamento, iniciado em

Setembro de 2007 foi aplicado com intuito de recuperar as condições de atrito necessárias a operações seguras durante os pousos e decolagens das aeronaves.

Não foram realizadas medições de atrito com MuMeter logo após processo de desemborachamento da pista. Provavelmente se logo após a limpeza da pista fosse realizada medição com MuMeter, os resultados seriam próximos ou até superiores aos levantados com aparelhagem portátil, apresentados na Figura 5.21.

Desta forma é possível concluir que os resultados obtidos a partir de ensaios realizados com equipamento portátil após desemborachamento, são satisfatórios no que se refere às condições de atrito.

No mês de Janeiro de 2008, portanto 4 meses após desemborachamento da pista, foi realizada medição de atrito dinâmico utilizando MuMeter, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.14

Tabela 5.14. Atrito dinâmico medido com MuMeter (Janeiro/2008).

<i>Faixas</i>	<i>BE (3m esquerda)</i>	<i>BD (3m direita)</i>
<i>1º terço (CAB 11L)</i>	0,52	0,56
<i>2º terço (Região central)</i>	0,55	0,59
<i>3º terço (CAB 29R)</i>	0,6	0,62
<i>Atrito médio (MuMeter)</i>	0,56	0,59

É possível verificar que os valores de atrito encontram-se próximos ao limite de 0,52 indicando que nos próximos meses será necessário nova intervenção para remoção de borracha da pista, comprovando que o período máximo entre intervenções para a antiga pista do AIB é de seis meses.

## 5.5 - CORRELAÇÕES ENTRE OS ENSAIOS

Para analisar o comportamento das variáveis estudadas nesta pesquisa, foram construídos gráficos onde se determinou o coeficiente de correlação linear de Pearson, utilizando os valores de campo relativos a:

- Macrotextura (HS, em mm);
- Microtextura (BPN);
- Drenabilidade (Vazão, l/s).

Foi adicionada a cada gráfico de dispersão uma linha de tendência linear, com finalidade de analisar numericamente a correlação existente entre os valores. Essa linha gera uma equação do tipo  $a.x+b$ . A linha de tendência gera também um valor de correlação de Pearson, também denominado coeficiente de determinação  $R^2$ .

A correlação serve para determinar se dois conjuntos de dados se movem juntos, isto é, se os maiores valores de um conjunto estão associados com os maiores valores do outro (correlação positiva), se os menores valores de um conjunto estão associados com os maiores valores do outro (correlação negativa), ou se os valores dos dois conjuntos não se relacionam (correlação próxima a zero).

Existe uma classificação subjetiva do NCHRP (TRB, 2002) do que se chama em inglês de “*goodness-of-fit*”, baseada no  $R^2$ , de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 5.15. Classificação subjetiva da correlação dos parâmetros avaliados.

<b><i>Classificação</i></b>	<b><i>R<sup>2</sup></i></b>
Excelente	> 0,90
Boa	0,70 – 0,89
Razoável	0,40 – 0,69
Fraca	0,20 – 0,39
Muito fraca	< 0,19

A classificação descrita acima será utilizada nas correlações que serão determinadas a partir dos ensaios de campo realizados durante a pesquisa.

#### 5.5.1 - DRENABILIDADE *VERSUS* MANCHA DE AREIA

Observa-se na Figura 5.22 que a linha de tendência linear gerou um alto valor de  $R^2 = 0,80$ , o que significa que há uma boa correlação entre os ensaios de Drenabilidade e Mancha de Areia.

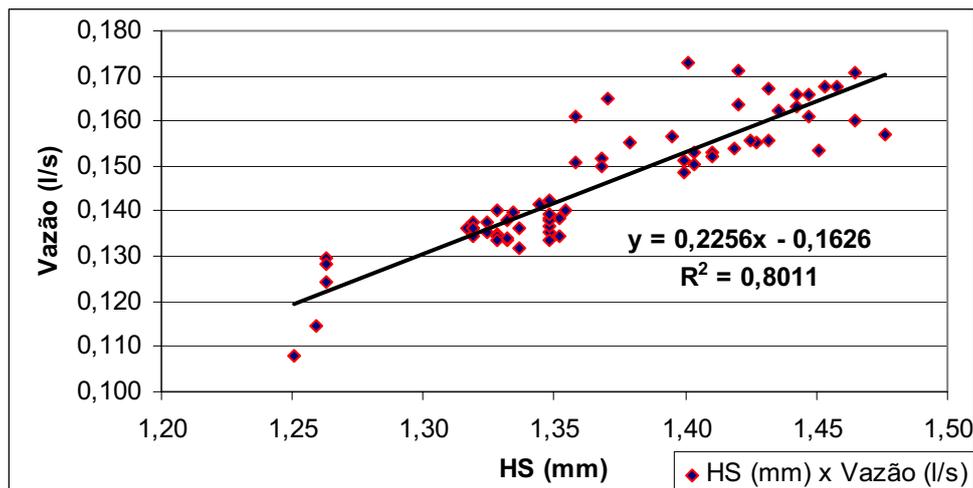


Figura 5.22. Relação entre os ensaios de Mancha de areia e Drenabilidade.

Embora Aps (2006) comente que para revestimentos cujas texturas são muito grossas (abertas) esta correlação pode não ser válida, além desta pesquisa, a forte correlação existente para pavimentos aeroportuários também foi determinada por Rodrigues Filho (2006) para o revestimento da pista do Aeroporto de Congonhas em São Paulo.

Neste sentido, é notório que para a pista estudada, a capacidade de drenagem superficial da água que se interpõe na área de contato pneu-pavimento está diretamente relacionada à altura média da macrotextura (HS, mm) obtida por meio do ensaio de Mancha de Areia, além de apresentar consistência para pavimentos que receberam tratamento antiderrapante como *grooving*.

#### 5.5.2 - MANCHA DE AREIA *VERSUS* PÊNDULO BRITÂNICO.

Analisando-se o coeficiente de correlação encontrado entre o ensaio de Mancha de Areia (HS, mm) e Pêndulo Britânico (BPN), apresentado na Figura 5.23, é possível observar a dispersão entre os valores, o que indica a inexistência de correlação entre os ensaios.

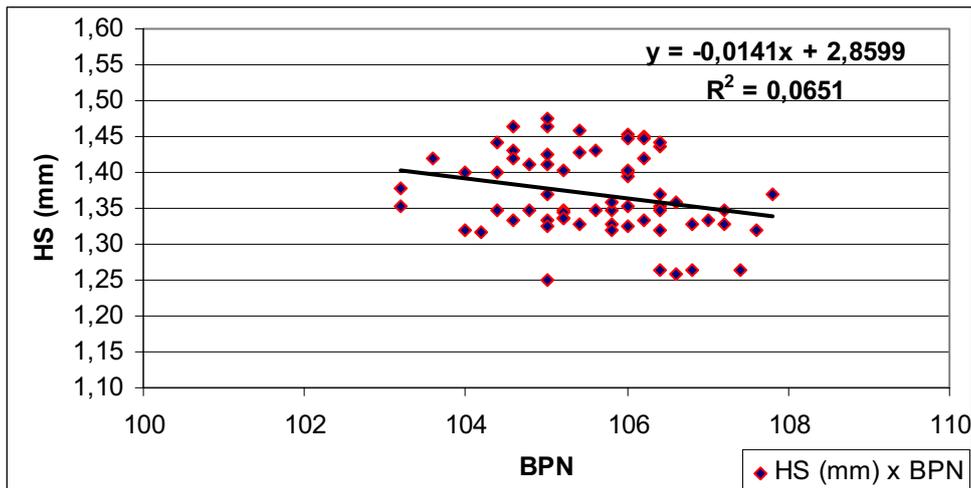


Figura 5.23. Relação entre os ensaios de Mancha de areia e Pêndulo Britânico.

Esta inexistência de correlação ocorre, pois o Pêndulo Britânico está relacionado com a microtextura dos agregados constituintes da mistura asfáltica, enquanto que a Mancha de areia avalia a macrotextura do revestimento.

### 5.5.3 - DRENABILIDADE *VERSUS* PÊNDULO BRITÂNICO.

A dispersão obtida após correlacionar os resultados de atrito medido com Pêndulo Britânico (BPN) e Drenabilidade (Vazão, l/s) medida com Drenômetro, apresentou coeficiente “a” negativo e valor de  $R^2$  próximo a zero, conforme ilustrado no gráfico da Figura 5.24.

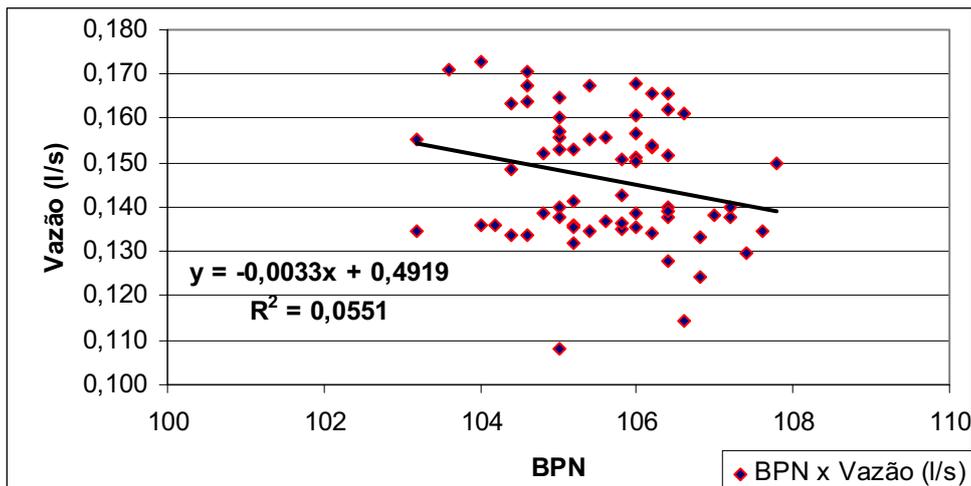


Figura 5.24. Relação entre os ensaios de Pêndulo Britânico e Drenabilidade.

Mais uma vez a inexistência de correlação se deve ao fato de que o BPN é uma medida de atrito relacionada com a microtextura dos agregados, enquanto que a Drenabilidade é uma medida indireta relacionada a macrotextura do revestimento.

#### 5.5.4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO LINEAR.

Após verificação das possíveis correlações entre os ensaios de campo realizados, foi construída a Matriz de Correlação Linear apresentada na Tabela 5.16, onde se pode observar a correlação das variáveis  $X_i$  e  $X_j$  em cada interseção linha ( $i$ ) coluna ( $j$ ).

Tabela 5.16. Matriz de Correlação Linear para a pista do AIB.

<b>FATOR</b>	<b>Mancha de Areia (HS, mm)</b>	<b>Drenabilidade (Vazão, l/s)</b>	<b>Pêndulo Britânico (BPN)</b>
<b>Mancha de Areia (HS, mm)</b>	1	0,80	- 0,06
<b>Drenabilidade (Vazão, l/s)</b>	0,80	1	- 0,05
<b>Pêndulo Britânico (BPN)</b>	- 0,06	- 0,05	1

Os valores de Mancha de Areia e Drenabilidade se correlacionaram bem entre si, pois ambos são decorrentes da macrotextura da via. Entretanto a relação dos mesmos com o Pêndulo Britânico é muito baixa, negativa e quase inexistente.

O fato de o ensaio de Pêndulo Britânico apresentar péssimas relações com os demais é decorrente da sua relação com a microtextura dos agregados, enquanto que os outros ensaios avaliam a macrotextura, relacionada com o tipo de mistura e traço adotado para o revestimento betuminoso.

Apesar da baixa correlação com os demais ensaios, os resultados obtidos com o Pêndulo Britânico apresentaram baixa variação, ou seja, baixos valores de Desvio Padrão, devido ao fato de que a medida do BPN é basicamente influenciada apenas pela microtextura dos agregados, sendo todos os pontos analisados constituídos de revestimento com as mesmas características.

## 5.6 - AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA PISTA (ACN/PCN)

Antes de realizar a avaliação da resistência da pista, foi necessário buscar informações sobre a estrutura do pavimento (base, sub-base, etc.). Segundo informações obtidas junto a Infraero, a Pista 11L – 29R, do Aeroporto Internacional de Brasília/DF, apresenta estrutura esquematizada conforme Figura 5.25.

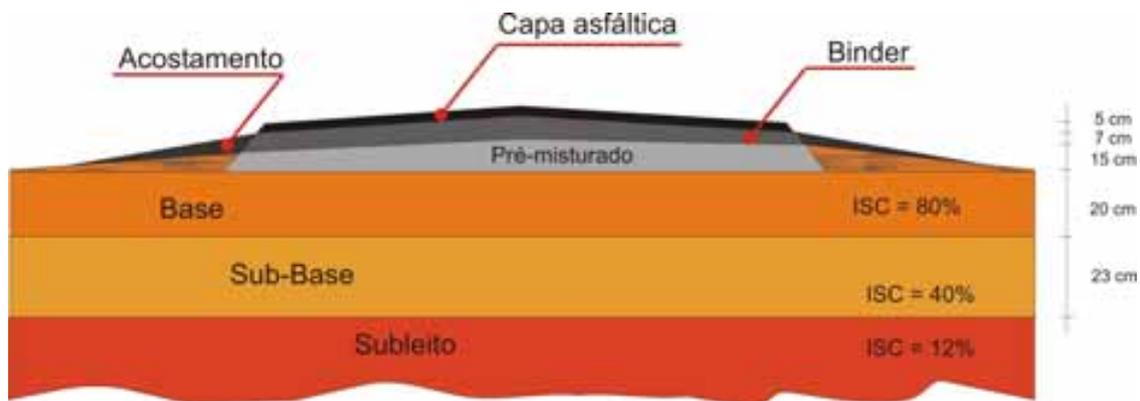


Figura 5.25. Seção Típica do pavimento do AIB.

A estrutura é composta por camadas asfálticas construídas sobre delgada camada de Base e Sub-Base de cascalho laterítico, assente em solo argiloso vermelho, predominante na região do Distrito Federal.

Outra informação importante refere-se ao tráfego de aeronaves na pista. Conforme Movimento Operacional obtido junto à Infraero, a aeronave mais freqüente e também a mais pesada a operar na pista do AIB é o Airbus A-320.

Com aproximadamente 18.000 pousos/decolagens/ano, o A-320 operando com carga máxima de decolagem de 667 kN ( $\pm$  68 toneladas), tem ACN = 36, ou seja, seu efeito de dano sobre um pavimento com fundação com  $8\% < \text{CBR} < 13\%$ .

Neste sentido, a avaliação da resistência da pista focou-se na freqüência e peso operacional desta aeronave.

Determinados os parâmetros necessários (tráfego e estrutura), as informações foram transferidas para o software PCASE. Finalmente após a compilação dos dados, o software apresenta os resultados em seu Módulo de Avaliação, conforme ilustrado na Figura 5.26.

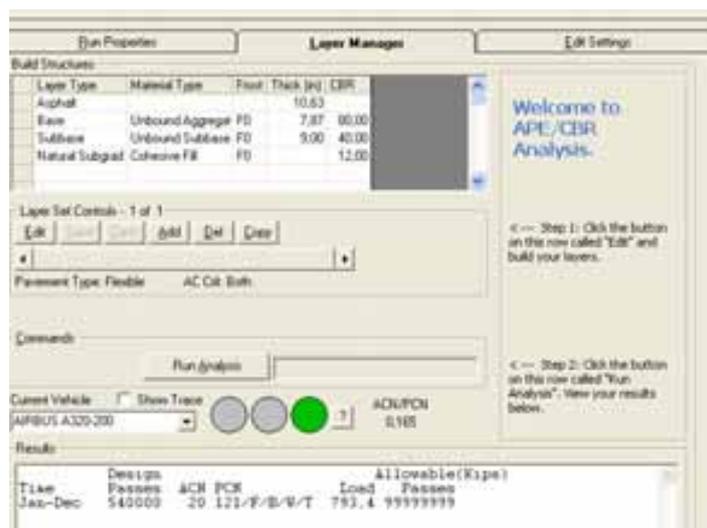


Figura 5.26. Avaliação da resistência da pista do AIB.

De acordo com resultados encontrados, o pavimento tem PCN = 121 e ACN = 20, sendo a relação ACN/PCN = 0,165. O software leva em consideração para cálculo do PCN a aeronave determinada e número de passadas, diferentemente do cálculo apresentado no Boletim Técnico nº 17 (ABPv, 1996), utilizado pela Infraero, onde o PCN determinado seria 43, e a relação ACN/PCN = 0,83, uma vez que o ACN do A-320 = 36.

Assim, é possível verificar que os resultados encontrados utilizando o software são superiores aos valores determinados aplicando a metodologia do Boletim Técnico nº 17.

Entretanto, verifica-se que a estrutura do pavimento suporta o tráfego representado pela aeronave mais pesada, independentemente do recurso utilizado para cálculo, pois a relação ACN/PCN continua inferior ao limite de 1,0, não apresentando qualquer restrição quanto ao uso da pista.

Apesar de verificada a capacidade técnica de resistir ao tráfego de aeronaves determinado, a avaliação técnica do PCN geralmente não apresenta valores coerentes, pois quaisquer recursos dentro desta metodologia desconsideram a fadiga a qual o pavimento está sujeito, causada pela ação contínua do tráfego de aeronaves.

Assim, é importante ressaltar que esta avaliação deve ser apenas indicativa da capacidade estrutural da pista.

Para uma melhor avaliação da situação estrutural de um pavimento devem ser utilizados métodos onde são consideradas as relações tensão-deformação dos materiais das camadas do

pavimento, obtidas por meio por meio de ensaios de laboratório ou por meio de retroanálises de medidas de deflexão induzidas no pavimento com aplicação de cargas dinâmicas, como é o caso do FWD.

Neste caso, os dados obtidos são então analisados por meio de programas computacionais, o que representa uma melhor simulação da situação atual e real do pavimento.

# CAPÍTULO 6

## *Conclusões*

---

Esta dissertação teve como objetivo, fazer uma análise das condições de textura, drenabilidade, atrito, deterioração superficial e resistência, verificando a aplicabilidade de uma metodologia de avaliação da aderência pneu-pavimento em pistas aeroportuárias, aplicável à realidade nacional, definindo a frequência e a localização dos levantamentos de campo.

Dessa maneira, abordou-se com detalhes os conceitos relacionados ao assunto, bem como algumas recomendações que subsidiarão a tomada de decisões relativas aos investimentos em manutenção da pista.

O plano de amostragem utilizado na pesquisa teve como foco principal as operações de pouso com destaque para os locais de maior utilização ao longo do sentido longitudinal e transversal da pista. Os pontos de maior utilização foram determinados por meio de uma Distribuição Normal onde se avaliou o efeito combinado da passagem de cada uma das rodas sobre o pavimento das principais aeronaves que operam na pista: A-320, B-737 e Fokker 100.

Este plano de amostragem foi utilizado para determinação dos parâmetros de macrotextura, microtextura e capacidade drenante para toda campanha experimental, exceto a condição superficial do pavimento (método PCI), que teve plano de amostragem conforme previsto em norma.

A coleta dos dados pelo método PCI foi realizada em curto período de tempo, pois a pista avaliada apresentou ocorrência de poucos defeitos com nível de severidade baixa, exceto na região da Cabeceira 11L, local onde se concentrava a maioria dos defeitos de superfície. Entretanto, se a condição superficial apresentasse uma densidade elevada de defeitos, com certeza o tempo necessário seria maior, o que poderia ser um obstáculo para o andamento da pesquisa, uma vez que o tempo disponível em campo foi rigorosamente controlado.

A condição superficial foi então enquadrada numa condição muito boa. Foram encontrados alguns defeitos funcionais de maneira isolada e com baixo nível de severidade, podendo ser

aplicadas medidas corretivas imediatas que evitarão maior comprometimento da pista, além dos altos custos de recuperação que poderão ocorrer no futuro.

As medições de atrito dinâmico obtidas por meio do MuMeter indicaram a necessidade de desemborrachamento com período máximo de 6 meses entre intervenções, sendo o mesmo aplicado no planejamento das manutenções realizadas pela Infraero.

Outra conclusão importante refere-se à técnica antiderrapante consagrada pelos meios aeroportuários, a execução do *grooving*. Esta por si só não garante total aumento da aderência pneu-pavimento, mas uma grande parcela que terá influência na melhoria das condições de drenagem superficial.

Entretanto, de acordo com o conjunto de conceitos, informações e dados analisados, pôde-se verificar que o constante emborrachamento da pista compromete a capacidade drenante da superfície, aumentando o potencial de ocorrência de hidroplanagem e, conseqüentemente reduzindo a segurança da pista.

Depois da retirada da borracha que comprometia o *grooving*, o comportamento das faixas analisadas nesta pesquisa teve significativa melhora nas condições de textura e drenabilidade, indicando a eficiência do jateamento d'água sob alta pressão, utilizada como processo de desemborrachamento.

Esta melhoria no comportamento da textura e drenabilidade foi comprovada por meio de análise estatística que reforçou a interpretação do comportamento das faixas analisadas, além de verificar os desvios de amostragem e nível de significância entre as combinações dos parâmetros de cada par de faixas determinado.

A combinação dos parâmetros de macrotextura e microtextura resultou no cálculo do Índice Internacional de Atrito (IFI) que foi determinado para diferentes velocidades, onde ficou comprovado que as condições de aderência pneu-pavimento (atrito) apresentaram comportamento até três vezes superior quando comparado à pista em condição emborrachada.

As correlações obtidas por meio das variáveis levantadas nesta pesquisa, forneceram resultados onde se percebe que as medidas de macrotextura, obtidos nos ensaios de Mancha de Areia e Drenabilidade, apresentam boa correlação entre si, pois determina de maneira direta ou indiretamente a profundidade média dos vazios formados pelos canais de escoamento da água.

Entretanto o mesmo não pôde ser verificado para os valores obtidos com Pêndulo Britânico, pois este fornece medidas de microtextura, relacionado à rugosidade superficial dos agregados utilizados na mistura.

Foi verificado pelo método ACN/PCN que o pavimento pode suportar, sem restrições de carga e número de operações, a aeronave com ACN inferior ao PCN calculado. Entretanto, este resultado deve ser utilizado apenas como um indicativo da capacidade estrutural da pista, sendo recomendado para tal avaliação, a utilização de métodos que consideram as relações tensão-deformação dos materiais que constituem as camadas do pavimento estudado.

Conclui-se pela literatura que os acidentes aéreos ocorrem principalmente nas manobras de decolagem e, mais ainda no pouso das aeronaves, demonstrando que o monitoramento das condições da pista (infra-estrutura), principalmente o atrito, aqui representado pela junção dos resultados de macrotextura e microtextura, é importantíssimo na manutenção das condições de segurança aeroportuária.

Finalmente, conclui-se que a metodologia utilizada durante a campanha experimental certamente poderá ser aplicada em avaliações de superfícies asfálticas aeroportuárias durante o período em que a pista estiver recebendo tratamento de desemborrachamento. Esta avaliação certamente favorecerá a obtenção de resultados com vistas a subsidiar intervenções adequadas, refletindo em um melhor desempenho quanto à segurança dos pousos e decolagens das aeronaves que operam nos aeroportos nacionais.

## 6.1 - SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para continuidade desta pesquisa, recomenda-se:

- Realização de levantamento geométrico, visando conhecer as condições planialtimétricas atuais da pista, com objetivo de verificar se são atendidas as condições de abaulamento da plataforma;
- Determinação do perfil longitudinal que pode interferir no conforto durante o passeio;
- Realização de medidas de deflexão induzidas no pavimento com aplicação de várias cargas dinâmicas, verificando a adequação da estrutura do pavimento às solicitações de tráfego atual, subsidiando possíveis dimensionamentos de reforços, caso sejam necessários;

- Extração de corpos-de-prova do revestimento com finalidade de verificação de possível polimento/desgaste dos agregados que compõe a mistura pelos tratamentos de limpeza (desemborrachamento) que a pista recebe;
- Perfuração de poços de inspeção para verificação da estrutura real da pista;
- Realização de levantamentos GPR (radares de penetração de sub-superfície) para verificar se este equipamento pode realmente fazer a identificação das camadas da estrutura com o nível de precisão requerido;
- Por fim, estudar uma nova mistura que apresente melhor desempenho quanto às condições de aderência pneu-pavimento.

# ***Referências Bibliográficas***

---

- ABPv (1996). Boletim Técnico No17. Projeto de Pavimento de Aeroportos – Método FAA-ICAO. Comissão de Aeroportos. Associação Brasileira de Pavimentação, 1996.
- ABPv (1998). Boletim Técnico No18. Informativo Técnico sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem através de Aparelhagem Portátil. Associação Brasileira de Pavimentação, 1998.
- ANAC (2005). Anuário do Transporte Aéreo 2005: Dados estatísticos. Agência Nacional de Aviação Civil – Brasil, Superintendência de Serviços Aéreos. Disponível em [www.anac.gov.br](http://www.anac.gov.br) . Acesso em agosto de 2007.
- ANDRESEN, A. WAMBOLD, J.C. (1999). Friction Fundamentals, Concepts and Methodology. Transportation Development Centre. Transport Canada, 1999.
- APS, MÁRCIA; BALBO, JOSÉ TADEU; SEVERI, ANDRÉA ARANTES, (1998) – Avaliação superficial de pavimentos asfálticos em vias urbanas utilizando o método do PCI. 31ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, São Paulo, 1998.
- APS, MÁRCIA (2006). Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – *International Friction Index* para revestimentos asfálticos. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 2006. 179p.
- ASG (2007). Aviação comercial: Porque caem os aviões. Air Safety Group. Disponível em [www.airsafetygroup.com.br](http://www.airsafetygroup.com.br) . Acesso em agosto de 2007.
- ASTM (2000). Standard Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces using the Mu-meter. Annual book of ASTM Standarts - ASTM E-670-94, Road and Paving Materials; Vehicle Pavement Systems, Volume 04.03, USA.
- ASTM (2001). Practice for calculating International Friction Index of a Pavement Surface. West Conshohocken: Annual book of ASTM Standarts - ASTM E 1960-98. 5p.
- ASTM (2003-a). Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. Annual book of ASTM Standarts - ASTM E-303-93, Road and Paving Materials; Vehicle Pavement Systems, Volume 04.03, USA, 5p.
- ASTM (2003-b). Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index Surveys. Annual book of ASTM Standarts - ASTM D 5340-04e1, Volume 04.03, USA.

- ASTM (2005). Standard Method for Measuring Pavement Texture Drainage using an Outflow Meter. Annual book of ASTM Standards - ASTM E-2380-05, Road and Paving Materials; Vehicle Pavement Systems, Volume 04.03, USA.
- ASTM (2006). Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexure Depth using a Volumetric Technique. Annual book of ASTM Standards - ASTM E-965-96, Road and Paving Materials; Vehicle Pavement Systems, Volume 04.03, USA, 5p.
- BALKWILL, K. J. (2003). Development of a Comprehensive Method for Modeling Performance of Aircraft Tires Rolling or Breaking on Dry and Precipitation-Contaminated Runways. Transportation Development Centre. Transport Canada, 2003.
- BLASTRAC (2007). Shot Blasting Systems for Asphalt. Disponível em [www.blastrac.com.br](http://www.blastrac.com.br). Acessado em fevereiro de 2007.
- BOEING (2006). Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations. 1959 – 2005. Disponível em [www.boeing.com](http://www.boeing.com) . Acessado em março de 2007.
- CARDOSO, S.H.; MARCON, A.F., APS, M.; MARCELLO, J.R. (1995) Proposta para Implantação de Centros de Análise e Controle de Acidentes (CACA) em órgãos rodoviários e vias urbanas. 29ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, Cuiabá, MT, 1995.
- CENIPA (2007). O que é considerado acidente aeronáutico. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. Disponível em [www.cenipa.aer.mil.br](http://www.cenipa.aer.mil.br). Acessado em setembro de 2007.
- COMFORT, G. (2001). Wet Runway Friction: Literature and Information Review. Transportation Development Centre. Transport Canadá, 2001.
- DAC (2001). Requisitos de Resistência à Derrapagem para Pistas de Pouso e Decolagem. Instrução de Aviação Civil – Normativa – IAC 4302. Departamento de Aviação civil - Comando da Aeronáutica, Brasil.
- DEVORE, JAY.L (2006). Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.
- DIRENG (1998). Especificações gerais para obras de infra-estrutura aeroportuárias. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica.
- DNIT (2003). Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos: PRO 006/2003. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

- DOTY, R.N. (1975). "Study of Sand Patch and Outflow Meter Methods of Pavement Surface Texture Measurement". In Surface Texture versus Skidding Measurement, Frictional Aspects and Safety Features of Tire- Pavements Interactions, ASTM STP 583, ASTM, PP. 42-61.
- FAA (1975). Field Survey and Analysis of aircraft distribution on Airport Pavements. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. Report N° FAA-RD-74-36, Washington, 1975.
- FAA (1997). Measurement Construction, and maintenance of skid-resistant airport pavement surfaces. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. Advisory Circular AC 150/5320-12C, 18/03/1997.
- FAA (2004-a). Measurement Construction, and maintenance of skid-resistant airport pavement surfaces. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. Advisory Circular AC 150/5320-12C Change 1, 16/04/2004.
- FAA (2004-b). Measurement Construction, and maintenance of skid-resistant airport pavement surfaces. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. Advisory Circular AC 150/5320-12C Change 2, 02/09/2004.
- FARIAS, M.M. & SOUZA, R.O. (2002). Irregularidade longitudinal e sua influência na avaliação de pavimentos. Anais VI Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, ENACOR. Vitória, ES. CD-ROM. pp. 1-36.
- FARIAS, M.M & VALADÃO JUNIOR, A. (2004). "Aderência Pneu-Pavimento de uma Via com Revestimento em CBUQ e Agregado Calcário". 35a Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro.
- FREITAS, E.F.; PEREIRA, P.A.A. (2001). Estudo da Evolução do desempenho de Pavimentos rodoviários flexíveis. Revista Engenharia Civil. Universidade do Minho, Portugal, 12-p.
- FRISTEDT, K; NORRBOM, B. (1980). Studies of Contaminated Runways. The Aeronautical Research Institute of Sweden. Estocolmo, 1980.
- FSF ALAR (2000). Wet or Contaminated Runways. Flight Safety Foundation. Briefing Note 8.5, August, 2000.
- GONÇALVES, F.P. (1997). Utilização de Expert Systems na Manutenção de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, ITA, São José dos Campos, SP, 214p.

- GOODYEAR AVIATION (2004). Manual: Aircraft Tire Care and Maintenance. Ohio.
- GRÄTZ, B; RIEDL, ST. (2006). Structural Maintenance of Airfields – Calculation and evaluation of the Pavement Classification Number (PCN) on the basis of Dynamic Measurements of the load carrying capacity. Second International Airports Conference: Planning, Infrastructure & Environment. São Paulo – SP, Agosto, 2006.
- HACHIYA YOSHITAKA; MIZUKAMI JUNICHI. Improving the functional quality of airport asphalt pavements. Research Report of NILIN (*National Institute for Land and Infrastructure Management*). Japão, 2006.
- HALLIDAY, RESNICK, WALKER (2006). Fundamentos da Física, Vol. I - Mecânica, 7. Edição, Editora Livros Técnicos e Científicos.
- HORNE, W. B.; DREHER, R. C. (1963). Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning. National Aeronautics and Space Administration - Langley Research Center – Langley Station. Washington. 1963.
- HORNE, W. B.; YAGER, T. J.; IVEY, D. L. (1986). Recent Studies to Investigate Effects of Tire Footprint Aspect Ratio on Dynamic Hydroplaning Speed. ASTM STP 929. Philadelphia. 1986.
- HUANG, Y.H. (1993). Pavement Analysis and Design. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 805 p.
- ICAO (1983). Design Manual Aerodrome Part 3 – Pavements. International Civil Aviation Organization. 2 ed. Washington, DC, 1983.
- ICAO (1994). International Standards and Recommended Practices: Aircraft Accident and Incident Investigation. International Civil Aviation Organization. Annex 13, 8th ed. Montreal, Canada. 1994.
- ICAO (2002). Manual de Servicios de Aeropuertos - Parte 2. Estado de la Superficie de los Pavimentos. International Civil Aviation Organization, 4 ed. 2002.
- ICAO (2004). International Standards and Recommended Practices. Aerodromes: Aerodrome Design and Operations. International Civil Aviation Organization. Annex 14, 4th ed., V. 1, Montreal, Canada. 2004.

- INFRAERO (2007). Aeroporto Internacional de Brasília - Presidente Juscelino Kubitschek. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Disponível em [www.infraero.gov.br](http://www.infraero.gov.br). Acessado em fevereiro de 2007.
- INFRAERO (2005). Movimento nos Aeroportos acumulado da Rede Infraero (Janeiro a Dezembro de 2005). Superintendência de Planejamento e Gestão. Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária. Disponível em [www.infraero.gov.br](http://www.infraero.gov.br). Acessado em agosto de 2007.
- MACEDO, M.C. (2005). Estudo para a base técnica de um Sistema de Gerência de Pavimentos para redes regionais de aeroportos. Tese de Doutorado, ITA, São José dos Campos, SP, 233p.
- MERIGHI, J.V.; PERES, R.; SILVA, G.T. (2006). Influência da Natureza da Superfície de contato na geração de aderência nos pavimentos aeroportuários. V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias, Recife-PE, V-039.
- PASQUET, A., (1968). Campagne Nationale de Glissance 1967 en France, in Colloque International sur la Glissance et la Circulation sur Routes Mouillées, Berlin, pp 717-732.
- PCASE (2005). User's Manual Version 2.08. Engineer Research and Development Center, U.S. Army Corps of Engineers. Washington, USA.
- RODRIGUES FILHO, OSWALDO SANSONE (2006). Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários – Estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2006, 263p.
- RODRIGUES FILHO, SILVIO; PESTANA, M.R.R; PAIVA, C.L.L (2006). O acúmulo de borracha na Zona de toque, o atrito e a irregularidade na segurança das operações de pouso e decolagem. 37ª Reunião Anual de Pavimentação, Goiânia-GO.
- ROEHRS, RENÉ ANTONIO (2002). Estudo de procedimentos para avaliação do PCN de pavimentos aeroportuários. Dissertação de Mestrado. ITA, São José dos Campos, SP. 219p.
- SANTOS, E.L. (2004). Análise histórica de medição de atrito das Pistas do Aeroporto Santos Dumont-RJ. Monografia de Graduação, ITA, São José dos Campos, SP, 124p.
- SHAHIN, M.Y.(1994). Pavement management for airports, roads and parking lots. Chapman & Hall, New York, 450p.

- SHAIN, M. Y, KOHN, D. S. (1979). Development of a Pavement Condition Rating Procedure for Roads, Streets and Parking Lot. CERL-TR-M-268, U.S.Army, 1979, vol. 1 e 2.
- SILVA, A. M. (1981). Atrito em Pistas Molhadas. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Rio de Janeiro. 1981.
- SPEIDEL, D.J. (2002). Airfield Rubber Removal. Federal Aviation Administration. Technology Transfer Conference. Disponível em: [www.airporttech.tc.faa.gov](http://www.airporttech.tc.faa.gov) . Acessado em novembro de 2007.
- TRANSPORT CANADA (2004). Aircraft Loading Tables: Complete Aircraft Set “A-Z”. Civil Aviation (CA). Disponível em: [www.tc.gc.ca/CivilAviation](http://www.tc.gc.ca/CivilAviation). Acesso em julho de 2007.
- TRANSPORT CANADA (2007). Pavement Structural Condition (Integrity). Civil Aviation (CA). Disponível em: [www.tc.gc.ca/CivilAviation](http://www.tc.gc.ca/CivilAviation). Acesso em julho de 2007.
- TRB - TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2002). Simple Performance Test for Superpave Mix Design. NCHRP report 465.
- VAN ES, G. W. H.; ROELEN, A. L. C.; KRUIJSEN, E. A. C.; GIESBERTS, M. K. H.(2001). Safety Aspects of Aircraft Performance on Wet and Contaminate Runways. National Aerospace Laboratory NLR. Amsterdam. 2001.
- WONG, J. Y. (2001). Mechanics of Pneumatic Tires. Disponível em: [http://media.wiley.com/product\\_data/excerpt/19/04713546/0471354619.pdf](http://media.wiley.com/product_data/excerpt/19/04713546/0471354619.pdf). Acesso em maio de 2007.

Tabela A.1. Exemplo de uma planilha de cálculo do valor de PCI

AVALIAÇÃO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL AEROPORTUÁRIO - MÉTODO PCI			Esquema:			
Divisão: ----	Seção: 01	Unidade amostrada: 01				
Data: 14/09/07	Área da Amostra: 550 m <sup>2</sup>					
<b>DEFEITOS</b>						
41. Trinca “couro de jacaré” (TJ)		50. Remendos (R)				
42. Exsudação (EX)		51. Agregado Polido (AP)				
43. Trinca tipo “bloco” (TB)		52. Desgaste/Desagregação (D)				
44. Ondulação/Corrugação (O)		53. Afundamento de Trilha de Roda (ATR)				
45. Afundamento localizado (AL)		55. Fissuras devido ao escorregamento de massa (ES)				
46. Desgaste causado por queima de Jato (DJ)		56. Expansão (EXP)				
48. Trinca Longitudinal/Transversal (TL, TT)						
49. Derramamento de óleo/contaminantes (DO)						
Tipo de Defeito	Grau de severidade	Quantidade defeitos	Dimensões	Total	Densidade (%)	Valor Deduzível
52	Médio	01	55 x 10 m	550 m <sup>2</sup>	100 %	57
53	Baixo	01	14,4 x 0,2 m	2,88 m <sup>2</sup>	0,52 %	13
48	Baixo	01	2,5 m	2,5 m	0,45 %	3
Valor Deduzível Total (VD)						73
Valor Deduzível Corrigido (VDC)						50
PCI = 100 - VDC						50
Condição da unidade amostrada						Regular

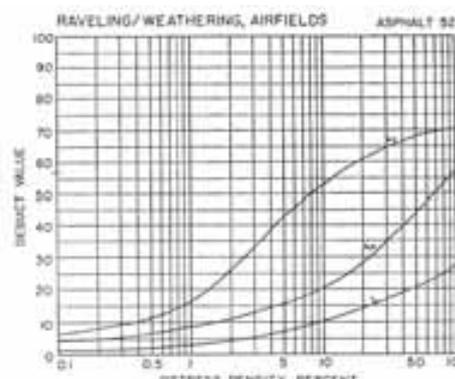
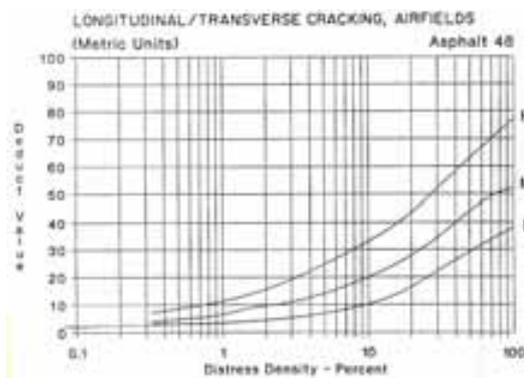


Figura A.1. Trinca longitudinal/transversal      Figura A.2. Desgaste/desagregação

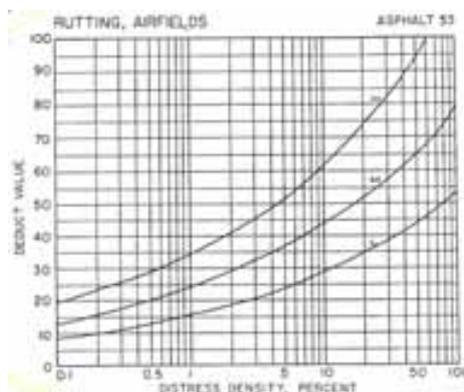


Figura A.3. Afundamento de Trilha de roda.

Tabela B.1. Densidade de Probabilidade e Probabilidade acumulada em função do afastamento do eixo da pista.  
Tráfego da pista do AIB: 40,1% A-320; 52,6% B-737; 7,3% F-100.

Desvio lateral em relação ao eixo da pista -->		-15,0	-10,0	-7,0	-6,0	-5,0	-4,0	-3,0	-2,0	-1,0	-0,5	0,0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	10,0	15,0		
AIRBUS A320	Função densidade de Probabilidade	EE	-4,19	0,0000	0,0019	0,0207	0,0317	0,0403	0,0427	0,0376	0,0275	0,0168	0,0122	0,0085	0,0056	0,0036	0,0013	0,0004	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
		ED	-3,41	0,0000	0,0008	0,0131	0,0231	0,0339	0,0415	0,0421	0,0356	0,0251	0,0196	0,0147	0,0105	0,0071	0,0029	0,0010	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	
		DE	3,41	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0010	0,0029	0,0071	0,0105	0,0147	0,0196	0,0251	0,0356	0,0421	0,0415	0,0339	0,0231	0,0131	0,0008	0,0000
		DD	4,19	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0004	0,0013	0,0036	0,0056	0,0085	0,0122	0,0168	0,0275	0,0376	0,0427	0,0403	0,0317	0,0207	0,0019	0,0000
		Soma		0,0000	0,0027	0,0337	0,0547	0,0743	0,0845	0,0811	0,0673	0,0526	0,0480	0,0463	0,0480	0,0526	0,0673	0,0811	0,0845	0,0743	0,0547	0,0337	0,0207	0,0019
	Probabilidade Acumulada	EE	-4,19	0,0000	0,0016	0,0285	0,0547	0,0910	0,1331	0,1738	0,2066	0,2286	0,2358	0,2410	0,2445	0,2468	0,2490	0,2497	0,2499	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500
		ED	-3,41	0,0000	0,0006	0,0154	0,0333	0,0619	0,1000	0,1425	0,1819	0,2124	0,2235	0,2321	0,2383	0,2427	0,2475	0,2493	0,2498	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500
		DE	3,41	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0007	0,0025	0,0073	0,0117	0,0179	0,0265	0,0376	0,0681	0,1075	0,1500	0,1881	0,2167	0,0337	0,0027	0,0000
		DD	4,19	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0010	0,0032	0,0055	0,0090	0,0142	0,0214	0,0434	0,0762	0,1169	0,1590	0,1953	0,2215	0,2484	0,2500
		Soma		0,0000	0,0022	0,0439	0,0880	0,1529	0,2334	0,3173	0,3920	0,4515	0,4766	0,5000	0,5234	0,5485	0,6080	0,6827	0,7666	0,8471	0,9120	0,9561	0,9978	1,0000
BOEING 737	Função densidade de Probabilidade	EE	-3,29	0,0000	0,0007	0,0120	0,0218	0,0327	0,0409	0,0425	0,0367	0,0264	0,0209	0,0158	0,0114	0,0079	0,0033	0,0011	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	
		ED	-2,43	0,0000	0,0002	0,0063	0,0132	0,0233	0,0341	0,0415	0,0421	0,0355	0,0304	0,0248	0,0194	0,0145	0,0070	0,0028	0,0010	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000	
		DE	2,43	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0010	0,0028	0,0070	0,0145	0,0194	0,0248	0,0304	0,0355	0,0421	0,0415	0,0341	0,0233	0,0132	0,0063	0,0002	0,0000
		DD	3,29	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0011	0,0033	0,0079	0,0114	0,0158	0,0209	0,0264	0,0367	0,0425	0,0409	0,0327	0,0218	0,0120	0,0007	0,0000
		Soma		0,0000	0,0009	0,0183	0,0351	0,0563	0,0762	0,0880	0,0891	0,0842	0,0821	0,0813	0,0821	0,0842	0,0891	0,0880	0,0762	0,0563	0,0351	0,0183	0,0009	0,0000
	Probabilidade Acumulada	EE	-3,29	0,0000	0,0005	0,0139	0,0306	0,0579	0,0951	0,1374	0,1775	0,2093	0,2211	0,2303	0,2370	0,2418	0,2471	0,2491	0,2498	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500
		ED	-2,43	0,0000	0,0001	0,0062	0,0157	0,0338	0,0626	0,1008	0,1433	0,1826	0,1991	0,2129	0,2239	0,2324	0,2428	0,2475	0,2493	0,2498	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500
		DE	2,43	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0007	0,0025	0,0072	0,0176	0,0261	0,0371	0,0509	0,0674	0,1067	0,1492	0,1874	0,2162	0,2343	0,2438	0,2499	0,2500
		DD	3,29	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0009	0,0029	0,0082	0,0130	0,0197	0,0289	0,0407	0,0725	0,1126	0,1549	0,1921	0,2194	0,2361	0,2495	0,2500
		Soma		0,0000	0,0006	0,0202	0,0463	0,0919	0,1586	0,2416	0,3309	0,4177	0,4592	0,5000	0,5408	0,5823	0,6691	0,7584	0,8414	0,9081	0,9537	0,9798	0,9994	1,0000
FOKKER 100	Função densidade de Probabilidade	EE	-2,81	0,0000	0,0007	0,0120	0,0218	0,0327	0,0409	0,0425	0,0367	0,0264	0,0209	0,0158	0,0114	0,0079	0,0033	0,0011	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	
		ED	-2,23	0,0000	0,0002	0,0063	0,0132	0,0233	0,0341	0,0415	0,0421	0,0355	0,0304	0,0248	0,0194	0,0145	0,0070	0,0028	0,0010	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000	
		DE	2,23	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0010	0,0028	0,0070	0,0145	0,0194	0,0248	0,0304	0,0355	0,0421	0,0415	0,0341	0,0233	0,0132	0,0063	0,0002	0,0000
		DD	2,81	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0011	0,0033	0,0079	0,0114	0,0158	0,0209	0,0264	0,0367	0,0425	0,0409	0,0327	0,0218	0,0120	0,0007	0,0000
		Soma		0,0000	0,0009	0,0183	0,0351	0,0563	0,0762	0,0880	0,0891	0,0842	0,0821	0,0813	0,0821	0,0842	0,0891	0,0880	0,0762	0,0563	0,0351	0,0183	0,0009	0,0000
	Probabilidade Acumulada	EE	-2,81	0,0000	0,0003	0,0090	0,0214	0,0434	0,0762	0,1169	0,1590	0,1953	0,2098	0,2215	0,2306	0,2372	0,2451	0,2484	0,2496	0,2499	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500
		ED	-2,23	0,0000	0,0001	0,0051	0,0132	0,0293	0,0559	0,0926	0,1348	0,1753	0,1928	0,2077	0,2198	0,2293	0,2413	0,2469	0,2491	0,2498	0,2499	0,2500	0,2500	0,2500
		DE	2,23	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0002	0,0009	0,0031	0,0087	0,0207	0,0302	0,0423	0,0572	0,0747	0,1152	0,1574	0,1941	0,2207	0,2368	0,2449	0,2499	0,2500
		DD	2,81	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0004	0,0016	0,0049	0,0128	0,0194	0,0285	0,0402	0,0547	0,0910	0,1331	0,1738	0,2066	0,2286	0,2410	0,2497	0,2500
		Soma		0,0000	0,0004	0,0141	0,0346	0,0731	0,1335	0,2142	0,3074	0,4041	0,4522	0,5000	0,5478	0,5959	0,6926	0,7858	0,8665	0,9269	0,9654	0,9859	0,9996	1,0000
Efeito Combinado	Função densidade de Probabilidade	A320	0,0000	0,0011	0,0135	0,0220	0,0298	0,0339	0,0325	0,0270	0,0211	0,0192	0,0186	0,0192	0,0211	0,0270	0,0325	0,0339	0,0298	0,0220	0,0135	0,0011	0,0000	
		B-737	0,0000	0,0005	0,0096	0,0184	0,0296	0,0401	0,0463	0,0469	0,0443	0,0432	0,0428	0,0432	0,0443	0,0469	0,0463	0,0401	0,0296	0,0184	0,0096	0,0005	0,0000	
		F100	0,0000	0,0001	0,0013	0,0026	0,0041	0,0056	0,0064	0,0065	0,0061	0,0060	0,0059	0,0059	0,0060	0,0061	0,0065	0,0064	0,0056	0,0041	0,0026	0,0013	0,0001	
		Soma	0,0000	0,0016	0,0245	0,0430	0,0635	0,0795	0,0852	0,0803	0,0715	0,0684	0,0673	0,0673	0,0684	0,0715	0,0803	0,0852	0,0795	0,0635	0,0430	0,0245	0,0016	0,0000
	Probabilidade Acumulada	A320	0,0000	0,0009	0,0176	0,0353	0,0613	0,0936	0,1272	0,1572	0,1811	0,1911	0,2005	0,2099	0,2199	0,2438	0,2738	0,3074	0,3397	0,3657	0,3834	0,4001	0,4010	
		B-737	0,0000	0,0000	0,0010	0,0025	0,0053	0,0097	0,0156	0,0224	0,0295	0,0330	0,0365	0,0400	0,0435	0,0506	0,0574	0,0633	0,0677	0,0705	0,0720	0,0730	0,0730	
		F100	0,0000	0,0003	0,0106	0,0244	0,0483	0,0834	0,1271	0,1740	0,2197	0,2415	0,2630	0,2845	0,3063	0,3520	0,3989	0,4426	0,4777	0,5016	0,5154	0,5257	0,5260	
		Soma	0,0000	0,0012	0,0292	0,0622	0,1150	0,1867	0,2699	0,3537	0,4303	0,4657	0,5000	0,5343	0,5697	0,6463	0,7301	0,8133	0,8850	0,9378	0,9708	0,9988	1,0000	

INCIDENCIA MÉDIA (passagens/m/pouso)	Entre -0,5 e 0,5 m -->	0,068	Entre -0,5 e 0,5 m -->	0,068
	Entre -0,5 e -3 m -->	0,076	Entre 0,5 e 3 m -->	0,076
	Entre -3 e -5 m -->	0,076	Entre 3 e 5 m -->	0,076
	Entre -5 e -15 m -->	0,027	Entre 5 e 15 m -->	0,027

Legenda: io eixo da pista, valores negativos à esquerda, positivos à direita  
 EE: Trem esquerdo, roda esquerda      ED: Trem esquerdo, roda direita  
 DE: Trem direito, roda esquerda      DD: Trem direito, roda direita

Função densidade de probabilidade : valor da função densidade de probabilidade da Distribuição Normal para Média = ao afastamento da roda ao eixo da aeronave e Desvio Padrão = 2,33 m  
 Probabilidade acumulada : probabilidade acumulada da passagem de uma roda a partir de um afastamento de 15 m à esquerda do eixo da pista

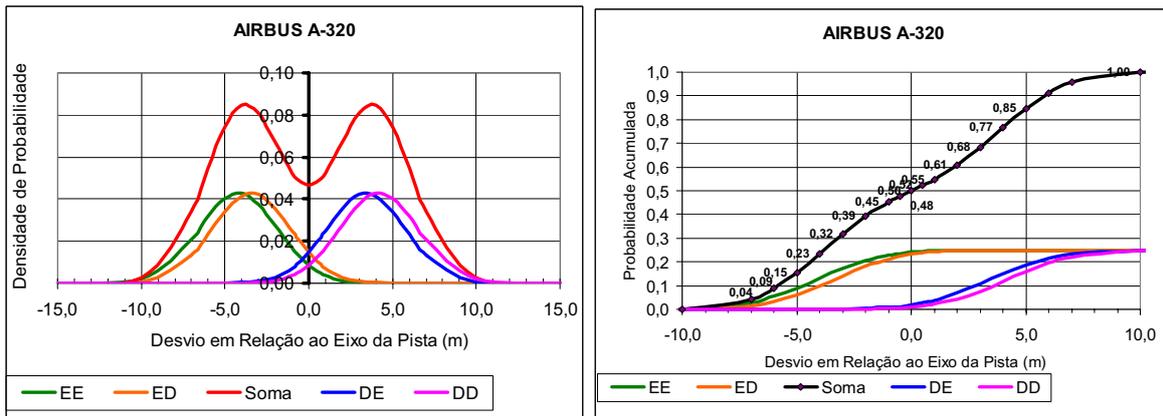


Figura B.1. (a) Função densidade de Probabilidade A-320; (b) Probabilidade acumulada A-320.

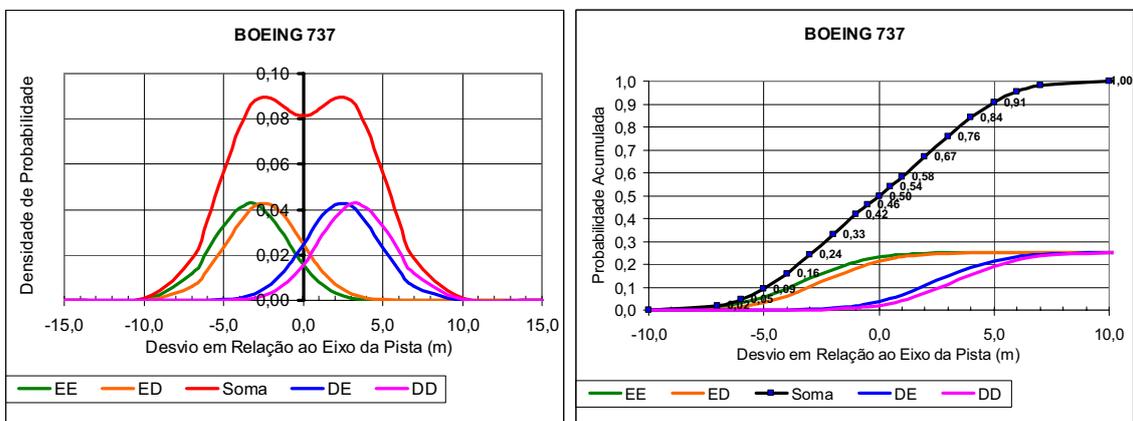


Figura B.2. (a) Função densidade de Probabilidade Boeing 737; (b) Probabilidade acumulada Boeing 737.

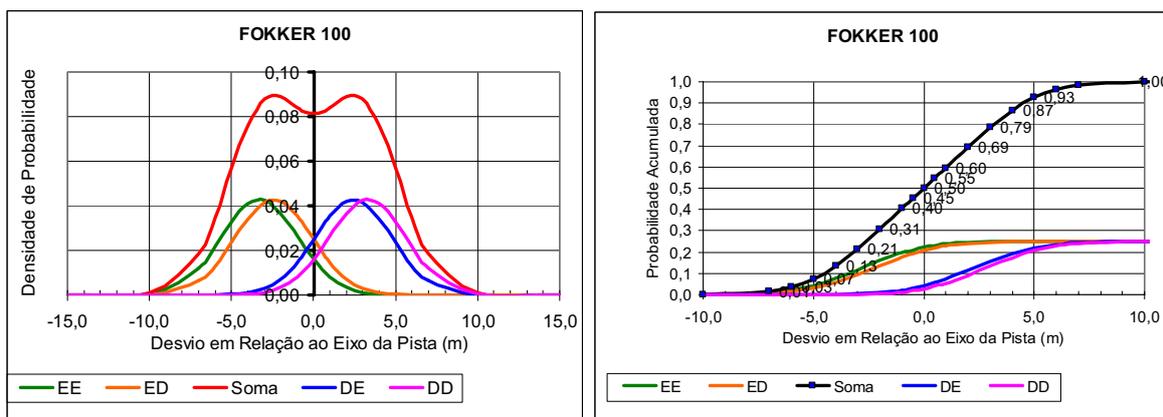


Figura B.3. (a) Função densidade de Probabilidade Fokker 100; (b) Probabilidade acumulada Fokker 100.

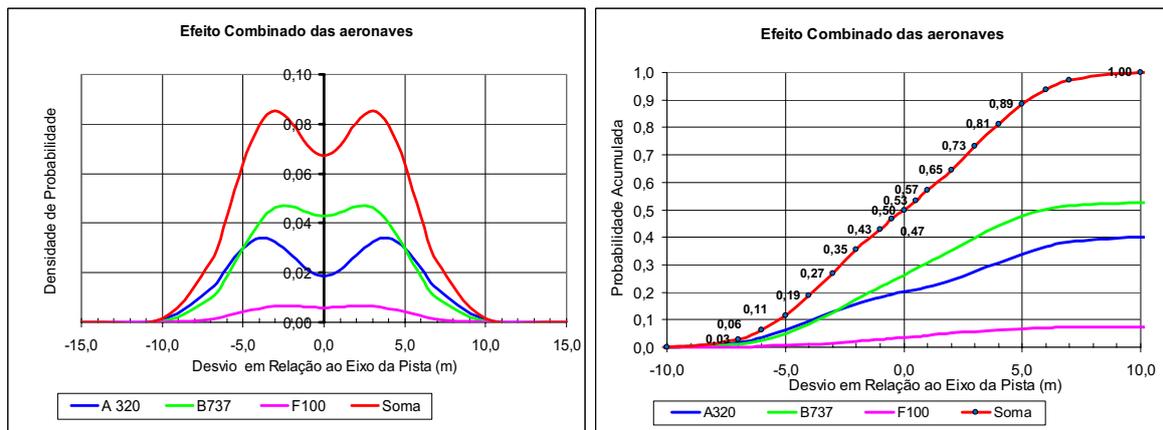


Figura B.4. (a) Função densidade de Probabilidade: Efeito combinado; (b) Probabilidade acumulada: Efeito combinado.

Tabela C.1. Resumo dos resultados de atrito obtidos com Pêndulo Britânico.

Faixa	Local	Ponto	Média local (BPN) - ANTES	Classificação Antes	Média local (BPN) - DEPOIS	Classificação Depois
Faixa A	Zona de toque	A 1	53,00	Medianamente Rugosa	104,6	Muito Rugosa
		A2	47,60	Medianamente Rugosa	104,2	Muito Rugosa
		A3	68,60	Rugosa	106,2	Muito Rugosa
		A4	56,40	Rugosa	106,4	Muito Rugosa
		A5	70,80	Rugosa	105,2	Muito Rugosa
		A6	53,60	Medianamente Rugosa	105,2	Muito Rugosa
	Zona Intermediária	A7	43,00	Insuficientemente Rugosa	104,4	Muito Rugosa
		A8	41,00	Insuficientemente Rugosa	104,4	Muito Rugosa
		A9	65,00	Rugosa	103,2	Muito Rugosa
		A10	57,20	Rugosa	103,2	Muito Rugosa
		A11	71,80	Rugosa	105,2	Muito Rugosa
		A12	49,80	Medianamente Rugosa	107	Muito Rugosa
		A13	53,40	Medianamente Rugosa	105,8	Muito Rugosa
Faixa BE	Zona de toque	BE 1	59,00	Rugosa	107,6	Muito Rugosa
		BE 2	51,00	Medianamente Rugosa	107,4	Muito Rugosa
		BE 3	57,00	Rugosa	105,4	Muito Rugosa
		BE 4	56,00	Rugosa	106,8	Muito Rugosa
		BE 5	56,80	Rugosa	106,4	Muito Rugosa
		BE 6	49,00	Medianamente Rugosa	105,6	Muito Rugosa
	Zona Intermediária	BE 7	58,20	Rugosa	106	Muito Rugosa
		BE 8	52,20	Medianamente Rugosa	105	Muito Rugosa
		BE 9	58,00	Rugosa	106,4	Muito Rugosa
		BE 10	53,00	Medianamente Rugosa	104,8	Muito Rugosa
		BE 11	52,00	Medianamente Rugosa	107,2	Muito Rugosa
		BE 12	43,00	Insuficientemente Rugosa	105,2	Muito Rugosa
		BE 13	53,00	Medianamente Rugosa	106,4	Muito Rugosa
Faixa CE	Zona de toque	CE 1	72,40	Rugosa	105,6	Muito Rugosa
		CE 2	73,20	Rugosa	104	Muito Rugosa
		CE 3	73,40	Rugosa	103,6	Muito Rugosa
		CE 4	79,40	Muito Rugosa	106	Muito Rugosa
		CE 5	71,60	Rugosa	106	Muito Rugosa
		CE 6	79,20	Muito Rugosa	105,4	Muito Rugosa
	Zona Intermediária	CE 7	72,00	Rugosa	105	Muito Rugosa
		CE 8	66,00	Rugosa	106,4	Muito Rugosa
		CE 9	78,00	Muito Rugosa	104,6	Muito Rugosa
		CE 10	79,00	Muito Rugosa	105,2	Muito Rugosa
		CE 11	73,00	Rugosa	106	Muito Rugosa
		CE 12	72,40	Rugosa	106,2	Muito Rugosa
		CE 13	77,40	Muito Rugosa	104,8	Muito Rugosa
Faixa BD	Zona de toque	BD 1	57,00	Rugosa	105,8	Muito Rugosa
		BD 2	51,00	Medianamente Rugosa	105	Muito Rugosa
		BD 3	43,00	Insuficientemente Rugosa	105,8	Muito Rugosa
		BD 4	47,40	Medianamente Rugosa	106,4	Muito Rugosa
		BD 5	56,80	Rugosa	106,8	Muito Rugosa
		BD 6	57,40	Rugosa	106	Muito Rugosa
	Zona Intermediária	BD 7	49,40	Medianamente Rugosa	106,6	Muito Rugosa
		BD 8	45,00	Insuficientemente Rugosa	107,2	Muito Rugosa
		BD 9	56,20	Rugosa	106,6	Muito Rugosa
		BD 10	43,00	Insuficientemente Rugosa	104	Muito Rugosa
		BD 11	48,20	Medianamente Rugosa	107,8	Muito Rugosa
		BD 12	57,00	Rugosa	105,8	Muito Rugosa
		BD 13	58,60	Rugosa	105	Muito Rugosa
Faixa CD	Zona de toque	CD 1	66,40	Rugosa	106,4	Muito Rugosa
		CD 2	74,40	Rugosa	105	Muito Rugosa
		CD 3	72,20	Rugosa	105	Muito Rugosa
		CD 4	72,00	Rugosa	106,2	Muito Rugosa
		CD 5	81,80	Muito Rugosa	105,4	Muito Rugosa
		CD 6	70,20	Rugosa	106	Muito Rugosa
	Zona Intermediária	CD 7	70,00	Rugosa	104,6	Muito Rugosa
		CD 8	75,20	Muito Rugosa	105	Muito Rugosa
		CD 9	72,00	Rugosa	104,6	Muito Rugosa
		CD 10	71,40	Rugosa	106,2	Muito Rugosa
		CD 11	81,20	Muito Rugosa	105	Muito Rugosa
		CD 12	74,00	Rugosa	104,4	Muito Rugosa
		CD 13	67,00	Rugosa	106	Muito Rugosa

Tabela C.2. Resumo dos resultados da macrotextura obtidos com Mancha de areia.

Faixa	Local	Ponto	Altura média da Rugosidade (mm) HS - ANTES	Classificação ANTES (Aps, 2006)	Altura média da Rugosidade (mm) HS - DEPOIS	Classificação DEPOIS (Aps, 2006)
Faixa A	Zona de toque	A 1	0,69	Média	1,33	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 2	0,76	Média	1,32	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 3	0,65	Média	1,33	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 4	0,67	Média	1,37	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 5	0,75	Média	1,34	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 6	0,77	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
	Zona Intermediária	A 7	0,67	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 8	0,56	Medianamente Fina	1,40	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 9	0,62	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 10	0,76	Média	1,38	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 11	0,57	Medianamente Fina	1,34	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 12	0,62	Média	1,33	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		A 13	0,62	Média	1,33	Muito Grosseira ou Muito Aberta
Faixa BE	Zona de toque	BE 1	0,76	Média	1,32	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 2	0,67	Média	1,26	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 3	0,63	Média	1,33	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 4	0,69	Média	1,33	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 5	0,72	Média	1,26	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 6	0,74	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
	Zona Intermediária	BE 7	0,76	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 8	0,75	Média	1,33	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 9	0,71	Média	1,32	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 10	0,75	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 11	0,76	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 12	0,75	Média	1,34	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BE 13	0,76	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
Faixa CE	Zona de toque	CE 1	0,94	Medianamente Grossa	1,43	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 2	0,82	Medianamente Grossa	1,40	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 3	1,15	Grosseira ou Aberta	1,42	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 4	0,89	Medianamente Grossa	1,40	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 5	0,79	Média	1,45	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 6	0,82	Medianamente Grossa	1,43	Muito Grosseira ou Muito Aberta
	Zona Intermediária	CE 7	0,82	Medianamente Grossa	1,41	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 8	0,89	Medianamente Grossa	1,44	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 9	1,06	Grosseira ou Aberta	1,46	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 10	1,15	Grosseira ou Aberta	1,40	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 11	0,88	Medianamente Grossa	1,45	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 12	0,79	Média	1,45	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CE 13	0,79	Média	1,41	Muito Grosseira ou Muito Aberta
Faixa BD	Zona de toque	BD 1	0,59	Medianamente Fina	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 2	0,72	Média	1,32	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 3	0,76	Média	1,32	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 4	0,67	Média	1,35	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 5	0,60	Média	1,26	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 6	0,58	Medianamente Fina	1,32	Muito Grosseira ou Muito Aberta
	Zona Intermediária	BD 7	0,72	Média	1,36	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 8	0,75	Média	1,33	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 9	0,63	Média	1,26	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 10	0,66	Média	1,32	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 11	0,74	Média	1,37	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 12	0,76	Média	1,36	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		BD 13	0,75	Média	1,25	Muito Grosseira ou Muito Aberta
Faixa CD	Zona de toque	CD 1	0,87	Medianamente Grossa	1,44	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 2	0,82	Medianamente Grossa	1,42	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 3	1,03	Grosseira ou Aberta	1,37	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 4	0,91	Medianamente Grossa	1,45	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 5	0,99	Medianamente Grossa	1,46	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 6	0,83	Medianamente Grossa	1,40	Muito Grosseira ou Muito Aberta
	Zona Intermediária	CD 7	1,00	Medianamente Grossa	1,43	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 8	0,95	Medianamente Grossa	1,46	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 9	0,92	Medianamente Grossa	1,42	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 10	1,06	Grosseira ou Aberta	1,42	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 11	1,03	Grosseira ou Aberta	1,48	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 12	0,86	Medianamente Grossa	1,44	Muito Grosseira ou Muito Aberta
		CD 13	0,84	Medianamente Grossa	1,40	Muito Grosseira ou Muito Aberta

Tabela C.3. Resumo dos resultados de drenabilidade obtidos com Drenômetro.

Faixa	Local	Ponto	Vazão (l/s) - ANTES	Vazão (l/s) - DEPOIS
Faixa A	Zona de toque	A 1	0,088	0,134
		A2	0,076	0,136
		A3	0,071	0,134
		A4	0,077	0,152
		A5	0,086	0,136
		A6	0,077	0,136
	Zona Intermediária	A7	0,086	0,134
		A8	0,072	0,148
		A9	0,070	0,135
		A10	0,086	0,155
		A11	0,092	0,141
		A12	0,072	0,138
		A13	0,078	0,135
Faixa BE	Zona de toque	BE 1	0,079	0,135
		BE 2	0,077	0,130
		BE 3	0,114	0,135
		BE 4	0,064	0,133
		BE 5	0,069	0,128
		BE 6	0,077	0,137
	Zona Intermediária	BE 7	0,079	0,138
		BE 8	0,070	0,140
		BE 9	0,065	0,138
		BE 10	0,079	0,138
		BE 11	0,078	0,138
		BE 12	0,078	0,132
		BE 13	0,070	0,140
Faixa CE	Zona de toque	CE 1	0,087	0,156
		CE 2	0,097	0,173
		CE 3	0,100	0,171
		CE 4	0,114	0,151
		CE 5	0,110	0,168
		CE 6	0,086	0,155
	Zona Intermediária	CE 7	0,094	0,153
		CE 8	0,114	0,162
		CE 9	0,098	0,171
		CE 10	0,114	0,153
		CE 11	0,118	0,161
		CE 12	0,135	0,154
		CE 13	0,114	0,152
Faixa BD	Zona de toque	BD 1	0,077	0,143
		BD 2	0,070	0,138
		BD 3	0,084	0,136
		BD 4	0,078	0,139
		BD 5	0,070	0,124
		BD 6	0,063	0,135
	Zona Intermediária	BD 7	0,080	0,161
		BD 8	0,068	0,140
		BD 9	0,077	0,114
		BD 10	0,068	0,136
		BD 11	0,077	0,150
		BD 12	0,086	0,151
		BD 13	0,069	0,108
Faixa CD	Zona de toque	CD 1	0,115	0,166
		CD 2	0,130	0,156
		CD 3	0,100	0,165
		CD 4	0,117	0,166
		CD 5	0,097	0,167
		CD 6	0,101	0,157
	Zona Intermediária	CD 7	0,111	0,167
		CD 8	0,116	0,160
		CD 9	0,114	0,164
		CD 10	0,125	0,154
		CD 11	0,135	0,157
		CD 12	0,117	0,163
		CD 13	0,132	0,150

Tabela C.4. Resumo dos resultados de atrito – IFI (F<sub>60</sub>).

Índice de Atrito Internacional (IFI) – ANTES							Índice de Atrito Internacional (IFI) – APÓS					
Ponto	Altura da Rugosidade (mm)	BPN médio	Sp	FR 60	F 60	Classificação (Aps, 2006)	Altura da Rugosidade (mm)	BPN médio	Sp	FR 60	F 60	Classificação (Aps, 2006)
A 1	0,69	53	66,29	24,93	0,26	Muito Bom	1,33	104,6	139,75	73,14	0,64	Ótimo
A 2	0,76	47,6	74,70	24,37	0,25	Muito Bom	1,32	104,2	137,99	72,53	0,64	Ótimo
A 3	0,65	68,6	62,35	30,76	0,30	Muito Bom	1,33	106,2	139,75	74,26	0,65	Ótimo
A 4	0,67	56,4	64,68	26,03	0,26	Muito Bom	1,37	106,4	143,83	75,16	0,66	Ótimo
A 5	0,75	70,8	73,76	35,94	0,34	Muito Bom	1,34	105,2	140,20	73,64	0,65	Ótimo
A 6	0,77	53,6	75,67	27,68	0,28	Muito Bom	1,35	105,2	141,55	73,89	0,65	Ótimo
A 7	0,67	43	64,68	19,85	0,21	Bom	1,35	104,4	141,55	73,33	0,64	Ótimo
A 8	0,56	41	51,56	15,55	0,18	Bom	1,40	104,4	147,36	74,36	0,65	Ótimo
A 9	0,62	65	59,05	27,87	0,28	Muito Bom	1,35	103,2	142,00	72,57	0,64	Ótimo
A 10	0,76	57,2	74,70	29,29	0,29	Muito Bom	1,38	103,2	144,99	73,10	0,64	Ótimo
A 11	0,57	71,8	53,58	28,24	0,28	Muito Bom	1,34	105,2	141,10	73,81	0,65	Ótimo
A 12	0,62	49,8	59,05	21,35	0,23	Muito Bom	1,33	107	139,75	74,82	0,65	Ótimo
A 13	0,62	53,4	58,70	22,78	0,24	Muito Bom	1,33	105,8	139,31	73,89	0,65	Ótimo
BE 1	0,76	59	74,70	30,21	0,30	Muito Bom	1,32	107,6	138,21	74,94	0,66	Ótimo
BE 2	0,67	51	65,07	23,65	0,25	Muito Bom	1,26	107,4	131,86	73,51	0,64	Ótimo
BE 3	0,63	57	60,34	24,89	0,26	Muito Bom	1,33	105,4	139,31	73,62	0,64	Ótimo
BE 4	0,69	56	66,70	26,46	0,27	Muito Bom	1,33	106,8	139,31	74,59	0,65	Ótimo
BE 5	0,72	56,8	70,56	27,96	0,28	Muito Bom	1,26	106,4	131,86	72,82	0,64	Ótimo
BE 6	0,74	49	72,92	24,68	0,25	Muito Bom	1,35	105,6	141,55	74,17	0,65	Ótimo
BE 7	0,76	58,2	75,18	29,93	0,30	Muito Bom	1,35	106	142,00	74,54	0,65	Ótimo
BE 8	0,75	52,2	73,29	26,39	0,27	Muito Bom	1,33	105	139,98	73,46	0,64	Ótimo
BE 9	0,71	58	69,24	28,17	0,28	Muito Bom	1,32	106,4	138,21	74,10	0,65	Ótimo
BE 10	0,75	53	73,29	26,79	0,27	Muito Bom	1,35	104,8	141,55	73,61	0,64	Ótimo
BE 11	0,76	52	74,23	26,51	0,27	Muito Bom	1,35	107,2	141,55	75,30	0,66	Ótimo
BE 12	0,75	43	73,76	21,83	0,23	Muito Bom	1,34	105,2	140,20	73,64	0,65	Ótimo
BE 13	0,76	53	75,18	27,26	0,27	Muito Bom	1,35	106,4	142,23	74,86	0,65	Ótimo
CE 1	0,94	72,4	94,88	42,74	0,40	Ótimo	1,43	105,6	151,00	75,83	0,66	Ótimo
CE 2	0,82	73,2	81,27	39,57	0,37	Ótimo	1,40	104	147,60	74,12	0,65	Ótimo
CE 3	1,15	73,4	118,52	48,14	0,44	Ótimo	1,42	103,6	149,78	74,20	0,65	Ótimo
CE 4	0,89	79,4	89,22	45,34	0,42	Ótimo	1,40	106	147,36	75,50	0,66	Ótimo
CE 5	0,79	71,6	78,56	37,89	0,36	Ótimo	1,45	106	153,51	76,53	0,67	Ótimo
CE 6	0,82	79,2	81,81	42,98	0,40	Ótimo	1,43	105,4	150,51	75,61	0,66	Ótimo
CE 7	0,82	72	81,27	38,92	0,37	Ótimo	1,41	105	148,56	74,99	0,66	Ótimo
CE 8	0,89	66	89,22	37,68	0,36	Ótimo	1,44	106,4	151,50	76,49	0,67	Ótimo
CE 9	1,06	78	108,52	49,20	0,45	Ótimo	1,46	104,6	154,78	75,72	0,66	Ótimo
CE 10	1,15	79	118,52	51,81	0,47	Ótimo	1,40	105,2	147,84	75,01	0,66	Ótimo
CE 11	0,88	73	88,62	41,52	0,39	Ótimo	1,45	106	152,75	76,41	0,67	Ótimo
CE 12	0,79	72,4	78,15	38,18	0,36	Ótimo	1,45	106,2	153,25	76,64	0,67	Ótimo
CE 13	0,79	77,4	77,65	40,65	0,38	Ótimo	1,41	104,8	148,56	74,85	0,65	Ótimo
BD 1	0,59	57	55,31	23,08	0,24	Muito Bom	1,35	105,8	141,55	74,31	0,65	Ótimo
BD 2	0,72	51	69,68	24,88	0,26	Muito Bom	1,32	105	138,87	73,25	0,64	Ótimo
BD 3	0,76	43	75,18	22,11	0,23	Muito Bom	1,32	105,8	138,21	73,68	0,65	Ótimo
BD 4	0,67	47,4	64,36	21,80	0,23	Muito Bom	1,35	106,4	141,55	74,74	0,65	Ótimo
BD 5	0,60	56,8	56,97	23,62	0,24	Muito Bom	1,26	106,8	131,86	73,10	0,64	Ótimo
BD 6	0,58	57,4	54,08	22,77	0,24	Muito Bom	1,32	106	138,87	73,95	0,65	Ótimo
BD 7	0,72	49,4	70,29	24,25	0,25	Muito Bom	1,36	106,6	142,68	75,09	0,66	Ótimo
BD 8	0,75	45	73,29	22,75	0,24	Muito Bom	1,33	107,2	139,31	74,87	0,65	Ótimo
BD 9	0,63	56,2	60,12	24,47	0,25	Muito Bom	1,26	106,6	131,45	72,87	0,64	Ótimo
BD 10	0,66	43	63,11	19,47	0,21	Bom	1,32	104	138,21	72,43	0,64	Ótimo
BD 11	0,74	48,2	72,36	24,15	0,25	Muito Bom	1,37	107,8	143,83	76,15	0,67	Ótimo
BD 12	0,76	57	74,70	29,19	0,29	Muito Bom	1,36	105,8	142,68	74,52	0,65	Ótimo
BD 13	0,75	58,6	73,76	29,75	0,29	Muito Bom	1,25	105	130,44	71,57	0,63	Ótimo
CD 1	0,87	66,4	87,08	37,39	0,36	Ótimo	1,44	106,4	152,25	76,62	0,67	Ótimo
CD 2	0,82	74,4	81,59	40,31	0,38	Ótimo	1,42	105	150,27	75,28	0,66	Ótimo
CD 3	1,03	72,2	104,98	44,84	0,41	Ótimo	1,37	105	144,06	74,21	0,65	Ótimo
CD 4	0,91	72	91,31	41,64	0,39	Ótimo	1,45	106,2	152,75	76,55	0,67	Ótimo
CD 5	0,99	81,8	100,32	49,69	0,45	Ótimo	1,46	105,4	154,01	76,18	0,67	Ótimo
CD 6	0,83	70,2	82,57	38,31	0,36	Ótimo	1,40	106	146,88	75,42	0,66	Ótimo
CD 7	1,00	70	101,75	42,82	0,40	Ótimo	1,43	104,6	151,00	75,12	0,66	Ótimo
CD 8	0,95	75,2	96,88	44,88	0,42	Ótimo	1,46	105	154,78	76,01	0,66	Ótimo
CD 9	0,92	72	92,94	42,04	0,39	Ótimo	1,42	104,6	149,78	74,91	0,66	Ótimo
CD 10	1,06	71,4	108,52	45,04	0,42	Ótimo	1,42	106,2	149,53	76,02	0,66	Ótimo
CD 11	1,03	81,2	104,98	50,43	0,46	Ótimo	1,48	105	156,07	76,22	0,67	Ótimo
CD 12	0,86	74	86,27	41,45	0,39	Ótimo	1,44	104,4	152,25	75,18	0,66	Ótimo
CD 13	0,84	67	83,44	36,80	0,35	Ótimo	1,40	106	147,84	75,58	0,66	Ótimo

Figura D.1. Relatório do MuMeter na pista do AIB – antes do desemborramento, corrida a 3m lado direito e esquerdo do eixo da pista (19/07/2007).

## MuMeter Run Report

Calibration Results		
Zero Reference	19/7/2007 14:55:02	-252
Distance		406
Board Test	2/10/2006 15:13:35	7021

Average Mu	1/3	2/3	3/3	Total
11-29	0,54	0,52	0,56	0,54
29-11	0,56	0,54	0,56	0,55
Dual Run Avg.	0,55	0,53	0,56	0,55

Run Start:	19/7/2007 15:00:40	
Auto. End Distance	Ativado	
Distance Travelled	2800	metros
Average Speed	64,8	km/h

Weather Condition	Ensolarado
Air Temperature	27
Operator Notes	

Location	Event Note
m	
m	
m	



Figura D.2. Relatório do MuMeter na pista do AIB – 4 meses após desemborrachamento, corrida a 3 m lado direito (11/12/2008).

# MuMeter Run Report

## PJK AIRPORT RUNWAY 11-29

Calibration Results		
Zero Reference	11/1/2008 14:37:00	-258
Distance		406
Board Test	2/10/2006 15:13:35	7021

Average Mu	1/3	2/3	3/3	Total
11-29	0,52	0,55	0,6	0,56

Run Start:	11/1/2008 14:41:45	
Auto. End Distance	Ativado	
Distance Travelled	2900	metros
Average Speed	64,6	km/h

Weather Condition	Bom
Air Temperature	29
Operator Notes	Lado direito do eixo central

Location	Event Note
m	
m	
m	

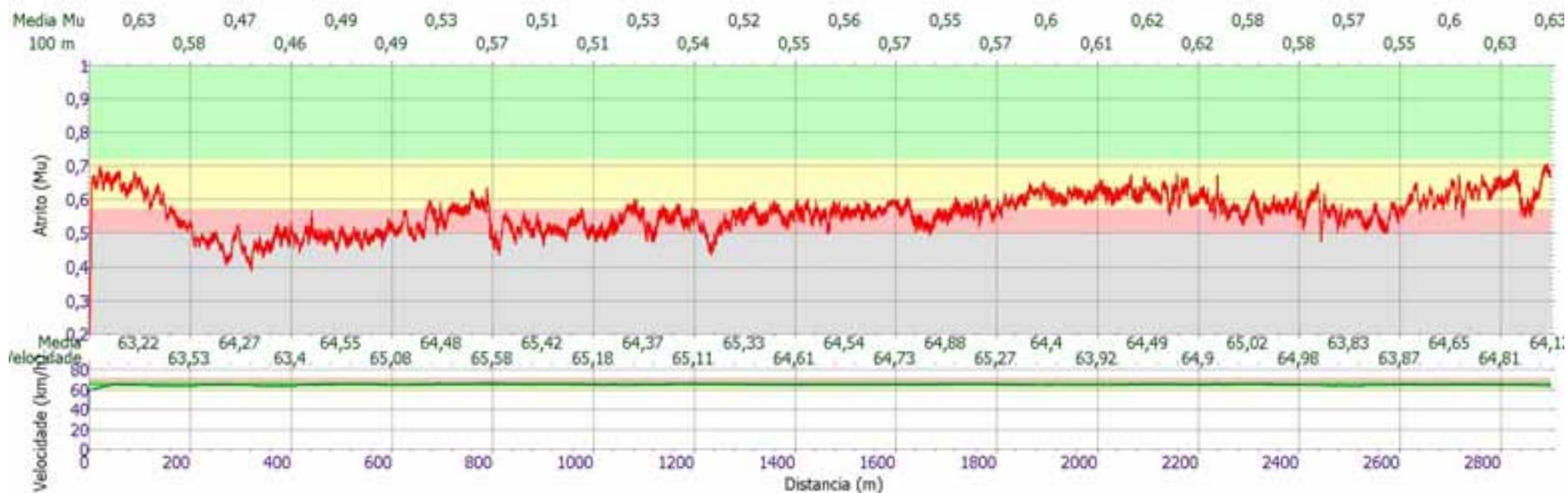


Figura D.3. Relatório do MuMeter na pista do AIB – 4 meses após desemborrachamento, corrida a 3 m lado esquerdo (11/12/2008).

# MuMeter Run Report

## PJK AIRPORT RUNWAY 11-29

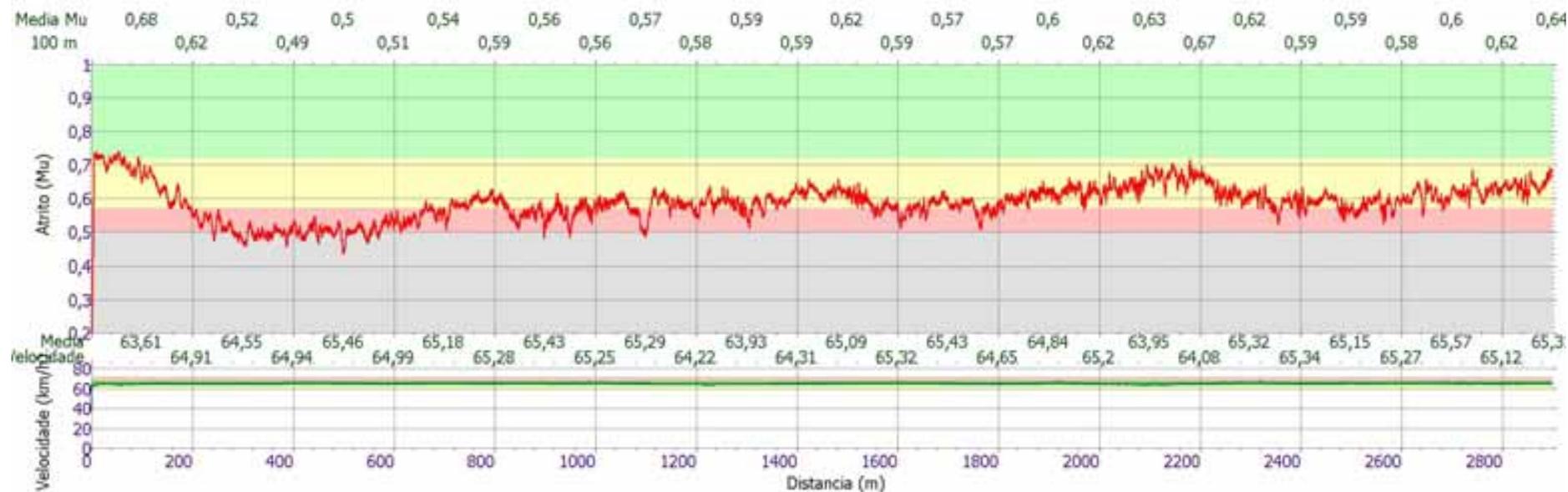
Calibration Results		
Zero Reference	11/1/2008 14:37:00	-258
Distance		406
Board Test	2/10/2006 15:13:35	7021

Average Mu	1/3	2/3	3/3	Total
11-29	0,56	0,59	0,62	0,59

Run Start:	11/1/2008 14:57:05	
Auto. End Distance	Ativado	
Distance Travelled	2900	metros
Average Speed	64,9	km/h

Weather Condition	Bom
Air Temperature	29
Operator Notes	Lado esquerdo do eixo central

Location	Event Note
m	
m	
m	



Apêndice E - Distribuição *t de Student* para os ensaios de campo.

Tabela E.1. Distribuição *t de Student* para macrotextura obtida com Mancha de Areia.

Faixas	MANCHA DE AREIA									
	HS (mm) antes					HS (mm) depois				
	CE	BE	A	BD	CD	CE	BE	A	BD	CD
<i>média (mm)</i>	0,91	0,73	0,67	0,69	0,93	1,43	1,33	1,35	1,32	1,43
<i>S (desvpad)</i>	0,13	0,04	0,07	0,07	0,08	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03
<b>Classificação</b>	Medianamente Grossa	Média	Média	Média	Medianamente Grossa	Muito Grosseira ou Muito aberta				
<i>graus de liberdade</i>	12	12	12	12	12	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
<i>Nível de Significância</i>	95%	95%	95%	95%	95%	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<i>t (Student)</i>	1,782	1,782	1,782	1,782	1,782	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78
<i>mínimo</i>	0,84	0,71	0,63	0,65	0,89	1,42	1,31	1,34	1,30	1,42
<i>máximo</i>	0,97	0,75	0,71	0,72	0,97	1,44	1,34	1,36	1,34	1,44

Tabela E.2. Distribuição *t de Student* para atrito obtido com Pêndulo Britânico.

Faixas	PÊNDULO BRITÂNICO									
	BPN antes					BPN depois				
	CE	BE	A	BD	CD	CE	BE	A	BD	CD
<i>média (BPN)</i>	74,38	53,71	56,25	51,54	72,91	105,29	106,17	105,00	106,06	105,37
<i>S (desvpad)</i>	3,96	4,50	10,14	5,88	4,60	0,87	0,93	1,16	1,01	0,70
<b>Classificação</b>	Rugosa	Medianamente Rugosa	Rugosa	Medianamente Rugosa	Rugosa	Muito Rugosa				
<i>graus de liberdade</i>	12	12	12	12	12	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
<i>Nível de Significância</i>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<i>t (Student)</i>	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78
<i>mínimo</i>	72,43	51,49	51,23	48,63	70,63	104,86	105,71	104,43	105,56	105,02
<i>máximo</i>	76,34	55,93	61,26	54,45	75,18	105,72	106,63	105,57	106,56	105,72

Tabela E.3. Distribuição *t de Student* para drenabilidade obtida com Drenômetro.

Faixas	FLOW-METER									
	Vazão (l/s) antes					Vazão (l/s) depois				
	CE	BE	A	BD	CD	CE	BE	A	BD	CD
<i>Média (l/s)</i>	0,11	0,08	0,08	0,07	0,12	0,16	0,14	0,14	0,14	0,16
<i>S (desv. pad)</i>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
<i>Graus de liberdade</i>	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
<i>Nível de Significância</i>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
<i>t (Student)</i>	1,782	1,782	1,782	1,782	1,782	1,782	1,782	1,782	1,782	1,782
<i>mínimo</i>	0,099	0,071	0,076	0,071	0,110	0,156	0,134	0,136	0,129	0,158
<i>máximo</i>	<b>0,11</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,08</b>	<b>0,12</b>	<b>0,16</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>	<b>0,16</b>