OSWALDO SANSONE RODRIGUES FILHO

CARACTERÍSTICAS DE ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS
ASFÁLTICOS AEROPORTUÁRIOS - ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO
INTERNACIONAL DE SÃO PAULO / CONGONHAS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2006

OSWALDO SANSONE RODRIGUES FILHO

CARACTERÍSTICAS DE ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS
ASFÁLTICOS AEROPORTUÁRIOS - ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO
INTERNACIONAL DE SÃO PAULO / CONGONHAS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de transportes

Orientadora:
Profa. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci

São Paulo
2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Rodrigues Filho, Oswaldo Sansone

Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários. Estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas / O.S. Rodrigues Filho. -- São Paulo, 2006. p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Pavimentação asfáltica 2.Aeroportos 3.Aderência pneu-pavimento I.Aeroporto Internacional de Congonhas / São Paulo II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes III.t.

À Fernanda , Filipe e Marcela.

Aos meus pais Oswaldo e Elza.

AGRADECIMENTOS

À orientadora Profa. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci pela confiança e oportunidade, pelo incentivo, pelas diretrizes firmes e seguras, e principalmente pela qualidade da formação.

A minha mulher Fernanda e aos meus filhos, Filipe e Marcela pela paciência, apoio e incentivo permanentes.

Aos meus irmãos Fernando e Renato pela amizade e firme presença na superação dos obstáculos.

Aos familiares Wilson e Armanda pela acolhida e apoio.

Aos amigos Theodosio, Michirefe e Roberto pelo incentivo e apoio.

À equipe do LTP/EPUSP: Edson, Rosângela, Diomária e Erasmo pela valiosa colaboração.

À equipe da INFRAERO: Lucínio, Montano, Ivelin, Tinen, Akemi, Paraizo e Barreto pela confiança e apoio.

A realização deste trabalho foi possível graças à participação direta ou indireta dessas pessoas.

RESUMO

Existe uma preocupação geral quanto à aderência que se pode obter entre os pneus de uma aeronave e as superfícies das pistas de aeroportos, principalmente naqueles em que operam aeronaves a jato, em altas velocidades, tornando a aderência um fator importante relacionado à segurança de voo. O atrito nas pistas muda ao longo do tempo, em função do tráfego, das condições climáticas e das práticas de manutenção adotadas. Contaminantes, tais como água e resíduos de borracha, causam diminuição do atrito das superfícies das pistas, em grandes extensões, principalmente nas zonas de toque. Este trabalho analisa a aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários, por meio da avaliação da macrotextura, do atrito dinâmico, do atrito medido com o Pêndulo Britânico e da drenabilidade, em regiões das pistas submetidas a diferentes solicitações de tráfego e diferentes ações de manutenção. O Aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas foi escolhido para o estudo de caso, pois conta com duas pistas de pouso e decolagem com revestimentos asfálticos com *grooving* e tráfego de aeronaves com intensidade suficiente para promover os problemas de aderência relatados na literatura. Os resultados indicam a influência do volume de tráfego, do *grooving*, do acúmulo de resíduos de borracha e das práticas de manutenção sobre a aderência pneu-pavimento proporcionada pelos revestimentos.

ABSTRACT

There is a general concern about braking performance in runways pavements surfaces, particularly in airports operating turbojet aircrafts with high landing speeds, making friction become a significant safety subject. Runway friction changes along the time depending on aircraft traffic, weather conditions and maintenance works. Contaminants such as rubber deposits and water cause friction loss on pavement surface, mainly in the touchdown zone on runways, and it can reach quite extensive areas. This work analyzes the tire/pavement adherence on asphalt runways surfaces, by evaluating parameters as *macrotexture*, *friction* (using British Pendulum and MuMeter) and *draining capability*, in different areas of runways, submitted to different traffic and different maintenance actions. The field surveys were performed at Congonhas Airport. Congonhas operates two asphalt runways (*grooved*) with enough traffic to promote the adherences problems reported in literature. The results indicate how volume of traffic, *grooving*, rubber deposits and pavement maintenance practices can influence on runway surface adherence level.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa do Tema.....	1
1.2	Objetivo do Trabalho	2
1.3	Antecedentes	3
1.4	Histórico	5
1.5	Acidentes Aeronáuticos.....	13
1.5.1	<i>A Condição Meteorológica</i>	<i>16</i>
1.5.2	<i>O Homem.....</i>	<i>16</i>
1.5.3	<i>A Infra-estrutura</i>	<i>17</i>
1.5.4	<i>O Avião.....</i>	<i>17</i>
1.6	Contexto do Trabalho	21
1.7	Estrutura do Trabalho	23
2	PNEUS.....	28
2.1	Informações Gerais.....	28
2.2	Características Operacionais	35

3	FORÇAS RESULTANTES DA INTERAÇÃO ENTRE PNEU E PISTA SECA	43
3.1	Resistência ao Rolamento	43
3.2	Deslizamento	51
3.3	Atrito Devido ao Deslizamento	54
3.3.1	<i>Atrito Devido à Adesão</i>	56
3.3.2	<i>Atrito Devido à Histerese</i>	61
3.4	Comportamento dos Pneus na Esterção	52
3.5	Área de Contato entre Pneu e Pavimento	64
3.6	Tensões Desenvolvidas na Área de Contato Pneu-Pavimento	65
4	FORÇAS RESULTANTES DA INTERAÇÃO ENTRE PNEU E PISTA MOLHADA.....	70
4.1	Resistência Hidrodinâmica.....	71
4.2	Atrito Pneu-Pavimento em Pista Molhada	73
4.3	Hidroplanagem – Aspectos Gerais	74
4.3.1	<i>O Pavimento</i>	75
4.3.2	<i>O Fluido Contaminante</i>	76
4.3.3	<i>A Aeronave</i>	80
4.3.4	<i>O Pneu</i>	83
4.4	Tipos de Hidroplanagem	86
4.4.1	<i>Hidroplanagem Viscosa</i>	86
4.4.2	<i>Hidroplanagem Dinâmica</i>	87
4.4.3	<i>Hidroplanagem por Desvulcanização</i>	89
4.4.4	<i>Hidroplanagem Combinada - Modelo das 3 Zonas</i>	90
5	CARACTERÍSTICAS DA SUPERFÍCIE DE UMA PISTA.....	96
5.1	Classificação das Superfícies	102
5.1.1	<i>Superfícies com Macrotextura Fechada e Microtextura Lisa</i>	102
5.1.2	<i>Superfícies com Macrotextura Fechada e Microtextura Áspera</i>	104
5.1.3	<i>Superfícies com Macrotextura Aberta e Microtextura Lisa</i>	105

5.1.4	<i>Superfícies com Macrotextura Aberta e Microtextura Áspera.....</i>	<i>106</i>
5.2	Resultados Experimentais	108
6	PROJETO, AVALIAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SUPERFÍCIES DE PISTAS DE AEROPORTOS	109
6.1	Identificação do Problema.....	109
6.2	Objetivos de Projeto	109
6.2.1	<i>Drenagem Superficial.....</i>	<i>110</i>
6.2.2	<i>Drenagem da Interface Pneu-Pavimento</i>	<i>110</i>
6.2.3	<i>Drenagem por Penetração</i>	<i>111</i>
6.3	Objetivos de Manutenção	111
6.4	Parâmetros de Projeto e de Manutenção	112
6.4.1	<i>Parâmetros de Atrito</i>	<i>112</i>
6.4.2	<i>Parâmetros de Textura.....</i>	<i>114</i>
6.5	Contaminação por Borracha.....	115
7	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	117
7.1	Método Estabelecido para o Planejamento dos Ensaios	117
7.2	Aplicação para as Pistas do Aeroporto de Congonhas	123
8	TRABALHOS DE CAMPO	134
8.1	Levantamento Visual das Superfícies das Pistas.....	134
8.2	Acompanhamento dos Serviços de Remoção de Borracha	134
8.3	Acompanhamento das Medições de Atrito com o MuMeter	138
8.4	Coleta de Dados de Medições Anteriores de Atrito Dinâmico	140
8.5	Avaliação da Macrotextura com o Ensaio da Mancha de Areia	141
8.6	Medição de Atrito com o Pêndulo Britânico.....	142
8.7	Avaliação da Capacidade de Drenagem da Superfície.....	143
8.8	Extração de Corpos de Prova	144

9	RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	145
9.1	Resultados para a Pista Auxiliar.....	147
9.1.1	<i>Levantamento Visual da Superfície.....</i>	<i>147</i>
9.1.2	<i>Tipo de Revestimento Asfáltico Existente na Pista Auxiliar.....</i>	<i>151</i>
9.1.3	<i>Análise Estatística dos Resultados.....</i>	<i>152</i>
9.1.4	<i>Análise da Macrotextura na Pista Auxiliar.....</i>	<i>155</i>
9.1.5	<i>Análise do Atrito do Pêndulo Britânico na Pista Auxiliar.....</i>	<i>159</i>
9.1.6	<i>Análise do Atrito do MuMeter na Pista Auxiliar.....</i>	<i>164</i>
9.1.7	<i>Ensaio Adicionais na Pista Auxiliar.....</i>	<i>169</i>
9.2	Resultados para a Pista Principal	173
9.2.1	<i>Levantamento Visual da Superfície.....</i>	<i>174</i>
9.2.2	<i>Tipo de Revestimento Asfáltico Existente na Pista Principal.....</i>	<i>177</i>
9.2.3	<i>Análise Estatística dos Resultados.....</i>	<i>178</i>
9.2.4	<i>Análise da Macrotextura na Pista Principal.....</i>	<i>180</i>
9.2.5	<i>Análise do Atrito do Pêndulo Britânico na Pista Principal.....</i>	<i>182</i>
9.2.6	<i>Análise do Atrito do MuMeter na Pista Principal.....</i>	<i>184</i>
9.3	Conclusões	190
9.4	Sugestões para Continuidade da Pesquisa.....	192
	ANEXO A – Análise estatística da distribuição dos pontos de toque de aeronaves	193
	ANEXO B – Hotran dos Vôos do Aeroporto de Congonhas	206
	ANEXO C – Resultados Brutos dos Ensaio na Pista Auxiliar	211
	ANEXO D – Análise de Variância para os dados da Pista Auxiliar	224
	ANEXO E – Dados Brutos dos Ensaio na Pista Principal.....	232
	ANEXO F – Análise de Variância para os Dados da Pista Principal.....	251

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – "Discos Rotativos" ou Reason Model	16
Figura 1.2 – Gráfico ilustrativo das forças típicas de desaceleração durante a rolagem de pouso	20
Figura 1.3 – Participação dos dispositivos de desaceleração de uma aeronave a jato na energia total dissipada até a parada e o efeito sobre a distância de parada	20
Figura 1.4 – Acidente sem vítimas de um Boeing 747 da QANTAS Airlines que sofreu hidroplanagem durante o pouso em pista molhada	21
Figura 1.5 – Aeronaves a jato com mais de 30.000 kg, certificadas, em operação, excluídas aeronaves fabricadas na antiga União Soviética.....	22
Figura 1.6 – Decolagens e horas de vôo anuais no mundo no período 1965–2003	22
Figura 1.7 – Acidentes e fatalidades a bordo de aeronaves por fases de vôo no período 1994–2003.	23
Figura 2.1 – Esquema da estrutura de um pneu aeronáutico diagonal e seus componentes.....	31
Figura 2.2 – Esquema da estrutura de um pneu aeronáutico radial	32
Figura 2.3 – Detalhe da orientação das fibras das lonas nas carcaças dos pneus diagonal e radial	33
Figura 2.4 – Elementos e características geométricas do conjunto roda e pneu....	34
Figura 2.5 – Efeito da velocidade de taxiamento sobre o aumento da temperatura de componentes do pneu	38
Figura 2.6 – Efeito da deflexão sobre o aumento da temperatura de componentes do pneu em uma operação de taxiamento a 30mi/h (48km/h)	39
Figura 2.7 – Efeito da distância de taxiamento sobre o aumento da temperatura de componentes do pneu a 30 mi/h (48 km/h) e 32% de deflexão	40
Figura 2.8 – Efeito da distância de taxiamento sobre o aumento da temperatura de componentes do pneu a 60mi/h (96,6 km/h) e 40% de deflexão	40
Figura 2.9 (a) e (b) – Vida útil de um pneu aeronáutico em operações de taxiamento e decolagem em função da sub–pressão.....	41

Figura 2.10 (a) e (b) – Vida útil de um pneu aeronáutico em operações de taxiamento e decolagem em função da carga de serviço	42
Figura 2.11 – Envelope de desempenho dos pneus.....	43
Figura 3.1 – Esquema do carregamento de um pneu estático	45
Figura 3.2 – Esquema de forças de um pneu em rolamento	47
Figura 3.3 – Variação do coeficiente de atrito ao rolamento com a velocidade, em pneus diagonal e radial de veículos de passeio, em pavimento suave e plano, com a mesma carga e pressão de enchimento	48
Figura 3.4 – Variação da resistência ao rolamento de pneus diagonal e radial, em função da carga e da pressão de enchimento.....	49
Figura 3.5 – Desenho esquemático do efeito da onda estacionária.....	51
Figura 3.6 – Pneu aeronáutico a 250 mi/h (400 km/h), 4.200 rpm, deflexão de 4,8 cm	52
Figura 3.7 – Pneu aeronáutico 40 x 14 a 225 mph (362 km/h); (Goodyear, 2004)	52
Figura 3.8 – Esquema de forças de um pneu freado	53
Figura 3.9 – Contribuição do deslizamento devido à deformação da banda de rodagem e do deslizamento real no deslizamento medido (Adaptado de Fristed, K.; Norrbom, B., 1980)	55
Figura 3.10 – Efeito do deslizamento no coeficiente de atrito (ICAO, 1994)	56
Figura 3.11 – Componentes do atrito no deslizamento de um pneu sobre um pavimento.....	59
Figura 3.12 – Participação da adesão, histerese e desgaste no atrito de deslizamento.....	59
Figura 3.13 – Variação do coeficiente de atrito e seus componentes com a velocidade de deslizamento de um bloco de borracha sobre uma superfície seca (Fristedt, K e Norrbom, B., apud Silva, 1981).....	60
Figura 3.14 – Influência da pressão de enchimento na área de contato real entre pneu e pavimento	62
Figura 3.15 – Comportamento de um pneu submetido a uma força lateral atuando no eixo da roda (Clark, 1971).....	65
Figura 3.16 – Características de pneus diagonais e radiais na esterção (Clark, 1971)	65

Figura 3.17 – Impressões de um pneu radial e de um pneu diagonal com carga por roda de 9.200 lb (4.170 kg) e pressão de enchimento de 104 lb/pol ² (717 kPa); (De Beer e Fisher, 1997).....	67
Figura 3.18 – Esquema de transmissão de carga pelas paredes e pelo efeito do ar sob pressão	68
Figura 3.19 – Tensões desenvolvidas na área de contato entre pneu e pavimento para uma roda parada	69
Figura 3.20 – Tensões desenvolvidas na área de contato entre pneu e pavimento no rolamento de uma roda livre.....	69
Figura 3.21 – Detalhe das tensões induzidas na superfície de um pavimento na área de contato pneu-pavimento causada por um pneu radial carregado.....	70
Figura 3.22 – Dispositivo Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array - VRSPTA	71
Figura 4.1 – Envelope do comportamento do atrito em função da velocidade em pista molhada (Adaptado de Comfort, 2001).....	72
Figura 4.2 (a) e (b) – Efeito da velocidade sobre a força de arrasto hidrodinâmico em um trem de pouso duplo-tandem, com 22.300 lb (10.000 kg) de carga e uma lâmina d'água de 1 pol (2,5 cm) (Adaptado de Horne e Dreher, 1963)	74
Figura 4.3 – Efeito da pista molhada e da pista seca sobre o coeficiente de atrito μ para a aeronave 880 Jet, em pista de concreto, sistema anti-skid ativado, $p=150$ psi (1034 kPa), pneus ranhurados	75
Figura 4.4 – Afastamento do pneu (em hidroplanagem) em relação à superfície da pista versus a profundidade da lâmina d'água na pista. Caça British Meteor, velocidade 87 nós (161 km/h), pressão de pneu 60 lib/pol ² (413 kPa) e $V/V_h = 1,25$	77
Figura 4.5 – Esquema da ação do arrasto hidrodinâmico	79
Figura 4.6 – Arrasto hidrodinâmico em função da velocidade, para diferentes profundidades do fluido contaminante; pneu pequeno na pista de teste, carga de roda = 200 lbf (441 kgf);.....	81
Figura 4.7 – Esquema do dispositivo da placa de vidro de Moiré (Browne, 1975)	83
Figura 4.8 – Foto da área de contato que mostra as franjas de Moiré, indicando a topografia da banda de rodagem de um pneu em hidroplanagem dinâmica (pneu diagonal, $V=13,4$ m/s, $p=152$ kPa, incremento/franja = 0,36 mm). (Browne e Whicker, 1983).....	83

Figura 4.9 – Representação esquemática das curvas de nível da banda de rodagem em hidroplanagem.....	84
Figura 4.10 – modelo da área de contato estabelecido por meio de análise por elementos finitos (Williams, 1992).....	84
Figura 4.11 – Área de contato do pneu do trem principal (40 x 28 ply rating), tipo VII com pressão de enchimento de 965 kpa (140 lb/pol2) – aeronave de transporte a jato (Horne et al., 1986).....	85
Figura 4.12 – Efeito da banda de rodagem sobre a tração, em condições de hidroplanagem parcial.....	87
Figura 4.13 – Efeito do tipo de pneu: diagonal ou radial, na relação da velocidade de início de hidroplanagem com a pressão dos pneus (experimento em escala real – Van Es et al., 2001)	88
Figura 4.14 – Foto da banda de rodagem de um pneu aeronáutico que sofreu hidroplanagem por desvulcanização	92
Figura 4.15 – Modelo das 3 zonas para a área de contato e das 4 fases da hidroplanagem.....	95
Figura 5.1 – Ilustração dos conceitos de micro e macrotexturas	98
Figura 5.2 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura lisa	104
Figura 5.3 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura fechada, microtextura lisa (ICAO, 1983).....	104
Figura 5.4 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura áspera	105
Figura 5.5 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura fechada, microtextura áspera (ICAO, 1983)	106
Figura 5.6 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura lisa	106
Figura 5.7 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura aberta, microtextura lisa (ICAO, 1983)	107
Figura 5.8 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura áspera	108
Figura 5.9 – Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura aberta, microtextura áspera (ICAO, 1983).....	108

Figura 5.10 – Comportamento do atrito em função da profundidade média da textura para diversas velocidades; pneu aeronáutico liso	109
Figura 7.1 – Distribuição dos afastamentos laterais em relação ao eixo de uma pista para pousos (FAA, 1973)	121
Figura 7.2 – Modelo da distribuição dos desvios laterais do eixo das aeronaves em operações de pouso em relação eixo da pista	122
Figura 7.3 – Modelo da distribuição dos desvios laterais de cada roda dos trens principais em relação eixo da pista e seu efeito combinado, para operações de pouso, para a aeronave	123
Figura 7.4 – Probabilidade acumulada da passagem das rodas de uma Aeronave A 319 em função do afastamento ao eixo da pista	124
Figura 7.5 – Visão geral das pistas do Aeroporto de Congonhas no sentido Norte-Sul	125
Figura 7.6 – Efeito combinado das passagens das rodas dos grupos de aeronaves para as cabeceiras 17 das pistas do Aeroporto de Congonhas, de acordo com o tráfego que opera em cada pista.	127
Figura 7.7 – Efeito combinado das passagens das rodas dos grupos de aeronaves para a cabeceira 17R (pista principal) do Aeroporto de Congonhas – 65% Boeing e 35% Airbus	128
Figura 7.8 – Probabilidade acumulada da passagem das rodas das aeronaves em função do afastamento ao eixo para pousos na cab 17R do Aeroporto de Congonhas – 65% Boeing e 35% Airbus	129
Figura 7.9 – Faixas de níveis de utilização das pistas para efeito do planejamento dos ensaios de campo	130
Figura 7.10 – Ilustração das Faixas estabelecidas para o plano de ensaios de campo. Pista principal do Aeroporto de Congonhas.	131
Figura 7.11 – Esquema da localização dos ensaios de campo	132
Figura 7.12 – Aspecto da mancha de borracha na pista auxiliar (17L/35R) do Aeroporto de Congonhas	134
Figura 7.13 – Aspecto da mancha de borracha na pista principal (17R/35L) do Aeroporto de Congonhas	135
Figura 8.1 (a) e (b) – Serviços de remoção de borracha em pista de aeroporto, com utilização da barra giratória (foto a), e com a pistola (foto b); equipamento WOMA, modelo 1502, para hidrojateamento, especialmente projetado para aeroportos	137

Figura 8.2 – Após a remoção da borracha impregnada a pista é lavada com água e detergente para limpeza dos resíduos soltos.....	138
Figura 8.3 – Aspectos dos resíduos de borracha já soltos da pista após a remoção.....	138
Figura 8.4 – CBUQ com grooving – pista emborrachada à esquerda e já sem borracha, após a limpeza, à direita (fotos realizadas em 18/04/2004, na pista 17R/35L do Aeroporto de Congonhas).....	138
Figura 8.5 – MuMeter montado no veículo rebocador, pronto para início da corrida	140
Figura 8.6 – Calibração do atrito com a placa padrão e computador no veículo rebocador.....	141
Figura 8.7 – Calibragem dos pneus e aspecto do sistema espargidor de água em funcionamento.....	141
Figura 8.8 – Esquema do ensaio de Mancha de Areia	142
Figura 8.9 – Ensaio da Mancha de Areia	143
Figura 8.10 – Pêndulo Britânico: equipamento portátil de medida de atrito	144
Figura 8.11 – Drenômetro	145
Figura 9.1 – Divisão da Pista em faixas para realização dos ensaios	146
Figura 9.2 – Remendo próximo a cabeceira 35R.....	148
Figura 9.3 (a), (b) e (c) – Pista auxiliar. Aspecto geral e em detalhe as fissuras do revestimento	149
Figura 9.4 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) – Pista auxiliar; desgaste da superfície com a perda de finos e início de desagregação	150
Figura 9.5 – Vista geral da superfície do pavimento da pista auxiliar.....	150
Figura 9.6 – Pista auxiliar. Aspecto geral do estado das ranhuras.....	151
Figura 9.7 – Corpo de prova, diâmetro 10 cm, lateral da pista auxiliar.....	152
Figura 9.8 – Correlação entre os ensaios de Mancha de Areia e drenabilidade...	158
Figura 9.9 – Comportamento da macrotextura em função do afastamento ao eixo da pista	159
Figura 9.10 – Gráfico de dispersão dos pares de valores Atrito (BPN) x Macrotextura (mm)	161

Figura 9.11 – Valores pontuais do atrito longitudinal em função do afastamento ao eixo da pista para seções localizadas a 340 e 400m da cabeceira 17L.....	164
Figura 9.12 – Esquema de localização dos ensaios adicionais	170
Figura 9.13 – Comportamento do atrito longitudinal e transversal em função do afastamento ao eixo da pista na seção localizada a cerca de 300 m da cabeceira 17L; valores médios para cada Faixa de pista.....	171
Figura 9.14 – Comportamento da macrotextura em relação ao afastamento do eixo da pista na seção localizada a cerca de 300 m da cabeceira 17L.....	172
Figura 9.15 – Repetição do gráfico da Figura 9.14, omitindo-se o dado de valor de atrito mais baixo (Faixa E), para melhorar a visualização das diferenças das macrotexturas entre as Faixas A, B, C e D	173
Figura 9.16 – (a) Faixa E, Detalhe do CBUQ da lateral (denso, textura fina e com certa segregação de massa); (b) local da lateral da pista em CBUQ sem grooving	176
Figura 9.17 – Faixa D; detalhe do CBUQ com grooving em local da pista não emborrachada	176
Figura 9.18 – Faixa C; detalhe do CBUQ com grooving em local da pista emborrachada impregnando a superfície do CBUQ	177
Figura 9.19 – Faixas A e B; revestimento com grooving bastante contaminado; detalhe do revestimento antes e após o desemborrachamento	178
Figura 9.20 – Área de Toque da cabeceira 17R da Pista Principal do Aeroporto de Congonhas	178
Figura 9.21 – Aspecto geral do corpo-de-prova extraído da pista 17R/35L.....	180
Figura 9.22 – Corpo-de-prova extraído na Faixa B da pista principal.....	183
Figura 9.23 – Detalhe de área de CBUQ com grooving apresentando desagregação na pista principal.....	185
Figura A. 1 – Função densidade de probabilidade para o Grupo Airbus.....	197
Figura A. 2 – Probabilidade acumulada para o Grupo Airbus.....	197
Figura A. 3 – Função densidade de probabilidade para o Grupo Boeing	198
Figura A. 4 – Probabilidade acumulada para o Grupo Boeing	198
Figura A. 5 – Função densidade de Probabilidade – Efeito combinado para a pista auxiliar	199

Figura A. 6 – Probabilidade Acumulada – Efeito combinado para a pista auxiliar	199
Figura A. 7 – Função densidade de Probabilidade – Efeito combinado para a pista principal.....	201
Figura A. 8 – Probabilidade Acumulada – Efeito combinado para a pista principal	201
Figura A. 9 – Efeito Combinado das Passagens das Rodas dos Grupos de Aeronaves para as Cab. 17 das Pistas do Aeroporto de Congonhas, de acordo com o tráfego que opera em cada pista.	202
Figura A. 10 – Geometria dos trens de pouso do Boeing 737 (Boeing, 2004: Airport Planning)	203
Figura A. 11 – Geometria dos trens de pouso do Foker 100 (Foker, 1998; Airport Planning)	204
Figura A. 12 – Geometria dos trens de pouso do A 319 e A 320 (Airbus, 2003; Airport Planning)	205
Figura A. 13 – Distribuição acumulada das posições de toque na pista, para diversas aeronaves, em relação à cabeceira de pouso (FAA, 1974; cópia da página 109 do Report No. FAA–RD–74–35)	206
Figura C. 1 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 29/set/2005.....	217
Figura C. 2 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a esquerda do eixo no sentido 17/35 em 29/set/2005.....	218
Figura C. 3 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 14 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 29/set/2005.....	219
Figura C. 4 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 18 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 29/set/2005.....	220
Figura C. 5 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 23/jul/2005	221
Figura C. 6 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a esquerda do eixo no sentido 17/35 em 23/jul/2005	222
Figura C. 7 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 26/mar/2005	223
Figura C. 8 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a esquerda do eixo no sentido 17/35 em 26/mar/2005	224

Figura E. 1 – Relatório do Mu Meter MK–6 na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, em 17/abr/2004	237
Figura E. 2 – Relatório do Mu Meter MK–6 na pista principal; corrida a 3 m a esquerda do eixo, em 17/abr/2004	238
Figura E. 3 – Relatório do Mu Meter MK–6 na pista principal; corrida a 6 m a direita do eixo, em 17/abr/2004	239
Figura E. 4 – Relatório do Mu Meter MK–6 na pista principal; corrida a 6 m a esquerda do eixo, em 17/abr/2004	240
Figura E. 5 – Relatório do Mu Meter MK–6 na pista principal; corrida a 13 m a direita do eixo, em 17/abr/2004	241
Figura E. 6 – Relatório do Mu Meter MK–6 na pista principal; corrida a 13 m a esquerda do eixo, em 17/abr/2004	242
Figura E. 7 – Relatório do Mu Meter MK–6 na pista principal; corrida a 19 m a direita do eixo, em 17/abr/2004	243
Figura E. 8 – Relatório do Mu Meter MK–6 na pista principal; corrida a 19 m a esquerda do eixo, em 17/abr/2004	244
Figura E. 9 – Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 0 a 800 m, no sentido 17/35, em 19/jan/2002.....	245
Figura E. 10 – Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 800 a 1700 m, no sentido 17/35, em 19/jan/2002.....	246
Figura E. 11 – Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 0 a 900 m, no sentido 35/17, em 19/jan/2002.....	247
Figura E. 12 – Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 900 a 1700 m, no sentido 35/17, em 19/jan/2002.....	248
Figura E. 13 – Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 0 a 800 m, no sentido 17/35, em 16/dez/2001	249
Figura E. 14 – Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 800 a 1700 m, no sentido 17/35, em 16/dez/2001	250
Figura E. 15 – Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 0 a 900 m, no sentido 35/17, em 16/dez/2001	251
Figura E. 16 – Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 900 a 1700 m, no sentido 35/17, em 16/dez/2001	252

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Forma de divulgação das características de atrito em pistas pavimentadas, contaminadas com neve ou gelo	10
Tabela 5.1 - Influência da textura em diversos aspectos.....	98
Tabela 5.2 - Influência do comprimento de onda da textura (m) nas características da superfície do pavimento – conforme proposto no 18o World Road Congress, apud Sandberg, 1997	99
Tabela 6.1 – Intervalos máximos entre medições de atrito.....	113
Tabela 6.2 – Coeficientes de atrito mínimos correspondentes às condições da superfície da pista.....	113
Tabela 6.3 – Período recomendado entre medições de atrito.....	114
Tabela 6.4 - Programa de manutenção do atrito baseado no nível de operações de aeronaves a reação, para cada cabeceira	117
Tabela 9.1 – Matriz dos Níveis Observados de Significância (p%) na ANOVA de valores de atrito medidos pelo Pêndulo Britânico no sentido longitudinal, em pares de faixas da pista auxiliar.....	155
Tabela 9.2 – Matriz dos Níveis Observados de Significância (p%) na ANOVA de valores de atrito medidos pelo Pêndulo Britânico no sentido transversal, em pares da faixas de pista auxiliar e entre atrito longitudinal e transversal na mesma faixa	155
Tabela 9.3 - Matriz dos Níveis Observados de Significância (p%) na ANOVA de valores de macrotextura em pares de faixas da pista auxiliar.....	155
Tabela 9.4 - Valores médios de macrotextura para a pista auxiliar	156
Tabela 9.5 - Valores médios de atrito com o Pêndulo Britânico	160
Tabela 9.6 – Comparação das solicitações entre as Faixas B e C.....	163
Tabela 9.7 – Valores do MuMeter para a pista auxiliar completa	166
Tabela 9.8 - Valores do MuMeter para a pista auxiliar completa.....	166
Tabela 9.9 - Valores do MuMeter para a pista auxiliar completa.....	166
Tabela 9.10 – Valores do MuMeter na área de interesse:	167

Tabela 9.11 – Valores de atrito dinâmico com o MuMeter e de macrotextura para as faixas de pista.....	169
Tabela 9.12 – Resumo dos resultados de atrito com o Pêndulo Britânico nos sentidos longitudinal e transversal, na seção a 300 m da cabeceira 17L	169
Tabela 9.13 - Matriz dos Níveis Observados de Significância na ANOVA (p%) de valores de atrito longitudinal e transversal em pares de faixas de pista principal.....	180
Tabela 9.14 - Matriz dos Níveis Observados de Significância na ANOVA (p%) de valores de macrotextura em pares de faixas da pista principal	180
Tabela 9.15 – Valores médios de macrotextura para a pista principal.....	181
Tabela 9.16 - Valores médios de atrito com o Pêndulo Britânico	183
Tabela 9.17 – Valores do Mu Meter para a pista principal.....	186
Tabela 9.18 - Valores do Mu Meter para a pista auxiliar completa.....	186
Tabela 9.19 - Valores do Mu Meter para a pista auxiliar completa.....	187
Tabela 9.20 - Valores da macrotextura e do atrito dinâmico na área de interesse:.....	188
Tabela A.1 – Pista Auxiliar - valores da função densidade de probabilidade e da probabilidade acumulada em função do afastamento do eixo da pista; Tráfego: 50%Aeronaves Grupo Airbus; 50% Aeronaves Grupo Boeing.....	195
Tabela A.2 - Pista Principal - Valores da função densidade de probabilidade e da probabilidade acumulada em função do afastamento do eixo da pista; Tráfego: 35%Aeronaves Grupo Airbus; 65% Aeronaves Grupo Boeing.....	199
Tabela C. 1 – Dados brutos das medições de atrito com o Pêndulo Britânico na pista auxiliar	211
Tabela C. 2 - Dados brutos dos ensaios de Mancha de Areia na pista auxiliar	214
Tabela C. 3 - Dados brutos dos ensaios de Mancha de Areia na pista auxiliar	215
Tabela C. 4 - Dados brutos das medições de atrito com o Pêndulo Britânico na pista auxiliar	216

Tabela C. 5 – Dados brutos dos ensaios de drenabilidade	216
Tabela D. 1– Atrito longitudinal (BPN) na auxiliar Aeroporto de Congonhas.....	224
Tabela D. 2 – Tabelas ANOVA para o atrito longitudinal em pares de faixa na pista auxiliar	225
Tabela D. 3- Atrito transversal (BPN) na pista auxiliar do Aeroporto de Congonhas.....	227
Tabela D. 4 - Tabelas ANOVA para o atrito transversal em pares de faixa de pista	228
Tabela D. 5 – Macrotextura (mm) pista auxiliar Aeroporto de Congonhas.....	230
Tabela D. 6 - Tabelas ANOVA para a macrotextura em pares de faixa de pista	230
Tabela E. 1– Dados brutos das medições de atrito com o Pêndulo Britânico na pista principal	232
Tabela E. 2 – Dados brutos dos ensaios de drenabilidade na pista principal	232
Tabela E. 3 - Dados brutos dos ensaios de Mancha de Areia na pista principal	233
Tabela F. 1– Atrito longitudinal e transversal (BPN) da pista principal.....	251
Tabela F. 2 - Tabelas ANOVA para o atrito longitudinal e transversal em pares de faixa da pista principal	251
Tabela F. 3 – Macrotextura (mm) da pista principal.....	254
Tabela F. 4 - Tabelas ANOVA para a macrotextura em pares de faixa da pista principal	254

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A319 e A320 - Aeronaves de transporte da Airbus;

AIRBUS - Consórcio europeu fabricante de aeronaves;

ASTM - *American Society of Testing Materials*;

B727; B737; B747; B 757; B767 - Aeronaves de transporte comercial da Boeing;

BOEING – Fabricante norte-americana de aeronaves;

BRB – BRA Linhas Aéreas;

BV-2 e BV-11 – Equipamentos suecos de medição continua de atrito chamados Deslizômetro (*Skidometer*), versões 2 e 11;

CAA - *Civil Aviation Authority* (Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido);

DAC – Departamento de Aviação Civil do Comando da Aeronáutica no Brasil;

DASH 8 - Aeronave de transporte comercial da *de Havilland*;

DC-4 - Aeronave quadrimotora da Douglas;

DOUGLAS – Fabricante norte-americana de aeronaves;

FAA - *Federal Aviation Administration* (Agência Federal de Aviação dos Estados Unidos);

FALCON 20 - Aeronave executiva;

FOKKER 50 – Aeronave de transporte da Fokker (fabricante holandesa de aeronaves);

EMB 120 – Aeronave de transporte da EMBRAER (fabricante brasileira de aeronaves);

GLO – GOL Linhas Aéreas;

GOODYEAR – fabricante de pneus (inclusive aeronáuticos);

HOTRAN – "Horário de Transporte" (programação semanal dos vôos regulares saindo ou chegando em um aeroporto);

IATA - *International Air Transport Association* (Associação Internacional do Transporte Aéreo): Organização normativa e de representação das empresas aéreas;

ICAO - *International Civil Aviation Organization* (Organismo das Nações Unidas para os assuntos da aviação civil no mundo todo);

INFRAERO - Empresa Brasileira de Infra-estrutura Aeroportuária (Responsável pelos principais aeroportos brasileiros);

IRFI - *International Runway Friction Index* (Índice Internacional de Atrito de Pistas de Aeroportos);

IRI - Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index*);

JAA - *Joint Aviation Authorities* (Agência de Aviação da União Européia);

JWRFMP - *Joint Winter Runway Friction Measurement Program* (Programa Conjunto de Medição de Atrito em Pistas de Aeroportos no Período de Inverno);

LTP/EPUSP – Laboratório de Tecnologias da Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo;

MUMETER – Equipamento inglês de medição contínua de atrito;

NASA - *National Aeronautics and Space Administration* (Agência Norte-americana para os assuntos de Aeronáutica e Espaço);

ONE – Ocean Air (Cia. Aérea brasileira);

PTN – Pantanal Linhas Aéreas;

SAAB – Fabricante de veículos da Suécia;

SAS - *Scandinavian Airlines* (Cia. Aérea dos Países Escandinavos);

TAM – Tam Linhas Aéreas;

USAF - *United States Air Force* (Força Aérea dos Estados Unidos);

VRSPATA - *Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array*, dispositivo para medição dos esforços desenvolvidos na área de contato pneu-pavimento;

VRG – VARIG Linhas Aéreas.

LISTA DE SÍMBOLOS

AAC = aspecto da área de contato;

c = comprimento da área de contato;

c_L = coeficiente de sustentação hidrodinâmica;

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

F_d = força de arrasto;

F_l = força de ascensão;

$F_{y\alpha}$ = força que se desenvolve na área de contato (no plano do pavimento) que forma um ângulo α com o plano da roda;

F_S = força lateral;

F_a = força de atrito devida à adesão

F_h = força de atrito devida à histerese;

F_w = força de atrito devida ao desgaste;

F_R = força de atrito ao Rolamento;

g = aceleração da gravidade;

l – largura da área de contato;

p = pressão de enchimento dos pneus;

P_F = pressão hidrodinâmica atuando no pneu causada pelo fluido contaminante;

r = desaceleração;

r = raio do pneu carregado;

S = taxa de deslizamento medido;

S_D = taxa de deslizamento devido à deformação horizontal da banda de rodagem;

S_S = taxa de deslizamento real ou efetivo;

T = tempo despendido depois de acionado os freios até a parada total;

V_h = velocidade de hidroplanagem dinâmica para roda girando sem deslizamento;

V = velocidade de deslocamento do veículo;

V_R = velocidade periférica do pneu freado;

$Z1$ – zona recoberta por uma espessura considerável de água (zona de hidroplanagem dinâmica);

$Z2$ – zona recoberta por um filme de água (zona de hidroplanagem viscosa);

$Z3$ – zona em que a água é totalmente expulsa (zona teoricamente seca);

ΔV = diferença de velocidade periférica;

ΔV_D = diferença de velocidade periférica devido à deformação;

ΔV_S = diferença de velocidade periférica devido ao deslizamento efetivo;

μ = coeficiente de atrito;

μ_a = coeficiente de atrito devido à adesão;

μ_{aw} = coeficiente de atrito devido à adesão em pista inundada;

μ_d = coeficiente de atrito devido à resistência hidrodinâmica;

μ_D = coeficiente de atrito de deslizamento real ou efetivo;

μ_h = coeficiente de atrito devido à histerese;

μ_{max} = coeficiente de atrito máximo;

μ_R = coeficiente de atrito ao rolamento

μ_w = coeficiente de atrito devido ao desgaste;

μ_W = coeficiente de atrito em pista inundada;

ρ = massa específica do fluido;

ω = velocidade angular da roda livre;

ω_R = velocidade angular da roda freada.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa do Tema

Existe uma preocupação geral quanto ao atrito que se pode obter entre os pneus de uma aeronave e a superfície das pistas de aeroportos, principalmente naquelas em que se verifique a presença de neve, gelo, água, óleo, areia ou poeira, chamados de *"agentes contaminantes"* ou simplesmente *"contaminantes"*.

Quatro aspectos fundamentais, associados à segurança de voo, caracterizam as ocorrências com aeronaves em pistas de aeroportos:

- (1) um acidente aeronáutico é resultado de várias causas, chamadas fatores contribuintes, que, juntas desencadeiam uma série de eventos e acabam por ocasionar o acidente;
- (2) os principais fatores contribuintes relacionados aos acidentes aeronáuticos são o avião, o homem, a condição meteorológica e a infra-estrutura;
- (3) as estatísticas da Boeing mostram que 57% dos acidentes aeronáuticos ocorrem nas corridas de pouso ou decolagem, ou seja, nas pistas dos aeroportos, colocando os fatores contribuintes associados às essas fases do voo entre os mais recorrentes;
- (4) "os dados de acidentes e incidentes relacionados a aeronaves que saíram das pistas, seja pelas extremidades ou pelas laterais, indicam que, em muitos casos, a causa principal, ou pelo menos um fator contribuinte, foram as características de atrito das pistas e a eficácia de frenagem do avião" (ICAO, 1994).

As considerações acima e o volume de tráfego de aeronaves operando nos aeroportos, tanto no Brasil quanto no mundo todo, mostram claramente a importância do assunto no contexto da segurança do transporte aéreo.

1.2 Objetivo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é caracterizar o comportamento da aderência pneu-pavimento em função do tráfego e das práticas de manutenção em revestimentos asfálticos de pistas de aeroportos.

Considerando as condições climáticas existentes no Brasil este trabalho estuda o problema da aderência dos revestimentos das pistas, tendo como agentes contaminantes a água e a borracha desprendida dos pneus das aeronaves. Não são estudados os casos de pistas com neve, gelo ou *slush*, pois não ocorrem no país. Por outro lado, é comum no Brasil a ocorrência de chuvas intensas e de curta duração, que produzem lâminas d'água nas superfícies das pistas, com profundidades que aumentam a possibilidade de ocorrência de hidroplanagem.

Para se atingir o objetivo são analisados parâmetros de atrito, de textura e de drenabilidade dos revestimentos. Consideram-se também os procedimentos de manutenção e o tráfego de aeronaves nas pistas. Procura-se relacionar os dados de atrito, textura, e condição drenante, buscando identificar possíveis efeitos do tráfego e das práticas de manutenção sobre as condições de aderência pneu-pavimento proporcionadas pelos revestimentos.

Para avaliação dos parâmetros de análise são realizadas: (1) medições de atrito por meio do Pêndulo Britânico (ASTM-E-303-93) e do *MuMeter* (ASTM-E-607-90); (2) avaliação da textura por meio do método da Mancha de Areia (ASTM-E-965-96) e (3) avaliação da drenabilidade com a utilização do Drenômetro.

O Aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas foi escolhido para o estudo de caso, pois conta com duas pistas de pouso e decolagem com revestimentos em CBUQ com *grooving* e tráfego de aeronaves com intensidade suficiente para promover os problemas de aderência relatados na literatura. Além disso, o aeroporto não opera das 23:00 às 06:00, fato que assegurou a realização dos trabalhos de campo sem interferir com o funcionamento do aeroporto.

1.3 Antecedentes

A preocupação com o atrito em pistas de aeroportos se acentua no caso das operações de aeronaves a jato, cujas velocidades de pouso e decolagem são elevadas, tornando ainda mais importante a eficácia do atrito entre os pneus e a superfície da pista, para que ocorra a desaceleração e parada da aeronave. Nos casos onde a extensão de pista necessária para o pouso (ou a extensão necessária para aceleração e parada da aeronave nas decolagens interrompidas) é próxima à extensão da pista existente, o tema requer ainda maior atenção.

Uma indicação dessa preocupação é demonstrada por meio das precauções adotadas pelas autoridades de aeronavegação de diversos países, recomendando a adoção de maiores distâncias requeridas para pouso em condições de pista molhada. O mesmo ocorre nos manuais de planejamento de aeroportos (*Airport Planning*), publicados pelos fabricantes de aeronaves, onde a distância requerida para o pouso em pistas molhadas é maior do que a indicada para pistas secas.

Em pistas molhadas, ou cobertas com gelo ou neve, a distância percorrida por uma aeronave de grande porte até sua parada pode ser acrescida em cerca de 300 a 600 m em relação à distância percorrida no pouso em pistas secas. Em casos extremos, quando a ação de frenagem for muito baixa, esta distância a mais pode ser ordem de 900m (Silva, 1981).

Na decolagem de aeronaves em pistas cobertas de neve em fusão ou água há outro problema. A resistência ao avanço da aeronave (arrasto) produzida pelos contaminantes presentes na superfície da pista (neve em fusão ou água), resulta em sensível queda no seu desempenho, podendo, em determinadas situações, colocar em risco a decolagem.

Além disso, o atrito exerce uma forte influência no controle direcional da aeronave nas operações de solo, limitando a componente máxima do vento de través permitida.

A somatória desses fatores torna essencial que pilotos e pessoal envolvido nas operações aeronáuticas nos aeroportos disponham de informações adequadas sobre as características de atrito das superfícies das pistas e sobre a eficácia de frenagem das aeronaves a fim de que, se necessário, possa-se ajustar os procedimentos operacionais e aplicar as devidas correções no desempenho dos aviões.

Os dados referentes aos acidentes e incidentes¹ relacionados ao escape de uma aeronave da pista, por uma das extremidades ou pelas laterais, indicam que, em muitos casos, a causa principal, ou pelo menos um fator contribuinte, foram as características de atrito da pista e a eficácia de frenagem da aeronave (ICAO 1984).

A Força Tarefa para Redução de Acidentes nas Aproximações e Pousos da *Flight Safety Foundation (Approach and Landing Accident Reduction Task Force - ALAR)* detectou que, 11 acidentes e incidentes sérios em aproximações ou pousos no período de 1984 a 1997 ocorreram em operações com pistas molhadas (FSF ALAR, 2000). Concluiu ainda que, em 20% dos 76 acidentes e incidentes sérios ocorridos nas fases de aproximação e pouso no mesmo período em todo o globo, os eventos *derrapagem e saída da pista* estavam presentes.

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

Em função disso, órgãos governamentais norte-americanos, tais como a *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, a *Federal Aviation Administration (FAA)* e a *United States Air Force (USAF)*, desenvolveram projetos de pesquisa com ênfase no problema da frenagem de aeronaves a jato.

Essas pesquisas concentraram esforços em duas grandes áreas:

- (1) no projeto de superfícies de pavimentos com características para maximizar a resistência à derrapagem, por meio da adoção de materiais e técnicas apropriadas de construção; e
- (2) na aplicação de técnicas efetivas de avaliação e manutenção, com o objetivo de detectar a deterioração da resistência à derrapagem da superfície do pavimento e proceder à sua restauração para níveis aceitáveis.

¹ A definição de acidente e incidente encontram-se no item 1.5 – Acidentes Aeronáuticos

Atualmente encontra-se em desenvolvimento o Programa denominado "*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 Canadá² e FAA, com a participação de mais de 40 instituições de 10 países (NASA, 2003).

Este Programa de Pesquisa 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,
- (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 método padrão que estabelece o procedimento e fixa a precisão exigida para a determinação do IRFI é a Norma *ASTM E 2100 / 2000*.

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

1.4 Histórico

Logo no início da aviação detectou-se que a segurança de vôo exigia que se dispusesse de algum controle sobre a qualidade das superfícies onde se realizavam os pousos e decolagens. A maioria das pistas era em grama e apenas alguns poucos aeroportos possuíam pistas pavimentadas (Antvik, 1997).

A primeira vez de que se tem notícia da preocupação com a condição do atrito em uma pista de aeroporto foi nos anos 20, no Aeroporto de Le Bourget em Paris, um dos primeiros a contar com pista pavimentada. Muitas vezes o gerente do aeroporto realizava um "teste de derrapagem" para "checar" as condições de atrito da pista. Se a derrapagem fosse "muito longa", o aeroporto era fechado.

² Ministério dos Transportes do Canadá

Com o passar do tempo e a ocorrência de diversos acidentes e incidentes tornou-se necessário se dispor de um método para avaliar o atrito das superfícies das pistas. A segurança de vôo foi a maior razão para isso. À medida que as aeronaves tornaram-se maiores e mais velozes ficou mais importante avaliar o atrito de uma maneira mais objetiva do que aquela usada pelo gerente do Le Bourget.

Em 1946 a SAS (Cia. Aérea dos países escandinavos) começou a operar a recém aberta rota para Nova York com aeronaves Douglas DC-4. Por razões de manutenção, ocasionalmente, os “grandes” DC-4 tinham que pousar no Aeroporto Fornebu, em Oslo. A pista principal do Fornebu possuía apenas 1.200 m de extensão, com fortes declividades nas duas cabeceiras.

Com o objetivo de evitar acidentes, o gerente do aeroporto, Ottar Kollerud, começou a medir o atrito na superfície da pista durante o inverno, antes dos pousos do DC-4. Kollerud desenvolveu um método usando um caminhão carregado de areia. A 30 km/h acionava os freios do caminhão, travando as rodas, e registrava o tempo ou a distância percorrida até a parada total do veículo. A partir das relações abaixo era então calculada a desaceleração r (*retardation*):

$$r = \frac{V}{T} \quad (1-1)$$

ou

$$r = \frac{V^2}{2S} \quad (1-2)$$

onde

r = *desaceleração*;

V = *velocidade antes de acionar os freios*;

T = *tempo despendido depois de acionado os freios até a parada total*;

S = *deslocamento depois de acionado os freios até a parada total*.

Testes de vôo realizados pela SAS com o DC-4 mostraram que a desaceleração verificada no avião, operando na mesma pista onde havia sido realizada a medição com o caminhão, correspondia, aproximadamente, ao dobro da desaceleração do caminhão. Testes e cálculos realizados posteriormente com outras aeronaves mostraram que essa relação era válida para vários tipos de aviões.

O método Kollerud, com algumas modificações, ainda é adotado pela ICAO e consta no Doc 9237-NA/898 (*Airport Services Manual*). Neste documento, ao invés de desaceleração, é adotado o coeficiente de atrito μ . Para se obter o coeficiente de atrito μ basta dividir a desaceleração r pelo valor da aceleração da gravidade $g = 9,81m/s^2$. Um fator de correção é aplicado para a obtenção do valor de μ_{max} ³.

Note-se que no método de Kollerud o valor de μ é fornecido indiretamente a partir da desaceleração r , enquanto que, no método da ICAO, é fornecido o valor de μ_{max} .

Logo o administrador do Aeroporto de Bromma (Aeroporto de Estocolmo), Bertil Florman, observou que também precisava de medições de atrito na pista do seu aeroporto durante o inverno, uma vez que nesta pista existiam rodovias de tráfego intenso nas duas cabeceiras. Ao mesmo tempo a SAS e outros operadores suecos sentiram a necessidade de dispor de informações sobre as condições de atrito das pistas em outros aeroportos da Suécia. A SAS também queria informações sobre as condições das pistas dos aeroportos da Dinamarca e da Noruega. Nessa época, final dos anos 40 e início dos anos 50, o problema do atrito nas pistas dos aeroportos ainda não era internacionalmente reconhecido.

Florman começou a utilizar o método de Kollerud no Aeroporto de Bromma, concluindo que este método se aplicava bem em Fornebu, devido à baixa frequência de operação do DC-4 naquele aeroporto, mas que, para o tráfego mais elevado do DC-4 em Bromma, a aplicação freqüente do método tomava muito tempo e deteriorava muito rapidamente os pneus e freios dos caminhões.

Então Florman introduziu o medidor *Tapley*. Este instrumento é um desacelerômetro que pode ser facilmente instalado em um veículo de passeio. O procedimento era acelerar o veículo até a velocidade determinada e então frear de modo a travar as rodas. Quando as rodas travadas começavam a derrapar, era feita a leitura no medidor Tapley. Não havia necessidade de frenagem do veículo até sua completa parada, podendo-se evitar o desgaste desnecessário dos freios e pneus. Normalmente o atrito era medido em nove pontos ao longo de três linhas, uma no eixo da pista e outras duas nas paralelas ao eixo, afastadas 5 m para cada lado.

³ Valor máximo de atrito obtido a uma taxa de deslizamento de cerca de 15%, vide Capítulo 3

O Medidor *Tapley* foi um grande avanço na técnica de medição de atrito. Mesmo assim Florman pediu a seu amigo Kulberg, engenheiro chefe no *Swedish Road Research Institute*, para desenvolver um equipamento capaz de medir o atrito de forma contínua ao longo da pista.

Kulberg propôs a Florman a utilização do Deslizômetro (*Skidometer*) para avaliar o atrito da pista do Aeroporto de Bromma. Em 1939 Kulberg já havia mostrado, com a utilização de um deslizômetro de pesquisa chamado BV-1, que, nas rodovias, o valor máximo de atrito obtido por pneus de automóveis ocorria em uma condição de cerca de 17% de deslizamento. Isto é, a velocidade periférica da roda na qual é aplicada a frenagem é 17% menor do que a velocidade periférica da roda livre.

No início dos anos 50, Florman decidiu introduzir o Deslizômetro para medidas operacionais no Aeroporto de Bromma e para isso foi construído um deslizômetro especial, o BV-2, em forma de reboque. Na opinião da SAS o equipamento deveria ser "pesado" de modo a representar razoavelmente as aeronaves daquela época. Como solução de compromisso aceitável ficou decidido que na roda de medição seria aplicada uma carga de 1.000 kg e que o equipamento inteiro pesaria em torno dos 3.000 kg. O BV-2 possuía três rodas no mesmo eixo com dispositivos que permitiam que a roda central (roda de medição) tivesse um diâmetro menor de modo que resultasse num deslizamento de 17%. O BV-2 foi usado por muitos anos no Aeroporto de Bromma.

Após a introdução do uso do Deslizômetro a forma de expressar a condição de atrito de uma pista se alterou: - no lugar do coeficiente de atrito μ , passou-se a informar o coeficiente máximo de atrito, μ_{max} . Este procedimento encontra-se de acordo com a linha atual da ICAO, conforme citado anteriormente.

No decorrer dos anos, a experiência mostrou que as medições de atrito poderiam ser realizadas com cargas menores do que aquelas usadas no BV-2. Na versão atual do equipamento, o BV-11, a carga na roda de medição é apenas de 105 kg.

Ao final dos anos 60, a SAAB⁴ desenvolveu uma unidade medidora de atrito, instalada como uma quinta roda em um de seus veículos. Esse equipamento recebeu

⁴ SAAB – Empresa fabricante de veículos na Suécia

o nome de *SAAB Friction Tester (SFT)*. Sua maior utilidade era a de permitir que as medições fossem realizadas rapidamente e a pista liberada ao tráfego aéreo em seguida. Isso era muito importante, principalmente nos aeroportos de maior movimento.

A forma de divulgar a condição de atrito de uma pista a partir dos resultados das medições realizadas foi desenvolvida, pela primeira vez, pela Autoridade do Aeroporto de Bomma em conjunto com a SAS, no início dos anos 50.

Durante o pouso, as características de atrito da porção média e do final da pista são de maior importância. Isso fez com que as pistas fossem divididas em três partes (três terços) para efeito de divulgação nos relatórios de características de atrito. Os terços foram qualificados em A, B e C, sendo o "A" sempre a informação de atrito correspondente à cabeceira de menor número de codificação da pista. Assim, por exemplo, em uma pista com designação 09/27, um piloto em aproximação na cabeceira 27 receberá a informação na sequência C, B e A.

A SAS e os operadores domésticos da Suécia entendiam bem o que os números de medida de atrito significavam. Entretanto, os operadores estrangeiros não sabiam o significado daquelas indicações que lhes eram relatadas. Desse modo foram introduzidas as expressões *BOM*, *MÉDIO* e *POBRE* para qualificar a condição do atrito.

A SAS distribuiu um questionário para que os pilotos avaliassem a condição de frenagem e de controle da aeronave, em situação de vento cruzado, para diversas pistas contaminadas com neve ou gelo. Foram respondidos cerca de 3.000 questionários.

As respostas mostraram que, para coeficientes de atrito maiores ou iguais a 0,40, não havia relato de quaisquer problemas. No entanto, para coeficientes de atrito menores ou iguais a 0,25, foram relatadas situações de dificuldades.

Como resultado desse estudo foi introduzida uma forma padronizada para divulgação dessas informações aos pilotos que associa termos descritivos aos índices de atrito medidos nas pistas. Essa forma de divulgação ainda hoje é adotada pela ICAO no Anexo-14 e é apresentada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Forma de divulgação das características de atrito em pistas pavimentadas, contaminadas com neve ou gelo

Atrito Medido	Ação de Frenagem Estimada	Código
maior ou igual a 0,40	Boa	5
0,36 a 0,39	Média a Boa	4
0,30 a 0,35	Média	3
0,26 a 0,29	Média a Pobre	2
menor ou igual a 0,25	Pobre	1

Fonte: Anexo-14 (ICAO, 2004)

Em 1952 a *International Air Transport Association (IATA)* promoveu um encontro onde a SAS teve a oportunidade de apresentar a experiência escandinava de avaliação e divulgação das características de atrito de pistas de aeroportos.

Como resultado da reunião, a *IATA* declarou haver a necessidade operacional de se dispor de informações confiáveis e uniformes referentes às características de atrito de pistas cobertas de neve ou gelo.

Nessa reunião estava presente o Sr. Walter B. Horne, representante da NASA. A partir deste momento iniciou-se a cooperação, que ainda existe na atualidade, entre técnicos da Suécia e da NASA para a pesquisa no campo de atrito em pistas de aeroportos.

A quinta reunião da "Divisão de Aeródromos e Auxílios em Terra" da ICAO (ICAO, 1952) aceitou as demandas da IATA, as quais se encontram hoje publicadas no Anexo 14 da ICAO, que apresenta as normas e recomendações para projeto e operação de aeródromos.

A partir das pesquisas desenvolvidas por Horne e Yager no *Langley Research Center*⁵ foi equacionada a mecânica de formação da lâmina d'água sobre o pavimento das pistas e o fenômeno da *Hidroplanagem* foi identificado como um fator chave na perda de atrito entre pneu e pavimento.

Em 1962, Yager desenvolveu a técnica do *grooving*, que consiste de ranhuras transversais aplicadas nos pavimentos das pistas por meio da serragem com discos

⁵Centro de Pesquisa da NASA localizada no Estado da Virginia – Estados Unidos.

diamantados. O desenvolvimento e a pesquisa desta técnica garantiu, em 1966, a obtenção de uma configuração geométrica mais eficaz.

Em 1968 o grooving foi aplicado, de forma incipiente, em algumas pistas de aeroportos na Inglaterra e nos Estados Unidos. Esse procedimento também foi aplicado em algumas curvas de estradas nos Estados Unidos, conhecidas por apresentarem altos índices de acidentes em condições molhadas. As avaliações iniciais indicaram resultados muito positivos. Mesmo assim, os setores civil e militar da aviação desejaram que esses resultados iniciais favoráveis fossem consubstanciados por uma pesquisa de maior abrangência e em escala real. Isso ocorreu no período de 1969 a 1972, com a utilização de um B-727 e um DC-9, em mais de 50 diferentes superfícies de pistas de aeroportos com e sem grooving.

Os resultados indicaram claramente os benefícios da utilização do grooving para assegurar a melhoria das condições de atrito. Conseqüentemente, em 1991, havia nos Estados Unidos 646 pistas de Aeroportos e de Bases da Força Aérea com aplicação de grooving (NASA, 2003).

Apesar dos avanços na tecnologia e nos procedimentos operacionais, as operações em pistas contaminadas com neve, gelo ou água continuaram sendo um desafio. Pistas nestas condições foram identificadas como fatores contribuintes em mais de 100 acidentes entre 1958 e 1993, muitos deles resultando em vítimas fatais.

Com o objetivo de reduzir esse tipo de acidente, a NASA em parceria com o *Transport Canada* e a FAA lideram, desde 1994, um programa de medições chamado "Programa Conjunto de Medições de Atrito em Pistas de Aeroportos no Inverno" (*Joint Winter Runway Friction Measurement Program - JWRFMP*). Também participam do Programa diversas organizações e fabricantes de equipamentos de medição de países da Europa, com ênfase nos países escandinavos. Conforme já descrito, esse programa de pesquisa foi concebido com os seguintes objetivos:

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

Para dar início às atividades do programa, reuniram-se, em 1994, cerca de 80 engenheiros, representando 43 organizações de 10 países, para participar dos estudos iniciais sobre o atrito desenvolvido entre o pneu e o pavimento em condições controladas. Tais atividades foram conduzidas nas instalações da NASA, em *Wallops Flight Facility*⁶. Foram realizados mais de 800 testes de atrito e mais de 400 medidas de textura dos pavimentos das pistas. Utilizaram-se ainda 13 equipamentos de medição de atrito, aplicando-se 7 técnicas diferentes de medição de textura sobre 11 superfícies diferentes de pavimentos.

Em 1996, iniciaram-se os testes de frenagem com aeronaves e veículos instrumentados nos Estados Unidos e no Canadá. Um B-737 de pesquisa (do *Langley Center*) e um Falcon 20 (do *National Research Council* do Canadá) realizaram uma série de "pousos-teste" em pistas contaminadas com neve, gelo e gelo fundente (*slush*). As condições das superfícies das pistas foram artificialmente alteradas de modo a ampliar a faixa de dados coletados. Foram utilizados também diversos equipamentos de medição para efetuar leituras de atrito nas mesmas pistas e nas mesmas condições em que operaram as aeronaves. Os dados obtidos com os equipamentos de medição foram comparados entre si e com o desempenho de frenagem das aeronaves instrumentadas. Novas campanhas, realizadas posteriormente, envolveram 9 aeronaves e 18 diferentes equipamentos de medição de atrito. As aeronaves de teste foram: B-737, B-757, B-727, Falcon 20, de Havilland Dash 8, Dornier 328, Airbus A319 e A320, e um 737-400.

⁶ Centro de Pesquisa da NASA, voltado à pesquisa aeronáutica, localizado no leste do Estado da Virgínia, Estados Unidos.

Os dados coletados pelo Programa entre 1996 e 1999 incluem cerca de 400 corridas de aeronaves instrumentadas e mais de 10.000 corridas de equipamentos de medição de atrito, sobre diversas superfícies de pavimentos, nas mais variadas condições de contaminação.

Essa substancial massa de dados permitiu aos pesquisadores desenvolverem um índice internacional de atrito em pistas de aeroportos, denominado *IRFI* (*International Runway Friction Index*), que padroniza a forma de divulgação do atrito e minimiza a dificuldade dos pilotos em tomar uma decisão quanto às operações de pouso e decolagem.

Os participantes do Programa pretendem que o *IRFI* se torne um índice internacional padrão, a ser utilizado pelos operadores de aeroportos na avaliação e divulgação das condições de atrito das pistas.

1.5 Acidentes Aeronáuticos

De acordo com a ICAO, as seguintes definições são aceitas internacionalmente no contexto da investigação de um incidente ou acidente aeronáutico:

Causa – são ações, omissões, eventos, condições ou qualquer combinação que leve a um incidente ou acidente;

Acidentes – são ocorrências associadas com a operação de uma aeronave (desde o momento do embarque de uma pessoa com intenção de voar, até o momento em que todas as pessoas tenham desembarcado), que resultem em uma ou mais das seguintes situações:

- morte ou ferimento sério de uma pessoa;
- dano ou falha estrutural que afete negativamente a estabilidade da estrutura, o desempenho ou as características de voo da aeronave e que venha a exigir reparos de maior monta ou a substituição dos componentes afetados;
- inacessibilidade ou impossibilidade do encontro da aeronave.

Incidentes – são todas as ocorrências, inclusive as de tráfego aéreo, associadas à operação de uma aeronave, havendo intenção de voo, que não cheguem a se

caracterizar como um acidente, que afetem ou possam afetar a segurança de uma operação.

Durante muitos anos as causas dos acidentes aeronáuticos eram atribuídas apenas ao(s) erro(s) do piloto ou falha(s) do equipamento (falha da aeronave). Com o passar do tempo, este conceito foi sendo modificado graças ao melhor entendimento dos problemas inerentes à aviação. Hoje se sabe que um acidente é resultado de várias causas - chamadas *fatores contribuintes* – que juntas desencadeiam uma série de eventos e acabam por ocasionar o acidente. Assim, a causa de um acidente ou incidente tem muitos aspectos.

A definição de **Causa** leva em consideração os diversos eventos ocorridos em um incidente ou acidente. Esses eventos podem ser considerados elos de uma corrente. Investigações de acidentes nos Estados Unidos revelaram cadeias de até 20 elos (fatores contribuintes), sendo que a média situa-se em torno de 4.

Por exemplo, em uma exaustiva investigação técnica e legal sobre determinado acidente, a comissão oficial de investigação identificou ao menos 10 fatores contribuintes. Concluiu-se ainda que, caso algum desses fatores não tivesse ocorrido, ou até mesmo se os 10 fatores tivessem ocorrido em ordem diferente, o acidente poderia ter sido evitado.

Outro exemplo: - um vôo pode sofrer diversas anormalidades envolvendo mau funcionamento de equipamentos, ou ainda pode passar por condições meteorológicas adversas e repentinas, resultando em perda do controle situacional pela tripulação. Como resultado, a aeronave pode levar mais tempo do que o esperado para desacelerar após o pouso. Caso isso ocorra em uma pista cuja extensão esteja próxima dos mínimos requeridos para o pouso e ainda apresente acúmulo de água em seu final, há grande chance de haver um acidente.

Caso a mesma sequência de eventos acontecesse em um aeroporto com pistas do mesmo comprimento, mas com uma área gramada ao final, a aeronave poderia varar a pista e sofrer apenas danos de pequena monta sem que houvesse grandes prejuízos.

Numa terceira situação, considerando a mesma sequência de eventos só que em um aeroporto com pista mais longa, onde houvesse folga na distância requerida para o pouso, a operação até poderia ser considerada normal.

O modelo que mais se aproxima e melhor ilustra como um acidente ou incidente é resultado de uma cadeia de eventos que se desenrolam em uma certa sucessão, é mostrado na Figura 1.1, que mostra esquematicamente um sistema de discos que giram ao acaso. Cada disco contém um buraco que, em certo momento, tem que se alinhar precisamente com os buracos dos outros discos para que um fecho de luz possa atravessar completamente o sistema. Assumindo que os discos representem eventos em uma cadeia que conduz a um acidente, a ação corretiva para prevenir um ou mais dos eventos (i.e., preenchendo os buracos) é uma aproximação para prevenir outros acidentes que poderiam envolver o mesmo tipo de situação.

Figura 1.1: "Discos Rotativos" ou Reason Model - Ilustração da cadeia de eventos que devem ocorrer numa determinada sucessão para que ocorra um acidente ou incidente (Reason, 1990).

Quando se pergunta por que um avião caiu, raramente encontra-se um único motivo, o que faz com que a resposta seja complexa. Pode-se, porém, distinguir quatro fatores contribuintes que mais freqüentemente aparecem relacionados a acidentes aeronáuticos:

- (1) condição meteorológica;
- (2) o homem;
- (3) a infra-estrutura; e
- (4) o avião.

1.5.1 A Condição Meteorológica

Este é o único fator contribuinte sobre o qual o homem não exerce nenhum controle. Lidar com ele, porém, é uma tarefa exigente, uma vez que se encontra em constante mutação e é, às vezes, até violento.

Em termos de aviação e, principalmente, quando consideramos o grau de exatidão que determinada informação precisa ter para tornar-se útil ao piloto, as previsões meteorológicas deixam muito a desejar. Pouco adianta ao piloto saber que num período de tantas horas poderá chover em determinado lugar. Ele precisa saber, por exemplo, que condições de tempo vai encontrar quando estiver efetuando uma aproximação para pouso. Esta ausência de informação faz com que, muitas vezes, o piloto encontre condições adversas com as quais não contava e, conseqüentemente, para as quais não estava preparado. Dependendo das circunstâncias, um acidente torna-se inevitável.

1.5.2 O Homem

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

Em terra, esses sistemas funcionam devidamente, mas em vôo, o corpo pode ser afetado. Uma variedade de acelerações pode fazer com que somente os olhos sejam confiáveis para fornecer uma verdadeira imagem da atitude do corpo no espaço, desde que recebam informações corretas por meio do mundo externo ou de instrumentos de vôo. No entanto, a visão humana também está sujeita às mais variadas ilusões de ótica.

Considere o seguinte exemplo de "autocinesis": quando se olha durante vários segundos no escuro para uma luz fixa, esta produzirá a impressão de estar se movendo. Da mesma forma, ao longo de uma aproximação para pouso à noite, em determinadas circunstâncias, a pista parece se mover para o piloto. Se estiver chovendo, a luz, ao passar pela água, sofre distorções que geram uma imagem errada ao piloto sobre seu posicionamento com relação à pista. Desse modo a possibilidade de um pouso ruim é maior.

O fator humano é, então, um contribuinte de extrema importância na ocorrência de um acidente. Culpar o piloto, porém, em nada contribui para a segurança do voo. É preciso, sim, encontrar meios que o ajudem a lidar com suas limitações.

1.5.3 A Infra-estrutura

Por ser bastante complexa, a infra-estrutura aeronáutica é uma geradora em potencial de vários fatores contribuintes. Destes, talvez os mais importantes relacionem-se às pistas de pouso e aos auxílios à navegação.

Pousar um avião que pesa 50.000 kg (é o caso do Boeing 737) a uma velocidade de 240 Km/h é uma tarefa, no mínimo, exigente. Se o pouso vai ocorrer à noite, sob condições meteorológicas adversas, o nível de exigência cresce ainda mais. Logicamente, quanto maior a exigência, maior é a chance de alguma falha ocorrer, a não ser que se criem condições adequadas para que a operação ocorra em segurança. Neste caso especificamente, o que os pilotos desejam são pistas suficientemente longas, que permitam margens de tolerância mais folgadas, tornando mais fácil a manobra.

Já os chamados auxílios à navegação precisam garantir as mais precisas informações possíveis. É fácil compreender, então, porque os auxílios à navegação que mais exigem da habilidade de um piloto e que mais aparecem relacionados a acidentes ocorridos em aproximações sob condições meteorológicas adversas, são os chamados de "não-precisão".

O atrito desenvolvido entre pneus e pavimento é abordado neste trabalho como um fator contribuinte (dentre os diversos fatores contribuintes que integram a Infra-estrutura), relacionado à segurança das operações de pouso e decolagem que ocorrem em pistas de aeroportos.

1.5.4 O Avião

Um dos maiores problemas encontrados pelos pilotos pioneiros era a falta de confiabilidade dos motores. Atualmente eles raramente falham graças ao elevado nível de tecnologia empregada em sua construção. Entretanto, quando isso acontece, cria-se um desbalanceamento de forças que, além de reduzir o desempenho da

aeronave, gera sérios problemas de controlabilidade, que exigem o máximo da habilidade do piloto.

Da mesma forma, diversos instrumentos existentes na cabine de pilotagem de um avião moderno permitem que ele seja operado com segurança nas mais variadas condições de tempo. Todavia, como todo sistema complexo, estes dispositivos também criam a possibilidade do piloto, por qualquer motivo, operá-los erradamente.

Esses dois exemplos indicam que a tecnologia aeronáutica, apesar de, sob certos aspectos ter facilitado a operação de um avião, acabou por criar outros problemas, que precisam ser solucionados para que um voo se torne mais seguro.

Para desacelerar uma aeronave da velocidade de toque na pista até a velocidade de *taxiamento*⁷ o piloto conta com três forças:

- (1) o arrasto aerodinâmico, produzido por superfícies especialmente projetadas,
- (2) o reverso, produzido pela inversão do empuxo dos motores, e
- (3) o atrito desenvolvido entre os pneus e o pavimento, quando da aplicação dos freios de roda.

Naquilo que diz respeito à influência do atrito na segurança das operações de pouso, ou das decolagens interrompidas, sabe-se que sua participação é maior em pistas mais curtas, onde não há muita folga entre a distância requerida e a extensão disponível de pista. Ou seja, quanto mais curta for uma pista, maior será a importância do atrito para que a aeronave possa desacelerar e parar com segurança, dentro da extensão de pista disponível.

Isso pode ser observado na Figura 1.2 e Figura 1.3, onde, para uma condição de pouso automático no modo "*Autobrake*" *Alto*⁸ (condição de desaceleração e parada na menor extensão), a energia dissipada pelo atrito representa cerca de 45% da energia total necessária para a parada da aeronave. Neste caso a participação do

⁷ Velocidade baixa, desenvolvida pela aeronave no solo, nos deslocamentos entre a pista e a posição de parada no pátio e vice-versa (máxima de 30 nós, 56 km/h, recomendada pelo fabricante de pneus).

⁸ Sistema existente nas aeronaves modernas a jato que, quando ativado pelo piloto, atua automaticamente no comando dos freios de roda, quando a aeronave toca o solo.

reverso dos motores e da resistência aerodinâmica correspondem, respectivamente, a cerca de 20% e 35% da energia total dissipada até a parada da aeronave.

Figura 1.2 - Gráfico ilustrativo das forças típicas de desaceleração durante a rolagem de pouso (sistema de pouso automático ativo no modo "Autobrake" Baixo) (FSF ALAR, 2000).

Figura 1.3- Participação dos dispositivos de desaceleração de uma aeronave a jato na energia total dissipada até a parada e o efeito sobre a distância de parada. Em condições de Máximo Peso de Pouso, aproximação na Velocidade de Referência, pista contaminada com 6,3 mm de água, ao nível do mar, pressão e temperatura padrão (FSF ALAR, 2000).

A título de ilustração pode-se observar que a força de atrito atua durante todo o pouso, desde o ponto em que a aeronave toca o pavimento e inicia a desaceleração, até sua parada total. Nas velocidades mais elevadas a magnitude da força de atrito produzida pela ação dos freios de roda é relativamente pequena, quando comparada com as forças desenvolvidas pelo reverso dos motores e pelo arrasto aerodinâmico.

Entretanto, a partir da velocidade de 80 nós (148 km/h) e, até a parada completa do avião, o atrito torna-se a força preponderante, sendo que, para as velocidades mais baixas, em torno de 20 nós (37 km/h), passa a ser o único recurso operacionalmente disponível com o qual o piloto pode contar.

É importante ainda notar que a distância percorrida pela aeronave até a parada total depende completamente do atrito, variando de cerca de 1.200 m até cerca de 1.500 m respectivamente nos modos *Auobrake* Alto e Médio, crescendo para cerca de 1.800 m (modo *Autobrake* Baixo) e chegando a valores extremos de 3.500 m para uma operação sem o uso dos freios de roda. Isto demonstra que sem os sistemas de freio seria necessário o dobro de extensão das pistas, ou seja, o sistema de freios e o atrito são fatores importantíssimos no pouso.

A Figura 1.4 refere-se a um acidente sem vítimas, mas com consideráveis danos materiais. Em 22 de setembro de 1999, no Aeroporto Internacional de Bangkok, uma aeronave B-747 varou a pista após uma aproximação e pouso em condições meteorológicas adversas (chuva forte), sofrendo danos consideráveis. Nas investigações constatou-se a ocorrência de hidroplanagem.

Figura 1.4 - Acidente sem vítimas de um Boeing 747 da QANTAS Airlines que sofreu hidroplanagem durante o pouso em pista molhada (Acidente Qantas, 1999)

1.6 Contexto do Trabalho

A Figura 1.5 e Figura 1.6 apresentam a evolução do número de aeronaves comerciais de grande porte em operação e a atividade do transporte aéreo no mundo, em termos de número de decolagens e de horas voadas, no período de 1965 a 2003, respectivamente.

Figura 1.5 - Aeronaves a Jato com mais de 30.000 kg, certificadas e em operação, excluídas aeronaves fabricadas na antiga União Soviética (Boeing, 2001)

Figura 1.6 - Decolagens e horas de voo anuais no mundo 1965-2003 (Boeing, 2004)

No ano de 2003 registraram-se cerca de 17 milhões de decolagens (correspondentes da mesma forma a 17 milhões de pousos) e cerca de 34 milhões de horas de voo. Nesse mesmo ano, ocorreram 1371 acidentes com aeronaves, resultando na morte de 516 pessoas (Boeing, 2001).

A Figura 1.7 apresenta o número de acidentes ocorridos, de 1994 a 2003, com aeronaves comerciais a jato, em cada fase do voo. Pode-se observar que 57% dos acidentes aconteceram nas fases da corrida de pouso ou decolagem, quando as aeronaves encontram-se nas pistas dos aeroportos, resultando em 10% do total de mortes por acidentes aéreos no mesmo período.

Figura 1.7 - Acidentes e Fatalidades a Bordo de Aeronaves por Fases de Voo no Período 1994-2003. (Boeing, 2004)

No Brasil, durante o ano de 2003 registraram-se cerca de 544.000 pousos e 750.000 horas voadas por aeronaves de empresas aéreas regulares, transportando um total de cerca de 35 milhões de passageiros (DAC, 2003 e INFRAERO, 2003).

1.7 Estrutura do Trabalho

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

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo inicia-se com a Justificativa do Tema e o Objetivo do Trabalho. Em seguida é apresentada a forma pela qual o problema do atrito em pistas de aeroportos é tratado pelas autoridades aeronáuticas dos países líderes em transporte aéreo e na fabricação de aeronaves comerciais. É apresentado um histórico contendo os registros das primeiras ações tomadas com o objetivo de melhor conhecer e divulgar as condições de frenagem proporcionadas por uma determinada pista. Em seguida, discorre-se sobre os conceitos e definições dos acidentes aeronáuticos: como ocorrem os acidentes, o que são e quais são os fatores contribuintes. Destaca-se o fato de que todo acidente aeronáutico é sempre resultado de diversas causas, encadeadas como elos de uma corrente. Introduz-se o conceito de *Prevenção*, onde se procura agir individualmente em cada causa, de forma a "quebrar" os elos da corrente, diminuindo as possibilidades de que ocorra um acidente. O contexto no qual se insere o trabalho é destacado por meio da apresentação de estatísticas sobre a atividade do transporte aéreo no mundo e no Brasil, indicando índices de acidentes e mostrando que uma parcela substancial destes ocorre em pistas de aeroportos. Finalmente é apresentada a organização da estrutura do trabalho em capítulos.

2. PNEUS

As funções, os componentes, a terminologia e as características dos pneus são expostas neste capítulo. Introduzem-se os dois tipos de pneus: - diagonal e radial, descrevendo suas características estruturais e funcionais. Apresenta-se o conceito da deflexão em pneus e as diferenças do regime de operação entre um pneu aeronáutico e um pneu rodoviário. Diversas informações e conceitos contidos neste capítulo servem de referência para os capítulos seguintes, principalmente naquilo que diz respeito aos fenômenos que se desenvolvem na área de contato do pneu com o pavimento.

3. INTERAÇÃO DO PNEU COM PISTA SECA

Neste capítulo evidenciam-se as forças que se desenvolvem na área de contato do pneu com um pavimento seco. São estabelecidos conceitos e descritos os esforços na área de contato para uma roda estática, para uma roda girando livre e para uma roda girando na condição freada. É descrito o fenômeno da onda estacionária que ocorre nos pneus rodando em altas velocidades. Estabelece-se o conceito de deslizamento real e aparente, e se explica o comportamento do atrito em função do deslizamento. São estabelecidos os conceitos da adesão, histerese e desgaste, que são componentes do atrito e é descrita a participação de cada um destes em função da velocidade e do tipo de pavimento. Aborda-se a variação da adesão e da histerese em função da carga de roda e da pressão do pneu, e expõe-se o conceito da área de contato real e aparente. Finalmente descrevem-se as diferenças entre esforços resultantes na área de contato pneu-pavimento para pneus diagonais e radiais, os efeitos pneumático e de Poisson e os resultados das pesquisas mais recentes de diversos autores.

4. INTERAÇÃO DO PNEU COM PISTA MOLHADA

Neste capítulo são tratados os esforços resultantes da interação entre um pneu e uma pista que contém água em sua superfície. São apresentados os principais fatores que influenciam o fenômeno: - a textura do pavimento, a profundidade do fluido contaminante, as características da banda de rodagem, a pressão de enchimento dos pneus, a série técnica dos pneus e, finalmente, a ação no eixo da roda. O fenômeno da resistência hidrodinâmica e o comportamento do atrito na presença de água também são apresentados. O fenômeno da hidroplanagem em suas três modalidades: - viscosa, hidrodinâmica e por desvulcanização é explicado e mostra-se a influência do pavimento, do pneu, do fluido contaminante e da aeronave sobre a hidroplanagem. Finalmente é apresentado o modelo das 3 zonas e das 4 fases para a hidroplanagem combinada.

5. CARACTERÍSTICAS DA SUPERFÍCIE DE UMA PISTA

O conceito de textura como característica da superfície de uma pista é apresentado. Descrevem-se os conceitos de microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade e explica-se como cada uma das faixas de textura influencia no rolamento das rodas e na dinâmica de um veículo. É definida a condição de contaminação das superfícies das pistas de aeroportos de acordo com organismos internacionais, e, em seqüência, é apresentado o comportamento do atrito desenvolvido na área de contato pneu-pavimento em função das diversas combinações entre macro e microtexturas de superfícies de pistas e de suas condições de contaminação.

6. PROJETO, AVALIAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PISTAS DE AEROPORTOS

São apresentadas as considerações básicas que o DAC adota no Brasil e que a ICAO e a FAA adotam internacionalmente para o assunto. São colocados os objetivos de projeto para uma pista nova, com base em três parâmetros: (1) drenagem superficial (geometria vertical), (2) drenagem da interface pneu-pavimento (associada à macrotextura) e (3) drenagem por penetração (associada à microtextura). São ainda apresentados os objetivos de manutenção, de acordo com os critérios da ICAO e da FAA. Os parâmetros de projeto e manutenção, com a indicação dos valores limites e as respectivas recomendações das ações a serem tomadas, também são descritos com base em documentos do Comando da Aeronáutica do Brasil, da ICAO e da FAA. Finalmente é abordado o problema do acúmulo de resíduos de borracha dos pneus das aeronaves nas pistas e as ações de manutenção recomendadas.

7. PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Neste Capítulo são apresentados os conceitos e critérios utilizados no planejamento dos ensaios de campo. Relatam-se os estudos de HoSang sobre os desvios de trajetória de aeronaves, quando em deslocamento sobre pistas de

aeroportos (realizados para a FAA), e são introduzidos os conceitos de "passagens" e "coberturas". Os resultados dos estudos de HoSang são utilizados na análise estatística para definição da localização dos ensaios de campo. Finalmente é proposto um critério, dividindo-se a pista em faixas longitudinais por níveis de solicitações, e definidos os locais dos ensaios.

8. TRABALHOS DE CAMPO

Trata-se da fase de coleta de dados. Neste capítulo são descritos os trabalhos realizados em campo. Descrevem-se os ensaios conduzidos diretamente pelo autor e registra-se o acompanhamento dos ensaios e serviços de manutenção realizados pela INFRAERO. Os trabalhos de campo foram realizados nas duas pistas do Aeroporto de Congonhas e consistiram de:

- levantamento visual das superfícies das pistas;
- acompanhamento dos serviços de remoção de borracha realizados pela INFRAERO;
- acompanhamento das medições de atrito dinâmico realizadas pela INFRAERO com equipamento MuMeter;
- coleta de dados de medições de atrito dinâmico realizadas anteriormente pela INFRAERO;
- medições da macrotextura por meio do ensaio da Mancha de Areia;
- medições de atrito com o Pêndulo Britânico;
- medição da drenabilidade com o uso de Drenômetro;
- extração de corpos de prova com sonda rotativa.

9. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste Capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de campo e é elaborada a análise desses resultados para as pistas do aeroporto. Inicialmente a análise é feita em separado para cada uma das pistas. Cada pista é dividida em faixas longitudinais (como indicado no Capítulo 7) e cada faixa é analisada em função dos valores de atrito com o Pêndulo Britânico, dos valores de macrotextura e dos valores de atrito dinâmico com o MuMeter. A comparação entre os resultados considera o tráfego e as práticas de manutenção a que são

submetidas as faixas. Os dados são analisados estatisticamente por meio de Análise de Variância. São apresentados comentários e conclusões sobre: (1) o desempenho do *grooving*; (2) o acúmulo de resíduos de borracha; (3) o desempenho dos serviços de desemborrachamento; (4) a ocorrência ou não de polimento dos agregados das misturas asfálticas; (5) a ocorrência ou não de remoção de finos e desagregação das superfícies dos revestimentos; e (6) o comportamento da aderência pneu-pavimento em função dos parâmetros analisados. São apresentadas ainda as conclusões sobre como se relacionam nessas pistas: (1) drenabilidade *versus* macrotextura, (2) atrito dinâmico com o MuMeter *versus* macrotextura, e (3) atrito com o Pêndulo Britânico *versus* macrotextura. Finalmente são apresentadas sugestões para continuidade da pesquisa.

2 PNEUS

2.1 Informações Gerais

Um pneu é uma estrutura flexível, em forma de toróide e cheia com ar comprimido.

As principais funções de um pneu são:

- (1) permitir o deslocamento do veículo transferindo carga ao pavimento pela ação do rolamento;
- (2) prover atrito com a superfície do pavimento, de modo a garantir dirigibilidade e respostas eficientes nas freadas e acelerações;
- (3) contribuir, junto com a suspensão, para o conforto dos ocupantes.

(Adaptado de Clark, 1981¹, apud Baladi *et al.*, 2003 e Wong, 2001)

O conhecimento das características dos pneus é fundamental para o estudo de sua interação com as superfícies de rolamento.

Um pneu basicamente é formado por quatro componentes:

- (1) carcaça – é a estrutura interna do pneu, com a função de reter o ar sob pressão e suportar o peso do veículo. É constituída por lonas de poliéster, nylon ou aço;
- (2) talão – possui a forma de um anel e tem a função de manter o pneu acoplado ao aro. É constituído por diversos arames de aço de alta resistência, unidos e recobertos por borracha;
- (3) flancos (também chamados de costados ou paredes laterais) – são as partes laterais do pneu e têm a função de proteger a carcaça. Constituem-se de borrachas com alto grau de flexibilidade;
- (4) banda de rodagem – é a parte que entra em contato direto com o solo. O desenho da superfície da banda é chamado escultura ou padrão. Formada

¹ Clark, S. M., Mechanics of Pneumatic Tires, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D. C., 1981

por partes cheias (denominadas biscoitos ou raias) e vazias (chamadas sulcos ou ranhuras), têm a função de otimizar a aderência do veículo aos diversos tipos de superfície. É feita por compostos de borracha com alta resistência ao desgaste.

O comportamento dos pneus varia de acordo com a construção de sua estrutura, com seu tipo de borracha, seu tamanho, sua pressão de enchimento, seu desenho da banda de rodagem e com a sua rigidez.

Comercialmente existem dois tipos de pneus tanto para uso rodoviário como para uso aeronáutico: - pneus diagonais, também conhecidos como convencionais, e pneus radiais.

Os pneus radiais rodoviários possuem maior teor de borracha natural. Esse fato, aliado aos reforços estruturais e novos desenhos da banda de rodagem, proporcionam-lhes maior resistência, durabilidade, aderência e estabilidade do que os pneus convencionais.

Apesar de um custo superior, 97% da produção mundial de veículos de passeio utiliza pneus radiais. No caso dos veículos comerciais: ônibus e caminhões, sua participação é expressiva, da ordem de 45% da produção total.

Uma outra classificação divide os pneus em "com câmara" e "sem câmara". No caso dos "sem câmara", a superfície interna da carcaça possui uma camada de borracha especial, denominada "*liner*", que garante a retenção do ar.

As principais vantagens dos pneus "sem câmara" são a montagem e desmontagem mais rápidas e a probabilidade de maior segurança quando perfurados, pois perdem ar muito lentamente.

Os pneus aeronáuticos apresentam estrutura similar aos rodoviários. A principal razão pela qual há diferença entre ambos, em termos práticos, é a condição de operação. As condições de operação e os projetos das aeronaves exigem uma grande variedade de tipos e tamanhos de pneus.

O pneu de uma aeronave moderna é o resultado de alta tecnologia da engenharia. Sua estrutura é composta por borracha, lonas e aço, e é projetada para suportar cargas pesadas em altas velocidades, devendo apresentar o menor tamanho e peso possíveis.

Um pneu aeronáutico possui aproximadamente a seguinte composição em peso: - 50% de borracha, 45% de lonas e 5% de aço.

Da mesma forma que os pneus rodoviários, os pneus aeronáuticos podem ser diagonais ou radiais.

A carcaça dos pneus aeronáuticos diagonais, também conhecidos como convencionais (*bias ply*), apresenta uma estrutura composta de camadas sucessivas de lonas. Estas são cobertas por borracha, assentadas umas sobre as outras, de modo que as tramas das lonas formem, alternadamente, um ângulo de aproximadamente 40° com o eixo da banda de rodagem (Goodyear, 2004). Um desenho esquemático da estrutura de um pneu aeronáutico convencional é apresentado na Figura 2.1.

Os pneus aeronáuticos radiais (*radial ply*) apresentam uma estrutura flexível, composta de camadas sucessivas de lonas cobertas por borracha. Estas se encontram assentadas umas sobre as outras, de modo que as tramas das lonas formem um ângulo de 90° com o eixo da banda de rodagem. Essa estrutura é estabilizada com uma cinta inextensível sob a banda de rodagem, conferindo-lhe maior rigidez (Goodyear, 2004). Um desenho esquemático da estrutura de um pneu aeronáutico radial é apresentado na Figura 2.2.

De acordo com Myers *et al.* (1999) 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 2.1 - Esquema da estrutura de um pneu aeronáutico diagonal e seus componentes (Goodyear, 2004)

Figura 2.2 - Esquema da estrutura de um pneu aeronáutico radial (Goodyear, 2004)

A Figura 2.3 mostra esquematicamente a orientação das lonas que compõem a carcaça para os dois tipos de pneus e as cintas de reforço logo abaixo da banda de rodagem do pneu radial.

Figura 2.3 – Detalhe da orientação das fibras das lonas nas carcaças dos pneus diagonal e radial (Wong, 2001)

A terminologia e as características geométricas gerais de um pneu são apresentadas a seguir. Essa terminologia e características são particularmente importantes para o entendimento dos capítulos seguintes deste trabalho, pois diversos aspectos associados à dinâmica do rolamento de um pneu sobre um pavimento referem-se aos parâmetros ou grandezas aqui definidos.

A Figura 2.4 indica os diversos elementos do conjunto roda e pneu utilizados nas definições.

Figura 2.4 - Elementos e características geométricas do conjunto roda e pneu (Goodyear , 2004)

Características de um pneu:

- *Índice de Carga*: é a carga máxima permitida (especificada pelo fabricante) suportada o pelo pneu em condições de operação, quando cheio na máxima pressão (Índice de Pressão);
- *Índice de Pressão*: é a máxima pressão de enchimento (especificada pelo fabricante), necessária e adequada para que o pneu opere com a carga máxima (Índice de Carga) à deflexão especificada. As pressões de enchimento dos pneus de aeronaves são fornecidas para o pneu sem carregamento (pneu fora da aeronave). Quando a carga máxima é aplicada ao pneu, a pressão cresce cerca de 4% como resultado da redução do volume de ar;
- *Diâmetro Externo*: é a medida do diâmetro de um pneu montado e inflado, sem carga, tomada na linha central da banda de rodagem;
- *Largura da Seção*: é a medida tomada na parte mais larga da seção de um pneu montado e inflado;
- *Diâmetro do Aro*: é a medida nominal do diâmetro da roda na qual o pneu é montado;
- *Altura da Seção Livre*: conforme mostrado na Figura 2.4 e pode ser expressa usando a seguinte fórmula:

$$\text{Altura da Seção Livre} = \frac{\text{Diâmetro Externo} - \text{Diâmetro do Aro}}{2} \quad (2.1);$$

- *Abatimento*: conforme mostrado na Figura 2.4 é a diferença entre as Alturas das Seções Livre e Carregada;
- *Série Técnica (Aspect Ratio)*: é a relação percentual entre a altura e a largura da seção do pneu. Quanto menor esse número, mais baixo será o perfil do pneu. Pode ser expressa pela fórmula:

$$\text{Série Técnica (\%)} = \frac{\text{Altura da Seção} \cdot 100\%}{\text{Largura da Seção}} \quad (2.2);$$

- *Raio Carregado Estático*: é a distância entre o eixo da roda e a superfície do pavimento, em um pneu carregado;
- *Altura da Seção Carregada*: é a altura da seção na parte inferior de um pneu carregado (parte em contato com o pavimento), tomada no centro da área de contato. Pode também ser definida pela seguinte fórmula:

$$\text{Altura da Seção Carregado} = \text{Raio Carregado Estático} - \text{Raio do Aro} \quad (2.3);$$

- *Deflexão do Pneu*: é o termo usado para indicar o quanto o pneu "abaixa" quando carregado. Formalmente é a relação entre a diferença das alturas das seções carregada e livre e a altura da seção livre, expressa percentualmente. É dada pela seguinte fórmula:

$$\text{Deflexão (\%)} = \frac{\text{Abatimento} \cdot 100\%}{\text{Altura da Seção Livre}} \quad (2.4);$$

- *Carga de Serviço (Carga Operacional)*: é a carga resultante no pneu quando a aeronave encontra-se com o peso máximo de decolagem;
- *Pressão de Serviço (Pressão Operacional)*: é a pressão necessária para manter a deflexão apropriada para a Carga de Serviço;
- *Índice de Velocidade (Rated Speed)*: é a máxima velocidade para a qual o pneu é qualificado.

2.2 Características Operacionais

Os pneus são, em sua maior parte, constituídos por borracha, um material isolante, que por esta razão, dissipa o calor muito lentamente.

As cargas pesadas e as altas velocidades, sob as quais os pneus aeronáuticos operam, geram calor, em quantidades bem superiores às aquelas produzidas nos pneus rodoviários, para o mesmo tempo de operação. Tal nível de aquecimento pode ser prejudicial aos pneus das aeronaves, devido às altas temperaturas atingidas.

Além disso, os pneus aeronáuticos são projetados para operar com 32% de deflexão, sendo que alguns podem chegar a 35%. A título de comparação, pneus de veículos de passeio e de caminhões operam a uma deflexão de 11% a 17%.

Por essa razão e considerando o intenso regime de operação (altas cargas e velocidades e grandes deflexões), os pneus aeronáuticos são concebidos para serem usados somente de forma intermitente.

A geração de calor nos pneus aeronáuticos é afetada significativamente pela velocidade de taxiamento, pela pressão de enchimento (ou pela deflexão) e pela distância de taxiamento.

A vida de um pneu aeronáutico é substancialmente reduzida, quando operado em velocidades de taxiamento acima da recomendada, ou com pressão de enchimento inadequada.

Para melhor conhecer a magnitude e os efeitos do calor gerado em pneus típicos de aeronaves, diversos pneus de testes foram equipados com sensores térmicos, localizados nas partes de interesse (Goodyear, 2004).

Os gráficos apresentados nas Figuras de 2.5 a 2.8 mostram a influência da velocidade, da distância percorrida e da pressão de enchimento, na geração interna de calor, em pneus típicos do trem principal de aeronaves, durante operações de taxiamento.

Na Figura 2.5, a linha vertical tracejada indica a velocidade máxima recomendada para táxi (30nós ou 56km/h). O talão é o componente do pneu que sofre o maior aumento de temperatura. Existem duas razões para isso:

- (1) todas as forças internas ou externas, em última análise, agem no talão, tornando-o um componente com alta geração de calor;
- (2) a borracha é um bom isolante e dissipa calor lentamente, ao passo que a área do talão é a mais espessa do pneu, retendo o calor por mais tempo do que as áreas de menor espessura.

Figura 2.5– Efeito da velocidade de taxiamento sobre o aumento da temperatura de componentes do pneu (1 nó = 1,852 km/h), (Goodyear, 2004)

Na Figura 2.6 a linha tracejada vertical indica a deflexão de 32%, para a qual os pneus aeronáuticos são projetados. A região à esquerda da linha de 32% indica a situação de pressão de enchimento acima da recomendada (ou a região de deflexões menores que 32%). A região à direita dos 32% indica a situação contrária – pressão de enchimento abaixo da recomendada.

Para um mesmo deslocamento, a uma determinada velocidade, quanto maior a deflexão maior é o calor dissipado. Nota-se uma inflexão nas curvas de temperatura do talão e da lateral de banda de rodagem, indicando que para deflexões acima de 32% o calor dissipado aumenta com mais intensidade.

Mesmo para um pneu operando em condições recomendadas de velocidade e deflexão, o calor gerado excede o calor dissipado e, assim, quanto maior a distância percorrida, maior será a temperatura dos pneus no início da decolagem.

Figura 2.6- Efeito da deflexão sobre o aumento da temperatura de componentes do pneu em uma operação de taxiamento a 30mi/h (48km/h) (Goodyear, 2004)

A Figura 2.7 mostra o comportamento da temperatura, em função da distância percorrida, para os componentes de um pneu aeronáutico taxiando a 30mi/h (48 km/h), com 32% de deflexão.

A Figura 2.8 apresenta o mesmo tipo de análise para um pneu operando a uma deflexão de 40% e a uma velocidade de taxiamento de 60mi/h (96km/h). Nessa Figura a inclinação das curvas é muito maior, evidência de que a variação de temperatura com a distância percorrida é maior do que na condição de 32% de deflexão e velocidade de 30mi/h (devido à maior taxa de geração de calor). Além disso, após percorrer uma distância de cerca 9km, o pneu estoura na parte mais baixa da parede lateral.

Figura 2.7- Efeito da distância de taxiamento sobre o aumento da temperatura de componentes do pneu a 30 mi/h (48 km/h) e 32% de deflexão (Goodyear, 2004)

Figura 2.8 - Efeito da distância de taxiamento sobre o aumento da temperatura de componentes do pneu a 60mi/h (96,6 km/h) e 40% de deflexão (Goodyear, 2004)

Ensaio realizados no dinamômetro mostram o efeito da deflexão no "número de ciclos até a falha", para diversos pneus, em operações de taxiamento (ciclos de 10.000 pés = 3.050 m) e de corridas de decolagem - Figura 2.9. O número de ciclos até a falha diminui com a sub-pressão (diferença entre a pressão verificada e a pressão de operação recomendada, expressa em percentagem da pressão recomendada). Ou seja, a vida útil dos pneus diminui caso sejam operados com pressão de enchimento abaixo do que a recomendada pelo fabricante (ou deflexão maior do que a recomendada). Esse estudo levou a duas constatações interessantes:

- (1) todas as falhas nas operações de taxiamento foram de estouro do pneu na parte inferior da parede lateral (próximo à banda de rodagem);
- (2) as falhas nas operações de decolagem foram o descolamento da banda de rodagem.

Ao observar-se o formato das curvas conclui-se que a operação de decolagem é mais sensível à sub-pressão do que o taxiamento. Isto se deve ao efeito da força centrífuga na banda de rodagem, causando a chamada "*onda estacionária*"²

Figura 2.9 (a) e (b) – Vida útil de um pneu aeronáutico em operações de taxiamento e decolagem em função da sub-pressão (Goodyear, 2004)
(10.000 pés = 3.050 m)

² Vide Capítulo 3

Da mesma forma foram realizados ensaios para verificar o comportamento da vida útil dos pneus em relação à sobrecarga (relação percentual entre a carga de operação e a carga recomendada para uma determinada pressão de enchimento), em operações de taxiamento e decolagem - Figura 2.10. Conforme esperado, quanto maior a sobrecarga, menor a vida útil dos pneus. Verificou-se também que houve repetição dos tipos de falhas ocorridas no taxiamento e na decolagem.

A operação de taxiamento é mais sensível à sobrecarga do que a corrida de decolagem, dinâmica que ocorre de modo inverso ao comportamento na condição de sub-pressão.

Figura 2.10 (a) e (b) – Vida útil de um pneu aeronáutico em operações de taxiamento e decolagem em função da carga de serviço (Goodyear, 2004)

As forças centrífugas que atuam num pneu aeronáutico podem causar ondas de tração na região posterior da banda de rodagem, imediatamente após o contato com o pavimento. A intensidade da onda de tração é muito dependente da pressão de enchimento ou da deflexão do pneu.

Um pneu aeronáutico é projetado de modo que, quando inflado e não carregado (fora da aeronave), as forças internas de tração que atuam em suas paredes se distribuam de maneira uniforme nas diversas camadas que compõem sua estrutura. Ou seja, na condição de pneu inflado e não carregado, o esforço de tração suportado por cada lona é o mesmo. Quando o pneu é carregado e, em consequência, sofre uma

deflexão, as forças de tração atuantes nas camadas externas das paredes laterais serão maiores do que as forças atuantes nas camadas internas. Devido a esse gradiente nos esforços de tração, desenvolvem-se esforços de cisalhamento entre as camadas (lonas). A operação com deflexões maiores do que as recomendadas aumentarão os esforços de cisalhamento, diminuindo a vida útil dos pneus.

Finalmente apresenta-se na Figura 2.11 a seguir, a título ilustrativo, o "envelope de desempenho" dos diversos tipos de pneus e suas aplicações.

Figura 2.11 - Envelope de desempenho dos pneus (Goodyear, 2004)

A terminologia, as características de construção e as limitações operacionais dos pneus aeronáuticos, descritas neste Capítulo, são úteis na leitura e entendimento de diversos aspectos e mecanismos descritos neste trabalho.

3 FORÇAS RESULTANTES DA INTERAÇÃO ENTRE PNEU E PISTA SECA

Além das 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 (que são as partes da aeronave e do solo que efetivamente entram em contato) é essencial ao estudo do desempenho, da qualidade ao rolamento e da dirigibilidade das aeronaves durante as operações no solo.

Os termos "*interface pneu-pavimento*" ou simplesmente "*pneu-pavimento*", ou ainda "*área de contato*", usados neste trabalho, referem-se aos seguintes aspectos:

- (1) **tamanho** e **forma** da área de contato entre o pneu e a superfície do pavimento;
- (2) **intensidade** e **distribuição** das tensões desenvolvidas na área de contato entre o pneu e a superfície do pavimento.

3.1 Resistência ao Rolamento

Um pneu estático sobre uma pista, quando submetido a uma força vertical, deforma-se como mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 - Esquema do carregamento de um pneu estático

A distribuição de pressões que se forma na área de contato é tal que a resultante é uma força vertical que passa pelo centro da roda.

Devido à deflexão do pneu, também estão presentes forças horizontais locais. Entretanto, para o pneu parado, a resultante dessas forças é zero.

Diversos autores já relataram os resultados de pesquisas que mostram que as tensões normais que se desenvolvem na área de contato do pneu com o pavimento não se distribuem de maneira uniforme. Entretanto, ao considerarem-se valores médios, é possível escrever a equação a seguir, sem cometer erro significativo:

$$P = p \cdot A \quad (3-1)$$

onde:

P = Carga de Roda;

p = pressões do pneu;

A = área de contato.

A resistência ao rolamento de um pneu é causada, principalmente, pela ação da histerese, devido ao comportamento visco-elástico do material do qual é constituído.

Resultados experimentais disponíveis mostram que as perdas verificadas no rolamento de um pneu, na faixa de velocidades de 120 a 150 km/h, são de 90 a 95% devidas à histerese, de 2 a 10% devidas ao atrito entre as superfícies do pneu e do pavimento e 1,5 a 3,5% em consequência da resistência do ar. Do total de energia despendida em sua estrutura, verifica-se que, em um pneu radial de caminhão, cerca de 73% das perdas ocorrem por histerese na banda de rodagem. Cerca de 13% se dá nas paredes laterais, aproximadamente 12% ocorre na região localizada entre a banda de rodagem e as paredes laterais (também conhecida como ombros) e cerca de 2% sucede-se nos talões (Wong, 2001).

Quando o pneu está girando, a distribuição de pressões na área de contato muda devido às propriedades visco-elásticas da borracha. Então a força vertical resultante 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, forma-se, na área de contato, uma força horizontal equivalente com sentido contrário.

Essa força, em sentido contrário ao do movimento, causada pela deformação da banda de rodagem, é denominada *resistência ao rolamento* da roda. De acordo com a Figura 3.2, o seu valor é dado por:

$$F_R = N \cdot \frac{e}{r} \quad (3-2)$$

onde:

F_R = resistência ao rolamento;

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

r = raio do pneu carregado.

Figura 3.2 - Esquema de forças de um pneu em rolamento

Devido à rotação da roda, tanto e quanto r aumentam levemente com a velocidade.

Na prática, F_R também inclui as contribuições devido ao atrito interno do eixo da roda e à deflexão do pavimento.

Definindo-se o coeficiente de atrito ao rolamento como:

$$\mu_R = \frac{F_R}{N} \quad (3-3)$$

onde:

μ_R = *coeficiente de atrito ao rolamento*;

F_R = *força de atrito ao Rolamento*.

pode-se também escrever:

$$\mu_R = \frac{e}{r} \quad (3-4)$$

A resistência ao rolamento de um pneu é afetada por diversos fatores, tais como: a estrutura do pneu (construção e materiais) e as condições de operação (pressão de enchimento, velocidade, temperatura e superfície de rolamento).

A construção do pneu tem influência significativa na resistência ao rolamento. A Figura 3.3, a seguir, apresenta o coeficiente de atrito ao rolamento μ_R , em diversas velocidades, para pneus diagonais e radiais em veículos de passeio.

Figura 3.3 - Variação do coeficiente de atrito ao rolamento com a velocidade, em pneus diagonal e radial de veículos de passeio, em pavimento suave e plano, com a mesma carga e pressão de enchimento (Wong, 2001)

Pneus fabricados com componentes de borracha sintética geralmente apresentam resistência ao rolamento mais elevada do que os fabricados com borracha natural. Já os pneus fabricados com borracha butílica apresentam melhores características de tração e adesão e, por outro lado, possuem resistência ao rolamento maior do que os fabricados com borracha sintética convencional.

As condições da superfície também afetam a resistência ao rolamento. A resistência ao rolamento é menor em superfícies de macrotextura¹ fechada do que em superfícies de macrotextura aberta.

Superfícies molhadas (contaminadas) apresentam maiores valores da resistência ao rolamento, em decorrência do arrasto causado pela água.

Outro fator que também afeta a resistência ao rolamento e depende da superfície de rolamento é a pressão de enchimento. A pressão de enchimento afeta a flexibilidade do pneu. Dependendo da capacidade de suporte do solo a pressão de enchimento do pneu afeta de forma diferente a resistência ao rolamento.

Em superfícies pavimentadas, geralmente, quando se aumenta a pressão de enchimento, diminui-se a resistência ao rolamento. Isso ocorre porque a deflexão do pneu diminui com o aumento da pressão e, em consequência, reduzem-se as perdas por histerese.

Mantendo-se constante a carga vertical, a resistência ao rolamento diminui quando a pressão do pneu é aumentada, conforme mostrado na Figura 3.4. De um modo geral, em pneus rodoviários, o coeficiente de atrito de rolamento é pequeno ($\mu_R < 0,1$) (Wong, 2001).

¹ O conceito de macrotextura é explicado no Capítulo 5

A: 110 kPa (16 psi); B: 165 kPa (24 psi); C: 220 kPa (32 psi)
 D: 276 kPa (40 psi); E: 331 kPa (48 psi); F: 370 kPa (55 psi)

Figura 3.4 - Variação da resistência ao rolamento de pneus diagonal e radial, em função da carga e da pressão de enchimento (Society of Automotive Engineers, apud Wong, 2001).

Em superfícies com baixa capacidade de suporte (como por exemplo areias), altas pressões de enchimento resultam em uma penetração maior do pneu no solo e, em consequência, em maiores resistências ao rolamento (Wong, 2001).

A resistência ao rolamento também é afetada pela velocidade de deslocamento, em razão do aumento da energia dissipada por deformação e do aumento das vibrações na estrutura do pneu.

Um outro fenômeno responsável por altas perdas de energia e, em consequência, pelo incremento da resistência ao rolamento, é conhecido por *onda estacionária*. Para um pneu operando em uma determinada condição (velocidade, carga e pressão de enchimento), existe uma velocidade, chamada de *velocidade limite*, acima da qual se observa o fenômeno conhecido por *onda estacionária*.

A força centrífuga que atua na banda de rodagem de um pneu é resultado da combinação dos efeitos da carga e da velocidade. Cargas pesadas e velocidades altas resultam em forças centrífugas de alta intensidade atuando nos pneus das aeronaves.

A Figura 3.5 a seguir representa um pneu girando no sentido anti-horário. A distância CX representa a metade da extensão longitudinal da área de contato. A distância BC

(ou XZ) representa a deflexão do pneu devido ao carregamento. No mesmo tempo em que um ponto da banda de rodagem se desloca longitudinalmente de C até X, esse mesmo ponto deve se deslocar radialmente de Z até X.

Quando a banda de rodagem sai da área de contato com o pavimento, a tendência é voltar à sua forma normal sem o efeito da deflexão. Devido à inércia, traduzida pela força centrífuga, a banda de rodagem não assume imediatamente sua posição periférica normal (representada pela linha tracejada no desenho), mas ultrapassa essa posição causando uma distorção na forma natural do pneu. Isso causa uma onda de tração na banda de rodagem denominada onda estacionária (Goodyear Aviation, 2004).

Figura 3.5 - Desenho esquemático do efeito da onda estacionária (Goodyear Aviation, 2004)

A maior amplitude da onda de tração ocorre na saída do contato com o pavimento e vai se atenuando exponencialmente ao longo da circunferência do pneu.

Os seguintes parâmetros ajudam a explicar a magnitude das forças que agem em um pneu rodando em alta velocidade. Tome-se por exemplo um pneu operando nas seguintes condições: Velocidade de 400 km/h; 4.200 rpm e deflexão de aproximadamente 4,8 cm. Nessas condições um ponto na banda de rodagem leva apenas a fração de 1/800 de segundo para percorrer metade da extensão longitudinal da área de contato. Nesse mesmo intervalo de tempo esse ponto se desloca radialmente para fora aproximadamente 4,8 cm. Isto resulta em uma aceleração

radial média da ordem de pouco mais de 61.000 m/s^2 , ou seja, da ordem de 6.000 vezes a aceleração da gravidade (6.000 g).

A Figura 3.6 a seguir é a foto de um pneu aeronáutico em banco de ensaio. Pode-se notar claramente a onda estacionária na parte inferior direita da roda.

Conforme pode ser observado na Figura 3.7 a deflexão (como consequência da pressão de enchimento do pneu) tem influência direta na intensidade da onda estacionária. Nota-se, no canto esquerdo da saída da área de contato, que a deformação na banda de rodagem do pneu aumenta à medida que a pressão de enchimento diminui.

Uma das principais tarefas do projeto de um pneu aeronáutico é a de minimizar o efeito da onda estacionária para as cargas e velocidades de operação especificadas.

Figura 3.6 - Pneu aeronáutico a 250 mi/h, 4.200 rpm, deflexão de 4,8 cm (Goodyear, 2004)

Figura 3.7 - Pneu aeronáutico 40 x 14 a 225 mph (362 km/h); (Goodyear, 2004)

3.2 Deslizamento

Se a velocidade periférica do pneu, em razão da frenagem da roda, for inferior à velocidade horizontal do eixo, a banda de rodagem se deformará horizontalmente na área de contato e em suas vizinhanças mais próximas, em sentido contrário ao do deslocamento da roda.

Em decorrência desse fato, em uma região mais interna da banda de rodagem, mas ainda muito próxima à área de contato, a velocidade angular da roda é diminuída da velocidade decorrente da deformação. Os pontos que saem da área de contato, ao retornarem à posição original, têm a velocidade periférica aumentada da velocidade de deformação, criando um ciclo que se repete a cada rotação do pneu.

Considerando que os pontos aumentam de velocidade somente após deixarem a área de contato, esse aumento de velocidade não afeta a velocidade angular da roda. Em consequência, em cada volta, a roda gira um pouco menos do que giraria se estivesse completamente livre. Essa diferença é proporcional à deformação da banda de rodagem.

Esse fenômeno pode ocorrer sem que haja o deslocamento relativo entre as superfícies da banda de rodagem e do pavimento. Neste caso se verifica apenas o *deslizamento aparente*, como consequência da deformação da banda de rodagem. A Figura 3.8 a seguir ilustra o fenômeno.

Figura 3.8 - Esquema de forças de um pneu freado

Por outro lado quando essa deformação alcança um certo limite, começará a ocorrer deslizamento real na área de contato.

Para definir o deslocamento relativo entre a banda de rodagem e a pista, usa-se o conceito de taxa de deslizamento (S), que é por definição:

$$S = 1 - \frac{\omega_R}{\omega} \quad (3-5)$$

onde:

ω_R = velocidade angular da roda freada;

ω = velocidade angular da roda livre.

Sendo:

$$V_R = \omega_R \cdot r \quad (3-6)$$

$$V = \omega \cdot r \quad (3-7)$$

é possível escrever:

$$S = 1 - \frac{V_R}{V} = \frac{\Delta V}{V} \quad (3-8)$$

onde:

V_R = velocidade periférica do pneu freado;

V = velocidade periférica do pneu girando livremente;

$\Delta V = V - V_R$ = diferença de velocidade periférica;

$S = 0$ é equivalente a uma roda girando teoricamente livre;

$S = 1$ é equivalente a uma roda deslocando-se totalmente bloqueada (sem rotação), também chamado de deslizamento puro.

Se a diferença de velocidade periférica ΔV for decomposta em:

$$\Delta V = \Delta V_D + \Delta V_S \quad (3-9)$$

onde:

ΔV_D = diferença de velocidade periférica devido à deformação;

ΔV_S = diferença de velocidade periférica devido ao deslizamento efetivo ou deslizamento real.

E, portanto, pode-se introduzir as seguintes definições para a taxa de deslizamento:

$$S = S_D + S_S \quad (3-10)$$

onde:

S_D = taxa de deslizamento devido à deformação horizontal da banda de rodagem;

S_S = taxa de deslizamento efetivo ou taxa de deslizamento real.

A Figura 3.9 a seguir ilustra o comportamento e a contribuição dos deslizamentos aparente e efetivo em função do deslizamento medido.

Figura 3.9- Contribuição do deslizamento devido à deformação da banda de rodagem e do deslizamento real no deslizamento medido (Adaptado de Fristed, K.; Norrbom, B., 1980)

A partir do momento em que se inicia o movimento relativo entre as superfícies (mesmo que apenas em uma parte da área de contato), a relação entre o coeficiente de atrito e o deslizamento passa a ser não linear. Isso corresponde ao trecho *AB* da curva na Figura 3.10.

Dados experimentais mostram que o máximo coeficiente de atrito de deslizamento ocorre para uma taxa de deslizamento de 15 a 20%. Qualquer aumento, acima do valor correspondente ao de máximo atrito resulta em uma condição instável e o coeficiente de atrito decresce até o valor chamado de *Coeficiente de Atrito de Deslizamento Puro* – μ_D (coeficiente de atrito para 100% de deslizamento). A condição de 100% de deslizamento é também chamada de *roda travada* e corresponde à situação de derrapagem.

Segundo *Andersen e Wambold, 1999*, o atrito resultante do deslizamento real deve ser entendido como aquele que se produz em razão do movimento relativo entre a banda de rodagem do pneu e a pista. Este tipo de atrito é consequência de três fenômenos:

- (1) da adesão entre as duas superfícies na área de contato;
- (2) da histerese da banda de rodagem do pneu, entendendo-se esta como a perda de energia cinética (sob a forma de calor), devido às deformações da banda de rodagem; e
- (3) da perda de energia decorrente do desgaste da banda de rodagem, onde ocorre o "arrancamento" de partículas do pneu na superfície de contato com o pavimento.

O atrito por deslizamento real pode ser escrito como:

$$F_D = F_a + F_h + F_w \quad (3-11)$$

onde:

F_a = força de atrito devida à adesão;

F_h = força de atrito devida à histerese;

F_w = força de atrito devida ao desgaste.

e o coeficiente de atrito por deslizamento como:

$$\mu_D = \frac{F_D}{N} = \frac{F_a}{N} + \frac{F_h}{N} + \frac{F_w}{N} \quad (3-12)$$

onde:

μ_D = *coeficiente de atrito de deslizamento real*;

ou

$$\mu_D = \mu_a + \mu_h + \mu_w \quad (3-13)$$

μ_a = *coeficiente de atrito devido à adesão*;

μ_h = *coeficiente de atrito devido à histerese*; e

μ_w = *Coeficiente de atrito devido ao desgaste*.

A textura da superfície (definida no Capítulo 5), a temperatura e a velocidade de deslocamento influenciam os três mecanismos.

No que diz respeito à textura:

- (1) a força de atrito devida à adesão é proporcional à área de contato real entre o pneu e as asperezas da superfície do pavimento;
- (2) a força de atrito devido à histerese é gerada nas deflexões da banda de rodagem com seu comportamento visco-elástico e é função da velocidade;
- (3) a força de atrito devido ao desgaste é proporcional à área de contato na banda de rodagem.

De forma genérica, a adesão é relacionada à microtextura², enquanto a histerese está relacionada à macrotextura do pavimento (*Andersen e Wambold, 1999*).

A Figura 3.11 apresenta esquematicamente os mecanismos de atrito referentes à adesão, à histerese e ao desgaste.

² O conceito de microtextura é explicado no Capítulo 5

A Figura 3.12 mostra a participação típica de cada tipo de atrito, no esforço de frenagem, para três diferentes tipos de superfícies de pavimento, interagindo com o mesmo pneu.

Figura 3.11 - Componentes do atrito no deslizamento de um pneu sobre um pavimento (Adaptado de Haney, 2004)

Figura 3.12 Participação da adesão, histerese e desgaste no atrito de deslizamento (Adaptado de Andersen, 1999)

Observa-se que em uma superfície rígida, limpa e seca, a participação do desgaste é relativamente pequena se comparada às participações da histerese e da adesão. Em um pavimento molhado, a participação da adesão é substancialmente reduzida, o desgaste é ainda menor e a histerese passa a responder quase que integralmente pelo

atrito de deslizamento. Isso ocorre devido à presença de um terceiro elemento entre pneu e pavimento, reduzindo as forças de adesão e lubrificando o contato, portanto diminuindo o desgaste. Em uma superfície não pavimentada a maior participação é do desgaste – neste caso, o maior desgaste certamente ocorrerá no solo e não no pneu.

3.3.1 Atrito Devido à Adesão

A Figura 3.13 mostra 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, cuja magnitude depende do tempo de contato e, portanto, da velocidade de deslizamento. O valor da componente horizontal resultante dessas forças depende, principalmente, da interpenetração das superfícies, da dimensão da superfície de contato e da velocidade de deslizamento. A composição da borracha, a temperatura e a textura das superfícies também exercem influência, embora em menor grau.

Figura 3.13 - Variação do coeficiente de atrito e seus componentes com a velocidade de deslizamento de um bloco de borracha sobre uma superfície seca (Fristedt, K e Norrbom, B³, apud Silva, 1981)

³ Fristedt, K. e Norrbom, B.; Studies of contaminated runways, Estocolmo, 1980

Pode-se observar na Figura 3.13 que as perdas de energia cinética por adesão crescem com a velocidade de deslizamento até atingirem um máximo e, então, decrescem. O valor da velocidade de deslizamento que ocasiona a máxima perda de energia cinética por adesão, é muito pequeno, cerca de 5 cm/s (0,18 km/h ou 0,11 mi/h), e aumenta com a temperatura. Somando-se essa velocidade (0,18 km/h) ao efeito de deformação longitudinal da banda de rodagem, obtém-se uma taxa de deslizamento entre 15% e 20%. para o máximo atrito ($\mu_{máx}$).

A adesão diz respeito, apenas, às superfícies em contato (banda de rodagem e pavimento) e diminui rapidamente, se as superfícies forem levemente separadas por um contaminante, podendo cessar totalmente, se a separação exceder a frações de um micron. Para um determinado pavimento (ou seja, para uma textura) e, fixada uma velocidade de deslizamento, as perdas de energia cinética por adesão dependem, unicamente, do número de ligações moleculares simultâneas, ou seja, apenas das dimensões da área de contato, e independem da força normal entre as superfícies.

Isso contradiz a teoria clássica do atrito para corpos rígidos. Apesar disso, para pneus infláveis, é possível usar a expressão clássica:

$$F = \mu \cdot N \quad (3-14)$$

onde:

F = Força de atrito;

μ = Coeficiente de atrito;

e as razões podem ser explicadas da seguinte forma:

- (1) se a pressão do pneu for constante e a carga vertical variar, a área de contato será proporcional à carga. As perdas por adesão serão, conseqüentemente, proporcionais à carga;
- (2) se a carga que atua sobre um pneu for constante e a pressão do pneu variar⁴, o tamanho da área de contato será inversamente proporcional à pressão..

⁴ As variações de pressão aqui consideradas são abaixo de 10%, que ocorrem normalmente nos pneus das aeronaves devido às variações de temperatura e pequenos vazamentos considerados normais.

Experimentalmente, porém, sabe-se que as perdas por adesão não variam de forma inversamente proporcional à pressão do pneu. Isto ocorre porque somente em uma parte da interface aparente há real contato entre as superfícies. Devido à elasticidade da borracha, a área de contato real aumenta proporcionalmente com a pressão dos pneus, compensando, assim, a variação aparente da área de contato. As perdas por adesão, portanto, permanecem praticamente constantes. A Figura 3.14 ilustra o fenômeno.

Figura 3.14 - Influência da pressão de enchimento na área de contato real entre pneu e pavimento

As perdas por adesão também são influenciadas pela composição da borracha. Na temperatura ambiente, a borracha natural produz menos perdas do que a borracha sintética. O contrário é verdadeiro, quando a temperatura está abaixo de 0°C .

As perdas por adesão são intimamente relacionadas com a microtextura do pavimento, sendo consideradas micro-características do atrito (Andresen, 1999).

3.3.2 *Atrito Devido à Histerese*

As perdas por histerese são consequência da deformação que ocorre na borracha do pneu, quando a banda de rodagem desliza sobre as irregularidades da pista. A força horizontal resultante é também, uma consequência da propriedade visco-elástica da borracha. A componente do coeficiente de atrito devido à histerese, aumenta com a velocidade de deslizamento, sendo o seu valor máximo ocorre para maiores velocidades quando a temperatura aumenta. O valor máximo, entretanto, ocorre a uma velocidade de deslizamento tão alta que não é possível, na prática, tirar vantagem disto.

O processo que produz as perdas por histerese ocorre em toda a banda de rodagem e é afetado pela textura superficial da pista. Este processo envolve um volume maior da banda de rodagem, se comparado com o processo que produz as perdas por adesão. Fica evidente, portanto, que se a pista não possui macrotextura, é impossível produzir perdas por histerese no deslizamento. As perdas por histerese não são influenciadas quando as superfícies de contato são levemente separadas por um contaminante.

Ainda nesse caso é possível utilizar a expressão da teoria clássica do atrito ($F = \mu.N$) porque:

- (1) As perdas por histerese são proporcionais à carga vertical, quando a pressão dos pneus é constante e a carga varia. Ao aumentar-se a carga, aumenta a deflexão do pneu e a área de contato e, conseqüentemente, aumenta o número de deformações induzidas pela textura do pavimento e crescem as perdas por histerese.
- (2) A superfície de contato do volume ativo da banda de rodagem é inversamente proporcional à pressão do pneu, quando a carga vertical é mantida constante e a pressão varia. Entretanto, ocorre que somente em uma parte da interface aparente há real contato entre as superfícies. Devido à elasticidade da borracha, a área de contato real aumenta proporcionalmente com a pressão dos pneus, compensando, assim, a variação aparente daquela. Outro fator de compensação é o aumento da intensidade das deformações induzidas na banda de rodagem, elevando o volume ativo de perdas por histerese.

Portanto, os efeitos se combinam e ocorre uma compensação. A Figura 3.14 ilustra o fenômeno.

As perdas por histerese são intimamente relacionadas com a macrotextura do pavimento, sendo consideradas macro-características do atrito (Andresen, 1999).

3.4 Comportamento dos Pneus na Esterção

Quando um pneu se desloca sem que esteja sujeito a forças perpendiculares ao plano da roda, sua trajetória será retilínea ao longo desse plano. Entretanto, se uma força transversal à direção do movimento é aplicada à roda, uma outra força lateral se desenvolve no sentido inverso, na área de contato, e o pneu desloca-se ao longo de uma nova trajetória (A), que forma um ângulo α com o plano da roda, conforme mostrado na Figura 3.15. O ângulo α é usualmente denominado *ângulo de deslizamento lateral* e o fenômeno do deslizamento lateral ocorre, principalmente, em função da elasticidade lateral do pneu.

A força lateral que se desenvolve na área de contato é denominada *força de esterção*. A relação entre a *força de esterção* e o *ângulo de deslizamento* é de importância fundamental ao controle direcional e estabilidade dos veículos rodoviários.

Quando um pneu se desloca a uma velocidade uniforme na direção OA (vide Figura 3.15), verifica-se que a força lateral F_s , aplicada ao centro da roda, e a força F_{ya} , que se desenvolve na área de contato (no plano do pavimento), não são colineares. Para pequenos *ângulos de deslizamento*, a *força de esterção* no plano do pavimento, normalmente, se localiza atrás da força lateral e produz um momento que tende a alinhar o plano da roda à direção do movimento. Esse momento é chamado de *momento de alinhamento* ou *torque de auto-alinhamento* e é uma das causas principais do retorno da roda à sua posição original após a realização de uma curva. A distância t_p entre a força lateral e a *força de esterção* é chamada de *trilha pneumática* e o produto da *força de esterção* pela trilha pneumática determina o momento de auto-alinhamento da roda.

Figura 3.15 - Comportamento de um pneu submetido a uma força lateral atuando no eixo da roda (Clark, 1971)

A Figura 3.16 apresenta o comportamento típico da força lateral em função do ângulo de deslizamento, em pneus diagonais e radiais de veículos de passeio.

Figura 3.16 - Características de pneus diagonais e radiais na esterção (Clark, 1971)

Pode-se observar que, para ângulos de deslizamento até 4° , a *força de esterção* é aproximadamente proporcional ao *ângulo de deslizamento*. Acima desse valor a *força de esterção* aumenta a uma razão de crescimento menor e atinge um valor máximo, quando os pneus iniciam o escorregamento lateral. Este é o tipo de atrito medido pelo equipamento MuMeter⁵.

3.5 Área de Contato entre Pneu e Pavimento

A forma e o tamanho da área de contato entre pneu e pavimento são afetados por diversos fatores (Clark, 1981):

- tipo de pneu (radial ou diagonal),
- pressão de enchimento,
- carga de roda,
- desenho da banda de rodagem,
- velocidade do veículo,
- esterção da roda, e
- textura do pavimento.

De Beer e Fisher (1997) obtiveram impressões da área de contato com o pavimento para pneus radiais e diagonais, com diferentes cargas e diferentes pressões de enchimento. O exame das impressões dos pneus indica que:

- Para os pneus diagonais a área de contato pode ser representada por um retângulo com os lados menores arredondados. A largura e o comprimento são variáveis e aumentam com a carga e diminuem com a pressão de enchimento.
- Nos pneus radiais a área de contato pode ser simulada por um retângulo com largura quase constante e praticamente igual à largura da banda de rodagem. O comprimento aumenta com a carga e diminui com a pressão.

⁵ MuMeter: equipamento de medição de atrito dinâmico, descrito no Capítulo 8

A Figura 3.17 mostra a impressão de um pneu radial e de um diagonal.

Figura 3.17 - Impressões de um pneu radial e de um pneu diagonal com carga por roda de 9.200 lb (4.170 kg) e pressão de enchimento de 104 lb/pol² (717 kPa); (De Beer e Fisher, 1997)

3.6 Tensões Desenvolvidas na Área de Contato Pneu-Pavimento

Diversos pesquisadores estudaram as tensões desenvolvidas na área de contato pneu-pavimento nos últimos 60 anos, resultando em diversos trabalhos: - Markwick e Starks (1940), Clark (1981), Lippmann (1985), Markshek *et al.* (1986), Teilking e Roberts (1987), Schapery e Teilking (1987), Teilking e Abraham (1994), De Beer *et al.* (1997), Himeno *et al.* (1997), Siegfried, (1998), Roque *et al.* (2000).

Os resultados dos estudos conduzidos por De Beer *et al.*, 1997 e Siegfried (1998) indicaram que tensões de contato na superfície pneu-pavimento são afetadas por vários fatores, dentre os quais incluem-se:

- tipo e estrutura do pneu;
- carga de roda e pressão de enchimento;
- se a roda encontra-se parada ou em movimento e, no caso de movimento, a velocidade de deslocamento também é fator de influência.

Conforme já mencionado anteriormente, uma das funções do pneu é transmitir carga do veículo ao pavimento. Essa carga pode ser transferida pelas paredes (flancos) do

pneu e pelo ar sob efeito meio da pressão de enchimento, atuando sobre a banda de rodagem, conforme mostrado na Figura 3.18.

Figura 3.18 Esquema de transmissão de carga pelas paredes e pelo efeito do ar sob pressão

No pneu diagonal a parcela de carga transferida pelas paredes é maior do que em um pneu radial. Essa diferença no mecanismo de transferência de carga afeta a distribuição de tensões.

Myers *et al.* (1999) concluíram que a rigidez dos flancos, combinada com a relativa flexibilidade da banda de rodagem dos pneus diagonais, faz com que as raias da banda de rodagem sejam "empurradas" em direção ao centro da área de contato, induzindo tensões de cisalhamento na superfície do pavimento. A indústria de pneus chama este fenômeno de *efeito pneumático*.

Em um pneu parado o atrito desenvolvido entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento gera forças tangenciais, dirigidas de fora para dentro, em direção ao centro da área de contato entre pneu e pavimento, conforme mostrado na Figura 3.19.

Figura 3.19 - Tensões desenvolvidas na área de contato entre pneu e pavimento para uma roda parada

Para um pneu diagonal em movimento, na situação de "roda livre" (sem as ações de frenagem ou de aceleração), tensões longitudinais se desenvolvem na área de contato, conforme mostrado na Figura 3.20.

Figura 3.20 - Tensões desenvolvidas na área de contato entre pneu e pavimento no rolamento de uma roda livre

Nos pneus radiais o *efeito pneumático* é muito menor do que o verificado nos pneus diagonais. Isso ocorre devido à rigidez da estrutura da banda de rodagem e à relativa flexibilidade dos flancos dos pneus radiais.

Em um pneu radial carregado as raia localizadas na parte central da área de contato pneu-pavimento expandem-se horizontalmente, induzindo uma tensão de cisalhamento em direção à periferia da área de contato entre a raia e o pavimento. Myers *et al.* (1999) chamaram a esse fenômeno de *efeito Poisson* da banda de rodagem. Uma ilustração esquemática desse fenômeno pode ser observada na Figura 3.21.

Figura 3.21 - Detalhe das tensões induzidas na superfície de um pavimento na área de contato pneu-pavimento causada por um pneu radial carregado

O efeito Poisson ocorre com mais intensidade nos pneus radiais devido à rigidez da estrutura da banda de rodagem. Isso vem ao encontro das descobertas de Markwick e Starks (1940). Eles relataram que a dureza das raias da banda de rodagem possui influência significativa no atrito entre pneu e pavimento e, conseqüentemente, nas tensões de cisalhamento que se desenvolvem na superfície do pavimento. Raias mais rígidas produzem tensões mais intensas. É também importante notar o efeito desse comportamento nas tensões e deformações geradas no pavimento.

O *efeito pneumático* causa tensões radiais de compressão na superfície do pavimento, em direção ao centro da área de contato pneu-pavimento. Em oposição, o *efeito Poisson* tende a tracionar a superfície do pavimento, localizadamente, no contato raia-pavimento. A combinação desses efeitos, contrários uns aos outros, submete a superfície do pavimento a altas tensões na área de contato pneu-pavimento.

Groenendijk (1998) investigou as tensões desenvolvidas na área de contato em pneus radiais novos, usados - mas ainda com ranhuras e pneus desgastados - pneus lisos, sem ranhuras, devido ao desgaste. Suas conclusões referentes aos pneus radiais novos corroboram com as conclusões de Meyers *et al.* (1999).

Para os pneus radiais desgastados sem ranhuras Groenendijk relatou que a máxima tensão de cisalhamento induzida ocorria nas bordas da área de contato e em direção ao centro.

Roque *et al.* (2000) utilizaram elementos finitos para modelar a estrutura de um pneu radial e analisar as tensões na área de contato, tendo concluído que as tensões calculadas eram similares às tensões medidas em escala real, por meio de sensores, e que as tensões de cisalhamento são maiores nas raia externas, próximas à periferia da área de contato.

Markwick e Starks (1940) mediram as tensões de contato em pneus parados e em rolamento. Eles concluíram que a tensão vertical máxima é aproximadamente 1,5 vezes a pressão de enchimento do pneu. Esse comportamento foi atribuído à rigidez da carcaça e às ranhuras que reduzem a área efetiva de contato, resultando em aumento das tensões verticais em relação à pressão de enchimento.

De Beer *et al.* (1997) chegaram a resultados similares medindo as tensões de contato em um pneu liso, deslocando-se lentamente, usando o equipamento denominado *Vehicle Road Surface Pressure Transducer Array* – *VRSP*TA (Figura 3.22).

Figura 3.22 - Dispositivo *Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array* - VRSP TA

4 FORÇAS RESULTANTES DA INTERAÇÃO ENTRE PNEU E PISTA MOLHADA

O desempenho dos pneus em uma pista molhada depende dos seguintes fatores:

- pressão de enchimento dos pneus;
- textura¹ 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;
- aspecto da área de contato²; e
- ação no eixo da roda (roda livre, roda freada, roda em tração ou ainda roda em curva).

A Figura 4.1 mostra a envoltória do comportamento do atrito em função da velocidade de deslocamento, na presença de água sobre a superfície do pavimento. Nota-se que a partir da velocidade de hidroplanagem (V_h) o atrito praticamente é nulo.

Para se atingir um desempenho aceitável em superfícies molhadas, assegurando-se o contato efetivo entre pneu e pavimento, é necessário, tanto quanto possível, que a água seja removida da área de contato.

Na literatura entende-se como *fluido contaminante* a água, o gelo fundente e a neve fundente. Considerando as condições climáticas predominantes em nosso país, o *fluido contaminante*, citado diversas vezes neste trabalho, será apenas a água.

¹ Textura é definida no Capítulo 5

² O *aspecto da área de contato (AAC)* é definido no item 4.3.4

Figura 4.1 – Envelope do comportamento do atrito em função da velocidade em pista molhada
(Adaptado de Comfort, 2001)

4.1 Resistência Hidrodinâmica

Quando uma roda se desloca ao longo de uma pista molhada, girando livremente, sem deslizamento, grande parte dessa água é deslocada para frente e para os lados. Isto causa o aparecimento de uma força de arrasto, de intensidade equivalente ao impulso que a roda transmite à água, na direção contrária ao deslocamento.

Desta forma, o coeficiente de resistência hidrodinâmica (μ_d) pode ser definido como:

$$\mu_d = \frac{F_d}{N} \quad (4-1)$$

onde:

F_d = Força de arrasto hidrodinâmico;

N = Força normal.

Os gráficos apresentados na Figura 4.2 mostram a variação do arrasto hidrodinâmico em função da velocidade. O valor máximo atingido pela força de arrasto hidrodinâmico corresponde à indicação da ocorrência da hidroplanagem dinâmica. O decréscimo do arrasto com a velocidade, após atingir seu máximo, reflete a mudança do fluxo da água, quando a roda começa a hidroplanar. A água passa a fluir entre as superfícies do pneu e do pavimento, diminuindo a resistência ao movimento, pois a roda passa a "empurrar" uma quantidade menor de fluido para frente e para os lados

– uma parte da água que até a ocorrência da hidroplanagem era deslocada, começa a fluir livremente sob a banda de rodagem, deixando de haver contato entre o pneu e o pavimento. O fenômeno será mais bem explicado no item 4.3 adiante.

Figura 4.2 (a) e (b) - Efeito da velocidade sobre a força de arrasto hidrodinâmico em um trem de pouso duplo-tandem, com 22.300 lb (10.000 kg) de carga e uma lâmina d'água de 1 pol (2,5 cm) (Adaptado de Horne e Dreher, 1963)

Caso a cortina de água deslocada pela roda se choque com a estrutura do avião, haverá um arrasto adicional que pode ser 1 ou 2 vezes superior à força de arrasto hidrodinâmico.

A importância do arrasto hidrodinâmico pode ser mais bem avaliada, tendo-se presente que o empuxo dos motores das aeronaves diminui com o aumento da velocidade e que o arrasto hidrodinâmico aumenta proporcionalmente ao quadrado da velocidade. Pode haver uma situação em que a resistência ao avanço se iguale ao empuxo. O avião que atinge essas condições com velocidade inferior à de decolagem não consegue decolar.

4.2 Atrito Pneu-Pavimento em Pista Molhada

O atrito disponível em uma pista molhada é consideravelmente inferior àquele encontrado quando a pista está seca. Isso decorre do fato de não se poder expulsar completamente a água que se encontra entre o pneu e a superfície da pista.

A fina película da água que permanece na área de contato reduz substancialmente a componente principal do atrito, a adesão. Embora a componente devida à histerese seja pouco influenciada pela presença da água, normalmente, o atrito nestas condições é reduzido.

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

Na medida em que a velocidade aumenta, o tempo de contato da banda de rodagem com o pavimento se reduz, diminuindo, também, o tempo disponível para que o processo de expulsão da água se complete. Por esse motivo o atrito em pistas molhadas diminui com a velocidade e é proporcional à área da zona de contato onde há o ocorre efetivamente o contato direto entre pneu e pavimento (parte da área de contato em que foi possível a completa expulsão da água). Mesmo que esse contato direto entre pneu e pavimento ocorra em áreas muito pequenas (asperezas do agregado), o atrito disponível é proporcional à somatória dessas pequenas áreas.

Esse fato é mostrado na Figura 4.3, onde são comparados os resultados dos atritos medidos em uma mesma pista, em condição seca e molhada, em função da velocidade, mantidas todas as demais condições do veículo de teste.

Figura 4.3 - Efeito da pista molhada e da pista seca sobre o coeficiente de atrito μ para a aeronave 880 Jet, em pista de concreto, sistema anti-skid ativado, $p=150$ psi (1034 kPa), pneus ranhurados (Horne, 1963)

4.3 Hidroplanagem – Aspectos Gerais

A hidroplanagem 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 que se interpõe entre o pneu e o pavimento.

Nessas condições a força de atrito é praticamente nula e insuficiente para manter a roda girando. Em consequência, a rotação da roda cessa gradualmente até parar e a ação das rodas no controle direcional e na frenagem da aeronave torna-se completamente ineficaz.

Um aspecto importante a ressaltar-se é que 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 (ICAO, 1994).

Os fatores importantes que têm influência no fenômeno da hidroplanagem podem ser agrupados em quatro tópicos principais:

- (1) pneu,
- (2) fluido contaminante (água);
- (3) pavimento; e
- (4) aeronave.

Os três primeiros 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 decolagem. Esses quatro tópicos são abordados a seguir.

4.3.1 O Pavimento

A declividade transversal de uma pista não tem influência direta sobre o fenômeno da hidroplanagem, mas, de fato, ela favorece ou dificulta a ocorrência do fenômeno, uma vez que, influi diretamente sobre as condições de drenagem da superfície do pavimento e, como consequência, determina a profundidade da lâmina d'água durante as chuvas de maior intensidade.

Há evidências de que, quanto mais aberta a macrotextura de um pavimento, maior será a profundidade média da lâmina d'água necessária para provocar a hidroplanagem. Por exemplo, os picos e vales existentes na superfície de um pavimento com macrotextura aberta fornecem caminhos de escape para a água contida na área de contato e, assim, retardam o aumento da pressão hidrodinâmica necessária à ocorrência de hidroplanagem.

A profundidade mínima de água necessária para que ocorra a hidroplanagem é substancialmente maior em uma pista com ranhuras transversais (*grooving*) (Horne e Dreher, 1963). A Figura 4.4 ilustra esse fenômeno.

Figura 4.4 - Afastamento do pneu (em hidroplanagem) em relação à superfície da pista *versus* a profundidade da lâmina d'água na pista. Caça British Meteor, velocidade 87 nós (161 km/h), pressão de pneu 60 lib/pol² (413 kPa) e $V/V_h = 1,25$ (Adaptado de Gray, W. E., 1963³, apud Horne, 1963).

As irregularidades⁴, quando existentes, resultam na formação de poças na superfície do pavimento durante os períodos de chuva. Em sua grande maioria, essas poças apresentam dimensões que atingem apenas um dos trens de pouso da aeronave que se desloca na pista. Assim, é grande a probabilidade de que se produzam momentos de guinada como resultado da frenagem diferencial em trens de pouso diferentes, ou quando algumas rodas entram em hidroplanagem e outras não. Por essa razão as irregularidades devem ser corrigidas, principalmente, quando se evidencia a formação de poças durante as chuvas.

4.3.2 O Fluido Contaminante

Para que ocorra a hidroplanagem é essencial a presença do chamado *fluido contaminante* (água) na área de contato entre o pneu e o pavimento. A viscosidade e a massa específica são as duas características básicas de um fluido, que afetam o

³ Gray, W. E., Aquaplaning on runways, Jour. RAS (Tech. notes), vol. 67, No. 629, May, 1963.

⁴ Irregularidade (*roughness*) é definida no Capítulo 5

desempenho do atrito entre pneu e pavimento e influem no potencial de ocorrência de hidroplanagem. Por viscosidade entende-se a resistência do fluido ao cisalhamento interno.

O tempo que a banda de rodagem leva para penetrar no filme de fluido existente na superfície do pavimento está relacionado com a viscosidade do fluido. Quanto maior a viscosidade, maior o tempo gasto para penetrar o filme, pois maior é a resistência que o fluido impõe ao escoamento.

A massa específica do fluido é uma medida da inércia que o pneu tem que vencer para atingir o pavimento. À medida que o pneu se movimenta através camada de fluido, ele altera a quantidade de movimento deste, o que resulta em uma força de reação atuando na superfície da banda de rodagem do pneu. Essa força, chamada de pressão hidrodinâmica, pode ser estimada a partir da seguinte expressão (Horn e Dreher, 1963):

$$P_F = 0,5 \cdot c_L \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (4-2)$$

onde:

P_F = pressão hidrodinâmica atuando no pneu causada pelo fluido contaminante;

V = velocidade de deslocamento do veículo;

ρ = massa específica do fluido;

c_L = coeficiente de sustentação hidrodinâmica;

A = área de contato pneu-fluido no plano vertical.

No caso dos pneus rodando sobre uma pista contaminada com água a expressão pode ser aproximada por:

$$P_F \cong 0,5 \cdot V^2 \quad (4-3)$$

onde:

P_F = pressão atuando no pneu, causada pelo fluido contaminante, em kPa;

V = velocidade de deslocamento do veículo, em m/s.

Ou seja, a uma velocidade de 22,3 m/s, o fluido exercerá uma pressão de 249 kPa no pneu. Assim, pode-se perceber que, mesmo para uma velocidade relativamente baixa, a pressão do fluido é suficiente para promover a deformação da banda de rodagem do pneu para trás (força de arrasto F_d) e para cima (força de ascensão F_l), permitindo a penetração de um filme delgado de contaminante (água) na área de contato.

Figura 4.5 - Esquema da ação do arrasto hidrodinâmico

A profundidade da lâmina de fluido ao longo da trajetória do pneu é também um fator muito importante na determinação do **potencial de hidroplanagem** para uma determinada combinação pneu-pavimento. Quanto maior a profundidade do fluido, maior as forças inerciais que vão agir no pneu: - arrasto F_d e ascensão F_l . Em consequência, maior será a probabilidade de seja excedida a capacidade de drenagem das ranhuras da banda de rodagem do pneu, combinadas com a macrotextura⁵ do pavimento. Dessa forma, a profundidade da lâmina d'água sobre o pavimento tem relação direta com a probabilidade de ocorrência da hidroplanagem.

Entretanto, **a profundidade do fluido não influi na velocidade de início de hidroplanagem**. A hidroplanagem ocorre a partir de uma profundidade mínima de fluido, chamada de *profundidade crítica*. Caso a profundidade do fluido seja menor

⁵ Macrotextura é definida no Capítulo 5

do que a *profundidade crítica* não ocorrerá a hidroplanagem, independentemente da velocidade de deslocamento do veículo. A partir da profundidade crítica, caso o veículo atinja a velocidade de hidroplanagem (que é associada à pressão do pneu), aí então ocorrerá a hidroplanagem (Horne 1963).

A Figura 4.6 a mostra que a velocidade de início de hidroplanagem independe da profundidade do fluido contaminante. Uma mesma roda é deslocada sobre uma pista de testes, com diferentes profundidades de água sobre sua superfície, mantidas constantes a carga de roda e a pressão do pneu. Nos três casos o arrasto hidrodinâmico cresce com a velocidade até um valor máximo, onde se identifica o início da hidroplanagem. A velocidade correspondente a esse valor máximo é a *velocidade de hidroplanagem*. Embora o arrasto hidrodinâmico (força) cresça com a profundidade da água, a velocidade de início de hidroplanagem é praticamente a mesma para os três casos.

Figura 4.6 - Arrasto hidrodinâmico em função da velocidade, para diferentes profundidades do fluido contaminante; pneu pequeno na pista de teste, carga de roda = 200 lbf (441 kgf); pressão do pneu = 30 lb/pol² (207 kPa), 1 pé = 0,3048 m, (Balkwill, 2003)

4.3.3 *A Aeronave*

Nos trens de pouso com configuração em tandem ocorre o efeito de trilha, causado pela roda da frente, em benefício da roda traseira. Ou seja, a roda da frente abre o caminho através da água, diminuindo sua profundidade logo à frente da roda traseira. Aparentemente, na maior parte das situações, a profundidade da água, após a passagem da primeira roda, é insuficiente para que ocorra a hidroplanagem total da roda traseira do tandem. Dados experimentais indicam que a hidroplanagem total é retardada, ou possivelmente eliminada, nos trens de pouso com configuração em tandem (Horne, 1963).

Pode-se citar os seguintes fatores, sobre as condições operacionais da aeronave, em relação à hidroplanagem,: - (1) modo de operação (pouso ou decolagem); (2) velocidade; (3) carga de roda; e (4) condições do tráfego.

O modo de operação indica o tipo de ação que é aplicada pelo piloto: se está freando, acelerando, mudando de direção ou aplicando uma combinação dessas ações. O modo de operação está relacionado à severidade das conseqüências, caso ocorra a hidroplanagem.

A velocidade do veículo tem uma grande influência no potencial de hidroplanagem. Quanto maior a velocidade, maior será a extensão do filme de fluido que penetra na área de contato, devido aos efeitos da viscosidade e inércia do fluido. Assim, na medida em que aumenta a velocidade do veículo diminui a área de contato direto entre pneu e pavimento, reduzindo o atrito disponível e aumentando a probabilidade de hidroplanagem.

A relação entre carga, potencial de hidroplanagem e capacidade de frenagem em pista molhada é muito complexa. O aumento da carga de roda resulta no aumento do comprimento da área de contato e no incremento da pressão de contato nas raiaas externas da banda de rodagem. Em superfícies molhadas, o aumento do comprimento da área de contato leva a um aumento da velocidade na qual ocorre a hidroplanagem total. Entretanto, o mesmo aumento na carga de roda causa o estreitamento das ranhuras da banda de rodagem, pela ação do efeito pneumático. O estreitamento das ranhuras piora a condição de drenagem da área de contato, diminuindo a velocidade de hidroplanagem. Finalmente, quanto maior a diferença na pressão de contato entre

as raiais externas e as mais internas, maior a quantidade de água canalizada para o centro da área de contato, fato que facilita a ocorrência de hidroplanagem.

Tal fato é constatado por meio da técnica das *Franjas de Moiré*, no qual utiliza-se um dispositivo composto de placa de vidro, grade, foco de luz e câmera (conforme mostrado na Figura 4.7). Com esse aparato pode-se registrar o rolamento de um pneu sobre uma placa de vidro inundada e, pela técnica de Moiré, registrar as curvas de nível da banda de rodagem deformada pelo efeito da hidroplanagem (Figura 4.8 e Figura 4.9).

Observa-se o "confinamento" do fluido no volume que se forma na região de contato, em decorrência da deformação da banda de rodagem. Deformações da ordem de 2,5 mm foram identificadas no centro do volume de confinamento (Browne, 1975).

O modelo estabelecido por meio da análise por elementos finitos também ilustra o fenômeno Figura 4.10.

Apesar dos efeitos contrários uns aos outros, descritos acima, tem-se verificado experimentalmente, em numerosas pesquisas e publicações que, o modelo proposto por Horne em 1963, no qual a velocidade de hidroplanagem é função apenas da pressão dos pneus, explica muito bem o fenômeno e mantém-se válido até hoje.

Figura 4.7 - Esquema do dispositivo da placa de vidro - Moiré (Browne, 1975)

Figura 4.8 - Foto da área de contato que mostra as franjas de Moiré, indicando a topografia da banda de rodagem de um pneu em hidroplanagem dinâmica (pneu diagonal, $V=13,4$ m/s, $p=152$ kPa, incremento/franja = $0,36$ mm). (Browne e Whicker, 1983)

Figura 4.9 - Representação esquemática das curvas de nível da banda de rodagem em hidroplanagem (Browne e Whicker, 1983)

Figura 4.10 - Modelo da área de contato estabelecido por meio de análise por elementos finitos (Williams, 1992)

4.3.4 O Pneu

A pressão de enchimento do pneu é, individualmente, o fator mais importante na determinação da velocidade de hidroplanagem. Quanto maior a pressão, maior a rigidez do pneu e maior a resistência da banda de rodagem a deformar-se sob a ação de arrasto da água. Ou seja, a banda de rodagem irá deformar-se menos ante a resistência hidrodinâmica, evitando uma penetração maior de água na área de contato. Aumentando-se a pressão de enchimento, eleva-se a pressão na área de contato e a extensão da penetração de água diminui, assim, a velocidade de início da hidroplanagem aumenta.

O *aspecto da área de contato (AAC)* de um pneu é definido como a relação entre a largura (l) e o comprimento (c) da área de contato, como mostrado na Figura 4.11

$$AAC = \frac{l}{c} \quad (4-4)$$

onde:

l = largura da área de contato (medida no cento da área de contato, na direção transversal ao deslocamento);

c = comprimento da área de contato (medido no eixo da banda de rodagem, na direção do deslocamento).

Figura 4.11 - Área de contato do pneu do trem principal (40 x 28 ply rating), tipo VII com pressão de enchimento de 965 kpa (140 lb/pol²) - aeronave de transporte a jato (Horne *et al.*, 1986)

Estudos experimentais realizados por Horne *et al.* (1986) mostraram que a velocidade de início de hidroplanagem varia com o inverso da raiz quadrada do AAC .

$$V_h \approx \frac{1}{AAC^{\frac{1}{2}}} \quad (4-5)$$

O AAC pode variar com o tipo de pneu, com a pressão de enchimento e com a carga de roda. Estudos extensivos das propriedades mecânicas de uma grande variedade de pneus mostram que, um pneu aeronáutico, nas condições de operação, apresenta pouca variação na ACC , mesmo quando submetido a uma grande variação na carga de roda e, como consequência, à uma variação na deflexão. Quando a deflexão é aumentada, crescem também a largura e o comprimento da área de contato.

Esse efeito é mostrado na Figura 4.11. Pode-se perceber que, para uma determinada pressão de enchimento, tanto o comprimento como a largura da área de contato aumentam com a carga de roda, resultando em uma variação pequena da ACC – de 0,79 para 0,64 (cerca de 19%) – contra uma considerável variação na carga de roda – de 53,9 kN para 134 kN (cerca de 148%).

Na prática pode-se considerar que a ACC de pneus aeronáuticos em condições operacionais é constante, pois as normas dos fabricantes impõem que o par *pressão x carga* deve ser sempre ajustado de modo a operar com o pneu a uma deflexão de 32% (vide Capítulo 2 – Pneus). Mantendo-se a deflexão, mantém-se o aspecto da área de contato. Conseqüentemente, para um determinado tipo de pneu, a velocidade de início de hidroplanagem das aeronaves, diferentemente dos veículos rodoviários, pode ser estimada apenas a partir da pressão de enchimento, desprezando-se a influência do ACC .

Outro fator relativo aos pneus é o desenho da escultura da banda de rodagem. Desenhos adequados, tais como raias contínuas ao longo do perímetro, tendem a elevar a velocidade de início da hidroplanagem, quando comparados com pneus lisos.

Outro efeito positivo das ranhuras é o aumento da profundidade mínima de água necessária para que ocorra a hidroplanagem. Dados experimentais demonstram também que a perda de tração em razão da hidroplanagem parcial é consideravelmente menor em pneus com banda de rodagem esculpida, mesmo quando a profundidade da lâmina d'água é maior do que a profundidade das ranhuras do pneu. Esse efeito é ilustrado Figura 4.12.

Figura 4.12 - Efeito da banda de rodagem sobre a tração, em condições de hidroplanagem parcial (1 nó = 1,85 km/h); pneu aeronáutico 32 x 8.8, lâmina d'água de 0,3 pol (7,5 mm), carga=10.500 lb (4.760 kg) e $p=150 \text{ lb/pol}^2$ (1.034 kPa), Langley, NASA, (Horne, 1963)

Finalmente, a estrutura do pneu (de acordo com o tipo de pneu: diagonal ou radial) tem influência na velocidade em que se inicia a hidroplanagem. Van Es *et al.* (2001) detectaram que pneus radiais apresentam velocidades de hidroplanagem em torno de 27% menores do que pneus diagonais, em condições similares de operação. A diferença parece ser causada pela forma da área de contato, especialmente a relação entre largura e comprimento da área de contato (*AAC*). A Figura 4.13 ilustra esse fato.

Figura 4.13 - Efeito do tipo de pneu: diagonal ou radial, na relação da velocidade de início de hidroplanagem com a pressão dos pneus (experimento em escala real - Van Es *et al.*, 2001)

4.4 Tipos de Hidroplanagem

Conhecem-se, atualmente, três tipos de hidroplanagem:

- viscosa;
- dinâmica; e
- por desvulcanização.

4.4.1 Hidroplanagem Viscosa

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

Esse tipo de hidroplanagem é favorecido em superfícies mais lisas, condição esta que ocorre com maior frequência nas áreas impregnadas por borracha proveniente do desgaste dos pneus das aeronaves.

De um modo geral, a hidroplanagem viscosa ocorre durante as operações de frenagem da aeronave, na faixa de velocidade situada entre aquela em que ocorre a

hidroplanagem dinâmica e velocidades bastante reduzidas, mesmo que a película de água seja extremamente delgada.

4.4.2 Hidroplanagem Dinâmica

Quando uma aeronave se desloca em uma pista cuja superfície se encontre coberta de água, o pneu da aeronave desloca a água para frente e para os lados, de modo que a roda possa avançar e de maneira que se estabeleça contato entre o pneu e a pista. Na frente da área de contato, onde o pneu se choca com a água, forma-se uma onda de pressão de intensidade correspondente ao impulso transmitido pelo pneu à água. Esta pressão - que é 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 a pista e sustentar, parcialmente, a carga vertical do pneu. Acima de uma certa espessura de camada de água (espessura crítica) e de determinada velocidade característica (velocidade de hidroplanagem), a água "invade" completamente a área de contato e deixa de existir o contato entre o pneu e a pista. O pneu sofre a hidroplanagem dinâmica completa, não há perdas de energia cinética por adesão e só ocorrem perdas por histerese no interior da área de contato.

Um aumento da espessura da camada de água acima do seu valor crítico não influencia de forma apreciável, a velocidade de hidroplanagem.

Experimentalmente, pode ser mostrado que a hidroplanagem dinâmica completa para pneus aeronáuticos diagonais, rodando sobre uma pista contaminada por uma lâmina de água de espessura maior ou igual à crítica, ocorre a uma velocidade de:

$$V_h = 1,77 \cdot \sqrt{p} \quad (4-6)$$

onde:

V_h = velocidade de hidroplanagem dinâmica para roda girando sem deslizamento, em m/s;

p = pressão de enchimento dos pneus, em kPa.

Se o pneu diagonal estiver deslizando sem girar (condição que pode ocorrer no pouso, imediatamente após o toque da aeronave no solo) o fenômeno ocorre a velocidades mais baixas:

$$V_{ht} = 1,51 \cdot \sqrt{p} \quad (4-7)$$

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:

$$V_h = 1,29 \cdot \sqrt{p} \quad (4-8)$$

Não foi encontrada na literatura pesquisada referência à velocidade de ocorrência de hidroplanagem para um pneu radial deslizando sem girar.

Em qualquer dos tipos de pneus, os dados experimentais referentes às pesquisas realizadas com aeronaves em escala real, ou com pneus aeronáuticos ensaiados em dispositivos de teste específicos, 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.

Isso resulta do fato de que, quanto maior for a velocidade, menor será o tempo disponível para completar o processo de 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 aeronave encontra-se em alta velocidade, durante a corrida no solo, para pousar ou decolar.

Segundo a bibliografia, a espessura crítica da lâmina de água necessária para a ocorrência desse tipo de hidroplanagem, em uma pista de macrotextura fechada e lisa, é de cerca de 2 a 3 mm, podendo chegar a 10 mm em pistas com macrotextura aberta (Silva, 1981).

Note-se que, essa espessura de água relativamente pequena, que cria condições favoráveis a hidroplanagem, pode ser produzida por uma chuva forte e de curta duração.

Portanto, um fator que contribui para evitar a ocorrência de hidroplanagem é o caimento transversal das pistas que favorece o escoamento superficial das águas de chuva. A ICAO estabelece no documento intitulado Anexo14 – Volume 1 – Projeto e Operações de Aeródromos, a recomendação de adotar-se declividades transversais de 1,5% para pistas que operem aeronaves de envergadura maior que 24 m.

Além disso é possível calcular a extensão na qual uma pista torna-se inundada, em função da intensidade da chuva, da macrotextura e da declividade da pista. Considerando-se que o regime de chuvas é uma condição natural da região de localização do aeroporto e que a declividade máxima das pistas é limitada por norma, resta estabelecer, em projeto, a profundidade da macrotextura de modo a assegurar uma condição de pista não inundada pelo maior período possível.

4.4.3 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.

Devido à macrotextura da pista e à inexistência de rotação, a borracha na área de contato fica sujeita a repetidas deformações locais que, em razão das propriedades visco-elásticas da borracha, superaquecem a área de contato. Se esse processo perdurar por um tempo longo, a temperatura na área de contato pode alcançar um nível em que a borracha perde suas qualidades elásticas e torna-se plástica.

Quando isso acontece, grande parte das perdas de energia cinética por histerese deixam de existir e, 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, histerese e desgaste serão pequenas e as rodas começarão a girar muito tarde, muito abaixo da velocidade na qual a hidroplanagem dinâmica cessa.

Esse processo é chamado de Hidroplanagem por Desvulcanização e um pneu exposto a tal processo apresenta danos locais (a banda de rodagem derrete-se parcialmente).

O aspecto de um pneu que sofreu hidroplanagem por desvulcanização é mostrado na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Foto da banda de rodagem de um pneu aeronáutico que sofreu hidroplanagem por desvulcanização (Goodyear, 2003)

4.4.4 Hidroplanagem Combinada - Modelo das 3 Zonas e 4 Fases

A ocorrência da hidroplanagem totalmente viscosa ou inteiramente dinâmica é extremamente rara. O normal é que os dois tipos de hidroplanagem ocorram simultaneamente. Pesquisas realizadas pela NASA mostraram que, dentro da área de contato entre o pneu e o pavimento, existem três zonas distintas.

- Zona 1 (Z1): zona recoberta por uma espessura considerável de água (zona de hidroplanagem dinâmica);
- Zona 2 (Z2): zona recoberta por uma espessura fina de água (zona de hidroplanagem viscosa); e
- Zona 3 (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 Figura 4.15, que apresenta o esquema da área de contato de um pneu deslocando-se sobre uma superfície molhada.

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, na forma de *spray*; outra parte é forçada a se deslocar através das ranhuras da banda de rodagem, ou pelos canais e micro-canais 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, como mostra a Figura 4.15 a. Na Zona 1 se verifica a presença de uma espessura considerável de fluido entre as superfícies do pneu e do pavimento. Alguns autores consideram que nesta região se desenvolvem apenas as forças devidas ao arrasto hidrodinâmico. Outros autores consideram que nesta região também ocorrem as perdas por histerese, em maior ou menor grau, dependendo da espessura do fluido contaminante.

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, onde as "asperezas" da superfície do pavimento geram tensões de contato maiores que a pressão do fluido. Alguns autores consideram que nesta região se desenvolvem apenas as perdas por histerese, as quais independem do contato direto entre as superfícies. Outros autores consideram que a ação das perdas por adesão também ocorrem na Zona 2, e que a intensidade dessas perdas depende da microtextura da superfície do pavimento: quanto mais áspera a superfície, maior o número de pontos com contato direto e, conseqüentemente, maiores as perdas por adesão.

A Zona 3 é a região onde predomina o contato seco entre as superfícies, onde as perdas por histerese e 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 pneu e pavimento em condições de pista inundada depende da participação relativa das Zonas 1, 2, e 3.

A Figura 4.15 mostra o efeito da velocidade de deslocamento da roda sobre a dimensão das Zonas 1, 2 e 3.

A velocidade de deslocamento na Figura 4.15 (b) é maior do que a velocidade na Figura 4.15 (a). Assim, no caso (b), a Zona 1 é maior e se estende em direção à parte traseira da área de contato (lado direito da figura), tomando espaço das Zonas 2 e 3, que assumem a forma de "ferradura".

Na Figura 4.15 (c), a velocidade de deslocamento é ainda maior do que nos casos anteriores e já não há o contato seco entre as superfícies do pneu e do pavimento. Nesta condição o atrito pneu-pavimento é bastante reduzido, dependendo principalmente da microtextura da superfície do pavimento, que ainda pode atuar na Zona 2 remanescente.

Finalmente, a Figura 4.15 (d) mostra o deslocamento da roda a uma velocidade em que já não há mais contato seco entre pneu e pavimento (velocidade maior do que a velocidade de hidroplanagem - V_h). Nesta condição a roda encontra-se na condição de hidroplanagem dinâmica completa e o atrito se reduz a valores insignificantes, com a perda do controle direcional da aeronave.

Na literatura encontram-se diversos modelos que procuram explicar o atrito desenvolvido entre pneu e pavimento nessa condição de rolamento em regime de hidroplanagem combinada.

O modelo constante da Equação 4.9 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.

Figura 4.15 - Modelo das 3 zonas para a área de contato e das 4 fases da hidroplanagem (Adaptado de Balkwill, 2003)

Sem considerar-se 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 por:

$$\mu_w = \frac{Z_1 \cdot \mu_h + Z_2 \cdot (\mu_{aw} + \mu_h) + Z_3 \cdot (\mu_a + \mu_h)}{A} \quad (4-9)$$

onde:

μ_w = *coeficiente de atrito da pista inundada;*

μ_a = *coeficiente de atrito devido à adesão na área seca (zona 3);*

μ_h = *coeficiente de atrito devido à histerese;*

μ_{aw} = *coeficiente de atrito devido à adesão na área molhada.*

A equação mostra que a zona seca da área de contato (Z_3) contribui substancialmente para a capacidade de frenagem do pneu, uma vez que nesta região atuam integralmente os atritos por histerese e adesão, como em uma pista seca.

Na Zona 2, em que existe uma película fina de água separando o pneu da pista, as perdas por histerese (que são menos intensas do que as perdas por adesão), estão sempre presentes. Nesta Zona, perdas por adesão podem ocorrer em maior ou menor grau. Nesta região de ocorrência da hidroplanagem viscosa, a magnitude das perdas por adesão variam em função da microtextura. Sobre uma pista de microtextura extremamente áspera, tudo se passa mais próximo ao comportamento da zona seca, como se Z_2 não se desenvolvesse e, com o aumento da velocidade, Z_1 substituísse gradualmente a Z_3 (Horne e Buhlmann, 1983⁶; apud Lenke e Graul, 1986). Ou, de outro modo, em uma superfície com microtextura extremamente áspera, a Zona 2 praticamente funciona como área seca para efeito de atrito. As asperezas rompem a película d'água garantindo o contato das superfícies do pneu e do pavimento e as perdas por adesão passam a atuar de forma muito próxima à da área seca (Zona 3).

⁶ Horne, W. B. e Buhlmann, F., *A Method for Rating the Skid Resistance and Micro/Macrotexture Characteristics of Wet Pavements*, ASTM, 1983.

No outro extremo, em uma microtextura muito lisa, praticamente não ocorrem perdas por adesão na Zona 2, pois não há asperezas para perfurar a película de água sob pressão e, em consequência, não há contato direto entre as superfícies do pneu e do pavimento. Neste caso a Zona 2 terá um comportamento próximo à Zona 1 para efeito de atrito, pois praticamente só atua a histerese.

A velocidade para a hidroplanagem dinâmica completa será a mesma se a profundidade da lâmina de água for maior ou igual ao seu valor crítico. As perdas por histerese ocorrem por toda a área de contato ($Z_1 + Z_2 + Z_3 = A$) com intensidade variável em função da espessura do contaminante.

Se a roda começar a girar sobre uma pista molhada, cuja microtextura seja lisa, a zona Z_2 (onde existe hidroplanagem viscosa), irá se formando progressivamente. Esta área se desenvolve da parte da frente para trás da zona de contato e diminui Z_3 . Em uma situação em que a espessura da lâmina de água ultrapasse 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 Z_1 , que penetra em Z_2 .

À medida que a velocidade aumentar mais, Z_3 desaparecerá gradualmente e, ao mesmo tempo, Z_1 aumentará. A uma certa velocidade crítica (se a profundidade da lâmina de água for superior à crítica), Z_1 cobrirá toda a área de contato e o pneu ficará totalmente exposto à hidroplanagem dinâmica. Nesta situação perde-se a capacidade de frenagem e o controle direcional da aeronave.

5 CARACTERÍSTICAS DA SUPERFÍCIE DE UMA PISTA

A principal maneira de se caracterizar a superfície de um pavimento é através da avaliação da textura. Entende-se por **textura** da superfície de um pavimento, de forma mais abrangente:

"o conjunto de características associadas à capacidade do pavimento em atender ao tráfego dos veículos que demandam sua utilização de forma segura, suave, confortável e econômica".

Conceitualmente são reconhecidas quatro escalas de textura: a microtextura, a macrotextura, a megatextura e, finalmente, a irregularidade (*roughness*).

A microtextura é caracterizada pelo grau de rugosidade, ou aspereza individual da superfície das partículas do agregado que compõem a mistura asfáltica ou de concreto de cimento Portland da camada de revestimento. A microtextura não é visível a olho nu, mas pode ser percebida por meio do tato, identificando-se superfícies lisas ou ásperas. Formalmente **microtextura** é definida como:

"o conjunto de desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características de comprimento de onda e amplitude menores que 0,5 mm" (ASTM E 867).

A natureza petrográfica e química dos agregados também influem na microtextura e em sua resistência ao polimento, que é provocado pelo contato com os pneus. Por exemplo, os calcários são conhecidos pela sua tendência a resistir pouco à ação do polimento. Por outro lado, granitos e quartzitos geralmente são rochas duras, que conservam a angularidade, os cantos vivos e a microtextura, resistindo bem à ação do tráfego (Veith, 1986).

A macrotextura é caracterizada pelo tamanho do agregado, pela faixa granulométrica (quantidades relativas dos diversos tamanhos de agregados), pela configuração geométrica individual do agregado e pelos vazios existentes na mistura. Um pavimento que tem como característica alta macrotextura possui, em sua mistura, agregado graúdo e anguloso, que freqüentemente se pronuncia acima da linha média da superfície, gerando grande volume de vazios entre as partículas mais próximas. Formalmente, a **macrotextura** é definida como:

"o conjunto de desvios da superfície de um pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana, com dimensões características de comprimento de onda e amplitude que variam de 0,5 mm até uma dimensão que não mais afete a interação pneu-pavimento" (ASTM E 867).

Alguns autores consideram a macrotextura na faixa de comprimento de onda de 0,5 mm a 50 mm e amplitude 0,1 a 20 mm (Classificação adotada pela ISO/CD 1373, apud Cairney P e Styles E, 2005).

A Figura 5.1 ilustra os conceitos de micro e macrotexturas.

Figura 5.1 - Ilustração dos conceitos de micro e macrotexturas

A **megatextura**, por sua vez, está associada aos desvios da superfície do pavimento decorrentes de fatores como: formação de trilha de roda, panelas, remendos, perda de agregado na superfície e também pelas juntas e fissuras de maiores dimensões. Situa-se na faixa de 50 a 500 mm de comprimento de onda e de 0,1 a 500 mm de amplitude. Ela afeta em maior grau o nível de ruído e a resistência ao rolamento do que o atrito entre o pneu e o pavimento (Cairney).

Finalmente, a irregularidade (*roughness*) refere-se aos desvios de dimensão superiores à megatextura e afeta, além da resistência ao rolamento, a dinâmica do veículo, a qualidade ao rolamento (associada ao conforto) e o custo operacional dos veículos. Formalmente a **irregularidade** é definida como:

“o desvio da superfície do pavimento em relação a uma superfície verdadeiramente plana com dimensões características que afetam à dinâmica do veículo e a qualidade do rolamento” (ASTM E 867).

A irregularidade fornece uma boa medida da condição geral do pavimento e é usualmente expressa em IRI - Índice Internacional de Irregularidade (*International Roughness Index*).

Essas características da textura constituem as qualidades da superfície de uma pista que, em última análise, determinam as interações entre pneu e pavimento e, conseqüentemente, influem nos diversos aspectos que contribuem para que o transporte seja realizado de forma segura, suave, confortável e econômica.

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram os efeitos dos tipos de textura e sua influência nos veículos, nos ocupantes dos veículos e no meio ambiente.

Tabela 5.1 - Influência da textura em diversos aspectos

Efeitos no Veículo, Ocupantes ou Meio Ambiente	Características da Superfície	Influência
Atrito	Microtextura Macrotextura Megatextura	Muito Alta Alta Moderada
Resistência ao Rolamento Consumo de Combustível Poluição do Ar	Macrotextura Megatextura Irregularidade	Alta Muito Alta Alta
Desgaste do Pneu	Microtextura Macrotextura	Muito Alta Moderada
Ruído Externo	Macrotextura Megatextura	Muito Alta Muito Alta
Drenagem da Superfície	Macrotextura	Alta
Esguicho e Pulverização	Macrotextura	Alta
Reflexão (luz de farol)	Microtextura Macrotextura	Pouco Conhecida Alta
Ruído interior	Macrotextura Megatextura Irregularidade	Alta Muito Alta Alta

Fonte: Noyce, D.A. *et al.*, 2005

Tabela 5.2 - Influência do comprimento de onda da textura (m) nas características da superfície do pavimento – Conforme proposto no 18º World Road Congress, apud Noyce, 2005

10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
Microtextura			Macrotextura		Megatextura	Irregularidade	
Atrito em Pista molhada							
			Ruído Ext.				
			Ruído Interno				
			Esguicho e Spray				
					Resistência ao Rolamento		
Desgaste do Pneu					Danos ao Pneu		

Particularmente, no contexto deste trabalho, são abordados apenas os aspectos referentes à micro e à macrotextura, uma vez que o foco da pesquisa é a questão da aderência pneu-pavimento em pistas de aeroportos.

Em uma pista com microtextura lisa, em condição seca, ocorre contato íntimo entre as superfícies, permitindo grande número de ligações moleculares e, em consequência, o atrito por adesão possui grande participação nas perdas de energia por atrito. Por outro lado, quando a pista está molhada, a película de água que cobre a área de contato e separa as superfícies reduz significativamente o efeito do atrito por adesão. A microtextura lisa favorece a ocorrência da hidroplanagem viscosa ou a área de atuação da hidroplanagem viscosa no caso de hidroplanagem combinada.

Uma pista seca com microtextura áspera causa perdas por adesão ligeiramente menores que aquelas que se verificam em uma pista seca com microtextura lisa. Nesse caso, a área de contato real na interface de contato é menor, resultando em um número menor de ligações moleculares. Por sua vez, as perdas por adesão de um pavimento desse tipo são menos influenciadas pela presença de água, porque a superfície com microtextura áspera, mesmo molhada, ainda permite o contato seco em grande parte da área de contato, devido à agudeza das asperezas que perfuram a película de água.

Passando-se agora à análise da macrotextura, tem-se que, uma superfície seca com macrotextura fechada causa pequenas deformações na banda rodagem, o que gera perdas pequenas por histerese e, em consequência, o atrito em razão da histerese é

relativamente menor. Neste caso o volume ativo da banda de rodagem é pequeno. Já na situação de uma pista seca com macrotextura aberta, as perdas por histerese são grandes, devido à maior amplitude das deformações na banda de rodagem, que proporcionam grandes perdas por histerese. A contaminação por água até um certo grau não influencia de forma significativa as perdas por histerese, pois estas são basicamente resultantes da geometria da superfície e das propriedades visco-elásticas da borracha dos pneus.

A macrotextura, além disso, exerce grande influência no fenômeno da hidroplanagem dinâmica. O valor da espessura crítica da lâmina de água, necessária para a ocorrência desse fenômeno, depende diretamente da macrotextura, sendo maior nas estruturas abertas do que nas fechadas. Isso ocorre porque as estruturas abertas permitem a formação de canais entre a banda de rodagem e a pista, facilitando a drenagem da água para fora da área de contato.

É possível, como será visto adiante, prevenir a ocorrência da hidroplanagem dinâmica em chuvas de intensidade razoável, se a pista for dotada de uma macrotextura suficientemente aberta.

A presença de substância(s) contaminante(s) na superfície de uma pista levou a *JAA – Joint Aviation Authority*, a *FAA – Federal Aviation Administration* e a *ICAO – International Civil Aviation Organization* a caracterizarem melhor essa condição de "pista contaminada".

A *ICAO* recomenda que se coloque à disposição dos interessados as informações sobre as condições da superfície de uma pista de pouso, sempre que se verifique a presença de água em sua faixa central. A descrição sobre as características dessa superfície deve adotar os seguintes critérios:

- (1) **Úmida:** a superfície muda de cor devido à umidade;
- (2) **Molhada:** a superfície apresenta-se molhada mas sem a presença de água parada;
- (3) **Poças d'água:** são visíveis trechos significantes de pista com água parada;
- (4) **Inundada:** é visível uma extensa área com água parada.

A *Federal Aviation Administration – FAA* define que uma **pista é considerada contaminada** em qualquer momento que se verifique a presença de água parada, gelo, neve, gelo molhado, neve fundente, geada, borracha em elevada quantidade ou outras substâncias.

A *Joint Aviation Authority – JAA* classifica a condição da superfície de uma pista em quatro tipos conforme se segue:

- (1) **Pista Seca:** é aquela que não se apresenta molhada nem contaminada e inclui pistas pavimentadas, especialmente preparadas com ranhuras (*gooving*) ou pavimentos porosos e mantidas de forma a assegurar uma ação de frenagem "efetivamente seca", mesmo na presença de umidade.
- (2) **Pista Úmida:** Uma pista é considerada úmida quando sua superfície não se apresenta seca, de modo que a umidade presente não dê uma aparência brilhante à sua superfície.
- (3) **Pista Molhada:** Uma pista é considerada molhada quando sua superfície apresenta-se coberta por água, gelo ou neve (ainda em uma condição menos grave do que aquela especificada para pistas contaminadas), ou quando há umidade suficiente para proporcionar um aspecto refletivo em sua superfície, mas ainda sem a presença de água parada (poças d'água).
- (4) **Pista Contaminada:** Uma pista é considerada contaminada, quando mais de 25% de sua superfície (considerados em áreas isoladas ou não) dentro do comprimento e largura em uso apresenta-se coberto com contaminante, em uma das seguintes situações:
 - ✓ Superfície coberta com mais de 3 mm de altura de água, ou gelo, ou ainda por neve equivalente a mais de 3 mm de altura de água;
 - ✓ Superfície coberta por neve compactada, resistente a compactação complementar, formando torrões quando quebrada; ou
 - ✓ Superfície coberta por gelo, incluindo gelo molhado.

Considerando o clima do nosso país e que o presente estudo abrange somente pistas de aeroportos no Brasil, os dados de campo, bem como os ensaios realizados e dados

coletados, são referentes à ação apenas da água como fluido contaminante e da borracha, desprendida dos pneus das aeronaves, acumulada na pista.

A combinação dos conceitos de micro e macrotextura, juntamente com a possibilidade da superfície da pista estar seca ou molhada, resultam em 8 alternativas de condição de superfícies de pavimento, com significativa relevância no problema da aderência pneu-pavimento. Esse aspecto encontra-se convenientemente abordado no documento “Aerodrome Design Manual – Parte 3 – Pavimentos, ICAO, 1983”, tendo sido tratado também por *Silva e Rodrigues Filho*, 1981, cujas análises apresentamos a seguir.

5.1 Classificação das Superfícies

5.1.1 Superfícies com Macrotextura Fechada e Microtextura Lisa

Uma pista com macrotextura fechada e microtextura lisa, quando seca, proporciona valores de coeficiente de atrito na faixa de 0,7 a 1,1, dependendo da composição da borracha e da pressão do pneu. Neste tipo de pista, predominam as perdas por adesão.

O atrito disponível sobre uma pista limpa e seca, com esse tipo de superfície, praticamente independe da velocidade de deslocamento da roda. O valor máximo do coeficiente de atrito ocorre a uma velocidade de deslizamento real de, aproximadamente, 0,05 m/s (0,18 Km/h). Somando-se a velocidade de deslocamento real com a velocidade resultante do deslocamento aparente (função da deformação da banda de rodagem), chega-se à uma *taxa de deslizamento*, medida, na faixa de 15% a 20% para o atrito máximo medido. Uma pista com esse tipo de estrutura, quando úmida ou molhada, proporciona coeficientes de atrito reduzidos, mesmo em velocidades baixas, devido ao fenômeno da hidroplanagem viscosa. O pneu não consegue expulsar totalmente a água da área de contato no intervalo de tempo de passagem da roda. Uma fina película de água interpõe-se entre a banda de rodagem e a pista, praticamente eliminando as perdas de energia por adesão. Como o processo de remoção da água depende do tempo de contato, o coeficiente de atrito disponível decresce com o aumento da velocidade.

Quando uma pista com essa textura é inundada, na medida em que a velocidade aumenta a hidroplanagem viscosa é gradualmente substituída pela hidroplanagem

dinâmica, dentro do mecanismo da hidroplanagem combinada já explicado anteriormente. A macrotextura fechada faz com que a profundidade crítica de água, necessária para ocorrência da hidroplanagem dinâmica completa, seja relativamente pequena. Nesse tipo de pista as ranhuras da banda de rodagem são muito importantes para prevenir a hidroplanagem dinâmica. A Figura 5.2 mostra o modelo deste tipo de superfície.

Figura 5.2 – Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura lisa

A Figura 5.3 ilustra a variação do coeficiente de atrito com a velocidade, quando um pneu é freado sobre uma pista com microtextura lisa e macrotextura fechada, em condições seca pista e em condição inundada.

Figura 5.3 - Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura fechada, microtextura lisa (ICAO, 1983)

Se durante o pouso de uma aeronave as rodas não iniciarem a rotação no momento do toque no solo, a hidroplanagem ocorrerá com as rodas sem rotação, podendo estender-se por uma grande extensão da pista e terminar como uma hidroplanagem por desvulcanização.

5.1.2 Superfícies com Macrotextura Fechada e Microtextura Áspera

Uma pista seca, com macrotextura fechada e microtextura áspera, 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.

Na prática, a mencionada redução é pouco importante e é inteiramente compensada pelo incremento que essa microtextura proporciona ao atrito da pista, quando esta está molhada. As asperezas perfuram e atravessam a fina película de água em milhares de pontos, tornando possível as perdas por adesão nos pontos de contato teoricamente secos. A microtextura áspera não pode prevenir a ocorrência da hidroplanagem dinâmica quando a pista está inundada, nem o evento da hidroplanagem por desvulcanização, se as rodas deslizam sem girar desde o toque do avião no solo, mas pode evitar a ocorrência da hidroplanagem viscosa. Nesse tipo de pista, as ranhuras da banda de rodagem são importantes para prevenir a hidroplanagem dinâmica.

A Figura 5.4 mostra o modelo desse tipo de superfície.

Figura 5.4 - Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura áspera

A Figura 5.5 mostra a variação do coeficiente de atrito com a velocidade para um pneu freado sobre uma pista de macrotextura fechada e microtextura áspera, nas condições seca e inundada.

Figura 5.5 - Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura fechada, microtextura áspera (ICAO, 1983)

5.1.3 Superfícies com Macrotextura Aberta e Microtextura Lisa

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 uma participação da ordem de 25% do atrito.

A hidroplanagem viscosa pode ocorrer uma vez que sua microtextura é lisa, entretanto as velocidades em que tal fenômeno pode acontecer não são tão baixas como no caso da pista de textura fechada e lisa.

A Figura 5.6 mostra o modelo desse tipo de superfície

Figura 5.6 - Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura lisa

Quando a pista está inundada, as características do fluxo da água na área de contato diferem consideravelmente das características do fluxo quando a macrotextura é

fechada. Grande parte da água escoia pelos canais que se formam entre a banda de rodagem e a pista. Como consequência, a profundidade da lâmina d'água necessária para a ocorrência da hidroplanagem dinâmica completa é maior. Essa profundidade aumenta com a macrotextura. Para uma certa intensidade de chuva é possível determinar, uma macrotextura que elimine a possibilidade de hidroplanagem dinâmica.

A Figura 5.7 mostra o comportamento do atrito para pistas de textura aberta e lisa nas condições de pista seca e inundada.

Figura 5.7 - Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura aberta, microtextura lisa (ICAO, 1983)

5.1.4 Superfícies com Macrotextura Aberta e Microtextura Áspera

Uma pista seca com macrotextura aberta e microtextura áspera proporciona coeficientes de atrito levemente inferiores àqueles possíveis de se obter com uma microtextura lisa. As perdas por adesão predominam, mas a contribuição das perdas por histerese em razão da macrotextura são superiores a 25% do valor do coeficiente de atrito.

A microtextura áspera diminui o potencial da ocorrência da hidroplanagem viscosa quando a pista está molhada e a macrotextura aberta dificulta a ocorrência da hidroplanagem dinâmica, na medida em que a profundidade crítica da lâmina d'água cresce consideravelmente.

Uma pista com essas características é a que melhor atende aos aspectos de aderência entre pneu e pavimento.

Figura 5.8 - Modelo de superfície com macrotextura fechada e microtextura áspera

A Figura 5.9 ilustra a variação do coeficiente de atrito, com a velocidade para esse tipo de pista. A curva em linha cheia, para pista inundada, ilustra o caso em que a macrotextura é suficientemente aberta para prevenir a hidroplanagem dinâmica.

Figura 5.9 - Influência da textura sobre o atrito em pista seca e inundada – macrotextura aberta, microtextura áspera (ICAO, 1983)

5.2 Resultados Experimentais

A Figura mostra a variação do atrito em função da profundidade média da macrotextura da superfície, resultado das pesquisas realizadas por Horne e Yager no centro de pesquisas da NASA - Langley Research Center, nos Estados Unidos em 1965.

Figura 5.10 - Comportamento do atrito em função da profundidade média da textura para diversas velocidades; pneu aeronáutico liso, carga de roda = 12.000 lb (5.440 kg), pressão de enchimento = 140 lb/pol² (965 kpa), profundidade da lâmina d'água = 0,1 a 0,2 pol (2,5 a 5 mm) (Horne *et al.*, 1965)

O gráfico permite visualizar o comportamento do atrito em função da profundidade média da textura das superfícies dos pavimentos para três velocidades, em pistas inundadas de forma controlada, mantidas constantes todas as demais condições de ensaio.

A partir dos resultados desse ensaio pode-se visualizar algumas características do comportamento do atrito em pistas molhadas, já citadas neste trabalho, a partir das referências consultadas, como por exemplo:

- O atrito diminui com a velocidade do veículo;
- A macrotextura contribui sensivelmente na melhora do atrito.

6 PROJETO, AVALIAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SUPERFÍCIES DE PISTAS DE AEROPORTOS

As normas estabelecidas pelo Comando da Aeronáutica (por meio das Instruções de Aviação Civil), pela FAA (por meio das *Advisory Circular*) e pela ICAO (por meio do Anexo 14), exigem que as superfícies pavimentadas de pistas de pouso sejam construídas de modo a fornecerem boas características de atrito quando molhadas. Estabelecem ainda parâmetros mínimos para as superfícies de pista de pouso e, em particular, reconhecem a necessidade de tratamentos especiais para que as superfícies atendam a essas exigências.

6.1 Identificação do Problema

Como já visto nos capítulos anteriores sabe-se que para pistas limpas e secas as variações no atrito não são significativas, pois praticamente, independem do tipo de pavimento. Além disto, o atrito é muito pouco afetado pela velocidade da aeronave em pistas secas.

Porém, na presença de água, em qualquer grau (desde pista úmida até pista inundada), a situação é completamente diferente. Em pistas molhadas os níveis de atrito caem significativamente em comparação às mesmas pistas secas. A textura da superfície passa a ter um papel muito importante na medida em que, em pistas molhadas, os valores de atrito variam consideravelmente para diferentes texturas.

Em pistas molhadas, a degradação do atrito disponível – fato que ocorre principalmente nas altas velocidades de operação das aeronaves – pode ter sérias implicações na segurança, regularidade e eficiência das operações.

Os mecanismos que explicam os fenômenos de variação do atrito em pistas molhadas encontram-se descritos no Capítulo 5.

6.2 Objetivos de Projeto

O pavimento de uma pista de pouso deve ser projetado de modo a prover uma superfície que atenda adequadamente a todas as exigências funcionais, durante toda a sua vida útil, em particular:

- (1) prover altos níveis de atrito em todas as condições previstas de pista molhada, com características uniformes ao longo da sua extensão;
- (2) minimizar o risco potencial de todas as formas de aquaplanagem (dinâmica, viscosa e por desvulcanização¹).

A capacidade de uma pista proporcionar atrito adequado quando molhada está intimamente relacionada às características de drenagem de sua superfície. Por sua vez, a demanda de drenagem depende das taxas locais de precipitação. Dessa forma, essencialmente, uma variável local – taxa de precipitação – vai determinar os esforços de engenharia necessários para que se atinja o objetivo de projeto para uma pista.

O problema do atrito em uma pista molhada pode ser tratado como um problema de drenagem, baseado em 3 aspectos:

- (1) drenagem superficial (geometria vertical);
- (2) drenagem da interface pneu-pavimento (associada à macrotextura); e
- (3) drenagem por penetração (associada à microtextura).

6.2.1 Drenagem Superficial

A drenagem superficial serve para minimizar a profundidade da lâmina d'água na superfície da pista. O objetivo é drenar a água pelo caminho mais curto e, particularmente para fora da área de passagem das rodas das aeronaves. Isso é conseguido pela adoção de declividades transversais e longitudinais adequadas e pela suavidade da superfície. As declividades máximas em pistas de pouso e decolagem são estabelecidas pela ICAO (2004) no Anexo 14.

6.2.2 Drenagem da Interface Pneu-Pavimento

O propósito da drenagem da interface pneu-pavimento é:

- evitar, tanto quanto possível, que a água se introduza e se acumule na área de contato; e
- drenar a água que se introduziu para fora da interface.

¹ Tipos de aquaplanagem descritos no Capítulo 4

O objetivo é obter-se altas taxas de saída de água da interface, minimizando a pressão hidrodinâmica. Ficou demonstrado experimentalmente que isso ocorre com maior eficiência em superfícies com macrotexturas abertas.

6.2.3 Drenagem por Penetração

O objetivo da drenagem por penetração é estabelecer o contato "seco" entre as asperezas do pavimento e a banda de rodagem do pneu, na presença de um filme delgado de água entre essas superfícies. As pressões devido à viscosidade da água crescem com a velocidade e tendem a separar as superfícies de contato, exceto naqueles pontos onde as asperezas perfuram o filme de água. Esse tipo de aspereza é definido por microtextura.

6.3 Objetivos de Manutenção

O atrito das superfícies dos pavimentos se deteriora ao longo do tempo devido a diversos fatores, dentre os quais destacam-se:

- (1) o desgaste mecânico e o polimento dos agregados causados pela ação de rolamento e frenagem das aeronaves; e
- (2) o acúmulo de borracha em sua superfície, proveniente do desgaste dos pneus.

O efeito desses fatores depende diretamente do tipo de aeronave e do volume de tráfego.

Outros fatores que também influenciam na evolução do atrito das superfícies das pistas dos aeroportos são as condições climáticas locais, o tipo de pavimento (asfáltico ou de concreto), os materiais utilizados na construção, intervenções posteriores na superfície e, finalmente as práticas de manutenção.

Falhas estruturais tais como afundamentos, fissuração, desagregação, também contribuem para a alteração do atrito.

Contaminantes tais como poeira, combustível, óleo, água, neve, gelo, areia, causam perda de atrito nas superfícies dos pavimentos.

Os depósitos de borracha que ocorrem principalmente nas zonas de toque podem ser excessivos e cobrir completamente a textura da superfície do pavimento,

comprometendo a capacidade de frenagem das aeronaves, principalmente em condições de pista molhada.

Os aeroportos com operações de aeronaves a jato deverão efetuar avaliações periódicas de atrito nas pistas de pouso visando:

- (1) identificar as pistas que se apresentam com níveis de atrito deficientes para que se faça a devida comunicação aos pilotos;
- (2) fornecer aos operadores dos aeroportos informações objetivas que permitam o aprimoramento dos procedimentos de manutenção e justifiquem a alocação dos recursos correspondentes.

6.4 Parâmetros de Projeto e de Manutenção

6.4.1 Parâmetros de Atrito

No Brasil, o Comando da Aeronáutica estabelece, por meio da *IAC-4302 - Requisitos de Resistência à Derrapagem para Pistas de Pouso e Decolagem (2001)*, os níveis mínimos de atrito para pistas de pouso, medidos com o equipamento MuMeter. Considera-se como *nível de manutenção* o valor de atrito de 0,50. Qualquer segmento do pavimento, com mais de 100 metros de comprimento, não poderá apresentar atrito inferior ao nível de manutenção.

Esta norma estabelece ainda que:

"Sempre que uma extensão de mais de 100 metros de pista apresentar atrito inferior ao nível de manutenção, a Administração Aeroportuária deverá providenciar: (1) a solicitação de expedição de NOTAM (NOtice To AirMen – Aviso aos Aeronavegantes), com informações de que a pista, quando molhada, encontra-se escorregadia; e (2) iniciar, prontamente, as ações corretivas apropriadas, visando a restaurar o nível de atrito exigido."

A periodicidade das medições de atrito é apresentada na Tabela 6.1 conforme publicada na IAC-4302.

Tabela 6.1 – Intervalos máximos entre medições de atrito

POUSOS DIÁRIOS DE AERONAVES À REAÇÃO	FREQUÊNCIA DAS MEDIÇÕES DE ATRITO	
	Pavimentos não Estriados (Sem Tratamento Complementar 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

Fonte: IAC4302 – Requisitos de Resistência à Derrapagem para Pistas de Pouso e Decolagem; (DAC, 2001)

A FAA e a ICAO estabelecem, em linha gerais, as recomendações apresentadas na Tabela 6.2, baseadas em resultados de medições de atrito (valores Mu):

Tabela 6.2 – Coeficientes de atrito mínimos correspondentes às condições da superfície da pista²

Equipamento	Lâmina d'água (mm)	Veloc. do ensaio (km/h)	Pressão pneu medição (kPa)	Pista Nova	Nível de Manut.	Nível Mínimo Admissível
MuMeter	1,0	65	70	0,72	0,52	0,42
	1,0	95	70	0,66	0,38	0,26
Deslizômetro (ex. BV-11)	1,0	65	210	0,82	0,60	0,50
	1,0	95	210	0,74	0,47	0,34
Veículo Medidor de Atrito da Superfície (SAAB)	1,0	65	210	0,82	0,60	0,50
	1,0	95	210	0,74	0,47	0,34
Veículo Medidor de Atrito da Pista (RFT)	1,0	65	210	0,82	0,60	0,50
	1,0	95	210	0,72	0,54	0,41

Adaptada de ICAO, 1994 e FAA, 2004

A FAA e a ICAO recomendam que sejam feitas avaliações de atrito com a periodicidade constante da Tabela 6.3. Este critério considera que o tráfego predominante é o de aeronaves "narrow body" (do tipo B 737, B 757, A 319 ou

² A parte de uma pista com extensão da ordem de 100 m pode ser considerada como "significante" para efeito de providências de manutenção ou de comunicação (Anexo 14 Cap. 9 item 9.4.6 – Nota)

A320). Quando o tráfego de aeronaves "wide body" (do tipo B 767, MD 11 ou B 747) tiver uma participação maior do que 20% do tráfego, recomenda-se a utilização do período correspondente ao imediatamente superior do número de pousos.

Tabela 6.3 – Período recomendado entre medições de atrito

Pousos diários de aeronaves a reação	Período entre medições de atrito
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
maior que 210	1 semana

FAA, 2004

6.4.2 Parâmetros de Textura

O Comando da Aeronáutica estabelece que a profundidade média da macrotextura do pavimento de uma pista de pouso e decolagem não deverá ser inferior a 0,50 mm, sendo necessária ação corretiva apropriada, toda vez que esses níveis não forem alcançados (DAC, 2001).

Para um pavimento novo ou recapeado o Comando da Aeronáutica recomenda a profundidade média da macrotextura de 1 milímetro.

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

A periodicidade deverá ser a mesma recomendada para as medições de atrito (Tabela 6.1).

A ICAO recomenda uma textura média mínima de 0,625 mm para pistas em uso (item 5, Apêndice 2, Estado da Superfície de los Pavimentos – Parte 2) e uma textura de no mínimo 1,0 mm para projeto de revestimentos de pistas novas (Anexo 14 Cap 3, item 3.1.24).

A FAA recomenda para pavimentos novos a profundidade média da textura deve ser de 1,14 mm (0,045 pol). 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 deve-se efetuar avaliações de textura toda a vez que se efetuar as medições de atrito;
- (2) quando a profundidade média da textura situa-se na faixa compreendida entre 0,76 mm (0,03 pol) e 0,40 mm (0,016 pol) 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 (0,01 pol) deve-se corrigir a deficiência num prazo de 2 meses.

Tanto a FAA como a ICAO afirmam que normalmente é necessário algum tipo de tratamento especial para que se atinjam as profundidades de textura recomendadas.

6.5 Contaminação por Borracha

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.

O acúmulo do resíduo de borracha dos pneus das aeronaves no pavimento está relacionado ao peso das aeronaves que pousam em determinada cabeceira de pista. A ICAO recomenda o tempo máximo decorrido entre avaliações de atrito e entre serviços de remoção de borracha, em função do número de pousos diários e do peso acumulado dos pousos no período de 1 ano, conforme consta da Tabela 6.4.

A Tabela 6.4 mostra as recomendações da ICAO constantes do Manual de Serviços de Aeroportos – Parte 2.

Tabela 6.4 - Programa de manutenção do atrito baseado no nível de operações de aeronaves a reação, para cada cabeceira

Pousos diários na Cabeceira	Peso anual dos pousos (10⁶ kg)	Período máximo entre avaliações de atrito	Período máximo entre remoções de borracha
menos de 15	menos de 447	1 vez por ano	1 vez cada 2 anos
de 16 a 30	de 448 a 838	1 vez cada 6 meses	1 vez por ano
de 31 a 90	de 839 a 2.404	1 vez cada 3 meses	1 vez cada 6 meses
de 91 a 150	de 2.405 a 3.969	1 vez por mês	1 vez cada 4 meses
de 151 a 210	de 3.970 a 5.535	1 vez cada 2 semanas	1 vez cada 3 meses
mais de 210	mais de 5.535	1 vez por semana	1 vez cada 2 meses

Tabela A4-3, Apêndice 4, Manual de Servicios de Aeropuertos – Parte 2 – ICAO, 1994

7 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Neste Capítulo é apresentado o planejamento dos ensaios de campo. O Aeroporto de Congonhas foi escolhido para realização dos ensaios de campo. Congonhas possui duas pistas de pouso e decolagem com níveis de utilização bastante diferentes; isto permite analisar uma pista submetida a tráfego intenso: a pista principal 17R/35L, e outra utilizada com frequência muito menor: a pista auxiliar 17L/35R. Além disso o aeroporto não opera das 23:00 às 06:00, fato que assegurou a realização dos trabalhos de campo sem interferir com o funcionamento do aeroporto.

7.1 Método Estabelecido para o Planejamento dos Ensaios

Os locais para execução dos ensaios foram definidos com base na combinação do conhecimento prático (experiência) e a compreensão teórica do objeto de estudo, apoiado em parâmetros estatísticos. Os ensaios foram realizados em locais definidos nos trabalhos de escritório por meio de um plano. O planejamento foi estabelecido com o objetivo de conhecer os diversos graus de solicitação aos quais é submetido o pavimento, de modo a definir previamente a localização dos ensaios, nas regiões de interesse da pista.

O objetivo da pesquisa é o de conhecer o comportamento da superfície do revestimento face à intensidade do tráfego e aos fatores de manutenção.

Segundo as referências pesquisadas, naquilo que diz respeito à superfície dos revestimentos de pistas de aeroportos, pode-se afirmar que:

- (1) as influências do tráfego e os procedimentos de manutenção são predominantes e encontram-se intimamente associados; e
- (2) as operações de pouso são aquelas que mais deterioram as condições das superfícies das pistas dos aeroportos, principalmente no que diz respeito à contaminação pela borracha desprendida dos pneus (ICAO,1994).

Estes fatos levam o planejamento dos ensaios a focar-se nas operações de pouso.

Quando as aeronaves se deslocam nas pistas dos aeroportos – seja no taxiamento, ou nas corridas de pouso ou decolagem – ocorre um certo desvio de sua trajetória em relação ao eixo da pista. As trajetórias de aeronaves no solo foram extensamente

estudadas por HoSang *et al.* para a *FAA*¹, como subsídio no critério de repetição de carga, para integrar o método de dimensionamento de pavimentos.

O método de dimensionamento de pavimentos da *FAA* adota o conceito de "*cobertura*", que representa a expectativa do número de vezes em que um determinado ponto no pavimento é solicitado, como resultado de um certo número de operações de aeronaves. Este número de operações é denominado "*passagens*".

As *coberturas* resultam das operações de um determinado tipo de aeronave e são função:

- (1) do número de *passagens*;
- (2) do tipo dos trens principais (roda simples, tandem simples, duplo tandem ou duplo triplo tandem);
- (3) da configuração dos trens principais na aeronave;
- (4) da largura das áreas de contato dos pneus; e
- (5) da distribuição dos desvios laterais da trajetória da aeronave em relação ao eixo da pista.

A influência coletiva desses fatores indica o grau de utilização de cada ponto do pavimento, ao longo da transversal da pista.

O objetivo principal do estudo de HoSang *et al.* foi o de coletar e analisar dados referentes à distribuição dos desvios laterais de aeronaves em pistas de pouso, saídas de pista de pouso e em pistas de táxi.

Foram estudadas as aeronaves comerciais mais utilizadas no transporte aéreo, com mais de 20.000 kg. Os dados foram coletados em nove aeroportos, selecionados de modo a fornecerem uma boa representação das condições normalmente encontradas no dia a dia das operações.

Nas pistas de pouso e decolagem foram coletados dados referentes a 4.359 decolagens e 5.200 pousos.

¹ HoSang *et al.*; Field Survey and Analysis of Aircraft Distribution on Airport Pavements, FAA, 1975.

As principais conclusões da pesquisa de HoSang *et al.*, que fundamentam a análise elaborada neste relatório, são descritas a seguir:

"Os resultados da análise dos dados levantados em campo sustentam as seguintes conclusões:

"A distribuição lateral das aeronaves nas pistas de pouso, saídas de pista de pouso e pistas de táxi são mais precisamente representadas pela distribuição Normal do que por distribuições Uniformes modificadas".

"O desvio médio lateral das aeronaves em relação ao eixos das pistas são: (a) à esquerda do eixo nas pistas de pouso e decolagem; (b) à direita do eixo no trechos retos das pistas de táxi; (c) à esquerda ou à direita da marca de eixo (sinalização) nas saídas de velocidade, dependendo do padrão operacional da aeronave e da configuração da saída".

"Para fins práticos, o desvio médio das trajetórias das aeronaves pode ser considerado localizado no eixo das pistas de pouso e decolagem e no eixo dos trechos retos das pistas de táxi, pelas seguintes razões: (a) os desvios médios situam-se muito próximos dos eixos das pistas; (b) geralmente a operação se dá nos dois sentidos".

"O padrão da distribuição lateral dos desvios das decolagens foi, de modo geral, mais estreito do que o dos pousos ..."

Para o presente estudo foram utilizados os resultados da pesquisa de HoSang, naquilo que se refere às **informações estatísticas dos desvios laterais observados nas operações de pouso**. Tais informações foram utilizadas como ferramentas de análise no planejamento dos ensaios de campo.

A Figura 7.1 mostra a distribuição dos afastamentos laterais em relação ao eixo da pista, para aeronaves em operações de pouso. Esse gráfico foi originalmente publicado no Estudo de HoSang *et al.*

Os afastamentos laterais foram medidos em três pontos das pistas:

- (1) Logo após a zona de toque;
- (2) Imediatamente antes da saída da pista no pouso; e
- (3) Em um ponto intermediário entre os dois pontos acima.

Figura 7.1 – Distribuição dos afastamentos laterais em relação ao eixo de uma pista para pousos (FAA, 1973)

Na área de toque, onde ocorre a contaminação por borracha desprendida dos pneus com maior intensidade, a distribuição dos afastamentos pode ser aproximada por uma distribuição normal com média $\bar{X} = -1,64$ pés (-0,50 m) e desvio padrão $S = 7,45$ pés (2,27 m). Isso significa que há um desvio de cerca de 0,50 m para esquerda em relação ao eixo da pista, ou seja: - nas operações de pouso verificou-se estatisticamente uma tendência dos pilotos tocarem a pista cerca de 0,50 m à esquerda do eixo. Neste estudo foi desconsiderado o viés de cerca de 0,5 m à esquerda para pousos, verificado na pesquisa de HoSang *et al.*, tendo em vista uma conclusão da própria pesquisa que afirma: *"Para fins práticos, o desvio médio das trajetórias das aeronaves pode ser considerado localizado no eixo das pistas de pouso e decolagem"*.

Isso significa que em cerca de 77% dos pousos o eixo das aeronaves situa-se em uma faixa central de aproximadamente 6,0 m e que, praticamente, todos os pousos ocorrem numa faixa de aproximadamente 20,0 m (10 m para cada lado do eixo), conforme mostra a Figura 7.2.

Figura 7.2 – Modelo da distribuição dos desvios laterais do eixo das aeronaves em operações de pouso em relação eixo da pista
(Z – valor da variável Normal padronizada; $S=2,27$ m)

Evidentemente, os trens de pouso seguem o mesmo padrão de desvios laterais da aeronave. O resultado das passagens das aeronaves sobre o pavimento é o efeito combinado da ação de cada uma das rodas dos trens principais, seja para carregamento da estrutura do pavimento ou para solicitações na superfície do revestimento.

O efeito combinado da ação das rodas dos trens principais sobre uma pista, em operações de pouso, pode ser explicado pelo modelo apresentado na Figura 7.3, onde, a título de exemplo, é mostrada a ação individual de cada roda dos trens principais de uma aeronave Airbus A 319 e seu efeito combinado sobre o pavimento. As passagens de cada uma das rodas sobre o pavimento possuem um desvio segundo uma distribuição Normal. O efeito combinado de todas as rodas é expresso pela soma dos efeitos individuais. Estatisticamente, este efeito combinado é expresso pela soma das ordenadas das funções densidade de probabilidade das passagens de cada roda individualmente, localizadas segundo a configuração dos trens principais na aeronave. A Figura 7.3 ilustra isso.

Figura 7.3 - Modelo da distribuição dos desvios laterais de cada roda dos trens principais em relação eixo da pista e seu efeito combinado, para operações de pouso, para a aeronave Airbus A 319 (decorrente da aplicação do modelo de HoSang *et al.* com $S=2,27m$)

Figura 7.4 – Probabilidade acumulada da passagem das rodas de uma Aeronave A 319 em função do afastamento ao eixo da pista

A área sob a curva azul, no gráfico da Figura 7.3, indica a expectativa de passagem de todas as rodas na faixa de pista considerada. Sabendo que as distribuições dos desvios de cada roda são distribuições Normais é possível construir a função de Probabilidade Acumulada e, a partir daí, determinar o grau de utilização da pista em função do afastamento ao eixo. A função de Probabilidade Acumulada é apresentada na Figura 7.4.

Para uma determinada pista esses gráficos são construídos a partir do conjunto de aeronaves que nela operam. A contribuição de cada aeronave será considerada de acordo com a configuração dos trens de pouso e ponderada pela sua participação no tráfego total.

No sentido longitudinal (ao longo do eixo da pista) a pesquisa de HoSang mostra que, para aeronaves do porte do B 737, a posição de toque na pista se distribui, a partir da cabeceira de pouso, da seguinte forma:

- cerca de 25% das aeronaves tocam a pista em uma distância menor que 300 m da cabeceira;
- cerca de 85% (acumulados) tocam a pista em uma distância menor que 600 m da cabeceira; e
- cerca de 96% (acumulados) tocam a pista até uma distância menor que 900 m da cabeceira.

7.2 Aplicação para as Pistas do Aeroporto de Congonhas

A Figura 7.5 é uma foto aérea panorâmica do Aeroporto de Congonhas. Pode-se observar as duas pistas paralelas no sentido norte-sul (da cabeceira 17 para a cabeceira 35). A pista da direita, designada 17R-35L, é a pista de maior extensão (1940 m), mais utilizada, chamada de pista principal. A pista da esquerda é a pista auxiliar 17L/35R, com 1450 m de extensão, menos utilizada em função de sua menor extensão.

Nota-se que no eixo das pistas existe uma faixa escura decorrente da contaminação pela borracha desprendida dos pneus das aeronaves. Essa contaminação ocorre com maior intensidade na região próxima à área de toque (primeiros 600 m de pista), onde a mancha escura apresenta a maior largura.

Figura 7.5 – Visão geral das pistas do Aeroporto de Congonhas no sentido Norte-Sul
(Foto de 28/12/2005)

Todos os auxílios ao pouso conduzem a aeronave a tocar as pistas em seu eixo e na região situada a uma distância de 300 m da cabeceira de pouso conhecida como "zona de toque" ou "área de toque". Ressalte-se ainda que cerca de 80% das operações ocorrem no sentido Norte-Sul, em razão dos ventos predominantes. Isto significa dizer que 80% das aeronaves que operam na pista auxiliar pousam ou decolam na cabeceira 17L. Da mesma forma, 80% das aeronaves que operam na pista principal pousam ou decolam na cabeceira 17R.

Daí decorre a primeira definição do planejamento dos ensaios. Optou-se por concentrar os ensaios na zona de toque das cabeceiras 17.

O tráfego de grande porte predominante no Aeroporto de Congonhas é composto por aeronaves Boeing 737 (500 a 800), Airbus (A 319 e A 320) e Foker 100. Essas aeronaves são responsáveis por 93% do tráfego (e, em consequência, dos pousos) no aeroporto. Outras aeronaves do tráfego regular comercial que operam em Congonhas são, Foker 50, ATR 43 e EMB 120, com uma participação em torno de 7% do tráfego.

Considerando que:

- (1) o acúmulo de borracha nas áreas de toque é associado ao peso acumulado dos pousos; e
- (2) as aeronaves da Boeing, Airbus e Foker são, em conjunto, responsáveis por mais de 95% desse índice²;

a análise da incidência do tráfego sobre a pista leva em conta apenas estas aeronaves.

Considerando ainda que as bitolas dos A319 e A320 são muito próximas e o mesmo ocorre para as bitolas do B737 e do F100, a análise é efetuada para os dois grupos de aeronaves: um grupo para os A319 e A320 e outro grupo para os B737 e F100.

Levantamento efetuado para as pistas do Aeroporto de Congonhas em uma semana típica indicam a seguinte utilização das pistas:

- Cab 17R (principal) 65% Boeing e 35% Airbus
- Cab 17L (auxiliar) 53% Boeing e 47% Airbus

O critério de avaliação do potencial de utilização e de contaminação por borracha das pistas foi fixado com o auxílio dos gráficos constantes do Anexo A. Construíram-se os modelos que apresentam o efeito coletivo e acumulado das passagens das rodas das aeronaves para cada uma das duas cabeceiras 17 das pistas do aeroporto, de acordo com a distribuição do tráfego acima. O resultado pode ser observado na Figura 7.6.

Verifica-se que as distribuições das solicitações são muito parecidas para as duas pistas, mesmo com perfis de tráfego diferentes. Pode-se observar nos gráficos de Probabilidade Acumulada (constantes do Anexo A), para a pista principal e para a pista auxiliar, que as variações, quando existentes, são mínimas – da ordem de 1 ponto percentual. Essa proximidade de comportamento permite adotar um critério único para o planejamento dos ensaios nas duas pistas. O critério adotado foi o da condição mais solicitante, ou seja, a condição referente ao tráfego da pista principal.

² Vide Anexo B – Hotran do Aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas (Pesos dos Pousos Acumulados)

Ressalte-se, neste ponto, que **as distribuições** das solicitações são praticamente iguais. É evidente que **a magnitude** das solicitações que incidem na pista principal é muito maior do que a da pista auxiliar.

Figura 7.6 – Efeito combinado das passagens das rodas dos grupos de aeronaves para as cabeceiras 17 das pistas do Aeroporto de Congonhas, de acordo com o tráfego que opera em cada pista.
cab 17R (principal) = 65% Boeing e 35% Airbus; cab 17L (auxiliar) = 53% Boeing e 47% Airbus

A análise do gráfico Distribuição dos Desvios Laterais (Figura 7.7) fica quantitativamente definida com o auxílio do gráfico de Probabilidade Acumulada (Figura 7.8), que permite determinar a expectativa de utilização em cada faixa transversal de pista. A partir da análise desses gráficos é estabelecido o planejamento dos ensaios.

Outro fator considerado é a presença ou não das ranhuras transversais (*grooving*).

Toda a análise é baseada na característica Normal da distribuição dos afastamentos laterais dos pousos em relação ao eixo da pista.

Figura 7.7 - Efeito combinado das passagens das rodas dos grupos de aeronaves para a cabeceira 17R (pista principal) do Aeroporto de Congonhas - 65% Boeing e 35% Airbus

Figura 7.8 - Probabilidade acumulada da passagem das rodas das aeronaves em função do afastamento ao eixo para pousos na cab 17R do Aeroporto de Congonhas – 65% Boeing e 35% Airbus

Com base nas informações dos gráficos anteriores é construído o gráfico constante da Figura 7.9, onde se estabelece o critério de divisão da pista em faixas. Propõe-se a divisão na transversal, em 5 regiões distintas, considerando: (1) o estado original da superfície (com ou sem *grooving*) e (2) o potencial de utilização e de contaminação por borracha.

A descrição da divisão proposta é apresentada a seguir:

Faixa A – eixo da pista, *grooving* contaminado com borracha: - faixa central de 2 m de largura (1 m para cada lado do eixo), onde ocorrem cerca de 14% das passagens de roda, com uma incidência média de 0,071 passagens/m/pouso;

Faixa B - *grooving* contaminado com borracha: - região formada por duas faixas laterais com largura de 4 m cada uma, iniciando afastadas a 1 m do eixo e terminando afastadas a 5m, onde ocorrem cerca de 32% das passagens de roda em cada uma delas, com uma incidência média de 0,077 passagens/m/ pouso;

Faixa C - *grooving* pouco contaminado: - região formada por duas faixas laterais com largura de 5 m cada uma, iniciando afastadas a 5 m do eixo e terminando afastadas a 10 m, onde ocorrem cerca de 11% das passagens de roda em cada uma delas, com uma incidência média de 0,02 passagens/m/pouso;

Faixa D - região situada próxima ao limite externo do *grooving* (afastado mais de 10 m para cada lado do eixo físico da pista), praticamente sem tráfego. Representa a situação original do pavimento com *grooving*, com desgaste apenas devido às intempéries;

Faixa E - lateral da pista: região próxima à borda do pavimento, sem *grooving* e sem tráfego. Representa a situação original do pavimento sem tráfego, apenas sujeita ao desgaste das intempéries;

Pontos W – eixo da pista, localizados em área de tráfego intenso, mas fora das zonas de toque (Faixa A, próximo ao meio da pista, equidistante das cabeceiras).

Figura 7.9 – 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)

A Figura 7.10 é uma montagem sobre foto aérea da pista principal do Aeroporto de Congonhas, ilustrando as faixas estabelecidas para execução dos ensaios de campo.

Figura 7.10 – Ilustração das Faixas estabelecidas para o plano de ensaios de campo. Pista principal do Aeroporto de Congonhas.

No sentido longitudinal é definida a região da pista compreendida entre 200 m e 520 m a partir das cabeceiras 17 para realização dos ensaios.

O esquema de localização dos ensaios é apresentado na Figura 7.1.

Figura 7.11 – Esquema da localização dos ensaios de campo

O esquema da Figura 7.11 serve de referência, orientação e padronização para os locais de realização dos ensaios.

A título ilustrativo são apresentadas fotos aéreas das pistas do Aeroporto de Congonhas, nas proximidades das cabeceiras 17R e 17L, mostrando suas dimensões físicas, as áreas ranhuradas e as áreas contaminadas por borracha.

Naturalmente a faixa contaminada por borracha da pista principal é mais larga do que a da pista auxiliar. Isso ocorre devido ao volume de tráfego. Embora o fenômeno seja explicado da mesma forma em ambas as pistas, o número de pousos na pista principal é muito maior, produzindo uma cobertura de borracha visualmente mais próxima à do modelo estatístico.

Figura 7.12 – Aspecto da mancha de borracha na pista auxiliar (17L/35R) do Aeroporto de Congonhas

Figura 7.13 - Aspecto da mancha de borracha na pista principal (17R/35L) do Aeroporto de Congonhas

8 TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram realizados nas pistas do Aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas e consistiram de¹:

- (1) levantamento visual das superfícies das pistas;
- (2) acompanhamento dos serviços de remoção de borracha realizados pela INFRAERO;
- (3) acompanhamento das medições de atrito dinâmico, realizadas pela INFRAERO com equipamento MuMeter;
- (4) coleta de dados de medições de atrito dinâmico realizadas anteriormente pela INFRAERO;
- (5) medições da macrotextura por meio do ensaio da Mancha de Areia;
- (6) medições de atrito com o Pêndulo Britânico;
- (7) medição da drenabilidade com o uso de Drenômetro;
- (8) extração de corpos de prova com sonda rotativa.

8.1 Levantamento Visual das Superfícies das Pistas

Procedeu-se ao levantamento visual das superfícies das pistas do Aeroporto de Congonhas com o objetivo de conhecer seu estado geral. Foram registrados os problemas tais como fissuras, panelas, desgastes, desagregações e excesso de borracha. O material fotográfico obtido e a descrição das áreas são apresentados no Capítulo 9.

8.2 Acompanhamento dos Serviços de Remoção de Borracha

Os serviços de remoção de borracha têm por objetivo preservar ou restaurar as condições de aderência dos revestimentos das pistas. Normalmente esses serviços são

¹Os trabalhos referentes aos itens 5, 6, 7 e 8 foram realizados pelo autor em conjunto com a equipe do LTP/EPUSP.

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 INFRAERO utiliza o processo de jato d'água a alta pressão com o uso de moto-bomba e saída do tipo barra giratória (também chamada de chuveiro rotativo) ou pistola. A pressão aplicada varia de 3.000 a 3.500 lb/pol² (21 a 24,5 Mpa) e é regulada empiricamente a partir do resultado alcançado após a passagem do jato d'água. O operador desloca o equipamento no sentido transversal a pista de modo a cobrir toda a área emborrachada. A Figura 8.1 mostra a execução dos serviços.

Em seguida, os locais do pavimento onde houve a retirada da borracha são lavados com água e solução detergente, Figura 8.2.

A Figura 8.3 mostra o aspecto dos resíduos de borracha após sua remoção da superfície da pista.

Observa-se que parte dos finos da mistura asfáltica também é removida durante a execução da limpeza. A Figura 8.4 mostra os aspectos de área contaminada superficialmente pela borracha e de uma área de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) com *grooving* recém limpada.

Um aspecto importante a ressaltar é a largura da faixa sobre a qual se aplica o jato d'água a alta pressão. Essas larguras são diferentes na pista auxiliar e na pista principal. A largura da "mancha" de borracha da pista auxiliar é de aproximadamente 14 m; a da pista principal é de aproximadamente 20 m (Figuras 7.12 e 7.13). Em cada passada da barra giratória observou-se que o operador avança cerca de 2 m para fora da área emborrachada, de modo a assegurar que a aplicação do jato d'água se dê em toda a área emborrachada.

(a)

(b)

Figura 8.1 (a) e (b) – Serviços de remoção de borracha em pista de aeroporto, com utilização da barra giratória (foto a), e com a pistola (foto b); equipamento WOMA, modelo 1502, para hidrojateamento, especialmente projetado para aeroportos. (Fotos ilustrativas cedidas pela INFRAERO)

Figura 8.2 – Após a remoção da borracha impregnada a pista é lavada com água e detergente para limpeza dos resíduos soltos.

Figura 8.3 – Aspectos dos resíduos de borracha já soltos da pista após a remoção

Figura 8.4 - CBUQ com *grooving* - pista emborrachada à esquerda e já sem borracha, após a limpeza, à direita (fotos realizadas em 18/04/2004, na pista 17R/35L do Aeroporto de Congonhas)

8.3 Acompanhamento das Medições de Atrito com o MuMeter

O MuMeter é um equipamento rebocável, constituído de três rodas, sendo duas destinadas a medir o coeficiente de atrito e a terceira para indicar as distâncias percorridas. O peso total do equipamento é de cerca de 245 Kg, dos quais 110 Kg são constituídos por lastro removível (Figura 8.5).

Os pneus têm 40 cm de diâmetro, 10 centímetros de largura e são inflados para operar com uma pressão de 70 kPa (10 lib/pol²). As duas rodas laterais, responsáveis pela medida do atrito, são montadas em braços móveis independentes e ajustadas segundo um ângulo de deslizamento lateral de 7° 30' para fora (formando um ângulo de 15° entre as duas rodas de medição).

Quando o equipamento é rebocado, as forças laterais, resultantes do deslizamento lateral das rodas medidoras, são transmitidas aos braços móveis e medidas por uma célula de carga que transmite eletronicamente as informações a um sistema de coleta de dados.

Para assegurar que o desgaste do pneu não tenha efeito nas medidas, as rodas medidoras (rodas externas) são equipadas com pneus lisos. A fabricação dos pneus é, por sua vez, submetida a elevado controle de qualidade de modo que se possa comparar resultados de diferentes equipamentos.

A calibração do equipamento é realizada sobre uma placa nova, com finalidade específica para esse fim, cujo coeficiente de atrito é de 0,77, após a sua limpeza com vassoura de pelo. São realizadas as passagens necessárias do equipamento sobre a placa, que são monitoradas por software instalado em computador acoplado ao equipamento, que fornece a liberação para início dos serviços (Figura 8.6).

O equipamento foi concebido de modo a permitir que veículos normais alcancem, rapidamente, a velocidade em que o trailer deve ser rebocado para atingir a taxa de deslizamento lateral correspondente ao atrito máximo.

A pressão dos pneus foi adotada de modo a identificar-se áreas de potencial de aquaplanagem e deve ser aferida antes do início do ensaio com os pneus ainda frios (Figura 8.7).

Para a pressão de 70kPa, o coeficiente de atrito máximo da pista é obtido com o trailer rebocado a uma velocidade de 65 km/h e equivale a 0,9 vezes a velocidade de aquaplanagem dinâmica do equipamento.

O sistema espargidor tem o objetivo de manter uma lâmina de água de 1mm de espessura em frente a cada uma das rodas medidoras, para simular as condições de pista molhada. O sistema é calibrado de modo a liberar água em uma vazão que, na velocidade de medição, produza uma lâmina d'água com espessura de 1 mm. A Figura 8.7 mostra o sistema espargidor de água em funcionamento.

Foram acompanhados os seguintes serviços de medição de atrito dinâmico, realizados pela INFRAERO, com o equipamento MuMeter:

- no dia *17 de Abril de 2004*, com o modelo Mark-6, na pista principal do Aeroporto de Congonhas;
- no dia *29 de setembro de 2005*, com o modelo Mark-4, na pista auxiliar do Aeroporto de Congonhas.

Figura 8.5 – MuMeter montado no veículo rebocador, pronto para início da corrida

Figura 8.6 – Calibração do atrito com a placa padrão e computador no veículo rebocador

Figura 8.7– Calibragem dos pneus e aspecto do sistema espargidor de água em funcionamento

8.4 Coleta de Dados de Medições Anteriores de Atrito Dinâmico

Foram coletados dados referentes às medições realizadas pela INRAERO no Aeroporto de Congonhas:

- Medição de atrito da pista principal (17R/35L) realizada em **16 de dezembro de 2001**, logo após a execução de recapeamento em CBUQ sem grooving;
- Medição de atrito da pista principal (17R/35L) realizada em **19 de janeiro de 2002**, um mês após o ensaio citado acima, com resultados de atrito após a execução de *grooving* nos primeiros 500 metros da cabeceira 17R;
- Medição de atrito da pista auxiliar (17L/35R) realizada em **25 de março de 2005**;

- Medição de atrito da pista auxiliar 17L/35R do Aeroporto Internacional de São Paulo (Congonhas) realizada em *23 de julho de 2005*.

8.5 Avaliação da Macrotextura com o Ensaio da Mancha de Areia

A textura superficial de um pavimento ou macrotextura pode ser obtida por meio de ensaio apropriado como a Mancha de Areia de acordo com o preconizado na norma ASTM E 965-96.

Esse ensaio é usado para a determinação da média da profundidade da altura da mancha de areia em superfícies de pavimentos com objetivo de obtenção das características da macrotextura.

O procedimento consiste em preencher os vazios da textura superficial do pavimento com um volume conhecido de $25.000 \text{ mm}^3 \pm 150 \text{ mm}^3$ de areia natural limpa e seca de grãos arredondados, que passa integralmente na peneira de abertura 0,3 mm e fica retida totalmente na peneira de abertura 0,15 mm, ou com micro esferas de vidro com as mesmas características granulométricas da areia (Figura 8.8).

Limpa-se a superfície com auxílio de escova de mão macia e a areia é espalhada sobre a superfície seca, com auxílio do disco de madeira, em movimentos circulares e uniformes, preenchendo os vazios da superfície e obtendo uma área final circular, conforme observado na Figura 8.9. Mede-se o diâmetro do círculo da “mancha” obtida com a areia em quatro direções com aproximação visual de 5 mm; o diâmetro médio D_m , será o resultado da média obtida nas três medições.

Figura 8.8 - Esquema do ensaio de Mancha de Areia

A altura média H_m é expressa conforme a equação:

$$H_m = \frac{4 \cdot V}{D_m^2 \cdot \pi} \quad (8-1)$$

onde:

$$V = 25.000 \text{ mm}^3;$$

D_m = diâmetro médio da mancha de areia (mm);

H_m = altura média da mancha de areia (mm).

As fotos constantes da Figura 8.9 ilustram a realização do ensaio.

Figura 8.9 – Ensaio da Mancha de Areia

Foram realizados ensaios de Mancha de Areia nas duas pistas do Aeroporto de Congonhas. Os resultados desses ensaios são apresentados no Capítulo 9.

8.6 Medição de Atrito com o Pêndulo Britânico

O Pêndulo Britânico é um equipamento portátil e sua utilização é especificada pelo método da ASTM E-303-93, cujo princípio de funcionamento baseia-se em um pêndulo com uma base de borracha, que é lançado em direção ao pavimento molhado, com o objetivo de medir-se a perda de energia, quando a sapata de borracha desliza sobre a superfície do pavimento (Figura 8.10). O valor é expresso em BPN (*British Number Pendulum*).

Figura 8.10 - Pêndulo Britânico: equipamento portátil de medida de atrito

Foram realizados ensaios de atrito com o Pêndulo Britânico nas duas pistas do Aeroporto de Congonhas. Os resultados desses ensaios são apresentados nos Anexos C e E.

8.7 Avaliação da Capacidade de Drenagem da Superfície

Foram realizados ensaios com o equipamento Drenômetro, construído com as mesmas características do drenômetro do *Institute for Highways, Railroads and Rock Engineering* (ISETH) de Zurique, apresentado na Figura 8.11. Esse método avalia a capacidade da macrotextura de drenar a água através dos canais da superfície de um pavimento; consiste em medir o tempo de escoamento de água contida em cilindro de plástico transparente, de volume 0,73 litro acoplado a um fundo com um orifício circular de 5 cm de diâmetro, em contato com a superfície.

O resultado desse ensaio é expresso em termos de tempo de escoamento ou de vazão de água escoada, cujo objetivo será de verificar o comportamento da superfície do pavimento na presença de água e identificar as diferenças de superfície e capacidade de escoamento de água de chuva.. Os resultados obtidos por meio deste ensaio estão apresentados nos Anexos C e E.

Figura 8.11 – Drenômetro

8.8 Extração de Corpos de Prova

Com o objetivo de conhecer o material que compõe a camada de rolamento das pistas do Aeroporto de Congonhas foram extraídos corpos de prova da camada de revestimento com 10 cm de diâmetro. O objetivo da extração dos corpos de prova foi o de observação de agregados e de algumas características granulométricas para auxiliar na compreensão dos resultados de textura. Não é objetivo a recomposição de traço granulométrico e a dosagem de ligante para ensaios de avaliação estrutural, mas tão somente enfatizar as características de superfície.

9 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os dados coletados, os resultados dos ensaios realizados e as conclusões são apresentados neste Capítulo.

Os trabalhos de campo foram realizados em duas épocas distintas:

- (1) no período de março a junho de 2004 na pista principal; e
- (2) no período de setembro de 2005 a março de 2006 na pista auxiliar.

Os ensaios na pista auxiliar foram realizados no período noturno, das 23:00 às 06:00h, durante o fechamento de rotina do Aeroporto de Congonhas. Os levantamentos visuais das superfícies de ambas as pistas foram realizados durante o dia, nos períodos de menor movimento, no intervalo entre operações de aeronaves, sob controle do pessoal de operações da INFRAERO.

Na pista principal, os ensaios foram realizados em parte no período noturno e em parte durante o dia, aproveitando-se um período de interdição da pista principal para manutenção (remoção de borracha).

A localização dos ensaios é aquela definida no Capítulo 7 – Planejamento do Experimento, constante da Figura 7.11, a qual orienta e serve de referência para a localização dos ensaios.

Nos ensaios com o Mu Meter que foram acompanhados, além das medições normais estabelecidas em norma (corridas a 3m de cada lado do eixo da pista), foram realizadas medições a 14 m e 18 m do eixo, na pista auxiliar. Na pista principal realizaram-se medições a 6 m, 13 m e 18 m do eixo.

Os dados brutos dos ensaios realizados nas duas pistas encontram-se no Anexo C. No corpo do texto deste Capítulo constam apenas os resultados resumidos e já trabalhados, para maior facilidade de leitura.

Sempre que possível, os resultados são identificados por cores, de acordo com o local de realização do ensaio, segundo o critério de divisão da pista em faixas, também definido no Capítulo 7, conforme mostra a Figura 9.1.

Figura 9.1 – Divisão da Pista em faixas para realização dos ensaios

Legenda:

Faixa A – *Grooving* contaminado com borracha; 14% das passagens de roda, com uma incidência média de 0,071 passagens/m/pouso;

Faixa B - *Grooving* contaminado com borracha; 32% das passagens de roda em cada uma delas, com uma incidência média de 0,077 passagens/m/ pouso;

Faixa C - *Grooving* pouco contaminado; 11% das passagens de roda em cada uma delas, com uma incidência média de 0,02 passagens/m/ pouso;

Faixa D - *Grooving* praticamente sem tráfego. Representa a situação original do pavimento com desgaste devido às intempéries;

Faixa E - Lateral da Pista: região próxima à borda do pavimento, sem *grooving* e sem tráfego. Representa a situação original do pavimento sem tráfego, apenas sujeita ao desgaste pelas intempéries.

Pontos W – eixo da pista, localizados em área de tráfego intenso, mas fora das zonas de toque (Faixa A, equidistante das cabeceiras).

9.1 Resultados para a Pista Auxiliar

A construção das pistas do Aeroporto de Congonhas data de 1950 e foram projetadas e construídas em pavimento rígido, para aeronaves da época e que pesavam em média 12.000 Kg.

A pista auxiliar (atual 17L/35R) possui 1450 m de extensão e foi utilizada preferencialmente por aeronaves de menor porte, principalmente pelas aeronaves da aviação geral até por volta do ano de 1999. Com o crescimento do movimento no Aeroporto de Congonhas e a pressão do tráfego nas horas pico, e ainda com o início das operações das aeronaves A-319 e A-320, a pista auxiliar passou a operar aeronaves de maior porte.

Nos anos de 1992/1993 a pista auxiliar sofreu sua primeira intervenção de maior porte, com a aplicação de um reforço em CBUQ com espessura variável de 5 a 7 cm sobre o pavimento rígido. Sobre a superfície desse reforço foi executado o *grooving* (ranhuras transversais).

9.1.1 Levantamento Visual da Superfície

Foi realizada uma visita para observação do estado da superfície do pavimento da pista auxiliar.

Aparentemente o pavimento apresenta-se estruturalmente estável com exceção de um problema localizado nas proximidades da cabeceira 35, onde foi executado um remendo em fevereiro de 2006 (Figura 9.2).

Figura 9.2 – Remendo próximo a cabeceira 35R

Observa-se a presença de fissuras transversais e longitudinais ao longo de toda a pista, decorrentes da reflexão das juntas do pavimento rígido sobre o qual se assenta a camada de revestimento em CBUQ.

Em grande parte as fissuras encontram-se já em fase de esborcinamento e abertas o suficiente para permitir a entrada de água (Figura 9.3). Observa-se também a presença de fissuras longitudinais nas juntas de construção do revestimento asfáltico.

Há um desgaste geral da superfície do pavimento, com a perda de finos, decorrente principalmente dos trabalhos de desemborrachamento com jato d'água a alta pressão. Em alguns pontos localizados, essa perda de finos já leva ao início de desagregação do revestimento em sua superfície (Figura 9.4).

Figura 9.3 (a), (b) e (c) – Pista auxiliar. Aspecto geral e em detalhe as fissuras do revestimento

Figura 9.4 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) – Pista auxiliar; desgaste da superfície com a perda de finos e início de desagregação

Conforme pode ser observado na Figura 9.5, na época da fotografia (outubro de 2005) era pequeno o acúmulo de borracha na pista auxiliar, mesmo nas proximidades da área de toque das aeronaves. Diferentemente do que ocorre na pista principal não se verifica a formação de uma camada densa de borracha impregnada na superfície

do pavimento e visualmente pode-se verificar que os trabalhos de desemborrachamento realmente produzem o efeito de remoção da borracha.

Figura 9.5 – Vista geral da superfície do pavimento da pista auxiliar

Pode-se ainda observar que em grande parte as ranhuras permanecem razoavelmente próximas de sua forma original, tendo apenas sofrido o desgaste dos trabalhos de desemborrachamento com a conseqüente perda de finos na superfície (Figura 9.6).

Figura 9.6 – Pista auxiliar. Aspecto geral do estado das ranhuras

9.1.2 Tipo de Revestimento Asfáltico Existente na Pista Auxiliar

O revestimento asfáltico, executado há mais de 10 anos, é um concreto asfáltico (também conhecido por concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ), com graduação contínua, bem graduada, densa e fechada.

Pelo aspecto visual dos corpos de prova extraídos pode-se verificar que o diâmetro máximo dos agregados é de 19 mm, com nominal de 12,5 mm. Os agregados são de granito/gnaiss com boa microtextura pela análise visual-táctil. Dada a distribuição granulométrica, o volume destes agregados não é tão expressivo na mistura, sendo esta constituída principalmente por agregados miúdos (passantes na peneira de abertura 4 ou 4,76 mm), areia natural e fíler. Dada a seleção granulométrica, pode-se explicar a macrotextura na região denominada de “E” acusar altura média de mancha de areia de apenas 0,4 mm, ou seja fechada. Há poucos granulares de maiores dimensões na superfície, o que torna a mistura mais fechada, com menos rugosidade superficial.

Dada a graduação escolhida, que gera uma macrotextura fechada e, portanto, não contribui efetivamente para o aumento do atrito, foi-se obrigado a executar o “*grooving*” para aumentar a presença de canais para drenar a água de superfície e aumentar a o atrito em pista molhada.

Figura 9.7 – Corpo de prova, diâmetro 10 cm, lateral da pista auxiliar.

Devido ao uso intensificado da pista auxiliar por outros tipos de aeronaves mais pesadas e a realização de limpezas com água sob pressão nos últimos anos, há várias áreas da pista com desprendimento de agregados (desagregação). Este fator causa

rugosidade superficial gerada, ou seja, tende a aumentar os valores de altura média do ensaio de Mancha de Areia, levando ao aumento de “canais” para drenagem da água superficial.

O fissuramento do CBUQ deve-se à reflexão de trincas das placas de concreto subjacentes, que é acelerada neste tipo de graduação fechada. Há também abertura de fendas junto às juntas construtivas longitudinais de CBUQ. A entrada de água acelera o processo de desagregação das misturas asfálticas, pois se intensifica a perda de agregados e problemas de adesividade.

9.1.3 *Análise Estatística dos Resultados*

A análise estatística tem por objetivo fundamentar e sustentar as conclusões que envolvem comparações entre as grandezas de atrito e de textura, resultados dos ensaios. Foi utilizada a Análise de Variância (*ANOVA*) em um Modelo de Efeitos Fixos, para comparar os resultados de atrito e de macrotextura em cada par de Faixas de Pista e verificar se existe diferença entre os tratamentos.

As Hipóteses testadas são:

- (1) para o atrito com o Pêndulo Britânico

$$H_0: (BPN)_i = (BPN)_j \quad (9.1)$$

$$H_1: (BPN)_i \neq (BPN)_j \quad (9.2)$$

- (2) para a macrotextura com a Mancha de Areia

$$H_0: (Hm)_i = (Hm)_j \quad (9.3)$$

$$H_1: (Hm)_i \neq (Hm)_j \quad (9.4)$$

onde:

BPN = valor do atrito medido com o Pêndulo Britânico;

Hm = valor da altura da macrotextura com o ensaio de Mancha de Areia;

i = Faixa de Pista A, B, C, D e E;

J = Faixa de Pista A, B, C, D e E.

As análises foram realizadas por meio do *software Excel* com a Ferramenta Análise de Dados (*ANOVA – Fator Único*). As Tabelas de ANOVA constam do Anexo B. O resumo dos resultados é apresentado nas Tabela 9.1, 9.2 e 9.3, em Matrizes, informando o *Nível Observado de Significância “p”* (também chamado de *Nível Descritivo do Teste*) obtido na análise, para cada um dos pares comparados.

Entendendo-se *Nível de Significância* como a ***probabilidade de rejeição de uma Hipótese Nula Verdadeira***, pode-se avaliar estatisticamente quanto um fator (por exemplo: atrito) pode ser considerado igual ou diferente nos pares de Faixas de Pista analisados.

Por exemplo, na Tabela 9.1 o valor **92,9%** no cruzamento da Linha W com a Coluna A indica que, pela Análise de Variância, há 92,9% de probabilidade de rejeitar-se a uma hipótese verdadeira, caso rejeite-se a hipótese nula do teste. Ou seja, caso rejeite-se que os atritos longitudinais das Faixas A e W sejam iguais, há 98% de probabilidade de se cometer um erro. Isto é uma indicação estatística robusta de que os valores dos atritos transversais medidos nas Faixas A e W apresentam a mesma média e variância, ou fisicamente falando, o atrito longitudinal na Faixa A é igual ao atrito longitudinal da faixa W.

De outro modo, na Tabela 9.3 o valor 2,6% no cruzamento da Linha D com a Coluna C indica que, pela Análise de Variância, há apenas 2,6% de probabilidade de rejeitar-se a uma hipótese verdadeira, caso se rejeite a Hipótese nula do teste. Ou seja, caso rejeite-se que as macrotexturas das Faixas C e D sejam iguais, há apenas 2,6% de probabilidade de se cometer um erro. Isto é uma indicação estatística robusta de que os valores das macrotexturas medidas nas Faixas C e D apresentam média e variância diferentes, ou fisicamente falando, a macrotextura na Faixa C é diferente da macrotextura da Faixa D.

A seguir constam as Matrizes com os valores dos níveis de significância observados, para comparação do atrito e macrotextura em cada par de Faixas de pista. Foram destacados em verde os valores mais baixos (em torno de 10% ou menos) que indicam ***diferenças*** entre pares no fator analisado.

As conclusões apresentadas baseiam-se nesta análise estatística.

Tabela 9.1 – Matriz dos Níveis Observados de Significância (p%) na ANOVA de valores de atrito medidos pelo Pêndulo Britânico no sentido longitudinal, em pares de faixas da pista auxiliar

	A	B	C	D	E
A					
B	75,0%				
C	39,0%	50,0%			
D	6,6%	10,2%	32,8%		
E	27,0%	10,6%	22,3%	6,4%	
W	92,9%	95,0%	70,8%	38,8%	53,3%

- Indica diferença no atrito longitudinal medido entre a Faixa *i* e *j*

Tabela 9.2 – Matriz dos Níveis Observados de Significância (p%) na ANOVA de valores de atrito medidos pelo Pêndulo Britânico no sentido transversal, em pares da faixas de pista auxiliar e entre atrito longitudinal e transversal na mesma faixa

	TB	TC	TD	E (*)	B	C	D
TB					0,0%		
TC	5,5%					3,6%	
TD	6,0%	47,2%					8,9%
E	0,0%	10,1%	47,1%

- Indica diferença no atrito transversal medido entre a Faixa *i* e *j*

(*) – Na Faixa E, sem *grooving* e sem tráfego, praticamente não há diferença entre o atrito longitudinal e transversal

Tabela 9.3 - Matriz dos Níveis Observados de Significância (p%) na ANOVA de valores macrotextura em pares de faixas da pista auxiliar

	A	B	C	D	E
A					
B	41,4%				
C	34,1%	99,2%			
D	0,7%	5,2%	2,6%		
E	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	
W	5,5%	15,7%	10,5%	90,7%	0,0%

- Indica diferença na macrotextura medida entre a Faixa *i* e *j*

9.1.4 Análise da Macrotextura da Pista Auxiliar

Foram realizados diversos ensaios de mancha de areia para analisar variações ao longo da pista, considerando as trajetórias mais prováveis das rodas no momento do pouso, conforme descrito no Capítulo 7 e Figura 9.1.

O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 9.4. Os dados brutos encontram-se no Anexo C.

Tabela 9.4 - Valores médios de macrotextura para a pista auxiliar

Faixas de Pista	A	B	C	D	E	W
Macrotextura Média (mm)	1,51	1,44	1,43	1,24	0,41	1,23
St (desv. pad.)	0,21	0,21	0,19	0,20	0,09	0,20
Coef. de Variação (%)	14,0	14,8	13,2	16,4	22,7	16,2

Ensaio realizado em 6 e 8/12/2005. A, B, C, D e W são as faixas de pista definidas no Capítulo 7 e Figura 9.1

Os resultados mostram que, na Faixa E (sem *grooving* e sem tráfego), a textura é fina (altura entre 0,3 e 0,6 mm), com média de 0,41 mm para a altura da Mancha de Areia.

Estes dados mostram tratar-se de um CBUQ fechado de macrotextura fina. Para ilustração, atualmente exige-se para rodovias em asfalto no Estado de São Paulo macrotextura de 0,6 mm a 1,2 mm, de modo a promover uma textura que auxilie na aderência pneu/pavimento em dias de chuva, ou seja de classificação média a grossa (macrotextura fina para altura média de areia menor que 0,4 mm; macrotextura média entre 0,4 e 0,8 mm e grossa entre 0,8 e 1,2 mm). O Comando da Aeronáutica no Brasil exige macrotextura de no mínimo 0,5 mm para pistas de aeroportos em operação e de mais de 1,0 mm para revestimentos novos (DAC, 2001). A ICAO recomenda uma macrotextura mínima de 0,625 mm para pistas em uso e de no mínimo 1,0 mm para revestimentos novos (ICAO, 1994). A FAA recomenda que quando a textura situar-se na faixa compreendida entre 0,76 mm (0,03 pol) e 0,40 mm (0,016 pol) deve-se iniciar os planos para corrigir a deficiência de textura no prazo de 1 ano. No caso de pistas novas a FAA exige no mínimo 1,14 mm (0,045 pol) de macrotextura (FAA, 1997).

Após a execução do *grooving*, a textura superficial apresenta uma melhoria para a aderência em dias de chuva pois forma canais de circulação de água, removendo em parte a água que se interpõe entre o pneu e o pavimento. A média dos valores de mancha de areia para os pontos na Faixa D, CBUQ com *grooving* não emborrachado, é de 1,24 mm. Se fosse teoricamente correto poder classificar uma superfície asfáltica com *grooving*, a macrotextura da faixa D da pista auxiliar seria “grossa” e atenderia às exigências e recomendações do DAC, da ICAO e da FAA.

Deve-se entender, no entanto, que a textura é resultante da graduação dos agregados, preferencialmente os graúdos, próximos à superfície, parcialmente expostos, que formam o "relevo" da superfície e conferem sua característica¹.

O *grooving* força a formação de canais de escoamento preferencial de água, o que ajuda a diminuição de lâmina d'água, mas não tem o mesmo significado físico que uma textura superficial grossa formada por agregados graúdos dispostos de forma aleatória, com numerosos canais de circulação e escoamento de água. Mesmo assim ***a Altura Média (Hm) do ensaio de Mancha de Areia realizado sobre o revestimento com grooving é um indicador objetivo da capacidade de drenagem dessa superfície***, como será mostrado mais adiante.

A forte correlação entre os valores de drenabilidade e de macrotextura foi citada por Momm em 1998. Essa correlação fica fortemente evidenciada no gráfico da (Figura 9.8) para a Pista Auxiliar do Aeroporto de Congonhas.

Dessa forma, fica demonstrado que, para o revestimento estudado, a capacidade de escoar água para fora da área de contato pneu-pavimento está diretamente relacionada à altura média da macrotextura (Hm), obtida com o ensaio da Mancha de Areia, e apresenta-se consistente também quando aplicada sobre o *grooving*. Neste caso a Altura Média (Hm) pode servir para indicar, comparativamente, se o regime de rolamento em pista molhada acontece em situação mais próxima à Fase (a), regime mais "seco", ou mais próxima à Fase (c), com área molhada maior, dentro do *Modelo das 4 Fases da Hidroplanagem Combinada* (Capítulo 4, Figura 4.15)

¹ Vide Figura 5.1 – Capítulo 5

Figura 9.8 – Correlação entre os ensaios de Mancha de Areia e drenabilidade. Os dados brutos encontram-se no Anexo C

Na Faixa C, CBUQ com *grooving* pouco emborrachado, a média das alturas de Mancha de Areia é de 1,4 mm.

Na Faixa B, CBUQ com *grooving* emborrachado, que é a área de maior densidade de passagens de rodas, pode-se observar uma variação da altura média de Mancha de Areia entre 1,1 mm e 1,8 mm, com média de 1,4 mm.

A Faixa A apresenta valores de macrot textura variando de 1,2 mm a 1,9 mm, com altura média de 1,5 mm.

Embora a média dos valores de macrot textura medidos na Faixa A seja superior às médias dos valores medidos das Faixas B e C (Tabela 9.4), a análise estatística mostra que não se pode rejeitar a Hipótese de que as macrot texturas das Faixas A, B e C sejam iguais (Tabela 9.3). É importante observar que as Faixas A e B são as faixas submetidas à maior densidade de passagens de roda e, em consequência, são as faixas onde ocorre o maior acúmulo de borracha e a maior ação de polimento pelo tráfego. A Faixa C, mesmo com densidade de passagens menor, apresenta a mesma textura das Faixas A e B. Isso ocorre devido à ação dos serviços de

desemborrachamento que é aplicado em toda a área emborrachada. O jato d'água a alta pressão remove, além da borracha, os finos da superfície da mistura asfáltica, tornando próximas as macrotexturas das faixas A, B e C.

Um resultado interessante é o valor da macrotextura nos pontos W1, W2 e W3, localizados em área de tráfego intenso, mas fora das zonas de toque (Faixa A, afastados cerca de 700 m da cabeceira 17L, vide Figura 7.11 – Cap. 7). Nessa região não há acúmulo de borracha e, em consequência, o revestimento não sofre a agressão dos serviços de limpeza. Observa-se a semelhança da macrotextura entre os valores na Faixa D e os valores de medidas dos pontos W, em cerca de 1,2 mm. Ambas as Faixas possuem *grooving* e não sofrem as agressões do desemborrachamento.

O gráfico apresentado na Figura 9.9 mostra os perfis da macrotextura medida com o ensaio da Mancha de Areia em seções transversais da pista, afastadas de 340 m e 400 m da cabeceira 17L.

Figura 9.9 – Comportamento da macrotextura em função do afastamento ao eixo da pista

Outro aspecto importante, com forte influência nos valores de macrotextura, é a presença das fissuras longitudinais nas juntas de construção do CBUQ e das fissuras

decorrentes da reflexão da paginação do pavimento rígido subjacente, tanto no sentido longitudinal, como no transversal. Essas fissuras interferem nos valores do ensaio de Mancha de Areia, aumentando a altura média, em função dos vazios das próprias fissuras e em função dos processos de perda de finos e desagregação, presentes nas áreas próximas às fissuras.

9.1.5 *Análise do Atrito do Pêndulo Britânico na Pista Auxiliar*

Foram realizados ensaios de determinação de atrito por meio do Pêndulo Britânico nas Faixas A, B, C, D, E e W. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 9.5.

Tabela 9.5 - Valores médios de atrito com o Pêndulo Britânico

Faixas de Pista	A	B	TB	C	TC	D	TD	E	W
Atrito Médio Pêndulo (BPN)	79,6	80,0	62,8	81,8	72,8	85,3	75,9	77,8	79,9
Sa (desv. pad.)	3,4	2,1	6,7	7,9	6,4	9,4	5,5	3,2	7,2
Coef. de Variação (%)	4,3	2,7	10,6	9,6	8,7	11,0	7,2	4,1	9,0

Ensaio realizado em 8/12/2005. A, B, C, D e E são as faixas de pista definidas no Cap 7 (Figura 7.11). TA, TB, TC e TD são as medições realizadas no sentido transversal à pista (paralelo às ranhuras) nas respectivas faixas. W são medições realizadas no eixo da pista, fora da zona de toque, afastados cerca de 700 m da cab 17L

Inicialmente, analisou-se o efeito da macrotextura sobre o atrito medido com o Pêndulo Britânico. Para isso foi construído o gráfico de dispersão dos pares de valores *Atrito (BPN) x Macrotextura (mm)* e calculado o *Coefficiente de Correlação* (chamado simplesmente de *Correlação*)² para esses dados.

² A Correlação serve para determinar se dois conjuntos de dados se movem juntos — isto é, se os maiores valores de um conjunto estão associados com os maiores valores do outro (correlação positiva), se os menores valores de um conjunto estão associados com os maiores valores do outro (correlação negativa), ou se os valores dos dois conjuntos não se relacionam (correlação próxima a zero).

Figura 9.10 - Gráfico de dispersão dos pares de valores *Atrito (BPN)* x *Macrotextura (mm)*. Os dados brutos encontram-se no Anexo D

O resultado obtido para a correlação foi:

$$\text{Correlação}_{(Atrito, Macrotextura)} = 0,122;$$

um valor baixo, que indica que esses dados não são relacionados. Em outras palavras, a macrotextura não influi no valor do atrito determinado pelo Pêndulo Britânico. Ou ainda, por exclusão, infere-se que as leituras efetuadas com o Pêndulo Britânico, no revestimento da pista auxiliar, estão basicamente relacionadas à **microtextura** dos agregados.

A seguir é feita a análise do atrito com o Pêndulo Britânico para as Faixas da pista.

Na Faixa E (pista sem *grooving* e sem tráfego), tem-se que a média do atrito pelo Pêndulo Britânico é de 77,8 BPN. Nesta situação, os agregados que não sofreram nem a ação do tráfego, nem a ação dos serviços de limpeza, fornecem valores elevados de atrito. Este valor no entanto não indica se o agregado é potencialmente susceptível ao polimento, pois nessa Faixa o pavimento sofre apenas a ação das intempéries.

Na Faixa D, constituída por CBUQ com *grooving* não emborrachado, o teste foi realizado em duas direções: transversal e longitudinal à pista. Na transversal à pista, o *grooving* não representa um impedimento ao escorregamento do Pêndulo Britânico, pois o deslocamento deste é paralelo às ranhuras. Nesta direção, foram encontrados valores de 75,9 BPN. Na Faixa D, a microtextura, traduzida pelo ensaio do Pêndulo Britânico na transversal, se mantém próxima aos valores da superfície sem tráfego (77,8 BPN na Faixa E), fato confirmado pelo teste estatístico (Tabela 9.2). Isso decorre do fato de que, nesse local da pista praticamente não há tráfego e, em consequência, não há acúmulo de borracha, sendo portanto, desnecessária a limpeza. Ou seja, na Faixa D os agregados expostos na superfície não sofreram ação de polimento do tráfego, nem do jato d'água a alta pressão, da mesma forma que não sofreram os agregados da Faixa E.

Na Faixa D, na direção longitudinal à pista (movimento do Pêndulo Britânico transversal às ranhuras), o valor médio do atrito é 85,3 BPN. Nota-se que o efeito das ranhuras produz um incremento significativo no valor do atrito. Esse incremento se manifesta nas 3 Faixas: B, C e D.

A análise estatística mostra que não há diferença no atrito medido no sentido transversal entre as faixas C, D. Entretanto, na faixa B, o atrito transversal é bem menor, reforçando a hipótese que houve perda de microtextura pela ação de polimento dos agregados. Os trabalhos de desemborrachamento são aplicados nas Faixas B e C, nos mesmos períodos e com o mesmo processo (jato d'água a alta pressão). Portanto a ação da limpeza não explica a diferença entre o atrito transversal das Faixas B e C, visto que ambas recebem o mesmo tratamento. Entretanto, analisando-se o tráfego, observa-se uma diferença significativa entre as densidades de passagens de roda para as Faixas B e C (Tabela 9.6). O polimento do agregado, causado pela ação do tráfego, parece explicar razoavelmente o valor de atrito mais baixo medido na Faixa B.

Tabela 9.6 – Comparação das solicitações entre as Faixas B e C

Faixa na Pista	Ação da Limpeza	Densidade de Tráfego *
Faixa B	SIM	0,077
Faixa C	SIM	0,020

(*) A densidade de tráfego em cada Faixa de pista é definida no Capítulo 7 e sua unidade é:
passagens de roda/m/passagem de aeronave

Outro aspecto interessante é a semelhança dos resultados de atrito longitudinal da Faixa A, medidos entre 200 e 500 m da cabeceira 17L, e dos pontos W, afastados cerca de 700 m da cabeceira 17L, também na Faixa A da pista. A indicação estatística é que os atritos nesses dois locais possuem a mesma estrutura. Isto reforça a afirmação de que, no que se refere a microtextura, o efeito do tráfego é mais significativo do que o efeito dos serviços de limpeza, visto que o tráfego é o mesmo (ambos na Faixa A) e que somente o trecho de pista compreendido entre 200 e 600 m da cabeceira 17L é submetido ao jato d'água a alta pressão. Nota-se que, também neste caso, o desemborachamento com a conseqüente perda de finos, não influencia no atrito medido com o Pêndulo Britânico.

O gráfico constante da Figura 9.11 mostra a variação **pontual** do atrito longitudinal, medido com o Pêndulo Britânico, em seções transversais localizadas a 340 m e 400 m da cabeceira 17L.

O gráfico da Figura 9.12 mostra os valores **médios** de atrito em cada faixa de pista, medidos com o Pêndulo Britânico, no sentido transversal à pista, entre 200 e 500 m afastados da cabeceira 17L.

O gráfico da Figura 9.13 mostra comparativamente a variação dos atritos médios longitudinal e transversal, medidos na zona de toque da cabeceira 17L. Observa-se nitidamente o efeito do *grooving* no atrito medido no sentido longitudinal (transversal às ranhuras), na faixa dos 30 m centrais (15 m para cada lado do eixo). Observa-se também o efeito do tráfego sobre o atrito para as duas direções medidas, longitudinal e transversal. Os valores de atrito crescem à medida que se afasta do eixo: - quanto menor o tráfego, maior o atrito. A análise estatística indica essas diferenças (Tabela 9.2).

Figura 9.11 – Valores pontuais do atrito longitudinal em função do afastamento ao eixo da pista para seções localizadas a 340 e 400m da cabeceira 171

Figura 9.12 - Comportamento do atrito transversal médio, por faixa de pista, em função do afastamento ao eixo da pista, para valores medidos na zona de toque da cabeceira 17L

Figura 9.13 – Variação do atrito longitudinal e transversal médios em função do afastamento ao eixo da pista, medidos na zona de toque

9.1.6 Análise do Atrito do MuMeter para a Pista Auxiliar

As análises dos resultados de atrito com o MuMeter foram baseadas nos relatórios das medições feitas em:

- 26 de março de 2005;
- 23 de julho de 2005 e
- 30 de setembro de 2005.

Os resultados encontram-se na Tabela 9.7, Tabela 9.8 e Tabela 9.9. Os relatórios originais das medições com o MuMeter encontram-se no Anexo C.

A medição realizada em 30 de setembro de 2005 foi acompanhada e introduziu-se a realização de duas corridas adicionais a 14 e 18 m afastadas do eixo, além das medições previstas em norma a 3m para cada lado do eixo. O objetivo dessas medições adicionais é o de avaliar o atrito com o MuMeter também nas Faixas D e E

da pista, permitindo o mesmo tipo de análise feita para a textura e atrito com o Pêndulo Britânico.

Tabela 9.7 – Valores do MuMeter para a pista auxiliar completa

Faixas de Pista	3m esq Faixa B	3m dir Faixa B	14m dir Faixa D	18m dir Faixa E
Atrito Médio (Mu)	0,69	0,65	0,58	0,46
1o. Terço (cabeceira 17L)	0,69	0,66	0,56	0,47
2o. Terço (central)	0,71	0,66	0,61	0,45
3o. Terço (cabeceira 35R)	0,67	0,61	0,57	0,44

Ensaio realizado em 30/9/2005

Tabela 9.8 - Valores do MuMeter para a pista auxiliar completa

Faixas de Pista	3m esq Faixa B	3m dir Faixa B
Atrito Médio (Mu)	0,62	0,60
1º. Terço (cabeceira 17L)	0,61	0,59
2º. Terço (central)	0,65	0,60
3º. Terço (cabeceira 35R)	0,60	0,60

Ensaio realizado em 23/7/2005

Tabela 9.9 - Valores do MuMeter para a pista auxiliar completa

Faixas de Pista	3m esq Faixa B	3m dir Faixa B
Atrito Médio (Mu)	0,52	0,50
1º. Terço (cabeceira 17L)	0,52	0,50
2º. Terço (central)	0,53	0,49
3º. Terço (cabeceira 35R)	0,52	0,51

Ensaio realizado em 26/3/2005

Observa-se uma melhora sensível no atrito entre os levantamentos de março e julho de 2005, decorrente dos serviços de desemborrachamento (na Faixa B passou de valores da ordem de 0,50 para valores da ordem de 0,60).

Os valores de atrito do MuMeter representam as médias dos trechos medidos, seja em cada um dos terços de pista ou para a pista inteira.

Para efeito de análise neste trabalho, de modo que se possa comparar os resultados do MuMeter com os resultados do Pêndulo Britânico e da Mancha de Areia, são tomadas as médias dos valores de atrito dinâmico do MuMeter na Área de Interesse, ou seja, nos mesmos locais onde foram realizadas as medições com o Pêndulo Britânico e com a Mancha de Areia.

Tabela 9.10 – Valores do MuMeter na área de interesse:
região situada entre 200 e 500 m afastados da cabeceira 17L

Posição em relação ao eixo da Pista	3m esq Faixa B	3m dir Faixa B	14m dir Faixa D	18m dir Faixa E
Atrito Médio entre 200 e 500 m da cab 17L	0,71	0,68	0,56	0,46
200 a 300 m da cab 17L	0,67	0,67	0,48	0,43
300 a 400 m da cab 17L	0,73	0,69	0,61	0,47
400 a 500 m da cab 17L	0,72	0,67	0,60	0,49

O relatório original de medição do MuMeter encontra-se no Anexo C; ensaio realizado em 30/set/2005

A Tabela 9.10 mostra que a média do atrito dinâmico na Faixa E, (0,46 para o revestimento sem *grooving*, sem borracha e sem tráfego) é significativamente inferior à média da faixa B (0,68 a 0,71 para o *grooving* emborrachado). O mesmo ocorre com a Faixa D (revestimento com *grooving* não emborrachado), também é significativamente inferior ao atrito da Faixa B, embora a diferença seja um pouco menor (de 0,55 para 0,68 a 0,71) .

Isso ocorre pelas seguintes razões:

- (1) a perda por histerese devido ao efeito do *grooving* é significativamente maior do que a do revestimento sem *grooving*. É evidente que a ação das ranhuras na banda de rodagem do pneu, rolando em condição de *deslizamento lateral* (condição de operação do MuMeter), gera perdas por histerese muito maiores do que aquelas geradas na mesma roda operando no mesmo revestimento sem *grooving*; portanto é natural que o atrito dinâmico nas Faixas B e D sejam maiores do que o da Faixa E;

- (2) a saída da água da área de contato pneu-pavimento é favorecida pelo *grooving*. Isto resulta que, em um revestimento molhado e com *grooving*, o regime de rolamento ocorre em uma situação mais próxima à Fase 1 do modelo de *hidroplanagem combinada* (regime mais "seco"), do que aquela que ocorreria em um pavimento sem *grooving* (vide Figura 4.15 – Cap 4). Neste caso, a influência positiva para o atrito dinâmico é resultado da ação do atrito por adesão que encontra condições mais favoráveis para atuar: - quanto menos água na área de contato, maior o atrito dinâmico devido à adesão. A macrotextura, removendo a água da área de contato, cria melhores condições para que a microtextura possa atuar;
- (3) os mecanismos descritos nos itens (1) e (2) anteriores estão intimamente ligados a macrotextura do revestimento. Esse fato é demonstrado pelos pares de valores *macrotextura x atrito dinâmico* para as Faixas B, D e E (Tabela 9.10): - quanto maior a macrotextura, maior é o atrito dinâmico em pista molhada;
- (4) resta ainda explicar a diferença do atrito dinâmico entre as faixas B e D. Embora ambos os revestimentos possuam *grooving* a macrotextura da Faixa B é maior. Como já citado anteriormente, o desemborachamento realizado com jato d'água a alta pressão remove, além da borracha, os finos da superfície asfáltica, aumentando a altura da macrotextura e, em consequência o atrito dinâmico em pista molhada. A Faixa D, sem tráfego e sem acúmulo de borracha, não sofre a remoção de finos causada pelo desemborachamento, fato que é mostrado pelo valor da macrotextura.

A Tabela 9.11 e Figura 9.14 mostram a relação entre a macrotextura e os valores de atrito dinâmico com o MuMeter.

Embora com apenas 3 pontos o gráfico é representativo do comportamento do atrito dinâmico da superfície da pista pois, cada um dos pontos é o resultado da média de diversos ensaios no caso da macrotextura e, de medição contínua com o MuMeter, realizados nos mesmos locais, em uma extensão de cerca de 300 m de pista.

Observa-se a forte relação entre o atrito dinâmico em pista molhada com a profundidade média da macrotextura.

Tabela 9.11 – Valores de atrito dinâmico com o MuMeter e de macrotextura para as faixas de pista

Faixa da Pista	B	D	E
Atrito (Mu)	0,69	0,56	0,46
Macrotextura (mm)	1,4	1,2	0,4

Figura 9.14 – Comportamento do atrito dinâmico com a macrotextura – área compreendida entre 200 m e 520 m afastados da cab. 17 L

9.1.7 Ensaios Adicionais na Pista Auxiliar

Posteriormente, foi realizada outra bateria de ensaios com o Pêndulo Britânico, Mancha de Areia e de drenabilidade no dia 20 de abril de 2006.

O objetivo dessa nova campanha é o de validação das análises e conclusões elaboradas a partir dos dados coletados anteriormente. Para isso, realizaram-se ensaios dentro das Faixas definidas no Capítulo 7, na seção transversal localizada a cerca de 300 m da cabeceira 17L. Propositadamente tomou-se uma localização diferente da dos ensaios anteriores. O esquema da Figura 9.12 mostra essa localização.

Figura 9.12 – Esquema de localização dos ensaios adicionais

O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 9.12.

Tabela 9.12 – Resumo dos resultados de atrito com o Pêndulo Britânico nos sentidos longitudinal e transversal, na seção a 300 m da cabeceira 17L

	A	B	C	D	E
Atrito Long. (BPN)	85,4	80,6	95,8	94,6	81,4
Atrito Transv. (BPN)	73,6	69,7	78,9	81,0	82,0

Ensaios realizados em 20/04/2006

O gráfico da Figura 9.13 mostra o comportamento do atrito longitudinal e transversal ao longo da seção transversal a cerca de 300 m da cabeceira 17L. Para facilidade de leitura, os dados foram identificados no gráfico com as cores correspondentes às respectivas Faixas de pista onde se localizam. Observa-se a semelhança no formato das curvas, desde o eixo da pista até o limite do *grooving*. Na faixa lateral sem *grooving* (afastada mais de 15 m do eixo), constam apenas os valores das medidas de atrito longitudinal, pois não existe o efeito do *grooving*.

Figura 9.13 – Comportamento do atrito longitudinal e transversal em função do afastamento ao eixo da pista na seção localizada a cerca de 300 m da cabeceira 17L; valores médios para cada Faixa de pista

Observando-se o gráfico pode-se afirmar que:

- (1) o atrito no sentido longitudinal é maior do que no transversal; o *grooving* eleva o valor do atrito na situação em que o deslocamento do Pêndulo Britânico se dá transversalmente às ranhuras;
- (2) nas faixas de maior intensidade de tráfego (Faixas A e B) o atrito longitudinal é menor do que nas faixas de menor intensidade de tráfego (Faixas C e D);

- (3) o ensaio do Pêndulo Britânico no sentido transversal praticamente não é afetado pelo *grooving*; note-se a semelhança (indicada estatisticamente nos ensaios anteriores) entre os valores de atrito transversal nas Faixas D e E (sendo D com *grooving* e E sem *grooving*); o que as faixas D e E tem em comum é a ausência de tráfego;
- (4) o atrito transversal na Faixa C é menor do que o da Faixa E em função do efeito do tráfego;
- (5) o atrito transversal na Faixa B é menor do que o atrito nas Faixas C, D e E (vide Tabela 9.2); este fato também evidencia o polimento dos agregados pela ação do tráfego.

O comportamento da macrotextura é mostrado nos gráficos constantes das Figuras a seguir.

Figura 9.14 – Comportamento da macrotextura em relação ao afastamento do eixo da pista na seção localizada a cerca de 300 m da cabeceira 171

Figura 9.15 – Repetição do gráfico da Figura 9.14, omitindo-se o dado de valor de atrito mais baixo (Faixa E), para melhorar a visualização das diferenças das macrotexturas entre as Faixas A, B, C e D

Pela análise dos gráficos pode-se afirmar que:

- (1) a macrotextura apresenta uma certa homogeneidade até cerca de 8 m do eixo, (Faixas A, B e C, emborrachadas), onde se aplica o jato d'água a alta pressão para limpeza;
- (2) evidentemente a Faixa E, sem *grooving*, apresenta estrutura de macrotextura diferente das demais (bastante menor);
- (3) a Faixa D, embora com *grooving*, apresenta altura de macrotextura menor do que as das Faixas A, B e C; essa diferença aponta o efeito de remoção dos finos da mistura asfáltica; neste caso a ação do tráfego afeta indiretamente a textura: o tráfego causa emborrachamento gerando a necessidade de limpeza da pista; os serviços de limpeza removem os finos e aumentam a macrotextura das Faixas A, B e C.

De maneira geral, os resultados da campanha adicional de ensaios confirmam as conclusões descritas nos itens 9.1.3 e 9.1.4.

9.2 Resultados para a Pista Principal

A pista principal do Aeroporto de Congonhas foi construída em 1950, em pavimento rígido, com placas de aproximadamente 7 m x 3,5 m e com 30 cm de espessura.

O grande aumento de peso das aeronaves comerciais que se verificou desde a época da sua construção até o presente, bem como o crescimento do tráfego aéreo, submeteram o pavimento da pista a solicitações estruturais bem maiores do que aquelas sofridas inicialmente quando as aeronaves eram mais leves e o tráfego menor.

Este fato ocorreu com maior intensidade na pista principal do aeroporto (17R/35L), que, pelo seu comprimento maior e maior número de equipamentos de proteção ao voo, foi sempre a pista mais utilizada, principalmente pelas aeronaves de maior porte¹.

Desde a sua construção, a pista 17R/35L passou por três grandes intervenções:

- 1980, recuperação e reforço em CBUQ com grooving;
- 1998, reforço em CBUQ com grooving; e
- 2001, correção de greide e reforço em CBUQ com grooving.

Durante o ano de 2004 e no decorrer do ano de 2005 houve um grande esforço na manutenção das condições de atrito proporcionadas pela superfície da pista principal, que já apresentava considerável contaminação de resíduos de borracha, com execução intensiva de serviços de limpeza por meio de jato d'água a alta pressão.

Em meados de 2005 foi executada troca parcial do revestimento, nas áreas de toque, por meio de fresagem e reposição do revestimento em CBUQ sem a aplicação de *grooving*.

É importante se destacar que os resultados de atrito com o Pêndulo Britânico e de macrotextura apresentados a seguir são os dos ensaios realizados anteriormente à substituição do revestimento nas áreas de toque (obra de 2005), ou seja, sobre revestimento em CBUQ com *grooving*, em situação de pista bastante contaminada

¹ Cerca de 80% do tráfego do Aeroporto de Congonhas utiliza a pista principal

por borracha, imediatamente antes do início de mais uma seção de desemborrachamento. O material fotográfico apresentado a seguir ilustra esta situação.

9.2.1 Levantamento Visual da Superfície

Foi realizado o levantamento visual das condições da superfície da pista principal no período diurno, durante sua interdição para serviços de manutenção (desemborrachamento).

Na Faixa E, laterais em CBUQ e sem *grooving*, o revestimento apresenta-se íntegro, com aspecto de pavimento novo, conforme pode ser visualizado na Figura 9.16.

(a)

(b)

Figura 9.16 – (a) Faixa E, Detalhe do CBUQ da lateral (denso, textura fina e com certa segregação de massa); (b) local da lateral da pista em CBUQ sem *grooving*

Na Faixa D, *grooving* sem tráfego (Figura 9.17), observa-se também o revestimento com aspecto de novo, com as ranhuras perfeitas e sem contaminação.

Figura 9.17 – Faixa D; detalhe do CBUQ com *grooving* em local da pista não emborrachada

Na Faixa C, Figura 9.18, já se percebe problema causado pelo acúmulo de borracha e o prejuízo para a macrotextura, pois os vazios da superfície encontram-se preenchidos de borracha. Da mesma forma a borracha começa a impedir o contato direto dos agregados com o pneu, causando prejuízo à microtextura. Embora a Faixa C não seja a faixa com a maior densidade de tráfego observa-se um grau acentuado de contaminação.

Figura 9.18 – Faixa C; detalhe do CBUQ com *grooving* em local da pista emborrachada impregnando a superfície do CBUQ

Nas Faixas A e B, CBUQ com *grooving* bastante contaminado por borracha, observa-se na Figura 9.19, lado esquerdo, o completo comprometimento da superfície, totalmente colmatada pelos resíduos de borracha dos pneus das aeronaves. Na parte direita da foto pode-se perceber o resultado dos serviços de remoção de borracha, reconstituindo a geometria das ranhuras. As Faixas A e B são as faixas com a maior densidade de tráfego.

Figura 9.19 – Faixas A e B; revestimento com *grooving* bastante contaminado; detalhe do revestimento antes e após o desemborrachamento

A Figura 9.20 mostra uma vista geral da pista principal em seu terço mais contaminado pelo tráfego, região entre 300 e 600 m afastados da cabeceira 17R (zona de toque). Pode-se observar o aspecto "brilhante" do revestimento, indicando o grau de contaminação da superfície.

Devido ao tráfego intenso operando na pista principal, nos pousos, ocorrem toques de aeronaves fora da zona de toque, afastados mais de 600 m da cabeceira 17R. Isto faz com que praticamente toda a extensão da pista fique contaminada por borracha. Portanto, na pista principal, *diferentemente da pista auxiliar*, os serviços de remoção de borracha são aplicados em toda a extensão na faixa central contaminada por

borracha. A Figura A.13, constante do Anexo A, mostra a distribuição da posição dos toques de aeronaves no pouso, em função do afastamento à cabeceira de aproximação. Para aeronaves do porte do B737 cerca de 13% dos toques ocorrem além dos 600 m (2000 pés) e cerca de 6% ocorrem além dos 1.000 m (3.000 pés).

Figura 9.20 – Área de Toque da cabeceira 17R da Pista Principal do Aeroporto de Congonhas

9.2.2 Tipo de Revestimento Asfáltico Existente na Pista Principal

O revestimento da pista principal é constituído por CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), com graduação contínua, bem graduada, densa e bem fechada. O recapeamento foi realizado durante a noite ou nos finais de semana no ano de 2000. Ou seja, não sendo uma obra contínua, a mistura asfáltica do recapeamento pode sofrer uma pequena variação, seja granulométrica, seja de dosagem, como também de estado devido às condições de serviço tais como: temperatura da massa asfáltica, temperatura ambiente, disponibilidade de equipamentos de distribuição e compactação, dificuldades executivas, entre outros.

Pode-se observar pela Figura 9.21 de um dos corpos-de-prova extraídos da pista que há poucos agregados graúdos na camada superior de revestimento asfáltico. A camada inferior de regularização ou a camada antiga de revestimento é composta por

agregados mais graúdos. Esta constatação mostra que a graduação privilegia pequeno consumo de agregados graúdos e maior quantidade de agregados miúdos (abaixo da dimensão da peneira 4 ou de 4,76 mm), com graduação contínua e densa, o que acarreta uma textura superficial fechada e fina.

Outra característica marcante é a grande quantidade de agregado miúdo do tipo areia natural, que pode ser constatada pelo brilho na superfície dos corpos de prova extraídos e na superfície dos corpos de prova após sua ruptura. A existência de areia facilita a compactação e densificação do material, o que é desejável em serviços noturnos, porém torna as misturas asfálticas mais susceptíveis à deformação por trilha de rodas.

Figura 9.21 - Aspecto geral do corpo-de-prova extraído da pista 17R/35L

9.2.3 *Análise Estatística dos Resultados*

Os resultados brutos dos ensaios realizados na pista principal encontram-se no Anexo E.

A análise estatística dos dados da pista principal foi elaborada por meio de Análise de Variância, com o mesmo método utilizado na análise da pista auxiliar, conforme descrito no item 9.1.2.

As Matrizes com os valores dos Níveis de Significância Observados (*ou Níveis Descritivos dos Testes*), para comparação do atrito e macrotextura em cada par de Faixas de pista, são apresentados em seguida. Foram destacados em verde os valores mais baixos (em torno de 10% ou menos) que indicam diferenças entre pares no fator analisado.

As conclusões apresentadas baseiam-se nesta análise estatística.

Tabela 9.13 - Matriz dos Níveis Observados de Significância na ANOVA (p%) de valores de atrito longitudinal e transversal em pares de faixas de pista principal

	A	D	E	AT	DT
A					
D	2,3%				
E	3,0%	0,2%			
AT	0,0%	0,5%	0,0%		
DT	0,1%	0,8%	0,0%	0,1%

- Indica diferença no atrito medido entre a Faixa *i* e *j*

As designações AT e DT referem-se ao atrito medido pelo Pêndulo Britânico no sentido transversal a pista

Tabela 9.14 - Matriz dos Níveis Observados de Significância na ANOVA (p%) de valores de macrotextura em pares de faixas da pista principal

	A	B	C	D	E	W
A						
B	0,3%					
C	41,2%	0,5%				
D	33,3%	0,0%	4,5%			
E	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		
W	93,0%	1,8%	62,9%	33,4%	0,0%

- Indica diferença na macrotextura medida entre a Faixa *i* e *j*

9.2.4 Análise da Macrotextura da Pista Principal

Foram realizados diversos ensaios de mancha de areia para analisar variações da macrotextura ao longo da pista, considerando as trajetórias mais prováveis das rodas no momento do pouso, conforme definido no Capítulo 7, Figura 7.11 e Figura 9.1.

O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 9.15. Os dados brutos encontram-se no Anexo E.

Tabela 9.15 – Valores médios de macrotextura para a pista principal

Faixas de Pista	A	B	C	D	E	W
Macro-textura Média (mm)	1,10	0,81	1,04	1,19	0,35	1,09
St (desv. pad.)	0,23	0,17	0,19	0,15	0,04	0,11
Coef. de Variação (%)	20,9	20,5	18,1	13,0	12,3	9,7

Ensaios realizados em 28/08 e 04/09/2005

Os resultados mostram que, na Faixa E (sem *grooving* e sem tráfego), a textura é fina (altura de mancha entre 0,2 e 0,4 mm), com média de 0,35 mm e coeficiente de variação de 12,3% para a altura média da Mancha de Areia. Estes dados corroboram a observação visual realizada na pista e nos corpos de prova analisados no item 9.2.2, mostrando tratar-se de um CBUQ muito fechado de macrotextura fina.

Naturalmente, a Faixa E, sem *grooving*, apresenta macrotextura menor que todas as faixas com *grooving*.

Após a aplicação do *grooving*, a macrotextura apresenta uma melhoria, passando para uma altura média de 1,19 mm e coeficiente de variação de 13,0% (Faixa D, com *grooving* e sem tráfego), gerando benefícios para a aderência pneu-pavimento em pista molhada. Neste caso valem as mesmas observações feitas no item 9.1.3 quanto ao conceito da macrotextura em superfície com *grooving* e sua forte relação com a drenabilidade. A macrotextura da Faixa D da pista principal seria classificada como "grossa" e atenderia às exigências e recomendações do DAC, da ICAO e da FAA.

Na Faixa C, CBUQ com *grooving* emborrachado, pode-se observar que os resultados de altura média de mancha de areia são um pouco inferiores à média constatada na Faixa D, por duas razões: (1) a superfície que era fechada ou fina originalmente, se

torna ainda um pouco mais fina e as ranhuras tendem a fechar suas aberturas, com o início de preenchimento por borracha. A média das alturas do ensaio de Mancha de Areia é de 1,04 mm, com coeficiente de variação de 18,1%. Deve-se levar em conta que os ensaios foram realizados na condição de pista contaminada com borracha, daí a Faixa C apresentar-se mais fechada que a Faixa D.

Na Faixa B, CBUQ com *grooving* emborrachado com a maior densidade de tráfego, pode-se observar uma variação importante na altura média de Mancha de Areia, com valores variando entre 0,58 a 1,02 mm, média de 0,81 mm e coeficiente de variação elevado de 20,5%. A análise estatística mostra que as macrotexturas das Faixas A e B são diferentes (Tabela 9.14). A Faixa B, com uma densidade de tráfego maior, apresenta-se cerca de 30% mais fechada. Nas Faixas A e B a superfície já se encontra totalmente coberta por borracha; as diferenças de macrotextura decorrem do maior fechamento das ranhuras, em uma situação crítica de contaminação. O tráfego muito mais intenso na pista principal leva a um comportamento diferente daquele observado na pista auxiliar, onde a macrotextura das Faixas A e B apresentam a mesma estrutura.

Nas Faixas A e B da pista principal, o emborrachamento fecha as ranhuras, abaixando significativamente os valores da macrotextura, fazendo com que a superfície perca suas qualidades drenantes, que é a característica mais importante do *grooving*. Observe-se ainda que o estrangulamento das aberturas das ranhuras ou total fechamento delas se dá no pouso, quando a borracha dos pneus atinge temperaturas elevadas devido ao atrito, levando à alteração de estado sólido para líquido, fazendo com que esta borracha se espalhe na superfície e adentre as ranhuras. A Figura 9.22 mostra uma foto em detalhe de uma ranhura contaminada com borracha que entrou nesta cavidade e está impregnada nas paredes.

(a) detalhe de corpo de prova extraído da pista (b) borracha na lateral da ranhura do grooving

Figura 9.22 – Corpo de prova extraído na Faixa B da pista principal

Outro ponto a ressaltar é o valor da macrotextura nos pontos W1, W2 e W3, localizados em área de tráfego intenso, mas fora das zonas de toque (Faixa A, afastados cerca de 1000 m da cabeceira 17R, vide Figura 7.11 – Cap. 7). Nessa região, diferentemente do que ocorre na pista auxiliar, há acúmulo de borracha e, em consequência, o revestimento sofre a agressão dos serviços de limpeza (vide item 9.2.1). Observa-se a semelhança da macrotextura entre os valores na Faixa A e os valores dos pontos W, em cerca de 1,1 mm. Ambas as Faixas possuem *grooving* e são submetidas ao mesmo tráfego e ao desemborrachamento.

9.2.5 Análise do Atrito do Pêndulo Britânico para a Pista Principal

Foram realizados ensaios de determinação de atrito por meio do Pêndulo Britânico nas Faixas A, D e E. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 9.16.

Tabela 9.16 - Valores médios de atrito com o Pêndulo Britânico

Faixas de Pista	A	TA	D	TD	E
Atrito Médio Pêndulo (BPN)	76,7	55,7	65,7	46,4	83,3
Sa (desv. pad.)	3,0	0,8	2,4	0,6	1,7
Coef. de Variação (%)	3,9	1,5	3,7	1,2	2,1

Ensaio realizado em 28/08/2004; A, D e E são as faixas de pista definidas no Cap. 7 (Figura 9.1); TA e TD são as medições realizadas no sentido transversal à pista (paralelo às ranhuras) nas respectivas faixas.

Na Faixa E, pista sem *grooving* e sem tráfego, tem-se que a média do atrito pelo Pêndulo Britânico é de 83 BPN. Nesta situação, os agregados que não sofreram polimento pela ação do tráfego, fornecem valores elevados de atrito.

Na Faixa D, constituída por CBUQ com *grooving* não emborrachado, o teste foi realizado em duas direções: transversal e longitudinal a pista. Na direção transversal à pista (sem influência das ranhuras) foram medidos valores da ordem de 46 BPN. Ou seja, há uma redução sensível de microtextura na superfície dos agregados, indicando um polimento dos mesmos. Uma vez que a região não é utilizada pelo tráfego das aeronaves, o único fator que leva ao polimento dos agregados é a ação dos serviços de limpeza e desemborrachamento. No caso da pista principal, a ação repetida dos serviços de limpeza leva a um polimento da superfície dos agregados. É importante ressaltar que na pista principal o desemborrachamento ocorre em uma largura maior do que na pista auxiliar, atingindo também a Faixa D. Além disso, este serviço tem cooperado para desagregação de alguns pontos superficiais que já se encontravam com segregação de massa asfáltica possivelmente. A Figura 9.23 mostra um local onde se pode observar o problema de desagregação.

Figura 9.23 - Detalhe de área de CBUQ com *grooving* apresentando desagregação na pista principal

Mesmo na direção longitudinal, as medições de atrito na Faixa D fornecem valores da ordem de 66 BPN. Ou seja, mesmo com o efeito do *grooving*, o valor é ainda significativamente menor que aquele na superfície sem *grooving*, mas que não sofreu a limpeza da pista.

Na pista com *grooving* onde há emborrachamento, o atrito é maior do que na área com *grooving* não emborrachada (na Faixa A os valores de atrito longitudinal e transversal são maiores do que nas Faixas D e E). O teste do Pêndulo Britânico é feito com uma sapata de borracha, e encontrando-se a Faixa A totalmente encoberta por borracha (vide Figura 9.19, lado esquerdo) o atrito se dá entre duas superfícies de borracha. Neste caso o ensaio passa a avaliar a resposta praticamente de duas superfícies de borracha e não mais a avaliar a microtextura de agregados. A medida dá valores de atrito entre superfícies de mesmo material e a análise seria diferente daquela sugerida pelo teste original.

9.2.6 Análise do Atrito do MuMeter na Pista Principal

As análises dos resultados de atrito com o MuMeter foram baseadas nos relatórios das medições feitas em:

- 17 de abril de 2004;
- 19 de janeiro de 2002; e
- 16 de dezembro de 2001.

Os dados de dezembro de 2001 são particularmente importantes pois estão relacionados à medida de atrito dinâmico em CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente) logo após a execução e inauguração da pista recapeada.

Os dados de janeiro de 2002 são interessantes pois, apesar de decorrido apenas um mês após a medida de atrito realizada em dezembro de 2001, os dados de janeiro de 2002, contemplam as medidas de atrito após a execução de *grooving* nos primeiros 500 metros da pista, no sentido 17R para 35L.

A medição de abril de 2004 foi realizada com o MuMeter modelo MK-6. Os ensaios com o MK-6 foram acompanhados e introduziram-se seis corridas adicionais às corridas previstas em norma: - afastadas de 6, 13 e 19 m do eixo, para cada lado da pista. O objetivo dessas medições adicionais é o de avaliar o atrito com o Mu Meter

também nas Faixas B, D e E da pista, permitindo o mesmo tipo de análise feita para a textura e atrito com o Pêndulo Britânico.

É importante ressaltar que duas das medições de atrito dinâmico foram realizadas com o MuMeter MK-4 (dezembro/2001 e janeiro/2002), e uma delas com o MuMeter MK-6 (abril/2004). Na análise dos dados de atrito dinâmico da pista principal tomou-se o cuidado de estabelecerem-se comparações apenas entre valores medidos com o mesmo equipamento. Portanto, compararam-se valores das duas medições realizadas com o MK-4, mesmo que em datas diferentes e, no caso dos ensaios do MK-6, comparou-se apenas os valores entre faixas de pista, realizados na mesma data. Não se compararam valores obtidos com o MK-4 com valores medidos com o MK-6. Tal procedimento teve por objetivo evitar comparar resultados de equipamentos diferentes sem os devidos cuidados de harmonização dos equipamentos.

Os resumos dos resultados encontram-se nas Tabelas 9.17, 9.18 e 9.19. Os relatórios originais das medições com o MuMeter encontram-se no Anexo F.

É nítida a influência benéfica do *grooving*, executado nos 500 metros iniciais (próximos à cabeceira 17R), no coeficiente de atrito. Pode-se observar nos resultados dos ensaios realizados em dez/01 (antes do *grooving*) e jan/02 (após o *grooving*) (Tabela 9.18 e Tabela 9.19), que nos primeiros 600 m da faixa afastada de 3 m à direita do eixo, o valor de atrito variou de 0,49 para 0,58 (aumento de 18,4%). Para o mesmo trecho, na faixa afastada 3 m à esquerda, observa-se um aumento de cerca de 14,3% (variação de 0,56 para 0,64). No segundo e terceiro trechos, praticamente não há variação no atrito medido, pois ambas as medições foram realizadas em superfícies sem *grooving*.

Tabela 9.17 – Valores do Mu Meter para a pista principal

Posição em relação ao eixo da Pista	3m esq Fx B	3m dir Fx B	6m esq Fx C	6m dir Fx C	13m esq Fx D	13m dir Fx D	19m esq Fx E	19m dir Fx E
Atrito Médio	0,55	0,52	0,63	0,58	0,60	0,61	0,47	0,46
1o. Terço (cab. 17L)	0,45	0,40	0,57	0,44	0,57	0,57	0,42	0,41
2o. Terço (central)	0,63	0,63	0,65	0,65	0,61	0,63	0,46	0,48
3o. Terço (cab. 35R)	0,58	0,55	0,67	0,64	0,62	0,62	0,54	0,49

Ensaio realizado em 17/04/2004 da cab 17 para a 35

Tabela 9.18 - Valores do Mu Meter para a pista auxiliar completa

Posição em relação ao eixo da Pista	3m esq Faixa B	3m dir Faixa B
Atrito Médio	0,60	0,57
1º. Trecho (600 m cab17L)	0,64	0,58
2º. Trecho (600 a 1200 m central)	0,58	0,57
3º. Trecho (1200 a 1700 m finais)	0,60	0,56

Ensaio realizado em 19/01/2002 da cab 17 para a 35

Tabela 9.19 - Valores do Mu Meter para a pista auxiliar completa

Posição em relação ao eixo da Pista	3m esq Faixa B	3m dir Faixa B
Atrito Médio	0,59	0,52
1º. Trecho (600 m cab17L)	0,56	0,49
2º. Trecho (600 a 1200 m central)	0,58	0,55
3º. Trecho (1200 a 1700 m finais)	0,62	0,53

Ensaio realizado em 16/12/2001 da cab 17 para a 35

Os resultados do MK-6 permitem analisar a superfície da pista principal em faixas, na área mais solicitada pelos pousos, para as faixas B, C, D e E.

Figura 9.23 – Variação do atrito dinâmico nas faixas da pista principal no primeiro trecho (600 m próximos à cabeceira 17R; faixas definidas no Capítulo 7, constantes da Figura 9.1)

Observa-se claramente o incremento do atrito ao longo da transversal da pista, da Faixa B em direção à Faixa D. Essa variação é associada diretamente à solicitação do tráfego, pois a Faixa B é a mais solicitada e a Faixa D a menos solicitada. A Faixa E, sem *grooving* e sem tráfego, guarda as características originais da construção do pavimento.

Para que se possam comparar os resultados do MuMeter com os resultados do Pêndulo Britânico e da Mancha de Areia na pista principal, são tomadas as médias dos valores de atrito dinâmico do MuMeter na área de interesse, ou seja, nos mesmos locais onde foram realizadas as medições com a Mancha de Areia (ente 200 e 520 m da cabeceira 17R).

A Tabela 9.20 e Figura 9.24 mostram a relação entre a macrotextura e os valores de atrito dinâmico com o MuMeter.

Tabela 9.20 - Valores da macrotextura e do atrito dinâmico na área de interesse: região situada entre 200 e 520 m afastados da cabeceira 17L

Faixa da Pista Principal				
	B	C	D	E
Macrotextura (mm)	0,81	1,04	1,19	0,35
Atrito Dinâmico (Mu)	38	46	62	42

O relatório original de medição do MuMeter encontra-se no Anexo E

Figura 9.24 - Comportamento do atrito dinâmico com a macrotextura – área compreendida entre 200 m e 520 m afastados da cab. 17 R

Na pista principal a correlação entre atrito dinâmico e textura é mais baixa do que a correlação entre esses parâmetros na pista auxiliar.

A correlação entre a macrotextura e a drenabilidade também apresenta um valor mais baixo para a pista principal, novamente diferente do que ocorre na pista auxiliar.

Figura 9.25 - Correlação entre os ensaios de Mancha de Areia e drenabilidade
Os dados brutos encontram-se no Anexo E

A contaminação por borracha, que cobre grande parte da superfície da pista, modifica as características da macrotextura, comprometendo a capacidade de drenagem da superfície de maneira não uniforme.

A baixa correlação entre drenabilidade e macrotextura pode explicar a baixa correlação entre atrito dinâmico e macrotextura. Considerando-se o modelo de aquaplanagem combinada, a drenabilidade determina a participação da área seca na área de contato total e, em função disso, influi diretamente no atrito. Portanto pode-se afirmar que, se a macrotextura representar bem a drenabilidade, também representará bem o atrito dinâmico em pista molhada.

9.3 Conclusões

As principais conclusões, decorrentes das análises dos resultados das duas pistas, são as seguintes:

- (1) os ensaios na pista auxiliar foram realizados em uma condição de pista não contaminada, pouco tempo após o desemborrachamento de sua superfície;
- (2) os ensaios na pista principal foram realizados em uma condição de alto grau de contaminação (estado crítico), imediatamente antes da execução dos serviços de desemborrachamento;
- (3) o revestimento da pista auxiliar é um CBUQ com graduação contínua, densa, bem graduada e fechada, que resultou em uma superfície com macrotextura fina, levando à necessidade de execução do *grooving* para atender a macrotextura das normas vigentes; a mesma situação se verifica na pista principal;
- (4) em ambas as pistas, a aplicação do *grooving* elevou significativamente os valores de altura média do ensaio de Mancha de Areia do revestimento, fazendo com que estes atingissem os valores recomendados pelas normas brasileiras e internacionais;
- (5) embora a textura da superfície ranhurada não tenha o mesmo significado físico que uma textura superficial grossa, formada por agregados graúdos dispostos de forma aleatória, a análise dos dados dos ensaios de Mancha de Areia e de drenabilidade mostram que, ***para a pista auxiliar***, a altura média da "*macrotextura*" da superfície ranhurada é um indicador objetivo e altamente relacionado à capacidade drenante dessa superfície;
- (6) já para a ***pista principal***, a correlação entre drenabilidade e macrotextura mostra-se significativamente mais baixa do que aquela verificada na pista auxiliar, indicando que o alto grau de contaminação por borracha compromete a capacidade drenante da superfície e que, nessas condições (superfície contaminada em estado crítico), o ensaio

de Mancha de Areia passa a não ser mais um indicador da drenabilidade da superfície;

- (7) na pista auxiliar os serviços de desemborrachamento removem os finos do revestimento de forma homogênea na faixa dos 14 m centrais da pista, resultando em macrotexturas similares nas Faixas A, B e C;
- (8) na pista principal, a Faixa B, altamente contaminada por borracha, apresenta o valor de macrotextura mais baixo, como consequência de ser submetida à maior densidade de passagens de roda nos pousos das aeronaves; a Faixa B apresenta-se cerca de 30% mais fechada que a Faixa A; nas Faixas A e B a superfície já se encontra totalmente coberta por borracha e as diferenças de macrotextura decorrem do maior fechamento das ranhuras, em uma situação crítica de contaminação;
- (9) nas Faixas A e B da pista principal, o emborrachamento fecha as ranhuras, abaixando significativamente os valores da macrotextura, fazendo com que a superfície perca suas qualidades drenantes, que é a característica mais importante do *grooving*;
- (10) na pista auxiliar, a análise dos dados de macrotextura e de atrito com o Pêndulo Britânico mostram que a macrotextura não influi no resultado do Pêndulo, indicando que os valores de atrito com o Pêndulo Britânico são relacionados principalmente a microtextura da superfície;
- (11) o tráfego de aeronaves causa o polimento dos agregados, resultando em perda de atrito; essa perda é associada à intensidade do tráfego;
- (12) o *grooving* melhora significativamente o atrito dinâmico em pista molhada;
- (13) os serviços de desemborrachamento melhoram o atrito dinâmico em pista molhada;
- (14) a capacidade drenante do revestimento (intimamente associada a macrotextura da superfície) facilita a saída da água da área de contato e permite que o regime de rolamento em pista molhada ocorra em

condições mais próximas à Fase (a) do Modelo de Hidroplanagem Combinada, melhorando a aderência pneu pavimento;

- (15) na pista auxiliar não ocorreu, até o momento, o polimento dos agregados; entretanto, o tráfego e número de desemborachamentos bem menores, não permitem afirmar que o agregado dessa mistura é menos suscetível ao polimento que o agregado da pista principal;
- (16) já na pista principal o desemborachamento com jato d'água a alta pressão reduziu significativamente os valores de atrito, tanto no sentido transversal, quanto no sentido longitudinal à pista;
- (17) o desemborachamento com jato d'água a alta pressão acelera o processo de perda de finos e desagregação do revestimento.

9.4 Sugestões para Continuidade da Pesquisa

A presente pesquisa foi realizada em duas situações: (1) na pista auxiliar, recentemente desemborachada, em revestimento com cerca de 10 anos de vida; e (2) na pista principal, altamente contaminada por borracha, em revestimento com cerca de 4 anos de vida.

Essas duas pistas permitiram caracterizar a aderência pneu pavimento, nas situações extremas nas quais se encontravam por ocasião da realização dos ensaios.

Para a caracterização da aderência pneu-pavimento ao longo do ciclo completo de emborachamento de uma pista, faz-se necessária a realização de ensaios, conforme sugeridos nos Capítulos 7 e 8, em fases intermediárias, entre as situações de pista *recém limpada* e *pista contaminada*.

Outro foco de interesse pode ser a verificação da suscetibilidade do agregado que integra a mistura asfáltica ao polimento pelo tráfego e pelo jato d'água a alta pressão.

Outra linha de pesquisa pode ser a comparação entre revestimentos asfálticos cujo agregado miúdo integrante da mistura é a areia e, revestimentos cujo agregado miúdo é o pó-de-pedra (material proveniente de britagem). Há indicações na literatura de que, revestimentos que não utilizam areia na mistura, apresentam melhor desempenho ao longo do tempo no aspecto aderência pneu-pavimento.

ANEXO A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE TOQUE DE AERONAVES

Neste anexo são construídos os modelos estatísticos que servem de base para o planejamento dos ensaios de campo.

Usa-se a função "DST.NORM" disponível no Software Excel para construir as seguintes tabelas e gráficos :

- (1) função densidade de probabilidade versus afastamento ao eixo da pista; e
- (2) função probabilidade acumulada versus afastamento ao eixo da pista.

Esses gráficos são construídos, segundo as explicações e critérios constantes no Capítulo 7.1, para os seguintes grupos de aeronaves:

- (1) Grupo Boeing: composto por Boeing 737 (300 a 800) e Foker 100; e
- (2) Grupo Airbus: composto por Airbus (A 319 e A 320).

O agrupamento das aeronaves é possível devido à grande proximidade das dimensões das bitolas nos grupos considerados (vide Figuras ao final do anexo).

GRÁFICOS PARA A PISTA AUXILIAR

A Tabela A.1 aplica-se à pista auxiliar com composição do tráfego 50% para cada Grupo de Aeronaves.

Os gráficos constantes da Figura A. 1 e da Figura A. 2 são referentes, respectivamente, à função densidade de probabilidade e à função probabilidade acumulada para as aeronaves do Grupo Airbus.

Os gráficos constantes da Figura A. 3 e da Figura A. 4 são referentes, respectivamente, à função densidade de probabilidade e à função probabilidade acumulada para as aeronaves do Grupo Boeing.

Os gráficos constantes da Figura A. 5 e da Figura A. 6 são referentes, respectivamente, à função densidade de probabilidade e à função probabilidade acumulada para o efeito combinado das aeronaves dos Grupos 1 e 2 na proporção de 50% para cada Grupo, refletindo o tráfego da pista auxiliar.

GRÁFICOS PARA A PISTA PRINCIPAL

A Tabela A.2 aplica-se à pista principal com composição do tráfego 65% para o Grupo Boeing e 35% para o Grupo Airbus.

Os gráficos constantes da Figura A. 7 e da Figura A. 8 são referentes, respectivamente, à função densidade de probabilidade e à função probabilidade acumulada para o efeito combinado na proporção de 65% para o Grupo Boeing e 35% para o Grupo Airbus.

O gráfico constante da Figura A. 9 permite a comparação entre a distribuição das solicitações que incidem nas pistas auxiliar e principal, de acordo com o tráfego incidente em cada uma.

A Figura A. 10, Figura A. 11 e Figura A. 12 mostram as configurações dos trens principais das aeronaves de interesse do estudo.

Tabela A.1 - PISTA AUXILIAR
Valores da função densidade de probabilidade e da probabilidade acumulada em função do afastamento do eixo da pista
Tráfego: 50%Aeronaves Grupo Airbus; 50% Aeronaves Grupo Boeing

			Desvio (m)	-15,0	-10,0	-7,0	-6,0	-5,0	-4,0	-3,0	-2,0	-1,0	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
A 319/320	fdp	EE	-4,19	0,0000	0,0017	0,0204	0,0320	0,0412	0,0438	0,0383	0,0276	0,0164	0,0080	0,0032	0,0011	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
		ED	-3,41	0,0000	0,0006	0,0126	0,0229	0,0344	0,0425	0,0432	0,0362	0,0250	0,0142	0,0067	0,0026	0,0008	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000
		DE	3,41	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0008	0,0026	0,0067	0,0142	0,0250	0,0362	0,0432	0,0425	0,0344	0,0229
		DD	4,19	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0011	0,0032	0,0080	0,0164	0,0276	0,0383	0,0438	0,0412	0,0320	0,0204
		Soma		0,0000	0,0023	0,0330	0,0549	0,0757	0,0865	0,0826	0,0674	0,0513	0,0444	0,0513	0,0674	0,0826	0,0865	0,0757	0,0549	0,0330
	prob acum	EE	-4,19	0,0000	0,0013	0,0270	0,0532	0,0902	0,1333	0,1750	0,2082	0,2300	0,2419	0,2472	0,2492	0,2498	0,2500	0,2500	0,2500	0,2500
		ED	-3,41	0,0000	0,0005	0,0142	0,0317	0,0605	0,0994	0,1429	0,1832	0,2140	0,2334	0,2435	0,2479	0,2494	0,2499	0,2500	0,2500	0,2500
		DE	3,41	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0006	0,0021	0,0065	0,0166	0,0360	0,0668	0,1071	0,1506	0,1895	0,2183	0,2358
		DD	4,19	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0008	0,0028	0,0081	0,0200	0,0418	0,0750	0,1167	0,1598	0,1968	0,2230
		Soma		0,0000	0,0018	0,0412	0,0849	0,1506	0,2329	0,3187	0,3943	0,4532	0,5000	0,5468	0,6057	0,6813	0,7671	0,8494	0,9151	0,9588
B 737	fdp	EE	-3,29	0,0000	0,0006	0,0116	0,0215	0,0331	0,0418	0,0436	0,0374	0,0264	0,0154	0,0074	0,0029	0,0009	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000
		ED	-2,43	0,0000	0,0002	0,0058	0,0128	0,0231	0,0346	0,0426	0,0432	0,0360	0,0248	0,0140	0,0065	0,0025	0,0008	0,0002	0,0000	0,0000
		DE	2,43	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0008	0,0025	0,0065	0,0140	0,0248	0,0360	0,0432	0,0426	0,0346	0,0231	0,0128	0,0058
		DD	3,29	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0009	0,0029	0,0074	0,0154	0,0264	0,0374	0,0436	0,0418	0,0331	0,0215	0,0116
		Soma		0,0000	0,0007	0,0174	0,0344	0,0565	0,0775	0,0896	0,0900	0,0838	0,0803	0,0838	0,0900	0,0896	0,0775	0,0565	0,0344	0,0174
	prob acum	EE	-3,29	0,0000	0,0004	0,0128	0,0291	0,0564	0,0943	0,1377	0,1788	0,2109	0,2316	0,2427	0,2475	0,2493	0,2498	0,2500	0,2500	0,2500
		ED	-2,43	0,0000	0,0001	0,0055	0,0145	0,0322	0,0611	0,1002	0,1438	0,1839	0,2144	0,2337	0,2436	0,2479	0,2494	0,2499	0,2500	0,2500
		DE	2,43	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0006	0,0021	0,0064	0,0163	0,0356	0,0661	0,1062	0,1498	0,1889	0,2178	0,2355	0,2445
		DD	3,29	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0007	0,0025	0,0073	0,0184	0,0391	0,0712	0,1123	0,1557	0,1936	0,2209	0,2372
		Soma		0,0000	0,0005	0,0183	0,0436	0,0888	0,1562	0,2407	0,3314	0,4185	0,5000	0,5815	0,6686	0,7593	0,8438	0,9112	0,9564	0,9817
Efeito Combinado	fdp	A320/19		0,0000	0,0012	0,0165	0,0274	0,0378	0,0433	0,0413	0,0337	0,0256	0,0222	0,0256	0,0337	0,0413	0,0433	0,0378	0,0274	0,0165
		737		0,0000	0,0004	0,0087	0,0172	0,0282	0,0387	0,0448	0,0450	0,0419	0,0401	0,0419	0,0450	0,0448	0,0387	0,0282	0,0172	0,0087
		Soma		0,0000	0,0015	0,0252	0,0446	0,0661	0,0820	0,0861	0,0787	0,0675	0,0624	0,0675	0,0787	0,0861	0,0820	0,0661	0,0446	0,0252
	Prob acum	A320/19		0,0000	0,0009	0,0206	0,0424	0,0753	0,1164	0,1593	0,1971	0,2266	0,2500	0,2734	0,3029	0,3407	0,3836	0,4247	0,4576	0,4794
		737		0,0000	0,0002	0,0091	0,0218	0,0444	0,0781	0,1204	0,1657	0,2092	0,2500	0,2908	0,3343	0,3796	0,4219	0,4556	0,4782	0,4909
		Soma		0,0000	0,0011	0,0297	0,0642	0,1197	0,1945	0,2797	0,3628	0,4359	0,5000	0,5641	0,6372	0,7203	0,8055	0,8803	0,9358	0,9703

Legenda: Desvio: desvio lateral em relação ao eixo da pista, valores negativos à esquerda, positivos à direita
 EE: Trem esquerdo, roda esquerda ED: Trem esquerdo, roda direita
 DE: Trem direito, roda esquerda DD: Trem direito, roda direita
 fdp: valor da função densidade de probabilidade da Distribuição Normal para Média = ao afastamento da roda ao eixo da aeronave e Desvio Padrão = 2,27 m
 prob acum: probabilidade acumulada da passagem de uma roda a partir de um afastamento de 15 m à esquerda do eixo da pista

Figura A. 1 – Função densidade de probabilidade para o Grupo Airbus

Figura A. 2 – Probabilidade acumulada para o Grupo Airbus

Figura A. 3 - Função densidade de probabilidade para o Grupo Boeing

Figura A. 4 - Probabilidade acumulada para o Grupo Boeing

Figura A. 5 – Função densidade de Probabilidade - Efeito combinado para a pista auxiliar

Figura A. 6 – Probabilidade Acumulada - Efeito combinado para a pista auxiliar

Tabela A.2 - PISTA PRINCIPAL

Valores da função densidade de probabilidade e da probabilidade acumulada em função do afastamento do eixo da pista
Tráfego: 35% Aeronaves Grupo Airbus; 65% Aeronaves Grupo Boeing

		Desvio (m)	-15,0	-10,0	-7,0	-6,0	-5,0	-4,0	-3,0	-2,0	-1,0	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
A 319/320	fdp	EE	-4,19	0,0000	0,0017	0,0204	0,0320	0,0412	0,0438	0,0383	0,0276	0,0164	0,0080	0,0032	0,0011	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000
		ED	-3,41	0,0000	0,0006	0,0126	0,0229	0,0344	0,0425	0,0432	0,0362	0,0250	0,0142	0,0067	0,0026	0,0008	0,0002	0,0000	0,0000
		DE	3,41	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0008	0,0026	0,0067	0,0142	0,0250	0,0362	0,0432	0,0425	0,0344	0,0229
		DD	4,19	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0011	0,0032	0,0080	0,0164	0,0276	0,0383	0,0438	0,0412	0,0320
		Soma		0,0000	0,0023	0,0330	0,0549	0,0757	0,0865	0,0826	0,0674	0,0513	0,0444	0,0513	0,0674	0,0826	0,0865	0,0757	0,0549
	prob acum	EE	-4,19	0,0000	0,0013	0,0270	0,0532	0,0902	0,1333	0,1750	0,2082	0,2300	0,2419	0,2472	0,2492	0,2498	0,2500	0,2500	0,2500
		ED	-3,41	0,0000	0,0005	0,0142	0,0317	0,0605	0,0994	0,1429	0,1832	0,2140	0,2334	0,2435	0,2479	0,2494	0,2499	0,2500	0,2500
		DE	3,41	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0006	0,0021	0,0065	0,0166	0,0360	0,0668	0,1071	0,1506	0,1895	0,2183
		DD	4,19	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0008	0,0028	0,0081	0,0200	0,0418	0,0750	0,1167	0,1598	0,1968
		Soma		0,0000	0,0018	0,0412	0,0849	0,1506	0,2329	0,3187	0,3943	0,4532	0,5000	0,5468	0,6057	0,6813	0,7671	0,8494	0,9151
B 737	fdp	EE	-3,29	0,0000	0,0006	0,0116	0,0215	0,0331	0,0418	0,0436	0,0374	0,0264	0,0154	0,0074	0,0029	0,0009	0,0003	0,0001	0,0000
		ED	-2,43	0,0000	0,0002	0,0058	0,0128	0,0231	0,0346	0,0426	0,0432	0,0360	0,0248	0,0140	0,0065	0,0025	0,0008	0,0002	0,0000
		DE	2,43	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0008	0,0025	0,0065	0,0140	0,0248	0,0360	0,0432	0,0426	0,0346	0,0231	0,0128
		DD	3,29	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0009	0,0029	0,0074	0,0154	0,0264	0,0374	0,0436	0,0418	0,0331	0,0215
		Soma		0,0000	0,0007	0,0174	0,0344	0,0565	0,0775	0,0896	0,0900	0,0838	0,0803	0,0838	0,0900	0,0896	0,0775	0,0565	0,0344
	prob acum	EE	-3,29	0,0000	0,0004	0,0128	0,0291	0,0564	0,0943	0,1377	0,1788	0,2109	0,2316	0,2427	0,2475	0,2493	0,2498	0,2500	0,2500
		ED	-2,43	0,0000	0,0001	0,0055	0,0145	0,0322	0,0611	0,1002	0,1438	0,1839	0,2144	0,2337	0,2436	0,2479	0,2494	0,2499	0,2500
		DE	2,43	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0006	0,0021	0,0064	0,0163	0,0356	0,0661	0,1062	0,1498	0,1889	0,2178	0,2355
		DD	3,29	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,0007	0,0025	0,0073	0,0184	0,0391	0,0712	0,1123	0,1557	0,1936	0,2209
		Soma		0,0000	0,0005	0,0183	0,0436	0,0888	0,1562	0,2407	0,3314	0,4185	0,5000	0,5815	0,6686	0,7593	0,8438	0,9112	0,9564
Efeito Combinado	fdp	A320/19		0,0000	0,0012	0,0165	0,0274	0,0378	0,0433	0,0413	0,0337	0,0256	0,0222	0,0256	0,0337	0,0413	0,0433	0,0378	0,0274
		737		0,0000	0,0004	0,0087	0,0172	0,0282	0,0387	0,0448	0,0450	0,0419	0,0401	0,0419	0,0450	0,0448	0,0387	0,0282	0,0172
		Soma		0,0000	0,0015	0,0252	0,0446	0,0661	0,0820	0,0861	0,0787	0,0675	0,0624	0,0675	0,0787	0,0861	0,0820	0,0661	0,0446
	Prob acum	A320/19		0,0000	0,0009	0,0206	0,0424	0,0753	0,1164	0,1593	0,1971	0,2266	0,2500	0,2734	0,3029	0,3407	0,3836	0,4247	0,4576
		737		0,0000	0,0002	0,0091	0,0218	0,0444	0,0781	0,1204	0,1657	0,2092	0,2500	0,2908	0,3343	0,3796	0,4219	0,4556	0,4782
		Soma		0,0000	0,0011	0,0297	0,0642	0,1197	0,1945	0,2797	0,3628	0,4359	0,5000	0,5641	0,6372	0,7203	0,8055	0,8803	0,9358

Legenda: Desvio: desvio lateral em relação ao eixo da pista, valores negativos à esquerda, positivos à direita

EE: Trem esquerdo, roda esquerda ED: Trem esquerdo, roda direita

DE: Trem direito, roda esquerda DD: Trem direito, roda direita

fdp: valor da função densidade de probabilidade da Distribuição Normal para Média = ao afastamento da roda ao eixo da aeronave e Desvio Padrão = 2,27 m

prob acum: probabilidade acumulada da passagem de uma roda a partir de um afastamento de 15 m à esquerda do eixo da pista

Figura A. 7 – Função densidade de Probabilidade - Efeito combinado para a pista principal

Figura A. 8 - Probabilidade Acumulada - Efeito combinado para a pista principal

Figura A. 9 - Efeito combinado das passagens das rodas dos grupos de aeronaves para as cab. 17 das pistas do Aeroporto de Congonhas, de acordo com o tráfego que opera em cada pista.
Cab 17R (principal) = 65% Boeing e 35% Airbus; Cab 17L (auxiliar) = 53% Boeing e 47% Airbus

7.2 LANDING GEAR FOOTPRINT

MODEL 737-600, -700, -800, -900

D6-58325-3

160 DECEMBER 2001

Figura A. 10 – Geometria dos trens de pouso do Boeing 737 (Boeing, 2004: Airport Planning)

0354F

FOKKER 100	PAVEMENT DATA	7.02.01
		PAGE 1
LANDING GEAR FOOTPRINT	VERSION 01	
	ISSUE 02

VD/OP-7.02-301

	VERSION	
	I	II
MAXIMUM RAMP WEIGHT (= MAXIMUM TAXI WEIGHT)	95 500 lb 43 320 kg	98 500 lb 44 680 kg
PER CENT OF WEIGHT ON MAIN GEAR	See Figure 3	
NOSE GEAR TIRE SIZE	24 x 7.7 - 10	
NOSE GEAR TIRE PRESSURE	90 psi 620 kPa	90 psi 620 kPa
MAIN GEAR TIRE SIZE STANDARD TIRES	H40 x 14 R 19	
MAIN GEAR TIRE PRESSURE STANDARD TIRES	TBD	TBD
MAIN GEAR TIRE SIZE OPTIONAL TIRES	H40 x 14 - 19	
MAIN GEAR TIRE PRESSURE OPTIONAL TIRES	136 psi 938 kPa	142 psi 979 kPa

Figura A. 11 - Geometria dos trens de pouso do Fokker 100 (Foker, 1998; Airport Planning)

Figura A. 12 – Geometria dos trens de pouso do A 319 e A 320 (Airbus, 2003; Airport Planning)

AIRCRAFT TYPE	SAMPLE SIZE	CUMULATIVE PERCENTAGES AT NOMINAL DISTANCES FROM THRESHOLD		
		1000'	2000'	3000'
747	61	20	67	88
DC-10-10	149	19	73	91
L-1011	75	8	44	88
DC-8-60	210	13	72	91
DC-8-40,-50	262	14	75	96
707	439	14	75	93
727-200	840	16	73	90
727-100	1299	18	78	98
DC-9-30,-40	880	24	85	98
DC-9-10,-20	226	22	92	98
737	376	25	87	96
BAC-111	199	30	94	100
C-580	164	29	85	93
YS-11	23	17	82	89

FIGURE 77

SUMMARY OF CUMULATIVE TOUCHDOWN
DISTRIBUTIONS AT ALL AIRPORTS COMBINED

Figura A. 13 – Distribuição acumulada das posições de toque na pista, para diversas aeronaves, em relação à cabeceira de pouso (FAA, 1974; cópia da página 109 do Report No. FAA-RD-74-35)

Anexo B - Hotran dos Vôos do Aeroporto de Congonhas - Abril/2006

EMP.	VOO	VOO	ESCALAS	HORA	EQUIP.	FREQUÊNCIA	EMP.	VOO	VOO	ESCALAS	HORA	EQUIP.	FREQUÊNCIA
PTN		4780	JDF	06:25	ATR43	21 1 1 1 1 1 1 45	VRG	2627		BSB	14:30	B733	A 1 1 1 1 1 1 128
GLO	1829		MGF	06:20	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 144	TAM		3454	IOS/SSA	14:31	FK10	15 1 1 1 1 1 1 108
TAM	3473		SSA/CPQ	06:06	A319	C 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3458	BPS/SSA	14:31	FK10	15 1 1 1 1 1 1 108
TAM		3900	SDU	06:18	A319	6 1 1 1 1 1 1 132	VRG		2774	FLN	14:33	B735	19 1 1 1 1 1 1 120
TAM	3247		UDI	06:15	FK10	B 1 1 1 1 1 1 1 108	TAM	3253		RAO	14:35	A319	C 1 1 1 1 1 1 1 132
ONE		6350	SCS/RAO/BSB	06:43	E120	20 1 1 1 1 1 1 30	VRG	2797		POA	14:37	B733	B 1 1 1 1 1 1 1 128
GLO	1879		JPA/GIG	06:27	B738	B 1 1 1 1 1 1 1 177	GLO		1602	GIG/SSA	14:38	B738	14 1 1 1 1 1 1 1 177
TAM		3240	UDI	06:36	A319	15 1 1 1 1 1 1 132	GLO	1755		CWB	14:38	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 144
GLO	1701		CGB/CGR	06:31	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 144	GLO		1524	SDU	14:39	B737	6 1 1 1 1 1 1 1 144
ONE	6361		SOD	06:29	E120	C 1 1 1 1 1 1 30	GLO	1676		POA/FLN	14:40	B738	A 1 1 1 1 1 1 1 177
VRG		2662	PLU	06:54	B733	16 1 1 1 1 1 1 1 128	VRG		2431	SDU	14:41	B73A	2 1 1 1 1 1 1 1 132
GLO		1500	SDU	06:44	B737	1 1 1 1 1 1 1 144	GLO	1875		SJP	14:42	B737	C 1 1 1 1 1 1 1 1 144
BRB		1068	SSA	06:30	B733B	1 1 148	GLO	1777		POA/JOI	14:43	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 1 144
BRB		1066	SSA/REC	06:34	B733B	1 1 1 148	GLO		1791	CWB/POA	14:44	B737	3 1 1 1 1 1 1 144
GLO	1905		SJP	06:40	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 144	TAM		3934	SDU	14:45	A319	16 1 1 1 1 1 1 1 132
VRG		2401	SDU	06:50	B73A	4 1 1 1 1 1 1 1 132	GLO	1523		SDU	14:48	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 1 144
GLO		1750	POA	06:40	B737	16 1 1 1 1 1 1 1 144	TAM	3931		SDU	14:49	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3902	SDU	06:47	A319	2 1 1 1 1 1 1 132	TAM	3219		CNF	14:50	A320	B 1 1 1 1 1 1 1 162
TAM		3130	VIX	06:37	A319	17 1 1 1 1 1 1 1 132	GLO	1919		LDB	14:51	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM		3746	SJP	06:32	FK10	13 1 1 1 1 1 1 1 108	VRG	2428		SDU	14:53	B73A	A 1 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3200	PLU	06:56	A319	5 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3220	CNF	14:55	A320	8 1 1 1 1 1 1 1 162
GLO		1910	RAO	07:02	B737	14 1 1 1 1 1 1 1 144	GLO	1723		CNF	14:56	B733	A 1 1 1 1 1 1 1 128
GLO		1756	NVT	06:49	B737	20 1 1 1 1 1 1 1 144	TAM		3055	POA	14:58	A320	14 1 1 1 1 1 1 1 162
PTN		4750	AQA/UBA	07:00	ATR43	21 1 1 1 1 1 1 1 45	TAM	3160		POA/CXJ	14:59	FK10	C 1 1 1 1 1 1 1 1 108
BRB		1090	CNF	06:38	B733B	1 1 1 148	GLO	1681		POA	15:00	B737	C 1 1 1 1 1 1 1 1 144
BRB		1022	GYN/BSB	06:51	B733B	1 1 148	VRG		2034	CNF	15:03	B733	19 1 1 128
TAM	3539		BEL/GIG	06:23	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132	VRG		2628	BSB	15:04	B733	20 1 1 1 1 1 1 1 128
TAM		3466	GYN/BSB/NAT	06:52	A320	18 1 1 1 1 1 1 1 162	TAM	3705		BSB	15:06	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3051	POA	06:58	A320	20 1 1 1 1 1 1 1 162	GLO		1680	POA	15:09	B737	18 1 1 1 1 1 1 1 1 144
GLO		1702	U/SSA/REC/F	06:55	B733G	19 1 1 1 1 1 1 1 141	TAM	3741		CGB/SJP	15:10	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 1 162
VRG		2620	BSB	06:56	B733	8 1 1 1 1 1 1 1 128	VRG		2798	POA	15:11	B733	13 1 1 1 1 1 1 1 128
ONE		6320	V/MOC/VDC/S	06:57	FK50	13 1 1 1 1 1 1 50	GLO		1874	SJP	15:13	B737	8 1 1 1 144
VRG		2700	CWB	06:42	B735	14 1 1 1 1 1 1 1 120	TAM		3936	SDU	15:15	A319	7 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3456	IOS/SSA	07:00	FK10	15 1 1 108	TAM		3242	UDI	15:16	A319	1 1 1 1 1 1 1 1 132
VRG		2790	POA	07:01	B733	13 1 1 1 1 1 1 1 128	GLO	1883		BSB	15:17	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM		3452	IOS/SSA	07:02	FK10	13 1 1 1 1 1 1 1 108	GLO		1526	SDU	15:18	B737	4 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM	3255		RAO	06:57	A319	B 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM	3933		SDU	15:19	A319	B 1 1 1 1 1 1 1 1 132
VRG		2403	SDU	07:07	B73A	3 1 1 1 1 1 1 132	VRG	2430		SDU	15:21	B73A	A 1 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3496	G/SSA/REC/N	07:10	FK10	19 1 1 1 1 1 1 1 108	TAM	3463		GYN	15:26	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM	3781		CGB	06:55	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 162	VRG		2433	SDU	15:28	B73A	3 1 1 1 1 1 1 1 1 132
GLO	1872		LDB	06:59	B737	8 1 1 1 1 1 1 1 144	RSL		5081	CXJ	15:29	B735	C 1 1 1 1 1 1 1 1 120
VRG	2400		SDU	07:13	B73A	A 1 1 1 1 1 1 1 132	GLO	1525		SDU	15:30	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM		3901	SDU	07:14	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132	GLO		1760	GIG/BSB	15:32	B737	6 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM			SDU	07:17	A319	5 1 1 1 1 1 1 1 132	GLO	1697		MAO/BEL/FOR/REC/S	15:33	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 1 144
GLO		1502	SDU	07:20	B737	7 1 1 1 1 1 1 1 144	GLO		1854	CNF	15:35	B737	16 1 1 144
TAM		3277	SJP	07:22	A319	B 1 1 1 1 1 1 1 132	GLO		1710	CNF	15:36	B737	21 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM		3771	LDB	07:24	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 162	TAM		3075	JOI	15:38	FK10	1 1 1 1 1 1 1 108
GLO	1501		SDU	07:25	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 144	TAM		3221	CNF	15:39	A319	B 1 1 1 1 1 1 1 132
VRG	2759		NVT	07:26	B733	C 1 1 1 1 1 1 1 1 128	TAM		3770	CGR	15:40	A320	13 1 1 1 1 1 1 1 1 162
TAM		3036	JOI	07:27	FK10	C 1 1 1 1 1 1 1 108	VRG	2705		CWB	15:42	B733	A 1 1 1 1 1 1 1 1 128
TAM		3400	MGF	07:28	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3710	BSB	15:43	A320	5 1 1 1 1 1 1 1 162
TAM			BSB	07:29	A319	2 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3938	SDU	15:44	A319	14 1 1 1 1 1 1 1 132
ONE	6363		SOD	07:30	E120	C 1 30	TAM		3206	PLU	15:45	A319	19 1 1 132
TAM	3719		BEL/MAB/BSB	07:35	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 162	TAM		3222	CNF	15:46	A319	16 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3020	NVT	07:36	FK10	21 1 1 1 1 1 1 1 108	PTN	4741		PPB/MII	15:47	ATR43	C 1 1 1 1 1 1 45
TAM	3543		MAO/BSB	07:38	A320	B 1 1 1 1 1 1 1 162	PTN		4784	JDF	15:48	ATR43	20 1 1 144
GLO		1738	CWB	07:39	B737	20 1 1 1 1 1 1 1 144	GLO		1772	FLN	15:49	B737	17 1 1 144
VRG		2405	SDU	07:40	B73A	4 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM	3010		CWB	15:50	A320	B 1 1 1 1 1 1 1 1 162
TAM		3204	PLU	07:41	A319	21 1 132	VRG		2432	SDU	15:51	B73A	B 1 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3210	CNF	07:41	A319	14 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3935	SDU	15:52	A319	B 1 1 1 1 1 1 1 1 132
PTN	4753		UBA/AQA	07:42	ATR43	C 1 1 1 1 1 1 1 45	GLO		1882	BSB	15:53	B737	16 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM		3903	SDU	07:43	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132	VRG	2033		CNF	15:54	B733	B 1 1 1 1 1 1 1 1 128
TAM			SDU	07:44	A319	1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3061	POA	15:55	A320	18 1 1 1 1 1 1 1 162
VRG	2402		SDU	07:45	B73A	B 1 1 1 1 1 1 1 132	VRG		2435	SDU	15:56	B73A	C 1 1 1 1 1 1 1 132
GLO		1936	CGB/BSB	07:47	B737	8 1 1 1 1 1 1 1 144	ONE	6315		VIA	15:58	E120	C 1 1 30
PTN	4767		ARU/BAU	07:49	ATR43	A 1 1 1 1 1 1 1 1 45	GLO		1528	SDU	15:59	B737	6 1 1 1 1 1 1 1 144
GLO	1503		SDU	07:52	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 144	TAM		3940	SDU	16:08	A319	8 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3460	GYN	07:53	A320	18 1 1 1 1 1 1 1 162	GLO	1923		NVT	16:09	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM		3039	NVT	07:54	FK10	15 1 1 1 1 1 1 1 108	GLO	1527		SDU	16:11	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 144
BRB	1121		VIX	07:55	B733B	1 1 1 1 1 1 1 148	TAM		3937	SDU	16:12	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132
PTN	4731		PPB/MII	07:55	ATR43	C 1 1 1 1 1 1 1 45	TAM		3013	CWB	16:13	A320	20 1 1 1 1 1 1 1 162
GLO		1504	SDU	07:56	B737	16 1 1 1 1 1 1 1 144	GLO		1809	UDI	16:14	B738	A 1 1 1 1 1 1 1 1 177
TAM		3003	CWB	07:57	A319	21 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3709	BSB	16:15	A320	B 1 1 1 1 1 1 1 162
TAM		3962	SDU	07:57	A319	8 1 132	VRG		2706	CWB	16:16	B733	17 1 1 1 1 1 1 1 128
TAM	3775		CGR	07:58	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 162	PTN	4773		BAU	16:19	ATR43	C 1 1 1 1 1 1 45
ONE		6318	IPN	07:59	FK50	21 1 50	GLO	1687		FLN	16:20	B737	B 1 1 144
TAM		3059	POA	07:59	A320	13 1 1 1 1 1 1 162	PTN		4754	UBA	16:21	ATR43	21 1 1 1 1 1 1 45
VRG	2739		JOI/CWB	08:01	B733	C 1 1 1 1 1 1 1 128	TAM	3110		FLN	16:23	FK10	C 1 1 1 1 1 1 1 108
TAM		3896	BSB/PVH	08:02	A320	5 1 1 1 1 1 1 1 162	TAM	3030		IGU	16:24	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3101	FOR/GIG	08:03	FK10	A 1 1 1 1 1 1 1 108	TAM	3022		NVT	16:26	FK10	B 1 108
PTN		4730	MII/PPB	08:04	ATR43	20 1 1 1 1 1 1 1 45	TAM		3279	RAO	16:27	FK10	A 1 1 1 1 1 1 1 1 108
VRG	2404		SDU	08:05	B73A	B 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3202	PLU	16:28	A319	13 1 1 1 1 1 1 1 132
TAM		3100	FLN	08:09	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132	GLO		1914	GYN	16:30	B737	14 1 1 1 1 1 1 1 144
TAM		3551	GYN	08:11	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 162	VRG	2629		BSB	16:31	B733	B 1 1 1 1 1 1 1 1 128
TAM		3905	SDU	08:12	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132	VRG		2639	BSB	16:31	B733	B 1 128
TAM			SDU	08:13	A319	7 1 1 1 1 1 1 132	VRG		2437	SDU	16:32	B73A	1 1 1 1 1 1 1 1 132
GLO	1961		FLN	08:14	B738	B 1 1 1 1 1 1 1 177	VRG	2434		SDU	16:35	B73A	B 1 1 1 1 1 1 1 1 132
VRG		2407	SDU	08:16	B73A	17 1 1 1 1 1 1 1 132	GLO		1920</				

Anexo B - Hotran dos Vôos do Aeroporto de Congonhas - Abril/2006

EMP.	VOO	VOO	ESCALAS	HORA	EQUIP.	FREQUÊNCIA	EMP.	VOO	VOO	ESCALAS	HORA	EQUIP.	FREQUÊNCIA				
TAM	3101	FLN	08:28	FK10	20	1 1 1 1 1 1 1 1	108	VRG	2799	POA	16:50	B733	B 1 1 1 1 1 1 1 1	128			
TAM	3126	VIX	08:29	A319	19	1	132	TAM		3103	FLN	16:51	FK10	14 1 1 1 1 1 1 1 1	108		
TAM	3562	BSB/REC/JPA	08:30	A320	3	1 1 1 1 1 1 1 1	162	TAM	3763	CGB/CGR/LDE	16:52	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 1	162			
VRG	2730	JOI	08:31	B733	19	1 1 1 1 1 1 1 1	128	TAM		3546	IP/BSB/PVH/JF	16:53	FK10	17 1 1 1 1 1 1 1 1	108		
VRG		VIX	08:32	B733	B	1 1 1 1 1 1 1 1	128	GLO	1529	SDU	16:54	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 1	144			
BRB	1094	CNF	08:34	B733B		1 1	148	TAM		3134	VIX	16:59	A319	18 1 1 1 1 1 1 1 1	132		
BRB	1020	GYN/BSB	08:34	B733B		1 1 1	148	RSL	5070	MGF/LDB	17:01	B735	B 1 1 1 1 1 1 1 1	120			
VRG	2409	SDU	08:35	B73A	4	1 1 1 1 1 1 1 1	132	VRG		2439	SDU	17:05	B73A	5 1 1 1 1 1 1 1 1	132		
TAM	3270	RAO	08:38	A319	13	1 1 1 1 1 1 1 1	132	BRB	1037	BSB/GYN/CGB/C	17:06	B733B		1			
VRG	2750	CWB/NVT	08:40	B735	17	1 1 1 1 1 1 1 1	120	BRB	1007	CWB	17:06	B733B			1		
VRG	2621	BSB	08:42	B73A	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132	BRB	1009	LDB/CWB	17:06	B733B			1	1	
TAM		3005	CWB	08:43	A320	16	1 1 1 1 1 1 1 1	162	BRB	1111	IGU/CWB	17:06	B733B				1
TAM	3907	SDU	08:44	A319	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132	PTN		4732	MII/PPB	17:07	ATR43	20	1 1 1 1 1 1 1 1	45	
GLO	1506	SDU	08:47	B737	2	1 1 1 1 1 1 1 1	144	ONE	6365	SOD	17:08	E120	C	1			30
TAM		3910	SDU	08:48	A319	5	1 1 1 1 1 1 1 1	132	TAM	3133	VIX	17:09	A319	C	1	1 1 1 1 1 1	132
GLO	1609	VIX/CNF	08:49	B733G	A	1 1 1 1 1 1 1 1	141	TAM	3941	SDU	17:13	A319	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132		
GLO	1827	MCP/BEL/BSB	08:50	B738	A	1 1 1 1 1 1 1 1	177	TAM		3944	SDU	17:14	A319	6	1 1 1 1 1 1 1 1	132	
GLO	1505	SDU	08:51	B737	B	1 1 1 1 1 1 1 1	144	GLO	1604	FLN/POA	17:15	B737	13	1 1 1 1 1 1 1 1	144		
GLO	1953	POA	08:52	B737	A	1 1 1 1 1 1 1 1	144	GLO	1778	BSB	17:16	B738	4	1 1 1 1 1 1 1 1	177		
GLO	1957	CWB	08:53	B738	B	1 1 1 1 1 1 1 1	177	PTN	4769	MII/BAU	17:17	ATR43	C	1	1 1 1 1 1 1	45	
TAM	3211	CNF	08:54	A320	A	1 1 1 1 1 1 1 1	162	VRG	2436	SDU	17:18	B73A	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132		
VRG	2406	SDU	08:55	B73A	B	1 1 1 1 1 1 1 1	132	GLO		1532	SDU	17:22	B737	1	1 1 1 1 1 1 1 1	144	
PTN	4781	JDF	08:56	ATR43	B	1 1 1 1 1 1 1 1	45	GLO	1531	SDU	17:23	B737	15	1 1 1 1 1 1 1 1	144		
TAM	3229	CNF	08:58	A320	A		162	TAM		3712	BSB/SLZ	17:24	A320	2	1 1 1 1 1 1 1 1	162	
TAM	3747	SJP	09:00	FK10	C	1 1 1 1 1 1 1 1	108	GLO	1762	MGF/CWB	17:25	B737	B	1 1 1 1 1 1 1 1	144		
TAM		3216	CNF/SSA/MCZ	09:02	A320	19	1 1 1 1 1 1 1 1	162	ONE	6357	DOU	17:26	FK50	C	1 1 1 1 1 1 1 1	50	
GLO	1954	FLN/POA	09:03	B738	20	1 1 1 1 1 1 1 1	177	TAM	3421	SSA/UNA	17:27	A320	C	1		162	
GLO	1600	GIG/SSA	09:05	B738	13	1 1 1 1 1 1 1 1	177	TAM	3451	SSA/BPS	17:27	A320	C	1 1 1 1 1 1 1 1	162		
VRG	2465	SDU	09:06	B733			128	GLO		1969	GIG	17:28	B737		1 1 1 1 1 1 1 1	144	
VRG	2792	POA	09:07	B733	18	1 1 1 1 1 1 1 1	128	ONE	6311	PFV/POA	17:29	FK50	21	1 1 1 1 1 1 1 1	50		
TAM	3722	BSB/SLZ	09:09	A320	6	1 1 1 1 1 1 1 1	162	VRG	2775	FLN	17:31	B733	A	1 1 1 1 1 1 1 1	128		
VRG	2780	VIX	09:10	B735	17	1 1 1 1 1 1 1 1	120	VRG		2708	CWB	17:32	B733	13	1 1 1 1 1 1 1 1	128	
GLO		1966	CWB	09:11	B738	16	1 1 1 1 1 1 1 1	177	VRG		2800	POA	17:33	B733	18	1 1 1 1 1 1 1 1	128
TAM	3243	UDI	09:12	A319	B	1 1 1 1 1 1 1 1	132	VRG		2736	JOI	17:34	B733	17	1 1 1 1 1 1 1 1	128	
TAM		3912	SDU	09:14	A319	1	1 1 1 1 1 1 1 1	132	VRG	2035	CNF	17:36	B733	B	1		128
ONE	6305	CCM	09:16	E120	C	1 1 1 1 1 1 1 1	30	TAM	3223	CNF	17:37	A320	B	1 1 1 1 1 1 1 1	162		
TAM	3909	SDU	09:17	A319	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132	TAM		3274	RAO	17:39	A319	15	1 1 1 1 1 1 1 1	132	
GLO		1612	BSB	09:18	B737	16	1 1 1 1 1 1 1 1	144	TAM	3731	UDI	17:41	A319	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132	
VRG	2411	SDU	09:19	B73A	5	1 1 1 1 1 1 1 1	132	TAM		3946	SDU	17:42	A319	3	1 1 1 1 1 1 1 1	132	
TAM	3740	SJP/CGB	09:20	A320	14	1 1 1 1 1 1 1 1	162	VRG		2441	SDU	17:43	B73A	7	1 1 1 1 1 1 1 1	132	
GLO	1840	SSA	09:21	B737	18	1	144	ONE		6300	CWB/CAC	17:45	FK50	21	1 1 1 1 1 1 1 1	50	
VRG	2622	BSB	09:22	B73A	8	1 1 1 1 1 1 1 1	132	VRG	2438	SDU	17:47	B73A	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132		
VRG	2663	PLU	09:24	B733	B	1 1 1 1 1 1 1 1	128	GLO	1534	SDU	17:48	B737	4	1 1 1 1 1 1 1 1	144		
BRB	1000	POA/CWB	09:27	B733B		1 1	148	VRG		2776	FLN	17:49	B733	18	1 1 1 1 1 1 1 1	128	
BRB	1002	POA	09:27	B733B		1 1 1 1	148	TAM	3027	VIX	17:50	FK10	A	1 1 1 1 1 1 1 1	108		
VRG	2408	SDU	09:26	B73A	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132	BRB		1078	GIG/SSA/REC	17:51	B733B		1	148	
GLO	1683	NVT	09:30	B737	B	1 1 1 1 1 1 1 1	144	BRB		1092	CNF	17:51	B733B		1	148	
ONE	6323	MOC/IPN	09:31	E120	C	1 1 1 1 1 1 1 1	30	BRB		1024	GYN/BSB	17:51	B733B			148	
TAM		3760	LDB/CGR	09:33	A320	15	1 1 1 1 1 1 1 1	162	BRB		1080	GIG/SSA	17:51	B733B		1 1	148
GLO	1508	SDU	09:34	B737	7	1 1 1 1 1 1 1 1	144	GLO	1533	SDU	17:54	B737	4	1 1 1 1 1 1 1 1	144		
TAM		3964	SDU	09:35	A319	1		132	PTN		4788	JDF	17:56	ATR43	21	1 1 1 1 1 1 1 1	45
GLO	1507	SDU	09:35	B737	B	1 1 1 1 1 1 1 1	144	BRB	1004	POA	17:57	B733B		1 1 1	148		
TAM	3553	UDI	09:35	A320	A	1	162	BRB	1041	CGB/CGR	17:57	B733B			148		
TAM	3033	CWB	09:36	FK10	13	1 1 1 1 1 1 1 1	108	BRB	1039	BSB/GYN/CGB/C	17:57	B733B		1	148		
GLO		1706	CNF	09:37	B733	19	1 1 1 1 1 1 1 1	128	TAM		3015	CWB	17:59	A319	17	1 1 1 1 1 1 1 1	132
GLO	1615	LDB/CWB	09:41	B737	A	1	144	VRG		2638	BSB	18:00	B733			128	
VRG		2030	CNF	09:44	B735	20	1 1 1 1 1 1 1 1	120	VRG		2036	CNF	18:01	B733	21	1 1 1 1 1 1 1 1	128
TAM	3201	PLU	09:45	A319	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132	GLO	1737	CGB/CGR	18:03	B738	C	1 1 1 1 1 1 1 1	177		
GLO	1911	RAO	09:48	B737	A	1 1 1 1 1 1 1 1	144	ONE		6322	IPN	18:04	E120	19	1 1 1 1 1 1 1 1	30	
TAM		3914	SDU	09:49	A319	2	1 1 1 1 1 1 1 1	132	GLO	1773	FLN	18:06	B737	A	1		144
GLO	1951	CNF/UDI	09:50	B737	A	1 1 1 1 1 1 1 1	144	GLO	1855	CNF	18:07	B733	A		128		
TAM	3911	SDU	09:51	A319	B	1 1 1 1 1 1 1 1	132	VRG	2440	SDU	18:08	B73A	B	1 1 1 1 1 1 1 1	132		
TAM		3470	BSB/FOR	09:52	A320	3	1 1 1 1 1 1 1 1	162	TAM		3224	CNF	18:09	A320	6	1 1 1 1 1 1 1 1	162
TAM	3163	CXJ	09:53	FK10	15	1	108	TAM		3027	JOI	18:10	FK10	13	1 1 1 1 1 1 1 1	108	
TAM	3730	UDI	09:54	A319	17	1 1 1 1 1 1 1 1	132	TAM		3948	SDU	18:12	A319	14	1 1 1 1 1 1 1 1	132	
VRG	2410	SDU	09:55	B73A	A	1 1 1 1 1 1 1 1	132	VRG		2443	SDU	18:13	B73A	1	1 1 1 1 1 1 1 1	132	
VRG		2413	SDU	09:56	B73A	6	1 1 1 1 1 1 1 1	132	TAM		3945	SDU	18:14	A319	B	1 1 1 1 1 1 1 1	132
GLO	1510	SDU	09:57	B737	19	1 1 1 1 1 1 1 1	144	TAM	3014	CWB	18:18	A320	B	1 1 1 1 1 1 1 1	162		
BRB	1100	BSB	09:58	B733B		1 1 1 1 1 1	148	GLO	1619	CNF	18:19	B737	A	1 1 1 1 1 1 1 1	144		
NES	5100	BPS	09:58	B735			120	TAM		3574	REC/NAT/FOF	18:21	A320	8	1 1 1 1 1 1 1 1	162	
GLO	1770	BPS	09:59	B737	14	1	144	GLO	1608	POA	18:22	B733G	C	1 1 1 1 1 1 1 1	141		
GLO		1912	GYN	10:00	B737	18	1 1 1 1 1 1 1 1	144	TAM	3041	SSA/GIG	18:24	FK10	A	1 1 1 1 1 1 1 1	108	
GLO	1739	CWB	10:01	B737	B	1 1 1 1 1 1 1 1	144	GLO		1752	GYN/BSB/JPA	18:25	B737	5	1 1 1 1 1 1 1 1	144	
GLO	1751	JPA/BSB/GYN	10:04	B737	C	1 1 1 1 1 1 1 1	144	TAM	3054	POA	18:26	A320	A	1 1 1 1 1 1 1 1	162		
TAM	3004	CWB	10:05	A319	C	1 1 1 1 1 1 1 1	132	TAM		3468	GYN	18:27	A319	17	1 1 1 1 1 1 1 1	132	
GLO	1719	POA	10:06	B737	A	1 1 1 1 1 1 1 1	144	VRG	2631	BSB	18:28	B733	C	1 1 1 1 1 1 1 1	128		
GLO	1509	SDU	10:07	B737	A	1 1 1 1 1 1 1 1	144	TAM	3207	PLU	18:29	A319	B	1		132	
ONE	6310	POA/PFB	10:09	E120	C	1 1 1 1 1 1 1 1	30	TAM	3225	CNF	18:29	A319	B	1 1 1 1 1 1 1 1	132		
TAM		3916	SDU	10:11	A319	7	1 1 1 1 1 1 1 1	132	ONE	6367	SOD	18:30	E120		1	30	
TAM		3487	SSA/IOS	10:12	A320	A	1 1 1 1 1 1 1 1	162	BRB		1102	BSB	18:32	B733B		1 1 1	148
GLO		1726	CWB/LDB	10:15	B737	1	1 1 1 1 1 1 1 1	144	BRB		1076	ARU/MCZ/REC	18:32	B733B		1	148
PTN	4770																

Anexo B - Hotran dos Vôos do Aeroporto de Congonhas - Abril/2006

EMP.	VOO	VOO	ESCALAS	HORA	EQUIP.	FREQUÊNCIA	EMP.	VOO	VOO	ESCALAS	HORA	EQUIP.	FREQUÊNCIA		
VRG	2414		SDU	10:38	B73A	A 1 1 1 1 1 132	TAM		3057	POA	18:58	A320	18 1 1 1 1 1 162		
GLO		1512	SDU	10:40	B737	21 1 1 1 1 1 1 144	TAM		3083	CWB	18:59	A320		1	162
TAM	3028		JOI	10:43	FK10	B 1 108	ONE	6309		POA/GEL/XAF	18:59	E120	C 1 1 1 1 1 1 30		
TAM	3026		JOI	10:46	FK10	B 1 1 1 1 1 108	VRG		2447	SDU	19:00	B73A	6 1 1 1 1 1 1 132		
GLO	1511		SDU	10:47	B737	A 1 1 1 1 1 144	VRG		2634	BSB	19:01	B733	2 1 1 1 1 1 1 128		
VRG		2417	SDU	10:49	B73A	4 1 1 1 1 1 1 132	VRG	2783		VIX	19:02	B733	1 1 1 1 1 1 1 128		
TAM	3915		SDU	10:50	A319	B 1 1 1 1 1 1 132	TAM	3203		PLU	19:05	A319	B 1 1 1 1 1 1 1 132		
TAM		3918	SDU	10:51	A319	6 1 1 1 1 1 1 132	GLO		1538	SDU	19:07	B737	1 1 1 1 1 1 1 144		
TAM		3420	UNA/SSA	10:52	A320	19 1 1 162	GLO		1774	RAO	19:08	B737	19 1 1 1 1 1 1 144		
TAM		3450	BPS/SSA	10:52	A320	19 1 1 1 1 1 162	GLO	1765		REC/GIG	19:09	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 144		
TAM	3271		RAO	10:54	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132	VRG	2444		SDU	19:13	B73A	B 1 1 1 1 1 1 1 132		
ONE		6366	SOD	10:56	E120	21 1 30	GLO	1677		SSA/BPS/GIG	19:13	B738	B 1 177		
TAM	3213		CNF	10:56	A319	B 1 1 1 1 1 132	GLO	1785		SSA/GIG	19:14	B738	B 1 1 1 1 1 1 1 177		
TAM	3006		CWB	10:57	A320	A 1 1 1 1 1 1 162	TAM	3949		SDU	19:15	A319	B 1 1 1 1 1 1 1 132		
GLO	1678		GIG	10:58	B738	B 1 177	TAM		3952	SDU	19:16	A319	7 1 1 1 1 1 1 1 132		
TAM		3040	GIG/SSA	10:59	FK10	13 1 1 1 1 1 1 108	GLO	1921		CNF	19:19	B737	1 1 1 1 1 1 1 1 144		
TAM		3970	SDU	11:00	A319	15 1 132	TAM		3748	SJP	19:20	FK10	1 1 1 1 1 1 1 1 108		
TAM		3053	POA	11:01	A320	16 1 1 1 1 1 1 162	GLO	1671		SSA	19:22	B737	B 1 144		
BRB	1095		CNF	11:02	B733B	1 1 148	GLO	1537		SDU	19:23	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 144		
BRB	1069		REC/SSA	11:02	B733B	1 1 1 148	TAM	3471		FOR/BSB	19:24	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 162		
VRG		2624	BSB	11:03	B733	3 1 1 1 1 1 1 128	TAM		3714	BSB	19:25	A320	1 1 1 1 1 1 1 1 162		
PTN	4751		UBA	11:04	ATR43	C 1 1 1 1 1 45	GLO	1790		POA/CWB	19:26	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 144		
VRG		2419	SDU	11:06	B73A	5 1 1 1 1 1 1 132	TAM	3060		POA	19:26	A320	C 1 1 1 1 1 1 1 162		
ONE		6356	DOU	11:07	FK50	21 1 1 1 1 1 1 50	TAM	3475		SSA/BPS	19:28	FK10	1 108		
TAM		3026	VIX	11:08	FK10	17 1 1 1 1 1 108	TAM		3226	CNF	19:29	A319	14 1 1 1 1 1 1 1 132		
TAM		3102	FLN	11:09	FK10	A 1 1 1 1 1 1 1 108	VRG		2756	NVT	19:30	B733	1 1 1 1 1 1 1 1 128		
TAM		3920	SDU	11:12	A319	2 1 1 1 1 1 1 132	GLO		1754	CWB	19:35	B737	15 1 1 1 1 1 1 1 144		
TAM		3007	CWB	11:13	A320	19 1 1 1 1 1 1 162	VRG		2710	CWB	19:36	B733	1 1 1 1 1 1 1 128		
GLO	1815		SLZ/FOR/BSB	11:14	B738	A 1 1 1 1 1 1 1 177	TAM	3743		CGB/SJP	19:37	A320	B 1 1 1 1 1 1 1 1 162		
VRG		2794	POA	11:15	B733	13 1 1 1 1 1 1 128	TAM		3954	SDU	19:38	A319	3 1 1 1 1 1 1 1 132		
PTN	4783		JDF	11:17	ATR43	C 1 1 1 45	TAM		3128	VIX	19:39	A320	18 1 1 1 1 1 1 1 162		
GLO	1949		CWB	11:18	B737	A 1 1 1 1 1 1 144	VRG		2449	SDU	19:40	B73A	4 1 1 1 1 1 1 1 132		
TAM	3917		SDU	11:19	A319	A 1 1 1 1 1 1 132	GLO		1682	NVT	19:41	B733G	5 1 1 1 1 1 1 1 141		
GLO		1514	SDU	11:20	B737	7 1 1 1 1 1 1 144	TAM	3275		RAO	19:42	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 1 132		
VRG	2731		JOI	11:21	B733	B 1 1 1 1 1 1 1 128	TAM	3951		SDU	19:43	A319	1 1 1 1 1 1 1 1 132		
GLO	1713		REC/GIG	11:22	B737	C 1 1 1 1 1 1 1 144	TAM	3104		FLN	19:45	FK10	A 1 1 1 1 1 1 1 1 108		
TAM		3704	BSB	11:23	A319	8 1 1 1 1 1 1 132	VRG	2446		SDU	19:46	B73A	C 1 1 1 1 1 1 1 1 132		
GLO	1678		BSB/SSA	11:24	B738	8 1 177	TAM		3538	GIG/BEL	19:50	A319	13 1 1 1 1 1 1 1 132		
RSL	5050		PFB/CXJ	11:25	B733	16 1 1 1 1 1 1 128	TAM	3773		CGR/LDB	19:51	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 1 162		
TAM	3127		VIX	11:28	A319	B 1 132	VRG	2709		CWB	19:52	B733	C 1 1 1 1 1 1 1 128		
TAM		3474	BPS/SSA	11:30	FK10	13 1 108	GLO		1826	BSB/BEL/MCF	19:53	B738	6 1 1 1 1 1 1 1 177		
BRB	1001		CWB/POA	11:31	B733B	1 148	GLO		1610	CNF	19:54	B737	4 1 144		
BRB	1040		CGR/CGB	11:31	B733B	1 148	TAM	3897		BSB	19:55	A320	1 1 1 1 1 1 1 1 162		
BRB	1008		CWB/LDB	11:31	B733B	1 148	GLO	1539		SDU	19:58	B737	B 1 1 1 1 1 1 1 1 144		
BRB	1010		CWB/IGU	11:31	B733B	1 148	GLO		1540	SDU	19:59	B737	1 1 1 1 1 1 1 1 144		
VRG	2416		SDU	11:32	B73A	B 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3552	UDI/GYN	20:00	A320	20 1 162		
GLO	1513		SDU	11:34	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 144	PTN	4705		MVS/JDF	20:00	ATR43	C 1 1 1 45		
TAM	3461		GYN	11:35	A320	C 1 1 1 1 1 1 1 162	PTN	4785		JDF	20:00	ATR43	C 1 1 45		
TAM	3963		SDU	11:36	A319	A 1 132	GLO	1915		GYN	20:01	B737	1 1 1 1 1 1 1 1 144		
PTN		4740	MII/PPB	11:37	ATR43	21 1 1 1 1 1 1 45	NES		5103	BPS	20:03	B735	1 120		
TAM		3025	NVT	11:38	FK10	15 1 108	TAM	3016		CWB	20:06	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132		
TAM		3161	CXJ/POA	11:39	FK10	19 1 1 1 1 1 1 108	GLO		1730	PLU/VIX	20:09	B737	19 1 1 1 1 1 1 1 144		
GLO		1618	POA	11:40	B733G	16 1 1 1 1 1 1 1 141	TAM	3467		NAT/BSB/GYN	20:10	A320	C 1 1 1 1 1 1 1 1 162		
TAM		3058	POA	11:45	A320	B 1 1 1 1 1 1 162	TAM		3956	SDU	20:11	A319	8 1 1 1 1 1 1 1 132		
GLO		1736	CGR/CGB	11:45	B738	17 1 1 1 1 1 1 1 177	VRG		2451	SDU	20:12	B73A	7 1 1 1 1 1 1 1 132		
ONE	6314		VIA	11:46	E120	21 1 1 30	TAM	3953		SDU	20:15	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132		
TAM		3922	SDU	11:47	A319	1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3037	JOI	20:16	FK10	16 1 1 1 1 1 1 1 108		
TAM	3919		SDU	11:48	A319	A 1 1 1 1 1 1 132	VRG	2633		BSB	20:17	B733	C 1 1 1 1 1 1 1 1 128		
GLO		1742	BSB/SSA	11:50	B737	4 1 1 1 1 1 1 144	VRG	2448		SDU	20:19	B73A	B 1 1 1 1 1 1 1 132		
TAM	3575		SLZ/FOR/NAT/REC	11:51	A320	A 1 1 1 1 1 1 1 162	PTN	4755		UBA/AQA	20:20	ATR43	1 1 1 1 1 1 45		
VRG	2418		SDU	11:54	B73A	A 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3049	POA	20:21	A320	1 1 1 1 1 1 1 162		
VRG		2421	SDU	11:55	B73A	7 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3486	IOS/SSA	20:22	A320	16 1 1 1 1 1 1 1 162		
TAM		3214	CNF	11:56	A320	14 1 1 1 1 1 162	TAM		3774	CGR	20:26	A320	17 1 1 1 1 1 1 1 162		
TAM		3462	GYN	11:57	A319	19 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3721	BSB	20:27	A320	B 1 1 1 1 1 1 1 162		
GLO	1766		CWB	12:00	B738	B 1 177	VRG		2738	JOI	20:28	B733	15 1 1 1 1 1 1 1 128		
VRG		2702	CWB	12:01	B733	1 1 1 1 1 1 1 1 128	TAM	3034		JOI	20:30	FK10	C 1 1 1 1 1 1 1 1 108		
GLO		1516	SDU	12:06	B737	5 1 1 1 1 1 1 1 144	VRG	2737		JOI	20:32	B733	B 1 1 1 1 1 1 1 1 128		
GLO	1707		CNF	12:07	B733	B 1 1 1 1 1 1 1 128	TAM	3135		VIX	20:35	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 1 132		
GLO	1515		SDU	12:09	B737	B 1 1 1 1 1 1 144	VRG	2450		SDU	20:36	B73A	B 1 1 1 1 1 1 1 1 132		
GLO	1917		JOI	12:11	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 144	GLO	1743		BSB	20:37	B738	A 1 1 1 1 1 1 177		
TAM		3480	RAO	12:12	A319	18 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM	3217		MCZ/SSA/CNF	20:39	A320	B 1 1 1 1 1 1 1 1 162		
TAM		3924	SDU	12:14	A319	6 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3955	SDU	20:41	A319	A 1 1 1 1 1 1 1 132		
PTN	4763		ARU/BAU	12:15	ATR43	C 1 1 1 1 1 1 45	TAM		3958	SDU	20:42	A319	4 1 1 1 1 1 1 1 132		
TAM		3762	LDB/CGR/CGE	12:19	A320	15 1 1 1 1 1 1 1 162	TAM		3772	LDB	20:43	A320	19 1 1 1 1 1 1 1 1 162		
TAM		3921	SDU	12:20	A319	B 1 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3086	CWB	20:44	A320	1 162		
VRG	2420		SDU	12:21	B73A	A 1 1 1 1 1 1 1 132	VRG		2453	SDU	20:45	B73A	1 1 1 1 1 1 1 1 132		
PTN	4733		PPB/MII	12:25	ATR43	C 1 1 1 1 1 1 45	GLO		1542	SDU	20:46	B737	5 1 1 1 1 1 1 1 144		
GLO		1766	GIG/JPA	12:28	B738	16 1 177	VRG		2636	BSB	20:48	B733	1 1 1 1 1 1 1 1 128		
TAM		3974	SDU	12:29	A319	2 1 132	TAM	3018		CWB	20:49	A320	B 1 1 1 1 1 1 1 162		
GLO		1762	CWB/MGF	12:31	B737	18 1 144	VRG	2037		CNF	20:53	B733	A 1 1 1 1 1 1 1 1 128		
VRG		2423	SDU	12:32	B73A	8 1 1 1 1 1 1 132	TAM		3542	BSB/MAB/BEL	20:54	A320	5 1 1 1 1 1 1 1 162		
VRG	2031		CNF	12:32	B733	A 1 1 1 1 1 1 128	TAM		3276	RAO	20:55	A319	1 1 1 1 1 1 1 1 132		
GLO		1708	CNF	12:33	B733G	19 1 1 1 1 1 1 141	GLO	1541		SDU	20:56	B737	A 1 1 1 1 1 1 1 1 144		
TAM		3706	BSB	12:33	A320	21 1 1 1 1 1 1 1 162	TAM		3230	CNF	20:57	A320	1 1 1 1 1 1 1 162		
TAM		3241	UDI	12:34	A319	C 1 1 1 1 1 1 1 132	BRB	1093		CNF	20:58	B733B	1 148		
PTN		4768	BAU/ARU	12:37	ATR43	20 1 1 1 1 1 1 45	VRG	2803		POA	20:58	B733	1 1 1 1 1 1 1 1 128		
VRG	2795		POA	12:39	B733	A 1 1 1 1 1 1 1 128	GLO		1614	CWB/LDB	20:59	B737	19 1 144		
GLO		1518	SDU	12:40	B737	1 1 1 1 1 1 1 1 144	GLO		1878	GIG/JPA	21:03	B738	18 1 1 1 1 1 1 1 177		
TAM		3926	SDU	12:45	A319	7 1 1 1 1 1 1 132	GLO		1880	GIG/MCZ	21:03	B738	18 1 177		
GLO		1918	LDB	12:46	B737	14 1 1 1 1 1 1 1 144	VRG	</							

Anexo B - Hotran dos Vôos do Aeroporto de Congonhas - Abril/2006

EMP.	VOO	VOO	ESCALAS	HORA	EQUIP.	FREQUÊNCIA										EMP.	VOO	VOO	ESCALAS	HORA	EQUIP.	FREQUÊNCIA									
VRG	2757		CWB	12:56	B733	B	1	1	1	1	1	1	1	128	VRG		2455	SDU	21:17	B73A	7	1	1	1	1	1	1	132			
TAM		3109	FLN	12:57	FK10	21	1	1	1	1	1	1	1	108	TAM		3105	FLN	21:19	A319	14	1	1	1	1	1	1	132			
VRG		2626	BSB	12:59	B733		1	1	1	1	1	1	1	128	BRB	1103		BSB	21:20	B733B		1	1	1	1	1	1	148			
TAM		3218	CNF	13:00	A319	4	1	1	1	1	1	1	1	132	GLO	1605		SSA/GIG	21:21	B738	A	1	1	1	1	1	1	177			
VRG		2425	SDU	13:01	B73A	3	1	1	1	1	1	1	1	132	TAM	3957		SDU	21:22	A319	A	1	1	1	1	1	1	132			
GLO		1830	A/REC/FOR/BI	13:02	B737	21	1	1	1	1	1	1	1	144	TAM	3457		SSA/IOS	21:23	FK10	A	1	1	1	1	1	1	108			
TAM	3547	JPR/PVH/BSB/S.	13:03	FK10	A		1	1	1	1	1	1	1	108	GLO		1544	SDU	21:24	B737	16	1	1	1	1	1	1	144			
TAM	3965		SDU	13:05	A319								1	132	GLO	1543		SDU	21:25	B737	B	1	1	1	1	1	1	144			
GLO	1793		BSB	13:09	B737	A							1	144	TAM	3231		CNF	21:27	A320		1	1	1	1	1	1	162			
TAM	3925		SDU	13:14	A319	A		1	1	1	1	1	1	132	GLO		1688	POA	21:29	B737	15	1	1	1	1	1	1	144			
TAM		3928	SDU	13:15	A319	5		1	1	1	1	1	1	132	TAM		3019	CWB	21:29	A320	6	1	1	1	1	1	1	162			
VRG		2796	POA	13:17	B733	18	1	1	1	1	1	1	1	128	PTN	4735		PPB/MII	21:31	ATR43	C	1	1	1	1	1	1	45			
GLO		1761	CWB/MGF	13:18	B737	2		1	1	1	1	1	1	144	PTN		4752	AQA/UBA	21:31	ATR43	20	1	1	1	1	1	1	45			
TAM	3008		CWB	13:20	A320	B	1	1	1	1	1	1	1	162	VRG		2802	POA	21:33	B733		1	1	1	1	1	1	128			
VRG	2424		SDU	13:21	B73A	B		1	1	1	1	1	1	132	TAM	3042		NVT	21:34	FK10	A	1	1	1	1	1	1	108			
BRB	1077	REC/MCZ/ARU/SSA	13:23	B733B									1	148	TAM	3453		SSA/IOS	21:34	FK10	C	1						108			
GLO		1520	SDU	13:22	B737	21	1	1	1	1	1	1	1	144	VRG		2782	VIX	21:35	B733	18		1	1	1	1	1	128			
BRB	1101		BSB	13:23	B733B								1	148	TAM		3401	MGF	21:37	A319		1	1	1	1	1	1	132			
VRG		2032	CNF	13:24	B733	15		1	1	1	1	1	1	128	PTN		4766	BAU/ARU	21:38	ATR43	20	1	1	1	1	1	1	45			
TAM	3465		BSB/GYN	13:26	A320	A		1	1	1	1	1	1	162	PTN		4734	MII/PPB	21:40	ATR43	20	1	1	1	1	1	1	45			
GLO	1808		POA	13:27	B738	B	1	1	1	1	1	1	1	177	TAM	3749		SJP	21:45	FK10		1	1	1	1	1	1	108			
TAM	3131		VIX	13:29	A319	A		1	1	1	1	1	1	132	TAM	3245		UDI	21:45	A319	A	1	1	1	1	1	1	132			
VRG		2427	SDU	13:30	B73A	1		1	1	1	1	1	1	132	GLO	1726		CWB	21:46	B737	A	1	1	1	1	1	1	144			
GLO	1781		CXJ	13:32	B737	B	1	1	1	1	1	1	1	144	VRG	2777		FLN	21:47	B733	A	1	1	1	1	1	1	128			
RSL		5070	MGF	13:34	B735	15	1	1	1	1	1	1	1	120	TAM		3960	SDU	21:48	A319	2	1	1	1	1	1	1	132			
GLO	1519		SDU	13:35	B737	B		1	1	1	1	1	1	144	VRG		2758	NVT	21:49	B733	19	1	1	1	1	1	1	128			
GLO		1768	BPS	13:36	B737	17							1	144	TAM	3469		GYN	21:51	A319	B	1	1	1	1	1	1	132			
NES		5102	BPS	13:40	B735								1	120	VRG	2454		SDU	21:52	B73A	B	1	1	1	1	1	1	132			
GLO	1685		CNF	13:40	B737	B	1	1	1	1	1	1	1	144	TAM		3254	RAO	21:53	A319	1	1	1	1	1	1	1	132			
TAM		3031	IGU	13:41	A319	13	1	1	1	1	1	1	1	132	GLO	1937		CBG/BSB	21:54	B733G		1	1	1	1	1	1	141			
TAM		3930	SDU	13:43	A319	3	1	1	1	1	1	1	1	132	ONE	6325		POA/GEL/XAF	21:55	E120	C	1					30				
TAM		3009	CWB	13:44	A320	15	1	1	1	1	1	1	1	162	TAM		3232	CNF	21:57	A320		1						162			
GLO		1922	NVT	13:45	B737	14	1	1	1	1	1	1	1	144	GLO	1645		SSA/GIG	21:59	B738		1	1	1	1	1	1	177			
TAM		3708	BSB	13:48	A320	6		1	1	1	1	1	1	162	TAM	3959		SDU	22:00	A319	A	1	1	1	1	1	1	132			
TAM	3927		SDU	13:50	A319	A		1	1	1	1	1	1	132	VRG	2751		NVT	22:01	B733	C	1	1	1	1	1	1	128			
BRB		1036	CGR/CGB/BSE	13:52	B733B								1	148	TAM	3563		JPA/REC/BSB	22:02	A320	C	1	1	1	1	1	1	162			
BRB		1003	POA	13:52	B733B								1	148	TAM		3244	UDI	22:22	FK10		1	1	1	1	1	1	108			
BRB		1038	CGB/CGB/BSE	13:52	B733B								1	148	BRB	1005		POA	22:04	B733B		1	1	1	1	1	1	148			
BRB		1006	CWB	13:52	B733B								1	148	GLO	1545		SDU	22:05	B737	A	1	1	1	1	1	1	144			
GLO		1808	UDI	13:53	B738	16	1	1	1	1	1	1	1	177	VRG		2457	SDU	22:06	B73A	13	1	1	1	1	1	1	132			
TAM	3761		CGR	13:55	A320	C	1	1	1	1	1	1	1	162	BRB	1021		BSB/GYN	22:07	B733B		1	1	1	1	1	1	148			
TAM		3132	VIX	13:56	A319	17	1	1	1	1	1	1	1	132	BRB		1120	VIX	22:08	B733B		1	1	1	1	1	1	148			
GLO		1676	GIG/BPS/SSA	13:56	B738								1	177	GLO	1950		UDI/CNF	22:09	B737	20	1	1	1	1	1	1	144			
NES	5101		BPS	13:57	B735								1	120	GLO	1757		NVT	22:10	B737	A	1	1	1	1	1	1	144			
GLO	1955		POA/FLN	13:57	B738	A	1	1	1	1	1	1	1	177	ONE	6351		BSB/RAO/SCS	22:11	E120	C		1	1	1	1	30				
TAM		3023	NVT	13:58	FK10	18							1	108	BRB	1067		REC/SSA	22:13	B733B		1	1	1	1	1	1	148			
TAM		3024	NVT	13:58	FK10	A	1							108	BRB	1035		BSB/GIG	22:13	B733B							1	148			
TAM		3742	SJP/CGB	13:59	A320	19	1	1	1	1	1	1	1	162	TAM		3780	CGB	22:15	A320	14	1	1	1	1	1	1	162			
TAM	3459		SSA/BPS	14:00	FK10	A	1						1	108	TAM		3021	NVT	22:16	FK10	13	1	1	1	1	1	1	108			
TAM	3455		SSA/IOS	14:00	FK10	A		1	1	1	1	1	1	108	GLO	1604		POA/FLN	22:18	B737	A	1	1	1	1	1	1	144			
VRG		2429	SDU	14:01	B73A	4	1	1	1	1	1	1	1	132	TAM	3961		SDU	22:19	A319	A	1	1	1	1	1	1	132			
TAM	3032		CWB	14:02	FK10	B	1	1	1	1	1	1	1	108	TAM		3472	CPQ/SSA	22:20	A319	16	1	1	1	1	1	1	132			
PTN	4771		ARU/BAU	14:03	ATR43	C		1	1	1	1	1	1	45	TAM	3227		CNF	22:21	A319	A	1	1	1	1	1	1	132			
VRG	2426		SDU	14:04	B73A	A		1	1	1	1	1	1	132	VRG	2456		SDU	22:23	B73A	B	1	1	1	1	1	1	132			
TAM		3162	CXJ	14:05	FK10	A	1							108	GLO		1873	LDB	22:24	B737	7	1	1	1	1	1	1	144			
GLO		1686	FLN	14:07	B737	13	1	1	1	1	1	1	1	144	BRB	1023		BSB/GYN	22:27	B733B							1	148			
GLO		1522	SDU	14:08	B737	7	1	1	1	1	1	1	1	144	GLO		1546	SDU	22:30	B737	8	1	1	1	1	1	1	144			
VRG	2703		CWB	14:09	B733	B	1	1	1	1	1	1	1	128	GLO		1905	SJP	22:30	B737		1	1	1	1	1	1	144			
GLO	1521		SDU	14:11	B737	B	1	1	1	1	1	1	1	144	GLO	1711		FOR/REC/SSA/C	22:32	B733	A	1	1	1	1	1	1	128			
GLO	1963		BSB	14:13	B737	A		1	1	1	1	1	1	144	VRG	2635		BSB	22:33	B733	B	1	1	1	1	1	1	128			
TAM		3932	SDU	14:15	A319	1		1	1	1	1	1	1	132	VRG		2459	SDU	22:34	B73A		3	1					132			
GLO	1771		BPS	14:19	B737	C	1							144	GLO	1767		JPA/GIG	22:35	B737	B						1	144			
TAM	3929		SDU	14:20	A319	A	1	1	1	1	1	1	1	132	TAM	3056		POA	22:35	A320	A	1	1	1	1	1	1	162			
GLO	1841		SSA	14:21	B737	B	1							144	TAM																

Tabela B.1 - Caracterização do tráfego para avaliação da contaminação por borracha

Total de pousos semanais	2.659	
Total Pousos Anuais	138.268	
Peso Média Aeronave (kg)	40.000	
Peso Total Pousos Anuais (kg)	5,53E+09	
Peso Total Pousos Anuais (10 ⁶ kg)	5.531	
Cab 17R (% operações)	64%	35
Cab 17L (% operações)	4%	2

Aeronave	Pousos Semanais	
A319/320	667	25%
ATR 43	197	7%
B733	332	12%
B735	55	2%
B737	604	23%
B738	46	2%
B73A	382	14%
E 120	70	3%
FK 100	267	10%
FK 50	39	1%
TOTAL	2.659	100%

ANEXO C – RESULTADOS BRUTOS DOS ENSAIOS NA PISTA AUXILIAR

ATRITO COM O PÊNDULO BRITÂNICO

As denominações "TA", "TB" e "TC" foram atribuídas às medições de atrito realizadas com o Pêndulo no sentido transversal à pista (com o movimento do Pêndulo paralelo às ranhuras). Todas as demais medidas foram realizadas no sentido longitudinal.

Tabela C. 1 – Dados brutos das medições de atrito com o Pêndulo Britânico

Ponto	Medidas (BPN)					Média (BPN)	Faixa
	1	2	3	4	5		
A1	75	75	74	70	75	73,8	A
A2	80	75	70	73	74	74,4	A
A3	85	83	83	85	80	83,2	A
A4	80	82	78	82	77	79,8	A
A5	83	80	83	83	82	82,2	A
A6	79	77	70	77	70	74,6	A
A7	85	83	82	82	80	82,4	A
A8	84	74	79	84	80	80,2	A
A9	81	81	73	80	84	79,8	A
A10	87	82	83	80	78	82	A
A11	81	80	87	77	77	80,4	A
A12	87	87	77	80	82	82,6	A
B2	87	86	84	77	78	82,4	B
B1	74	80	78	73	71	75,2	B
B4	82	82	77	84	77	80,4	B
B3	86	82	80	80	78	81,2	B
B6	80	80	80	78	77	79	B
B5	80	83	80	78	79	80	B
B8	87	85	81	79	79	82,2	B
B7	84	84	79	73	77	79,4	B
B10	77	78	84	77	78	78,8	B
B9	87	82	82	77	80	81,6	B
C1	97	97	97	90	90	94,2	C
C2	95	89	88	91	90	90,6	C
C3	82	78	75	76	75	77,2	C
C4	77	70	74	70	65	71,2	C
C5	80	84	75	75	70	76,8	C
C6	85	80	79	77	77	79,6	C
C7	85	80	80	75	77	79,4	C
C8	84	74	71	75	71	75	C
C9	78	79	77	75	75	76,8	C
C10	88	80	87	83	82	84	C
N	90	90	90	93	95	91,6	C
O	76	73	79	82	70	76	C
P	86	75	73	80	72	77,2	C
Q	95	99	93	93	95	95	C

Ensaio realizado em 8/12/2005

Tabela C. 1 – Dados brutos das medições de atrito com o Pêndulo Britânico (continuação)

Ponto	Medidas (BPN)					Média (BPN)	Faixa
	1	2	3	4	5		
D1	71	70	70	70	70	70,2	D
D2	73	73	73	67	70	71,2	D
D3	94	87	90	88	94	90,6	D
D4	97	95	93	88	87	92	D
D5	75	76	76	75	75	75,4	D
D6	95	97	90	90	94	93,2	D
D7	90	90	86	86	87	87,8	D
D8	88	88	87	87	88	87,6	D
D9	83	90	90	90	92	89	D
D10	94	100	98	93	94	95,8	D
E1	77	77	77	79	77	77,4	E
E2	77	76	75	76	75	75,8	E
E3	74	74	74	74	74	74	E
E4	84	82	83	83	83	83	E
E6	77	78	78	78	78	77,8	E
E8	83	82	80	80	80	81	E
E10	75	76	76	76	76	75,8	E
B1T	55	54	53	51	51	52,8	TB
B3T	69	67	65	64	63	65,6	TB
B2T	72	67	64	64	63	66	TB
B7T	68	68	68	65	65	66,8	TB
PT	72	68	68	67	67	68,4	TC
C9T	71	67	66	63	62	65,8	TC
C5T	77	75	74	75	74,0	71	TC
C11T	85	83	82	83	82	79	TC
C13T	85	84	86	83	82	80	TC
D2T	72	70	69	69	69	69,8	TD
D1T	72	73	73	73	73	72,8	TD
D9T	80	80	80	79	79	79,6	TD
D11T	83	82	81	80	81	81,4	TD
W ₁	87	88	85	85	86	86,2	A
W ₂	87	85	80	78	77	81,4	A
W ₃	73	72	72	71	72	72	A

Ensaio realizado em 8/12/2005

MACROTEXTURA COM O ENSAIO DA MANCHA DE AREIA

Tabela C. 2 - Dados brutos dos ensaios de Mancha de Areia

Ponto	Diâmetro Medido (cm)				Hm (mm)	Faixa
	1	2	3	Média		
A1	16	16	16	16,0	1,24	A
A2	15	15	16	15,3	1,35	A
A3	13,5	14	14,5	14,0	1,62	A
A4	16	15	16	15,7	1,30	A
A5	15	15	14	14,7	1,48	A
A6	16	15	15	15,3	1,35	A
A7	13	16	15	14,7	1,48	A
A8	14	14	13	13,7	1,70	A
A9	13	14	15	14,0	1,62	A
A10	13	13	14	13,3	1,79	A
A11	15	16	16	15,7	1,30	A
A12	13	14	12	13,0	1,88	A
B2	16	15	14	15,0	1,41	B
B1	17	16	17	16,7	1,15	B
B4	16	16	17	16,3	1,19	B
B3	15	16	16	15,7	1,30	B
B6	15	15	15	15,0	1,41	B
B5	13	14	13	13,3	1,79	B
B8	16	15	15	15,3	1,35	B
B7	13	15	14	14,0	1,62	B
B10	17	14	14	15,0	1,41	B
B9	14	13	14	13,7	1,70	B
C2	15	15	15	15,0	1,41	C
C1	14	16	14,5	14,8	1,45	C
C4	16	16	16	16,0	1,24	C
C3	16	15	16	15,7	1,30	C
C6	15	15	15	15,0	1,41	C
C5	15	14	16	15,0	1,41	C
C8	15	13	14	14,0	1,62	C
C7	14	13	15	14,0	1,62	C
C10	14	13	13	13,3	1,79	C
C9	14	13	15	14,0	1,62	C
N	18	17	16	17,0	1,10	C
O	14	15	15	14,7	1,48	C
P	15	18	16	16,3	1,19	C
Q	16	14	15	15,0	1,41	C
D2	15	14	15	14,7	1,48	D
D4	16	17	17	16,7	1,15	D
D8	17	16	16	16,3	1,19	D
D10	17	16	15	16,0	1,24	D
D1	18	18	17	17,7	1,02	D
D3	15	14	16	15,0	1,41	D
D7	14	15	15	14,7	1,48	D
D9	18	16	16	16,7	1,15	D
D5	14	15	16	15,0	1,41	D
D6	20	18	19	19,0	0,88	D
E2	29	27	27	27,7	0,42	E
E4	31	30	29	30,0	0,35	E
E1	31,5	29,5	30	30,3	0,35	E
E3	24	23	22	23,0	0,60	E
E6	30	31	30	30,3	0,35	E
E8	31	29	29	29,7	0,36	E
E10	26	28	26	26,7	0,45	E
W ₁	15	15	15	15,0	1,41	A
W ₂	18	18	17	17,7	1,02	A
W ₃	16	15	17	16,0	1,24	A

Ensaio realizado em 6 e 8/12/2005

ENSAIOS ADICIONAIS REALIZADOS EM 20/04/2006

Posteriormente à realização dos ensaios em 06 e 08 de dezembro de 2005 foi realizada outra bateria de ensaios de atrito com o Pêndulo, de macrotextura com o ensaio de Mancha de Areia e de drenabilidade no dia 20 de abril de 2006.

O objetivo dessa nova campanha é o de validação das análises e conclusões. Para isso realizaram-se ensaios dentro das faixas definidas no Capítulo 7, na área compreendida entre 300 m e 410 m da Cabeceira 17L.

Tabela C. 3 - Dados brutos dos ensaios de Mancha de Areia

Mancha aos 300 m da cab. 17L

Afastam Eixo (m)	Diâmetro Medido (cm)				Média (cm)	HS (mm)	Faixa
	1	2	3	4			
-0,5	15	15	14	14	14,5	1,51	A
-2	14	16	16	15	15,3	1,37	B
-3,5	13	16	15	14	14,5	1,51	B
-5	13	15	15	14	14,3	1,57	B
-6,5	12	14	13	13	13,0	1,88	C
-8	15,5	16	16	15	15,6	1,30	C
-9,5	13	16	16	15	15,0	1,41	C
-14,5	15,5	16	15	15	15,4	1,35	D
-22	29	27	28	28	28,0	0,41	E

Mancha aos 410 m da cab. 17L

Afastam Eixo (m)	Diâmetro Medido (cm)				Média (cm)	HS (mm)	Faixa
	1	2	3	4			
-0,5	11	14	12	13	12,5	2,04	A
-3	10	12	13	12	11,8	2,31	B
-4	11	12	12	12	11,8	2,31	B
-7	10	11	11	11	10,8	2,75	C
-8	13	14	15	14	14,0	1,62	C
-14,5	10	12	13	12,5	11,9	2,26	D
-22	32	30	29	30	30,3	0,35	E

Ensaio realizado em 20/04/2006

ANEXO C

Tabela C. 4 - Dados brutos das medições de atrito com o Pêndulo Britânico

Pêndulo Longitudinal aos 300 m da cab. 17L

Afastam Eixo (m)	Medidas (BPN)					Média (BPN)	Faixa
	1	2	3	4	5		
-0,5	88	84	84	87	84,0	85,4	A
-2	74	76	70	70	77,0	73,4	B
-3,5	82	85	75	83	75,0	80,0	B
-5	89	88	87	90	88,0	88,4	B
-6,5	97	94	98	87	98,0	94,8	C
-8	97	99	97	97	94,0	96,8	C
-9,5	97	97	97	95	93,0	95,8	C
-14,5	97	94	94	94	94,0	94,6	D
-22	83	82	81	81	80,0	81,4	E

Pêndulo Transversal aos 300 m da cab. 17L

Afastam Eixo (m)	Medidas (BPN)					Média (BPN)	Faixa
	1	2	3	4	5		
-0,5	77	75	73	72	71,0	73,6	A
-2	74	67	65	64	63,0	66,6	B
-3,5	72	68	67	65	64,0	67,2	B
-5	77	75	75	74	75,0	75,2	B
-6,5	82	80	82	81	80,0	81,0	C
-8	77	77	77	77	77,0	77,0	C
-9,5	79	79	79	78	78,0	78,6	C
-14,5	81	81	80	81	82,0	81,0	D
-22	nd	nd	nd	nd	nd	82,0	E

Tabela C. 5 – Dados brutos dos ensaios de drenabilidade

Drenabilidade aos 300 m da cab. 17L

Afastam Eixo (m)	Tempo (s)			Média (s)	Vazão (l/s)	Faixa
	1	2	3			
-0,5	2,94	2,94	2,93	2,94	0,25	A
-2	3,19	3,09	3,07	3,12	0,23	B
-3,5	3,18	3,16	3,13	3,16	0,23	B
-5	2,71	2,82	2,72	2,75	0,27	B
-6,5	2,41	2,41	2,5	2,44	0,30	C
-8	3,15	3,19	3,28	3,21	0,23	C
-9,5	3,25	3,13	3,35	3,24	0,23	C
-14,5	3,1	2,97	2,94	3,00	0,24	D
-22	25,82	26,31	26,84	26,32	0,03	E

Drenabilidade aos 410 m da cab. 17L

Afastam Eixo (m)	Tempo (s)			Média (s)	Vazão (l/s)	Faixa
	1	2	3			
-0,5	2,16	2,18	2,28	2,21	0,33	A
-3	1,65	1,69	1,81	1,72	0,43	B
-4	1,56	1,56	1,50	1,53	0,38	B
-7	1,97	1,85	1,97	1,93	0,47	C
-8	2,65	2,78	2,88	2,77	0,26	C
-14,5	2,57	2,5	2,56	2,54	0,29	D
-22	54,34	55,97	57,38	55,90	0,01	E

Ensaio realizado em 20/04/2006

MEDIÇÃO DE ATRITO COM MU METER EM 29 DE SETEMBRO DE 2005 NA PISTA AUXILIAR DO AEROPORTO DE CONGONHAS

Figura C. 1 – Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a direita do eixo no sentido 17/35 em
29/set/2005

ANEXO C

Figura C. 2 - Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a esquerda do eixo no sentido 17/35 em 29/set/2005

ANEXO C

Figura C. 3 - Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 14 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 29/set/2005

ANEXO C

Figura C. 4 - Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 18 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 29/set/2005

ANEXO C

MEDIÇÃO DE ATRITO COM MU METER EM 23 DE JULHO DE 2005 NA PISTA AUXILIAR DO AEROPORTO DE CONGONHAS

Figura C. 5 - Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 23/jul/2005

ANEXO C

Figura C. 6 - Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a esquerda do eixo no sentido 17/35 em 23/jul/2005

ANEXO C

MEDIÇÃO DE ATRITO COM MU METER EM 26 DE MARÇO DE 2005 NA PISTA AUXILIAR DO AEROPORTO DE CONGONHAS

Figura C. 7 - Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a direita do eixo no sentido 17/35 em 26/mar/2005

ANEXO C

Figura C. 8 - Relatório do Mu Meter na pista auxiliar; corrida a 3 m a esquerda do eixo no sentido 17/35 em 26/mar/2005

ANEXO D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS DADOS DA PISTA AUXILIAR

Neste anexo são apresentados os resultados das Análises de Variância realizada nos valores de atrito (BPN) e nos valores de macrotextura (Mancha de Areia) para a pista auxiliar do Aeroporto de Congonhas.

ANÁLISE DOS DADOS DE ATRITO LONGITUDINAL

Os dados de atrito longitudinal da pista auxiliar constam da Tabela D. 1, agrupados por Faixa de Pista.

Tabela D. 1– Atrito longitudinal (BPN) pista auxiliar Aeroporto de Congonhas

A	B	C	D	E	W
73,8	82,4	94,2	70,2	77,4	86,2
74,4	75,2	90,6	71,2	75,8	81,40
83,2	80,4	77,2	90,6	74	72,00
79,8	81,2	71,2	92	83	
82,2	79	76,8	75,4	77,8	
74,6	80	79,6	93,2	81	
82,4	82,2	79,4	87,8	75,8	
80,2	79,4	75	87,6		
79,8	78,8	76,8	89		
82	81,6	84	95,8		
80,4		91,6			
82,6		76			
		77,2			
		95			

As Tabelas de *ANOVA* para análise dos dados de atrito agrupados por Faixa de Pista são apresentadas a seguir. Esses resultados são utilizados no Capítulo 9 – Análise e Conclusões.

Tabela D. 2 – Tabelas ANOVA para o atrito longitudinal em pares de faixa de pista

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
A	12	955,4	79,617	11,734		
B	10	800,2	80,02	4,5107		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,88733	1	0,8873	0,1046	0,7497	2,974652
Dentro dos grupos	169,673	20	8,4836			
Total	170,56	21				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
A	12	955,4	79,617	11,734		
C	14	1144,6	81,757	61,65		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	29,6044	1	29,604	0,7635	0,3909	2,927116
Dentro dos grupos	930,531	24	38,772			
Total	960,135	25				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
A	12	955,4	79,617	11,734		
D	10	852,8	85,28	88,411		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	174,946	1	174,95	3,7835	0,066	2,974652
Dentro dos grupos	924,773	20	46,239			
Total	1099,72	21				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
A	12	955,4	79,617	11,734		
E	7	544,8	77,829	9,979		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	14,1354	1	14,135	1,2718	0,2751	3,02623
Dentro dos grupos	188,951	17	11,115			
Total	203,086	18				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
B	10	800,2	80,02	4,5107		
C	14	1144,6	81,757	61,65		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	17,603	1	17,603	0,4599	0,5047	2,948582

ANEXO D

Dentro dos grupos	842,05	22	38,275
Total	859,653	23	

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
B	10	800,2	80,02	4,5107
D	10	852,8	85,28	88,411

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	138,338	1	138,34	2,9775	0,1016	3,006974
Dentro dos grupos	836,292	18	46,461			
Total	974,63	19				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
B	10	800,2	80,02	4,5107
E	7	544,8	77,829	9,979

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	19,7744	1	19,774	2,9523	0,1063	3,073183
Dentro dos grupos	100,47	15	6,698			
Total	120,245	16				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C	14	1144,6	81,757	61,65
D	10	852,8	85,28	88,411

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	72,3947	1	72,395	0,9972	0,3288	2,948582
Dentro dos grupos	1597,15	22	72,598			
Total	1669,55	23				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C	14	1144,6	81,757	61,65
E	7	544,8	77,829	9,979

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	72,0238	1	72,024	1,5888	0,2228	2,9899
Dentro dos grupos	861,329	19	45,333			
Total	933,352	20				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
D	10	852,8	85,28	88,411
E	7	544,8	77,829	9,979

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	228,627	1	228,63	4,0083	0,0637	3,073183

Dentro dos grupos	855,57	15	57,038				
Total	1084,2	16					
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>			
W	3	239,6	79,86667	52,17333			
A	12	955,4	79,61667	11,73424			
ANOVA							
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>	
Entre grupos	0,15	1	0,15	0,008354	0,928568	3,136208	
Dentro dos grupos	233,4233	13	17,95564				
Total	233,5733	14					

ANÁLISE DOS DADOS DE ATRITO TRANSVERSAL

Os dados de atrito transversal da pista auxiliar constam da Tabela D. 3.

Tabela D. 3- Atrito transversal (BPN) pista auxiliar Aeroporto de Congonhas

TB	TC	TD	E
52,8	68,4	69,8	77,4
65,6	65,8	72,8	75,8
66	71	79,6	74
66,8	79	81,4	83
	80		77,8
			81
			75,8

As Tabelas de *ANOVA* para análise dos dados de atrito agrupados por Faixa de Pista são apresentadas a seguir.

Esses resultados são utilizados no Capítulo 9 – Análise e Conclusões.

Tabela D. 4 - Tabelas ANOVA para o atrito transversal em pares de faixa de pista

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>		
TB	4,00	251,20	62,80	44,69		
TC	5,00	364,20	72,84	40,47		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	224,00	1,00	224,00	5,30	0,055	3,59
Dentro dos grupos	295,95	7,00	42,28			
Total	519,96	8,00				

ANEXO D

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
TB	4,00	251,20	62,80	44,69
E	7,00	544,80	77,83	9,98

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	574,91	1,00	574,91	26,68	0,001	3,36
Dentro dos grupos	193,95	9,00	21,55			
Total	768,87	10,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
TC	5,00	364,20	72,84	40,47
E	7,00	544,80	77,83	9,98

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	72,58	1,00	72,58	3,27	0,101	3,29
Dentro dos grupos	221,75	10,00	22,17			
Total	294,33	11,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
TB	4,00	251,20	62,80	44,69
TD	3,00	222,20	74,07	25,21

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	217,61	1,00	217,61	5,90	0,06	4,06
Dentro dos grupos	184,51	5,00	36,90			
Total	402,11	6,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
TC	5,00	364,20	72,84	40,47
TD	4,00	303,60	75,90	30,25

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	20,81	1,00	20,81	0,58	0,47	3,59
Dentro dos grupos	252,63	7,00	36,09			
Total	273,44	8,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
TD	4,00	303,60	75,90	30,25
E	7,00	544,80	77,83	9,98

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	9,47	1,00	9,47	0,57	0,47	3,36
Dentro dos grupos	150,63	9,00	16,74			
Total	160,10	10,00				

ANÁLISE DOS DADOS DE MACROTEXTURA

Os dados de macrotextura da pista auxiliar constam da Tabela D. 5 a seguir.

Tabela D. 5 – Macrotextura (mm) pista auxiliar Aeroporto de Congonhas

A	B	C	D	E	W
1,24	1,41	1,41	1,48	0,42	1,41
1,35	1,15	1,45	1,15	0,35	1,02
1,62	1,19	1,24	1,19	0,35	1,24
1,30	1,30	1,30	1,24	0,60	
1,48	1,41	1,41	1,02	0,35	
1,35	1,79	1,41	1,41	0,36	
1,48	1,35	1,62	1,48	0,45	
1,70	1,62	1,62	1,15		
1,62	1,41	1,79	1,41		
1,79	1,70	1,62	0,88		
1,30		1,10			
1,88		1,48			
		1,19			
		1,41			

As Tabelas de *ANOVA* para análise dos dados de macrotextura agrupados por Faixa de Pista são apresentadas a seguir.

Esses resultados são utilizados no Capítulo 9 – Análise e Conclusões.

Tabela D. 6 - Tabelas ANOVA para a macrotextura em pares de faixa de pista

Grupo	Contagem	Soma	Média	Var		
A	12,00	18,13	1,51	0,04		
B	10,00	14,35	1,44	0,04		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p%	F crítico
Entre grupos	0,03	1,00	0,03	0,69	0,414	2,97
Dentro dos grupos	0,90	20,00	0,04			
Total	0,93	21,00				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Var		
A	12,00	18,13	1,51	0,04		
C	14,00	20,08	1,43	0,04		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	p%	F crítico
Entre grupos	0,04	1,00	0,04	0,95	0,341	2,93
Dentro dos grupos	0,96	24,00	0,04			
Total	1,00	25,00				

ANEXO D

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
A	12,00	18,13	1,51	0,04
D	10,00	12,42	1,24	0,04

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,39	1,00	0,39	9,10	0,007	2,97
Dentro dos grupos	0,87	20,00	0,04			
Total	1,26	21,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
A	12,00	18,13	1,51	0,04
E	7,00	2,87	0,41	0,01

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,35	1,00	5,35	166,63	0,000	3,03
Dentro dos grupos	0,55	17,00	0,03			
Total	5,90	18,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
B	10,00	14,35	1,44	0,04
C	14,00	20,08	1,43	0,04

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,00	1,00	0,00	0,00	0,992	2,95
Dentro dos grupos	0,87	22,00	0,04			
Total	0,87	23,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
B	10,00	14,35	1,44	0,04
D	10,00	12,42	1,24	0,04

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,19	1,00	0,19	4,34	0,05	3,01
Dentro dos grupos	0,78	18,00	0,04			
Total	0,96	19,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
B	10,00	14,35	1,44	0,04
E	7,00	2,87	0,41	0,01

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,33	1,00	4,33	142,45	0,00	3,07
Dentro dos grupos	0,46	15,00	0,03			
Total	4,78	16,00				

ANEXO D

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
C	14,00	20,08	1,43	0,04
D	10,00	12,42	1,24	0,04

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,22	1,00	0,22	5,70	0,03	2,95
Dentro dos grupos	0,84	22,00	0,04			
Total	1,05	23,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
C	14,00	20,08	1,43	0,04
E	7,00	2,87	0,41	0,01

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4,89	1,00	4,89	180,64	0,00	2,99
Dentro dos grupos	0,51	19,00	0,03			
Total	5,41	20,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
D	10,00	12,42	1,24	0,04
E	7,00	2,87	0,41	0,01

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,85	1,00	2,85	100,58	0,00	3,07
Dentro dos grupos	0,42	15,00	0,03			
Total	3,27	16,00				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Var</i>
D	10,00	12,42	1,24	0,04
W	3,00	3,68	1,23	0,04

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p%</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,00	1,00	0,00	0,01	0,907	3,23
Dentro dos grupos	0,45	11,00	0,04			
Total	0,45	12,00				

ANEXO E – DADOS BRUTOS DOS ENSAIOS NA PISTA PRINCIPAL

ATRITO COM O PÊNDULO BRITÂNICO

As denominações "TA", "TB" e "TC" foram atribuídas às medições de atrito realizadas com o Pêndulo no sentido transversal à pista (com o movimento do Pêndulo paralelo às ranhuras). Todas as demais medidas foram realizadas no sentido longitudinal.

Tabela E. 1– Dados brutos das medições de atrito com o Pêndulo Britânico

Ponto	Medidas (BPN)					Média (BPN)	Faixa
	1	2	3	4	5		
A6	80	77	77	77	74	77,0	A
A7	83	79	79	77	80	79,6	A
A8	77	75	65	79	72	73,6	A
D5	67	63	78	65	64	67,4	D
D6	72	63	62	60	63	64,0	D
S	83	82	83	80	79	81,4	E
T	84	84	84	84	83	83,8	E
U	85	85	85	84	85	84,8	E
A6T	60	57	55	55	54	56,2	AT
A7T	58	57	56	55	55	56,2	AT
A8T	58	54	54	54	54	54,8	AT
D5T	50	47	47	45	45	46,8	DT
D6T	48	47	45	45	45	46,0	DT

Ensaio realizado em 28/08/2004

DRENABILIDADE COM O DRENÔMETRO

Tabela E. 2 – Dados brutos dos ensaios de drenabilidade

Pontos	Tempo (s)			Média (s)	Vazão (l/s)	Faixa
	1	2	3			
A6	5,57	5,49	5,58	5,55	0,13	A
A7	3,49	3,36	3,79	3,55	0,21	A
A8	4,06	4,25	4,17	4,16	0,18	A
D3				3,52	0,21	D
D4				4,47	0,16	D
D5	3,2	3,04	3,17	3,14	0,23	D
D6	3,79	3,63	3,61	3,68	0,20	D
D8				2,29	0,32	D
E6	46,85	48,05	49,09	48,00	0,02	E

Ensaio realizado em 28/08/2004

MACROTEXTURA COM O ENSAIO DA MANCHA DE AREIA

Tabela E. 3 - Dados brutos dos ensaios de Mancha de Areia

Pontos	Diâmetro Medido (cm)				HS (mm)	Faixa
	1	2	3	Média		
A1	20	19	19	19,3	0,85	A
A2	18	16,5	18	17,5	1,04	A
A3	18	16	16,5	16,8	1,12	A
A4	16	13	15	14,7	1,48	A
A5	16	14	15	15,0	1,41	A
A6	16	14	15	15,0	1,41	A
A7	19	18	18	18,3	0,95	A
A8	20	18	19	19,0	0,88	A
A9	18	18	17	17,7	1,02	A
A10	20	20	19	19,7	0,82	A
A11	19	17	17	17,7	1,02	A
A12	17	15	16	16,0	1,24	A
B1	18	18	17	17,7	1,02	B
B2	19,5	21	21	20,5	0,76	B
B3	18	19	20	19,0	0,88	B
B4	23	23	24	23,3	0,58	B
B5	19	18	18	18,3	0,95	B
B6	21	20	20	20,3	0,77	B
B7	23	22	22,5	22,5	0,63	B
B8	17	18	18	17,7	1,02	B
B9	22	23	24	23,0	0,60	B
B10	19,5	19	19	19,2	0,87	B
C1	19	18	17	18,0	0,98	C
C2	20	21	21	20,7	0,75	C
C3	17	16,5	17	16,8	1,12	C
C4	14,5	15	14,5	14,7	1,48	C
C5	19	18	18	18,3	0,95	C
C6	19	19	19	19,0	0,88	C
C7	16,5	15	16	15,8	1,27	C
C8	19,5	18	18	18,5	0,93	C
C9	17	16	16	16,3	1,19	C
C10	20	18	18,5	18,8	0,90	C
N	17	16	17	16,7	1,15	C
O	19,5	17	18	18,2	0,96	C
P	19,5	17,5	17,5	18,2	0,96	C
Q	19	17,5	17,5	18,0	0,98	C

Ensaos realizados em 28/08 e 04/09/2004

Tabela E. 3 - Dados brutos dos ensaios de Mancha de Areia (continuação)

Pontos	Diâmetro Medido (cm)				HS (mm)	Faixa
	1	2	3	Média		
D1	19	18	19	18,7	0,91	D
D2	17	17	17	17,0	1,10	D
D3	17	17	16	16,7	1,15	D
D4	16	16	16	16,0	1,24	D
D5	16	14	15	15,0	1,41	D
D6	15	15	15	15,0	1,41	D
D7	17	17	17	17,0	1,10	D
D8	17	17	16,5	16,8	1,12	D
D9	16	16	15	15,7	1,30	D
D10	18	16	16	16,7	1,15	D
E1	29	30	29	29,3	0,37	E
E2	25	29	30	28,0	0,41	E
E3	30	29	29	29,3	0,37	E
E4	28	30	29	29,0	0,38	E
E6	33	31	32	32,0	0,31	E
E8	32,5	32,5	33	32,7	0,30	E
E10	33	33	31	32,3	0,30	E
W1	19	17	18	18,0	0,98	W
W2	18	15	16	16,3	1,19	W
W3	18	16	17	17,0	1,10	W

Ensaos realizados em 28/08 e 04/09/2004

MEDIÇÃO DE ATRITO COM MU METER EM 17 DE ABRIL DE 2004 NA PISTA PRINCIPAL DO AEROPORTO DE CONGONHAS

Figura E. 1 – Relatório do Mu Meter MK-6 na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, em 17/abr/2004

Figura E. 2 - Relatório do Mu Meter MK-6 na pista principal; corrida a 3 m a esquerda do eixo, em 17/abr/2004

Figura E. 5 - Relatório do Mu Meter MK-6 na pista principal; corrida a 13 m a direita do eixo, em 17/abr/2004

Figura E. 6 - Relatório do Mu Meter MK-6 na pista principal; corrida a 13 m a esquerda do eixo, em 17/abr/2004

Figura E. 7 - Relatório do Mu Meter MK-6 na pista principal; corrida a 19 m a direita do eixo, em 17/abr/2004

ANEXO E

MEDIÇÃO DE ATRITO COM MU METER EM 19 DE JANEIRO DE 2002 NA PISTA PRINCIPAL DO AEROPORTO DE CONGONHAS

Figura E. 9 - Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 0 a 800 m, no sentido 17/35, em 19/jan/2002

ANEXO E

Figura E. 10 - Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 800 a 1700 m, no sentido 17/35, em 19/jan/2002

ANEXO E

Figura E. 11 - Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 0 a 900 m, no sentido 35/17, em 19/jan/2002

ANEXO E

Figura E. 12 - Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 900 a 1700 m, no sentido 35/17, em 19/jan/2002

ANEXO E

MEDIÇÃO DE ATRITO COM MU METER EM 16 DE DEZEMBRO DE 2001 NA PISTA PRINCIPAL DO AEROPORTO DE CONGONHAS

Figura E. 13 - Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 0 a 800 m, no sentido 17/35, em 16/dez/2001

ANEXO E

Figura E. 14 - Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 800 a 1700 m, no sentido 17/35, em 16/dez/2001

ANEXO E

Figura E. 15 - Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 0 a 900 m, no sentido 35/17, em 16/dez/2001

ANEXO E

Figura E. 16 - Relatório do Mu Meter na pista principal; corrida a 3 m a direita do eixo, de 900 a 1700 m, no sentido 35/17, em 16/dez/2001

ANEXO F – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS DADOS DA PISTA PRINCIPAL

Neste anexo são apresentados os resultados da Análise de Variância realizada nos valores de atrito (BPN) e nos valores de Macrotextura (Mancha de Areia) para a Pista Principal do Aeroporto de Congonhas.

ANÁLISE DOS DADOS DE ATRITO DA PISTA PRINCIPAL

Os dados de atrito longitudinal da pista auxiliar constam da Tabela F. 1, agrupados por Faixa de Pista.

Tabela F. 1– Atrito longitudinal e transversal (BPN) da pista principal

A	D	E	AT	DT
77	67,4	81,4	56,2	46,8
79,6	64	83,8	56,2	46
73,6		84,8	54,8	

Obs.: Os dados das colunas AT e DT correspondem às medições do Pêndulo no sentido transversal a pista

As Tabelas de *ANOVA* para análise dos dados de atrito agrupados por Faixa de Pista são apresentadas a seguir. Esses resultados são utilizados no Capítulo 9 – Análise e Conclusões.

Tabela F. 2 - Tabelas ANOVA para o atrito longitudinal e transversal em pares de faixa da pista principal

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
A	3	230,2	76,73333	9,053333		
D	2	131,4	65,7	5,78		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	146,0813	1	146,0813	18,3468	0,023381	5,538311
Dentro dos grupos	23,88667	3	7,962222			
Total	169,968	4				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
A	3	230,2	76,73333	9,053333		
E	3	250	83,33333	3,053333		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	65,34	1	65,34	10,79405	0,030345	4,544773
Dentro dos grupos	24,21333	4	6,053333			
Total	89,55333	5				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
A	3	230,2	76,73333	9,053333
DT	2	92,8	46,4	0,32

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1104,133	1	1104,133	179,7612	0,000897	5,538311
Dentro dos grupos	18,42667	3	6,142222			
Total	1122,56	4				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
AT	3	167,2	55,73333	0,653333
DT	2	92,8	46,4	0,32

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	104,5333	1	104,5333	192,7869	0,000809	5,538311
Dentro dos grupos	1,626667	3	0,542222			
Total	106,16	4				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
AT	3	167,2	55,73333	0,653333
A	3	230,2	76,73333	9,053333

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	661,5	1	661,5	136,2981	0,000308	4,544773
Dentro dos grupos	19,41333	4	4,853333			
Total	680,9133	5				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
D	2	131,4	65,7	5,78
E	3	250	83,33333	3,053333

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	373,1213	1	373,1213	94,16971	0,002324051	5,538311
Dentro dos grupos	11,88667	3	3,962222			
Total	385,008	4				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
E	3	250	83,33333	3,053333
AT	3	167,2	55,73333	0,653333

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1142,64	1	1142,64	616,5324	1,56156E-05	4,544773
Dentro dos grupos	7,413333	4	1,853333			
Total	1150,053	5				

ANEXO F

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
E	3	250	83,33333	3,053333
DT	2	92,8	46,4	0,32

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1636,885	1	1636,885	764,1062	0,00010392	5,538311
Dentro dos grupos	6,426667	3	2,142222			
Total	1643,312	4				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
D	2	131,4	65,7	5,78
AT	3	167,2	55,73333	0,653333

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	119,2013	1	119,2013	50,46152	0,005739622	5,538311
Dentro dos grupos	7,086667	3	2,362222			
Total	126,288	4				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
DT	2	92,8	46,4	0,32
D	2	131,4	65,7	5,78

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	372,5	1	372,5	122,1279	0,008089	18,51276
Dentro dos grupos	6,1	2	3,05			
Total	378,6	3				

ANÁLISE DOS DADOS DE MACROTEXTURA

Os dados de macrotextura da pista auxiliar constam da Tabela F. 3.

Tabela F. 3 – Macrotextura (mm) da pista principal

A	B	C	D	E	W
0,85	1,02	0,98	0,91	0,37	0,98
1,04	0,76	0,75	1,10	0,41	1,19
1,12	0,88	1,12	1,15	0,37	1,10
1,48	0,58	1,48	1,24	0,38	
1,41	0,95	0,95	1,41	0,31	
1,41	0,77	0,88	1,41	0,30	
0,95	0,63	1,27	1,10	0,30	
0,88	1,02	0,93	1,12		
1,02	0,60	1,19	1,30		
0,82	0,87	0,90	1,15		
1,02		1,15			
1,24		0,96			
		0,96			
		0,98			

As Tabelas de *ANOVA* para análise dos dados de macrotextura agrupados por Faixa de Pista são apresentadas a seguir. Esses resultados são utilizados no Capítulo 9 – Análise e Conclusões.

Tabela F. 4 - Tabelas ANOVA para a macrotextura em pares de faixa da pista principal

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação		
A	12	13,25834	1,104861	0,053555		
B	10	8,077421	0,807742	0,027392		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,481526	1	0,481526	11,52476	0,002876	2,974652
Dentro dos grupos	0,835638	20	0,041782			
Total	1,317165	21				

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variação		
A	12	13,25834	1,104861	0,053555		
C	14	14,50722	1,03623	0,035275		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,030435	1	0,030435	0,697206	0,411959	2,927116
Dentro dos grupos	1,047679	24	0,043653			
Total	1,078114	25				

ANEXO F

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
A	12	13,25834	1,104861	0,053555
D	10	11,90118	1,190118	0,02397

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,039648	1	0,039648	0,98524	0,332766	2,974652
Dentro dos grupos	0,804837	20	0,040242			
Total	0,844485	21				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
A	12	13,25834	1,104861	0,053555
E	7	2,437979	0,348283	0,001834

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,53066	1	2,53066	71,68884	1,67E-07	3,02623
Dentro dos grupos	0,60011	17	0,035301			
Total	3,13077	18				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
A	12	13,25834	1,104861	0,053555
W	3	3,277013	1,092338	0,011163

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,000376	1	0,000376	0,008003	0,93008	3,136208
Dentro dos grupos	0,611435	13	0,047033			
Total	0,611811	14				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
B	10	8,077421	0,807742	0,027392
C	14	14,50722	1,03623	0,035275

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,30454	1	0,30454	9,502018	0,00544	2,948582
Dentro dos grupos	0,7051	22	0,03205			
Total	1,00964	23				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
B	10	8,077421	0,807742	0,027392
D	10	11,90118	1,190118	0,02397

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,731058	1	0,731058	28,46687	4,5182E-05	3,006974
Dentro dos grupos	0,462258	18	0,025681			
Total	1,193317	19				

ANEXO F

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
B	10	8,077421	0,807742	0,027392
E	7	2,437979	0,348283	0,001834

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,869247	1	0,869247	50,62951	3,5331E-06	3,073183
Dentro dos grupos	0,257532	15	0,017169			
Total	1,126779	16				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C	14	14,50722	1,03623	0,035275
D	10	11,90118	1,190118	0,02397

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,138143	1	0,138143	4,507107	0,04524479	2,948582
Dentro dos grupos	0,674299	22	0,03065			
Total	0,812442	23				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C	14	14,50722	1,03623	0,035275
E	7	2,437979	0,348283	0,001834

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,208601	1	2,208601	89,36521	1,2916E-08	2,9899
Dentro dos grupos	0,469572	19	0,024714			
Total	2,678174	20				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
D	10	11,90118	1,190118	0,02397
E	7	2,437979	0,348283	0,001834

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	2,918125	1	2,918125	193,0567	5,69E-10	3,073183
Dentro dos grupos	0,226731	15	0,015115			
Total	3,144855	16				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
B	10	8,077421	0,807742	0,027392
W	3	3,277013	1,092338	0,011163

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,186911	1	0,186911	7,647286	0,018378	3,225196
Dentro dos grupos	0,268856	11	0,024441			
Total	0,455767	12				

ANEXO F

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
C	14	14,50722	1,03623	0,035275
W	3	3,277013	1,092338	0,011163

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,007778	1	0,007778	0,242596	0,629468	3,073183
Dentro dos grupos	0,480897	15	0,03206			
Total	0,488674	16				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
D	10	11,90118	1,190118	0,02397
W	3	3,277013	1,092338	0,011163

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,022064	1	0,022064	1,019526	0,334326	3,225196
Dentro dos grupos	0,238055	11	0,021641			
Total	0,260119	12				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
E	7	2,437979	0,348283	0,001834
W	3	3,277013	1,092338	0,011163

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,162598	1	1,162598	279,0644	1,67E-07	3,457913
Dentro dos grupos	0,033328	8	0,004166			
Total	1,195926	9				

LISTA DE REFERÊNCIAS

- ACIDENTE QANTAS. 22/09/1999. **Accident in the Bangkok International Airport (BKK) under Registration VH OJH**. Disponível em: <<http://aviation-safety.net/database/record.php?id=19990922-0&lang=en>>.
- AIRBUS INDUSTRIE. **Airplane Characteristics for Airport Planning A319**. Airbus Industrie. 1990.
- _____. **Airplane Characteristics for Airport Planning A320**. Airbus Industrie. 1990.
- AL-QADI, I. L.; LOULIZI, A.; FLINTSCH, G. W.; TECH, V.; ROOSEVELT, D. S.; DECKER, R.; WAMBOLD, J. C.; NIXON, W. A. **Feasibility of Using Friction Indicators to Improve Winter Maintenance Operations and Mobility**. National Cooperative Highway Research Program - Transportation Research Board of the National Academies. November, 2002.
- ANDRESEN, A. **Friction Fundamentals, Concepts and Methodology**. Transportation Development Centre. Transport Canada. 1999.
- ANFAVEA. **Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira**. 1996 e 1997.
- ANIP/ SINPEC. **Boletim Informativo da Indústria de Pneumáticos**. n.215, 09/1993; n.229, 11/1994; n.231, Janeiro de 1995.
- ANTVIK, G. **Friction Testing History**. Suécia. 1997.
- BALADI, G. Y.; SCHORSCH, M.; SVASDISANT, T. **Determining the Causes of Top-Down Cracks in Bituminous Pavements**. MDOT, Michigan State University. 2003.
- BALKWILL, K. J. **Development of a Comprehensive Method for Modeling Performance of Aircraft Tires Rolling or Breaking on Dry and Precipitation-Contaminated Runways**. Transportation Development Centre. Transport Canada. 2003.
- BAZLAMIT, S. M.; REZA, F. **Changes in Asphalt Pavement Friction Components and Adjustment of Skid Number for Temperature**. Journal of Transportation Engineering. 2005.
- BOEING. **Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents**. Worldwide Operations 1959 -1996: Airplane Safety Engineering. Seattle, Wash. 2003.
- _____. **Airplane Characteristics for Airport Planning 737**. Boeing Commercial Airport Group. 1990.
- BRIDGESTONE FIRESTONE DO BRASIL. “Informações Técnicas Gerais”. Manual.
- CAIRNEY, P.; STYLES, E. **Landing Field Length: A Pilot of the Relationship Between Macrotecture and Crash Occurrence**. Australian Transport Safety Bureau. Disponível em: <<http://adg.stanford.edu/aa241/performance/FAR125.html>>.

CHOUBANE, B.; HOLZSCHUHER, C. R.; GOKHALE, S. **Precision of Locked Wheel Testers for Measurement of Roadway Surface Friction Characteristics**. TRB 2004. Annual Meeting. CD-ROM.

CIVIL AVIATION AUTHORITY. **Performance Information for Operations with Contaminated Runway Surface Conditions**. JAR 25X1591. 28 de Fevereiro de 2003.

CLARK, S. M. **Mechanics of Pneumatic Tires**. U.S. Department of Transportation - National Highway Traffic Safety Administration. Washington. 1981.

COMFORT, G. **Wet Runway Friction: Literature and Information Review**. Transportation Development Centre. Canada. 2001.

DAC. **Requisitos de Resistência à Derrapagem para Pistas de Pouso e Decolagem**. Instrução de Aviação Civil – Normativa - IAC 4302. Comando da Aeronáutica. Brasil. 2001.

DAUGHERTY, R. H.; YEAGER, T. J. **Texture Modification of Shuttle Landing Facility Runway at Kennedy Space Center**. Virginia. 1997.

DAVIS, P. A. **Quasi-Static and Dynamic Response Characteristics of F4- Bias-Ply and Radial-Belted Main Gear Tires**. Langley Research Center. NASA Technical. Virginia. February, 1997.

DE BEER, M.; FISHER, C. **Contact Stresses of Pneumatic Tires Measured with the Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array (VRSPTA)**. Transportek CSIR. v.1. June, 1997.

EUROPEAN TRANSPORT SAFETY COUNCIL – ETSC. **Accidents Occurred During Take Off and Landing – Briefing Notes**. Bruxelas. 1999.

FAA. **Measurement, Construction and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces**. AC n.150/5320-12C Change 4. US Department of Transportation. 2004.

FLIGHT SAFETY FOUNDATION. **Crosswind Landings**. FSF ALAR Briefing Note 8.7. 2000.

____. **Landing Distances**. FSF ALAR Briefing Note 8.3. 2000.

____. **Runway Excursions and Runway Overruns**. FSF ALAR Briefing Note 8.1. 2000.

____. **Wet or Contaminated Runways**. FSF ALAR Briefing Note 8.5. 2000.

FOKKER. **Airplane Characteristics for Airport Planning F100**. Fokker B. V. Schiphol. 1990.

FRAGOSO, J. V. **Por que Ocorrem os Acidentes**. Air Safety Group. Segurança de Voo – Prevenção. <<http://www.airsafetygroup.com.br>>.

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

FWA, T. F.; CHAN, W.T; LIM, C.T. **Decision Framework for Pavement Friction Management of Airport Runways**. Journal of Transportation Engineering. November/December, 1997.

GÄFVERT, M.; SVENDENIUS, J. **Construction of Novel Semi-Empirical Tire Models for Combined Braking and Cornering**. Lund Institute of Technology. April, 2003.

GIESBERTS, M. K. H. **Test and Evaluation of Precipitation Drag on an Aircraft Caused by Snow and Standing Water on a Runway**. National Aerospace Laboratory – NLR. November, 2001.

GOODYEAR AVIATION. **Manual: Aircraft Tire Care and Maintenance**. Ohio.2003.

GOODYEAR AVIATION. **Flight Radial Tire Care and Maintenance from Goodyear**.2002.

GOODYEAR. **Anatomia de um Pneu**. Disponível em:
<<http://www.goodyear.com.br>>. Acesso em: 11 de Jul. 2005.

HANEY, P. **The Racing & High-Performance Tire - Rubber Friction**. Sports Car Magazine. January, 2004.

HARRIN, E. N. **Low Tire Friction and Cornering Forces on a Wet Surface**. Langley Aeronautical Laboratory - Langley Field - National Advisory Committee for Aeronautics. Washington.1958.

HENRY, J. J. **Tire Wet-Pavement Traction Measurement: A State-of-the-Art Review**. ASTM STP 929. Philadelphia. 1986.

HENRY, J. J.; ABE, H.; KAMEYAMA, S.; TAMAI, A.; KASAHARA, A.; SAITO, K. **Determination of the International Friction Index (IFI) Using the Circular Texture Meter (CTM) and the Dynamic Friction Tester (DTF)**. 2005.

HÖLSCHER, H.; TEWES, M.; BOTKIN, N.; LÖHNDORF, M.; HOFFMANN, K. – H.; QUANDT, E. **Modeling of Pneumatic Tires by a Finite Element Model for the Development of a Tire Friction Remote Sensor**. 2004.

HORNE, W. B.; DREHER, R. C. **Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning**. National Aeronautics and Space Administration - Langley Research Center - Langley Station. Washington.1963.

HORNE, W. B.; YAGER T. J.; TAYLOR, G. R. **Recent Research on Ways to Improve Tire Traction on Water, Slush or Ice**. NASA Langley Research Center. Los Angeles. 1965.

HORNE, W. B.; YAGER, T. J.; IVEY, D. L. **Recent Studies to Investigate Effects of Tire Footprint Aspect Ratio on Dynamic Hidroplaning Speed**. ASTM STP 929. Philadelphia. 1986.

HOSANG, V. A. **Field Survey and Analysis of Aircraft Distribution on Airport Pavements**. FAA. Washington. 1975.

HUANG, Y. W. **Pavement Analysis and Design**. Prentice Hall. 1993.

HUI, C.Y.; LIN, Y. Y.; BANEY, J. M.; KRAMER, E. J. **The Mechanic of Contact and Adhesion of Periodically Rough Surfaces**. 2001.

ICAO. **Aerodrome Design Manual - Part 3. Pavements**. 2.ed.1983.

____. **Aerodrome Design Manual - Part 1. Runways**. 2.ed. 1984.

_____. **International Standards and Recommended Practices: Aircraft Accident and Incident Investigation**. Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation. 8th ed. Montreal, Canada. 1994.

_____. **Manual de Serviços de Aeroportos - Parte 2. Estado de la Superfície de los Pavimentos**. 4.ed. 2002.

_____. **Aerodromes - Annex 14 - Vol I. Aerodrome Design and Operations**. 4.ed. 2004.

INFRAERO. Estatísticas dos Aeroportos Brasileiros. Disponível em <http://www.infraero.gov.br>. Acesso em 15 de ago 2005.

_____. **Relatórios Técnicos de Medição de Atrito da Pista de Pouso e Decolagem do Aeroporto Internacional de São Paulo (Congonhas)**. Superintendência Regional do Sudeste, INFRAERO. 2001, 2002, 2004, 2005.

JAMES, C. W. **Evaluation of Ground Test Friction Measuring Equipment on Runways and Taxiways under Winter Conditions**. Canada Transport Airports. 1996.

KEBABJAN, R. **Statistics, Fatal Accident Causes by Category**. Database, 1981-2004. Disponível em: <http://www.placecrashinfo.com/index.html>.

KEVIN, K.; MCGHEE, P. E. **High-Speed Texture Measurement of Pavements**. US Department of Transportation - Federal Highway Administration. Charlottesville, Virginia. February, 2003.

LEIGH, J. W.; BRUCE, R. **Development and Application of an Improved Airport Pavement Design Method**. ASCE Transportation Congress. San Diego. October, 1995.

LENKE, L. R.; GRAUL, R. A. **Development of Runway Rubber Removal Specifications Using Friction Measurements and Surface Texture Control**. ASTM STP 929. Philadelphia. 1986.

MICHELIN. **Histórico dos Pneus**. Disponível em: http://www.michelin.com.br/wps/portal/_pagr/104/_pa.104/112?jsp=/2r/2rodas_pneus_caracteristicas.jsp.

MILWITZKY, B.; COOK, F. E. **An Experimental Investigation of Wheel Spin-Up Drag Loads**. National Advisory Committee for Aeronautics. Washington. 1953.

MONTENEGRO, R. **Pneus**. Disponível em: <http://purl.org/dc/elements/1.1/>. BNDES. Junho, 1998.

NASA. **Research Aims to Prevent Accidents on Hazardous Runways**. Disponível em: <http://nasa.gov>; <http://larc.nasa.gov>; <http://runfric.larc.nasa.gov>. 2004.

NATIONAL ACADEMY PRESS. **Causes of Incidents and Accidents**. 1998

NORRIS, R. **Hydroplaning: Keep your Wheels Rolling**. Dynamic Hydroplaning; Viscous Hydroplaning; Rubber Reversive Hydroplaning; Airline Pilot Careers Magazine and a Participant in AIR, Inc.'s Airline Pilot Career Seminars. 1997.

NORSEMETER. **A Primer on Modern Runway Surface Friction Measurement**. v.1. Disponível em: <http://www.norsemeter.no>. Courtesy Publication.

- NOYCE, D. A. **Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements.** Midwest Regional University. Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory. April 29, 2005.
- PIERRE, P.; DORÉ, G.; VAGILE, L. **Characterization and Evaluation of Tire-Roadways Interface Stresses.** Ministère des Transports du Québec. 2003.
- RADO, C.; WAMBOLD, J. C. **Correlation of Ground Friction Measurements to Aircraft Braking Friction Calculated from Flight Data Recorders.** 2005.
- REASON, J. **Human Error.** Cambridge University Press. 1990.
- SILVA, A. M. **Atrito em Pistas Molhadas.** Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Rio de Janeiro. 1981.
- SILVA, A. M.; RODRIGUES FILHO, O. S. **Grooving – Aspectos Teóricos e Executivos da Aplicação em Pavimentos Aeroportuários.** 2º. Congresso de Desenvolvimento Tecnológico de Transportes. São Paulo. 1981.
- SINHA, N. K. **Winter Contaminants on Surfaces During Friction Test at Munich Airport.** February, 2000.
- SOUTH, J. T. **Mechanical Properties and Durability of Natural Rubber Compounds and Composites.** Blacksburg, Virginia. December 14, 2001.
- SULLIVAN, B. W. **Development of a Fundamental Skid Resistance Asphalt Mix Design Procedure.** Sidney, Australia. 2005.
- US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Preliminary Findings of the Effect of Tire Inflation Pressure on the Peak and Slide Coefficients of Friction.** June, 2002.
- VAN ES, G. W. H.; ROELEN, A. L. C.; KRUIJSEN, E. A. C.; GIESBERTS, M. K. H. **Safety Aspects of Aircraft Performance on Wet and Contaminate Runways.** National Aerospace Laboratory NLR. Amsterdam. 1998.
- VEITH, A.G. **The Most Complex Tire-Pavement Interaction: Tire Wear.** ASTM STP 929. Philadelphia. 1986.
- WAMBOLD, J. C.; HENRY, J. J. **NASA Wallops Tire/Runway Friction Workshops 1993-2002.** NASA - Transport Canadá - FAA. 2002.
- WAMBOLD, J. C.; HENRY, J. J. **Joint Winter Runway Friction Measurement Program (JWRFMP) - International Runway Friction Index versus Aircraft Braking Coefficient (μ).** NASA and FAA - Transport Canada. 2003.
- WAMBOLD, J. C.; HENRY, J. J.; ANDRESEN, A. **International Runway Friction Index (IRFI) - Development Technique and Methodology.** September, 2001.
- WAMBOLD, J. C.; HENRY, J. J.; ANDRESEN, A. **International Runway Friction Index (IRFI) versus Aircraft Braking Coefficient (μ).** NASA Langley Center. 2004.
- WILLIAMS, A. R. **A Review of Tire Traction.** ASTM STP 1164 - J. J. Henry and J. C. Wambold. Philadelphia. 1992.

WILSON, D.; DUNN, R. **Polishing Aggregates to Equilibrium Skid Resistance**. New Zealand. 2005.

WONG, J. Y. **Mechanics of Pneumatic Tires**. 2001. Disponível em:
<http://media.wiley.com/product_data/excerpt/19/04713546/0471354619.pdf>.
Acesso em: 2 Ago. 2005.

YAGER, T. J.; WAMBOLD, J. C.; HENRY, J. J.; ANDRESEN, A.; BASTIAN, M. **Joint Winter Runway Friction Measurement Program Accomplishments**. Virginia Department of Transportation. 2002.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. J. Wiley and Sons. 1975.