

WILSON GANDINI LUGÃO

**ANÁLISE DA ADERÊNCIA ENTRE PNEU E PAVIMENTO COM CAMADA POROSA
DE ATRITO NO AEROPORTO INTERNACIONAL TANCREDO NEVES – MG**

**Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do título
de *Doctor Scientiae*.**

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

WILSON GANDINI LUGÃO


**ANÁLISE DA ADERÊNCIA ENTRE PNEU E PAVIMENTO COM CAMADA POROSA
DE ATRITO NO AEROPORTO INTERNACIONAL TANCREDO NEVES – MG**

**Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do título
de *Doctor Scientiae*.**

APROVADA: 10 de março de 2008.



Prof. Dario Cardoso de Lima
(Co-Orientador)



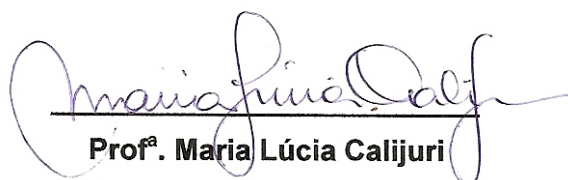
Prof. Carlos Alexandre Braz de Carvalho
(Co-Orientador)



Prof. Márcio Marangon



Prof. Geraldo Luciano de O. Marques



Prof.ª Maria Lúcia Calijuri
(Orientadora)

Dedico este trabalho

À Zeni, Adeir e Patrícia.

Agradecimentos

À Deus;

À minha mãe Adeir e ao meu irmão Ricardo, pela confiança e tudo que sou;

À Patrícia, por todos os momentos ao meu lado nessa caminhada;

À Lúcia, pela orientação, apoio, segurança e formação interdisciplinar proporcionada;

Aos amigos do LabSIGEO, que tanto contribuíram nesse período;

Aos primeiros companheiros do Laboratório, Pedro, Samuel, André, Othávio, Aníbal, Alessandra e Romina, pelo enriquecimento profissional e pessoal.

Ao Mauro, Aníbal e Henrique, pelas noites de trabalho em Confinis;

À Thatiana pelo incentivo na pesquisa e ajuda no preparo de materiais e equipamentos;

Ao Madson, pela ajuda na reta final;

Aos co-orientadores Dario e Carlos Alexandre, pelas sugestões valiosas;

À CAPES pela bolsa concedida;

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV;

À INFRAERO pelo interesse e apoio na pesquisa, em especial à Superintendência do Aeroporto Int. Tancredo Neves e à Superintendência de Manutenção – INFRAERO / SEDE;

Aos funcionários da INFRAERO do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, em especial à equipe da Divisão de Manutenção, Nogueira, Sebastião, Ricardo, Lanaro, Paulo e Roberto;

Ao Eng. Paulo Mengatti, sempre preocupado com as condições da pista;

Aos estagiários Hugo e Patrícia, e também ao José Antônio pelo apoio nos ensaios na pista;

À Pattrol, em especial ao Bruno Castro, pelas dicas e disponibilidade de equipamentos;

Ao IPT pela doação da Areia Normal; À Zirtec pela doação da Micro-esfera;

Ao Laboratório de Mecânica dos Solos da UFV;

Aos professores Márcio Marangon e Geraldo Luciano pelas avaliações e contribuições;

Às demais pessoas que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para esta Tese.

RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Iniciais	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura do Trabalho	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Avaliação de Pavimentos	5
2.1.1. Avaliação Estrutural	7
2.1.2. Avaliação Funcional	8
2.2. Aderência Pneu-Pavimento	12
2.2.1. Forças Resultantes da Interação entre Pneu e Pista Seca	12
2.2.2. Forças Resultantes da Interação entre Pneu e Pista Molhada	20
2.2.3. Lâmina d'água	31
2.3. Condições de Superfície de uma Pista	36
2.3.1. Características de Textura Superficial de Pavimentos	39
2.3.2. Classificação das Superfícies	40
2.3.3. Emborrachamento de Pistas de Aeroportos	43
2.4. Camada Porosa de Atrito - CPA	46
2.4.1. CPA no Aeroporto Internacional Tancredo Neves	51
2.5. Medidas de Atrito	53
2.5.1. Parâmetros de Atrito	60
2.6. Medidas de Textura	62
2.6.1. Parâmetros de Textura	67
2.7. International Runway Friction Index - IRFI	69
2.8. International Friction Index - IFI	69
3. MATERIAIS E MÉTODOS	74
3.1. Objeto de Estudo	74
3.2. Planejamento dos Ensaios	78
3.3. Macrotextura da superfície	82
3.4. Remoção de borracha	86
3.5. Medição de Atrito Dinâmico com o Mu-meter	87
3.6. Medição de Atrito Estático com o Pêndulo Britânico	90
3.7. Ensaio de Drenabilidade	91
3.8. Estimativa da Lâmina d'água e Hidroplanagem	93
3.9. Cálculo do IFI – Índice Internacional de Atrito	93
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
4.1. Avaliação da macrotextura	95

4.2. Cálculo do IFI – Índice Internacional de Atrito.....	101
4.3. Evolução do emborrachamento da pista	103
4.4. Remoção de Borracha.....	107
4.5. Estimativa da lâmina d'água e da velocidade crítica para hidroplanagem	116
4.6. Ensaio de drenabilidade do pavimento.....	119
4.7. Classificação das imagens digitais.....	122
4.8. Discussões Gerais.....	124
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	127
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

Lista de Figuras

Figura 1 – Distribuição de pressões na área de contato e deformação do pneu da aeronave (RODRIGUES FILHO, 2006)	13
Figura 2 – Forças que atuam sobre uma roda tracionada (RODRIGUES FILHO, 2006)	14
Figura 3 – Contribuição do deslizamento devido à deformação no deslizamento medido (FRISTEDT & NORRBOM, 1980 ³ <i>apud</i> RODRIGUES FILHO, 2006).....	16
Figura 4 – Efeito do deslizamento no coeficiente de atrito	17
Figura 5 – Mecanismos de forças de atrito (SANTOS, 2004)	18
Figura 6 – Variação do coeficiente de atrito e seus componentes com a velocidade de deslizamento sobre uma superfície seca (FRISTEDT & NORRBOM, 1980 ⁵ <i>apud</i> SILVA, 1981)	19
Figura 7 – Hidroplanagem viscosa (Adaptado de ANDRÉ, 2001).....	22
Figura 8 – Hidroplanagem dinâmica. Fonte: http://www.aviationshop.com.au/ (22/10/07)	24
Figura 9 – Pneu diagonal (a) e pneu radial (b) (Adaptado de Wong, 2001).....	25
Figura 10 – Hidroplanagem por desvulcanização (Adaptado de ANDRÉ, 2001).....	27
Figura 11 – Modelo das três zonas (Adaptado de RODRIGUES FILHO, 2006).....	29
Figura 12 – Acidentes e Fatalidades a Bordo de Aeronaves por fase de voo entre 1997-2006 (BOEING, 2007).....	37
Figura 13 – Variação de atrito para diferentes condições de superfícies.....	38
Figura 14 – Influência da microtextura no atrito (OLIVER, 2003).....	40
Figura 15 – Classificação das superfícies de pavimentos (Adaptado de ESDU, 1971).....	41
Figura 16 – Efeito típico do acúmulo de borracha (OPUS, 2004)	44
Figura 17 – Diferença de drenabilidade (ADAMS, 2003)	48
Figura 18 – Corpo-de-prova (BERNUCCI, 2005)	48
Figura 19 – Camada Porosa (a) e CBUQ Tradicional (b).....	49
Figura 20 – Detalhe da espessura da CPA	49
Figura 21* – Comparação do coeficiente de atrito (μ) para superfícies secas (a) e a camada porosa (b) com filme de água de 0,25mm (Adaptado de YAGER <i>et al.</i> , 1990).....	50
Figura 22 – <i>Airport Surface Friction Tester</i> . (Foto: Yager, 2006)	54
Figura 23 – <i>Runway Friction Tester</i> , Foto: www.dynatest.com (22/10/2007).....	55
Figura 24 – <i>SFT</i> , Fonte: www.sarsys.se (22/10/2007)	55
Figura 25 – <i>Griptester</i> , Foto: www.mastrad.com (22/10/2007).....	56
Figura 26 – <i>NAC</i> , Foto: www.airportnac.com (20/05/2007).....	56
Figura 27 – <i>RUNAR</i> (Foto: Yager, 2006).....	56
Figura 28 – <i>BV-11 Skiddometer</i> (Foto: Yager, 2006)	57
Figura 29 – <i>STFT</i> (a) e ilustração do equipamento (b), Foto: www.sarsys.se (22/10/2007).....	57
Figura 30 – <i>Mu-meter MK6</i>	58
Figura 31 – Desenho esquemático do <i>Mu-meter</i>	58
Figura 32 – Pêndulo Britânico.....	60
Figura 33 – Materiais para o ensaio de mancha de areia (WAMBOLD & HENRY, 2002)	64

Figura 34 – Materiais para o ensaio de mancha de graxa (WAMBOLD & HENRY, 2002)	65
Figura 35 – Perfilômetro. (www.cibermetrica.com.br, 20/05/2007)	65
Figura 36 – Drenômetro LTP-USP (APS, 2006).....	66
Figura 37 – Significado das distintas zonas de um diagrama de atrito – textura.	72
Figura 38 – Localização do Aeroporto (data da imagem 26/02/2003)	75
Figura 39 – Aumento de Vôos em Confins (fonte: INFRAERO, 2008).....	76
Figura 40 – Movimentação de passageiros por aeroporto no ano de 2007 (INFRAERO, 2008)	76
Figura 41 – Aeroporto Internacional Tancredo Neves – vista aérea	77
Figura 42 – Aeroporto Internacional Tancredo Neves – pistas de operação	78
Figura 43 – Geometria dos trens-de-pouso das aeronaves	78
Figura 44 – Faixas de níveis de utilização das pistas para efeito do planejamento dos ensaios de campo. Os números em cada faixa indicam respectivamente: (1) expectativa da passagem das rodas das aeronaves (em percentuais) e (2) a densidade de probabilidade de passagem das rodas (em passagens de roda/m/passagens de aeronaves) (RODRIGUES FILHO, 2006)	79
Figura 45 – Vista aérea da zona de toque das aeronaves (Imagem Google Earth, 2007)	80
Figura 46 – Esquema dos ensaios para macrotextura e atrito estático	81
Figura 47 – Ensaio de Mancha de Areia.....	83
Figura 48 – Foto para a classificação	84
Figura 49 – Esquema dos pontos de ensaio de mancha de areia.	85
Figura 50 – Equipamento de barra giratória	86
Figura 51 – Prancha padrão de teste (SANTOS, 2004).....	88
Figura 52 – Visor de vazão do sistema de aspersão.....	88
Figura 53 – Computador portátil para o recebimento das informações do Mu-meter	89
Figura 54 – Corrida na pista do aeroporto com o Mu-meter.....	89
Figura 55 – Detalhe do Pêndulo Britânico	90
Figura 56 – Dimensões do drenômetro LTP-USP (FERREIRA, 2002)	91
Figura 57 – Ensaio de drenabilidade	92
Figura 58 – Micro-esferas <i>versus</i> Areia Comum (volume – 50ml)	96
Figura 59 – Micro-esferas <i>versus</i> Areia Normal – IPT (volume – 50ml).....	96
Figura 60 – Areia Comum <i>versus</i> Areia Normal – IPT (volume – 50ml)	96
Figura 61 – Micro-esferas (25ml) <i>versus</i> Areia Normal (25ml).....	97
Figura 62 – Micro-esferas (25ml) <i>versus</i> Areia Normal (50ml).....	97
Figura 63 – Areia Normal (25ml) <i>versus</i> Areia Normal (50ml).....	98
Figura 64 – Correlação entre Mu-meter e Pêndulo Britânico	103
Figura 65 – Vista da zona de toque logo após os serviços de limpeza e pintura da pista (a) e, depois de 10 meses de operação (b)	104
Figura 66 – Região emborrachada (a) e região sem solicitação (b)	104
Figura 67 – Evolução do emborrachamento.....	105
Figura 68 - Coeficiente de Atrito com o Mu-meter - 3 metros à direita do eixo da pista	106
Figura 69 - Coeficiente de Atrito com o Mu-meter - 3 metros à esquerda do eixo da pista	106

Figura 70 – Limpeza da pista equipamento de barra giratória	108
Figura 71 - Coeficiente de Atrito com o Mu-meter - 3 metros à direita do eixo da pista	112
Figura 72 - Coeficiente de Atrito com o Mu-meter - 3 metros à esquerda do eixo da pista	112
Figura 73 – Comparação do coeficiente de atrito para dois afastamentos do eixo.....	113
Figura 74 – Ano hidrológico	115
Figura 75 – Seção transversal da pista de pouso e decolagem.....	116
Figura 76 – Perfil longitudinal	116
Figura 77 – Intensidade de precipitação <i>versus</i> Lâmina d'água	117
Figura 78 – Velocidade crítica <i>versus</i> porcentagem de giro de roda	119
Figura 79 – Velocidade crítica <i>versus</i> lâmina d'água	119
Figura 80 – Drenômetro com a adaptação do orifício	120
Figura 81 – Área sem solicitação de aeronaves.....	121
Figura 82 – Área pouco solicitada	122
Figura 83 – Área altamente emborrachada	122
Figura 84 – Classificação de ponto altamente emborrachado	123
Figura 85 – Classificação de ponto pouco emborrachado	124

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Condições de suavidade de rolamento de aeronaves.....	10
Tabela 2 – Classificação da textura (APS, 2006)	39
Tabela 3 – Intervalos máximos para limpeza da pista (FAA, 1997)	44
Tabela 4 – Especificação para a faixa granulométrica da mistura	52
Tabela 5 – Equipamentos de medição de atrito	54
Tabela 6 - Classificação da microtextura com o Pêndulo Britânico (ABPv, 1998).....	60
Tabela 7 – Valores mínimos de atrito (Adaptado de ICAO, 2004)	61
Tabela 8 – Valores mínimos de atrito (Adaptado de CAA, 2004).....	61
Tabela 9 – Intervalos máximos entre medições de atrito	62
Tabela 10 – Intervalos máximos entre medições de atrito (FAA, 1997).....	62
Tabela 11 - Classificação da macrotextura superficial do revestimento (DER/MG, 2005)	68
Tabela 12 - Classificação proposta por APS (2006).....	68
Tabela 13 – Limites IFI (DNIT, 2006).....	71
Tabela 14 – Limites IFI (APS, 2006).....	71
Tabela 15 – Constantes para o cálculo de S_p (APS, 2006)	72
Tabela 16 – Constantes para o cálculo de F_{60} (APS, 2006)	73
Tabela 17 – Correção da leitura do Pêndulo Britânico devido à temperatura (DNIT, 2006).....	91
Tabela 18 – Macrotextura – Data: 03 de outubro de 2007	99
Tabela 19 – Macrotextura – Data: 12 de fevereiro de 2008	100
Tabela 20 – Proposta de níveis de emborrachamento	100
Tabela 21 – Valores de IFI.....	101
Tabela 22 – Sensibilidade de cada parâmetro para o cálculo do IFI	102
Tabela 23 – Número de pousos e massa total das aeronaves	107
Tabela 24 – Valores de profundidade de textura antes e após a limpeza	109
Tabela 25 – Dados pluviométricos da estação	114
Tabela 26 – Intensidades máximas de precipitação (mm/h)	115
Tabela 27 – Sensibilidade de cada parâmetro dos modelos.....	118
Tabela 28 – Tempo de escoamento da água – diâmetro de 2 polegadas	120
Tabela 29 – Tempo de escoamento da água – diâmetro de 1 polegada	121
Tabela 30 – Porcentagem de emborrachamento	123

RESUMO

LUGÃO, Wilson Gandini, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2008. **Análise da Aderência entre Pneu e Pavimento com Camada Porosa de Atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG.** Orientadora: Maria Lúcia Calijuri, Co-Orientadores: Dario Cardoso de Lima e Carlos Alexandre Braz de Carvalho.

A alta aderência entre o pneu e o pavimento nas fases de pousos e decolagens de aeronaves é fundamental para a segurança de um voo. Nesta Tese, estudaram-se as condições de aderência em pavimentos com Camada Porosa de Atrito - CPA, superfície com alto índice de vazios, que atua diretamente no aspecto funcional do pavimento, escoando rapidamente a água da superfície. Pavimentos com CPA, embora aplicados em dois Aeroportos no Brasil, ainda necessitam de estudos específicos, sendo que ensaios e classificações são generalizados para todos os tipos de revestimentos. O objeto de estudo foi a pista de pousos e decolagens do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, Confins – MG. Nessa pesquisa procurou-se, por meio de equipamentos e procedimentos, na sua maioria, utilizados em rodovias, estabelecer parâmetros específicos de avaliação das condições funcionais do pavimento com CPA. Verificou-se que a falta de padronização do tipo de material utilizado no ensaio de mancha de areia, pode levar a conclusões precipitadas sobre a condição de emborrachamento do pavimento. Deste modo, é proposta uma classificação de níveis de emborrachamento da pista a partir de resultados de ensaios de mancha de areia, com a adoção da Areia Normal do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, na execução dos ensaios. Para a caracterização da macrotextura superficial pode-se adotar a classificação de imagens digitais, que obteve boa correlação quando comparada aos ensaios de mancha de areia. Construiu-se um drenômetro adaptado às condições específicas de escoamento da CPA, tornando-se mais um instrumento de verificação da macrotextura do pavimento. Utilizou-se o Pêndulo Britânico e o Mu-meter para as medições de atrito entre pneu e pavimento, sendo verificada a falta de correlação entre os equipamentos. Os ensaios com o Mu-meter mostraram-se bastante divergentes quando comparados em diferentes datas, devendo-se considerar todas as variáveis que influenciam as condições de medição na hora do ensaio. É preciso uma revisão da técnica de remoção de borracha e periodicidade da limpeza, atualmente adotada, devido às novas condições de tráfego do Aeroporto.

ABSTRACT

LUGÃO, Wilson Gandini, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, march of 2008. **Analysis of Adherence between Tire and Pavement with Porous Friction Course in the International Airport Tancredo Neves – MG.** Adviser: Maria Lúcia Calijuri, Co-Advisers: Dario Cardoso de Lima and Carlos Alexandre Braz de Carvalho.

The high adherence between the tire and the pavement in the phases of landings and takeoffs of aircrafts is fundamental for the safety of a flight. In this thesis, the conditions of adherence in pavements with Porous Friction Course – PFC, surface with high index of emptiness, were studied. It acts directly in the functional aspect of the pavement, draining the water of the surface quickly. Pavements with PFC, although already applied in two Airports in Brazil, still need specific studies, with essays and classifications widespread for all of the types of coverings. The study object was the lane of landings and takeoffs of the International Airport Tancredo Neves, Confins - MG. In that research, it was searched for, through equipments and procedures, in its majority, used in highways, to establish specific parameters of evaluation of the functional conditions of the pavement with PFC. It was verified that the lack of standardization of the material type used in the sand patch essay, can induce to precipitate conclusions about the condition of rubbery of the pavement. This way, a classification of levels of rubbery of the lane is proposed starting from results of essays of sand patch, with the adoption of the Normal Sand of the Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (Institute for Technological Research), in the execution of the essays. For the characterization of the superficial macrotexture the classification of digital images can be adopted, that obtained good correlation when compared to the essays of sand patch. A drain machine adapted to the specific conditions of drainage of PFC was built, becoming one more instrument of verification of the macrotexture of the pavement. The British Pendulum and Mu-meter were used and for the friction measurements between tire and pavement, being verified the lack of correlation among the equipments. The essays with Mu-meter were shown quite divergent when compared in different dates, what lead us to considerer, in the hour of the essay, all the variables that influence the measurement conditions. It is necessary a revision of the technique of rubber removal and the periodicity of the cleaning, now adopted, due to the new conditions of traffic of the Airport.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Os acidentes aéreos relacionam-se com características específicas em cada caso, pois se têm diversos aspectos envolvidos, tais como: os fisiológicos e os psicológicos (fator humano), a aeronave e o complexo de engenharia aeronáutica (fator material) e o homem no exercício da atividade aérea (fator operacional). Além desses fatores, as condições meteorológicas contribuem de forma relevante nos acidentes aéreos, em especial nas condições da pista de pouso (PERES *et al.*, 2006).

Um acidente aéreo é fruto de um somatório desses fatores, no qual uma manutenção deficiente poderá ser o ingrediente final de uma seqüência de eventos mal sucedidos, durante as diferentes fases da operação aérea, e que culmina com o acidente (ARAÚJO, 1994).

Em termos de riscos para a aeronave, Silva (1981) destaca o pouso e a decolagem como as fases mais críticas de um voo, ressaltando que, a ineficácia de frenagem em virtude de atrito deficiente, se não for a causa primária, é um importante fator de contribuição de muitos incidentes e acidentes ocorridos nessas duas etapas de um voo.

A preocupação com o atrito em pistas de aeroportos acentua-se no caso das operações de aeronaves a jato, em que velocidades de pouso e decolagem são elevadas, o que torna ainda mais importante a eficácia do atrito entre os pneus e a superfície da pista, para que ocorra a desaceleração e a parada da aeronave (ARAÚJO, 1994; RODRIGUES FILHO, 2006).

Um conjunto de aspectos influencia essa aderência entre pneu-pavimento, como a presença de contaminantes, a textura, as condições de drenabilidade da pista, o peso e a velocidade de aterrissagem da aeronave, entre outros.

Tem-se então na aderência entre os pneus da aeronave e a superfície da pista um fator de extrema importância quando se trata de segurança de voo. Silva (1981) ressalta que em pistas limpas e secas praticamente não se têm problemas de frenagem, mas nas pistas ditas “contaminadas” (por gelo, neve ou água) o atrito é

sensivelmente reduzido. Devido ao seu clima, no Brasil tem-se como principal contaminante na pista a água. Uma condição importante para que se tenha uma aderência elevada é a eliminação da água que se encontra na área de contato pneu-pavimento.

O atrito nas pistas muda ao longo do tempo em função do tráfego, das condições climáticas e das práticas de manutenção adotadas. A presença de contaminantes como água ou resíduos de borracha, causa diminuição do atrito das superfícies das pistas em grandes extensões, principalmente nas zonas de toque (RODRIGUES FILHO, 2006).

Muitas tentativas de revestimentos de pavimentos já foram testadas para manter os níveis de atrito aceitáveis, mesmo sob condições adversas, como no caso da presença de água na pista. No Brasil, dois tipos de pavimentos são utilizados para tal fim: pavimentos estriados (“*grooving*”) e os pavimentos com Camada Porosa de Atrito - CPA.

Atualmente, a INFRAERO administra 68 aeroportos em todo país, sendo que aproximadamente 10% destes possuem pavimentos com *grooving* (5) ou CPA (2). Nos pavimentos com *grooving*, são feitas ranhuras ou estrias transversalmente ao eixo da pista com objetivo de fornecer um fluxo preferencial de escoamento das águas de chuva. A CPA desempenha a mesma função de drenagem da água, com a diferença que ao invés das ranhuras, o pavimento possui grande índice de vazios, fazendo com que a água penetre no pavimento e escoe subsuperficialmente.

A CPA é um revestimento poroso, de granulometria aberta, que além de propiciar um atrito maior entre os pneus do trem-de-pouso e a pista, torna a drenagem da água mais eficiente. A CPA é uma camada delgada, de espessura constante, flexível, de macrotextura aberta e características drenantes, resultantes da mistura a quente, em usina apropriada, do agregado mineral graúdo, material de enchimento e material betuminoso (ARAUJO, 1994).

O Aeroporto Internacional Tancredo Neves, em Confins – Minas Gerais possui em sua pista de pousos e decolagens, revestimento contendo a CPA. Assim, esse aeroporto foi escolhido como objeto de estudo, devido ao revestimento com CPA de sua pista de pousos e decolagens, como também ao seu momento de grande aumento de vôos

nacionais e internacionais, em que as condições da pista passam a ser controladas com maior frequência.

Vale ressaltar que a CPA atua somente no aspecto funcional do pavimento que, em conjunto com a parte estrutural, dão suporte a um sistema de gerenciamento de pavimento.

A experiência brasileira sobre a avaliação de pavimentos revestidos com a Camada Porosa de Atrito ainda é recente, e muitos ensaios e procedimentos são generalizados a todos os tipos de revestimentos asfálticos. A frequência de verificação dos componentes da aderência entre pneu e pavimento também são questionáveis, visto as recomendações atuais de diversos órgãos internacionais de aviação.

1.2. Objetivos

O objetivo central desta tese foi contribuir para a avaliação funcional da superfície da pista de pouso e de decolagem do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, propondo-se parâmetros e períodos específicos de avaliação das condições de pavimento para a Camada Porosa de Atrito.

Para atingir o objetivo central deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram desenvolvidos:

- avaliar os procedimentos adotados para a verificação da macrotextura da superfície do pavimento e seus resultados em pavimentos com camada porosa de atrito;
- estudar a evolução do acúmulo de borracha no pavimento ao longo do tempo, determinando níveis de emborrachamento da pista a partir da análise da macrotextura da superfície do pavimento;
- analisar a eficiência na remoção de contaminantes do pavimento por meio da avaliação da macrotextura da superfície e valores de atrito obtidos pelo Mu-meter;
- analisar o potencial de drenabilidade do pavimento em diversos níveis de contaminação da pista com o uso do drenômetro, desenvolvido especificamente para a pesquisa;

- estimar a espessura da lâmina d'água formada na superfície do pavimento e a velocidade crítica para a ocorrência da hidroplanagem;
- verificar, a partir de valores de atrito do Pêndulo Britânico, a adequação do equipamento de medição de atrito utilizado no aeroporto, Mu-meter, ao índice internacional de atrito – IFI, visto que o mesmo não consta na listagem dos equipamentos calibrados no experimento.

1.3. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho apresenta-se estruturado em capítulos conforme descrito a seguir.

O Capítulo 1 inicia-se com a importância e justificativa do tema juntamente com o objetivo do trabalho.

No Capítulo 2 tem-se o referencial teórico sobre os assuntos abordados neste trabalho, com os temas considerados relevantes. Abordam-se assuntos sobre a avaliação de pavimentos, a aderência entre pneu e pavimento, as condições de superfície de uma pista, as características da camada porosa de atrito, as técnicas e equipamentos para medição de atrito e de textura, como também, os índices de atrito utilizados internacionalmente.

No Capítulo 3 apresentam-se os materiais e a metodologia, com descrição do objeto de estudo e técnicas e equipamentos disponibilizados para a pesquisa.

O Capítulo 4 traz os resultados dos ensaios executados e uma discussão geral sobre os dados encontrados, como também proposição de outras técnicas de verificação da macrotextura, bem como uma avaliação dos equipamentos e materiais utilizados nos ensaios.

No Capítulo 5, apresentam-se as conclusões e as recomendações para futuros trabalhos e também sugestões de valores a serem adotados pelos órgãos do setor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são introduzidos conceitos de avaliação de pavimentos, métodos e equipamentos utilizados, além de parâmetros e frequência das avaliações. Descrevem-se também, aspectos da interação entre pneu e pavimento e as diversas condições de textura superficial.

2.1. Avaliação de Pavimentos

Os pavimentos não são concebidos para durarem eternamente, mas apenas por um determinado período. Durante cada um desses períodos ou “ciclos de vida”, o pavimento passa de uma condição ótima até alcançar uma condição ruim.

Para atingir uma capacidade satisfatória de desempenho e um prolongamento de sua vida útil, os pavimentos exigem intervenções freqüentes, passando por processos de restauração simples, por reforço de sua estrutura, ou, ainda, pela combinação dessas ações com melhoramentos referentes à drenagem e ao traçado geométrico, conforme as deficiências observadas (JORDÃO *et al.*, 2004).

Os pavimentos aeroportuários apresentam similaridade com os pavimentos rodoviários em termos de materiais e serviços, diferindo na magnitude da carga aplicada, a pressão dos pneus, a seção geométrica da pista e o número de repetições de carga durante a vida útil do pavimento (JORDÃO *et al.*, 2004).

A avaliação de pavimentos consiste em uma série de procedimentos que fornecem informações sobre o seu estado de conservação atual, particularmente no que diz respeito às condições estruturais do pavimento e à capacidade de oferecer aos usuários conforto e segurança. Estas informações são utilizadas em estudos de gerência de pavimentos para nortear os serviços de manutenção e de restauração destas estruturas (HAAS *et al.*, 1994).

Um Sistema de Gerenciamento de Pavimentos (SGP) é definido, segundo Haas *et al.* (1994), como sendo “*a compreensão e coordenação das atividades associadas com o planejamento, projeto, construção, manutenção, avaliação e pesquisa de pavimentos*”, em que cada atividade é um subsistema de um sistema principal.

A avaliação das condições do pavimento é um subsistema de um SGP, de extrema importância, em virtude de que grande parte dos projetos e das equipes de manutenção necessitam dessas informações para melhor desenvolver e programar suas atividades (ARAÚJO, 1994).

Para o DNER (1983)¹ *apud* Muller (2005), a medição das características do pavimento e a avaliação dos dados obtidos têm três principais objetivos:

- verificar se a função pretendida ou o desempenho esperado estão sendo alcançados;
- fornecer informações para o planejamento da restauração do pavimento existente; e
- fornecer informações para melhorar a tecnologia de projeto, construção e manutenção do pavimento.

Quanto maior o nível de informações que se puder reunir sobre o pavimento, mais acertadas e rápidas serão as decisões. Um sistema bem montado de Gerenciamento de Pavimentos consiste na priorização de projetos de acordo com os recursos disponíveis e critérios técnico-econômicos, redundando em baixo custo/benefício para o usuário (MACEDO NETO, 1993).

A avaliação de pavimentos deve ter como principal objetivo o fornecimento de dados para a execução acertada de intervenções corretivas em sua estrutura, quando se fizer necessário, promovendo o restabelecimento das características de conforto, de segurança e de economia aos usuários, podendo variar entre simples operações de manutenção corretiva até a situação mais extrema, que seria a reconstrução total do pavimento (GONTIJO *et al.*, 1994).

A condição de um pavimento representa o nível de degradação resultante dos processos associados ao meio ambiente e ao uso contínuo pelo tráfego. A avaliação dessa condição é possível por meio do conhecimento de diversos parâmetros de referência normatizados, permitindo a determinação das condições de superfície, das condições estruturais, das condições de rugosidade longitudinais, da avaliação das solicitações do tráfego e das condições de aderência entre pneu-pavimento (DNIT, 2006).

O conjunto de medidas a serem tomadas para melhoria do pavimento será, portanto, em função do conhecimento do estado em que o pavimento se encontra. Cardoso (1995) recomenda uma avaliação periódica da condição estrutural e funcional do pavimento.

¹ Departamento de Estradas de Rodagens – DNER. **Projeto de pesquisas e operação da pista experimental circular**. Relatório técnico, contrato PG999-A/82. 1983.

A avaliação de pavimentos pode ser dividida em dois tipos: a avaliação funcional e a avaliação estrutural. Dessa forma, são feitas inspeções de campo onde se avaliam as condições funcionais e/ou estruturais, o que possibilita a identificação de medidas a serem tomadas para que o pavimento apresente condições satisfatórias de uso ao longo de um determinado período pré-estabelecido (NÓBREGA, 2003).

2.1.1. Avaliação Estrutural

A avaliação estrutural do pavimento pode ser efetuada por meio dos elementos obtidos nos levantamentos dos defeitos de superfície, nos ensaios destrutivos e nos ensaios não-destrutivos. Os defeitos existentes no pavimento causados principalmente pelas cargas de tráfego, fornecem informações importantes sobre o efeito do tráfego na estrutura do pavimento (DNIT, 2006).

A avaliação do comportamento estrutural de um pavimento consiste na determinação de características que estejam relacionadas à capacidade de suporte e de resistência da estrutura às ações do tráfego. Dessa maneira, o comportamento estrutural de um pavimento pode ser avaliado por meio da resposta que uma dada estrutura apresenta, quando aplicada uma carga em sua superfície. Essa resposta é analisada com base em parâmetros referenciais que auxiliam no diagnóstico desse comportamento (VALE *et al.*, 2004).

A análise de parâmetros elásticos obtidos em levantamentos estruturais permite inferir sobre a condição em que se encontra a estrutura, e assim dimensionar o reforço com o objetivo de compatibilizar as diversas características resistentes dos materiais que compõem o pavimento reforçado, frente às solicitações futuras do tráfego e dos efeitos climáticos (CAVALCANTE *et al.*, 2005).

Especificamente para aeroportos existe o *Pavement Classification Number* (PCN), número que expressa a capacidade estrutural relativo do pavimento em termos de carga de roda equivalente a uma pressão de 1,25MPa. O PCN, metodologia adotada pela ICAO e FAA, que utiliza dados deflectométricos, informações relativas às espessuras das camadas e dados da aeronave de projeto em seu cálculo, de acordo com a circular n°150/5335-5 (1983) da FAA.

A determinação do PCN é realizada através de dois procedimentos: o primeiro utiliza informações da aeronave e do tipo de subleito determinado por retroanálise; o segundo considera avaliações mecânicas da capacidade de suporte do pavimento (PREUSSLER *et al.*, 2004).

2.1.2. Avaliação Funcional

As avaliações funcionais consistem na caracterização da degradação superficial e da deformação permanente e traduzem as condições de conforto e de segurança do usuário. Têm como objetivos a definição da “natureza” e o “tipo” dos serviços corretivos a serem realizados.

Na avaliação funcional, realizam-se investigações de macro e microtextura da superfície, potencial de hidroplanagem, medições de irregularidade superficiais e de resistência à derrapagem (MACEDO NETO, 1993).

Os aspectos funcionais de um pavimento são caracterizados pela avaliação das condições de superfície, irregularidades longitudinais e aderência entre pneu-pavimento.

Avaliação das Condições de Superfície

As condições de superfície de pavimentos são avaliadas de forma objetiva ou subjetiva.

A avaliação objetiva pode ser feita pelo índice combinado de falhas, o Índice de Gravidade Global (IGG). O IGG descrito na Norma DNIT 006/2003-PRO, permite classificar o estado geral de um determinado trecho homogêneo de pavimento, em função da incidência de defeitos de superfície. É um indicador das condições do pavimento, útil para tomada de decisão quanto às intervenções de restauração necessárias (DNIT, 2006).

Para a avaliação objetiva existe também o procedimento do Levantamento Visual Contínuo (LVC), descrito na Norma DNIT 008/2003-PRO, que permite determinar os seguintes parâmetros (DNIT, 2006):

- ICPF – Índice de Condição do Pavimento Flexível;

- IGGE – Índice de Gravidade Global Expedito;
- IES – Índice do Estado de Superfície do Pavimento;
- porcentagem de área de trincamento;
- número de painéis e remendos; e
- porcentagem de área com outros defeitos.

A avaliação subjetiva de pavimentos, cuja metodologia para avaliação foi desenvolvida pela AASHTO na determinação do Valor de Serventia Atual (VSA), descrita na Norma DNIT 009/2003-PRO, afere, subjetivamente, as qualidades de suavidade e de conforto do rolamento proporcionado pelo pavimento.

Em aeroportos utiliza-se o *Pavement Condition Index* (PCI), método desenvolvido pelo *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory* (CERL), do Corpo de Engenheiros do Exército Americano. O PCI, que varia de 0 (pavimentos totalmente deteriorados) a 100 (pavimentos em excelente condição), é calculado a partir de inspeções visuais do pavimento, registrando-se os tipos de defeitos, suas severidades e densidades de ocorrência em cada setor analisado (ARAÚJO, 1994).

Irregularidade Longitudinal

Pode-se conceituar irregularidade longitudinal ou simplesmente irregularidade de um pavimento, como sendo um conjunto de desvios da superfície em relação a um plano de referência ou ao greide de projeto. Esses desvios podem afetar a qualidade do rolamento, a dinâmica dos veículos e a ação dinâmica das cargas sobre a via (SOUZA *et al.*, 2002).

O perfil transversal de um pavimento é útil principalmente para a verificação de deformações superficiais permanentes que se formam normalmente nas trilhas de roda devido à ação do tráfego e que apresentam sérios riscos à segurança quando o pavimento está molhado, pois em tais deformações pode haver acúmulo de água superficial que facilita a perda do contato pneu-pavimento. Esse perfil pode também ser usado para a medida da condição de drenagem superficial da pista (CIBERMÉTRICA, 2007).

A medição da irregularidade pode se dar em diversas escalas padronizadas (QI, IRI), na dependência do equipamento e no processo de medição. Essa irregularidade pode ser avaliada com sistemas de medidas diretas ou indiretas do perfil, sistemas

baseados na reação do veículo (medidores tipo-resposta) ou sistema de medida com sonda sem contato (DNIT, 2006).

O sistema mais difundido internacionalmente e também no Brasil é dos integradores tipo-resposta, baseados na reação da suspensão do veículo às irregularidades do pavimento, sob determinada velocidade (DNIT, 2006).

No Brasil, a escala padrão de medição é o “Quociente de Irregularidade” (QI) ou “Índice Quarto de Carro”, reconhecido internacionalmente.

Em pistas de aeroportos também se realizam medições da irregularidade do pavimento, à semelhança de rodovias, utilizando o QI, por terço médio de pista em função do valor médio de leituras de irregularidades (LI). As leituras são feitas ao longo de três alinhamentos longitudinais. Um no eixo e os outros dois distantes deste 3m à esquerda e à direita. São realizadas leituras a cada 80m de percurso a velocidade de 65 km/h. (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2006).

A DIRENG estabelece as condições de suavidade de rolamento, a partir de resultados de irregularidade com o integrador IPR/USP, conforme a Tabela 1, em função do QI e do tipo de aeronave.

Tabela 1 – Condições de suavidade de rolamento de aeronaves

Condição de suavidade ao rolamento de aeronaves	Aeronaves comerciais a jato – QI (contagem/km)	Aeronaves comerciais de aviação regional – QI (contagem/km)
ótima	13 – 22	26 – 36
boa	22 – 32	36 – 46
regular	32 – 41	46 – 57
ruim	41 – 51	57 – 67
péssima	51- 60	67 – 77

Adaptado da DIRENG (1991)² *apud* RODRIGUES FILHO *et al.* (2006)

Metodologia desenvolvida pela DIRENG avalia, também, as condições de suavidade ao rolamento de aeronaves através de correlações subjetivas de pilotos, considerando a aceleração vertical, experimentado pelo assento do piloto, e o centro de gravidade da aeronave (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2006).

² DIRENG. **Relatório de Levantamento de Dados de Aeroportos Brasileiros**. Aeroporto Santos Dumont. Rio de Janeiro. 1991.

Aderência

A primeira vez que se teve notícia com preocupação da aderência entre pneu e pavimento foi nos anos 20, onde era realizado testes de derrapagem para a verificação subjetiva da condição de atrito no Aeroporto de Le Bourget em Paris, um dos primeiros aeroportos a contar com uma pista de pousos e decolagens pavimentada (RODRIGUES FILHO, 2006).

Em 1946, com a entrada dos aviões Douglas DC-4, o Aeroporto de Fornebu (Oslo) com 1200m de extensão da pista, realizou testes de frenagem com um caminhão carregado de areia e estabeleceu uma metodologia baseada na desaceleração do caminhão e posteriormente, com testes de vôo realizados com o DC-4, correlacionou os dados de desaceleração do caminhão com o da aeronave.

As pesquisas iniciais ficaram concentradas nos países escandinavos, pelo fato da maior preocupação em se tratando de pistas contaminadas por neve ou gelo. Já na década de 50, desenvolveram-se pesquisas com o medidor *Tapley*, um desacelerômetro instalado em um veículo de passeio. E posteriormente, adotado o deslizador, equipamento em forma de reboque, para a avaliação do atrito da pista do Aeroporto de Bromma (Estocolmo).

No final dos anos 60, a SAAB, empresa fabricante de veículos sueca, desenvolveu uma unidade medidora de atrito, *SAAB Friction Tester* (SFT), com a instalação de uma quinta roda em um veículo.

O problema do atrito em pistas de aeroportos, em se tratando de Brasil, é muito recente. Os primeiros estudos começaram na década de 80 pela DIRENG com avaliações da macrotextura do pavimento. No final de 1982, a INFRAERO adquiriu equipamento de medição direta de atrito, o Mu-meter modelo MK-3, de fabricação britânica (ARAÚJO, 1994).

Nesta pesquisa, abordaram-se os aspectos referentes à avaliação funcional do pavimento com base nas propriedades de aderência pneu-pavimento por meio de análises de atrito, textura e drenabilidade da superfície, detalhados nos itens seguintes.

2.2. Aderência Pneu-Pavimento

Desconsiderando as forças aerodinâmicas e gravitacionais, todas as demais forças que agem e afetam o movimento de uma aeronave no solo (nas operações de taxiamento, pouso ou decolagem) são aplicadas por meio das rodas em contato com o pavimento. Dessa forma, o entendimento das características básicas da interação entre pneu e pavimento é essencial ao estudo do desempenho, da qualidade ao rolamento e da dirigibilidade das aeronaves durante as operações no solo (RODRIGUES FILHO, 2006).

As forças de atrito entre os pneus das aeronaves e a pista são os principais meios que contribuem para a parada da aeronave após o pouso ou após abortagem de uma decolagem. O sistema de reversão dos motores, apesar de contribuir para a eficiência da frenagem em pista molhada, é considerado como um complemento à operação e não sua componente principal (ARAÚJO, 1994).

2.2.1. Forças Resultantes da Interação entre Pneu e Pista Seca

De forma geral, não existem grandes problemas de frenagem dos pneus quando se trata de uma pista limpa e seca. A seguir são descritos conceitos para melhor entendimento da interação entre o pneu e o pavimento em condições de pista seca.

Resistência ao Rolamento

Um pneu estático, sobre um pavimento submetido a uma força vertical, deforma-se de acordo com a Figura 1. A resultante da distribuição de pressões sobre a área de contato é uma força vertical que passa pelo centro da roda.

Devido à deflexão do pneu, também estão presentes forças horizontais locais, porém com o pneu parado, a resultante é zero. Considerando valores médios, é possível escrever a Equação 01 sem cometer erros significativos, considerando que a distribuição das tensões normais na área de contato seja uniforme.

$$P = p.A \quad \text{eq 01}$$

onde: P : carga de roda;
 p : pressão do pneu; e
 A : área de contato.

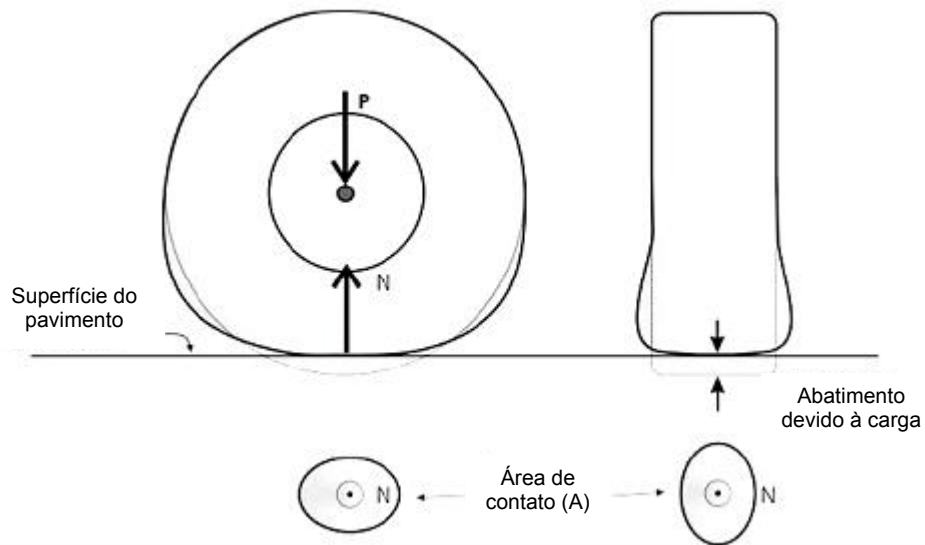


Figura 1 – Distribuição de pressões na área de contato e deformação do pneu da aeronave (RODRIGUES FILHO, 2006)

Com o pneu girando, a distribuição de pressões na área de contato muda devido às propriedades visco-elásticas da borracha. Logo, a força vertical resultante N se move para frente em relação ao centro da roda, opondo-se à rotação. Se a rotação é mantida em consequência da ação de uma força de tração no eixo da roda, uma força horizontal equivalente é formada na área de contato, porém em sentido contrário.

Essa força que causa a deflexão da banda de rodagem (parte do pneu que entra em contato direto com o pavimento) em sentido contrário ao do movimento é denominada resistência ao rolamento da roda e apresentada na Figura 2. O seu valor é dado pela Equação 02:

$$F_R = \frac{N \cdot e}{r} \quad \text{eq 02}$$

onde: F_R : resistência ao rolamento;

N : força normal;

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

r : raio do pneu carregado.

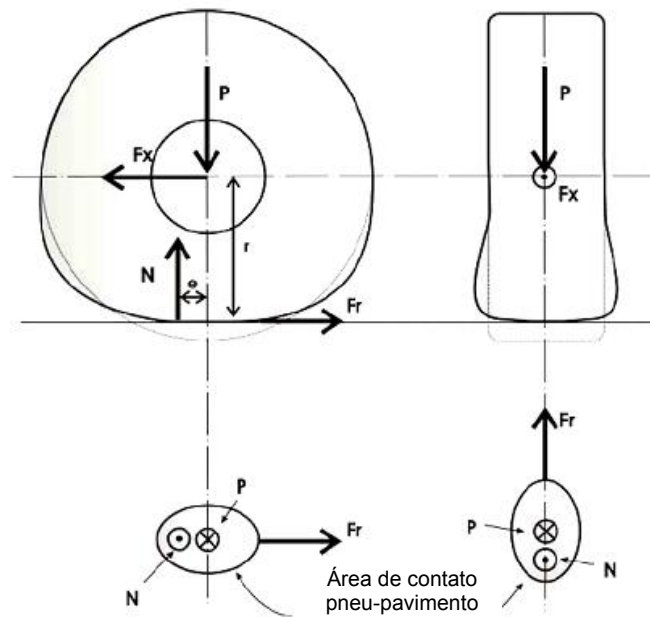


Figura 2 – Forças que atuam sobre uma roda tracionada (RODRIGUES FILHO, 2006)

Devido à rotação da roda, tanto “e” quanto “r”, aumentam levemente com a velocidade. A resistência ao rolamento, na prática, inclui também contribuições devido ao atrito interno do eixo da roda, à resistência ao avanço e à deflexão do pavimento (SILVA, 1981).

O coeficiente de atrito é definido conforme Equação 03. O coeficiente de atrito ao rolamento pode ser descrito conforme Equação 04.

$$\mu = F/N \quad \text{eq 03}$$

onde: μ : coeficiente de atrito; e
F: força de atrito.

$$\mu_R = e/r \quad \text{eq 04}$$

onde: μ_R : coeficiente de atrito ao rolamento.

Atrito devido ao Deslizamento

Caso a velocidade periférica do pneu em razão da frenagem da roda, for inferior à velocidade horizontal do eixo da mesma, a banda de rodagem deformatar-se-á,

horizontalmente, na área de contato e em suas vizinhanças mais próximas, em sentido contrário ao do deslocamento das rodas (SILVA, 1981; ARAÚJO, 1994; RODRIGUES FILHO, 2006).

Em decorrência desse fato, a velocidade periférica do pneu torna-se variável. Os pontos do pneu que entram na área de contato e são deformados, têm a velocidade periférica acrescida da velocidade de deformação e os pontos que saem da área de contato ao retornarem à posição original, têm a velocidade periférica reduzida da velocidade de deformação, criando um ciclo que se repete a cada rotação do pneu. Por outro lado, quando essa deformação alcança certo limite, começa a ocorrer deslizamento na área de contato (SILVA, 1981).

Utiliza-se o conceito de taxa de deslizamento para definir esse deslocamento relativo entre a banda de rodagem e a pista, conforme a Equação 05:

$$S = 1 - \frac{\omega}{\omega_R} \quad \text{eq 05}$$

onde: S: taxa de deslizamento;
 ω : velocidade angular da roda freada, em rad/s; e
 ω_R : velocidade angular da roda livre, em rad/s.

A taxa de deslizamento será igual a 1 (um) quando a roda estiver totalmente bloqueada, sem rotação, e 0 (zero) com a roda girando teoricamente livre.

Escrevendo a Equação 05 em termos de velocidade periférica (Equação 06), tem-se:

$$S = 1 - \frac{V}{V_R} = \frac{\Delta V}{V_R} \quad \text{eq 06}$$

em que: $V = \omega \cdot r$ onde: V: velocidade periférica do pneu freado;
 $V_R = \omega_R \cdot r$ V_R : velocidade periférica do pneu girando livremente; e
 ΔV : diferença de velocidade periférica.

A diferença periférica (ΔV) pode ser decomposta em componentes de deformação e de deslizamento, conforme a Equação 07:

$$\Delta V = \Delta V_D + \Delta V_S \quad \text{eq 07}$$

onde: ΔV_D : diferença de velocidade periférica devido à deformação; e
 ΔV_S : diferença de velocidade periférica devido ao deslizamento.

Portanto, é possível introduzir as seguintes definições para a taxa de deslizamento, conforme a Equação 08:

$$S = S_D + S_S \quad \text{eq 08}$$

onde: S_D : taxa de deslizamento devido à deformação horizontal do pneu na área de contato;
 S_S : taxa de deslizamento real.

Na Figura 3, têm-se as contribuições de cada tipo de deslizamento descrito na Equação 08.

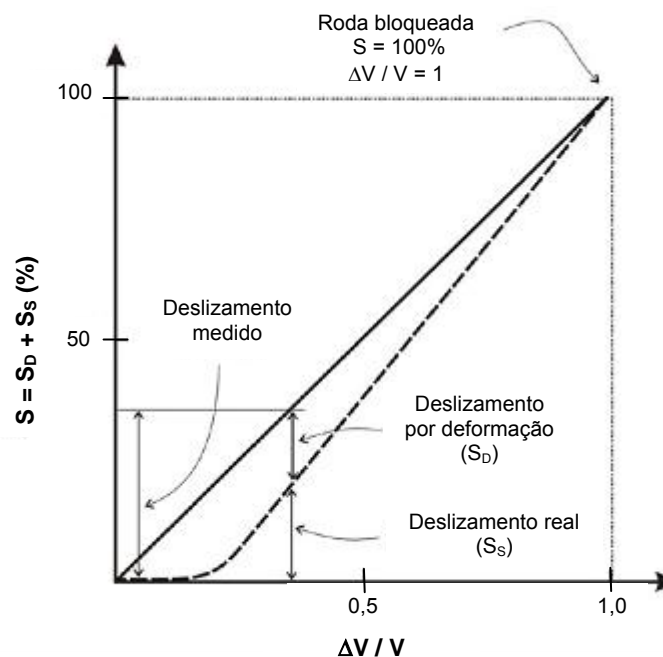


Figura 3 – Contribuição do deslizamento devido à deformação no deslizamento medido (FRISTEDT & NORRBOM, 1980³ apud RODRIGUES FILHO, 2006)

Essas contribuições podem ser vistas também na Figura 4, em que se tem a contribuição de deformação do pneu no deslizamento no ramo AO, e, a partir do ponto A, ocorre o deslizamento efetivo do pneu no pavimento. A partir do momento em que se inicia o movimento relativo entre as superfícies, banda de rodagem e pavimento, a relação entre o coeficiente de atrito e o deslizamento passa a ser não-linear.

³ FRISTEDT, K.; NORRBOM, B. **Studies of Contaminated Runways**. The Aeronautical Research Institute of Sweden. Estocolmo. 1980.

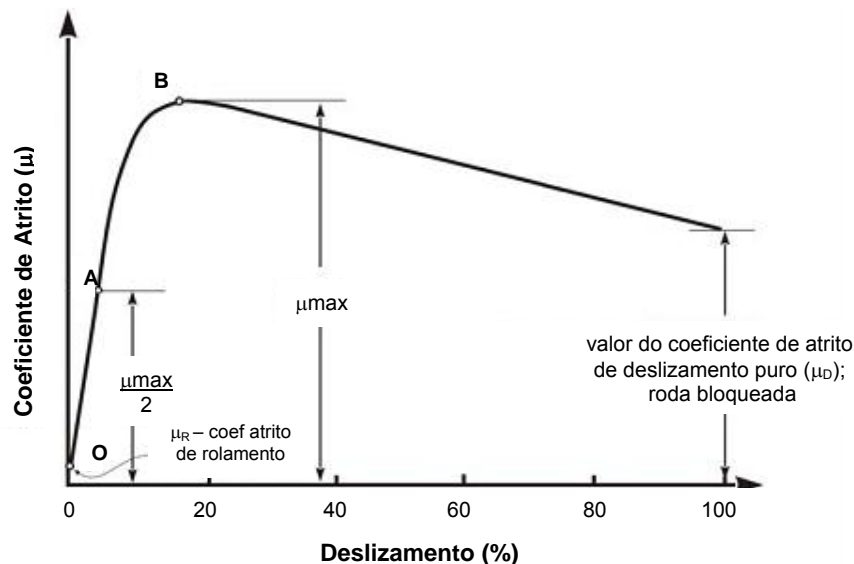


Figura 4 – Efeito do deslizamento no coeficiente de atrito (ICAO, 1994⁴ apud RODRIGUES FILHO, 2006)

O deslizamento real é consequência da adesão entre as duas superfícies na área de contato e da histerese da banda de rodagem do pneu. O atrito por deslizamento pode ser escrito como se segue na Equação 09 (SILVA, 1981):

$$F_D = F_a + F_h \quad \text{eq 09}$$

onde: F_a : força de atrito de adesão; e
 F_h : força de atrito de histerese.

O coeficiente de atrito por deslizamento é dado pelas Equações 10 e 11:

$$\mu_D = \frac{F_D}{N} = \frac{F_a}{N} + \frac{F_h}{N} \quad \text{eq 10}$$

ou

$$\mu_D = \mu_a + \mu_h \quad \text{eq 11}$$

onde: μ_D : coeficiente de atrito de deslizamento;
 μ_a : coeficiente de atrito de adesão; e
 μ_h : coeficiente de atrito de histerese.

Normalmente, assume-se o coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento sendo composto dessas duas parcelas: o atrito devido à adesão, proveniente da atração molecular das superfícies (forças de van der Waals), e o atrito devido à perda por

⁴ ICAO. International Standards and Recommended Practices: **Aircraft Accident and Incident Investigation**. Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation. 8th ed. Canadá. 1994.

histerese, resultante da deformação cíclica da superfície dos pneus, causada pelas asperezas do pavimento. Alguns autores incluem, também, o atrito devido ao desgaste da banda de rodagem, no qual ocorre o “arrancamento” de partículas do pneu na superfície de contato com o pavimento.

A Figura 5 ilustra as forças de atrito devido à adesão e a histerese.

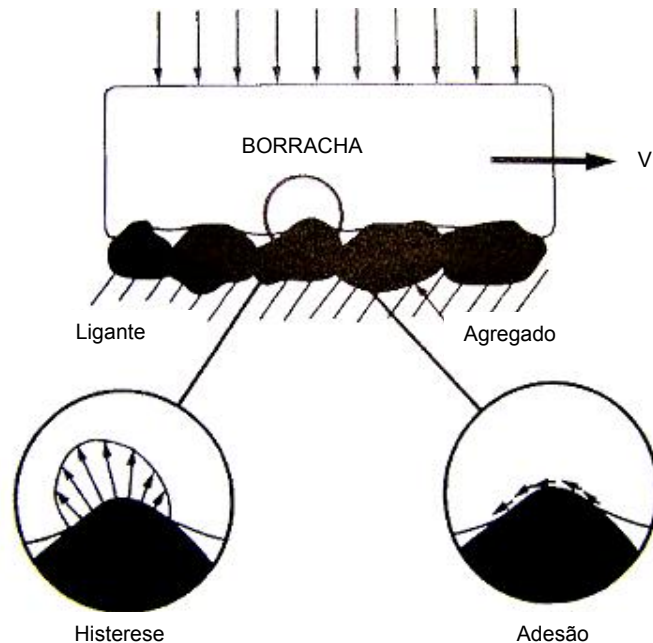


Figura 5 – Mecanismos de forças de atrito (SANTOS, 2004)

A adesão superficial surge dos vínculos intermoleculares entre a borracha e o agregado da superfície do pavimento. A adesão é a principal componente responsável pelo atrito em pistas secas, mas, por outro lado, sofre redução substancial quando o pavimento se encontra molhado.

A histerese representa a perda de energia da borracha quando ela se deforma, deslizando sobre o agregado do pavimento. O atrito por histerese não é tão afetado pela presença de água na superfície. Portanto, pneus compostos por borrachas com alto valor de histerese costumam ter valores melhores de tração em pavimentos molhados.

A Figura 6 apresenta a variação do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento quando um bloco de borracha desliza sobre uma superfície dura e lisa. Na interface das duas superfícies, surgem forças adesivas entre as moléculas dos dois materiais, cujas magnitudes dependem do tempo de contato e, conseqüentemente, da velocidade de deslizamento. Observa-se que as perdas de energia cinética por adesão

crecem com a velocidade de deslizamento até atingir um ponto máximo e depois decrescem. O valor da componente horizontal resultante dessas forças depende, principalmente, da interpenetração das duas superfícies, do tamanho da superfície de contato e da velocidade de deslizamento, e ainda, com alguma influência da temperatura, da composição da borracha e da textura das superfícies (SILVA, 1981).

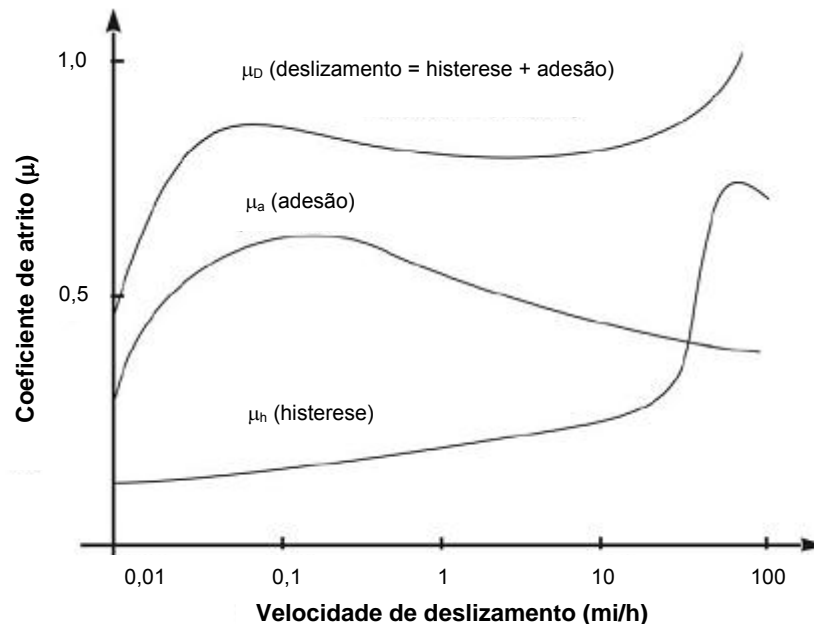


Figura 6 – Variação do coeficiente de atrito e seus componentes com a velocidade de deslizamento sobre uma superfície seca (FRISTEDT & NORRBOM, 1980⁵ *apud* SILVA, 1981)

O atrito por adesão depende da natureza dos materiais em contato, bem como da atração entre eles, da condição seca da superfície e da área de real contato entre as superfícies, diminuindo rapidamente se as superfícies forem levemente separadas por um contaminante.

As perdas por adesão estão intimamente relacionadas com a microtextura do pavimento, sendo consideradas como microcaracterísticas do atrito (ARAÚJO, 1994).

A componente do coeficiente de atrito devido à histerese, aumenta com a velocidade de deslizamento, sendo que o seu valor máximo ocorre para maiores velocidades quando a temperatura aumenta (Figura 6).

O processo que produz as perdas por histerese ocorre em toda a banda de rodagem e é afetado pela textura superficial da pista. Esse processo envolve um volume maior da banda de rodagem, se comparado com o processo que produz as perdas por adesão. Caso a pista não possua macrotextura, é impossível produzir perdas por histerese no

⁵ FRISTEDT, K.; NORRBOM, B. **Studies of Contaminated Runways**. The Aeronautical Research Institute of Sweden. Estocolmo. 1980.

deslizamento. As perdas por histerese não são influenciadas quando as superfícies na área de contato são levemente separadas por um contaminante.

Perdas por histerese estão intimamente relacionadas com a macrotextura do pavimento, sendo consideradas como macrocaracterísticas do atrito (ARAÚJO, 1994).

2.2.2. Forças Resultantes da Interação entre Pneu e Pista Molhada

Em pistas molhadas, tendo em vista que a película de água existente entre o pneu e o pavimento não pode ser totalmente afastada para fora da área de contato, o atrito desenvolvido será sensivelmente menor do que na condição de pista seca (ARAÚJO, 1994).

O desempenho dos pneus em uma pista molhada, segundo Rodrigues Filho (2006), depende dos seguintes fatores:

- pressão de enchimento dos pneus;
- textura da superfície do pavimento;
- profundidade da lâmina d'água;
- material, padrão e profundidade das ranhuras da banda de rodagem;
- tipo de pneu (diagonal ou radial);
- carga de roda;
- velocidade de deslocamento;
- área de contato; e
- ação no eixo da roda (roda livre, roda freada, roda em tração ou ainda roda em curva).

Resistência Hidrodinâmica

Quando uma roda está girando ao longo de uma pista molhada sem ser freada, grande parte dessa água é deslocada pela roda. Isso causa o aparecimento de uma força de arrasto equivalente ao impulso que a roda transmite à água, na direção contrária ao deslocamento. Dessa forma, o coeficiente de resistência hidrodinâmica (μ_i) pode ser definido pela Equação 12:

$$\mu_f = \frac{F_f}{N}$$

eq 12

onde: F_f : força de arrasto hidrodinâmico; e
 N : força normal.

A influência do arrasto hidrodinâmico pode ser avaliada tendo-se presente que o empuxo dos motores diminui com o aumento da velocidade e que o arrasto hidrodinâmico aumenta proporcionalmente ao quadrado da velocidade, o que pode levar a uma situação em que a resistência ao avanço se iguale ao empuxo. O avião que atingir essas condições com velocidade inferior à de decolagem, não conseguirá levantar vôo (SILVA, 1981).

Atrito

O atrito de uma pista molhada é consideravelmente inferior se comparado com a pista em condição seca. Isso ocorre porque a água que se encontra entre o pneu e o pavimento não é expulsa completamente.

A película de água que permanece na área de contato do pneu reduz substancialmente a componente de atrito devido à adesão. Embora a componente devido à histerese seja pouco influenciada na presença de água, o atrito nessas condições é, normalmente, reduzido.

Para que se tenha o atrito necessário à frenagem de uma aeronave na pista molhada, é necessário que se rompa ou se desloque a película de água entre o pneu e o pavimento, tentando produzir um contato semelhante ao obtido em uma pista seca.

Na medida em que a velocidade aumenta, o tempo disponível para a expulsão da água entre o pneu e o pavimento diminui, logo, o atrito nessas condições diminui na medida em que a velocidade aumenta e é proporcional à área de contato direto produzida pela expulsão da água.

Hidroplanagem

A hidroplanagem ou aquaplanagem é o fenômeno que ocorre quando os pneus da aeronave perdem totalmente o contato com a superfície do pavimento, devido à

presença de uma película de água entre o pneu e o pavimento (SILVA, 1981; ARAÚJO, 1994; RODRIGUES FILHO, 2006).

A componente da força de atrito devido à adesão é praticamente nula, reduzindo o atrito disponível a valores insuficientes para manter a roda girando. Em consequência disso, a rotação da roda cessa gradualmente até parar e o controle direcional e a frenagem da aeronave tornam-se ineficazes. Uma vez iniciada a hidroplanagem, a velocidade da aeronave em relação ao solo tem que ser reduzida sensivelmente para que a roda volte a girar (SILVA, 1981, ARAÚJO, 1994).

Rodrigues Filho (2006) destaca o pneu, o fluido contaminante (água), o pavimento e a aeronave como fatores importantes que influenciam o fenômeno da hidroplanagem. Os três primeiros fatores abrangem os principais componentes da interface pneu-pavimento. O fator final abrange as características próprias da aeronave e suas condições de operação, tais como a carga, a velocidade e se a operação é de pouso ou de decolagem.

Atualmente, são reconhecidos três tipos de hidroplanagem: viscosa, dinâmica e por desvulcanização.

Hidroplanagem Viscosa

A hidroplanagem viscosa ocorre a velocidades relativamente baixas, devido ao efeito da viscosidade da água que se opõe a sua expulsão na área de contato entre o pneu e o pavimento (ARAÚJO, 1994).

A Figura 7 ilustra esse fenômeno.

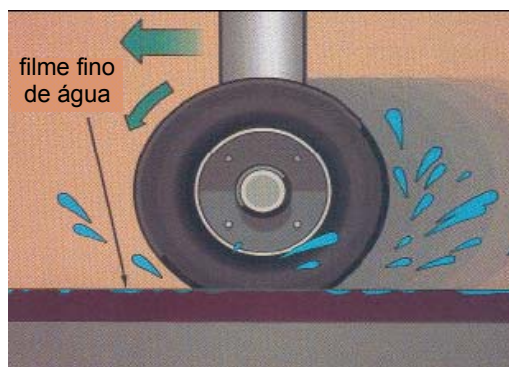


Figura 7 – Hidroplanagem viscosa (Adaptado de ANDRÉ, 2001)

Esta hidroplanagem é favorecida em pavimentos com superfícies mais lisas. O próprio emborrachamento existente nos pontos de toque da pista pode servir de poluição e não permitir que ocorra a aderência do pneu na pista. Se a pista for provida de ranhuras ou macrotextura elevada, como é o caso da CPA, essa condição de derrapagem é inibida (MERIGHI *et al.*, 2007).

De modo geral, a hidroplanagem viscosa ocorre durante as operações de frenagem da aeronave, com velocidade abaixo do valor em que ocorre a hidroplanagem dinâmica, mesmo que a película de água seja extremamente delgada.

Hidroplanagem Dinâmica

Quando há uma espessa camada de água sobre a pista, o pneu da aeronave desloca a água para que se estabeleça um contato entre o pneu e o pavimento. Na frente da área de contato, onde a água se choca com o pneu, forma-se uma pressão de intensidade correspondente ao impulso transmitido pelo pneu à água. Essa pressão proporcional ao quadrado da velocidade da roda e à densidade da água, deforma o pneu de uma forma tal que as porções de água subseqüentes são capazes de penetrar na área de contato entre o pneu e o pavimento e sustentar, parcialmente, a carga vertical do pneu. Acima de certa espessura da camada de água (espessura crítica) e de determinada velocidade característica (velocidade de hidroplanagem), não existe mais contato entre o pneu e o pavimento. Ocorre então a hidroplanagem dinâmica completa, em que não há perdas de energia cinética por adesão e só ocorrem perdas por histerese no interior da área de contato (SILVA, 1981; ARAÚJO, 1994; RODRIGUES FILHO, 2006).

Segundo Silva (1981), um aumento da espessura da camada de água acima do seu valor crítico não influencia de forma apreciável, a velocidade de hidroplanagem. Contudo, uma redução nessa espessura aumenta, substancialmente, a velocidade necessária para que ocorra a hidroplanagem dinâmica.

O risco da ocorrência desse tipo de hidroplanagem estará afastado, caso a espessura da lâmina d'água seja inferior à crítica, o que se consegue com um bom sistema de drenagem superficial, além da pista apresentar uma adequada macrotextura (ARAÚJO, 1994).

A Figura 8 ilustra o fenômeno da hidroplanagem dinâmica em que se observa a ausência de contato pneu-pavimento devido à presença da lâmina d'água.



Figura 8 – Hidroplanagem dinâmica. Fonte: <http://www.aviationshop.com.au/> (22/10/07)

Para qualquer tipo de pneu, radial ou diagonal, dados experimentais demonstram que a velocidade de hidroplanagem dinâmica em aeronaves pode ser expressa apenas como função da pressão dos pneus. Quanto maior a pressão dos pneus, maior será a velocidade necessária para que ocorra a hidroplanagem.

A carcaça dos pneus aeronáuticos diagonais ou convencionais apresenta uma estrutura composta de camadas sucessivas de lonas, e são cobertas por borracha, assentadas umas sobre as outras, de modo que as tramas das lonas formem, alternadamente, um ângulo geralmente de aproximadamente 40° com o eixo da banda de rodagem. Nos pneus aeronáuticos radiais, as tramas das lonas formam um ângulo de 90° com o eixo da banda de rodagem (GOODYEAR, 2008). Um desenho esquemático da orientação das fibras das lonas de um pneu aeronáutico diagonal (a) e outro radial (b) é apresentado na Figura 9.

De acordo com Myers *et al.* (1999) *apud* Rodrigues Filho (2006), as principais diferenças entre os pneus radiais e convencionais são:

- (1) a estrutura das paredes do pneu diagonal é mais rígida do que a do pneu radial;
- (2) a estrutura da banda de rodagem do pneu radial é mais rígida do que a do pneu diagonal.

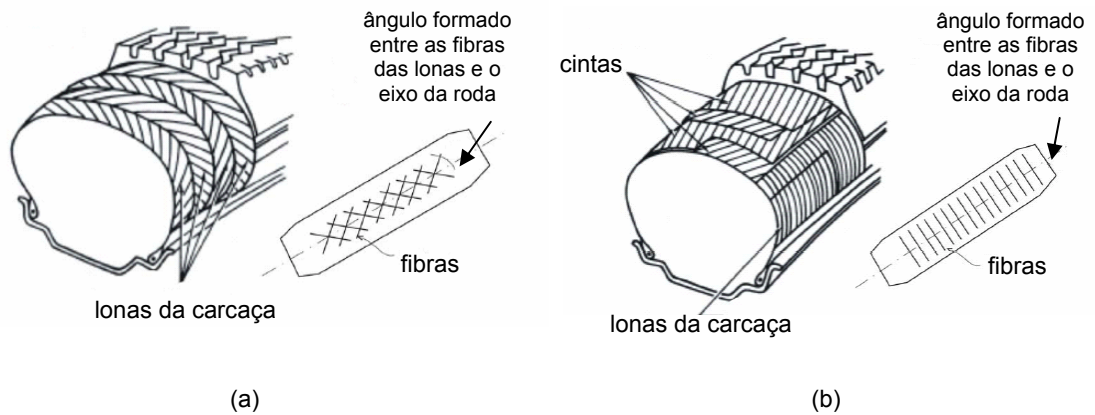


Figura 9 – Pneu diagonal (a) e pneu radial (b) (Adaptado de Wong, 2001)

Fristedt & Norrbom (1980)⁶ *apud* Silva (1981), indicam em sua experiência que, para pneus aeronáuticos diagonais em rotação sobre uma pista contaminada por uma lâmina de água de espessura maior ou igual à crítica, a hidroplanagem dinâmica completa ocorre, de acordo com a Equação 13, a uma velocidade de:

$$V_p = 1,77 \cdot \sqrt{p} \quad \text{eq 13}$$

onde: V_p : velocidade de hidroplanagem dinâmica (m/s); e
 p : pressão de enchimento dos pneus (kPa).

Caso o pneu esteja deslizando sem girar, condição que pode ocorrer após o toque da aeronave no pavimento, a hidroplanagem ocorre a velocidade mais baixa, conforme Equação 14:

$$V_p = 1,51 \cdot \sqrt{p} \quad \text{eq 14}$$

Para pneus aeronáuticos radiais, rodando sobre uma pista contaminada por uma lâmina de água de espessura maior ou igual à crítica, a hidroplanagem completa ocorre a uma velocidade de acordo com a Equação 15:

$$V_p = 1,29 \cdot \sqrt{p} \quad \text{eq 15}$$

Logo, quanto maior for a velocidade, menor será o tempo disponível para a eliminação da água da área de contato e maior deverá ser a pressão dos pneus para conseguir a completa expulsão da água. Normalmente, a hidroplanagem dinâmica ocorre quando a

⁶ FRISTEDT, K.; NORRBOM, B. **Studies of Contaminated Runways**. The Aeronautical Research Institute of Sweden. Estocolmo. 1980.

aeronave encontra-se em alta velocidade durante a corrida no solo, para pousar ou para decolar (SILVA, 1981).

A espessura crítica da lâmina de água necessária para a ocorrência desse tipo de hidroplanagem para pistas de macrotextura fechada e lisa, é de cerca de 2 a 3mm. Essa espessura de água relativamente pequena pode ser produzida por uma chuva forte e de curta duração (SILVA, 1981).

Gallaway *et al.* (1979) estimaram a velocidade crítica para ocorrência da hidroplanagem em rodovias, em que são considerados outros fatores além da pressão dos pneus, como a porcentagem de giro de roda, a profundidade dos sulcos do pneu e as características de textura do pavimento, por meio do ensaio de mancha de areia. A expressão é dada pela Equação 16:

$$V = 0,9143.SD^{0,04}.P^{0,3}.(TD + 0,794)^{0,06}.A \quad \text{eq 16}$$

$$SD = \left(\frac{W_d - W_w}{W_d}\right).100 \quad \text{eq 17}$$

onde:

- V : velocidade crítica para ocorrência de hidroplanagem (km/h);
- SD : porcentagem de giro de roda (%), a qual descreve a mudança no rolamento rotacional livre do pneu no momento em que o mesmo perde contato com a superfície do pavimento;
- W_d : velocidade de rotação em superfície seca (km/h);
- W_w : velocidade de rotação em superfície molhada (km/h);
- P : pressão de enchimento do pneu (geralmente entre 1100 e 1300 kPa); e
- TD : profundidade da escultura do pneu (pneus novos em torno de 8,4 mm).

O valor de A é o maior valor entre $A1$ e $A2$ apresentado nas Equações 18 e 19, respectivamente.

$$A1 = \frac{12,639}{LA^{0,06}} + 3,50 \quad \text{eq 18}$$

$$A2 = \left(\frac{22,351}{LA^{0,06}} - 4,97\right).HS^{0,14} \quad \text{eq 19}$$

onde: LA : espessura da lâmina d'água (mm); e
 HS : altura média de areia no ensaio de mancha de areia (mm).

Para prevenir a ocorrência desse tipo de hidroplanagem, além do tipo e da pressão do pneu, é necessário que o pavimento tenha uma boa macrotextura e boas características de drenagem superficial. A ICAO estabelece, de acordo com o Anexo 14 – Volume 1 – Projeto e Operações de Aeródromos, declividades transversais e longitudinais das pistas de acordo com a envergadura das aeronaves que operam no aeroporto.

É possível prever a extensão na qual uma pista torna-se inundada em função da intensidade da chuva, da macrotextura e da declividade da pista (RODRIGUES FILHO, 2006).

Hidroplanagem por Desvulcanização

Se uma aeronave ao pousar, sofre hidroplanagem completa, suas rodas não chegam a girar. Isso pode ocorrer quando a película de água for suficientemente profunda e a velocidade de toque no solo for superior à velocidade de hidroplanagem da aeronave. Tem-se então a chamada hidroplanagem por desvulcanização ou hidroplanagem por borracha revertida, conforme a Figura 10, e um pneu exposto a tal processo apresenta danos locais (a banda de rodagem derrete-se parcialmente) (SILVA, 1981; RODRIGUES FILHO, 2006).

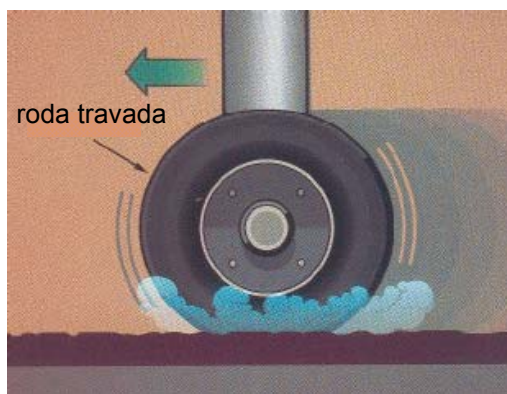


Figura 10 – Hidroplanagem por desvulcanização (Adaptado de ANDRÉ, 2001)

Devido à macrotextura da pista e à inexistência de rotação, a borracha fica sujeita à repetidas deformações locais na área de contato, e em razão das propriedades viscoelásticas da borracha, superaquecem a área de contato. Se esse processo perdurar por um espaço de tempo longo, a temperatura na área de contato pode alcançar um

nível em que a borracha perde suas qualidades elásticas e torna-se praticamente plástica. Quando isso acontece, desaparece uma grande parte das perdas de energia cinética por histerese. Se a pista possuir macrotextura fechada e lisa, a hidroplanagem viscosa continuará, mesmo a baixas velocidades. Devido à baixa resistência da borracha no estado plástico, as perdas por adesão serão pequenas e as rodas começarão a girar muito tarde, muito abaixo da velocidade na qual a hidroplanagem dinâmica cessa (SILVA, 1981).

Para Silva (1981), esse tipo de hidroplanagem só ocorre em aeronaves com pneus a elevada pressão, podendo ser evitado se a aeronave possuir freios com sistema anti-deslizante, permitindo que apenas uma determinada porcentagem do deslizamento ocorra (cerca de 15%), impedindo, assim, que a roda seja totalmente bloqueada.

Hidroplanagem Combinada

A ocorrência da hidroplanagem totalmente viscosa ou inteiramente dinâmica é rara. O normal é que ocorra a hidroplanagem combinada em que os dois tipos acontecem simultaneamente. Pesquisas realizadas pela NASA mostraram que, dentro da área de contato entre o pneu e o pavimento, existem três zonas distintas (SILVA, 1981):

- Z1 - zona recoberta por uma espessura considerável de água (zona de hidroplanagem dinâmica);
- Z2 - zona recoberta por uma espessura fina de água (zona de hidroplanagem viscosa); e
- Z3 - zona em que a água é totalmente expulsa (zona teoricamente seca, cujo atrito contribui com mais intensidade para a desaceleração e o controle direcional da aeronave).

Essas zonas podem ser visualizadas na Figura 11, que apresenta o esquema da área de contato de um pneu deslocando-se sobre uma superfície molhada.

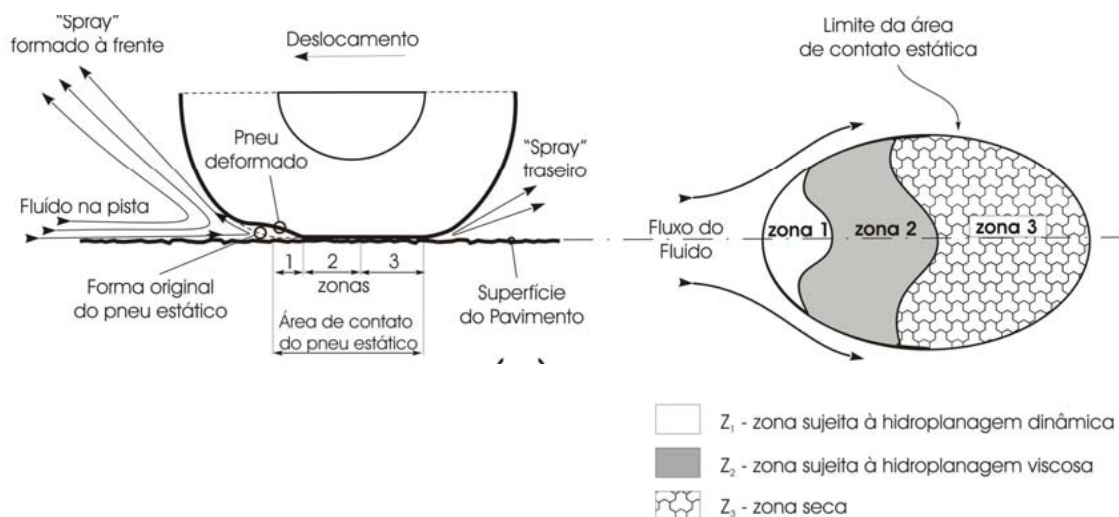


Figura 11 – Modelo das três zonas (Adaptado de RODRIGUES FILHO, 2006)

A Zona 1 é a região onde ocorre o impacto do pneu com a superfície do fluido, gerando pressões suficientes para deslocar o fluido. A maior parte do fluido é lançada para a frente e para os lados; outra parte é forçada a se deslocar através das ranhuras da banda de rodagem ou pelos canais e microcanais existentes na macrotextura da superfície do pavimento. Como resultado, a pressão hidrodinâmica gerada nessa região causa a deformação da banda de rodagem e permite a penetração do fluido na área de contato.

A Zona 2 é uma região de transição, onde ainda permanece uma fina camada de fluido. O efeito da viscosidade do fluido impede que sua saída da área de contato ocorra em um tempo menor do que o tempo de passagem da roda e, em função disso, a pressão no fluido é mantida. O fluido sob pressão impede o contato direto entre as superfícies do pneu e do pavimento. Essa fina camada de fluido sob pressão é rompida em alguns pontos localizados, em que as "asperezas" da superfície do pavimento geram tensões de contato maiores que a pressão do fluido.

A Zona 3 é a região onde predomina o contato seco entre as superfícies, onde as perdas por histerese e por adesão atuam plenamente e, em conseqüência, é o local da área de contato onde é gerada a maior parte das perdas por atrito.

O coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento em condições de pista inundada depende da participação relativa das Zonas 1, 2, e 3. Sem considerar a resistência ao rolamento e a resistência hidrodinâmica da água, o coeficiente de atrito do pneu em rolamento sobre uma pista inundada, pode ser expresso conforme a Equação 20.

O modelo baseia-se nas hipóteses de que há perdas por histerese na Zona 1 (representadas pelo coeficiente de atrito μ_h), e que há perdas por adesão na Zona 2 (representadas pelo coeficiente de atrito μ_{aw}). A magnitude desses coeficientes depende da espessura do fluido contaminante e da microtextura da superfície, respectivamente (RODRIGUES FILHO, 2006).

$$\mu_w = \frac{Z1.\mu_h + Z2.(\mu_h + \mu_{aw}) + Z3.(\mu_a + \mu_h)}{A} \quad \text{eq 20}$$

onde: μ_w : coeficiente de atrito da pista molhada;
 μ_a : coeficiente de atrito devido à adesão na área seca;
 μ_h : coeficiente de atrito devido à histerese;
 μ_{aw} : coeficiente de atrito devido à adesão na área molhada; e
 A : área de contato.

Para Silva (1981), somente a zona seca (Z3) contribui de forma substancial para a frenagem do pneu, e considera que apenas nessa zona existe a componente de atrito devido à adesão.

A Equação 20 mostra que a zona seca da área de contato (Z3) contribui substancialmente para a capacidade de frenagem do pneu, uma vez que nessa região atuam integralmente os atritos por histerese e adesão, como em uma pista seca.

Na Zona 2 as perdas por histerese estão sempre presentes, e as perdas por adesão podem ocorrer em maior ou menor grau em função da microtextura da superfície. Em uma superfície com microtextura muito aberta, as asperezas rompem a película d'água garantindo o contato entre o pneu e o pavimento, e as perdas por adesão passam a atuar de forma muito próxima à da área seca (Zona 3). No outro extremo, em uma microtextura muito lisa, não há asperezas para perfurar a película de água sob pressão e praticamente não ocorrem perdas por adesão na Zona 2. Nesse caso, a Zona 2 terá um comportamento próximo à Zona 1 para efeito de atrito, pois praticamente só atua a histerese.

Se a roda estiver parada, a zona seca (Z3) se estenderá por toda a área de contato. Se a roda começar a girar sobre a pista molhada, considerando uma superfície de microtextura lisa, a Zona 2 (onde existe hidroplanagem viscosa) formar-se-á progressivamente. Esta área desenvolve-se da parte da frente para a de trás da zona

de contato e reduz a Zona 3. Quando a espessura da lâmina de água ultrapassa o valor crítico, com o aumento da velocidade, desenvolvem-se pressões hidrodinâmicas na frente da roda e a água, gradualmente, penetrará na área de contato. Assim, forma-se uma zona de hidroplanagem dinâmica (Z1), que penetra na Zona 2. À medida que a velocidade aumenta mais, a Zona 3 desaparece gradualmente e, ao mesmo tempo, a Zona 1 aumenta. A certa velocidade crítica (se a profundidade da lâmina de água for superior à crítica), a Zona 1 cobrirá toda a área de contato e o pneu ficará totalmente exposto à hidroplanagem dinâmica (SILVA, 1981).

Silva (1981) destaca, ainda, que nas superfícies de microtextura áspera, a Zona 2 não se desenvolve e a Zona 1 substitui gradualmente a Zona 3.

2.2.3. Lâmina d'água

A presença de água influencia consideravelmente o nível de aderência de um pavimento, dependendo de alguns fatores como (GOTHIÉ, 1996):

- a velocidade de escoamento da água por meio dos canais formados pela disposição dos granulares do revestimento; e
- a possibilidade de escoamento forçado na interface pneu/pavimento, decorrente da pressão exercida pelos pneus.

A precipitação possui diversas formas: neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho e geada, sendo a chuva o tipo de precipitação mais importante, uma vez que possui capacidade de produzir escoamento.

A precipitação é caracterizada por meio de três grandezas: altura, duração e intensidade. A altura pluviométrica é o volume da chuva precipitado medido em milímetros. No entanto, esse valor não tem significado se não estiver relacionado a uma duração. Logo, quando uma precipitação é medida, esta é relacionada a um período de tempo. A intensidade é a grandeza que visa caracterizar a variabilidade temporal da precipitação (TUCCI, 2002).

A ocorrência da precipitação é um processo aleatório que não permite uma previsão determinística com grande antecedência, sendo que para a maioria dos problemas

hidrológicos, os dados de precipitação passam por um tratamento estatístico (TUCCI, 2002).

Para o estudo da presença de água na interface pneu-pavimento é indispensável a avaliação do regime hidrológico da região, para posteriormente estimar-se a lâmina d'água sobre o pavimento. A partir do conhecimento da espessura da lâmina d'água é possível melhorar a textura do revestimento na tentativa de que a superfície não seja sobreposta pela água (FERREIRA, 2002).

O estudo do comportamento das chuvas é realizado a partir de dados obtidos por estações pluviométricas instaladas no entorno dos aeroportos ou, em muitos casos, nos próprios aeroportos.

Dentre os tipos de chuvas, tem-se maior preocupação para aquelas de grande intensidade e de pequena duração, quando se trata de estudos em pavimentos de aeroportos, capazes de interromper os pousos e decolagens devido ao risco de hidroplanagem.

Estimativa da Lâmina d'água

A espessura da lâmina d'água pode ser estimada em função da intensidade da precipitação pluviométrica, da declividade da superfície e da capacidade de drenagem do pavimento.

Durante o ano de 1971, técnicos do *Texas Transportation Institute* (TTI), Texas A&M University, publicaram resultados do efeito da intensidade da chuva e das condições de pavimento, resultando em uma equação que se estima a intensidade de chuva requerida para que se tenha um filme de água entre os pneus da aeronave e a superfície do pavimento (HORNE, 1977).

A Equação 21 é dada em função das características de textura do pavimento e da distância de pouso e declividade da pista.

$$i_F = 1,253 \cdot 10^3 \cdot \left[\frac{T^{0,89}}{L^{0,43} \cdot (1/S)^{0,42}} \right]^{1,695} \quad \text{eq 21}$$

onde: i_F : intensidade de chuva para início do filme de água (mm/h);

T: profundidade da textura da superfície do pavimento (mm);
L: distância para aterrissagem (m); e
S: declividade da pista (m/m).

Em se tratando de produção de lâmina d'água é fundamental que se conheça os valores de intensidade máxima de precipitação. A precipitação máxima pode ser definida como a ocorrência extrema de precipitação com duração, distribuição temporal e espacial crítica para uma área ou bacia hidrográfica.

As precipitações máximas são retratadas pontualmente (abrangência máxima aceitável de 20 a 25 km²) pelas curvas de intensidade, duração e freqüência (i-d-f). Na determinação das curvas i-d-f, deve-se considerar o tempo de retorno ou recorrência de uma determinada precipitação.

Tempo ou período de retorno é o tempo médio em que dado evento ou, para este caso, dada precipitação, probabilisticamente, acontecerá novamente (TUCCI, 2002).

A necessidade de se conhecer as três grandezas que caracterizam as precipitações máximas (intensidade, duração e freqüência) é encontrada para projetos de obras hidráulicas, tais como vertedores de barragens, sistemas de drenagem, galerias pluviais, dimensionamento de bueiros, entre outros, tendo em vista a correlação existente entre chuva e vazão.

A relação entre intensidade, duração e freqüência variam entre largos limites, de local para local e só pode ser determinada, empiricamente, por meio da análise estatística de uma longa série de observações pluviográficas locais, não havendo possibilidade de estender os resultados obtidos em uma região para outras regiões diversas. Correlacionando intensidade e duração, verifica-se que quanto mais intensa for a precipitação, menor será sua duração. A relação das maiores intensidades para cada duração pode ser obtida de uma série de registros pluviográficos de tormentas intensas do local em estudo ou estimada com base nos dados dos postos vizinhos.

Uma das formas da equação i-d-f é apresentada a seguir pela Equação 22:

$$i = \frac{KT^a}{(t+b)^c} \quad \text{eq 22}$$

onde: i : intensidade máxima de precipitação (mm/h);
 T : período de retorno (anos);
 t : duração da chuva (min); e
 K, a, b, c : parâmetros de ajuste.

No cálculo da lâmina d'água considera-se a água que fica retida sobre o revestimento, que é a resposta que o revestimento dá à intensidade da chuva. Inicialmente, o escoamento ocorre pelos canais da rugosidade. Caso a espessura d'água seja superior à textura, o escoamento ocorre sobre as saliências dos granulares do revestimento. Assim, pode-se considerar que nos instantes iniciais de chuva, a água é acumulada sobre o revestimento até que seja atingido o equilíbrio, ou seja, a quantidade de água que cai sobre o revestimento é igual à quantidade escoada (FERREIRA, 2002).

Alguns métodos empíricos foram desenvolvidos para a estimativa da lâmina d'água produzida por determinada precipitação. Um método é o do Laboratório de Pesquisas Rodoviárias (*Road Research Laboratory – RRL*) desenvolvido por Russam & Ross (1968), que estima a lâmina d'água, de acordo com a Equação 23, a partir de dados geométricos da pista e da intensidade de precipitação.

$$LA = 0,046 \cdot \frac{(L_f \cdot i)^2}{S_f^{\frac{1}{5}}} \quad \text{eq 23}$$

onde: LA : lâmina d'água (mm);
 L_f : distância de escoamento (m);
 i : intensidade de precipitação (mm/h); e
 S_f : declividade da distância de escoamento.

A declividade do caminho do escoamento é calculada por meio da declividade transversal e horizontal do pavimento, assumindo uma superfície plana, conforme Equação 24:

$$S_f = (S_l^2 + S_c^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{eq 24}$$

onde: S_l : declividade longitudinal; e
 S_c : declividade transversal.

A distância de escoamento é calculada conforme Equação 25, considerando além das declividades anteriores, a largura da pista.

$$L_f = W \frac{S_f}{S_c} \quad \text{eq 25}$$

onde: W : largura da pista que contribui para o escoamento (m).

Para modelo do RRL recomenda-se para o cálculo da intensidade de precipitação, períodos de retorno de 2 anos e duração da chuva de 5 minutos. O método não considera a profundidade da textura do pavimento e é recomendado para lâminas d'água de até 4mm.

Uma outra solução empírica foi desenvolvida por Gallaway *et al.* (1979), que estimaram a lâmina d'água com base na textura do pavimento, das dimensões da pista e a intensidade de precipitação, conforme apresentado na Equação 26.

$$LA = 0,01485 \cdot \left(\frac{HS^{0,11} \cdot L^{0,43} \cdot I^{0,59}}{S^{0,42}} \right) - HS \quad \text{eq 26}$$

onde: LA : lâmina d'água (mm);
 HS : profundidade da macrotextura (mm);
 L : distância de escoamento (m);
 I : intensidade de precipitação (mm/h); e
 S : declividade transversal (m/m).

Andreatini (1986) considerou para o cálculo da lâmina d'água, o regime de escoamento como um canal aberto de seção retangular com a vazão variando linearmente ao longo do próprio canal. Estimou também o tempo de equilíbrio da lâmina d'água, ou seja, o tempo desde o início da chuva até o equilíbrio da altura da lâmina d'água.

O cálculo da espessura máxima da lâmina d'água e o tempo de equilíbrio podem ser obtidos por meio das Equações 27 e 28:

$$LA = (1,6135 \times 10^{-4} \cdot ip + 5,8548 \cdot C) \cdot ip^{1/3} \cdot i^{-1/3} \cdot L^{1/3} \quad \text{eq 27}$$

e

$$t_e = (0,0145.ip + 527.C).ip^{1/3}.i^{-1/3}.L^{1/3}$$

eq 28

onde: LA : espessura da lâmina d'água (mm);
 t_e : tempo de equilíbrio (s);
 i : declividade transversal (%);
 L = largura da pista (m);
 ip : intensidade de precipitação (mm/h); e
 C : coeficiente relativo à rugosidade do revestimento:
revestimento asfáltico de baixa rugosidade = 0,006 a 0,007;
revestimento asfáltico de média rugosidade = 0,007 a 0,008;
revestimento asfáltico de alta rugosidade = 0,010 a 0,012;
pavimento de concreto = 0,012.

A medição da espessura da película de água aderente ao pavimento também pode ser determinada por meio da refração da luz, decorrente do equipamento “*Water Surface Depth Instrument*”, disponível no Brasil (RODRIGUES FILHO *et al.*, 2006).

2.3. Condições de Superfície de uma Pista

A pesquisa sobre as condições do pavimento é de grande relevância, pois o maior índice de acidentes ocorre nas fases de decolagem e pouso do voo. A Figura 12 mostra dados de acidentes ocorridos entre 1997 e 2006 (BOEING, 2007). Nesse período, as fases de pouso e decolagem foram responsáveis por cerca de 33% dos acidentes, e as vítimas fatais chegaram a 17%. Portanto, é imprescindível que se tenham condições favoráveis para que a aeronave pouse com a mínima perturbação possível.

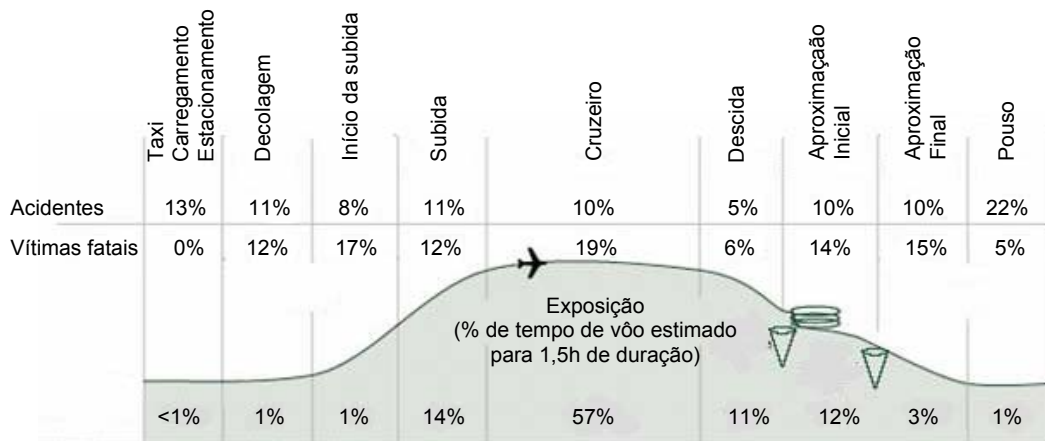


Figura 12 – Acidentes e Fatalidades a Bordo de Aeronaves por fase de voo entre 1997-2006 (BOEING, 2007)

Rodrigues Filho (2006) destaca o homem, a aeronave, a infra-estrutura e a condição meteorológica como os quatro principais fatores para as causas de acidentes aeronáuticos.

Para auxiliar as operações de pouso e de decolagem, os órgãos especializados definem e classificam diversos tipos de condição existentes na pista. A *Joint Aviation Authority* – JAA classifica a condição da pista em quatro tipos: pista seca, úmida, molhada e contaminada. A Agência Nacional de Aviação Civil, por meio da IS-RBHA 121-189 de 2007 (ANAC, 2007), define as condições de superfície de uma pista com base na classificação da JAA e acrescenta mais um tipo, a pista escorregadia, como se segue:

Pista seca: uma pista está seca, por definição, quando não está molhada ou contaminada com qualquer agente líquido ou sólido sendo, portanto, capaz de permitir uma ação de frenagem eficaz mesmo se alguma umidade estiver presente.

Pista úmida: uma pista é considerada úmida quando sua superfície não está seca, mas a umidade existente não resulta numa superfície espelhada.

Pista contaminada: uma pista está contaminada quando mais de 25% de sua superfície (área contínua ou não) dentro do comprimento e da largura utilizáveis está coberta com os seguintes elementos:

- lâmina d'água com mais de 3mm de espessura, por "slush" (mistura de neve com água) ou neve solta equivalente a mais de 3mm de água;
- neve compactada; ou
- gelo, incluindo gelo misturado com água.

Pista molhada: uma pista está molhada quando sua superfície está coberta com água, ou líquido equivalente, mas com menos quantidade do que a quantidade

definida para pista contaminada, ou quando a umidade existente resulta numa superfície espelhada, mas sem poças d'água significativas.

Pista escorregadia: uma pista é considerada escorregadia quando molhada, se o coeficiente de atrito da pista, medido com o Mu-meter numa área significativa para a frenagem de parada, estiver abaixo de 0,42 por mais de 100 metros contínuos. Nesse caso, será expedido um NOTAM (*Notice To AirMen* – Aviso aos Aeronavegantes) com esta informação.

A ICAO classifica as condições de uma pista em:

Úmida: a superfície muda de cor devido à umidade;

Molhada: a superfície apresenta-se molhada, mas sem presença de água parada;

Poças d'água: são visíveis trechos significantes de pista com água parada;

Inundada: é visível uma extensa área com água parada.

Na Figura 13 tem-se a variação do coeficiente de atrito com a taxa de deslizamento do equipamento de medição para diferentes condições de uma pista. Nota-se grande diferença entre os coeficientes de atrito para uma superfície limpa e seca quando comparada com superfícies contaminadas, seja por água, neve ou gelo.

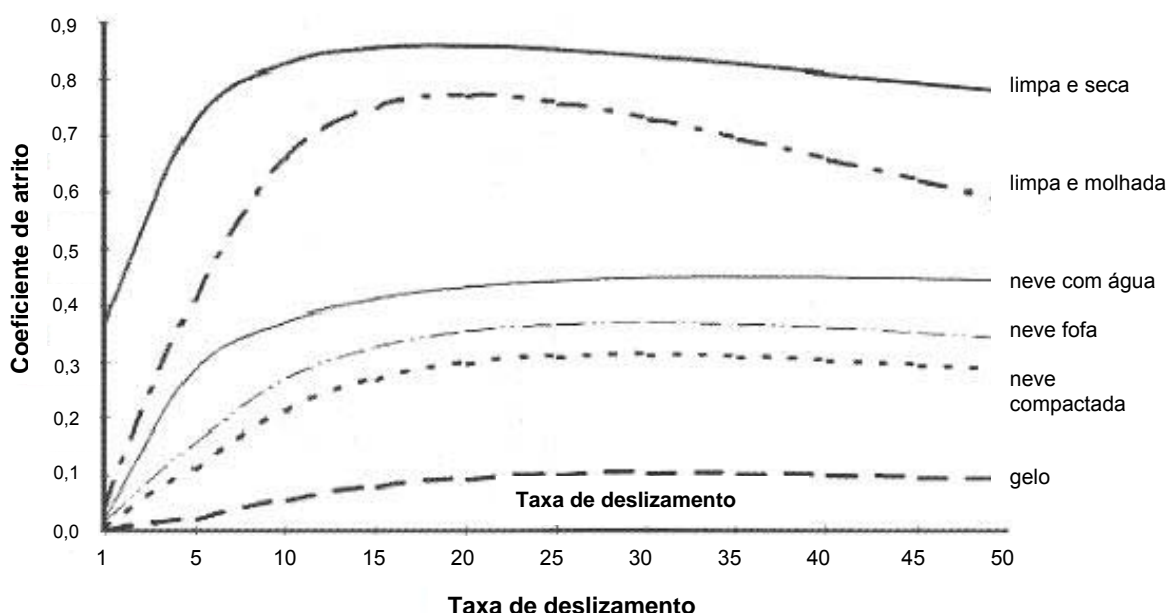


Figura 13 – Variação de atrito para diferentes condições de superfícies (Adaptado de YAGER, 1999)

2.3.1. Características de Textura Superficial de Pavimentos

A textura do revestimento de um pavimento é um parâmetro que pode descrever o comportamento da superfície de uma pista quanto à aderência. Experiências têm revelado que a textura tem atuação importante no atrito a altas velocidades e em pistas molhadas, demonstrando haver correlação entre a textura do revestimento e os índices de derrapagem (MEURER FILHO, 2001).

Conceitualmente, a textura é a característica do revestimento do pavimento que se refere aos materiais dispostos e observáveis na superfície de rolamento. Ela pode ser considerada como uma propriedade que se altera constantemente pela degradação dos materiais componentes do revestimento, decorrentes do tráfego e de agentes agressores. Portanto, a cada instante o revestimento apresenta um estado diferente de textura superficial (FERNANDES & DOMINGUES, 1993).

A textura de uma superfície é definida em quatro classes: a microtextura, a macrotextura, a megatextura e a irregularidade. A Tabela 2 a seguir, apresenta a classificação de acordo com a norma ASTM E867 (1997):

Tabela 2 – Classificação da textura (APS, 2006)

Domínio	Intervalo de dimensão	
	horizontal	vertical
Microtextura	0 – 0,5 mm	0 – 0,2 mm
Macrotextura	0,5 – 50 mm	0,2 – 10 mm
Megatextura	50 – 500 mm	1 – 50 mm
irregularidade	0,5 – 50 m	1 – 200 mm

A microtextura refere-se à textura individual dos agregados constituintes do pavimento, podendo ser lisa ou áspera. A macrotextura depende dos tamanhos e das quantidades relativas dos agregados (faixa granulométrica), pela configuração geométrica do agregado e pelos vazios da mistura, podendo ser fechada ou aberta.

A megatextura está relacionada aos desvios da superfície do pavimento, ocasionado por alguns aspectos como a trilha de roda, os remendos, a desagregação, as panelas, entre outros. A irregularidade refere-se aos desvios de dimensões superiores à megatextura, influenciando na resistência ao rolamento, na dinâmica do veículo, o conforto e também o custo de manutenção do veículo.

Segundo Silva (1981), o atrito e a drenagem superficial de uma determinada pista podem ser caracterizados a partir de conceitos de micro e macrotextura da superfície. Para este trabalho foram estudadas questões relativas à micro e à macrotextura por se tratar da aderência entre pneu-pavimento.

De acordo com Gillespie (1992), o mecanismo de força de atrito por histerese está relacionado com a macrotextura da superfície do pavimento, enquanto que a força de atrito por adesão é ligada à microtextura do pavimento. A Figura 14 ilustra o efeito da microtextura no valor do coeficiente de atrito em função da velocidade.

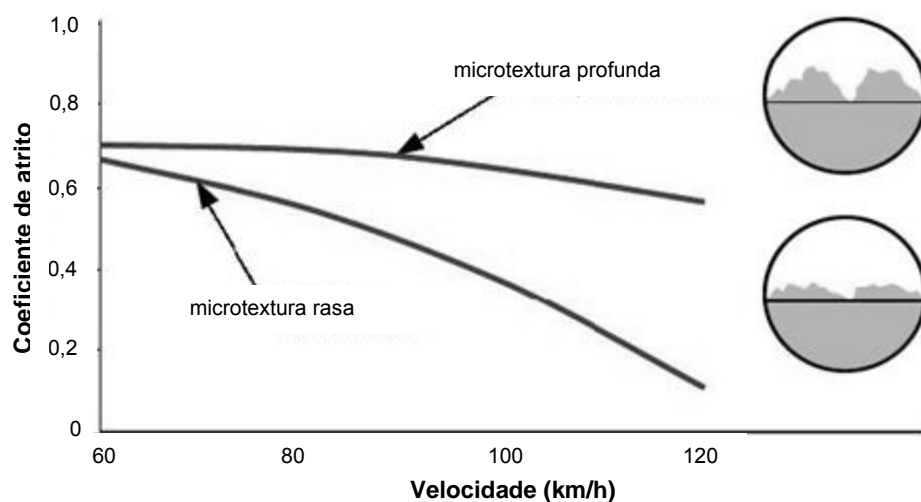


Figura 14 – Influência da microtextura no atrito (OLIVER, 2003)

2.3.2. Classificação das Superfícies

Para o pavimento proporcionar boa aderência na interação com o pneu, sobretudo na presença de água, é necessário que a superfície apresente textura capaz de fornecer o adequado potencial de drenagem, eliminando a água pelos microcanais formados pela macrotextura, além de conter em sua composição agregados que apresentem rugosidade suficiente para romper a lâmina de água, ou seja, boa microtextura (APS, 2006).

Os pavimentos são classificados em quatro tipos de acordo com a rugosidade da macro e da microtextura da superfície (ESDU, 1971; SILVA, 1981; SANTOS, 2004; RODRIGUES FILHO, 2006). A Figura 15 apresenta uma ilustração dessas superfícies.

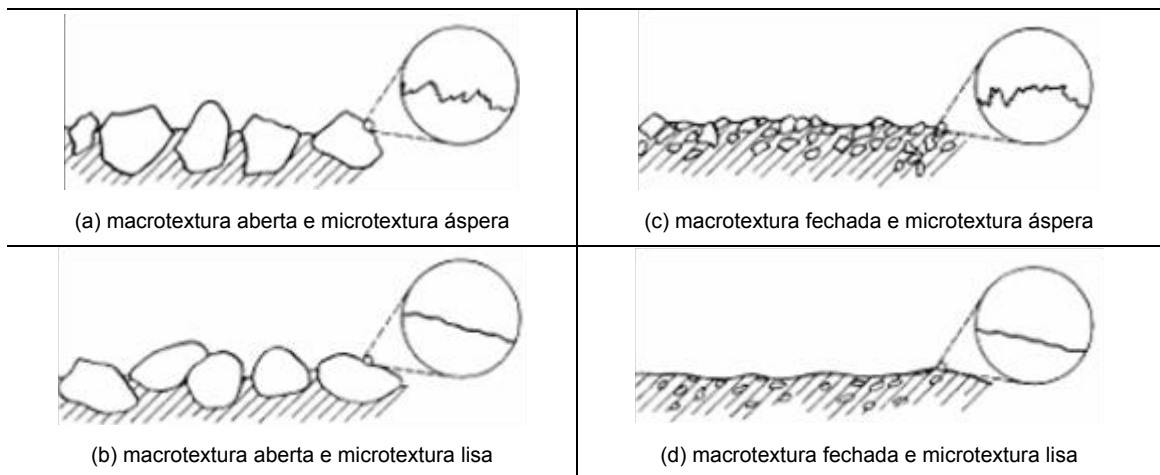


Figura 15 – Classificação das superfícies de pavimentos (Adaptado de ESDU, 1971)

Superfície com macrotextura fechada e microtextura lisa

Nesse tipo de superfície, predominam as perdas por adesão. O coeficiente de atrito diminui levemente com o aumento da temperatura e a pressão dos pneus. Mesmo com a pista seca, o valor da força de frenagem é reduzido, devido aos valores pequenos de atrito por adesão e por histerese, fazendo com que uma aeronave necessite de uma distância maior para executar uma frenagem.

A pista quando úmida ou molhada proporciona coeficientes de atrito reduzido a qualquer velocidade devido à hidroplanagem viscosa, pois o pneu não consegue expulsar completamente a água da área de contato no intervalo de tempo disponível. Uma fina película de água se interpõe entre a banda de rodagem e a pista, eliminando as perdas de energia cinética por adesão (SILVA, 1981).

Silva (1981) destaca ainda que, quando uma pista com essa textura é inundada, a hidroplanagem viscosa é contínua e gradualmente substituída pela hidroplanagem dinâmica, na medida em que a velocidade aumenta. A ausência de macrotextura faz com que a lâmina crítica de água necessária para ocorrência de hidroplanagem dinâmica seja pequena. Para pistas com essa textura, as ranhuras na banda de rodagem são muito importantes para a prevenção tanto da hidroplanagem viscosa como da dinâmica.

Superfície com macrotextura fechada e microtextura áspera

Esse tipo de superfície, na condição seca, proporciona valores de atrito levemente inferiores àqueles proporcionados por uma pista de microtextura lisa, porque há

diminuição da área real de contato e menor adesão. As perdas por adesão predominam, mas a contribuição das perdas por histerese devidas à macrotextura são superiores a 25% do valor do coeficiente de atrito (SILVA, 1981).

Na prática, Rodrigues Filho (2006) descreveu que essa redução é pouco importante e inteiramente compensada pelo incremento que essa microtextura proporciona ao atrito da pista, quando molhada. As asperezas perfuram e atravessam a fina película de água em milhares de pontos, tornando possíveis as perdas por adesão nos pontos de contato teoricamente secos. Nesse tipo de pista, as ranhuras da banda de rodagem são importantes para prevenir a hidroplanagem dinâmica.

Superfície com macrotextura aberta e microtextura lisa

Pavimentos desse tipo apresentam menor valor de atrito por adesão, devido à menor capacidade da borracha (da banda de rodagem do pneu) aderir à microtextura mais suave do pavimento. Em pistas de pouso com altas taxas de utilização, o material agregado da superfície costuma se desgastar, principalmente se o agregado for menos resistente à abrasão, perdendo então suas características de atrito, especialmente na condição de pista molhada.

Uma pista seca com macrotextura aberta e microtextura lisa proporciona coeficientes de atrito similares aos oferecidos pela pista de textura fechada e lisa. Se a macrotextura for muito aberta os valores serão levemente inferiores, pois as perdas por adesão predominam. As perdas por histerese devidas à macrotextura podem alcançar 25% do valor do coeficiente de atrito (SILVA, 1981).

O atrito por histerese em pista molhada é responsável pela maior parte da força de frenagem. Pneus construídos com materiais que permitam valores altos de coeficiente de atrito por histerese apresentam melhor desempenho nessas condições. Como esse tipo de pavimento possui uma macrotextura aberta, o escoamento da água acumulada sobre o pavimento ainda é passível de acontecer, diminuindo os riscos de hidroplanagem.

Superfície com macrotextura aberta e microtextura áspera

Superfícies caracterizadas por apresentarem uma macrotextura aberta e uma microtextura rugosa e áspera permitem alta adesão entre a borracha do pneu e o

pavimento. Esse tipo de pavimento proporciona ainda, um alto índice de histerese da borracha quando esta se deforma para acompanhar as saliências do piso.

A microtextura áspera diminui o potencial da ocorrência da hidroplanagem viscosa e a macrotextura aberta dificulta a ocorrência da hidroplanagem dinâmica, sendo que a profundidade da lâmina d'água crítica aumenta consideravelmente (RODRIGUES FILHO, 2006).

Esses pavimentos não sofrem perda acentuada de propriedades de atrito na presença de água, devido à capacidade de permitir o escoamento do fluido quando da movimentação do pneu sobre o pavimento, em qualquer velocidade de deslocamento da aeronave. São pavimentos típicos de pistas recém-construídas, que não sofreram desgaste do seu material agregado na superfície, ou de pistas construídas com material granulado provenientes de rochas mais resistentes, mantendo suas características em relação ao atrito por mais tempo (SANTOS, 2004).

2.3.3. Emborrachamento de Pistas de Aeroportos

A macrotextura de uma pista não se altera, consideravelmente, ao longo do tempo, exceto nas áreas de toque como resultado do depósito de borracha. Os procedimentos de manutenção para remoção dos resíduos de borracha também causam alteração na macrotextura (RODRIGUES FILHO, 2006).

Na Figura 16, tem-se o resultado de medição de atrito realizado com o equipamento Griptester a 95 km/h, afastado 5 m do eixo da pista, em que é nítido o efeito do acúmulo de borracha na zona de toque das aeronaves, círculo em destaque, resultando em baixos valores de coeficiente de atrito. Os valores do coeficiente de atrito são comparados com os recomendados pela ICAO (2004).

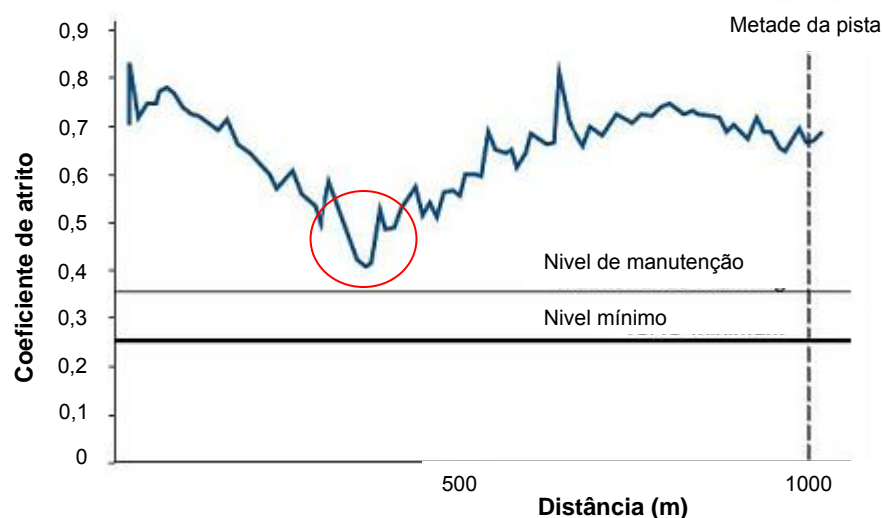


Figura 16 – Efeito típico do acúmulo de borracha (OPUS, 2004)

Os serviços de remoção de borracha têm por objetivo preservar ou restaurar as condições de aderência dos revestimentos das pistas. Normalmente, esses serviços são realizados nos períodos de menor movimento de aeronaves (geralmente à noite), de modo a causar o menor impacto nas operações. São executados periodicamente e estão intimamente ligados às medições de atrito.

A frequência de limpeza da pista recomendada pela FAA está descrita na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Intervalos máximos para limpeza da pista (FAA, 1997)

Pousos diários de aeronaves a reação	Massa anual dos pousos (10⁶ kg)	Período máximo entre remoções de borracha
menos de 15	Menos de 447	2 anos
de 16 a 30	de 448 a 838	1 ano
de 31 a 90	de 839 a 2.404	6 meses
de 91 a 150	de 2.405 a 3.969	4 meses
de 151 a 210	de 3.970 a 5.535	3 meses
mais que 210	mais de 5.535	2 meses

Métodos para remoção de borracha e outros contaminantes

As técnicas para a remoção de contaminantes em pistas de aeroportos são:

- remoção com jatos de água a alta pressão;
- remoção química;
- remoção por alta velocidade de impacto;
- remoção mecânica.

Jatos de água a alta pressão

A remoção é feita por meio de equipamento giratório, com movimentos lentamente ao longo da superfície a ser limpa, usando pressões entre 2.000 e 15.000psi (entre \approx 14 MPa e 103 MPa). No ponto de aplicação, a água a alta pressão penetra na superfície limpando efetivamente os depósitos de borracha na pista, melhorando as características de atrito do pavimento.

Atualmente, existem equipamentos que operam a pressões elevadíssimas, podendo chegar a 40.000psi (\approx 275 MPa). Devido à aplicação de água a altíssima pressão, pode ocorrer o polimento da superfície depois de repetidas limpezas.

A pressão a ser adotada depende da espessura da borracha e do tipo de revestimento do pavimento. Experiências demonstram que a remoção de borracha é facilmente executada em pavimentos estriados de concreto e carece de maiores cuidados em pavimentos asfálticos em virtude da possibilidade de desagregação (ARAÚJO, 1994).

Em se tratando de CPA, segundo Moreira (1992)⁷ *apud* Araújo (1994), pressões acima de 14,7 MPa provocam desagregação superficial do revestimento.

Remoção química

Os solventes químicos representam uma solução que apesar de apresentar bons resultados, sofrem restrições em relação à questão ambiental, devido à natureza volátil e tóxica dos produtos empregados, que devem ser manuseados com extremo cuidado durante e após sua aplicação, além de cuidados com seu grau de diluição.

Atualmente, a INFRAERO utiliza um produto desenvolvido especificamente para pistas de aeroportos para a remoção da borracha impregnada no pavimento.

Alta velocidade de impacto

Esse método consiste no lançamento de partículas abrasivas a elevada velocidade sobre a superfície do pavimento. O equipamento possui um sistema auto-coletor que recolhe de volta as partículas lançadas, e também a borracha desprendida do pavimento. O equipamento é projetado para reciclar as partículas abrasivas para repetidas operações de limpeza.

⁷ MOREIRA, M. J. **Camada Porosa de Atrito do Aeroporto Santos Dumont: Execução, Manutenção e Recuperação**. In: Seminário de Manutenção de Aeroportos, OACI, DIRENG, INFRAERO. São Paulo. 1992. 31p.

Remoção mecânica

É utilizado um esmeril para a remoção de depósitos de borracha de grande espessura, removendo camadas de borracha entre 3,2 a 4,8mm (FAA, 1997).

2.4. Camada Porosa de Atrito - CPA

Por suas características tropicais, diversas regiões do Brasil estão expostas a constantes chuvas, contribuindo para o aumento de acidentes, uma vez que as condições de aderência pioram consideravelmente. Dessa forma, intervenções no pavimento são necessárias para minimizar os efeitos da chuva nos níveis de aderência entre pneu e pavimento (NASCIMENTO & REIS, 1999).

Algumas soluções são utilizadas para eliminar ou minimizar a película de água na superfície dos pavimentos, como por exemplo, a imposição de declividades horizontal e longitudinal no projeto geométrico. A resultante dessas declividades permite o escoamento da água, com velocidade e vazão adequadas para um sistema de coleta de descarga. Contudo, nem sempre é possível impor essa declividade na medida desejada. Outro procedimento possível é a utilização de misturas na camada de rolamento (capa) e/ou na camada intermediária (binder), entre a capa e a camada de base, cujas granulometrias determinem certa permeabilidade. Dessa maneira, a camada intermediária assume a função drenante, conduzindo a água até os dispositivos de descarga. Para camadas de rolamento, tem-se estudado misturas asfálticas cujas texturas permitem a melhor aderência entre o pneu e o pavimento, como exemplo, a Camada Porosa de Atrito (SILVA, 2005).

A execução de pavimentos com misturas asfálticas com granulometrias abertas tem-se mostrado eficiente principalmente no quesito drenagem, atuando no rápido escoamento da água, reduzindo o potencial de hidroplanagem de veículos e de aeronaves.

A Camada Porosa de Atrito, de acordo com a norma DNER-ES 386/99 (DNER, 1999), é um pré-misturado a quente com asfalto polímero, podendo ser empregado como camada sobrejacente ao revestimento, possuindo característica drenante e uma melhor aderência entre pneu e pavimento.

A camada porosa de atrito foi desenvolvida pela *British Airport Authority* (BAA), em 1960, em Londres. Tem grande aplicação na Inglaterra, Escócia e Estados Unidos (ARAÚJO, 1994).

A maioria dos aeroportos administrados pela BAA, como os aeroportos de Gatwick, Heathrow, Liverpool, London Southend, Prestiwick e Stanstead possuem a CPA em suas pistas de pousos e decolagens, sendo executados desde a década de 60.

Nos Estados Unidos, a maioria dos pequenos e médios aeroportos também adota a CPA em suas pistas, utilizando-a também em alguns aeroportos internacionais, como o Aeroporto Internacional de Palm Spring.

Em aeroportos brasileiros, a camada porosa de atrito está presente no Rio de Janeiro e em Minas Gerais, nos Aeroportos Santos Dumont e Tancredo Neves, respectivamente. A CPA foi executada primeiramente no Aeroporto Internacional Tancredo Neves, em 1983 e posteriormente, em 1987, no Santos Dumont.

A experiência brasileira na execução de CPA em rodovias teve início em 1992, com a implantação de um trecho experimental da DERSA na Rodovia dos Bandeirantes – SP348 (MELO, 2005).

Em meados de 2004, na Rodovia SP – 340, sob concessão da Renovias, executou-se a camada porosa de atrito (CPA) utilizando asfalto com borracha reciclada de pneu (SILVA, 2005).

De maneira geral, as principais vantagens da Camada Porosa de Atrito são (MELO, 2005):

- elevada capacidade de drenagem;
- redução dos riscos de hidroplanagem;
- redução das distâncias de frenagem sob chuva;
- aumento de distância de visibilidade e diminuição de projeção da cortina de água (spray);
- menor reflexão luminosa do pavimento molhado, tanto de dia como sob iluminação noturna;
- maior percepção de sinalização vertical durante a noite;
- redução dos níveis de ruído do tráfego; e
- redução dos níveis de “stress” do usuário.

Para Lefebvre (1993), as razões para o emprego do asfalto poroso são claras. Alguns elementos são determinantes em sua escolha, como a vantagem de visibilidade durante chuvas, a possibilidade da redução de ruídos e outra, talvez a decisiva, a redução do risco de hidroplanagem.

Na Figura 17 tem-se um pavimento com dois trechos diferentes, um com asfalto poroso e outro com asfalto tradicional, onde se pode visualizar a nítida diferença de eficiência na drenagem.



Figura 17 – Diferença de drenabilidade (ADAMS, 2003)

Em aeroportos, a principal razão para sua aplicação é a característica drenante, atuando diretamente na diminuição do potencial de hidroplanagem de aeronaves. A drenagem é realizada através de seu alto percentual de vazios e pela interconexão desses vazios, permitindo que a água infiltre na camada porosa e escoe pela camada subjacente para fora do pavimento.

Em um CBUQ tradicional, o índice de vazios varia na faixa de 3 a 5%. No caso da camada porosa de atrito, esse índice pode chegar a 25%. Na Figura 18, tem-se um corpo-de-prova extraído de um revestimento com camada porosa de atrito.



Figura 18 – Corpo-de-prova (BERNUCCI, 2005)

A Figura 19 apresenta uma comparação da Camada Porosa (a) com CBUQ (b), subjacente à CPA no Aeroporto Internacional Tancredo Neves.



Figura 19 – Camada Porosa (a) e CBUQ Tradicional (b)

O detalhe da espessura da camada porosa é mostrado na Figura 20. A CPA não possui qualquer função estrutural no pavimento, sua pequena espessura, cerca de 3 cm, é utilizada apenas para o aspecto funcional do pavimento.



Figura 20 – Detalhe da espessura da CPA

Um conceito tradicional sobre um determinado revestimento é que ele deve ser impermeável; assim, um revestimento composto por camada drenante ou poroso aplicado sobre uma camada impermeável desempenha duas funções, selando a estrutura do pavimento e evitando o escoamento superficial das águas precipitadas (SILVA, 2005).

Uma das mais importantes pesquisas realizadas sobre aderência pneu-pavimento em aeroportos foi desenvolvida pela NASA em 1990. Analisaram-se diversos tipos de superfícies, com dois tipos de aeronaves da Boeing (737-200 e 737-100) de

propriedade da NASA e da FAA, respectivamente, operando em situações críticas (YAGER *et al.*, 1990).

Os testes com camada porosa nessa pesquisa da NASA foram realizados no Aeroporto da Pease Air Force Base em Portsmouth, construído em 1985, com 19 mm de espessura da camada. Dentre os vários resultados, um que chama atenção é o coeficiente de atrito na superfície com camada porosa, quando submetida à uma intensidade de precipitação de 0,25 mm/h em comparação com todas outras superfícies estudadas em condições secas, em que, praticamente, não houve diferenças no valor do coeficiente de atrito na maioria dos equipamentos de medição utilizados, conforme mostrado na Figura 21.

Para definição da macrotextura, a NASA utilizou um equipamento que possui os mesmos princípios do ensaio de mancha de areia, com valor de 1,25 mm para a pista da Pease Air Force Base, sendo os valores na faixa de 2,1 a 3,0 mm, em comparação com o ensaio de mancha de areia.

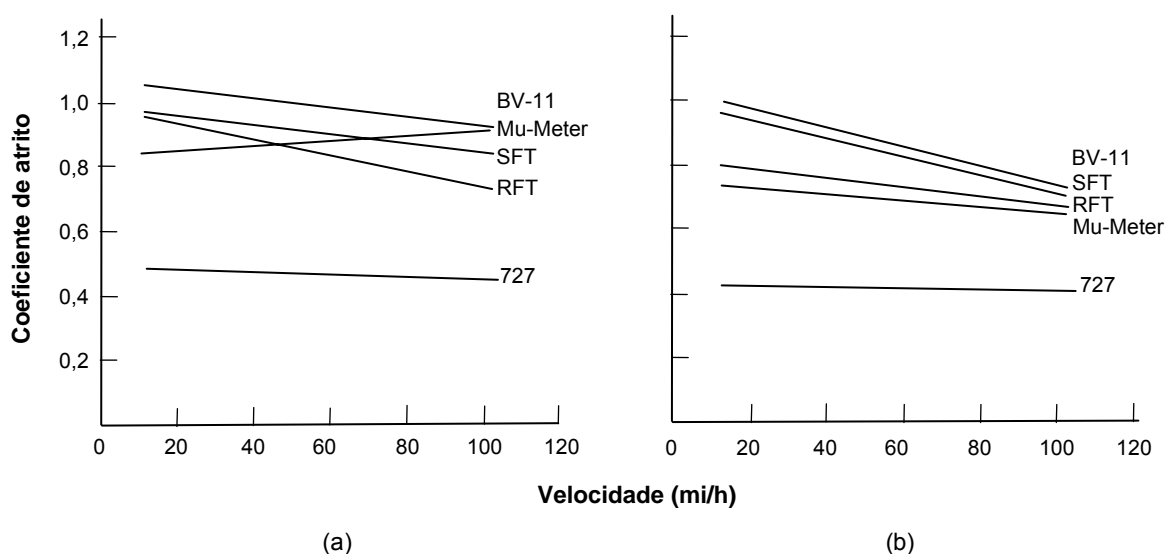


Figura 21* – Comparação do coeficiente de atrito (μ) para superfícies secas (a) e a camada porosa (b) com filme de água de 0,25mm (Adaptado de YAGER *et al.*, 1990)

Embora existam muitas vantagens em sua aplicação, algumas desvantagens da camada porosa de atrito devem ser avaliadas antes de sua escolha:

- em geral, o custo de construção da camada porosa é mais elevado em relação aos asfaltos tradicionais (LEFEBVRE, 1993; PORTO, 1999);

* os equipamentos de medição de atrito BV-11, Mu-meter, SFT e RFT estão detalhados no item 3.5

- necessitam de agregados com alta resistência ao polimento e ao choque, e requerem precisão na construção para o controle de temperatura da mistura, do ar e da umidade (LEFEBVRE, 1993);
- a vida útil do pavimento poroso geralmente é menor que em pavimentos tradicionais, sendo necessária constante manutenção;
- um dos problemas mais freqüentes encontrados em pavimentos drenantes deve-se a colmatação dos poros por contaminantes, sobretudo a borracha dos pneus, ao longo de sua vida útil, reduzindo gradativamente as funções de drenagem e acústicas do pavimento, perdendo suas vantagens com relação aos revestimentos convencionais (HORNE, 1977; SANTOS, 2004; SILVA, 2005);
- Bochove (1995) ressaltou a quantidade de poluição, o tamanho e a estrutura dos vazios, a declividade da camada subjacente à camada drenante, a velocidade e o efeito limpante do tráfego, como os principais fatores para que ocorra a colmatação do pavimento;
- Porto (1999) observou um maior poder de desagregação superficial para misturas com teor de vazios maiores que 25%.
- Em aeroportos com alto movimento de aeronaves, o acúmulo de borracha torna-se um sério problema quando não monitorado adequadamente. A remoção da borracha tem que ser feita de forma constante e eficiente. Quando a borracha recobre completamente a superfície do pavimento a drenagem interna fica comprometida. Quando isso acontece é praticamente impossível remover a borracha sem que ocorram sérios danos na estrutura da CPA. Por esse motivo, a FAA não recomenda a utilização da camada porosa para aeroportos com tráfego acima de 91 pousos diários de aeronaves à reação por cabeceira (FAA, 1997).

2.4.1. CPA no Aeroporto Internacional Tancredo Neves

O Aeroporto Internacional Tancredo Neves foi o primeiro aeroporto no Brasil a utilizar a CPA. Engenheiros da DIRENG visitaram aeroportos do Reino Unido para constatar o seu comportamento funcional, bem como adaptá-la às condições brasileiras (ARAUJO, 1994).

Para a execução da camada porosa de atrito no aeroporto, utilizou-se a recomendação da DIRENG, faixa B, de granulometria descontínua constituindo-se, praticamente, de material passando na peneira n°1/2" e retido na peneira n°4.

Foi utilizada a brita n°0, de rocha gnaíssica de procedência da BRIVEL (Britadora Rio das Velhas Ltda). Os agregados miúdos, pó calcário e areia artificial, são de procedência da Mineração Lapa Vermelha. A cal hidratada é de procedência da ICAL (Indústria de Calcinação).

A composição granulométrica dos agregados foi distribuída da seguinte forma:

- brita n°0	(1,875 mm – 12,7 mm):	76%
- pó de pedra	(0 – 1,875 mm):	12%
- areia artificial	(3,175 mm – 6,35 mm):	10,5%
- cal hidratada		1,5%

Na Tabela 4 tem-se a especificação da mistura executada segundo recomendações da DIRENG para a camada porosa de atrito.

Tabela 4 – Especificação para a faixa granulométrica da mistura

Peneiras		% em peso passando		
n°	abertura (mm)	mistura executada	faixa de trabalho	Faixa B - DIRENG
1/2"	12,7	99,7	93 – 100	100
3/8"	9,5	90,8	90,3 – 100	80 – 100
n° 4	4,8	30,6	27,6 – 40,6	20 – 40
n° 8	2,4	16,4	12,9 – 20,9	12 – 20
n° 30	0,6	10,7	8,0 – 14,0	8 – 14
n° 200	0,074	5,8	3,8 – 5,0	3 – 5

O teor de betume foi determinado pelo Método da Superfície Específica, conforme Equação 29.

$$100S = 0,17A + 0,33B + 2,30C + 12D + 135F \quad \text{eq 29}$$

onde:

- A: % maior que a # 3/8";
- B: % maior que a # 4 e menor ou igual a # 3/8";
- C: % maior que a # 40 e menor ou igual a # 4;
- D: % maior que a # 200 e menor ou igual a # 40;
- F: % passando na # 200;
- S: % superfície específica em m²/kg.

$$P = 3,75 \cdot \sqrt[5]{S} \quad \text{eq 30}$$

onde: P : teor de asfalto em peso;
3,75: módulo de riqueza.

A porcentagem de betume se refere à mistura de agregados considerada como 100%.

O teor de ligante betuminoso utilizado foi de 5%, dosado pelo método da superfície específica do agregado e, também de modo a obter-se um índice de vazios dentro das especificações para a camada porosa. A princípio o teor ótimo estava em 5,7%; porém, não foi possível atender às condições de índice de vazios entre 20 a 25%, com temperatura de 140°C. O teor de ligante foi fixado em 5% e variou-se a temperatura até obter-se um índice de vazios de 17,8% para uma temperatura de 80°C.

As principais características das misturas asfálticas que influenciam na textura são: a distribuição granulométrica dos agregados e fíler; e natureza, forma e microtextura superficial dos agregados, principalmente os das frações graúdas (agregados retidos na peneira nº4). O ligante asfáltico influencia pouco na textura resultante; sua importância é indireta e relativa à resistência à desagregação dos revestimentos que podem, após uso pelo tráfego e ação das intempéries, sofrerem arrancamento de agregados, tendo como consequência a alteração da textura superficial (APS, 2006).

2.5. Medidas de Atrito

Dentre os vários equipamentos de medição de atrito, alguns são estáticos e a maioria, dinâmicos (medição contínua). Os dinâmicos podem ser de roda oblíqua, roda bloqueada ou parcialmente bloqueada. A FAA, por meio de *Advisory Circular*, homologa os equipamentos de medição contínua de atrito. Atualmente, através da AC N°150/5320-12C change 8 de 02/07/2007, estão homologados os equipamentos constantes na Tabela 5.

Tabela 5 – Equipamentos de medição de atrito

Equipamento	Fabricante
Airport Surface Friction Tester	Airport Surface Friction Tester Industries AB
Runway Friction Tester (6810,6850,6875)	Dynatest Consulting, INC.
Sarsys Friction Tester (SFT)	Scandinavian Airport and Road Systems AB
Griptester Friction Tester	Findlay, Irvine, LTD
NAC Dynamic Friction Tester	Neubert Aero Corp.
RUNAR Runway Analyser and Recorder	Norsemeter
BV-11 Skiddometer	Patria Vammas AEC
Sarsys Trailer Friction Tester (STFT)	Scandinavian Airport and Road Systems AB
Sarsys Suv Friction Tester (SSFT)	Scandinavian Airport and Road Systems AB
Mu-meter	Douglas Equipment, LTD

Adaptado de FAA, 2007.

Equipamentos inseridos em veículos

Airport Surface Friction Tester

A Figura 22 mostra o veículo realizando o teste em pista coberta por neve. A medição do atrito é realizada com a roda instalada no eixo traseiro a uma taxa de deslizamento de 12%. O pneu possui formato e material semelhantes a de um pneu normal de uma aeronave.



Figura 22 – *Airport Surface Friction Tester*. (Foto: Yager, 2006)

Runway Friction Tester (RFT) – Roda Parcialmente Bloqueada

O equipamento é montado dentro de um veículo, cuja roda de medição de atrito está instalada no eixo traseiro. A roda de medição tem a rotação retardada e opera com uma taxa de deslizamento controlada de 13,5%. A Figura 23 mostra o veículo modelo 6875.



Figura 23 – *Runway Friction Tester*, Foto: www.dynatest.com (22/10/2007)

Sarsys Friction Tester (SFT) – Roda Parcialmente Bloqueada

A Figura 24 ilustra o Sarsys Friction Tester e detalhes do equipamento de medição instalado dentro do veículo. Opera com taxa de deslizamento de 15% para pneus novos. A medição do atrito contínuo é realizada por uma quinta roda instalada no porta-malas do veículo.



Figura 24 – *SFT*, Fonte: www.sarsys.se (22/10/2007)

Equipamentos rebocados por veículos

GripTester - Roda Parcialmente bloqueada

Equipamento que também realiza as medidas de atrito contínuo, constituído por um reboque de três rodas do tipo deslizômetro (*skiddometer*). A roda central é responsável pela medida do atrito com rotação retardada, operando com uma taxa de deslizamento de 15%. A Figura 25 mostra o equipamento.



Figura 25 – *Griptester*, Foto: www.mastrad.com (22/10/2007)

NAC Dynamic Friction Tester

Equipamento com capacidade de separar valores de atrito com a roda girando, μ_r (roll), e com a roda deslizando, μ_s (slip), permitindo ainda a caracterização do fluido contaminante. Possui transmissão de dados com tecnologia WiFi (sem fio). A Figura 26 mostra o equipamento sendo rebocado para a realização do teste.



Figura 26 – *NAC*, Foto: www.airportnac.com (20/05/2007)

RUNAR

A Figura 27 mostra o equipamento da Norsemeter em operação. A medição de atrito pode ser feita com deslizamento fixo ou variável.



Figura 27 – *RUNAR* (Foto: Yager, 2006)

BV-11 Skiddometer – Roda parcialmente bloqueada

Esse equipamento que realiza as medidas de atrito contínuo, constituído por reboque de três rodas do tipo deslizômetro (*skiddometer*). As duas rodas laterais giram livremente, e a roda central, é responsável pela medição do atrito, com sua rotação retardada, operando com uma taxa de deslizamento de 17%. A Figura 28 mostra o equipamento.



Figura 28 – BV-11 Skiddometer (Foto: Yager, 2006)

Sarsys Trailer Friction Tester (STFT)

Trailer rebocado, também produzido pela Sarsys, foi desenvolvido para pistas de aeroportos, atualmente operando também em rodovias. A medição é realizada com uma taxa de deslizamento de 15% para pneus novos. A Figura 29 mostra o equipamento e também uma ilustração interna do sistema de medição.



(a)



(b)

Figura 29 – STFT (a) e ilustração do equipamento (b), Foto: www.sarsys.se (22/10/2007)

Mu-meter (Roda Oblíqua)

De todos os aparelhos utilizados para aferir o coeficiente de atrito de pistas de aeroportos, o mais utilizado no Brasil é o Mu-meter. A Figura 30 mostra o Mu-meter, modelo MK6.



Figura 30 – *Mu-meter* MK6

O Mu-meter é um instrumento de teste de superfície de pista que infere um valor de coeficiente de atrito de frenagem a partir da medida da força lateral nos eixos de duas rodas lisas, chamadas *friction wheels (FW)*, instaladas num veículo de reboque. Em geral, as *FW* têm um alinhamento convergente em relação à direção longitudinal do reboque, com um ângulo de convergência de, aproximadamente, $7,5^\circ$, que produz uma taxa de escorregamento aparente de, aproximadamente, 13%. Uma terceira roda traseira, alinhada normalmente, mede a distância percorrida e estabiliza o movimento do reboque (SANTOS, 2004). A Figura 31 esquematiza o equipamento.

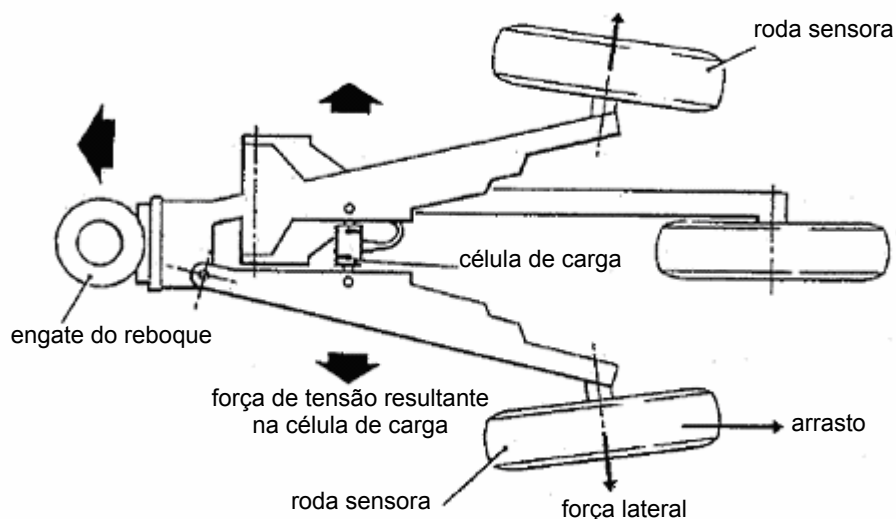


Figura 31 – Desenho esquemático do Mu-meter

Há um sistema espargidor que aplica uma película d'água de espessura média de 1mm à frente das rodas sensoras. A velocidade do equipamento pode ser ajustável, sendo a mais comum de 65 km/h e seu procedimento está descrito na ASTM E-670 (2000).

Quando o veículo reboca o Mu-meter para efetuar uma medição, o atrito gerado entre os pneus laterais e o pavimento força os membros laterais do chassi a se afastar, o que gera forças de tensão na célula de carga ligada aos dois braços do chassi. O sinal de força e o sinal de distância percorrida medida são enviados para uma unidade de processamento conectada a um computador portátil (disponível para o modelo MK6), e as informações são repassadas em tempo real, de dentro do veículo rebocador.

Um carregamento de 77,5 kgf é aplicado em cada *FW* através de um lastro colocado nos amortecedores. Os pneus de todas as três rodas têm dimensões 16 x 4 com 6 lonas, modelo RL2. Os pneus das *FW* são de desenho liso e possuem pressão de 10 lbf/in² enquanto o pneu traseiro, o qual mede a distância percorrida, tem desenho convencional e pressão de 30 lbf/in² (SANTOS, 2004).

Pêndulo Britânico

O Pêndulo Britânico é o principal equipamento portátil, cuja utilização é padronizada pela norma ASTM-E-303-93 (1998).

O pêndulo britânico determina por uma medida escalar o grau de aderência entre pneu e pavimento presente na superfície de um pavimento, conhecido também como coeficiente de atrito cinemático.

Esse equipamento consiste de uma placa de borracha simulando a superfície de um pneumático de veículo automotor montada no extremo de um pêndulo que, liberado em queda livre, descreve um arco circular que tangencia e fricciona a superfície do pavimento onde se coloca o equipamento para o ensaio. A perda de energia decorrente desse movimento serve como medida de atrito e é registrada em uma escala graduada. As condições do ensaio foram definidas de tal forma que os valores apresentados no mostrador do equipamento correspondem ao Valor de Resistência à Derrapagem – VRD (ou *British Pendulum Number* - BPN) de um pneumático padrão derrapando sobre o pavimento a 48 km/h (DNIT, 2006).

O Pêndulo Britânico é um dos dispositivos mais difundidos internacionalmente devido ao seu baixo custo e facilidade de operação. A Figura 32 mostra o equipamento com a haste posicionada para sua liberação.



Figura 32 – Pêndulo Britânico

No Brasil, o DNIT em seu Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), sugere valores mínimos de BPN ou VRD acima de 55. A ARTESP (Agência de Transportes de São Paulo) estabelece classes de microtextura com o Pêndulo Britânico, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação da microtextura com o Pêndulo Britânico (ABPv, 1998)

Classificação	Limites
perigosa	< 25
muito lisa	25 – 31
lisa	32 – 39
insuficientemente rugosa	40 – 46
mediamente rugosa	47 – 54
rugosa	55 – 75
muito rugosa	> 75

2.5.1. Parâmetros de Atrito

No Brasil, a ANAC estabeleceu, por meio da IAC-4302 – *Requisitos de resistência à derrapagem para pistas de pouso e decolagem (2001)*, os níveis mínimos de atrito medidos com o equipamento Mu-Meter.

Considera-se como *nível de manutenção* o valor de atrito de 0,50, excetuado 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, não poderá ser inferior ao nível de manutenção. Sempre que apresentar atrito inferior ao nível de manutenção na extensão de mais de 100 metros de pista, 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, com vistas a restaurar o nível de atrito exigido.

A ICAO (2004) estabeleceu valores de coeficiente de atrito para uma lâmina d'água de 1 mm, conforme o tipo de equipamento utilizado na medição, constantes na Tabela 7:

Tabela 7 – Valores mínimos de atrito (Adaptado de ICAO, 2004)

Equipamento	Tipo de pneu	Pressão no pneu (kPa)	Velocidade de teste (km/h)	Pista nova	Nível de manutenção	Nível mínimo admissível
Mu-meter	A	70	65	0,72	0,52	0,42
	A	70	95	0,66	0,38	0,26
Skkidometer	B	210	65	0,82	0,60	0,50
	B	210	95	0,74	0,47	0,34
Surface Friction	B	210	65	0,82	0,60	0,50
Tester Vehicle	B	210	95	0,74	0,47	0,34
Runway Friction	B	210	65	0,82	0,60	0,50
Tester Vehicle	B	210	95	0,74	0,54	0,41
TATRA Friction	B	210	65	0,76	0,57	0,48
Tester Vehicle	B	210	95	0,67	0,52	0,42
Griptester	C	140	65	0,74	0,53	0,43
	C	140	95	0,64	0,36	0,24

A CAA recomendou valores de atrito para os dois equipamentos mais utilizados no Reino Unido, conforme Tabela 8:

Tabela 8 – Valores mínimos de atrito (Adaptado de CAA, 2004)

Equipamento	Pista nova	Nível de manutenção	Nível mínimo admissível
Mu-meter	0,72	0,57	0,50
Griptester	0,80	0,63	0,55

Ainda de acordo com a IAC-4302 (2001), a ANAC estabeleceu periodicidade das medições de atrito para os aeroportos nacionais, com base nos resultados de estudos conduzidos por agências especializadas de diferentes países desenvolvidos, 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)*”, conforme descrito na Tabela 9.

Tabela 9 – Intervalos máximos entre medições de atrito

POUSOS DIÁRIOS DE AERONAVES À REAÇÃO NA PISTA	FREQUÊNCIA DE MEDIÇÕES DE ATRITO	
	Pavimentos não-estriados (sem tratamento superficial)	Pavimentos estriados ou com camada porosa de atrito
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 apresentados da Tabela 9 são os mesmos recomendados pela FAA, por meio da AC n.150/5320-12A em 1986. Atualmente, a FAA determina para pistas, sem distinção do tipo de revestimento, uma frequência de medição de atrito de acordo com a Tabela 10:

Tabela 10 – Intervalos máximos entre medições de atrito (FAA, 1997)

Pousos diários de aeronaves a reação	Frequência mínima de medição
menos de 15	1 ano
16 a 30	6 meses
31 a 90	3 meses
91 a 150	1 mês
151 a 210	2 semanas
mais que 210	1 semana

2.6. Medidas de Textura

A textura de uma superfície pode ser avaliada por três métodos:

- método volumétrico (mancha de areia e mancha de graxa);
- perfilômetros; e
- drenômetros.

Existem diversos ensaios para caracterizar a macrotextura da superfície de um pavimento. A seguir, alguns ensaios mais comumente realizados no Brasil.

Mancha de Areia

O ensaio de mancha de areia é um método volumétrico, padronizado pela norma ASTM E 965-96 (2001). É utilizado na determinação da profundidade média da altura da mancha de areia na superfície do pavimento, relacionado com a característica de macrotextura.

O ensaio consiste em preencher vazios da textura superficial do pavimento com um volume de 25.000 mm³ (25ml) ± 150 mm³ de micro-esferas de vidro, que passa na peneira de abertura 0,250 mm (n°60) e fica retida na peneira de abertura 0,177 mm (n°80). A superfície é limpa com auxílio de uma escova de mão macia, e as micro-esferas espalhadas no pavimento com auxílio de um soquete padronizado, com movimentos circulares e uniformes, obtendo-se ao final uma área aproximadamente circular.

Ao final, mede-se o diâmetro do círculo obtido em quatro direções diferentes e obtém-se um diâmetro médio. A profundidade média é expressa pela Equação 31. A Figura 33 apresenta os materiais necessários à realização do ensaio.

$$H_s = \frac{V.4}{D_m^2 .\pi} \quad \text{eq 31}$$

onde: H_s : profundidade média da mancha;
 V : volume de micro-esferas; e
 D_m : diâmetro médio do círculo.

No Brasil, a ANAC, por meio da *IAC-4302*, recomenda para o ensaio a utilização de areia na granulometria entre as peneiras de abertura 0,300 mm (n°50) e a peneira de abertura 0,150 mm (n°100). Parâmetros também recomendados pela Norma Francesa - *Rugosité Géométrique des Revêtements Routiers – Mesure de la Profondeur au Sable*, Mode Opératoire RG-2 / Paris 1971).



Figura 33 – Materiais para o ensaio de mancha de areia (WAMBOLD & HENRY, 2002)

Mancha de Graxa

O método da mancha de graxa, também volumétrico, é uma variação do método da mancha de areia. O procedimento consiste em preencher os vazios da textura superficial do pavimento com um volume de 16.000 mm³ de graxa de uso geral.

A área de ensaio é marcada com duas fitas adesivas paralelas, espaçadas de 10 cm, e como limite, emprega-se uma terceira fita adesiva perpendicular, fechando um dos extremos, conforme pode ser visto na Figura 34. Limpa-se a superfície antes do ensaio, com auxílio de uma escova de mão macia, e a graxa é espalhada sobre a superfície seca por meio de um rodo, preenchendo os vazios da superfície e formando uma área final de formato retangular. Mede-se o comprimento do retângulo com uma aproximação visual de 5 mm. Calcula-se a área coberta e obtém-se a profundidade média da textura, conforme a Equação 32. A Figura 34 apresenta os equipamentos e os materiais necessários para a realização do ensaio.

$$H_G = \frac{V}{A} \quad \text{eq 32}$$

onde: H_G : altura média da mancha;
 V : volume de graxa; e
 A : área do retângulo formado;



Figura 34 – Materiais para o ensaio de mancha de graxa (WAMBOLD & HENRY, 2002)

Perfilômetro a Laser

O perfilômetro a laser pode ser instalado em equipamentos estacionários sobre uma viga ou ser montado em um veículo. Esses equipamentos, geralmente, projetam um raio (laser) sobre um ponto do pavimento e, um receptor situado na viga, mede a altura desse ponto. Na Figura 35, tem-se um exemplo de perfilômetro produzido no Brasil.



Figura 35 – Perfilômetro. (www.cibermetrica.com.br, 20/05/2007)

O perfilômetro é composto por módulos de medição a laser, sensores de aceleração vertical e de deslocamento longitudinal, integrados por microcontroladores, e tem sua operação gerenciada por um computador portátil, podendo ser fixado em veículo de passeio comum, o que facilita seu transporte.

Com o perfilômetro utilizado para avaliação de macrotextura de um pavimento, a medida do perfil longitudinal inclui medidas de centésimos de milímetros, realizadas muito próximas umas das outras (a cada décimo de milímetro, por exemplo).

Drenômetro LTP-EPUSP

Foi desenvolvido aos moldes do drenômetro do *Institute of Highways, Railroads and Rock Engineering* (ISETH) de Zurique, pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (MOMM, 1998).

Esse equipamento permite medir o tempo de escoamento da água contida em cilindro de plástico transparente, de volume 0,73 litro, acoplado a um fundo com um orifício circular de 2 polegadas de diâmetro, em contato com a superfície do pavimento (Figura 36). O resultado desse ensaio é expresso em termos de tempo de escoamento ou de vazão de água escoada, cujo objetivo é verificar a capacidade drenante da textura do pavimento.



Figura 36 – Drenômetro LTP-USP (APS, 2006)

Classificação de Imagens Digitais

Embora ainda incipiente no setor de pavimentação, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto podem auxiliar o processo de análise da macrotextura de um pavimento, por meio de classificação de imagens digitais a partir da resposta espectral da superfície, de acordo com o grau de emborrachamento da pista.

Para Lillesand e Kiefer (1994) o objetivo geral dos procedimentos de classificação de imagem é categorizar automaticamente todos os *pixels* de uma imagem em classes ou temas. Normalmente, utilizam-se dados multiespectrais na classificação da imagem e, certamente, o padrão espectral presente nos dados para cada *pixel* é usado como a base numérica para a categorização. Isto é, diferentes tipos de feições manifestam diferentes combinações de VNs (valores numéricos) baseados em suas reflectâncias espectrais inerentes e propriedades de emitância.

Segundo Novo (1998), as técnicas de classificação digital implicam na implementação de um processo de decisão para que o computador possa atribuir certo conjunto de pontos da imagem (*pixels*) a uma determinada classe. Assim, uma imagem numérica é transformada numa imagem temática, onde o número de categorias é definido pelo próprio analista. Essa classificação pode ser supervisionada ou não-supervisionada.

O diferencial entre os dois grupos baseia-se, na existência ou não, de controle direto do operador no processo de classificação das imagens. Para a classificação supervisionada, utiliza-se do conhecimento prévio da área no processamento da imagem, o analista apresenta características da imagem relacionada a diferentes classes. Já numa classificação não-supervisionada, o sistema (algoritmo de classificação) reúne *pixels* em diferentes classes espectrais e somente após este procedimento que o analista passa a identificar as classes definidas pelo computador.

2.6.1. Parâmetros de Textura

A ANAC (2001), também por meio da IAC-4302, estabelece que as medições de textura superficial do pavimento deverão ser realizadas com base em ensaios volumétricos, recomendando utilizar o método da “mancha-de-areia” ou o método da “mancha-de-graxa”.

A frequência de medição é a mesma recomendada para a medição de atrito. A profundidade média da macrotextura do pavimento de uma pista de pouso e decolagem não deverá ser inferior a 0,50 mm, ou outro valor específico constante de plano especial de manutenção, quando houver, sendo necessária ação corretiva apropriada, toda vez que esses níveis não forem alcançados. A profundidade média da macrotextura recomendada para um pavimento novo é de 1 mm.

As medições de textura superficial devem 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.

Algumas classificações são propostas para avaliação da macrotextura superficial do pavimento, como descrito na Tabela 11 e na Tabela 12:

Tabela 11 - Classificação da macrotextura superficial do revestimento (DER/MG, 2005)

Altura de areia (HS)	Textura superficial
HS < 0,20 mm	muito fina ou muito fechada
0,20 mm < HS < 0,40 mm	fina ou fechada
0,40 mm < HS < 0,80 mm	média
0,80 mm < HS < 1,20 mm	grosseira ou aberta
HS > 1,20 mm	muito grosseira ou muito aberta

Tabela 12 - Classificação proposta por APS (2006)

Altura de areia (HS)	Textura superficial
HS < 0,20 mm	muito fina ou muito fechada
0,20 mm < HS < 0,40 mm	fina ou fechada
0,40 mm < HS < 0,60 mm	medianamente fina
0,60 mm < HS < 0,80 mm	média
0,80 mm < HS < 1,00 mm	medianamente grosseira
1,00 mm < HS < 1,20 mm	grosseira ou aberta
HS > 1,20 mm	muito grosseira ou muito aberta

A ICAO recomenda uma textura média mínima de 0,625 mm para pistas em uso e uma textura de no mínimo 1,0 mm para projeto de revestimentos de pistas novas.

A FAA (1997) recomenda que para pavimentos novos a profundidade média da textura deve ser de 1,14 mm. Para o caso de pavimentos existentes a FAA adota três situações:

- (1) quando a profundidade média da textura da pista cai para valores abaixo de 1,14 mm, devem-se efetuar avaliações de textura toda a vez que se realizarem medições de atrito;
- (2) quando a profundidade média da textura situa-se na faixa compreendida entre 0,76 mm e 0,40 mm, deve-se iniciar os planos para corrigir a deficiência de textura no prazo de 1 ano;
- (3) quando a profundidade média da textura cai a valores inferiores a 0,25 mm, deve-se corrigir a deficiência num prazo de 2 meses.

2.7. International Runway Friction Index - IRFI

(Índice Internacional de Atrito de Pistas de Aeroportos)

Atualmente, encontra-se em desenvolvimento o "*Joint Winter Runway Friction Measurement Program – JWRFMP*", Programa Conjunto de Medição de Atrito em Pistas de Aeroportos no Período de Inverno, liderado pela NASA, *Transport Canadá* e FAA. O programa existe há, aproximadamente, 10 anos, com testes envolvendo cerca de 10 aeronaves, 49 veículos de medição de atrito e 10 locais de teste, com a participação de mais de 65 instituições de 16 países (YAGER, 2006).

O programa foi concebido com os seguintes objetivos:

- (1) estabelecer um sistema coordenado de leitura para os diversos medidores de atrito, de modo a desenvolver uma grandeza de atrito que represente e indique condições similares de potencial de perigo das pistas; e
- (2) estabelecer uma correlação confiável entre os valores obtidos nos equipamentos de medição e o desempenho de frenagem das aeronaves.

Essa grandeza padronizada de medida de atrito em pistas de aeroportos é denominada IRFI (*International Runway Friction Index*). O IRFI é padronizado pela Norma ASTM E 2100 (2001) - *Standard Practice for Calculating the International Runway Friction Index*.

Os participantes do Programa *JWRFMP* pretendem que o IRFI se consolide como uma medida oficial de atrito em pistas de aeroportos e passe a ser adotada internacionalmente pela indústria do transporte aéreo.

2.8. International Friction Index - IFI

(Índice Internacional de Atrito)

O *International Friction Index* (IFI) é um parâmetro internacional que pode ser usado para quantificar a aderência pneu-pavimento e, por conseqüência, ser usado como ferramenta visando a redução de acidentes (APS, 2006).

O parâmetro IFI originou-se de uma pesquisa internacional denominada de "*International Experiment to Compare and Harmonizing Texture and Skid Resistance Measurement*" (Experimento Internacional de Comparação e Harmonização das

Medidas de Textura e Atrito) desenvolvida pela PIARC - *Permanent International Association of Road Congress*.

O IFI, cujo procedimento está descrito na ASTM E-1960 (2001), é resultado do Experimento Internacional da PIARC, atualmente denominada de *World Road Association*, onde equipamentos e métodos de avaliação de diversos países foram estudados de forma a padronizar os resultados em uma escala internacional. O experimento contou com a participação de 47 equipamentos de medição de 16 países. Foram medidos 33 parâmetros de textura e 34 parâmetros de atrito.

O programa resultou em um banco de dados com mais de 15.000 valores numéricos para diferentes tipos de superfícies, que foram utilizados para criar esse índice comum que quantificasse a aderência no pavimento molhado.

Com base em experimentos anteriores, admitiu-se que, para relacionar as medidas de atrito realizadas com equipamentos distintos como roda bloqueada, roda parcialmente bloqueada ou roda oblíqua em relação ao sentido do rolamento, seria necessário incluir os efeitos da textura da camada de rolamento.

O IFI é uma escala de referência, com base no modelo da PIARC, que relaciona o atrito com a velocidade de deslizamento. Esse modelo pode estimar a constante de referência da velocidade (S_p) e o atrito a 60 km/h (F_{60}) de um determinado pavimento. O par de valores, S_p e F_{60} , expressam o valor de IFI de um pavimento e permite calcular o valor do atrito, $F(S)$, a qualquer velocidade de deslizamento.

Para se obter o valor de IFI, é preciso realizar com qualquer equipamento ou técnica homologada ou homologável a partir de critérios estabelecidos em experimento internacional, dois tipos de medidas sobre a superfície do pavimento, uma de atrito (F_R) e outra de textura (T_x) (WAMBOLD *et al.*, 1995).

O parâmetro S_p é dado pela Equação 33:

$$S_p = a + b.T_x \quad \text{eq 33}$$

onde: T_x : parâmetro de textura; e
 a e b : constantes determinadas em função do equipamento utilizado.

O parâmetro FR_{60} é dado pela Equação 34:

$$FR_{60} = FRS \cdot e^{(S-60)/Sp} \quad \text{eq 34}$$

onde: FR_{60} : valor do atrito do equipamento convertido à velocidade de 60km/h;
 FRS : valor do atrito medido a velocidade de deslocamento S; e
 S: velocidade de deslizamento do equipamento.

O valor de F_{60} é dado pela Equação 35:

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot Tx \quad \text{eq 35}$$

O par de valores (F_{60} , Sp) determina o IFI de um pavimento. Atualmente o DNIT, através do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos de 2006, adota o IFI para fins de classificação de rodovias. As faixas de classificação do IFI por meio do parâmetro F_{60} estão apresentadas na Tabela 13:

Tabela 13 – Limites IFI (DNIT, 2006)

Parâmetro F_{60}	
péssimo	< 0,06
ruim	0,06 a 0,12
regular	0,13 a 0,16
bom	0,17 a 0,30
ótimo	> 0,30

APS (2006) apresenta os limites de IFI com maior detalhe de intervalos, conforme Tabela 14:

Tabela 14 – Limites IFI (APS, 2006)

Parâmetro F_{60}	
péssimo	< 0,05
muito ruim	0,06 a 0,08
ruim	0,09 a 0,11
regular	0,12 a 0,14
bom	0,15 a 0,21
muito bom	0,22 a 0,35
ótimo	> 0,35

Com os valores de IFI, é possível estabelecer também níveis de intervenções em função de F_{60} e Sp , determinando a estratégia de reabilitação mais adequada, conforme pode ser visto na Figura 37.

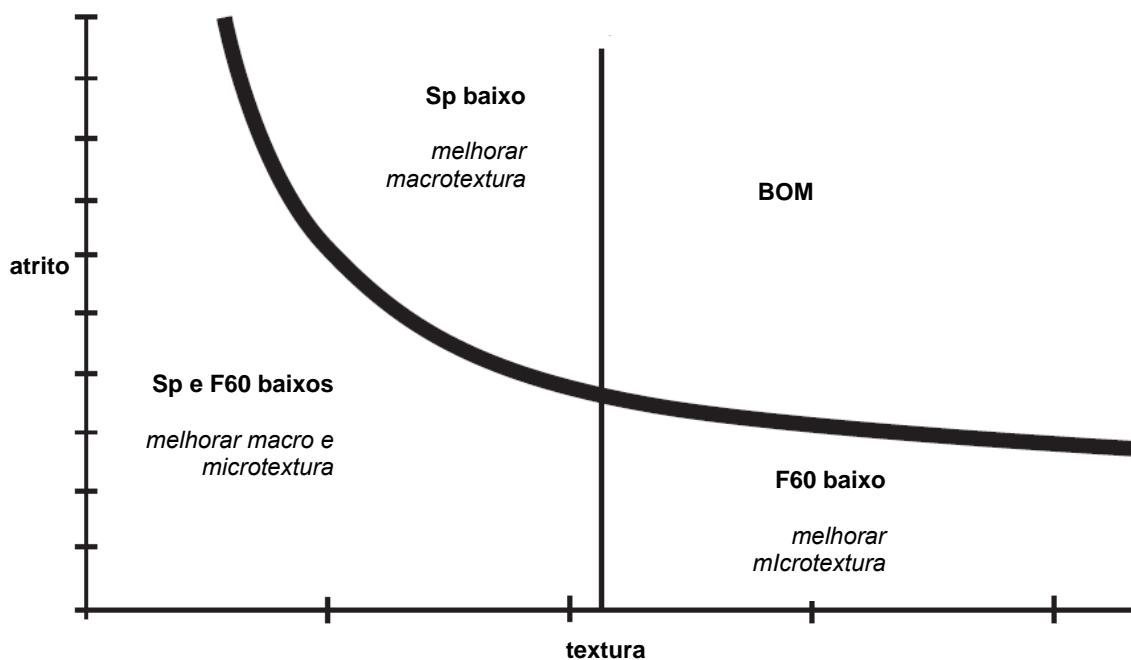


Figura 37 – Significado das distintas zonas de um diagrama de atrito – textura.
(Adaptado de WAMBOLD *et al.*, 1995)

Calibraram-se valores para cada constante das Equações 33 e 35, de acordo com os equipamentos utilizados no experimento, conforme mostrado na Tabela 15 e na Tabela 16, respectivamente.

Tabela 15 – Constantes para o cálculo de Sp (APS, 2006)

Norma	Ensaio	a	b
ASTM E-1845	Perfilômetro a Laser	14,2	89,7
ASTM-965	Mancha de Areia	-11,6	113,6

Tabela 16 – Constantes para o cálculo de F_{60} (APS, 2006)

Características	Equipamento	S	A	B	C
<u>Pneus Lisos</u>					
Roda Bloqueada	ASTM E-274	65	0,045	0,925	0
	LCPC Skid Trailer	60	0,002	1,008	0
Roda Parcialmente Bloqueada	OSCAR a 86%	52	-0,03	0,864	0
	OSCAR a 20%	12	0,119	0,643	0
	Komatsu Skis Trailer	10	0,042	0,849	0
	DWW Trailer	43	0,019	0,868	0
	Griptester	9,4	0,082	0,91	0
Roda Oblíqua	Stradograph	12,5	0,054	0,77	0
	Odoliograph Wallon	12,9	0,113	0,729	0
	Odoliograph CRR	20,5	0,113	0,746	0
	SCRIM Flemish	20,5	0,049	0,967	0
	SCRIM CEDEX	20,5	0,019	0,813	0
	SCRIM MOPT	20,5	0,032	0,873	0
	SCRIM SRM	20,5	0,017	0,85	0
	SCRIM GEOCISA	20,5	0,021	0,928	0
	SCRIM	20,5	-0,006	0,862	0
	SUMMS	20,5	0,002	0,987	0
	SRIMTEX	17,1	0,033	0,872	0
<u>Pneus com ranhuras</u>					
Roda Bloqueada	Stuttgarter Reibungsmesser	60	0,022	0,05	0,082
	Skiddometer	60	0,026	0,504	0,099
	Stuttgarter Reibungsmesser	60	-0,072	0,767	0,086
	ASTM E-274	65	-0,023	0,607	0,098
	Friction Tester	60	-0,025	0,807	0,068
Roda Parcialmente Bloqueada	Stuttgarter Reibungsmesser	12	0,141	0,323	0,074
	Skiddometer	12	0,03	0,918	-0,014
	BV-11	12	0,04	0,856	-0,016
	Stuttgarter Reibungsmesser	12	0,02	0,867	-0,006
<u>Equipamentos com Sapatas</u>					
Estáticos	DF Tester a 60 km/h	60	-0,034	0,771	0
	DF Tester a 20 km/h	20	0,081	0,732	0
	Pendulum Tester BPT	10	0,056	0,008	0
	Pendulum Tester SRT	10	0,044	0,01	0

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descrevem-se o objeto de estudo, os métodos e os equipamentos utilizados, com vistas à caracterização da condição de aderência entre pneu e a superfície do pavimento da pista de pousos e decolagens do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.

3.1. Objeto de Estudo

O estudo foi realizado na pista principal de pousos e decolagens do Aeroporto Internacional Tancredo Neves. Situado na região metropolitana de Belo Horizonte - MG, entre Confins e Lagoa Santa (Figura 38), o aeroporto construído na década de 80, tem capacidade para atender a cinco milhões de passageiros por ano, com conforto e segurança.

Construída em 1983, a pista de pousos e decolagens possui uma extensão de 3 km, com aplicação da Camada Porosa de Atrito, sobre o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

Até o início de 2005, o aeroporto encontrava-se subutilizado e, em decorrência da superlotação do Aeroporto da Pampulha, foi realizada, em março de 2005, a transferência dos vôos desse aeroporto para o Aeroporto Internacional Tancredo Neves. Com isso, o aeroporto teve um grande aumento no tráfego de aeronaves, Figura 39. Antes dessa transferência, o aeroporto possuía um movimento de 350 mil passageiros em 2004, passando para cerca de três milhões em 2005. O movimento de aeronaves também mostrou expressivo incremento, foram 37 mil movimentos em 2005 contra 11 mil no ano anterior (INFRAERO, 2006).

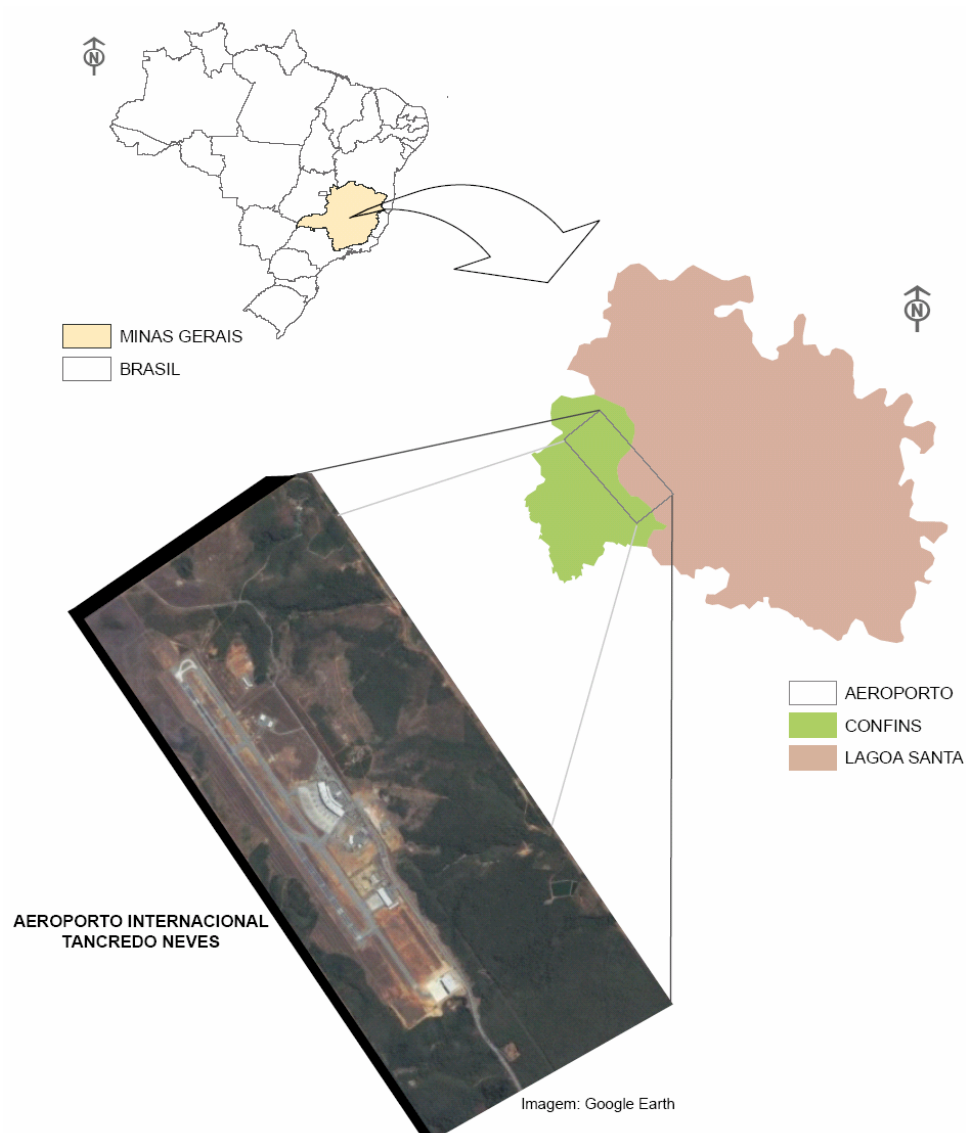


Figura 38 – Localização do Aeroporto (data da imagem 26/02/2003)

Aliado à transferência de vôos, foi lançado o Projeto Linha Verde que liga o centro de Belo Horizonte ao Aeroporto Internacional Tancredo Neves. O percurso até o aeroporto ficou mais rápido, possibilitando a sua consolidação como aeroporto industrial, fator determinante para a criação de pólos de comércio exterior em Minas Gerais. Dessa forma, a Linha Verde também disponibiliza um importante instrumento para a expansão do turismo de negócios em Belo Horizonte.

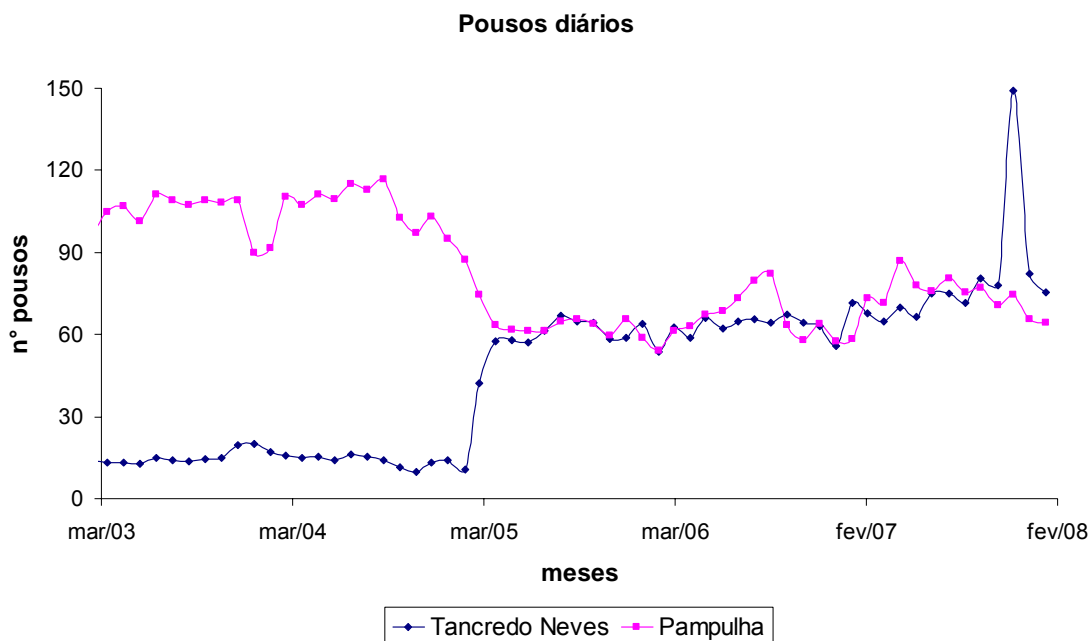


Figura 39 – Aumento de Vôos em Confins (fonte: INFRAERO, 2008)

Pela Figura 39, nota-se um aumento bastante acentuado nos vôos em um curto espaço de tempo, em que o aeroporto recebeu em 2004 uma média de 15 pousos diários, contra 75 pousos diários no ano de 2007. Portanto é de fundamental importância o estudo das condições do pavimento vista essa nova demanda de vôos no aeroporto.

Dados do ano de 2007 destacam o Aeroporto Internacional Tancredo Neves como o sétimo aeroporto do país em termos de movimentação de passageiros, conforme Figura 40.

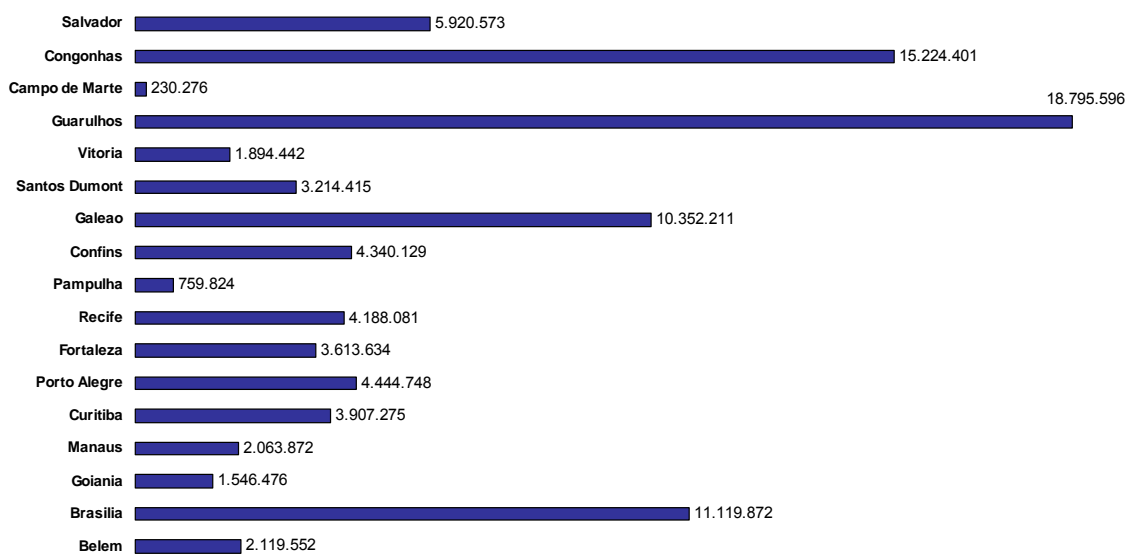


Figura 40 – Movimentação de passageiros por aeroporto no ano de 2007 (INFRAERO, 2008)

Atualmente, o aeroporto encontra-se em processo de transformação para tornar-se Aeroporto Indústria, com o objetivo de oferecer vantagens a investidores brasileiros e estrangeiros. O Aeroporto Indústria tem como meta a criação de pólo de desenvolvimento, com a instalação de empresas de setores de ponta nas suas proximidades, com vistas a ampliar as exportações.

Com isso, essa pesquisa ocorre em momento oportuno para o aeroporto, pois além de receber os vôos transferidos do Aeroporto da Pampulha, contará com o incremento nos vôos oriundos do Aeroporto Indústria.

Outro fator importante que determinou na escolha desse aeroporto é o fato da Camada Porosa de Atrito (CPA), revestimento da pista, que, por suas características, necessita de constante verificação de seus aspectos funcionais.

Na Figura 41, tem-se uma vista aérea do Aeroporto Internacional Tancredo Neves.



Figura 41 – Aeroporto Internacional Tancredo Neves – vista aérea

A Figura 42 ilustra a geometria das pistas para o tráfego de aeronaves no aeroporto.

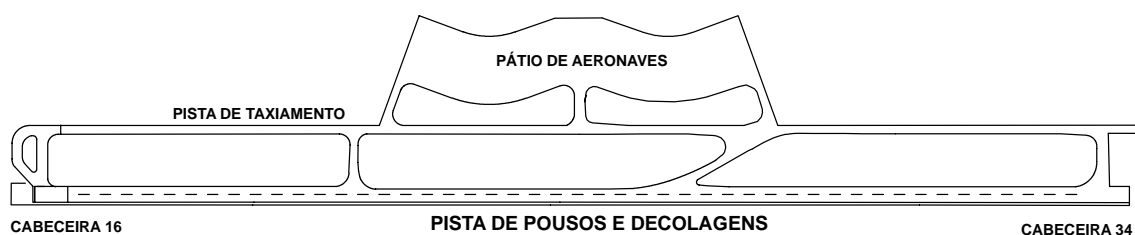


Figura 42 – Aeroporto Internacional Tancredo Neves – pistas de operação

3.2. Planejamento dos Ensaiois

O planejamento dos ensaios foi realizado baseado nas informações dos espaçamentos dos trens-de-pouso de aeronaves que operam com maior frequência no aeroporto e que seus pesos influenciam nas condições estruturais e funcionais do pavimento, conforme ilustrado na Figura 43.

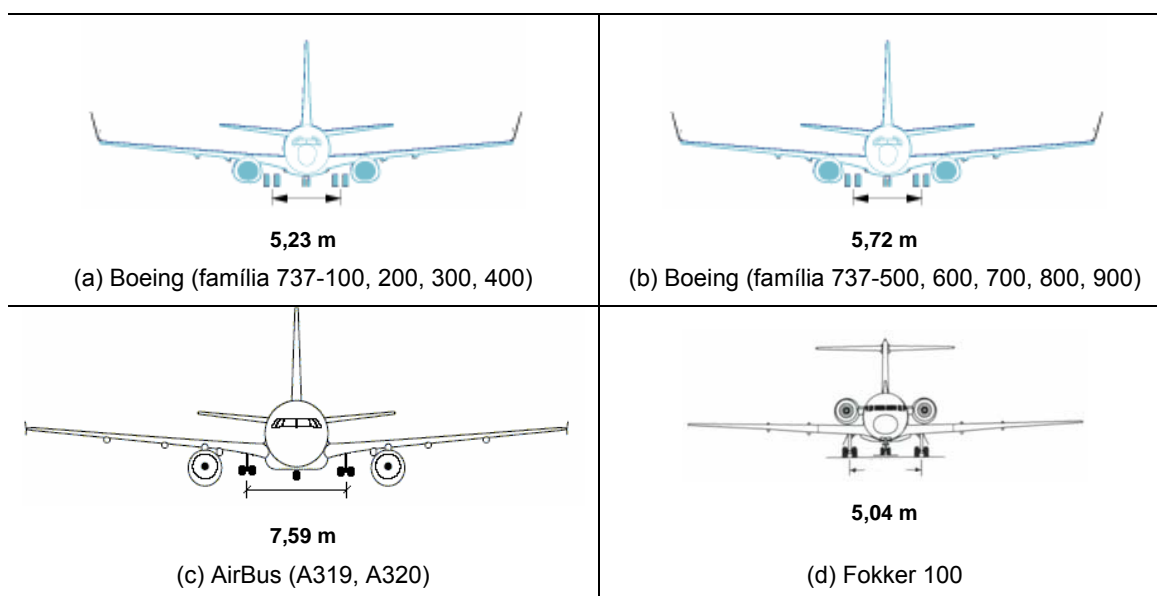


Figura 43 – Geometria dos trens-de-pouso das aeronaves

De acordo com a Figura 43 é possível definir dois grandes grupos de aeronaves que operam no aeroporto. Um grupo formado pelas aeronaves da AirBus e outro grupo formado pelas aeronaves da Boeing e da Fokker.

As aeronaves que operam no Aeroporto Internacional Tancredo Neves são as mesmas existentes no tráfego do Aeroporto Internacional de São Paulo e estudadas por Rodrigues Filho (2006), que definiu probabilidades de toques das aeronaves de

acordo com os seus afastamentos em relação ao, tomando-se por base dois grupos de aeronaves, conforme Figura 44.

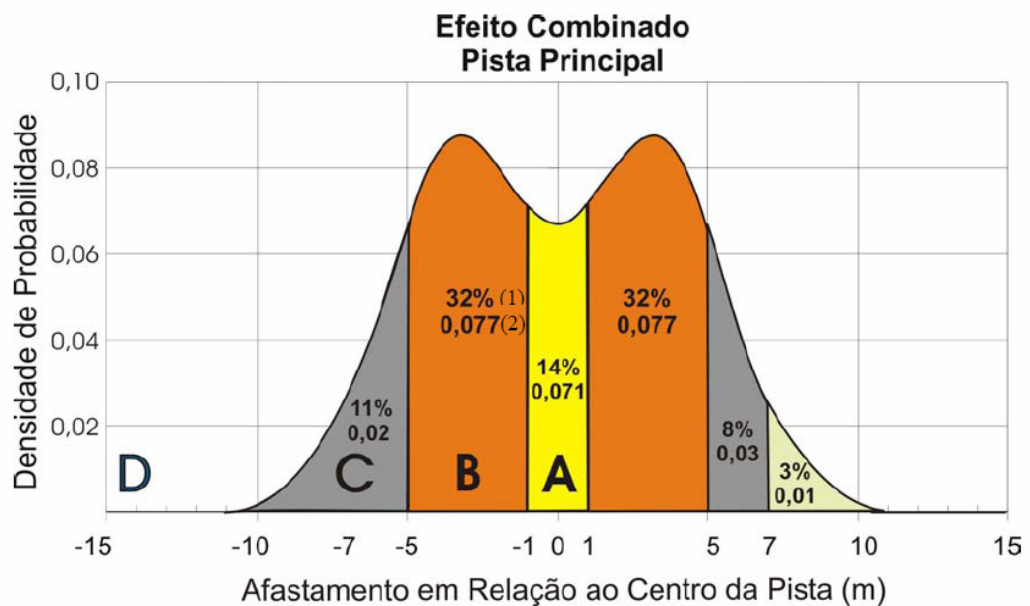


Figura 44 – Faixas de níveis de utilização das pistas para efeito do planejamento dos ensaios de campo. Os números em cada faixa indicam respectivamente: (1) expectativa da passagem das rodas das aeronaves (em percentuais) e (2) a densidade de probabilidade de passagem das rodas (em passagens de roda/m/passagens de aeronaves) (RODRIGUES FILHO, 2006)

A localização das áreas dos ensaios foi feita levando-se em consideração o que regulamenta a ANAC, por meio da IAC 4302, e também de acordo com o estudo realizado por Rodrigues Filho (2006).

Seguindo recomendações da ANAC, realizaram-se medições de atrito e textura ao longo da pista, afastados 3m à direita e à esquerda do eixo da pista. Foram realizados ensaios também com afastamentos de 4m, 5m e 15 m do eixo, com espaçamentos de 30m, longitudinalmente. Os pontos medidos a 15 metros do eixo da pista caracterizam as regiões sem solicitação de tráfego.

O Aeroporto Internacional Tancredo Neves possui uma pista de 3.000 m de extensão. A zona de toque das aeronaves inicia-se a aproximadamente 300 m das cabeceiras, com uma zona de emborramento ao longo de, aproximadamente 450 metros, que pode ser visto na mancha escura presente na pista, conforme Figura 45. A avaliação das condições da superfície concentrou-se nessa zona de toque, correspondente à cabeceira de maior movimento no aeroporto, a cabeceira 16.



Figura 45 – Vista aérea da zona de toque das aeronaves (Imagem Google Earth, 2007)

A Figura 46 ilustra a localização do trecho da pista do Aeroporto Internacional Tancredo Neves aonde foram realizados os ensaios de macrotextura (Mancha de Areia) e atrito estático (Pêndulo Britânico).

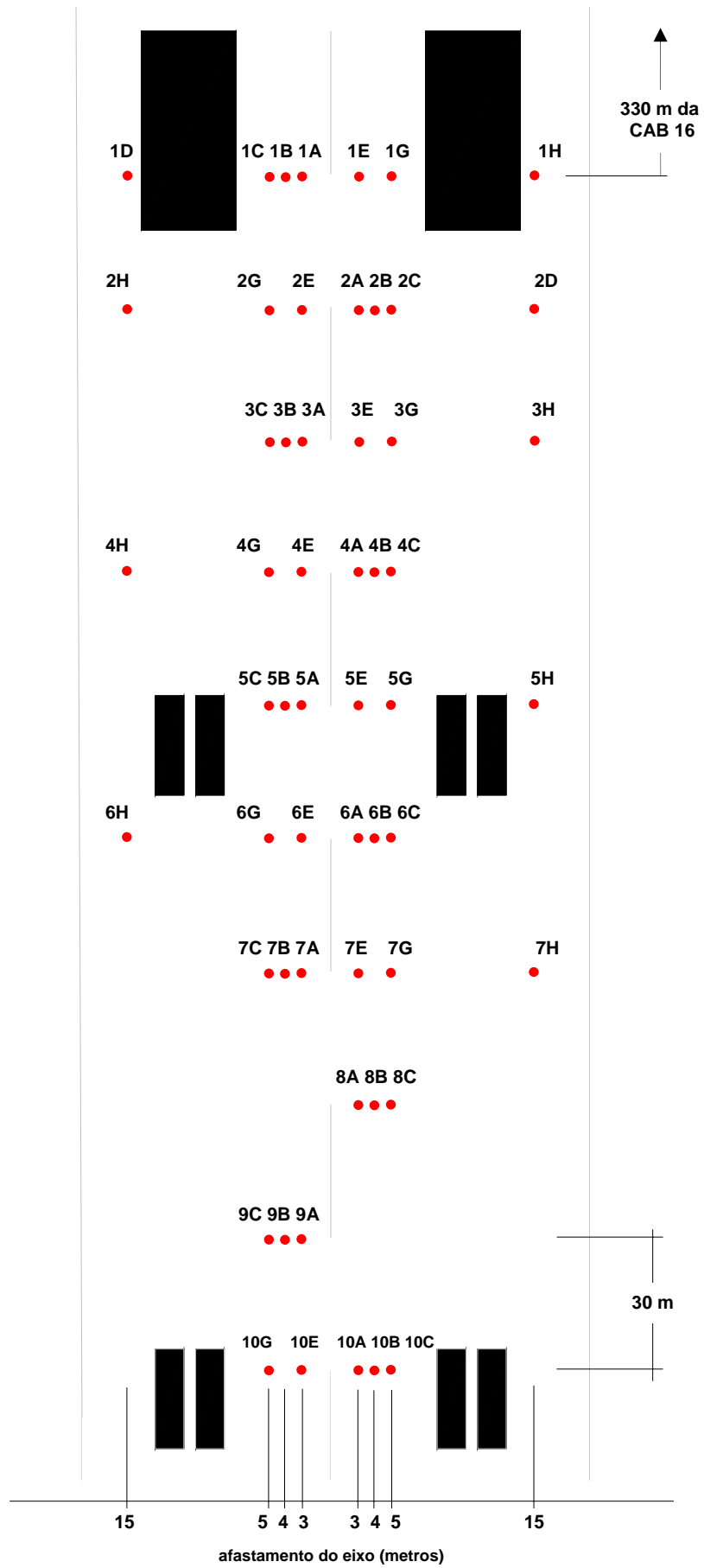


Figura 46 – Esquema dos ensaios para macrotextura e atrito estático

3.3. Macrotextura da superfície

A macrotextura da superfície do pavimento foi caracterizada pelo ensaio de mancha de areia. Foram testadas duas diferentes recomendações: uma com granulometria de micro-esferas entre 0,177mm e 0,250mm de acordo com a Norma ASTM E-965-96 e outra que determina granulometria de areia entre 0,150mm e 0,300mm de acordo com recomendações da ANAC, DER-MG e Norma Francesa.

O ensaio foi escolhido por ser de fácil execução e de baixo custo, e que representa, em se tratando de pistas de aeroportos, o nível de emborrachamento da superfície do pavimento.

As recomendações da ANAC, DER-MG e Norma Francesa não determinam que tipo de areia a ser utilizada, apenas recomenda areia lavada. Nessa pesquisa, utilizou-se uma areia lavada qualquer, a qual foi denominada de Areia Comum, e também foi utilizada uma areia padronizada produzida comercialmente pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, a Areia Normal, há mais de 30 anos no mercado.

Foram analisados pontos na área de toque (3m, 4m e 5m) e pontos sem solicitação de tráfego de aeronaves (15m) para a definição dos limites entre as classes de textura para a caracterização da pista com relação ao grau de contaminação por borracha na CPA.

Antes de iniciar o ensaio, limpou-se a superfície com uma escova, para que nenhum agente contaminante se misturasse à areia, interferindo na realização do ensaio. Sobre cada ponto, despejou-se um volume conhecido de areia, sendo em seguida espalhado com movimentos circulares com o auxílio de um soquete padrão, cuja base é revestida de uma lâmina de borracha para não modificar a geometria das asperezas da superfície.

O espalhamento resultou em um círculo formado pela areia, preenchendo os espaços existentes entre os granulares do revestimento. O próximo passo consistiu em medir os diâmetros do círculo. Foram efetuadas quatro medidas, que resultou em um diâmetro médio (D_m). O valor da profundidade HS (mm) é dada pela Equação 31.

$$H_s = \frac{V \cdot 4}{D_m^2 \cdot \pi} \quad \text{eq 31}$$

A Figura 47 ilustra o início do ensaio, com a areia despejada e, ao final, depois da areia espalhada.

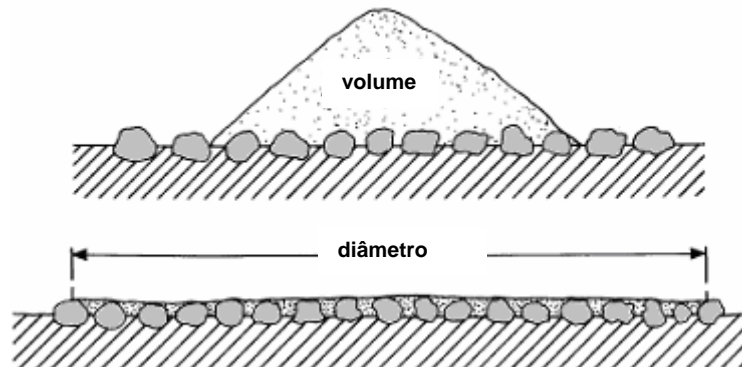


Figura 47 – Ensaio de Mancha de Areia

Foram realizadas correlações entre a areia lavada (areia comum), a areia do IPT (areia normal) e as micro-esferas. Essas comparações foram feitas tanto para o volume recomendado nos ensaios, de 25ml, quanto para o volume aplicado na maioria dos ensaios, de 50ml.

Embora a recomendação para a execução do ensaio seja com um volume de 25ml de areia ou micro-esfera, todos os ensaios, com exceção de pontos para o cálculo do IFI que determina 25ml de micro-esferas, foram realizados com o dobro do volume (50ml), pelo fato da dificuldade na execução de um círculo utilizando-se 25ml, devido à grande penetração do material no pavimento poroso.

Classificação de Imagens Digitais

Na tentativa de se ter mais um instrumento para a estimativa do nível de emborrachamento do pavimento empregou-se a técnica de classificação de imagens digitais. Para efeito de comparação de resultados, nos locais fotografados foram realizados ensaios de mancha com a Areia Normal do IPT.

Materiais:

- moldura de plástico com dimensões internas de 27,5 x 27,5cm, Figura 48;
- câmera fotográfica digital de 7 megapixels, lente Carl Zeiss;
- software Erdas Imagine 8.5.

Procedimento de campo:

- limpeza da superfície a ser ensaiada;
- fotografia com enquadramento máximo do quadrado, perpendicularmente ao pavimento;
- realização do ensaio de mancha de areia no interior do quadrado;
- fotografia da areia espalhada dentro do quadrado.



(a) quadro sobre o pavimento

(b) mesmo ponto após o ensaio de mancha

Figura 48 – Foto para a classificação

No software Erdas, cada imagem foi padronizada com uma área de 1500 x 1500 pixels recortada no interior da moldura quadrada utilizada. De posse dessa imagem recortada realizou-se a classificação não-supervisionada pelo algoritmo ISODATA.

Nesse tipo de classificação não-supervisionada, o algoritmo baseia-se na análise de agrupamentos onde são identificadas no espaço de atributos as nuvens (clusters) formadas por “*pixels*” com características similares. Neste tipo de classificador, é comum especificar o número destas nuvens, isto é, o número de classes possíveis de serem encontradas na área de estudo, mesmo não sendo este o número ideal destas classes. Definem-se então, através de um limiar estabelecido pelo analista, quais as concentrações de “*pixels*” que devem ser tratadas como grupos distintos (VENTURIERI e SANTOS, 1998).

Foram testados diversos números desses grupos distintos ou classes, sendo que ao final estabeleceram-se 20 classes. Para todos os pontos analisados, adotou-se então o número de 20 classes, sendo que, de acordo com o nível de emborrachamento do pavimento, certa quantidade de classe é classificada como emborrachada. Ao final,

compararam-se essas imagens com os valores de macrotextura obtidos no ensaio de mancha de areia.

Avaliação da evolução do emborrachamento

Por aproximadamente 10 meses, seis pontos foram monitorados por meio de ensaios de mancha de areia, com o intuito de avaliar a evolução do emborrachamento da pista. Os ensaios foram realizados apenas na região crítica de acúmulo de borracha, em pontos afastados 3m à direita e à esquerda do eixo, em um trecho de, aproximadamente, 150 metros ao longo da pista a partir de 300 m da cabeceira 16 da pista de pouso e decolagem, conforme esquema da Figura 49.

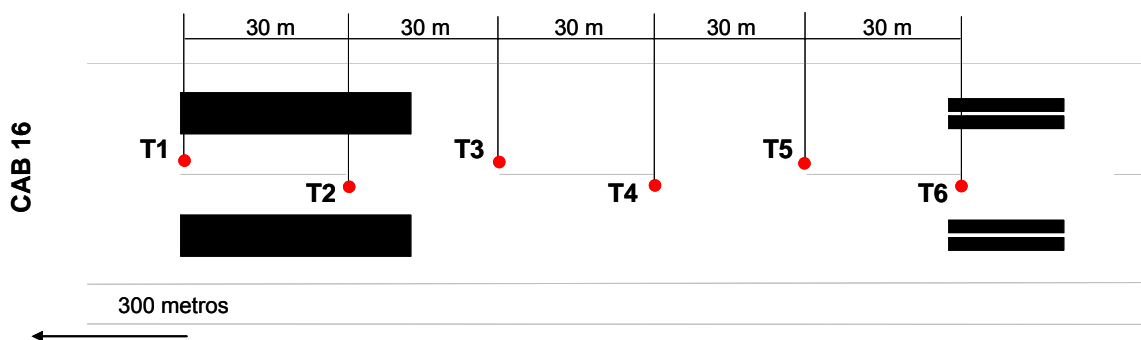


Figura 49 – Esquema dos pontos de ensaio de mancha de areia.

Datas dos ensaios de mancha de areia:

13 de novembro de 2006

19 de dezembro de 2006

02 de agosto de 2007

05 de setembro de 2007

Os ensaios de mancha de areia foram executados com areia lavada (areia comum) conforme recomendações da ANAC, da Norma Francesa e do DER/MG com granulometria entre 0,150mm e 0,300mm, porém com um volume de 50ml.

Além do monitoramento da macrotextura, realizou-se um levantamento de todos os pousos entre cada período, a fim de se ter a massa total média de todas as aeronaves, para uma verificação dos valores sugeridos pela FAA, constantes na Tabela 3. Foram filtrados os pousos por tipo de aeronave, sendo desconsideradas

aeronaves de pequeno porte, que causam efeito desprezível no emborrachamento da pista.

3.4. Remoção de borracha

A INFRAERO utiliza no aeroporto o processo de jato d'água a alta pressão com o uso de moto-bomba e saída do tipo barra giratória (conhecida como chuveiro rotativo) para a remoção de borracha impregnada no pavimento. A Figura 50 mostra a barra giratória em detalhe.



Figura 50 – Equipamento de barra giratória

A pressão d'água utilizada foi da ordem de 22 MPa, valor adotado para a limpeza por se esperar uma possível desagregação dos materiais quando submetidos à pressões mais elevadas. Foram realizados ensaios de mancha de areia antes e após o serviço de remoção da borracha para avaliar a eficiência do equipamento na limpeza. Os ensaios foram realizados nos dias 03 e 10 de outubro de 2007, antes e depois da limpeza, respectivamente. A eficiência da remoção da borracha também foi verificada por meio dos resultados de coeficiente de atrito obtidos pelo Mu-meter.

A limpeza da pista deve ser feita considerando-se o período de chuvas da região, visto que a probabilidade de acidentes nos pousos e decolagens agrava-se com a presença de água em conjunto com uma pista contaminada por borracha. Visando um melhor planejamento das datas para a limpeza da pista, foi feito um estudo sobre as características das ocorrências de chuva no aeroporto. O estudo pluviométrico foi realizado com informações da estação climatológica existente no próprio complexo aeroportuário, por meio de dados diários de precipitação. Devido aos riscos de hidroplanagem, ao iniciar-se o período de chuvas, é fundamental que a pista não apresente grande contaminação por borracha, principalmente na zona de toque.

3.5. Medição de Atrito Dinâmico com o Mu-meter

Seguindo normas da ANAC, no Aeroporto Internacional Tancredo Neves são realizadas medições de atrito com o Mu-meter, geralmente a cada 9 meses, para verificar o nível de atrito na pista, ao longo de toda sua extensão, afastados 3 metros à direita e à esquerda do eixo.

As medições com o Mu-meter deram-se nos dias 27/01/2007, 26/09/2007 e 28/12/2007.

Etapas para a operação do Mu-meter

- calibração dos pneus:

rodas sensoras, pressão de $10 \pm 0,5$ psi;

roda traseira de medição de distância, 30 ± 1 psi.

- calibração do zero:

Um botão localizado na caixa do condicionador de sinal (atrás do Mu-meter), que deve ser ajustado até zerar o marcador do monitor “nível do olho” da cabine. Quando aquele estiver zerado, será emitido um som. Anotam-se, assim, os três dígitos mostrados acima do botão do “Zero Calibrate”.

- calibração do Mu:

Em seguida, calibra-se o próprio Mu-meter puxando-o pela prancha de teste (Figura 51) de forma mais uniforme possível durante, aproximadamente, nove segundos, não fazendo paradas durante o movimento. Durante o percurso, o processador emite um sinal sonoro. Se o procedimento for realizado corretamente, tem-se a impressão de um gráfico com a leitura do atrito da prancha. O valor padrão é 0,77, no entanto, uma leitura de 0,74 a 0,79 mantida durante 2 a 5 segundos, está dentro do aceitável na calibração.



Figura 51 – Prancha padrão de teste (SANTOS, 2004)

- teste do sistema de aspersão:

Após essa calibração da prancha, o próximo passo consiste na calibração do sistema de aspersão d'água, que deverá ter uma vazão constante de modo a proporcionar atrito com lâmina d'água de 1 mm à frente dos pneus. Essa vazão é calibrada de acordo com a velocidade de operação do equipamento e é verificada no visor acoplado no sistema (Figura 52). Feito esse procedimento, o Mu-meter estará pronto para realizar as medições.



Figura 52 – Visor de vazão do sistema de aspersão

- corrida na pista:

As medidas de atrito são realizadas a 65 km/h e tem seu início a partir de 152 m de uma das cabeceiras, de modo a permitir o registro de dados na velocidade padrão. O término do ensaio também ocorre a 152 m do final da pista por medida de segurança. Normalmente, inicia-se a corrida na cabeceira de maior movimento de pousos e de decolagens, na caso dessa pesquisa na cabeceira 16. As leituras são registradas e verificadas de forma instantânea por meio de um computador portátil de dentro do veículo (Figura 53).



(a) Computador portátil



(b) detalhe da tela

Figura 53 – Computador portátil para o recebimento das informações do Mu-meter

Na Figura 54, tem-se o Mu-meter em operação na pista do aeroporto.



Figura 54 – Corrida na pista do aeroporto com o Mu-meter

Os valores de atrito obtidos com o Mu-meter são usados como diretriz para avaliar a eficiência do atrito da superfície de pavimentos de pistas, bem como para identificar ações corretivas adequadas para a realização de operações aéreas seguras.

3.6. Medição de Atrito Estático com o Pêndulo Britânico

As medições de atrito com o pêndulo foram realizadas conjuntamente com o ensaio de mancha de areia.

O Pêndulo Britânico também foi utilizado em conjunto com o Mu-meter na observação de atrito da pista. Esse equipamento consta no experimento da PIARC e serviu de apoio na tentativa de calibração do Mu-meter para utilizá-lo no cálculo dos parâmetros do IFI.

Procedimento de ensaio

No local do ensaio, o equipamento é nivelado por meio de parafusos existentes nas extremidades do pêndulo, verificado em um nível de bolha. Em seguida a superfície é molhada, simulando-se o pavimento com cerca de 1mm de lâmina d'água. A sapata é então ajustada de forma que a mesma toque na superfície numa distância entre 124 e 127mm, conforme ilustra a Figura 55. Foram realizadas cinco leituras de BPN, desprezando-se a primeira. A temperatura da água na hora do ensaio é anotada para posterior correção do valor lido no equipamento, conforme Tabela 17.

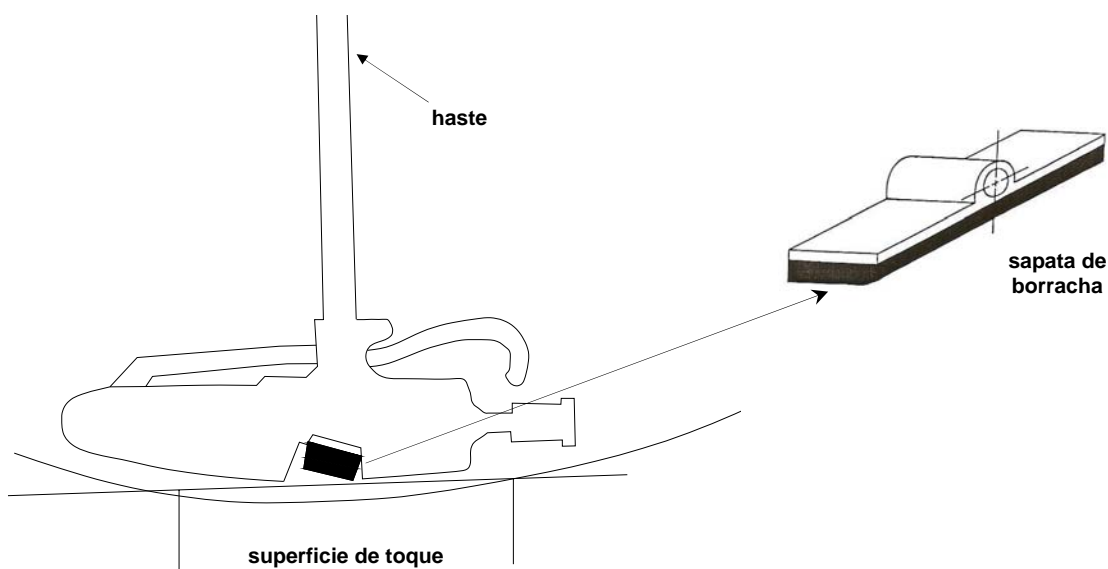


Figura 55 – Detalhe do Pêndulo Britânico

Tabela 17 – Correção da leitura do Pêndulo Britânico devido à temperatura (DNIT, 2006)

Temperatura °C	0	2	5	8	10	13	15	20	25	30	40
Correção	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3

Foi medido apenas o atrito no sentido longitudinal da pista devido a predominância desse sentido no toque das aeronaves no pavimento.

3.7. Ensaio de Drenabilidade

As condições de drenagem foram avaliadas através do drenômetro construído segundo parâmetros do drenômetro do LTP-EPUSP. A Figura 56 mostra as especificações do drenômetro.

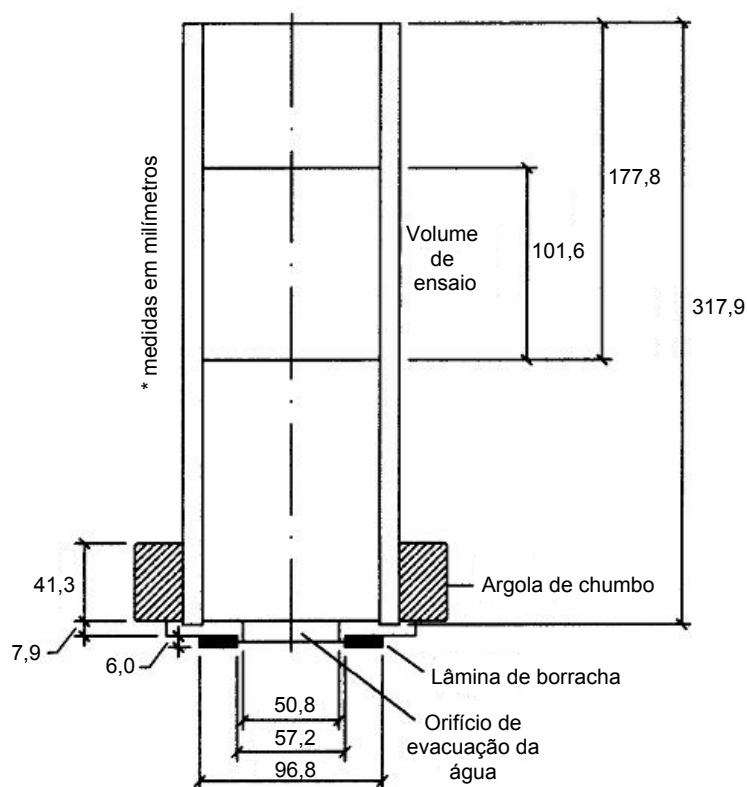


Figura 56 – Dimensões do drenômetro LTP-USP (FERREIRA, 2002)

A drenabilidade também tem a função de caracterizar a macrotextura do revestimento, pois mede o tempo de escoamento da água pelos canais presentes na superfície do pavimento, os quais são dependentes da disposição dos granulares. Portanto, convencionou-se que o tempo de escoamento é crescente com a escassez de canais

por onde a água pode escoar, ou seja, quanto mais fechada for a textura do revestimento maior será o tempo de escoamento (FERREIRA, 2002).

Os ensaios de drenabilidade foram realizados em regiões emborrachadas e regiões com baixa ou sem solicitações de tráfego. A superfície do revestimento foi molhada antes de posicionar o drenômetro sobre a mesma, com o objetivo de simular uma situação em que a superfície estivesse inundada. Após a superfície molhada, seguiu-se os seguintes passos (Figura 57):

- a) fixação do drenômetro sobre o pavimento com argolas de ferro, massa de 2,482 kg;
- b) fixação de uma rolha para que a água não escoasse antes do momento certo;
- c) enchimento do cilindro com água; e
- d) após a retirada da rolha, foi medido o tempo necessário para a água passar da linha superior para a inferior, ou seja, o tempo necessário para o volume delimitado por essas linhas (0,73 litro) escoar através dos canais formados pela rugosidade do revestimento. Para esse ensaio, utilizou-se a média de três tomadas de tempo (segundos).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 57 – Ensaio de drenabilidade

3.8. Estimativa da Lâmina d'água e Hidroplanagem

Calculou-se a espessura da lâmina d'água segundo métodos desenvolvidos por Russam e Ross (1968), Gallaway *et al.* (1979) e Andreatini (1986). Para tanto, foram levantadas informações sobre a geometria do pavimento no acervo bibliográfico da Divisão de Manutenção do aeroporto e posterior checagem dos dados na própria pista de pouso e decolagem.

Outro parâmetro de entrada em todos os modelos, a intensidade máxima de precipitação para o local de estudo, foi estimada através da equação de intensidade-duração-frequência, cujos parâmetros (K, a, b, c) foram interpolados pelo programa Plúvio 2.0 do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (GPRH-DEA-UFV).

Por fim, avaliou-se em campo o parâmetro relativo à macrotextura do pavimento, por meio dos resultados do ensaio de mancha de areia, em que o grau de emborrachamento da pista é decisivo para a espessura da lâmina d'água. O valor adotado para o parâmetro foi a média de todas as observações do ensaio de mancha de areia realizadas no pavimento.

A partir do valor para a lâmina d'água, estimou-se a velocidade crítica para a ocorrência de hidroplanagem por meio da equação proposta por Gallaway *et al.* (1979). Apesar de desenvolvida para rodovias, essa equação foi utilizada por considerar maior quantidade de variáveis na determinação da velocidade crítica, ao contrário de outras equações, que consideram apenas a influência da pressão de enchimento dos pneus. Foram feitas simulações, variando-se a espessura da lâmina d'água, como também a porcentagem de giro das rodas.

3.9. Cálculo do IFI – Índice Internacional de Atrito

Para a obtenção do IFI, adotou-se o ensaio de mancha de areia de acordo com a ASTM para avaliação da macrotextura e, para o atrito, utilizou-se o Pêndulo Britânico, visto que o Mu-meter não consta na relação dos equipamentos calibrados no experimento.

No entanto, de acordo com o experimento da PIARC, é possível que se adote um equipamento a partir de correlação com algum outro já calibrado, a partir da existência de correlação entre os equipamentos.

Nessa pesquisa, o objetivo foi verificar a possibilidade de calibração do Mu-meter, a partir da correlação dos dados obtidos com o Pêndulo Britânico. No entanto, essa calibração, caso possível, só aplica-se ao Aeroporto Internacional Tancredo Neves, por estar analisando apenas um tipo de superfície, não podendo ser extrapolado outros tipos de pavimentos existentes.

O IFI foi determinado a partir do valor HS (ensaio de mancha de areia) e do valor BPN (Pêndulo Britânico).

As constantes de entrada no cálculo do parâmetro Sp (Equação 33), para o ensaio de mancha de areia, são:

a : -11,6
 b : 113,6

$$Sp = a + b.Tx \quad \text{eq 33}$$

onde: Tx : parâmetro de textura, valor HS obtido pelo ensaio de mancha de areia.

As constantes de entrada para o cálculo do parâmetro FR_{60} e F_{60} , Equações 34 e 35, respectivamente, são determinadas pelo tipo de equipamento de medição de atrito, no caso, o Pêndulo Britânico, são as seguintes:

S : 10
 A : 0,056
 B : 0,008
 C : 0

$$FR_{60} = FRS.e^{(S-60)/Sp} \quad \text{eq 34}$$

onde: FRS : valor BPN obtido pelo Pêndulo Britânico

$$F_{60} = A + B.FR_{60} + C.Tx \quad \text{eq 35}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização da superfície do pavimento, como também análise e discussão dos mesmos.

4.1. Avaliação da macrotextura

Primeiramente, estudou-se qual recomendação adotar para a verificação da macrotextura da superfície. A partir de então, foram realizados ensaios em diversos pontos, em períodos diferentes, a fim de obter-se uma classificação que representasse a realidade do nível de emborrachamento no pavimento com CPA.

Granulometria dos materiais utilizados:

Areia Comum (areia lavada)	entre 0,150 mm e 0,300 mm
Areia Normal (produzida pelo IPT)	entre 0,150 mm e 0,300 mm
Micro-esfera	entre 0,177 mm e 0,250 mm

Análise das recomendações de ensaio de mancha de areia

Nas Figura 58, Figura 59 e Figura 60 apresentam-se as correlações obtidas a partir dos valores de profundidade da macrotextura, HS (mm), entre Micro-esferas *versus* Areia Comum, Micro-esferas *versus* Areia Normal e Areia Comum *versus* Areia Normal, respectivamente. Utilizou-se um volume único de 50ml para essas comparações da macrotextura. Os três diferentes tipos de areia e granulometria apresentaram fortes correlações, podendo ser utilizadas na determinação da profundidade da macrotextura em pavimentos com camada porosa. Os ensaios foram realizados em 12 pontos da camada porosa de atrito, com cinco repetições em cada ponto, com diversos graus de contaminação e também em locais sem tráfego.

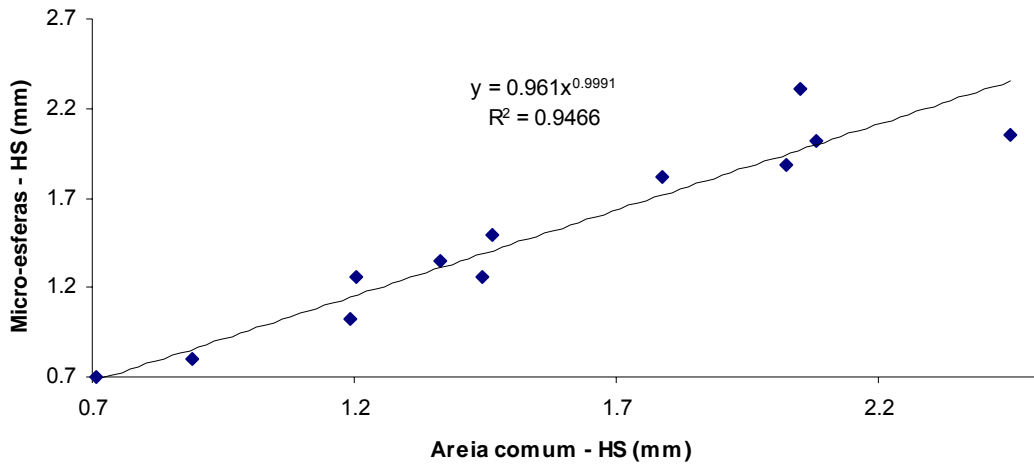


Figura 58 – Micro-esferas versus Areia Comum (volume – 50ml)

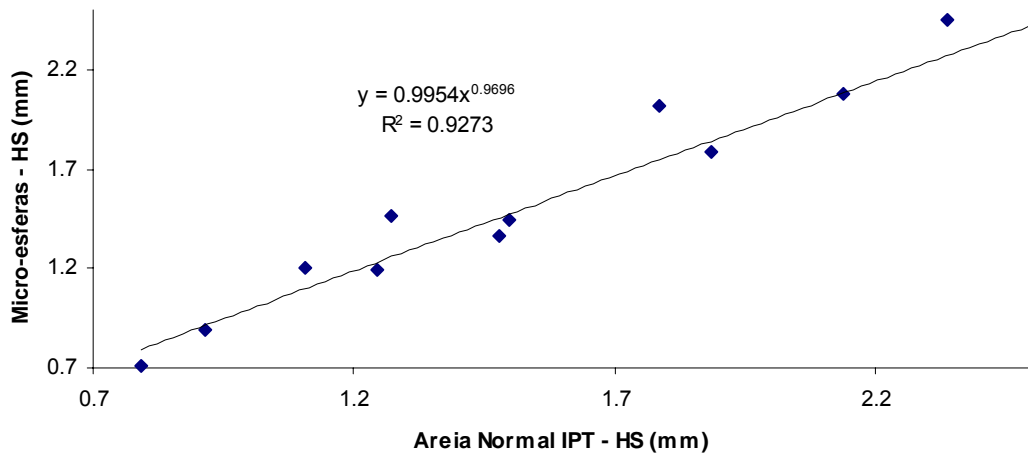


Figura 59 – Micro-esferas versus Areia Normal – IPT (volume – 50ml)

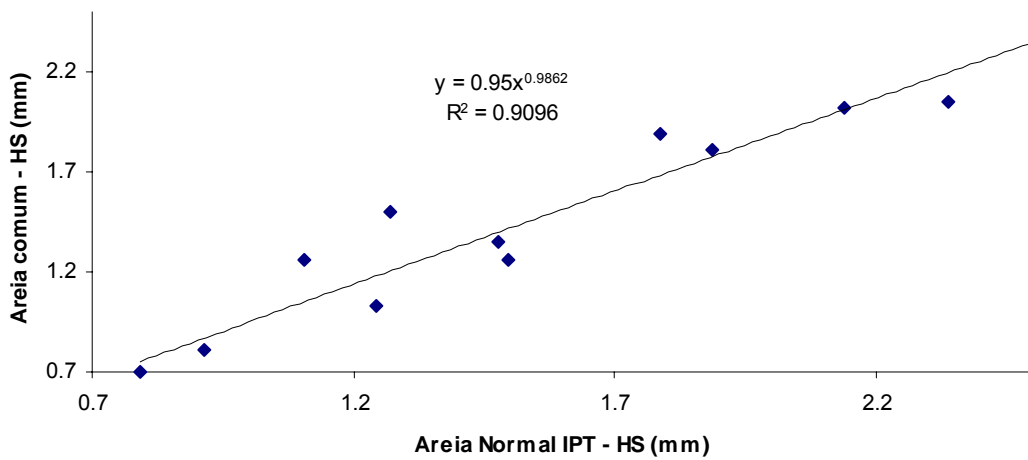


Figura 60 – Areia Comum versus Areia Normal – IPT (volume – 50ml)

Realizaram-se também, comparações a partir dos valores de HS (mm), entre a Areia Normal do IPT e as Micro-esferas, com o volume recomendado de 25ml. Comparou-se a Micro-esfera com 25ml e a Areia Normal com 25ml, Micro-esfera com 25ml e Areia Normal com 50ml e, a Areia Normal com 25 e 50ml, conforme Figuras 61, 62 e 63, respectivamente.

Os ensaios foram realizados em 27 pontos, distribuídos em regiões com diferentes níveis de emborrachamento do pavimento.

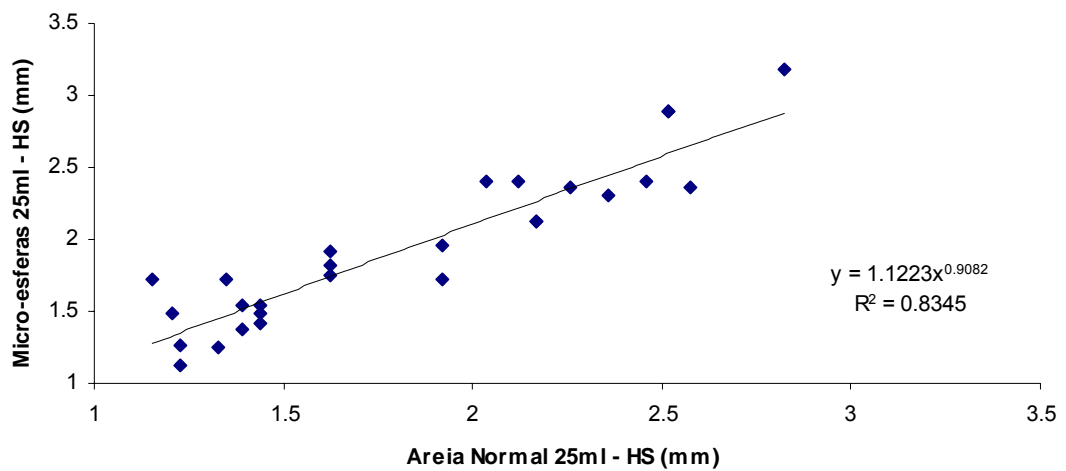


Figura 61 – Micro-esferas (25ml) versus Areia Normal (25ml)

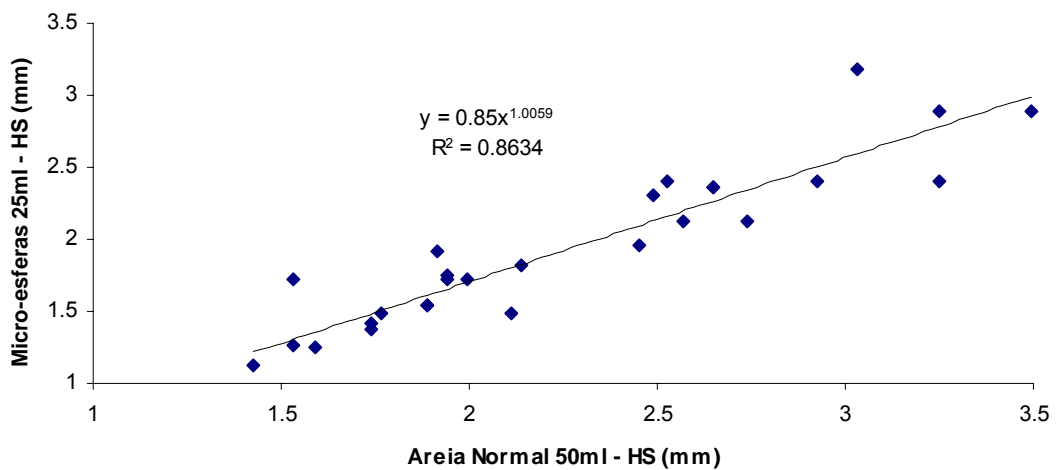


Figura 62 – Micro-esferas (25ml) versus Areia Normal (50ml)

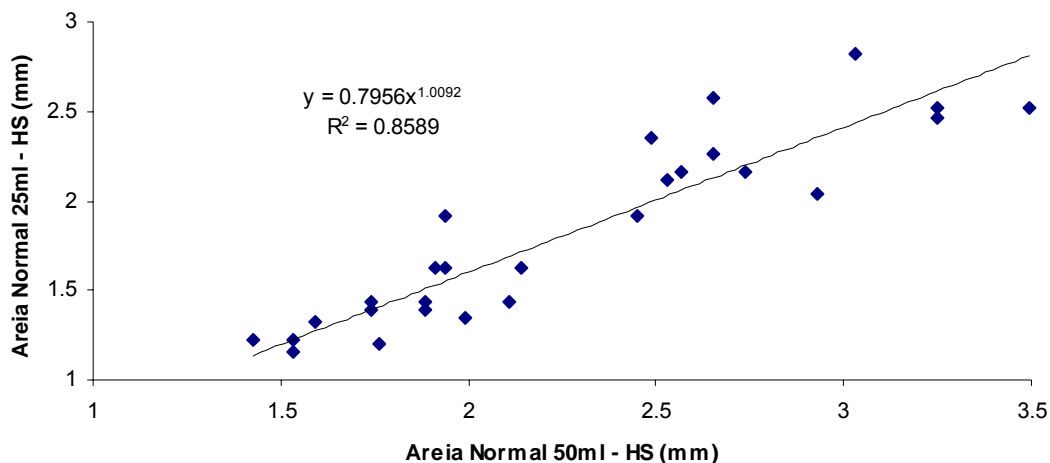


Figura 63 – Areia Normal (25ml) versus Areia Normal (50ml)

Embora todos os volumes e granulometrias utilizados tenham apresentado boas correlações, não é possível adotar qualquer tipo de granulometria ou volume do material. É necessário que haja uma padronização do ensaio, em que além do volume, especifique-se também, no caso particular da areia, o tipo a ser utilizado. Os resultados demonstram que areias de mesma granulometria produziram valores de HS diferentes.

A diferença do valor de HS entre a areia comum (lavada) e a areia normal (IPT) para um volume de 50ml, é em média, de 0,16 mm. Comparando-se a areia comum com a micro-esfera, o desvio médio é de 0,11 mm no resultado final. Para o volume de 25ml, a diferença entre a areia normal e a micro-esfera pode chegar a 0,50 mm. Comparando-se volumes diferentes, essa discrepância pode ser ainda maior. Valores de HS utilizando a areia normal com volume de 25ml e 50ml, tiveram em média um diferença de 0,43 mm, chegando a quase 1 mm.

Visto a grande variedade nos resultados, dependendo da granulometria e volume aplicado de areia, adotou-se nessa pesquisa a utilização da Areia Normal, produzida pelo IPT, há mais de 30 anos no mercado e referência no Brasil, com volume de ensaio de 50ml.

Muitos pesquisadores já utilizam o volume de 50ml quando avaliam superfícies porosas, porém utilizam a mesma classificação elaborada para a recomendação de 25ml.

Resultados da Macrotextura com Areia Normal do IPT

Na Tabela 18, apresentam-se os resultados do ensaio de mancha de areia numa época de grande contaminação da pista. Na Tabela 19, têm-se resultados de macrotextura, 4 meses após o último serviço de limpeza da pista.

Tabela 18 – Macrotextura – Data: 03 de outubro de 2007

Local do ensaio	Macrotextura Mancha de Areia HS (mm)	Local do ensaio	Macrotextura Mancha de Areia HS (mm)
1A	1,36	4E	1,44
1C	2,20	4G	1,94
1E	1,61	5A	0,99
1G	4,92	5C	1,44
2A	2,34	5E	1,53
2C	3,84	5G	2,83
2E	1,86	6A	2,49
2G	2,49	6C	2,98
3A	1,15	6E	2,24
3C	2,02	6G	2,93
3E	1,35	7A	1,41
3G	2,74	7C	2,41
4A	1,14	7E	1,15
4C	1,99	7G	2,88

Tabela 19 – Macrotextura – Data: 12 de fevereiro de 2008

Local do ensaio	Macrotextura	Local do ensaio	Macrotextura
	Mancha de Areia HS (mm)		Mancha de Areia HS (mm)
1A	1,94	6A	1,74
1B	1,91	6B	2,14
1C	2,65	6C	3,49
1D	3,03	7A	1,53
2A	1,53	7B	1,43
2B	1,94	7C	2,53
2C	2,65	7**	1,13
2D	2,93	8A	2,00
3A	1,59	8B	1,89
3B	1,76	8C	2,49
3C	2,57	8***	1,32
4A	1,74	9A	1,26
4B	1,89	9B	1,41
4C	2,45	9C	1,89
5A	2,11	10A	1,74
5B	2,74	10B	2,41
5C	3,25	10C	2,88
5*	1,27	10E	1,38
5*	1,13	10G	2,05

* pontos extras, altamente emborrachados, na região dos pontos 5A e 5B

** ponto extra, altamente emborrachado, na região do ponto 7A

*** ponto extra, altamente emborrachado, na região do ponto 8B

Baseado nos valores encontrados nas Tabelas 18 e 19, e também ao longo de toda a pesquisa, por meio dos resultados da evolução do emborrachamento da pista, elaborou-se, em uma primeira tentativa ou aproximação, uma classificação da macrotextura da CPA no aeroporto de forma a se obter níveis de emborrachamento do pavimento. A Tabela 20 traz essa primeira tentativa de classificação, para o ensaio de mancha de areia com um volume de 50ml da Areia Normal produzida pelo IPT.

Tabela 20 – Proposta de níveis de emborrachamento

Profundidade da macrotextura HS (mm)	Faixas de emborrachamento
< 1,2 mm	altamente emborrachada
> 1,2 mm e < 1,6 mm	emborracha
> 1,6 mm e < 2,0 mm	levemente emborrachada
> 2,0 mm	praticamente sem borracha

4.2. Cálculo do IFI – Índice Internacional de Atrito

Os valores médios de macrotextura e atrito, dados primários no cálculo dos parâmetros do IFI, para cada ponto de ensaio são apresentados na Tabela 21. Os ensaios foram realizados no dia 13 de fevereiro de 2008. Para a região emborrachada, realizaram-se ensaios em pontos afastados a 3 e 4 m do eixo da pista e, para a região com menor solitação, realizaram-se ensaios com afastamento de 5 m do eixo, além de alguns pontos distantes 15 m do eixo.

Tabela 21 – Valores de IFI

Local do ensaio	Macrotextura	Microtextura	IFI		
	Mancha de Areia	Pêndulo Britânico	Sp	FR ₆₀	F ₆₀
	HS (mm)	valor BPN			
1A	1,75	83,3	186,9	63,8	0,57
1B	1,92	71	206,6	55,7	0,50
1C	2,36	79	256,1	65,0	0,58
1D	3,18	88	350,2	76,3	0,67
2A	1,72	61,7	183,3	46,9	0,43
2B	1,72	69,7	183,3	53,0	0,48
2C	2,36	76,7	256,1	63,1	0,56
2D	2,41	76	262,0	62,8	0,56
3A	1,24	66,3	129,7	45,1	0,42
3B	1,49	60,7	157,5	44,2	0,41
3C	2,12	90,7	229,5	72,9	0,64
4A	1,37	63,7	144,0	45,0	0,42
4B	1,54	68,7	163,5	50,6	0,46
4C	1,96	71,3	210,9	56,3	0,51
5A	1,49	69,7	157,5	50,7	0,46
5B	2,12	71,3	229,5	57,4	0,51
5C	2,89	84,3	316,5	72,0	0,63
6A	1,42	69,3	149,2	49,6	0,45
6B	1,81	71	194,5	54,9	0,50
6C	2,89	80	316,5	68,3	0,60
7A	1,26	62,3	132,0	42,7	0,40
7B	1,12	63,3	115,4	41,1	0,38
7C	2,41	80	262,0	66,1	0,58
8A	1,72	70,7	183,3	53,8	0,49
8B	1,54	61,7	163,5	45,4	0,42
8C	2,31	80,3	250,4	65,8	0,58

As áreas altamente emborrachadas apresentaram, segundo as classificações atuais, altos valores de textura e atrito, o que pode comprometer a verificação da necessidade

de limpeza da pista. Torna-se necessário então, estabelecer valores-limite de emborrachamento, especificamente para a camada porosa de atrito.

Verificou-se que mesmo baixos valores de F_{60} (destacados em vermelho na Tabela) indicam uma ótima condição de aderência, segundo DNIT (2006), no pavimento com CPA.

Notou-se também que, em regiões emborrachadas, esperava-se que o valor de atrito medido com o Pêndulo Britânico acompanhasse a lógica de que quanto mais emborrachado, menores seriam os valores de BPN. Entretanto, por se tratar de uma medição bastante localizada, como é o caso do deslizamento da sapata do pêndulo, mesmo em regiões emborrachadas, verificou-se em alguns pontos valores maiores de BPN do que o esperado para essas áreas. Observou-se o mesmo para pontos com valores de macrotextura semelhante, porém, com valores BPN diferentes.

Foi realizada uma análise de sensibilidade para verificar quais dos parâmetros de macrotextura (HS) ou microtextura (BPN) têm maior influência no resultado do IFI (componente F_{60}), conforme Tabela 22. Variaram-se os parâmetros em -75%, -50%, -25%, +25%, +50% e +75%, resultando valores no interior da tabela em termos de porcentagem da variação da componente F_{60} do IFI.

Adotou-se o valor médio encontrado na pista de 2 mm como valor base de profundidade da macrotextura (HS). O valor base para BPN foi de 55, conforme recomendação do DNIT. A análise da sensibilidade é válida somente para os ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico.

Tabela 22 – Sensibilidade de cada parâmetro para o cálculo do IFI

Parâmetro	-75%	-50%	-25%	25%	50%	75%
HS	-50,2%	-19,6%	-6,9%	4,3%	7,2%	9,3%
BPN	-64,6%	-43,1%	-21,5%	21,5%	43,1%	64,6%

Verificou-se pelos resultados da Tabela 22 que o atrito medido pelo Pêndulo Britânico tem maior influência no valor do IFI. Para o valor de 1 mm de profundidade da macrotextura (-50% na tabela), conforme recomendação da ANAC para pistas novas, o valor de F_{60} decresce 19,6% em relação ao valor de 2 mm.

Correlação entre o Pêndulo Britânico e o Mu-meter

A Figura 64 apresenta a correlação encontrada para os dois equipamentos de medição de atrito utilizados. Verificou-se baixa correlação entre os equipamentos. Os valores de coeficiente de atrito obtidos pelo Mu-meter foram interpolados a partir do relatório gerado pelo programa do equipamento.

Essa baixa correlação pode ser explicada a princípio pelo fato dos sistemas de medição ser distintos. Enquanto o Mu-meter é um equipamento de medição dinâmico, ou seja, mede-se o atrito de forma contínua ao longo da pista, o Pêndulo Britânico opera de forma estática, pontual. Enquanto o Pêndulo é sensível a pequenas variações de atrito, o Mu-meter não consegue diferenciar essas oscilações do nível de atrito a curtas distâncias.

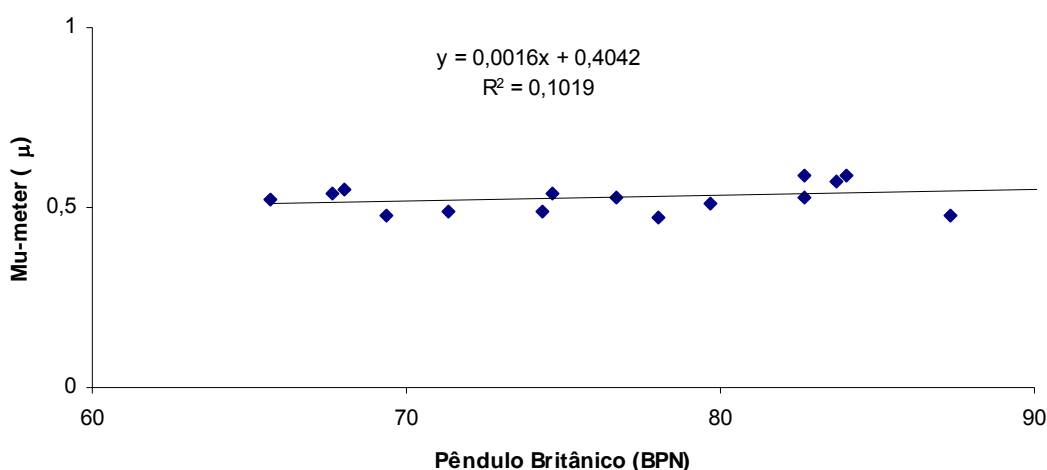


Figura 64 – Correlação entre Mu-meter e Pêndulo Britânico

Esses resultados demonstram a inviabilidade de se utilizar o Mu-meter para o cálculo dos parâmetros IFI no Aeroporto Internacional Tancredo Neves, a partir de dados obtidos com o Pêndulo Britânico.

4.3. Evolução do emborrachamento da pista

Na Figura 65 visualiza-se a pista do aeroporto em duas condições, uma logo após os serviços de limpeza da pista realizado em 26 de outubro de 2006 e outra condição com avançado grau de emborrachamento no dia 05 de setembro de 2007.



(a)



(b)

Figura 65 – Vista da zona de toque logo após os serviços de limpeza e pintura da pista (a) e, depois de 10 meses de operação (b)

Maiores detalhes do nível de emborrachamento são apresentados na Figura 66, onde se têm na zona de toque grandes diferenças de textura da superfície. A Figura (a) é a região altamente contaminada devido ao desgaste dos pneus das aeronaves, a Figura (b) também na zona de toque, porém em região sem solicitação.



(a)



(b)

Figura 66 – Região emborrachada (a) e região sem solicitação (b)

A Figura 67 apresenta a evolução do emborrachamento, por meio do ensaio de mancha de areia, na zona de toque entre o período de 13 de novembro de 2006 (período 1), 19 de dezembro de 2006 (período 2), 02 de agosto de 2007 (período 3) a 05 de setembro de 2007 (período 4). As medidas de macrotextura foram realizadas em seis pontos da zona de toque considerados críticos, distantes 3 metros do eixo da pista.

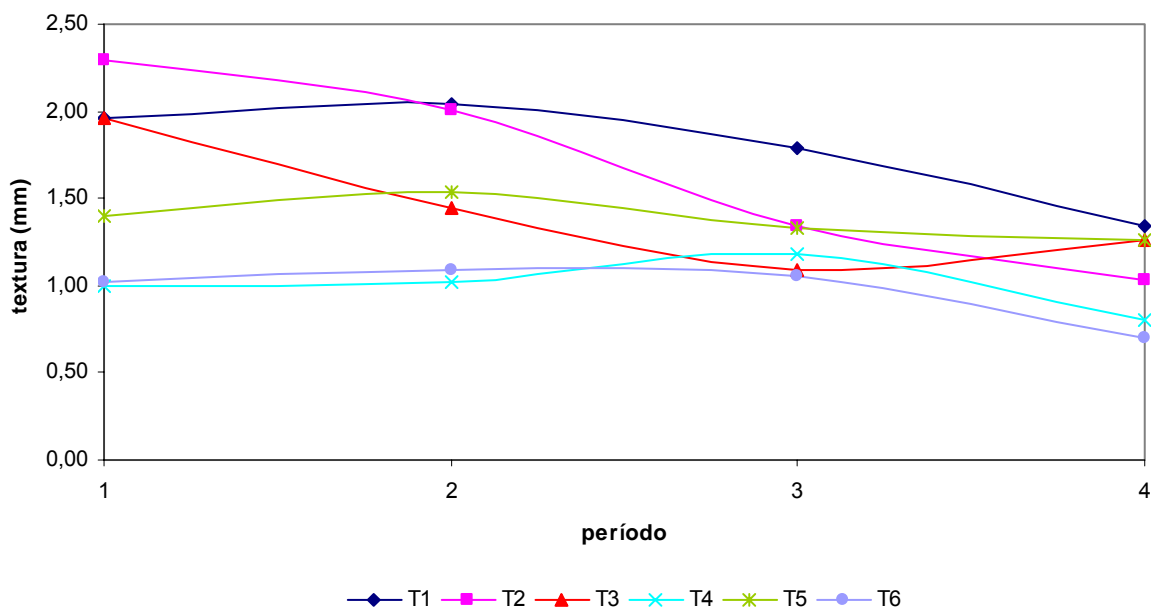


Figura 67 – Evolução do emborrachamento

Considerando os valores iniciais e os valores finais desse período, o emborrachamento da zona de toque foi da ordem de 30%, com base nos valores da profundidade de macrotextura.

As medições com o Mu-meter também mostraram o acúmulo de borracha através dos baixos valores de coeficiente de atrito da pista, elipse em azul, conforme apresentado na Figura 68, para valores de atrito em pontos afastados 3 m à direita do eixo da pista. Observa-se que as maiores diferenças estão na zona de toque das aeronaves, logo nos primeiros metros de medição a partir da cabeceira 16. A Figura 69 apresenta valores de atrito obtidos com afastamento de 3 m à esquerda em relação ao eixo da pista.

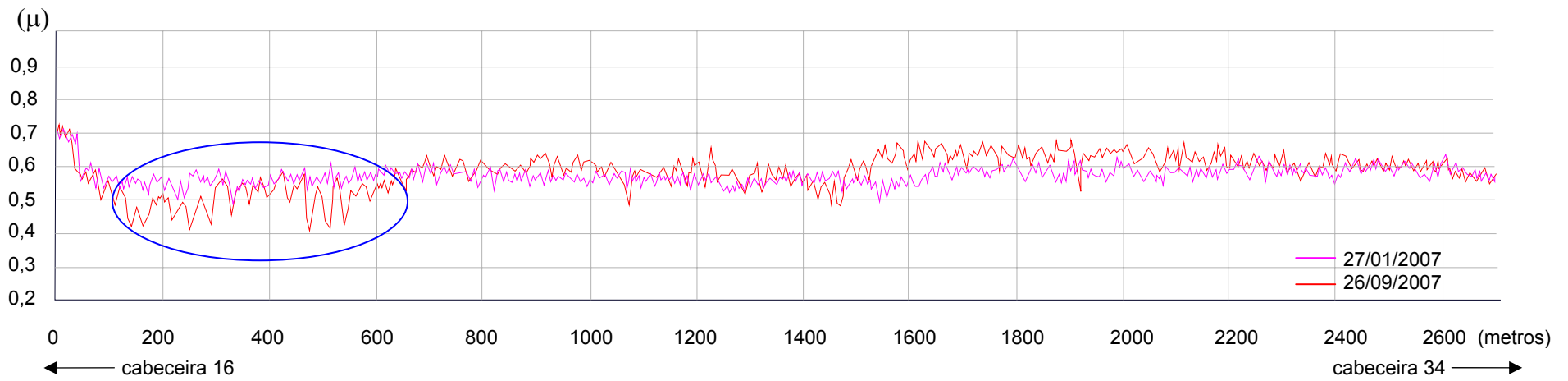


Figura 68 - Coeficiente de Atrito com o Mu-meter - 3 metros à direita do eixo da pista

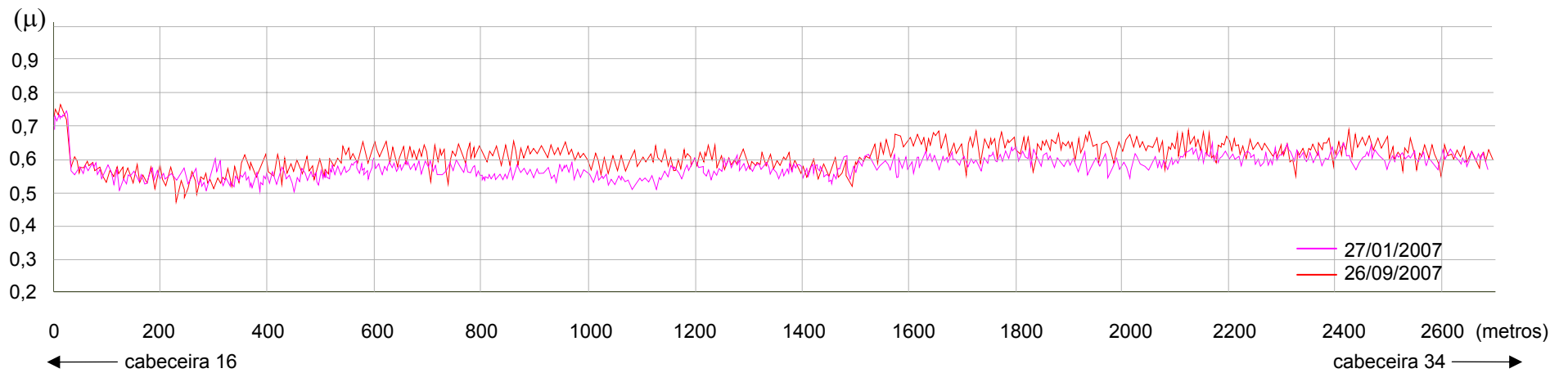


Figura 69 - Coeficiente de Atrito com o Mu-meter - 3 metros à esquerda do eixo da pista

4.4. Remoção de Borracha

Freqüência de limpeza

Na Tabela 23, têm-se os pousos por aeronave no intervalo entre os serviços de limpeza da pista, 26 de outubro de 2006 a 03 de outubro de 2007, cerca de 340 dias.

Tabela 23 – Número de pousos e massa total das aeronaves

Tipo de Aeronave*	Massa máxima da aeronave na aterrissagem (t)	Total de pousos no período	Massa total por aeronave no período nas duas cabeceiras (t)
A319	61,0	1167	71.187
A320-200	64,5	6351	409.640
A330-200	180,0	1	180
B707-320B	94,0	7	658
B727-100	64,7	36	2.329
B727-200	73,1	541	39.547
B737-300	52,5	4305	226.129
B737-400	54,9	232	12.737
B737-700	58,1	3080	178.948
B737-800	65,3	1893	123.613
B747-400	295,7	1	296
B757-200	89,8	48	4.310
B767-200	122,5	2	245
B767-300	136,1	51	6.941
FK100	39,9	2144	85.578
G550	34,1	1	34
EMB145	18,7	4	75
total	-	19.864	1.162.446

*A – AirBus; B – Boeing; EMB – Embraer; FK – Fokker, G - Gulfstream

Considerando que, em média, 96% dos pousos ocorrem na cabeceira 16, a massa total no período de, praticamente 1 ano, foi de 1.115.948 t ou 1.116×10^6 kg, para um total de 56 pousos diários na cabeceira para o mesmo período.

Para esses valores, tanto em relação ao número de pousos diários por cabeceira, quanto à massa total anual de pousos, a FAA sugere um intervalo para a remoção de

borracha em até 6 meses. O último serviço de limpeza no aeroporto foi realizado no mês de outubro de 2007, aproximadamente 1 ano após o anterior, em outubro de 2006.

Ainda não existe no aeroporto uma especificação para esse intervalo de limpeza. Quando os pilotos detectam problemas, realizam-se limpezas pontuais nos locais indicados. No Aeroporto Santos Dumont, onde também é aplicado o revestimento com CPA e com um volume de tráfego semelhante, o intervalo de limpeza é de 60 a 90 dias.

Limpeza da pista de pouso e decolagem

O acompanhamento dos serviços de limpeza da pista ocorreu durante os meses de outubro e novembro de 2007. A Figura 70 mostra a limpeza executada com equipamento de barra giratória. Os serviços de limpeza foram realizados durante a madrugada, devido à ausência de vôos nesse período.



Figura 70 – Limpeza da pista equipamento de barra giratória

Para a avaliação de eficiência da limpeza, tomou-se como parâmetro valores do ensaio de mancha de areia antes e após a limpeza, com utilização da areia normal do IPT, com volume de 50ml.

Os dados referentes à remoção de borracha na pista estão apresentados na Tabela 24. Verificaram-se pontos distantes a 3 e 5 metros do eixo da pista.

Tabela 24 – Valores de profundidade de textura antes e após a limpeza

Local do ensaio	Macrotextura - mancha de areia	
	HS (mm)	
	antes	depois
1A	1,36	1,63
1C	2,20	2,74
1E*	1,61	1,60
1G	4,92	4,85
2A*	2,34	2,30
2C*	3,84	3,75
2E*	1,86	1,84
2G	2,49	3,08
3A	1,15	1,26
3C	2,02	2,65
3E	1,35	1,41
3G*	2,74	2,65
4A	1,14	1,86
4C	1,99	2,17
4E*	1,44	1,46
4G	1,94	2,78
5A	0,99	1,26
5C	1,44	2,61
5E*	1,53	1,52
5G	2,83	2,88
6A*	2,49	2,51
6C	2,98	3,25
6E*	2,24	2,20
6G	2,93	2,90

* não houve remoção de borracha

Os valores encontrados depois da limpeza indicaram uma remoção geral na zona de toque da ordem de 14%. Desconsiderando os pontos em que a borracha não foi removida, esse valor sobe para 23%. Analisando-se apenas os pontos localizados a 3m do eixo, área de maior emborrachamento, a eficiência ficou próxima de 10% e, considerando apenas pontos afastados 5m do eixo, com menor porcentagem de toques, o valor foi de, aproximadamente, 18%.

Verificou-se, em geral, pouca eficiência na remoção da borracha. Nos locais onde a contaminação foi menor (5m do eixo), talvez pelo fato de a borracha não se encontrar tão impregnada em relação aos pontos afastados a 3m, obteve-se uma maior

remoção. O longo período de ausência de limpeza, 1 ano, também contribuiu para a pouca eficiência de remoção, visto que a CPA requer constante manutenção.

Destaca-se que no Aeroporto Santos Dumont, além do intervalo de limpeza ser menor, aplica-se na CPA um produto químico para a remoção de borracha, que foi desenvolvido especialmente para aeroportos. O produto é espalhado na superfície e depois de certo tempo, aplica-se o jato de água a alta pressão no pavimento, de modo a promover a limpeza.

A colmatação dos poros por borracha na CPA é evidente, devido à sua própria característica, porém a vida útil do pavimento pode ser estendida, com uma manutenção mais eficaz do pavimento.

Nas Figura 71 e Figura **72** são apresentadas, respectivamente, os valores de coeficiente de atrito medidos com o Mu-meter, à direita e à esquerda do eixo da pista, antes e depois dos serviços de limpeza. Os valores de coeficiente de atrito, praticamente, em toda a extensão da pista são inferiores, curiosamente, após o serviço de limpeza.

Como não existe um procedimento de ensaio que fixa a distância de 3 metros do eixo da pista por parte da INFRAERO, uma das possibilidades para a explicação desses resultados deve-se ao fato de que o equipamento Mu-meter possa ter se desviado do alinhamento de 3 metros do eixo da pista de pouso e de decolagem, divergindo os resultados.

Outro fator a se considerar é que na medição antes da limpeza, no dia 26 de setembro de 2007, a região em que se situa o aeroporto passou por um grande período sem chuvas, cerca de 4 meses, podendo ter influenciado as condições de atrito da superfície. O período de chuvas já havia iniciado na medição do dia 28 de dezembro de 2007.

Deve-se, também, ressaltar a diferença de condição climática na hora da realização dos testes. A medição do dia 26 de setembro de 2007 foi realizada durante o dia com alta temperatura, enquanto a medição do dia 28 de dezembro de 2007 foi realizada de madrugada, com certa umidade no pavimento.

Há de se verificar, também, a regulagem da vazão do sistema de aspersão de água.

Realizou-se, também, a medição do atrito com um afastamento de 4,5 m à direita do eixo da pista, conforme Figura 73. Essa medição foi executada apenas para constatar se existem grandes diferenças de valores de atrito em comparação com valores obtidos à 3 metros do eixo. O valor médio de atrito foi de 0,57, para toda a extensão da pista.

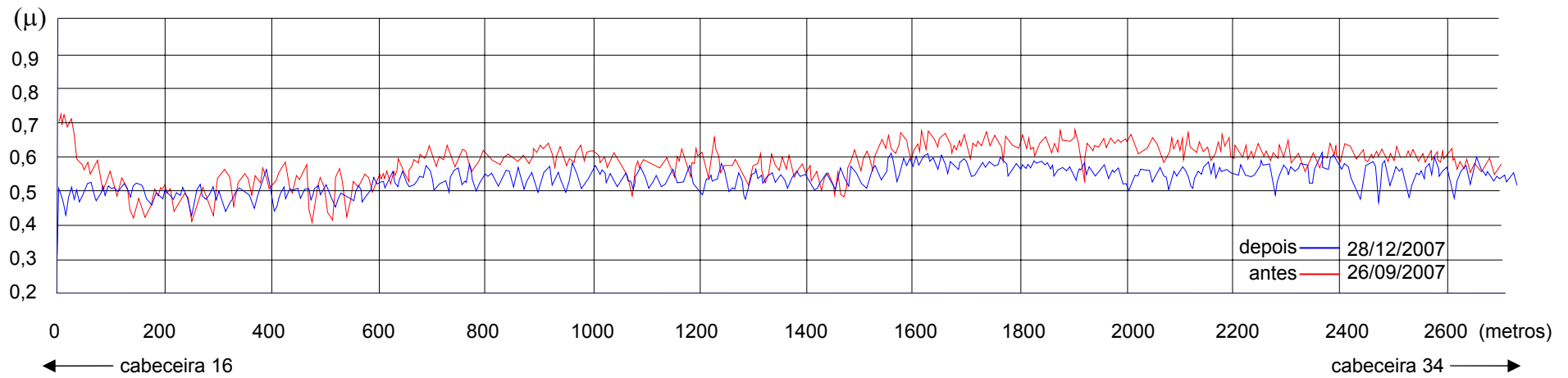


Figura 71 - Coeficiente de Atrito com o Mu-meter - 3 metros à direita do eixo da pista

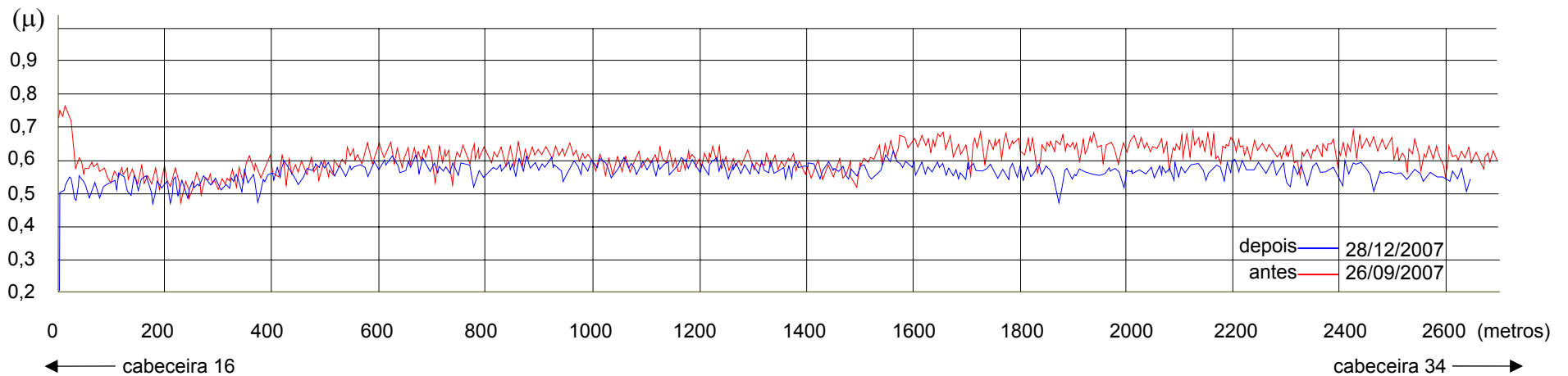


Figura 72 - Coeficiente de Atrito com o Mu-meter - 3 metros à esquerda do eixo da pista

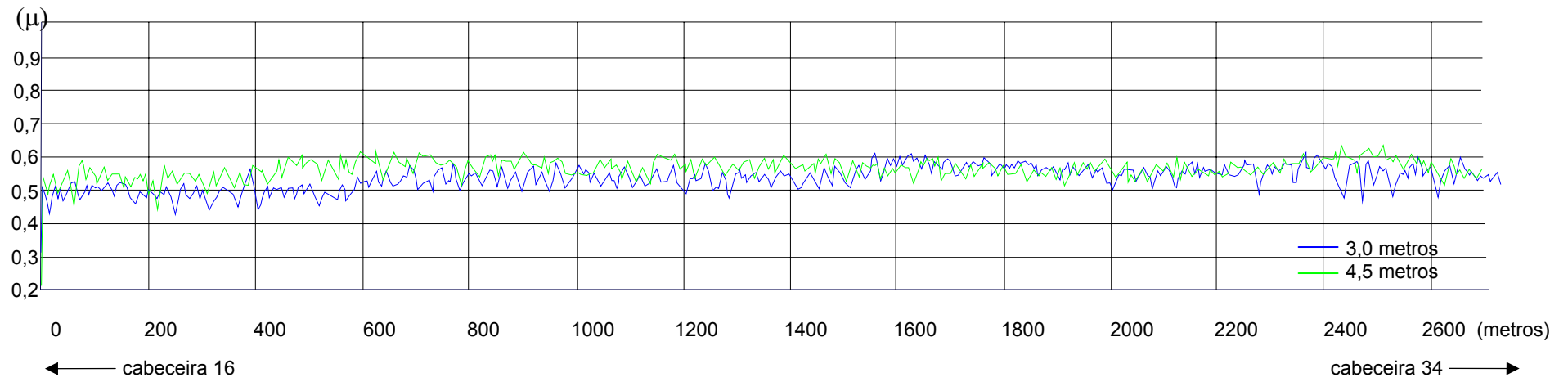


Figura 73 – Comparação do coeficiente de atrito para dois afastamentos do eixo

Dados Hidrológicos

A estação climatológica do aeroporto possui informações desde 1991, com série histórica de dados de 17 anos. A Tabela 25 mostra os valores de precipitação máxima diária anual, os totais anuais de precipitação da série histórica e também o número de dias de chuva em cada ano.

Tabela 25 – Dados pluviométricos da estação

Ano	Precipitação máxima diária (mm)	Total anual (mm)	Dias de chuva
1991	68	1021,8	105
1992	76	1405,9	129
1993	51,1	743,6	97
1994	43,3	1079,2	101
1995	118,3	1522,2	107
1996	100,9	1545,2	117
1997	109,6	1428	112
1998	77,5	1447,3	96
1999	59,1	1305,9	90
2000	82,6	1260,5	96
2001	87,1	1283	98
2002	74,2	1367,9	105
2003	79,4	1136,5	101
2004	64,3	1490,6	116
2005	73	1423	121
2006	54,5	1170,2	131
2007	59,7	816,9	93

Com base na série de dados fez-se um estudo do regime de chuvas no aeroporto, conforme apresentado na Figura 74. Constatou-se que o início significativo das chuvas ocorre entre os meses de setembro e outubro. Esses dados podem ser usados como um instrumento na manutenção do pavimento, orientando os técnicos em relação ao regime de chuvas da região.

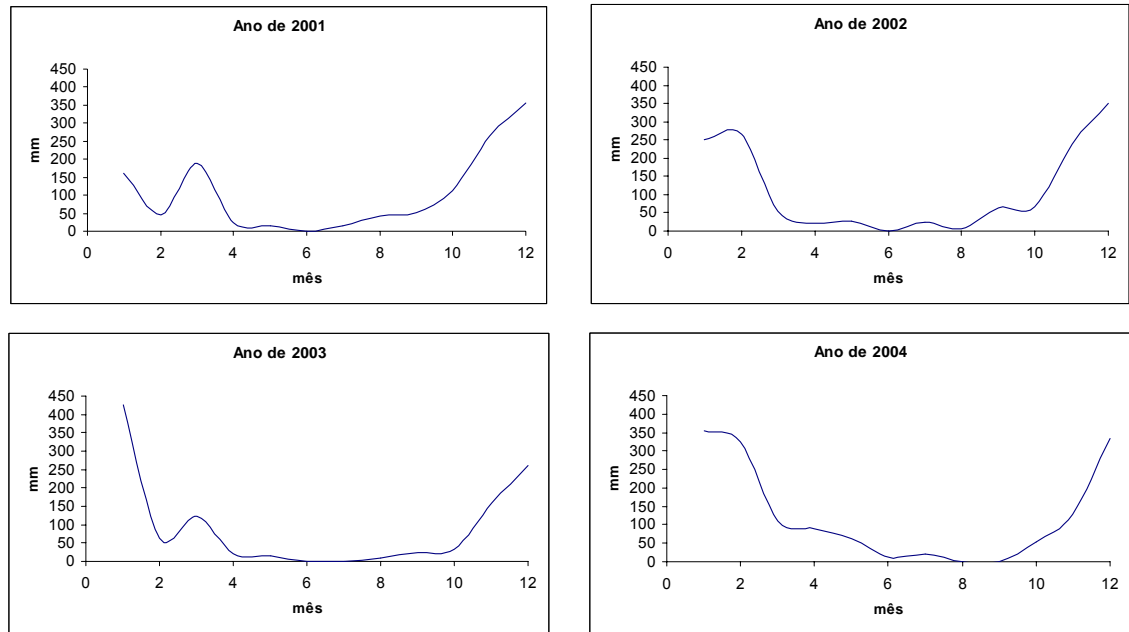


Figura 74 – Ano hidrológico

Para a estimativa de precipitações máximas foi utilizada a equação i-d-f. Os parâmetros da equação foram interpolados para o aeroporto, obtidos pelo programa Plúvio 2.0. O ponto interpolado, de coordenadas 43⁰58'22" W de longitude e 19⁰37'22" S de latitude, está inserido no complexo aeroportuário, próximo à estação climatológica. Os parâmetros são apresentados a seguir:

K: 1885,905; a: 0,205; b: 20,207; c: 0,868

A equação i-d-f é descrita pela Equação 36:

$$i = \frac{1885,905 \cdot T^{0,205}}{(t + 20,207)^{0,868}} \quad \text{eq 36}$$

Na Tabela 26, tem-se os valores de intensidade máxima para cada período de retorno e duração de chuva.

Tabela 26 – Intensidades máximas de precipitação (mm/h)

Duração da chuva (min)	T (anos)			
	2	5	10	20
5	132,0	159,3	183,6	211,7
10	112,8	136,2	157,0	180,9
20	88,0	106,2	122,5	141,2
30	72,6	87,6	101,0	116,4
60	48,4	58,3	67,2	77,5

É comum trabalhar com durações de chuva menores em aeroportos, visto que as mesmas são as de maior intensidade e podem causar até o fechamento da pista. Nessa região em que se situa o aeroporto, pode-se considerar uma chuva crítica de projeto com intensidade acima de 100 mm/h.

4.5. Estimativa da lâmina d'água e da velocidade crítica para hidroplanagem

Estimativa da lâmina d'água

Os modelos de estimativa da lâmina d'água utilizam a geometria da pista como um dos principais parâmetros de entrada. A Figura 75 ilustra uma seção transversal típica da pista de pousos e de decolagens do aeroporto, com as camadas constituintes do pavimento e as inclinações transversais da pista.

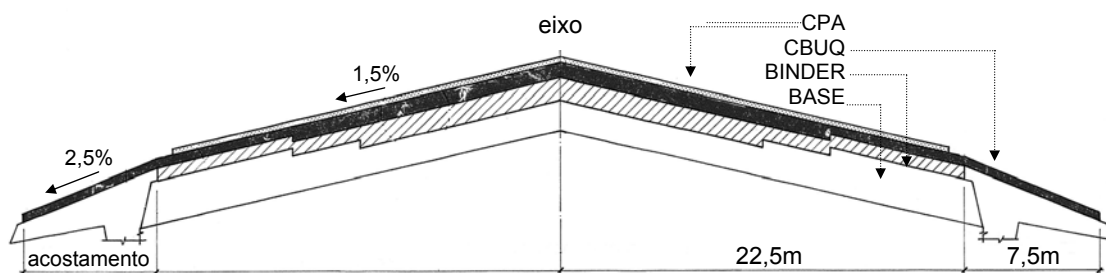


Figura 75 – Seção transversal da pista de pouso e decolagem

A camada subjacente a CPA é o elemento do sistema de drenagem, atuando como uma barreira à percolação da água para as camadas de base do pavimento. No aeroporto, esse revestimento é constituído por um CBUQ convencional de granulometria densa com função impermeabilizante.

No sentido longitudinal, conforme se ilustra na Figura 76, a pista apresenta diferentes declividades a fim de se obter um melhor escoamento da água de chuva.

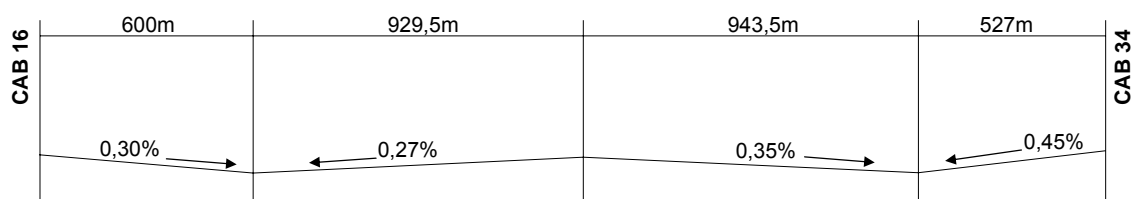


Figura 76 – Perfil longitudinal

Na Figura 77, apresentam-se os resultados de estimativa de lâmina d'água sobre a superfície do pavimento, segundo os modelos propostos por Russam e Ross (1968), Equação 23, Gallaway et al. (1979), Equação 26 e Andreatini (1986), Equação 27.

Foram fixados os valores de declividade transversal (1,5%), declividade longitudinal (0,30%), largura da pista (22,5 m), profundidade da textura (2 mm) e coeficiente de rugosidade (0,006). O valor da lâmina foi calculado baseado em cada parâmetro exigido nos modelos.

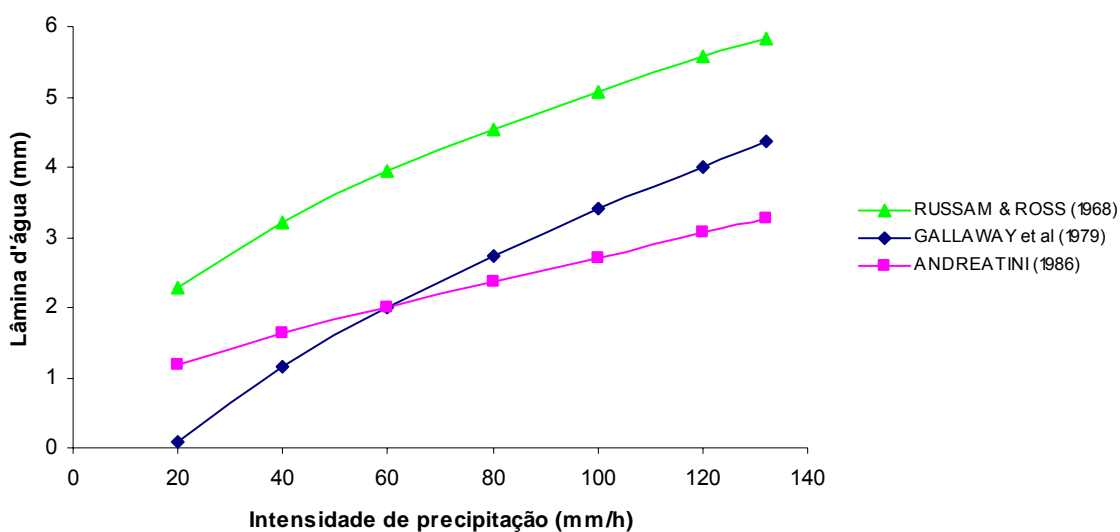


Figura 77 – Intensidade de precipitação *versus* lâmina d'água

As curvas da Figura 77 ilustram as diferenças e as semelhanças existentes entre os modelos. Os modelos propostos por Russam e Ross e o de Gallaway *et al.* apresentaram curvas semelhantes, observando-se certo deslocamento entre as mesmas. Esse deslocamento pode ser resultado de uma variável considerada no modelo de Gallaway *et al.*, a macrotextura do pavimento. Andreatini também considera essa variável, nesse caso, adotando o coeficiente de rugosidade da superfície, e os resultados se aproximam da curva proposta por Gallaway *et al.*

Contudo, para melhor avaliação desses modelos, ou até mesmo proposição de algum modelo, torna-se necessário uma validação em campo dessa espessura da lâmina d'água, com equipamentos para determinação da lâmina produzida, como também de um pluviômetro para registrar o volume de precipitação no pavimento.

Na Tabela 27, apresenta-se os resultados de análise de sensibilidade para os parâmetros dos modelos mais utilizados, o modelo de Russam e Ross (1968) e o modelo de Gallaway *et al.* (1979). Variaram-se os valores de cada um dos parâmetros

em -75%, -50%, -25%, +25%, +50% e +75%. Os resultados no interior da tabela indicam a variação da lâmina d'água em função da variação de cada parâmetro.

Tabela 27 – Sensibilidade de cada parâmetro dos modelos

Gallaway et al	-75%	-50%	-25%	25%	50%	75%
HS	30,4%	23,9%	12,9%	-14,0%	-28,7%	-43,9%
L	-77,8%	-44,6%	-20,2%	17,4%	33,0%	47,1%
i	-96,7%	-58,1%	-27,0%	24,4%	46,8%	67,7%
S	136,8%	58,5%	22,2%	-15,5%	-27,1%	-36,3%
Russam & Ross	-75%	-50%	-25%	25%	50%	75%
Lf	-50,0%	-29,3%	-13,4%	11,8%	22,5%	32,3%
Sf	32,0%	14,9%	5,9%	-4,4%	-7,8%	-10,6%
i	-50,0%	-29,3%	-13,4%	11,8%	22,5%	32,3%

Nota-se maior sensibilidade na variação dos parâmetros do modelo de Gallaway *et al.*, em que, por exemplo, uma diminuição da intensidade de precipitação em 50%, resulta numa redução da lâmina de 58% no modelo de Gallaway *et al.*, enquanto que no modelo de Russam e Roos, a diminuição foi de apenas 29%, aproximadamente.

Estimativa da velocidade crítica para ocorrência de hidroplanagem

Para a estimativa da velocidade crítica em que ocorre a hidroplanagem, adotou-se a fórmula de Gallaway *et al.* (1979), conforme Equação 16. Na Figura 78, tem-se a velocidade crítica em função da variação da porcentagem do giro de roda. Na Figura 79, a velocidade crítica é apresentada em função da profundidade da lâmina d'água no pavimento.

$$V = 0,9143.SD^{0,04}.P^{0,3}.(TD + 0,794)^{0,06}.A \quad \text{eq 16}$$

Muitas equações utilizam somente a pressão dos pneus para a estimativa da velocidade crítica em que se ocorre o fenômeno da hidroplanagem. Gallaway *et al.* propõem a adoção de mais variáveis que também possuem influência nesse fenômeno, como por exemplo, a espessura da lâmina d'água presente no pavimento. Pela Figura 79, nota-se o decréscimo da velocidade crítica quando a superfície se encontra com 3 mm de lâmina d'água.

Esses valores apresentados mostram a influência de algumas variáveis da hidroplanagem. Embora a equação tenha sido desenvolvida para rodovias, quando

comparadas com outras equações obtidas por ensaios com aeronaves, em que se adotam somente a pressão de enchimento dos pneus, essas velocidades críticas se aproximam. No entanto, é necessário estudo com aeronaves em diversos tipos de pavimentos, para que se tenha uma validação e posterior refinamento dessa equação.

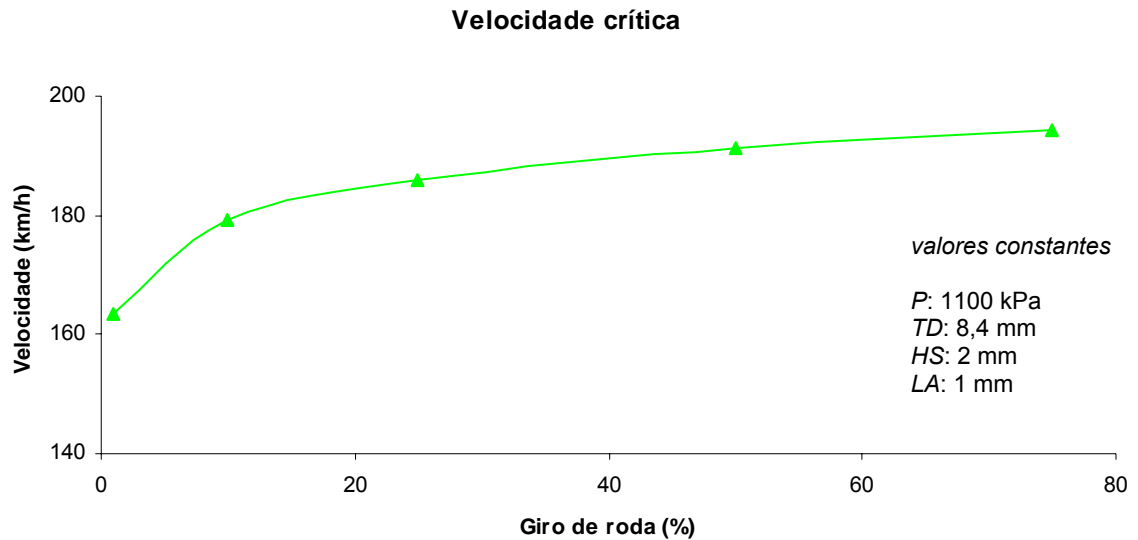


Figura 78 – Velocidade crítica versus porcentagem de giro de roda

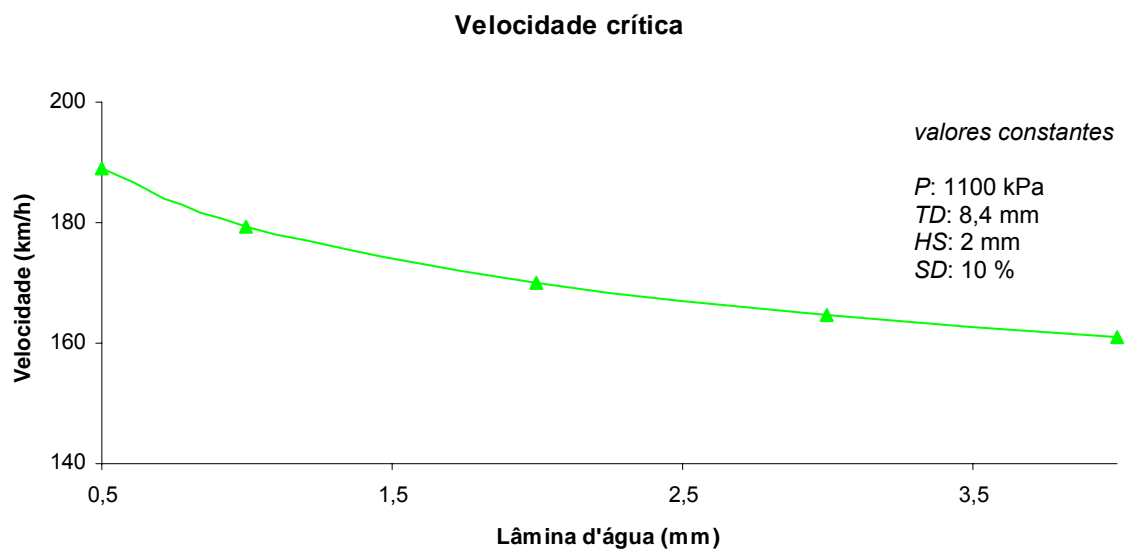


Figura 79 – Velocidade crítica versus lâmina d'água

4.6. Ensaios de drenabilidade do pavimento

O drenômetro construído para essa pesquisa foi utilizado para avaliar áreas com diversos graus de drenabilidade do pavimento, considerando regiões com ou sem toques das aeronaves. Entretanto, os primeiros resultados mostraram uma difícil diferenciação de cronometragem, visto os diferentes níveis de contaminação da

superfície. As maiores diferenças de tempo, conseguiram indicar apenas áreas com maior grau de contaminação e áreas com pouca ou nenhuma contaminação. Os resultados desse drenômetro são apresentados na Tabela 28, onde, em média, a área emborrachada (3 m do eixo) teve uma vazão de 0,32 l/s e a área sem contaminação foi de 0,51 l/s.

Tabela 28 – Tempo de escoamento da água – diâmetro de 2 polegadas

Região	Tempo de escoamento (s)
Sem Contaminação	1,59
Sem Contaminação	1,43
Sem Contaminação	1,37
Sem Contaminação	1,37
Emborrachada	2,17
Emborrachada	2,26
Emborrachada	2,24
Emborrachada	2,40

Devido a essa dificuldade, realizou-se uma adaptação no drenômetro com o objetivo de melhorar a diferenciação entre as áreas. Diminuiu-se o diâmetro do orifício de saída da água, de 2 polegadas para 1 polegada. O drenômetro com o detalhe da adaptação no orifício (anel de acrílico branco) é apresentado na Figura 80.



Figura 80 – Drenômetro com a adaptação do orifício

Após essa adaptação, novos testes de drenabilidade determinaram três grupos de valores de tempo distintos, um grupo formado pelas regiões sem solicitação de

aeronaves, um grupo onde ocorrem toques de aeronaves, porém sem grandes emborrachamentos, e outro grupo em que se têm áreas altamente emborrachadas, conforme apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 – Tempo de escoamento da água – diâmetro de 1 polegada

Região	Tempo de escoamento (s)
sem solicitação	2,49
sem solicitação	2,80
pouco emborrachada	1,32
pouco emborrachada	1,37
altamente emborrachada	5,35
altamente emborrachada	4,55

As Figuras 81, 82 e 83, caracterizam as regiões sem solicitação de aeronaves, área pouco emborrachada e altamente emborrachada, respectivamente.



Figura 81 – Área sem solicitação de aeronaves



Figura 82 – Área pouco solicitada



Figura 83 – Área altamente emborrachada

4.7. Classificação das imagens digitais

Os valores de porcentagem de emborrachamento, a partir da classificação não-supervisionada, Tabela 30, demonstraram que a técnica de tratamento de imagens digitais possui boa correlação (R^2 : 0,85) com os valores de macrotextura obtidos pelo ensaio de mancha de areia.

Tabela 30 – Porcentagem de emborrachamento

Ponto	Mancha de areia HS (mm)	Emborrachamento (%)
1B	1,91	38,2
2 ^a	1,53	42,1
2B	1,94	39,5
3 ^a	1,60	44,7
3B	1,76	37,1
4 ^a	1,74	40,8
4B	1,89	36,2
5*	1,13	50,5
7**	1,13	50,3
8***	1,32	52,5

* ponto extra, altamente emborrachado, na região dos pontos 5A e 5B

** ponto extra, altamente emborrachado, na região do ponto 7A

*** ponto extra, altamente emborrachado, na região do ponto 8B

Na Figura 84, tem-se o ponto 8*, antes e após a classificação. As áreas em marrom correspondem à presença de borracha no pavimento.

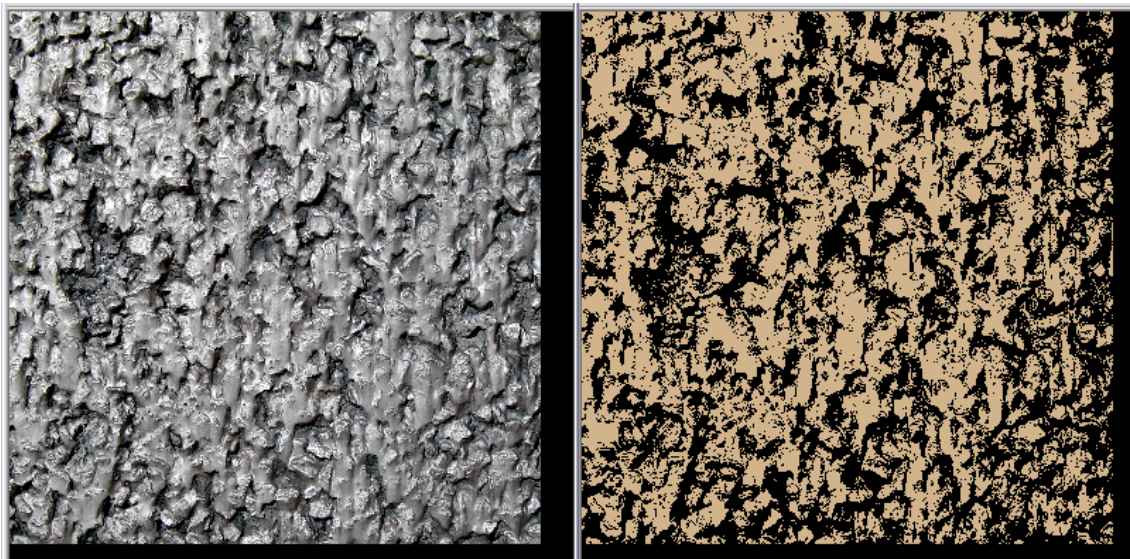


Figura 84 – Classificação de ponto altamente emborrachado

Na Figura 85, apresenta-se a imagem classificada para o ponto 4B, com pouca presença de borracha.

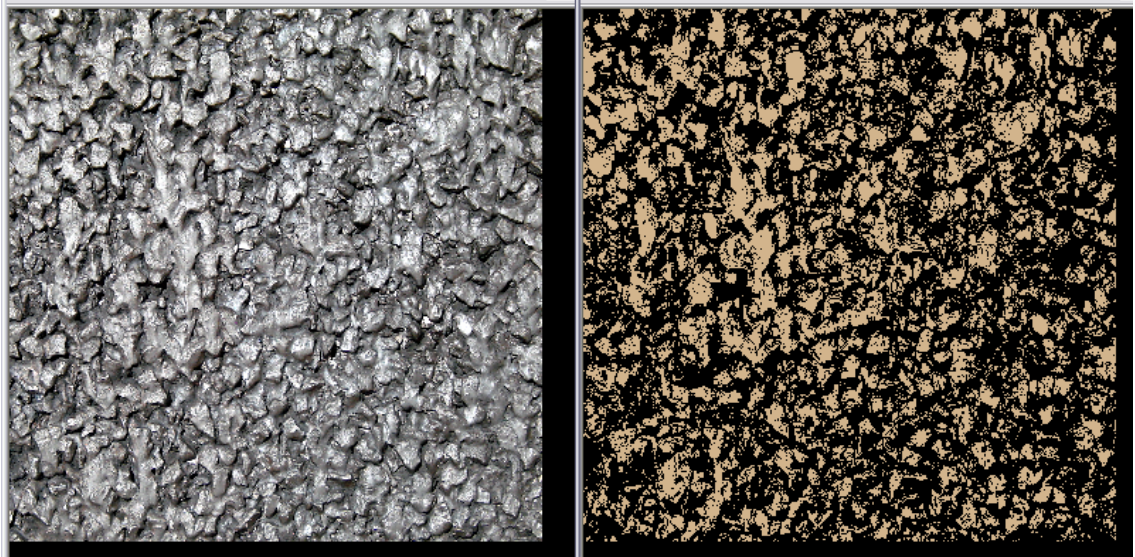


Figura 85 – Classificação de ponto pouco emborrachado

A determinação do nível de emborrachamento por meio da classificação de imagens, embora necessite de maior padronização, mostrou-se como uma alternativa viável, prática e simples, tornando-se mais um instrumento de verificação das condições do pavimento.

4.8. Discussões Gerais

No Brasil, ainda não se tem recomendações de parâmetros de classificação de macrotextura para pavimentos com a Camada Porosa de Atrito. Os valores encontrados nesse trabalho e conseqüentemente as sugestões apresentadas vêm de encontro à necessidade de estudos específicos para tal superfície.

As diferentes recomendações de tipos de areia para o ensaio de mancha de areia, levam a princípio, a um resultado satisfatório quando considerado o grau de correlação entre areias e/ou micro-esferas no valor de profundidade de macrotextura. Porém, em valores absolutos, existem diferenças entre algumas recomendações. Ao avaliarem-se diversos tipos de superfícies, essas diferenças podem se tornar ainda maiores. A adoção da Areia Normal produzida pelo IPT visa padronizar o ensaio de mancha de areia, evitando essas discrepâncias.

Propõe-se então, que os ensaios de mancha de areia em Camada Porosa de Atrito sejam feitos com a Areia Normal e que se adotem os intervalos de valores de profundidade de macrotextura, conforme Tabela 20, na estimativa do nível de emborrachamento da pista para o auxílio nos serviços de limpeza da mesma.

Tabela 31 – Proposta de níveis de emborrachamento

Profundidade da macrotextura HS (mm)	Faixas de emborrachamento
< 1,2 mm	altamente emborrachada
> 1,2 mm e < 1,6 mm	emborracha
> 1,6 mm e < 2,0 mm	levemente emborrachada
> 2,0 mm	praticamente sem borracha

Esses intervalos propostos refletem a experiência adquirida ao longo da pesquisa, juntamente com os resultados de ensaio de macrotextura em diversos locais da pista, tornando-se, assim, mais um instrumento na avaliação de pavimentos aeroportuários.

As condições de emborrachamento ainda podem ser verificadas por meio da classificação não-supervisionada das imagens digitais, que se mostrou eficiente na determinação da porcentagem de área emborrachada, quando comparada com resultados dos ensaios de mancha de areia. Uma vez estabelecida a correlação com o ensaio de mancha de areia, a aquisição de informações sobre as condições de textura do pavimento pode ser feita apenas com imagens digitais, tornando o processo mais ágil, diminuindo o tempo de permanência nas pistas de pousos e decolagens.

Ainda com relação ao emborrachamento da pista, deve-se destacar a baixa eficiência verificada na limpeza da pista. Uma vez que não se tinha tanta impregnação de borracha no pavimento, visto o baixo volume de tráfego até o momento, a remoção com jato a alta pressão atendia às necessidades de limpeza. Contudo, com o incremento nos vôos, essa técnica de remoção não teve a mesma eficiência de limpezas passadas, o que força a administração rever suas técnicas de limpeza, podendo adotar, por exemplo, a remoção química em conjunto com a remoção mecânica, como já vem ocorrendo no Aeroporto Santos Dumont.

Também foram avaliados dois diferentes tipos de equipamentos para verificação das condições de atrito entre pneu e pavimento. Observando-se maior sensibilidade às variações de emborrachamento da pista quando se utilizou o Pêndulo Britânico. O Mu-meter diferencia apenas regiões do pavimento com grandes diferenças de condições de atrito e em longas distâncias, sendo necessário algumas verificações pontuais dessas condições, principalmente na zona de toque das aeronaves. Essa verificação pode ser feita com o próprio Pêndulo ou a partir da macrotextura da superfície, com o

ensaio de mancha de areia, e dessa forma, obter uma estimativa das condições da pista por meio da Tabela 20.

Para o pavimento com CPA, especificamente do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, a utilização do índice internacional de atrito, no que diz respeito ao coeficiente de atrito, pode ser obtido apenas com a utilização do Pêndulo Britânico, ou com algum outro equipamento homologado no estudo da PIARC. O equipamento Mu-meter não apresentou boa correlação com o Pêndulo Britânico, talvez pela própria natureza de medição dos mesmos, não sendo possível, utilizar seus dados na determinação dos parâmetros do IFI.

Há de se verificar e controlar, as condições de realização das medições de coeficiente de atrito com o equipamento Mu-meter, uma vez que diversos fatores podem interferir na célula de medição e assim fornecer valores irrealistas de atrito da pista. Os valores de coeficiente de atrito encontrados antes e após os serviços de limpeza, por exemplo, não condizem com a realidade, sendo que em muitos pontos, o coeficiente de atrito diminuiu ao invés de, no mínimo, continuar com o mesmo valor de antes.

Outro equipamento utilizado para estimativa da macrotextura superficial, o drenômetro, mostrou-se eficiente na diferenciação de graus de emborrachamento da pista. Verificou-se que em determinadas regiões, mesmo com alto grau de emborrachamento, a água escoava muito rápido, provavelmente devido ao diâmetro de 2 polegadas sempre encontrar algum caminho preferencial de escoamento, mascarando os resultados. A diminuição do orifício de saída para 1 polegada, contornou o problema da alta taxa de infiltração, possibilitando, assim, maior distinção entre os níveis de emborrachamento do pavimento.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- A utilização indiscriminada de qualquer tipo de areia ou micro-esfera pode levar a uma incorreta avaliação da condição do pavimento, visto a diferença entre as mesmas;
- Recomenda-se a adoção da Areia Normal produzida pelo IPT, como padrão para o ensaio de mancha de areia na determinação da condição da macrotextura superficial;
- Espera-se que os órgãos competentes adotem a proposição de classificação do nível de emborrachamento do pavimento, exclusivamente para CPA, conforme a Tabela 20;
- A redução no diâmetro do orifício de saída do drenômetro torna-se essencial quando se trabalha em pavimentos de granulometria aberta como a CPA;
- Não foi possível utilizar os valores de coeficiente de atrito obtidos pelo Mu-meter para o cálculo dos parâmetros do Índice Internacional de Atrito – IFI;
- A medição de atrito com o Mu-meter deve ser feita considerando-se todas as condições de ensaios em campo, para que não se tenha valores divergentes como os encontrados nessa pesquisa;
- É necessário que a INFREARO estude novos intervalos máximos de verificação de atrito e textura do pavimento de suas pistas de pousos e decolagens;
- A classificação de imagens digitais, embora necessite de maior padronização, pode ser utilizada na estimativa do grau de emborrachamento do pavimento;
- A limpeza da pista não foi satisfatória. Em muitos locais, não se conseguiu remover a borracha impregnada no pavimento, devido às próprias características da CPA e também devido ao longo tempo sem limpeza;

- É fundamental um estudo da aplicação do solvente químico produzido especialmente para aeroportos, uma vez que a remoção por jato d'água a pressões muito elevadas pode ocasionar a desagregação da CPA.

Sugestões para pesquisas futuras:

- Aperfeiçoar a técnica de aquisição das imagens digitais, padronizando, por exemplo, o ângulo de tomada da imagem;
- Analisar outros equipamentos de medição de atrito contínuo constante na lista homologada para o cálculo do IFI e verificar a existência de correlação com os resultados obtidos com o Mu-meter;
- Analisar a Areia Normal do IPT para todos os tipos de superfície, inclusive com outros tipos de revestimento com granulometria aberta;
- Verificar a eficiência da remoção de borracha, com a adoção da remoção química, com o solvente desenvolvido para aeroportos, em conjunto com a remoção por jato de alta pressão na limpeza da pista;
- Monitorar o volume de precipitação em tempo real, com medição da espessura da lâmina d'água sobre o pavimento, correlacionando intensidade de precipitação com as características físicas da superfície do pavimento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, M. C. **Porous Asphalt Pavement with Recharge Beds: 20 years e still working.** Storm Water Journal. Maio/Junho 2003. Disponível em http://www.forester.net/sw_0305_porous.html, acesso em 20/10/2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **ANAC IAC 3204 (2001).** Requisitos de resistência à derrapagem para pistas de pouso e decolagem. 2001. 13p.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **ANAC IS-RBHA 121-189 (2007).** Instruções para despacho e operação em pista molhada. 2007. 12p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E867-97 (1997):** Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems. West Conshohocken: ASTM Standards, 1997, vol. 04.03, 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E303-93 (1998):** Standard Method for Measuring Frictional Properties Using The British Pendulum Tester. West Conshohocken: ASTM Standards, 1998, vol.04.03, 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E670-94 (2000):** Standard Test Method for Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-meter. West Conshohocken: ASTM Standards, 2000, vol. 04.03, 11 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2100-04 (2001):** Standard Practice for Calculating the International Runway Friction Index. West Conshohocken: ASTM Standards, 2001, vol. 04.03, 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 1960-98:** Standard Practice for calculating International Friction Index of a Pavement Surface. West Conshohocken: ASTM Standards, 2001. 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E965-96 (2001):** Standard Test Method for Measuring Surface Macro texture Depth Using a Volumetric Technique. West Conshohocken: ASTM Standards, 2001, vol. 04.03, 5 p.

ANDRE, L. **Landing on Slippery Runways**. Boeing Airliner. 2001.

ANDREATINI, L. P. V. **Determinação da Espessura da Lâmina D'água Devida à Precipitação Pluvial na Superfície de Pavimentos**. In: 21ª Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, BA. 1986.

APS, M. **Classificação Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI – International Friction Index para Revestimentos Asfálticos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, USP. São Paulo. 2006. 179p.

ARAÚJO, J. A. **As Condições de Atrito Superficial das Pistas de Aeroportos como Parte da Gerência de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, UFF. Niterói. 1994. 247p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAVIMENTAÇÃO (ABPv). **Boletim Técnico Nº18**. Informativo Técnico sobre Avaliação da Resistência à Derrapagem através de Aparelhagem Portátil. 1998.

BERNUCCI, L. L. B. []. 2005. Fotografia, colorida, digital.

BOCHOVE, G. **Van Twinlay, a new concept for porous asphalt**. Eurasphalt & Eurobitume Congress. Strasbourg, 1995.

BOEING. **Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959-2006**. Aviation Safety. Boeing Commercial Airplanes. Washington, USA. 2007. 26p. Disponível em <http://www.boeing.com/news/techissues> , acesso em 29/08/2007.

CIBERMÉTRICA. **Perfis Longitudinais de Pavimentos Rodoviários e sua Medição com Perfilômetros Inerciais**. Disponível em <http://www.cibermetrica.com.br>, acesso em 20/05/2007.

CAA - CIVIL AVIATION AUTHORITY. Safety Regulation Group. CAP683. **The Assessment of Runway Surface Friction for Maintenance Purposes**. 2004. 13p.

CARDOSO, S. H. **Sugestão de um Sistema de Gerência de Pavimentos para Aeroportos Brasileiros**. In: 29ª Reunião Anual de Pavimentação, Cuiabá, MT. 1995.

CAVALCANTE, F. P. et. al. **Avaliação Estrutural de Trecho Rodoviário no Estado da Paraíba.** In: 36ª Reunião Anual de Pavimentação, Curitiba, PR. 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **DER/MG – RT 03.25** – Avaliação da Macrotextura de Pavimentos Viários através do Ensaio de Mancha de Areia. DG/GNT. Belo Horizonte, 2005. 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ES 386/99** – Pavimentação. Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero – Camada Porosa de Atrito. Norma rodoviária – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** (Publicação IPR, 720). Rio de Janeiro. 2006. 314p.

ESDU. ENGINEERING SCIENCES DATA UNIT. **Frictional and Retarding Forces on Aircraft Tyres, Part 1: Introduction.** London. (ESDU Data Item No.71025). 1971. 40p.

FAA. **Standardized method of reporting airport pavement strength - PCN.** AC n.150/5335-5. US Department of Transportation. 1983. 20p.

____ . **Measurement, Construction and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces.** AC n.150/5320-12A. US Department of Transportation. 1986. 39p.

____ . **Measurement, Construction and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces.** AC n.150/5320-12C. US Department of Transportation. 1997. 37p.

____ . **Measurement, Construction and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces.** AC n.150/5320-12C Change 8. US Department of Transportation. 2007.

FERNANDES, E. S; DOMINGUES, F. A A. **Considerações sobre a Micro e a Macrotextura de Pavimentos.** In 27ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, São Paulo, SP. 1993.

FERREIRA, P. N. **Avaliação da Macrotextura de Trechos Pavimentados de Rodovias Estaduais Situadas na Região Insular do Município de Florianópolis.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Santa Catarina. 2002. 161p.

GALLAWAY, B. M.; IVEY, D. L.; HAYES, G. G.; LEDBETTER, W. G.; OLSON, R. M.; WOODS, D. I.; SCHILLER, R. E. **Pavement and Geometric Design Criteria for Minimizing Hydroplaning.** Federal Highway Administration, Report N^o. FHWA-RD-79-31. 1979. 278p.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics.** Warrendale: Society of Automotive Engineers. 1992. 495p.

GONTIJO, P.R.A.; GUIMARÃES, F.H.R.; NOGUEIRA, C.L. **Metodologias Brasileiras para Avaliações das Características Funcionais e Estruturais de Pavimentos Rodoviários – Estado da Arte.** In: 28ª Reunião Anual de Pavimentação. V. 1, pp. 501- 529, Belo Horizonte, MG. 1994.

GOODYEAR. **Lendo um Pneu. Medidas e Anatomia de Pneus.** Disponível em www.goodyear.com.br, acesso em 06/02/2008.

GOTHIÉ, M. **Qualités d’Usage des Revêtements Routiers en Présence d’Eau.** In: Note D’information n° 91– Chaussées Dependences - SETRA, pp. 01-06. 1996.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management.** Malabar, Flórida. Krieger Publishing Company. 1994. 583p.

HORNE, W. B. **Status of Runway Slipperiness Research.** NASA Langley research Center. 1977. p191-245.

ICAO. Aerodromes - Annex 14 - Vol I. **Aerodrome Design and Operations.** 4ªed. 2004. 233p.

INFRAERO. **Aeroporto Internacional Tancredo Neves completa 22 anos**. Notícias: 30/03/2006. Disponível em <http://www.infraero.gov.br>, acesso em 15/06/2006.

____. Movimento nos Aeroportos. Disponível em <http://www.infraero.gov.br>, acesso em 08/02/2008.

JORDÃO, L. P.; RODRIGUES, J. K. G.; SILVA JR, F. A.; FERNANDES, M. W. Q. **Avaliação Estrutural das Pistas de Pouso e Decolagem, Pátios e Acessos do Aeroporto Presidente Castro Pinto de João Pessoa**. In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ. 2004.

LEFEBVRE, G. **Porous Asphalt**. Permanent International Association of Road Congress – Technical Committee on Surface Characteristics. 1993. 92p. (08.01.B)

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Third Edition. EUA. 1994. 750 p.

MACEDO NETO, M. U. **Gerência de Pavimentos**. Encontro Nacional de Engenharia de Manutenção – Infraero. Brasília, 1993. 10p.

MELO. **A Experiência das Concessionárias de Rodovias do Paraná em Novas Tecnologias de Pavimentação**. 36ª RAPv. Palestra. 2005. 154p.

MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M.; BANDEIRA, A. A. **Projeto e Desempenho de Misturas Asfálticas Tipo Open-Graded Friction Course (OGFC)**. CONIFRA – Congresso de Infra-Estrutura de Transportes. São Paulo. 2007. 20p.

MEURER FILHO, E. **Estudo de Granulometria para Concretos Asfálticos Drenantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, SC. 2001.

MODE OPÉRATOIRE DU LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. **Rugosité Géométrique des Revêtements Routiers – Mésure de la Profondeur au Sable**, RG-2, Paris, FR. 1971.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, USP. São Paulo. 1998. 259p.

MÜLLER, R. M. **Avaliação de Transmissão de Esforços em Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro. 2005. 234p.

NASCIMENTO, H. R. C; REIS, R. M. M. **Camadas Porosas de Atrito com Utilização de Asfalto Modificado com Polímeros**. Publicação Técnica da Ipiranga Asfaltos. 1ª edição/Abril, 1999. 24p.

NÓBREGA, E. S. **Comparação entre Métodos de Retroanálise em Pavimentos Asfálticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro. 2003. 365p.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações**. Editora Edgard Blucher Ltda. 2ª Edição, 3ª Reimpressão. 1998. 328p.

OLIVER, J.W.H. **Factors Affecting the Correlation of Skid Testing Machines and a Proposed Correlation Framework**. *In*: 1st Annual Australian Runway and Roads Friction Testing Workshop, August 2003.

OPUS Consultants, **Skid Resistance Testing**, DIAL (Project file). September 2004.

PERES, R.; SILVA, G. T.; MERIGHI, J. V. **Influência da Natureza da Superfície de Contato na Geração de Aderência nos Pavimentos Aeroportuários**. *In*: V Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos: Políticas e Tecnologias. Recife – PE. 2006. 14p.

PORTO, H. G. **Pavimentos Drenantes**. São Paulo: D & Z Computação Gráfica e Ed., 1999. 109 p.

PREUSSLER, E. S; VALE, A. F; BARBOSA, L. M. **Ensaio Não-Destrutivo no Diagnóstico de Pavimentos Aeroportuários**. *In*: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ. 2004. 12p.

RODRIGUES FILHO, O. S. **Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários. Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, USP. São Paulo. 2006. 290p.

RODRIGUES FILHO, S.; PESTANA, M. R. R.; PAIVA, C. E. L. **O Acúmulo de Borracha na Zona de Toque, o Atrito e a Irregularidade na Segurança das Operações de Pouso e Decolagem.** In: 37ª Reunião Anual de Pavimentação, Goiânia, GO. 2006.

RUSSAM, K.; ROSS, N. F. **The Depth of Rain Water on Road Surfaces.** Road Research Laboratory, Ministry of Transport Report No. LR 236. 1968. 25p.

SANTOS, E. L. **Análise Histórica de Atrito de Medição das Pistas do Aeroporto Santos Dumont – RJ.** Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP. 2004.123p.

SILVA, A. M. **Atrito em Pistas Molhadas.** Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Rio de Janeiro. 1981. 53p.

SILVA, C.E.D.B.D. **Estudo da Permeabilidade de Misturas Asfálticas de Graduação Aberta.** Dissertação de Mestrado, UNICAMP – Campinas, SP. 2005. 130p.

SOUZA, R.; FARIAS, M.; SHIMOISHI; J. M. **Análise Comparativa entre Índices de Irregularidade Longitudinal do Pavimento.** Transportes em Transformação. VII / CNT; ANPET, Brasília, DF. 2002.

TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Editora da UFRGS / ABRH. Porto Alegre, RS. 3ª edição, vol.4. 2002. 943p.

VALE, A. F.; NEGRÃO, D. P.; PREUSSLER, E. S.; FERNANDES FILHO, S. M. **Emprego de Ensaio Não-Destrutivos (NDT) no Diagnóstico de Pavimentos Rígidos.** In: 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ. 2004.

VENTURIERI, A.; SANTOS, J. R. **Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal.** In: ASSAD, E. D; SANO, E.E. Sistema de informações

geográficas. Aplicações na agricultura. 2 ed., Brasília: Embrapa - SPI/ Embrapa - CPAC, 1998. p.351-371.

YAGER, T. J.; VOGLER, W. A.; BALDASARE, P. **Evaluation of Two Transport Aircraft and Several Ground Test Vehicle Friction Measurements Obtained for Many Runway Surface Types and Conditions – A Summary of Test Results from Joint FAA/NASA Runway Friction Program** . NASA Technical Paper 2917. 1990.

YAGER, T. J. **Aircraft and Ground Vehicle Winter Runway Friction Assessment**. NASA/TM-1999-209142. 1999. 16p. Disponível em: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19990052866_1999084955.pdf, acesso em 12/11/2007.

YAGER, T. J. **Runway Friction Measurement**. FAA/Aviation Industry Workshop on Runway Condition Determination, Reporting and Report Dissemination. Washington DC, USA. 2006. Disponível em: http://www.faa.gov/news/conferences_events/runway_cond/media/friction.ppt, acesso em 22/03/2007.

WAMBOLD, J. C., HENRY, J. J. **NASA Wallops Tie/Runway Friction: Workshops 1993-2002**. Montreal: TDC, 2002. 155p. (Publication, TP14190E).

WAMBOLD, J.C.; ANTLE, C. E.; HENRY, J. J.; RADO, Z. **International PIARC Experience to Compare and Harmonize Texture and Skid resistance Measurements**. Paris: PIARC, 1995. 423 p. (Publication, 01.04.T).

WONG, J. Y. **Mechanics of Pneumatic Tires**. 2001. 88p. Disponível em: http://media.wiley.com/product_data/excerpt/19/04713546/0471354619.pdf, acesso em 12/02/2008.