



Luciana Moreira Barbosa Ribeiro

**ESTUDO DA DRENABILIDADE DE PAVIMENTOS
AEROPORTUÁRIOS ATRAVÉS DE EQUIPAMENTO DO
TIPO *OUTFLOW METER***

**CAMPINAS
2012**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

Luciana Moreira Barbosa Ribeiro

ESTUDO DA DRENABILIDADE DE PAVIMENTOS
AEROPORTUÁRIOS ATRAVÉS DE EQUIPAMENTO DO
TIPO *OUTFLOW METER*

Orientador: Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Transportes.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA LUCIANA MOREIRA BARBOSA RIBEIRO E ORIENTADA PELO PROF. DR. CASSIO EDUARDO LIMA DE PAIVA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R354e Ribeiro, Luciana Moreira Barbosa, 1979-
 Estudo da drenabilidade de pavimentos
aeroportuários através de equipamento do tipo outflow
meter / Luciana Moreira Barbosa Ribeiro. --Campinas,
SP: [s.n.], 2012.

 Orientador: Cássio Eduardo Lima de Paiva.
 Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

 1. Pavimentos flexíveis. 2. Pavimentos de asfalto. I.
Paiva, Cássio Eduardo Lima de, 1953-. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Study of airport pavement drainability through outflow meter
equipment

Palavras-chave em Inglês: Flexible pavements, Asphalt pavements

Área de concentração: Transportes

Titulação: Mestra em Engenharia Civil

Banca examinadora: Maria Lúcia Galves, João Virgílio Merighi

Data da defesa: 31-07-2012

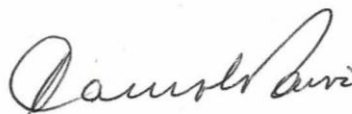
Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**ESTUDO DA DRENABILIDADE DE PAVIMENTOS
AEROPORTUÁRIOS ATRAVÉS DE EQUIPAMENTO DO TIPO
*OUTFLOW METER***

Luciana Moreira Barbosa Ribeiro

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva
Presidente e Orientador / Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dra. Maria Lucia Galves
Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. João Virgílio Merighi
Escola de Engenharia Mackenzie**

Campinas, 31 de Julho de 2012

DEDICATÓRIA

Ao Rodrigo, meu marido, por seu companheirismo, apoio e compreensão nos momentos de ausência. À minha filha Marina, que me traz tanta alegria de viver. À minha mãe Maria Lúcia que sempre me incentivou nas horas mais difíceis e pelo exemplo de seriedade e profissionalismo. Ao meu pai João Bosco (*in memoriam*) meu exemplo de dedicação ao trabalho como engenheiro e à família.

AGRADECIMENTOS

À Deus

À minha família por ceder muitas horas da minha atenção para que eu pudesse me dedicar a essa dissertação.

Aos Professores Dr. João Virgílio Merighi e Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva pela orientação e conhecimentos transmitidos, essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas pelos ensinamentos transmitidos em aulas, trabalhos e conversas.

Aos professores Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva e Dra. Rita Fortes pela contribuição durante o exame de qualificação.

Aos colegas de pós-graduação Ana Paula Ramires, Renata Xavier, Ivo Moscateli, Daliana Damaceno e, em especial, a amiga Flaviane Lopes, que dividiu comigo os conflitos e angústias e que tanto me ajudou ao longo dessa jornada.

Ao Dr. André Felipe Vale, chefe e amigo, pela grande contribuição técnica, apoio, incentivo para a realização deste trabalho, bem como pela confiança que sempre tem depositado em mim.

Ao Dr. Ernesto Simões Preussler e Rui Alves Margarido pela oportunidade de ingressar no meio rodoviário e pela confiança depositada.

À colega e amiga Paloma Fialho pela disponibilidade de revisar o texto desta pesquisa.

Ao Professor José Fontebasso Neto pelos ensinamentos e sugestões incorporados ao trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Suzuki pelas significativas sugestões e contribuição para finalização desta dissertação.

Ao Edson de Moura pela prestatividade e apoio nos ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação.

Aos meus sogros Jaime e Ivone que me apoiaram e me ajudaram a cuidar da minha filha Marina nos momentos de ausência.

À minha querida madrinha Flávia Henriques pelo exemplo de força de vontade, disposição e profissionalismo.

Aos meus amigos e colegas da Dynatest, pelo aprendizado que tivemos em todos esses anos nos trabalhos em equipe que nos proporcionou grande crescimento profissional, em especial ao André, Paloma, Douglas, Celso, Rodrigo Sahara, Moisés, Felipe Camargo, Agnaldo, José Roberto, Leonardo Rangel e Flávio Andrade que em algum momento envolveram-se diretamente nesta pesquisa.

À minhas queridas amigas de infância, Sofia, Luiza, Tatiana, Vanessa, Ângela e Renata, aos meus amigos da Faculdade de Engenharia Industrial, em especial Tathyana, Fernanda e Érika e à minha amiga Crisoca que muitas vezes não pude ver em função da dedicação a esta pesquisa.

A todos que, de alguma forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

RIBEIRO, L. M. B. **Estudo da Drenabilidade de Pavimentos Aeroportuários Através de Equipamento do Tipo *Outflow Meter***. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - UNICAMP, 2012. 125p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2012.

Nos últimos anos o transporte aéreo cresceu expressivamente tanto no cenário nacional como mundial. Assim, a preocupação com a ocorrência de acidentes envolvendo aeronaves também é crescente. Parte significativa dos acidentes aéreos no Brasil e no mundo ocorre em solo, ou seja, na fase de decolagem, aterrissagem ou rolagem da aeronave, podendo estar associados com a aderência entre o pneu e o pavimento. Para a obtenção de uma adequada aderência pneu-pavimento, principalmente em pistas molhadas, a macrotextura da superfície do pavimento deve proporcionar um adequado potencial de drenagem, de forma a eliminar água pelos seus micros canais. O presente trabalho tem como objetivo estudar um método de ensaio de drenabilidade que possa ser empregado de forma sistemática em aeroportos brasileiros de pequeno e médio porte como forma adicional de controlar a segurança operacional com adequada repetitividade e reprodutividade, utilizando-se um equipamento do tipo *outflow meter*. Deste modo, primeiramente foram executados testes do ensaio com o equipamento em quatro tipos de revestimentos distintos. Para a verificação da repetitividade e da reprodutividade do equipamento foram realizados ensaios de drenabilidade de pavimentos, em três aeroportos de pequeno e médio porte do Estado de São Paulo. Também foi realizado um estudo comparativo da medida indireta de macrotextura obtida por meio da drenabilidade superficial do pavimento com o equipamento do tipo *outflow meter* e o método tradicionalmente empregado no Brasil para obtenção da macrotextura do revestimento, o ensaio de mancha de areia. O ensaio se mostrou rápido, de simples operação, de baixo custo e com adequada repetitividade e reprodutividade. Além disso, o ensaio em estudo apresentou uma boa correlação com o método da mancha de areia, indicando potencial para a medição da macrotextura do pavimento. Através da correlação obtida foi possível estabelecer um parâmetro adicional para se determinar o momento de realizar uma ação corretiva em pavimentos aeroportuários através do ensaio com o equipamento *outflow meter*, observando-se o tempo de escoamento limite.

Palavras Chave: drenabilidade de pavimentos, aderência pneu-pavimento, macrotextura, pavimentos aeroportuários.

ABSTRACT

RIBEIRO, L. M. B. **Study of Airport Pavement Drainability Through *Outflow Meter* Equipment.** Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - UNICAMP, 2012. 125p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2012.

In recent years, air travel has grown significantly in both the national and global scenarios. Thus, there is also a growing concern for accidents involving aircrafts. A significant portion of the aircraft accidents in Brazil and worldwide occur on the ground, more specifically during takeoff or landing, and may be associated with the adhesion between the aircraft's tire and the pavement. To obtain a proper tire-pavement friction, especially on wet runways, the macrotexture of the pavement should provide adequate drainage potential in order to remove water through the pavement's micro-channels. This study aims to define the criteria and methods of analysis, with reasonable reproducibility and repeatability, for the adherence and drainability of airport pavements in order to provide safe operating conditions during rainfall in small and medium size Brazilian airports. First, tests were conducted to measure the pavement's drainage using equipment such as the *outflow meter* in four different types of pavement. News tests were conducted to measure the pavement's drainage using the aforementioned equipment in three small and medium airports in the state of São Paulo, Brazil, to measure the reproducibility and repeatability of the tests. In addition, the testing procedure using the *outflow meter* equipment will be validated through a detailed study of a comparative study of the indirect measurements of the macrotextures using the *outflow meter* in relation to the ones obtained through the sandpatch tests, a traditional method for determining macrotexture commonly used in Brazil. The criteria and methods of analysis proved to be fast, of simple operation, low cost, and with adequate repeatability and reproducibility. Furthermore, the criteria and methods of analysis were correlated with the sandpatch method, indicating a good potential for measuring the pavement's macrotexture. An additional parameter for determining the time to take a corrective action on airport pavements by using the *outflow meter* equipment, observing the flow time limit. The obtained correlation allowed for establishing an additional parameter for determining when a corrective action on the airport's pavement is necessary by using the *outflow meter* equipment for observing the flow time limit.

Keywords: pavement drainability, tire-pavement friction, macrotexture, airport pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Acidentes Aeronáuticos na Aviação Civil Brasileira (BRASIL, 2010)	2
Figura 1.2 - Percentual de Acidentes na Aviação Civil por Segmento entre 2000 e 2009 (BRASIL, 2010)	3
Figura 1.3 – Acidentes de aeronaves durante a fase de voo, 2005 (adaptado de NTSB, 2009).....	3
Figura 2.1 - Efeito da pista molhada e da pista seca sobre o coeficiente de atrito em função da velocidade da aeronave (adaptado de HORNE e DREHER, 1963)	14
Figura 2.2 - Hidroplanagem viscosa (adaptado de ANDRE, 2001)	17
Figura 2.3 - Hidroplanagem dinâmica (adaptado de ANDRE, 2001)	17
Figura 2.4 - Hidroplanagem por borracha revertida (adaptado de ANDRE, 2001)	18
Figura 2.5 - Modelo das três zonas para a área de contato e das quatro fases da hidroplanagem (BALKWILL, 2003 apud RODRIGUES FILHO, 2006)	20
Figura 3.1 - Corpo de prova de revestimento tipo Concreto Asfáltico (BERNUCCI et al, 2008).....	25
Figura 3.2 - Dois tipos de concretos asfálticos de graduação densa (arquivo próprio).....	25
Figura 3.3 - Corpo de prova extraído de revestimento tipo CPA – graduação aberta (arquivo próprio)	26
Figura 3.4 - Camada Porosa de Atrito executada no Aeroporto Santos Dumont - RJ (BERNUCCI et al, 2008)	26
Figura 3.5 - Execução de Ensaio de Permeabilidade no Aeroporto Santos Dumont - RJ (BERNUCCI et al, 2008).....	27
Figura 3.6 - Textura Superficial de uma Camada Porosa de Atrito (arquivo próprio).....	27
Figura 3.7 - Composição Esquemática da Mistura SMA	28
Figura 3.8 - Aspecto de uma camada de SMA (arquivo próprio)	29
Figura 3.9 - <i>Gap-graded</i> (arquivo próprio)	29
Figura 3.10 - Exemplos de curvas granulométricas das misturas asfálticas SMA, CBUQ e CPA (MOURÃO, 2003).....	30
Figura 3.11 - Camada de <i>Porous Friction Course</i> – PFC (FAA, 1997)	31
Figura 3.12 - Lama Asfáltica (arquivo próprio)	34
Figura 3.13 - Micro Revestimento Asfáltico (arquivo próprio)	35

Figura 3.14 - Concreto asfáltico com <i>grooving</i> na superfície (arquivo próprio).....	37
Figura 3.15 - Características geométricas do <i>grooving</i>	37
Figura 4.1 - Mecanismos chave de atrito pneu-pavimento (adaptado de HALL et al, 2009)	40
Figura 4.2 - Faixas de textura existentes para uma dada superfície do pavimento (adaptado de SANDBERG, 1998)	44
Figura 4.3 - Diferença entre microtextura e macrotextura (MERIGHI et al, 2006).....	45
Figura 4.4 - Influência do comprimento de onda da textura nas características de superfície (adaptado de NCHRP, 2000)	46
Figura 4.5 - Efeito da macrotextura e da microtextura na aderência pneu-pavimento em diferentes velocidades de deslizamento (adaptado de FLINTSCH et al, 2002 apud HALL et al, 2009).....	46
Figura 4.6 - Tipo de superfície em função da classe de macrotextura e microtextura (APS, 2006)	50
Figura 4.7 - Sequência executiva da técnica da mancha de areia utilizando areia normalizada (arquivo próprio)	53
Figura 4.8 - Repetitividade do ensaio da Mancha de Areia (Doty, 1974).....	56
Figura 4.9 - Correlação entre os resultados do ensaio da mancha de areia realizados por dois operadores (Wambold e Henry, 2002)	56
Figura 4.10 - Ensaio de Mancha de Graxa (Wambold e Henry, 2002)	57
Figura 4.11 - Relação entre técnicas de medição da profundidade média de superfície – Mancha de Areia x Mancha de Graxa (YAGER e BUHLMANN, 1982).....	58
Figura 4.12 - Perfilômetro Laser	59
Figura 4.13 - Esquema dos três elementos presentes no perfilômetro (adaptado de SAYERS e KARAMIHAS, 1998).....	59
Figura 4.14 - Procedimento para o cálculo da profundidade média do segmento (adaptado de ASTM, 2005a).....	61
Figura 4.15 - Correlação entre as medidas obtidas através do Perfilômetro Laser e da Mancha de Areia (adaptado de FLINTSCH et al, 2003).....	62
Figura 4.16 - Correlação entre as medidas obtidas através do Perfilômetro Laser e da Mancha de Areia para diferentes superfícies de pavimento (adaptado de FLINTSCH et al, 2003).....	63
Figura 4.17 - Circular Track Meter em operação (HALL et al, 2009).....	64
Figura 4.18 - Vista do Circular Track Meter (Wambold e Henry, 2002).....	64
Figura 4.19 - MTD x MPD – Dados NASA Wallops Flight Facility -1998 (adaptado de ABE et al, 2001).....	65
Figura 4.20 - MTD x MPD – Dados NASA Wallops Flight Facility – 1999 (adaptado de ABE et al, 2001).....	65
Figura 4.21 - MTD x MPD – Dados <i>Sperenberg</i> – 2000 (adaptado de ABE et al, 2001)	66
Figura 4.22 - MTD x MPD – Todos os dados - 1998 – 2000 (adaptado de ABE et al, 2001).....	66
Figura 4.23 - Correlação entre os resultados obtidos com os ensaios CT Meter e de Mancha de Areia (adaptado de Hanson e Prowell, 2004)	67

Figura 4.24 - Correlação entre os resultados obtidos com os ensaios CT Meter e de Mancha de Areia (adaptado de FLINTSCH et al, 2003)	68
Figura 4.25 – Drenômetro do <i>Swedish National Road and Transport Research Institute</i> (SANDBERG, 1998)	69
Figura 4.26 – Drenômetro no pavimento com <i>grooving</i> (RODRIGUES FILHO, 2006).....	70
Figura 4.27 – Drenômetro LTP-USP (APS, 2006)	70
Figura 5.1 - <i>Outflow meter</i> (ASTM, 2005b)	72
Figura 5.2 - <i>Outflow meter</i>	72
Figura 5.3 - Ensaio com o <i>outflow meter</i> (arquivo próprio).....	73
Figura 5.4 - Profundidade de Textura – Método da Mancha de Areia (ARDANI, 2007).....	75
Figura 5.5 - Tempo de Dissipação - Método do <i>Outflow Meter</i> (ARDANI, 2007)	75
Figura 5.6 - Correlação Mancha de Areia (polegadas) x <i>Outflow meter</i> (tempo em segundos) .	76
Figura 5.7 – 1/ <i>Outflow meter Skidabrader</i> x MPD – 1999/2000 (adaptado de ABE et al, 2001)	77
Figura 5.8 - 1/ <i>Outflow meter</i> FHWA x MPD - 1999 (adaptado de ABE et al, 2001).....	78
Figura 5.9 - 1/ <i>Outflow meter</i> Berlim x MPD - 2000 (adaptado de ABE et al, 2001)	78
Figura 5.10 - Mancha de Areia (MTD em mm) x <i>Outflow meter</i> (tempo em segundos) (RIBEIRO et al, 2008).....	79
Figura 5.11 - Mancha de Areia (MTD em mm) x <i>Outflow meter</i> (tempo em segundos) - expurgando-se os pontos com o tempo de escoamento da água acima de 50 segundos (RIBEIRO et al, 2008)	80
Figura 5.12 - Relação entre a profundidade de textura de superfície e as medidas de drenagem do FHWA <i>outflow meter</i> (adaptado de YAGER e BUHLMANN, 1982).....	81
Figura 5.13 - Relação entre a profundidade de textura de superfície e medidas de drenagem do ISETH <i>outflow meter</i> (adaptado de YAGER e BUHLMANN, 1982)	82
Figura 5.14 - Efeito de tratamentos de superfície nas medições de drenagem do <i>outflow meter</i> (YAGER e BUHLMANN, 1982).....	83
Figura 5.15 - Correlação entre dois diferentes drenômetros (Wambold e Henry, 2002)	84
Figura 6.1 – Textura do CBUQ ensaiado	89
Figura 6.2 - Execução do ensaio com o <i>outflow meter</i> no CBUQ	89
Figura 6.3 – Textura do OGFC ensaiado	89
Figura 6.4 - Execução do ensaio com o <i>outflow meter</i> no OGFC	89
Figura 6.5 – Textura do <i>gap-graded</i> ensaiado	90
Figura 6.6 - Execução do ensaio com o <i>outflow meter</i> no <i>gap-graded</i>	90
Figura 6.7 – Textura do micro revestimento asfáltico ensaiado.....	90
Figura 6.8 - Execução do ensaio com o <i>outflow meter</i> no micro revestimento asfáltico	90
Figura 6.9 – Vista aérea do Aeroporto Estadual Arthur Siqueira (DAESP, 2012)	92
Figura 6.10 – Vista aérea do Aeroporto Estadual Arthur Siqueira (GOOGLE, 2012)	92
Figura 6.11 – Vista aérea do Aeroporto Estadual Campo do Amarais (DAESP, 2012)	93
Figura 6.12 – Vista aérea do Aeroporto Estadual Bertram Luiz Leupolz (DAESP, 2012).....	94

Figura 6.13 - Execução do ensaio com o <i>outflow meter</i> no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista	96
Figura 6.14 - Ensaio com o <i>outflow meter</i> no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista.....	96
Figura 6.15 - Execução do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista	96
Figura 6.16 - Detalhe do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista	96
Figura 6.17 - Execução do ensaio com o <i>outflow meter</i> no Aeroporto Estadual de Campinas ...	97
Figura 6.18 - Detalhe do cronômetro do <i>outflow meter</i> no Aeroporto Estadual de Campinas	97
Figura 6.19 - Execução do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Campinas.....	97
Figura 6.20 - Detalhe do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Campinas.....	97
Figura 6.21 - Execução do ensaio com o <i>outflow meter</i> no Aeroporto Estadual de Sorocaba.....	98
Figura 6.22 - Detalhe do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Sorocaba	98
Figura 6.23 – Intervalo de confiança com confiabilidade de 95%	108
Figura 6.24 – Nivelamento da placa de CBUQ para realização do ensaio de drenabilidade.	112
Figura 6.25 - Ensaio de drenabilidade – inclinação da placa de CBUQ de 0%	112
Figura 6.26 – Resultado do ensaio de drenabilidade na placa de CBUQ.....	113
Figura 6.27 – Ensaio de drenabilidade – inclinação da placa de CBUQ de 10%.....	113
Figura 7.1 – Teste do Ensaios – Diversos tipos de revestimentos.....	115
Figura 7.2 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x <i>Outflow meter</i> (tempo em s) – Aeroporto Estadual de Bragança Paulista	128
Figura 7.3 - Correlação Mancha de Areia x <i>Outflow meter</i> – Aeroporto Estadual de Campinas	128
Figura 7.4 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x <i>Outflow meter</i> (tempo em s) – Aeroporto Estadual de Sorocaba	129
Figura 7.5 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x <i>Outflow meter</i> (tempo em s) - Todos aeroportos estudados	130
Figura 7.6 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x <i>Outflow meter</i> (tempo em s) – 4 tipos de revestimento.....	131
Figura 7.7 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x <i>Outflow meter</i> (tempo em s) - Todos os dados obtidos	132
Figura 7.8 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x <i>Outflow meter</i> (MTD em mm), calculado conforme Norma ASTM 2380-05	133
Figura 7.9 – Fluxograma de decisão da ação corretiva	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Hidroplanagem Total e Parcial – Modelo das três zonas (Aps, 2006)	21
Tabela 4.1 – Fatores que afetam o atrito disponível no pavimento (adaptado de HALL et al, 2009)	42
Tabela 4.2 – Fatores que afetam a macrotextura e a microtextura (adaptado de Hall et al, 2009)	48
Tabela 4.3 – Avaliação da macrotextura / Método da altura da areia (DNIT, 2006)	53
Tabela 4.4 – Intervalos máximos entre medições de textura (adaptada de DAC, 2001)	54
Tabela 5.1 – Métodos de ensaio utilizados nos Estados Unidos para caracterizar a textura da superfície do pavimento (adaptado de HALL et al, 2009)	85
Tabela 6.1 – Tráfego de pouso e decolagem – Aeroporto Estadual Arthur Siqueira (adaptado de DAESP, 2012)	92
Tabela 6.2 – Tráfego de pouso e decolagem – Aeroporto Estadual Campo do Amarais (adaptado de DAESP, 2012)	93
Tabela 6.3 – Tráfego de pouso e decolagem – Aeroporto Estadual Bertram Luiz Leupolz (adaptado de DAESP, 2012)	94
Tabela 6.4 – Valores críticos para o Teste de Dixon	100
Tabela 6.5 – Valores críticos para o Teste de Cochran	101
Tabela 6.6 – Valores críticos para o Teste de Grubbs (adaptado de ISO 5725-2, 1994)	103
Tabela 6.7 – Distribuição F de Snedecor	104
Tabela 6.8 – Relação entre o desvio padrão da repetitividade e a média dos resultados	106
Tabela 6.9 – Distribuição Normal – valores de P ($0 \leq Z \leq z_0$)	109
Tabela 6.10 – Classificação das misturas betuminosas em termos de permeabilidade (ZOOROB, 2002 apud O’FLAHERTY, 2002)	111
Tabela 7.1 – Resultados obtidos nos ensaios com o <i>outflow meter</i>	117
Tabela 7.2 – Resultados obtidos no Teste de Dixon para os ensaios com <i>outflow meter</i>	117
Tabela 7.3 – Resultados obtidos no Teste de Cochran para os ensaios com <i>outflow meter</i>	118
Tabela 7.4 – Resultados obtidos no Teste de Grubbs para os ensaios com <i>outflow meter</i>	118
Tabela 7.5 – Resultados obtidos no Teste de Snedecor para os ensaios com <i>outflow meter</i>	119

Tabela 7.6 – Valores das variâncias da repetitividade e reprodutividade - equipamento <i>outflow meter</i>	119
Tabela 7.7 – Valores da repetitividade obtida nos ensaios com <i>outflow meter</i>	120
Tabela 7.8 – Valores da repetitividade do equipamento <i>outflow meter</i>	121
Tabela 7.9 – Resultados obtidos nos ensaios pelo método da mancha de areia	122
Tabela 7.10 – Resultados obtidos no Teste de Dixon para os ensaios de Mancha de Areia	123
Tabela 7.11 – Resultados obtidos no Teste de Cochran para os ensaios de Mancha de Areia ..	123
Tabela 7.12 – Resultados obtidos no Teste de Grubbs para os ensaios de Mancha de Areia	124
Tabela 7.13 – Resultados obtidos no Teste de Snedecor para os ensaios de Mancha de Areia .	124
Tabela 7.14 – Valores das variâncias da repetitividade e reprodutividade – mancha de areia...	125
Tabela 7.15 – Valores da repetitividade obtida nos ensaios pelo método da mancha de areia ..	126
Tabela 7.16 – Valores da repetitividade do ensaio de mancha de areia	127
Tabela 7.17 – Cálculo da velocidade de escoamento superficial - exemplo	135
Tabela 7.18 – Limites da profundidade média da textura e do tempo obtido com <i>outflow meter</i> (adaptado de DAC, 2001; RODRIGUES FILHO, 2006)	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADOT	<i>Arizona Department of Transportation</i>
AIRBUS	Consórcio europeu fabricante de aeronaves
A310	Aeronave de transporte comercial da Airbus
A340	Aeronave de transporte comercial da Airbus
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ASTM	<i>American Society of Testing And Materials</i>
ATR-42-300	Aeronave de transporte fabricada pela <i>Aerei da Trasporto Regionale</i>
BOEING	Fabricante norte-americana de aeronaves
B737	Aeronave de transporte comercial da Boeing
B747-400	Aeronave de transporte comercial da Boeing
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CPA	Camada Porosa de Atrito
DAC	Departamento de Aviação Civil
DAESP	Departamento Aeroviário do Estado de São Paulo
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ETD	<i>Estimated Texture Depth</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FSF	<i>Flight Safety Foundation</i>
HS	Profundidade média de areia

IAC	Instituto de Aviação Civil
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISETH	<i>Institute for Highways, Railroads, and Rocks Engineering</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
LNCE	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LTP	Laboratório de Tecnologia de Pavimentação
MD-82	Aeronave de transporte da McDonnell Douglas, antiga fabricante de aviões norte-americana, comprada pela Boeing em 1996
MPD	<i>Mean Profile Depth</i>
MTD	<i>Mean Texture Depth</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NASDAC	<i>National Aviation Safety Data Analysis Center</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
NPIAS	<i>National Plan of Integrated Airport Systems</i>
NTSB	<i>National Transportation Safety Board</i>
OFM	<i>Outflow meter</i>
OGFC	<i>Open Graded Friction Course</i>
PCC	<i>Portland Cement Concrete</i>
PFC	<i>Porous Friction Course</i>
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congresses</i>
RMS	<i>Root Mean Square of Texture Profile</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
USAF	<i>United States Air Force</i>
USP	Universidade de São Paulo
Z1	Zona 1
Z2	Zona 2
Z3	Zona 3

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

%	Porcentagem
μm	Micrômetro
λ	Comprimento de onda
A	Amplitude pico a pico
C	Estatística do Teste de Cochran
cm	Centímetro
d	Diâmetro
d_c	Desvio da célula
D	Estatística do Teste de Dixon
F_a	Força de Atrito
F	Estatística do Teste de Snedecor
F_s	Coeficiente de Atrito
F_w	Carga Vertical
G	Estatística do Teste de Grubbs
K	Coeficiente de Permeabilidade
kHz	Quilohertz
km/h	Quilômetro por hora
m	Metro
$\bar{m}$	Média aritmética
mm	Milímetro
n	Número de resultados
p	Número de conjuntos de uma população de dados
pol	Polegadas
r	Repetitividade
r_e	Valor da repetitividade real do equipamento

r'_e	Valor da repetitividade obtida dos ensaios
R	Reprodutividade
R^2	Coeficiente de Correlação
s	Segundos
S	Desvio padrão
S^2	Variância
S_r	Desvio padrão da repetitividade
S_R	Desvio padrão da reprodutividade
t	Tempo
t_e	Tempo de escoamento
t/km	Toneladas por quilômetro
v	Volume
V	Velocidade do Veículo
$\bar{x}$	Média aritmética
$\bar{\bar{x}}$	Média geral dos resultados
z	Multiplicativo do desvio padrão para determinação da envoltória de confiança
Z	Conjunto de resultados

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	vii
AGRADECIMENTOS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES	xxiii
SUMÁRIO.....	xxv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivo do trabalho	5
1.3 Estrutura do Trabalho	6
2 DERRAPAGEM EM POUSOS E DECOLAGENS	9
3 TIPOS DE REVESTIMENTOS PARA PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM.....	23
3.1 Misturas Asfálticas	23
3.1.1 Misturas Asfálticas Usinadas a Quente	24
3.1.2 Misturas Asfálticas Usinadas <i>in Situ</i>	33
3.2 <i>Grooving</i>	35
4 ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO.....	39
4.1 Fatores que afetam a aderência pneu/pavimento	39
4.2 Características de Superfície.....	43
4.3 Medidas de Textura	50

4.3.1	Método Volumétrico - Mancha de Areia.....	51
4.3.2	Mancha de Graxa.....	57
4.3.3	Perfilômetro Laser	58
4.3.4	<i>Circular Track Meter (CTMeter)</i> (ASTM E 2157-01).....	63
4.3.5	Filosofia do Equipamento denominado Drenômetro.....	69
5	DRENÔMETRO (<i>OUTFLOW METER</i>)	71
5.1	Conceituação.....	71
5.2	Estudos Realizados Anteriormente.....	74
5.3	Considerações Finais	85
6	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	87
6.1	Introdução	87
6.2	Teste do Ensaio	88
6.3	Pesquisa de Repetitividade e Reprodutividade.....	90
6.3.1	Aeroportos Estudados	91
6.3.2	Método do Ensaio	95
6.3.3	Método de Análise dos Resultados.....	99
6.4	Correlação com a Mancha de Areia.....	110
6.5	Informações sobre a Influência da Permeabilidade e da Declividade no Ensaio de Drenabilidade.....	111
6.5.1	Permeabilidade	111
6.5.2	Declividade Transversal da Pista.....	112
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	115
7.1	Teste do Ensaio	115
7.2	Repetitividade e Reprodutividade.....	116
7.2.1	<i>Outflow Meter</i>	116
7.2.2	Mancha de Areia.....	121
7.3	Correlação com a Mancha de Areia.....	127
7.4	Informações sobre a Influência da Permeabilidade e da Declividade no Ensaio de Drenabilidade.....	134
7.4.1	Permeabilidade	134
7.4.2	Declividade Transversal da Pista.....	135
7.5	Produto do Estudo das Correlações	136
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS	139
8.1	Conclusões	139

8.2 Sugestões para novas pesquisas.....	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Nos últimos anos tem-se observado um aumento crescente no tráfego aéreo mundial, em função da grande demanda do mundo globalizado por eficiência e agilidade na ligação entre os centros produtivos, tornando popular o uso do avião.

No Brasil o crescimento da procura e oferta de assentos no transporte aéreo apresenta números significativos. De acordo dados fornecidos pela Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC (2009) houve um crescimento de 122% de assentos-quilômetro utilizados em termos de tráfego doméstico no período entre 2000 e 2008. Quanto ao transporte de cargas (t/km), no mesmo período, o aumento foi de 71%. Em 2009 a frota aérea registrada no país foi 12.178 aeronaves, incluindo desde os jatos das grandes companhias aéreas, os aviões e helicópteros particulares, táxi-aéreo, as aeronaves usadas na agricultura, em escolas de aviação, em reportagens e vários outros usos.

No âmbito da aviação civil, a aviação geral destaca-se por seu elevado número de voos em relação à aviação comercial, embora essa seja maior em operação no que tange a números de passageiros. O Brasil possui a segunda maior frota de aviação geral do mundo, depois somente dos Estados Unidos, com 10.562 aeronaves no ano de 2008 (FUOCCO, 2008).

Usualmente, a aviação geral é atendida por aeroportos de pequeno e médio porte, os quais apresentam crescente importância na esfera nacional, tendo em vista o elevado número de

aeronaves da aviação geral e o crescimento da aviação regional no Brasil. Esse crescimento tem sido impulsionado pelo desenvolvimento de novos polos regionais, pela ampliação das fronteiras agrícolas e pelo crescimento da classe C. As companhias aéreas estão expandindo suas linhas, concentrando suas operações fora dos grandes centros e implantando hubs regionais, que possibilita a redistribuição de passageiros para outros destinos de forma a estabelecer uma maior ocupação nos voos, reduzindo o custo operacional e racionalizando a malha. As empresas com a maior participação dentro do mercado de aviação regional nacional são exemplos de índices elevados do aumento de demanda. De janeiro a maio de 2010, obtiveram crescimento de até 155%, em comparação ao mesmo período do ano anterior (GONÇALVES, 2010).

Existe uma crescente preocupação com a ocorrência de acidentes envolvendo aeronaves. No período de 2000 a 2009, a aviação civil brasileira totalizou 697 acidentes, com perda de 308 aeronaves e de 966 vidas em 241 acidentes com fatalidades (BRASIL, 2010), conforme observado na Figura 1.1.

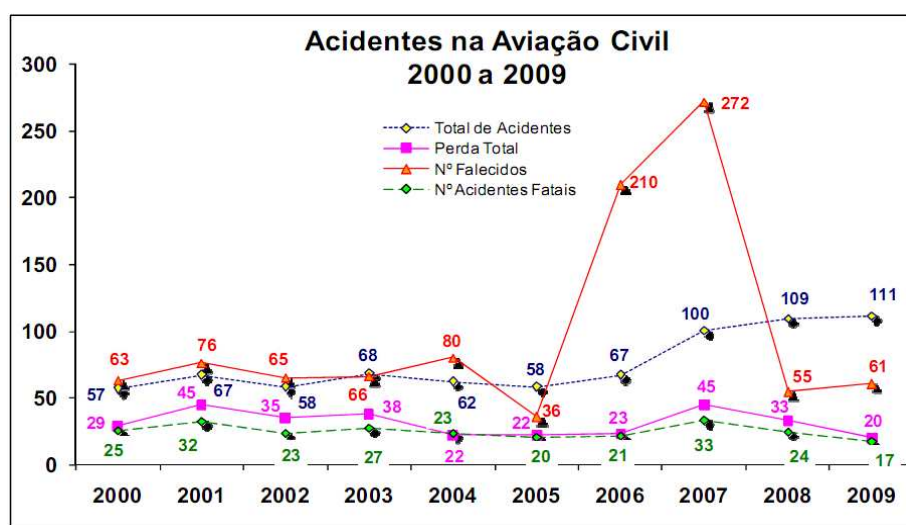


Figura 1.1 - Acidentes Aeronáuticos na Aviação Civil Brasileira (BRASIL, 2010)

Uma análise efetuada referente aos acidentes por segmento de operação demonstra que 88,2% dos acidentes na aviação civil brasileira, entre os anos de 2000 e 2009, estão concentrados nos seguintes segmentos de operação: aviação geral (42,6%), táxi aéreo (20,3%), serviços de instrução (12,8%) e aviação agrícola (12,5%) (BRASIL, 2010). A Figura 1.2 mostra o percentual de acidentes por segmento de operação no período de 2000 a 2009.

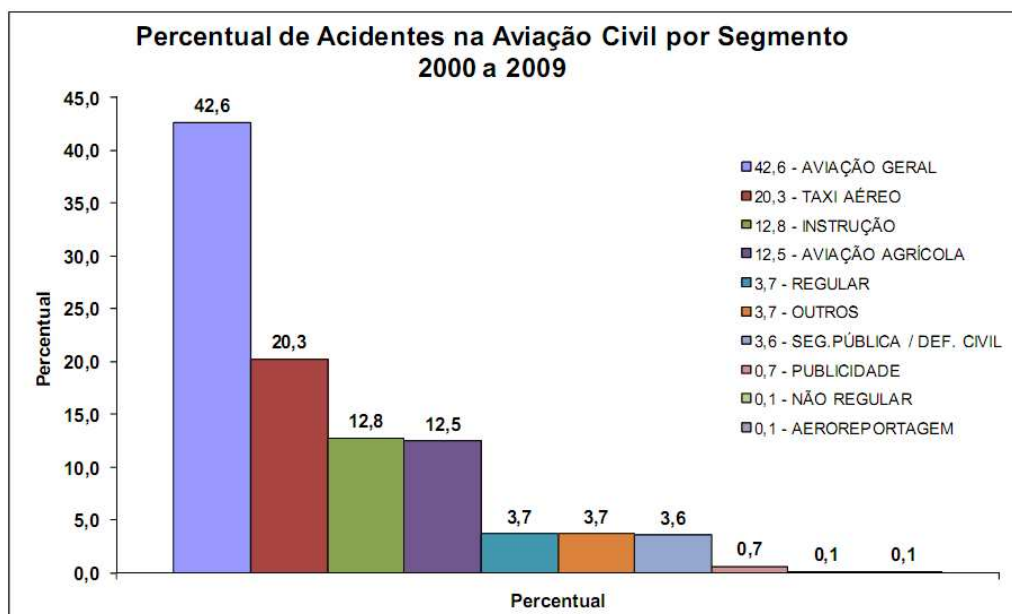


Figura 1.2 - Percentual de Acidentes na Aviação Civil por Segmento entre 2000 e 2009 (BRASIL, 2010)

Estatísticas demonstram que parte significativa (28,3%) dos acidentes ocorridos no Brasil no período de 1996 a 2005 sucederam em solo, ou seja, durante a fase de pouso, decolagem ou rolagem da aeronave (BRASIL, 2010). Estudos da *National Transportation Safety Board* - NTSB (2009) demonstram que cerca de metade de todos os acidentes de aviação geral (49,4%) americana no ano de 2005 ocorreram durante a decolagem ou aterrissagem, apesar da relativa curta duração dessas fases, em comparação com todo o perfil de um voo normal. A Figura 1.3 ilustra os percentuais de acidentes e fatalidades em cada fase de voo.

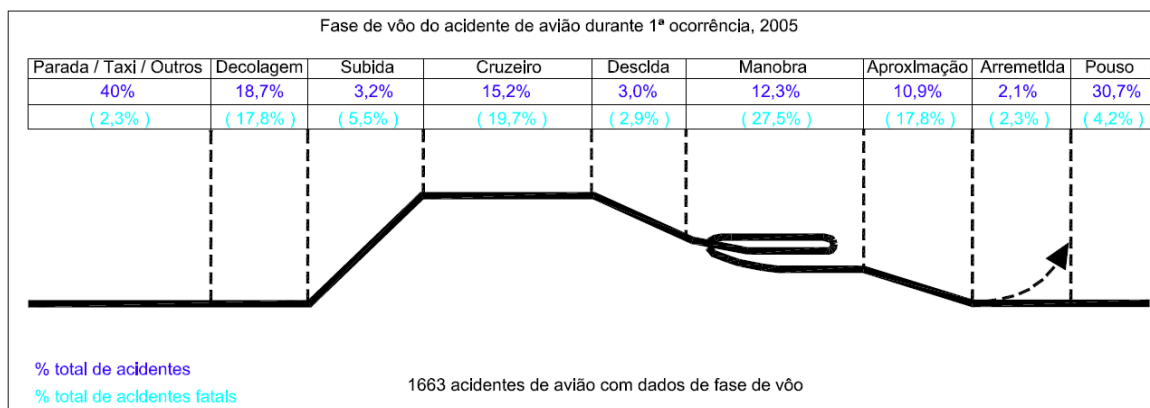


Figura 1.3 – Acidentes de aeronaves durante a fase de voo, 2005 (adaptado de NTSB, 2009)

De acordo com a *Federal Aviation Administration* – FAA (s/d), 21% dos 19.562 acidentes ocorridos entre os anos de 1994 e 2003 tiveram como fator contribuinte a condição meteorológica. Cumpre ressaltar que esse número corresponde a todos os acidentes ocorridos nos EUA e aos acidentes ocorridos em outros países de maior repercussão na mídia.

Os significativos percentuais de acidentes ocorridos em solo e de acidentes com condição meteorológica como fator contribuinte podem estar associados com a aderência pneu-pavimento.

Entre os diversos parâmetros necessários para definir as características superficiais de um pavimento, do ponto de vista da segurança, a aderência pneu-pavimento é a mais importante. Segundo estatísticas realizadas em vários países, a falta de aderência é responsável por um elevado percentual de acidentes ocorridos, principalmente em pistas molhadas.

Rodrigues Filho (2006) afirma que uma pista molhada apresenta atrito significativamente inferior ao de uma pista seca em função da impossibilidade de se expulsar completamente a água que se encontra entre o pneu e a superfície da pista. Assim sendo, em pistas molhadas, é imprescindível o deslocamento ou rompimento da película de água que se interpõe entre o pneu e a pista para que se obtenha atrito necessário à frenagem de uma aeronave, alcançando assim contato semelhante ao obtido com a pista seca.

As características de textura da superfície do pavimento influenciam diretamente nas forças de atrito que o pneu pode desenvolver para a aceleração, direção e frenagem dos veículos. Diferentes tipos de processos e técnicas têm sido desenvolvidos para a medida da textura da superfície, sendo identificados dois tipos de classificação da textura: microtextura e macrotextura.

As características do pavimento quanto à macrotextura e a microtextura, afetam o coeficiente de aderência pneu-pavimento, podendo resultar em acidentes por derrapagem em situações de frenagem ou manobras emergenciais, principalmente em pavimentos molhados.

Para se obter uma boa aderência entre o pneu e o pavimento, principalmente quando houver a presença de água, a camada de rolamento do pavimento deve apresentar textura que

proporcione adequado potencial de drenagem, ou seja, uma macrotextura capaz de eliminar a água pelos seus micros canais, bem como conter em sua composição agregados que apresentem rugosidade suficiente para romper a lâmina de água (boa microtextura).

O tipo de revestimento interfere diretamente nessas características de textura do pavimento, sendo sua escolha importante para a utilização em pavimentos aeroportuários.

Outro ponto a ser ressaltado é o monitoramento desses pavimentos para a verificação de suas condições de aderência, imprescindível para uma operação aeroportuária segura. Essa verificação através de medições de sua macrotextura, microtextura e drenabilidade pode ser realizada com diversos equipamentos e métodos de avaliação, variando conforme o país ou administração. No entanto, é necessária a definição de critérios e métodos de ensaio para se ter um padrão operacional com segurança em situação de chuvas.

O presente trabalho aborda o estudo da drenabilidade da superfície do pavimento, ou seja, escoamento superficial da água, associando-a com sua macrotextura em pavimentos de aeroportos de pequeno e médio porte através da utilização de equipamento do tipo *outflow meter*, verificando-se a possibilidade de se introduzir um novo método de ensaio no Brasil para complementar o controle de segurança operacional aeroportuário. Foi realizado o teste do ensaio em quatro tipos de revestimentos e também foram estudadas a repetitividade e reprodutividade do ensaio selecionado e sua correlação com medidas de mancha de areia, atualmente recomendado, como padrão de determinação da macrotextura de pistas de aeroporto pela ANAC, em sua instrução IAC 4302.

1.2 Objetivo do trabalho

Estudar um método de ensaio de drenabilidade que possa ser empregado de forma sistemática em aeroportos brasileiros de pequeno e médio porte como forma adicional de controlar a segurança operacional com adequada repetitividade e reprodutividade.

Adicionalmente, o presente trabalho apresenta um estudo comparativo da medida indireta de macrotextura obtida por meio da drenabilidade superficial do pavimento com o equipamento do tipo *outflow meter* e o método tradicionalmente empregado no Brasil para obtenção da macrotextura do revestimento, o ensaio de mancha de areia.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi estruturado em sete capítulos, sucintamente descritos a seguir:

O Capítulo 1 realiza o enquadramento do tema, a partir de uma breve introdução sobre o aumento acentuado da demanda de transporte aéreo nos últimos anos, as crescentes preocupações com os aspectos da segurança nas operações aeroportuárias, ressaltado a importância das características de textura da superfície do pavimento e de seu monitoramento.

O Capítulo 2 relata acidentes aeronáuticos que podem estar associados à aderência pneu-pavimento, discorre sobre derrapagens na fase de pouso e decolagem, enfatizando-se o fenômeno da hidroplanagem, os fatores que a influenciam e o sistema de frenagem de uma aeronave.

O Capítulo 3 descreve os tipos de revestimentos que podem ser utilizados em pistas aeroportuárias, incluindo misturas asfálticas, pavimento de concreto e técnicas de textura.

No Capítulo 4 são apresentados os fatores que afetam a aderência pneu/pavimento, as características de superfície, com enfoque para a macrotextura e microtextura, os fatores que as influenciam e os métodos de avaliação da macrotextura.

O Capítulo 5 apresenta o equipamento *outflow meter*, descrevendo seu funcionamento e seu método de ensaio. Também são demonstrados estudos realizados anteriormente que comparam ensaios efetuados com o *outflow meter* e ensaios com outros equipamentos que medem a macrotextura do pavimento através da profundidade média do perfil (*Mean Profile*

Depth - MPD) e da profundidade média de textura (*Mean Texture Depth* - MTD).

O Capítulo 6 apresenta a metodologia da pesquisa, que inclui o teste do ensaio em diversos tipos de revestimentos, a análise de repetitividade e da reprodutividade do equipamento *outflow meter* e do método da mancha de areia, o estudo da correlação entre o *outflow meter* e a mancha de areia, o estudo teórico da influência da permeabilidade no ensaio de drenabilidade em questão e um estudo prático da influência da declividade no mesmo.

O Capítulo 7 apresenta a análise dos resultados obtidos nos testes realizados com o equipamento do tipo *outflow meter*, a análise estatística para a verificação da repetitividade e da reprodutividade do equipamento em estudo e da mancha de areia, as correlações obtidas entre o *outflow meter* e o ensaio da mancha de areia, as constatações sobre a influência da permeabilidade no ensaio de drenabilidade em questão, os resultados obtidos sobre a influência da declividade no mesmo e o produto do estudo das correlações.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões obtidas e as sugestões para as próximas pesquisas a serem realizadas sobre este assunto.

2 DERRAPAGEM EM POUSOS E DECOLAGENS

Os acidentes aéreos causam grande impacto em toda a sociedade, pois estes implicam em efeitos chocantes e profundamente marcantes. Desta forma, há um grande esforço para que haja a redução de seu número, uma vez que torná-lo nulo é uma meta difícil de ser alcançada.

Dados publicados pela *Flight Safety Foundation* – FSF (AERO SAFETY WORLD, 2008), sobre acidentes entre os anos de 1995 e 2007 mostram um total de 1332 acidentes com aeronaves comerciais, sendo que em 379 dos eventos (28,%) o avião superou o final da pista ou desviou para o lado de fora da pista, podendo estar associado com a aderência pneu-pavimento. A seguir são relatados alguns dos principais acidentes/incidentes que podem estar associados com a aderência dos pavimentos.

No Brasil, em termos de acidentes/incidentes associados com derrapagem, Merighi et al (2006) citam o caso do avião da companhia brasileira BRA que no dia 21 de março de 2006, ao pousar sob intensa chuva na pista principal do Aeroporto de Congonhas, derrapou e quase provocou uma tragédia.

No aeroporto de Irkutsk, na Rússia, ocorreu um grande acidente que tem a derrapagem como principal fator contribuinte. O relatório final do *Interstate Aviation Committee* (2007) relata que no dia 8 de Julho de 2006, uma aeronave Airbus A310 da companhia russa Sibir, com 195 passageiros e oito tripulantes, ao pousar sob chuva, ultrapassou o final da pista, chocou-se com uma estrutura de concreto e pegou fogo, deixando 125 vítimas fatais e 41 gravemente feridas. O avião foi quase completamente destruído pelo fogo.

De acordo com Merighi e Fortes (2007), outro acidente que causou certa apreensão nos meios aeronáuticos foi o que ocorreu em agosto de 2005 na cidade de Toronto, Canadá, onde uma aeronave A340 da companhia aérea Air France com 297 passageiros e 12 tripulantes a bordo, derrapou durante a aterrissagem sob forte tempestade no Aeroporto Internacional de Toronto. Conforme relatado pela Agência de Segurança de Transporte dos Estados Unidos – NTSB ([ca. 2005]), o Airbus tentou pousar sob severas condições meteorológicas, ultrapassando o fim da pista que tem um comprimento total de 2.700 metros. Ao final da derrapagem, o avião chocou-se com uma mureta lateral, incendiando-se em função da força de impacto, o que resultou na perda total da aeronave. Entretanto, os passageiros conseguiram escapar do que poderia ter sido uma tragédia.

No dia 11 de agosto de 2007, um Lear Jet 35A, operado pela empresa World Jet II, como taxi aéreo, ultrapassou o final da pista 09 no Aeroporto de Melville Hall, na Dominica, parando em uma rodovia. De acordo com o relatório do NTSB ([ca. 2007]), a aeronave sofreu danos substanciais, porém não houve feridos.

De acordo com a FSF ([ca. 2004]), um Boeing 737-200 operado pela companhia aérea Air Guinee Express tentou decolar do Aeroporto Internacional de Freetown-Lungi, em Serra Leoa, no dia 11 de agosto de 2004, porém, teve que abortar a decolagem devido à forte tempestade. A aeronave foi parar a 100 m do fim da pista que possui um comprimento total de 3200 m. Os 127 ocupantes escaparam ilesos, mas o avião foi seriamente danificado.

Segundo Merighi e Fortes (2007), essa redução brusca de velocidade causou a derrapagem. Caso não houvesse água na pista, a distância de parada teria sido menor e não teria ocorrido o incidente.

O relatório do NTSB (2007) relatou que em Dezembro de 2005 um Boeing B737, operado pela companhia aérea *Southwest Airlines*, após a aterrissagem no Aeroporto Internacional Midway, em Chicago, ultrapassou a pista, rolou através de uma cerca de vedação do perímetro do aeroporto e sobre uma estrada adjacente, atingindo um automóvel antes da parada total (Figura 2.16). Uma criança no automóvel foi morta e os outros quatro ocupantes ficaram feridos. Dezoito dos 103 ocupantes do avião apresentaram ferimentos leves e o avião foi

substancialmente danificado.

Em Setembro de 1999, o B747-400 da companhia aérea australiana Qantas aterrisou em Bangkok, na Tailândia, e em seguida aquaplanou em uma pista muito afetada pela água após chuvas intensas. Segundo a FSF ([ca. 1999]), a aeronave ultrapassou o final da pista a uma velocidade de 163 km/h e parou 220 metros depois, em um gramado com o nariz em uma estrada no perímetro do aeroporto.

A profundidade de água sobre a pista quando o avião pousou não pôde ser determinado, mas foi suficiente para permitir a ocorrência da aquaplanagem. O acúmulo da água foi o resultado de intensas chuvas na pista nos últimos minutos e, possivelmente, porque a pista estava sem ranhuras.

Em março de 2007, uma aeronave Dassault Falcon 900C ao pousar no Aeroporto Rifle-Garfield County, no Colorado (Estados Unidos) derrapou e ultrapassou a pista parando em um terreno vizinho. O relatório da FSF ([ca. 2007a]) considerou que pista molhada, a falta de ranhura e a baixa declividade da pista foram fatores contribuintes para a ocorrência do acidente.

No dia 16 de Julho de 2007, um avião ATR-42-300 operado pela Companhia Pantanal Linhas Aéreas Sul Matrogrossenses, ao pousar na pista principal do Aeroporto de Congonhas, em São Paulo, sob condições chuvosas perdeu o controle, derrapou para fora da pista e foi parar no gramado que divide as pistas auxiliar e principal (Figura 2.18). Houve danos graves a aeronave, mas seus ocupantes ficaram ilesos (FSF, [ca. 2007b]).

O relatório final do CENIPA (2008) concluiu que houve hidroplanagem da aeronave. Uma das recomendações de segurança de vôo emitidas neste relatório à Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) foi que se reavaliasse a metodologia, os procedimentos específicos e o modo de calibração referente à medição do coeficiente de atrito da superfície das pistas dos aeroportos que administra, com vistas a assegurar consistência nos resultados de medições.

De acordo com o relatório do NTSB (2001), no primeiro dia de Junho de 1999, uma aeronave McDonnell Douglas MD-82 da companhia American Airlines, com 139 passageiros e 6

tripulantes, ao pousar no Aeroporto Nacional de Little Rock, em Arkansas (Estados Unidos) ultrapassou o final da pista durante a aterrissagem, passou através da cerca de segurança e colidiu com a estrutura de apoio do sistema de iluminação de abordagem da outra pista. O comandante e 10 passageiros morreram, além de 110 pessoas que ficaram feridas. O avião foi destruído pela força de impacto, incendiando-se.

A principal causa dos acidentes, nas situações mencionadas, está associada à derrapagem ou perda da dirigibilidade durante o pouso em situação crítica.

Rodrigues Filho (2006) afirma que a força de atrito pneu-pavimento atua durante todo o pouso, desde o ponto em que a aeronave toca o pavimento e inicia a desaceleração, até sua parada total. A intensidade da força de atrito gerada pela atuação dos freios da aeronave, em velocidades mais elevadas, é relativamente pequena, se comparada às forças desenvolvidas pelo reverso dos motores e pelo arrasto aerodinâmico. Contudo, a partir do momento que o avião chega à velocidade de 80 nós (148 km/h) até sua parada total, o atrito passa a ser a principal força, sendo que, para as velocidades mais baixas de aproximadamente 20 nós (37 km/h), este se torna o único recurso operacionalmente disponível com o qual o piloto pode contar.

A operação de aeronaves com maior peso e velocidade de aterrissagem tornou o desempenho da frenagem nas pistas de pouso e decolagem dos aeroportos, principalmente quando há água no pavimento, um componente cada vez mais crítico para a segurança das operações.

Segundo Mantovani e Merighi (2008), o sistema de frenagem de uma aeronave é composto por um conjunto de recursos que trabalham na função de proporcionar a redução da velocidade das aeronaves provendo a sua parada total. Os principais dispositivos de frenagem são: *speedbrakes*, sistemas de *autobrake* e *antiskid* e reversor de empuxo, conforme descrito a seguir:

- ***Spoilers* ou *Speedbrakes*:** freios aerodinâmicos utilizados na frenagem das aeronaves a propulsão, e posicionados sobre as asas dos aviões (mecanismo móvel). Após o toque das rodas do avião na pista, este pode ser acionado totalmente, com o objetivo de se

quebrar rapidamente a sustentação da aeronave, gerando uma situação em que a aeronave não consiga ganhar altitude novamente, se mantendo bem próxima ao solo, e com uma perda de velocidade significativa, justificada pelo arrasto.

- **Sistema de *autobrake*:** sistema de freios automáticos que inicia seu processo de atuação a partir do momento que a aeronave toca o solo no procedimento de pouso, de forma a permitir uma desaceleração contínua e sem que a aeronave apresente o travamento das rodas (tal recurso deve-se também ao sistema *antiskid*).
- **Sistema *Antiskid*:** sistema que regula a pressão do freio de modo contínuo em função da velocidade da roda. Quando a desaceleração da roda excede um valor pré-determinado, a pressão é aliviada, prevenindo que as rodas da aeronave travem em qualquer condição de pista, como exemplo, molhada, contaminada ou seca. Esta pressão é gradualmente aumentada até que outra derrapagem (incipiente) seja percebida.
- **Reversor de Empuxo:** procedimento que produz uma força de empuxo contrária ao sentido normal de navegação da aeronave causando forte desaceleração. Os reversores de empuxo ajudam na frenagem após a aterrissagem, de modo a reduzir o uso dos freios e admitindo distâncias menores de frenagem.

De acordo com Rodrigues Filho (2006), uma pista molhada apresenta atrito significativamente inferior ao de uma pista seca em função da impossibilidade de se expulsar completamente a água que se encontra entre o pneu e a superfície da pista. Assim sendo, em pista molhadas, é imprescindível o deslocamento ou rompimento da película de água que se interpõe entre o pneu e a pista para que se obtenha atrito necessário à frenagem de uma aeronave, de forma a obter contato semelhante ao obtido com a pista seca.

Ranganathan (2005) cita em seu estudo que para o piloto, a pista é considerada “molhada” quando a profundidade de água é menor que 3 mm, conforme consta nos manuais de voo. Se a profundidade é maior que 3 mm, a pista entra na categoria de “escorregadia” ou “contaminada”. Esta diferença na profundidade da água altera significativamente a distância de aterrissagem. Em uma pista molhada a aeronave requer 40% a mais de pista para parar e em uma pista contaminada a necessidade aumenta para 300%.

Horne e Dreher (1963) demonstraram o efeito de pista molhada e de pista seca sobre o coeficiente de atrito para a aeronave 880 Jet, em pista de concreto com sistema antiderrapante e pneus ranhurados com pressão de 1034 kPa (Figura 2.1). Observa-se uma redução significativa do atrito em pista molhadas na medida em que a velocidade aumenta. Rodrigues Filho (2006) afirma que isso ocorre porque com o aumento de velocidade, reduz-se o tempo de contato da banda de rodagem com o pavimento, acarretando na diminuição do tempo disponível para a expulsão da água.

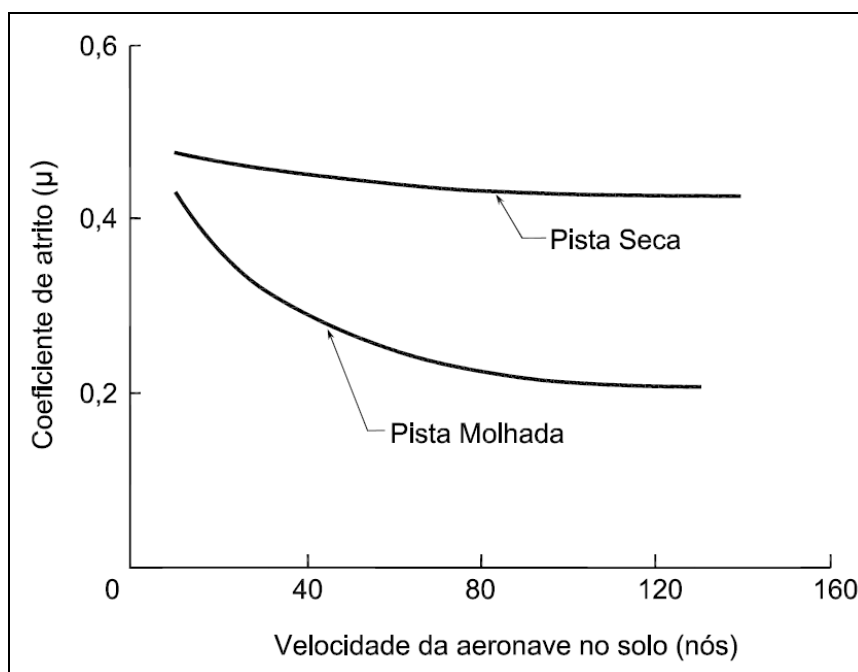


Figura 2.1 - Efeito da pista molhada e da pista seca sobre o coeficiente de atrito em função da velocidade da aeronave (adaptado de HORNE e DREHER, 1963)

Um fenômeno que acontece em pistas molhadas é a hidroplanagem, que de acordo com Rodrigues Filho (2006), ocorre em função da presença de uma película de água que se interpõe entre o pneu e o pavimento, acarretando na perda total de contato entre os pneus da aeronave e a superfície do pavimento. Na ocorrência da hidroplanagem a força de atrito é insuficiente para manter a rotação das rodas, que param gradualmente, tornando ineficaz sua ação no controle direcional e na frenagem da aeronave.

Rodrigues Filho (2006) agrupa os fatores que influenciam na hidroplanagem em quatro tópicos principais: pneu, fluído contaminante (água), pavimento e aeronave, sendo os mesmos descritos a seguir.

Os fatores importantes relativos ao pneu que podem ser destacados na determinação da velocidade de hidroplanagem são:

- Pressão de enchimento do pneu: quanto maior a pressão, maior a rigidez do pneu e maior a resistência da banda de rodagem à deformação sob a ação de arrasto da água, o que evita uma maior penetração de água na área de contato.
- Desenho da escultura da banda de rodagem: na comparação entre pneus com ranhuras e pneus lisos, observa-se que os primeiros tendem a aumentar a velocidade de início de hidroplanagem, além de aumentar a profundidade mínima de água necessária para que ocorra a hidroplanagem.
- Estrutura do pneu: de acordo com o tipo de pneu (diagonal ou radial) tem influência na velocidade de início da hidroplanagem. Es et al (2001) verificaram que a velocidade de hidroplanagem de um pneu radial é aproximadamente 27% inferior a de um pneu diagonal de mesma pressão, provavelmente pela diferente forma da área de contato dos pneus.

O fluído contaminante, ou seja, a água, o gelo ou a neve, mas que no caso do clima do Brasil pode ser considerada apenas a água proveniente de chuvas na área de contato pneu-pavimento é um fator essencial para que ocorra a hidroplanagem. O fluído possui duas características básicas que afetam a aderência entre o pneu e o pavimento e influenciam no potencial de ocorrência de hidroplanagem que são a viscosidade e a massa específica. Outro fator que também influencia na determinação do potencial de hidroplanagem é a profundidade da lâmina d'água na trajetória do pneu, que quanto mais elevada, maior as forças inerciais que agem no pneu e maior a probabilidade de que a capacidade de drenagem das ranhuras da banda de rodagem do pneu e da macrotextura do pavimento sejam excedidas.

O pavimento pode influenciar na hidroplanagem através da:

- Declividade transversal, que afeta as condições de drenagem da superfície do pavimento, dificultando ou favorecendo a ocorrência do fenômeno.
- Macrotextura do pavimento que fornece caminhos de escape para a água contida na área de contato pneu-pavimento, retardando o aumento da pressão hidrodinâmica necessária para a ocorrência de hidroplanagem.
- Irregularidades do pavimento que, quando existentes, promovem a formação de poças na superfície do pavimento em períodos de chuva.

As condições operacionais da aeronave que têm relação com a ocorrência de hidroplanagem são o modo de operação (pouso ou decolagem), a velocidade da aeronave, a carga de roda e as condições de tráfego.

Merighi e Fortes (2007) relatam que a hidroplanagem corresponde à perda de aderência entre o pneu e o pavimento e está intimamente associada às condições de atrito do pneu com a pista de rolamento. Em situações onde contato do pneu ou a aderência são deficientes, há uma perda do controle de direção e freio, genericamente conhecido como incerteza (BAILEY, 2000).

Bailey (2000) identifica três modos básicos de incerteza: hidroplanagem viscosa, hidroplanagem dinâmica e hidroplanagem por borracha revertida. Andre (2001) também identifica esses três tipos de hidroplanagem.

A hidroplanagem viscosa ocorre quando o pneu não consegue perfurar o filme residual fino de água ou algum outro poluente no pavimento. Essa água lubrifica a superfície e a aderência é reduzida. De acordo com Merighi e Fortes (2007), o próprio emborrachamento existente nos pontos de toque da pista pode servir de poluição e não permitir que ocorra a aderência entre o pneu e a pista. O método mais eficiente de prevenir esta lubrificação é prover uma textura adequada para a superfície de pavimento. A Figura 2.2 demonstra a hidroplanagem viscosa.

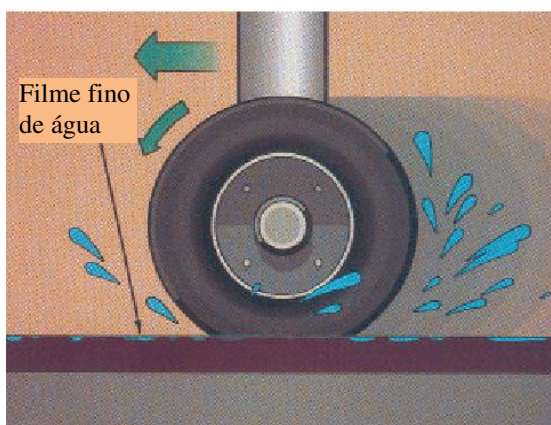


Figura 2.2 - Hidroplanagem viscosa (adaptado de ANDRE, 2001)

A hidroplanagem dinâmica ou aquaplanagem (Figura 2.3) é o termo técnico para o que geralmente é chamado de hidroplanagem. É um fenômeno que ocorre em função do conjunto de três condições: grande espessura de lâmina de água na pista, elevadas velocidades das aeronaves ou veículos e superfície de macrotextura pobre. Porém, quando acontece, efeitos inerciais impedem que a água escape e o pneu evita o pavimento por força hidrodinâmica, ou seja, o pneu bóia deslizando sobre o filme de água, perdendo a aderência com o pavimento.

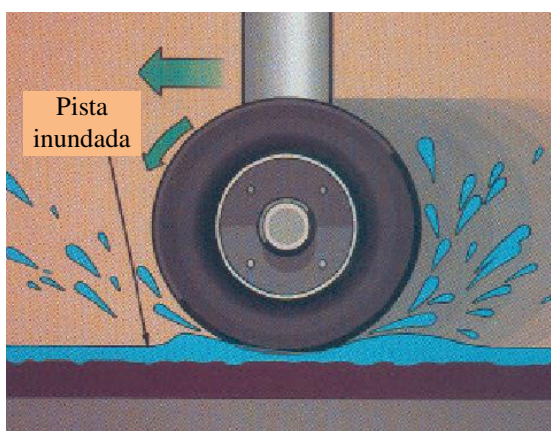


Figura 2.3 - Hidroplanagem dinâmica (adaptado de ANDRE, 2001)

A hidroplanagem por borracha revertida, de acordo com Bailey (2000), é um complexo fenômeno que durante anos recebeu uma variedade de explicações. A hidroplanagem por borracha revertida é semelhante à derrapagem viscosa que acontece com uma película de água e uma superfície de pista lisa. Esta situação frequentemente ocorre em seguida da hidroplanagem dinâmica ou viscosa onde as rodas de aeronave são travadas, criando calor suficiente para

vaporizar a película de água subjacente que forma um amortecedor de vapor eliminando o contato do pneu com a superfície. A Figura 2.4 ilustra o fenômeno descrito.

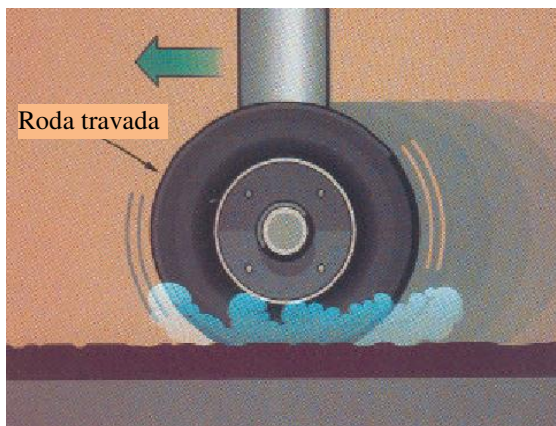


Figura 2.4 - Hidroplanagem por borracha revertida (adaptado de ANDRE, 2001)

Uma vez começada, a hidroplanagem por borracha revertida prosseguirá até em velocidades muito baixas, potencialmente até a aeronave vir a parar, sendo que durante a derrapagem não há nenhuma capacidade de direção. Indicações da ocorrência desse fenômeno são marcas brancas particulares no pavimento, as quais são fáceis de identificar.

Rodrigues Filho (2006) afirma que a ocorrência da hidroplanagem totalmente viscosa ou completamente dinâmica é extremamente rara, sendo normal a ocorrência simultânea dos dois tipos de hidroplanagem, ou seja, hidroplanagem combinada. Conforme apresentado em seu estudo, pesquisas realizadas pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) mostraram que a região de contato do pneu com o pavimento pode ser dividida em três zonas distintas:

- Zona 1 (Z1): é a região da área de contato recoberta por uma espessura considerável de água, sujeita à hidroplanagem dinâmica, também denominada "zona molhada". Nessa zona, ocorre o impacto do pneu com a superfície da água, em que o pneu em movimento empurra a maior parte da água para frente e para os lados, na forma de spray e a outra parte é obrigada a se deslocar através das ranhuras da banda de rodagem ou pelos canais existentes na macrotextura do pavimento. Assim, a pressão hidrodinâmica gerada nessa região provoca a deformação da banda de rodagem, permitindo a penetração da água na

área de contato.

- Zona 2 (Z2): é a região da área de contato recoberta por uma espessura delgada de água, sujeita à hidroplanagem viscosa, também denominada “zona de transição ou intermediária”. A viscosidade da água impede que esta se desloque da área de contato antes da passagem da roda e conseqüentemente sua pressão é mantida, impedindo o contato direto entre o pneu e o pavimento. Essa pequena espessura de lâmina d’água, sob pressão, é rompida em pontos localizados, onde as “asperezas” da superfície do pavimento geram tensões de contato maiores que a pressão da água, ou seja, o pneu passa a ter contato parcial com o pavimento
- Zona 3 (Z3): é a região da área de contato em que a água é totalmente expulsa, ou seja, é uma zona teoricamente sem a presença d’água, ocorrendo, portanto, o contato direto entre o pneu e o pavimento. É também denominada de “zona seca ou de contato”, cujo atrito contribui com mais intensidade para a desaceleração e o controle direcional da aeronave.

A Figura 2.12 apresenta o esquema das três zonas da área de contato de um pneu e uma superfície molhada e das quatro fases da hidroplanagem combinada.

Segundo Silva (2008), a velocidade de deslocamento é um dos fatores fundamentais para se determinar as dimensões nas Zonas 1, 2 e 3, conforme ilustrado na Figura 2.5. Destaca-se também a magnitude dos coeficientes de atrito, histerese e adesão, os quais dependem da espessura da lâmina d’água e da microtextura da superfície do pavimento, respectivamente.

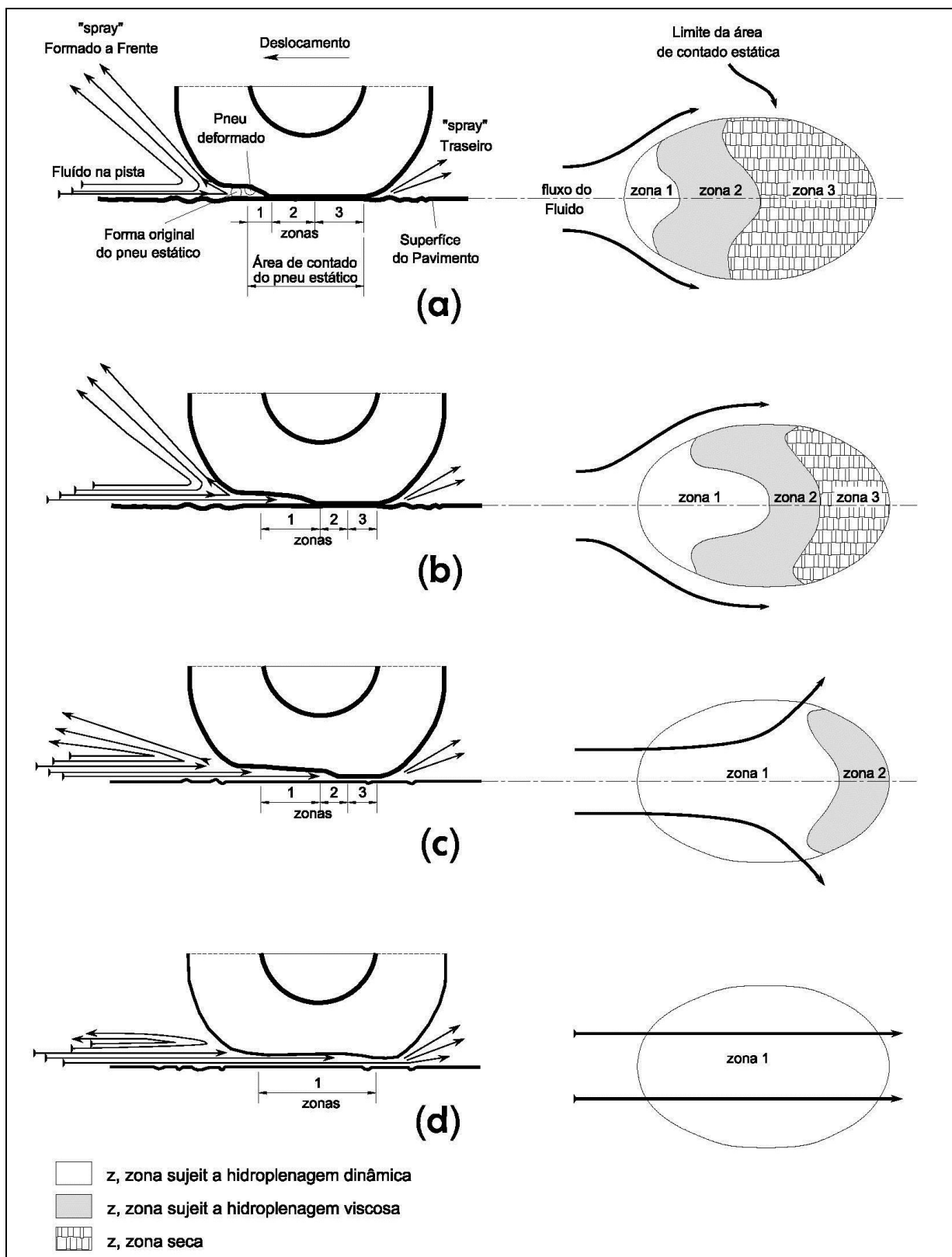


Figura 2.5 - Modelo das três zonas para a área de contato e das quatro fases da hidroplanagem
(BALKWILL, 2003 apud RODRIGUES FILHO, 2006)

Rodrigues Filho (2006), em seu estudo, faz os seguintes comentários sobre a velocidade de deslocamento:

- A velocidade de deslocamento da Figura 2.5b é maior que a velocidade da Figura 2.5a. No primeiro caso a Zona 1 é maior e se estende à parte traseira da área de contato, tomando espaço das Zonas 2 e 3.
- A velocidade de deslocamento da Figura 2.5c é ainda maior que nos dois referidos casos devido à ausência de contato seco entre o pneu e o pavimento, o que torna o atrito pneu-pavimento bem reduzido.
- A Figura 2.5d ilustra o deslocamento da roda a uma velocidade em que não há mais contato seco entre as superfícies do pneu e do pavimento (hidroplanagem dinâmica completa), sendo o atrito reduzido a valores insignificantes, desencadeando a perda de controle direcional da aeronave e um possível acidente.

A porcentagem das áreas de cada zona, de acordo com Aps (2006), depende da velocidade do veículo, da textura do pavimento, da pressão interna dos pneus e da manobra realizada. As características, fenômenos envolvidos e propriedades relevantes nas zonas 1, 2 e 3 são resumidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Hidroplanagem Total e Parcial – Modelo das três zonas (Aps, 2006)

Parâmetros	Hidroplanagem Total	Hidroplanagem Parcial	Contato
Zona	Z 1	Z 2	Z 3
Condição do Pavimento	Molhado	Úmido	Seco
Tipo de interação	Deslizamento	Contato parcial	Rolamento
Propriedade relevante	Macrotextura	Microtextura	Macro e Micro
Fenômeno ocorrente	Hidroplanagem dinâmica	Hidroplanagem Viscosa	Atrito

A ação conjunta da macrotextura e da microtextura da superfície do pavimento elimina a água da área de contato entre o pneu e o pavimento. A macrotextura, em conjunto com os sulcos que compõem o desenho da banda de rodagem do pneu, é responsável por permitir a drenagem de

grande parte da água existente na Zona 1. A função da microtextura é o rompimento da película de água remanescente na Zona 2, de forma a permitir o restabelecimento do contato entre o pneu e o pavimento.

Normalmente os acidentes em função da hidroplanagem ocorrem sob condições de altas velocidades (superiores a 100 km/h), em revestimentos com elevadas espessuras de lâmina d'água e em veículos com pressão sobre o pneu superior à sua pressão de contato. Ocorrem geralmente em pontos isolados dos pavimentos com macrotextura fechada, onde a drenagem superficial é ruim. No entanto, mesmo em lâminas muito delgadas sobre o pavimento (filme), o risco de acidente continua existindo, pois esse filme atua como um lubrificante, diminuindo, por consequência, a resistência ao deslizamento (GUZMÁN, 1995 apud APS, 2006).

Uma adequada e segura operação de pouso ou decolagem depende do contato pneu/pavimento e da aderência entre ambos. A condição de boa aderência entre o pavimento/pneu pode ser conseguida através de uma boa macrotextura e uma drenagem adequada.

A literatura rodoviária é rica em informações sobre o aumento da segurança em vias molhadas em casos de utilização de pavimentos permeáveis, ou seja, drenantes, resultantes de uma elevada porosidade. Assim, muitas agências têm desenvolvido extensivos programas na obtenção de superfícies que contribuam para a redução de acidentes.

3 TIPOS DE REVESTIMENTOS PARA PISTAS DE POUSO E DECOLAGEM

Na construção de novas pistas de pouso e decolagem ou na restauração de pistas existentes, podem ser utilizados como revestimento misturas asfálticas ou pavimento de concreto. No presente estudo serão abordadas apenas as misturas asfálticas.

3.1 Misturas Asfálticas

O material de revestimento pode ser fabricado em usina específica (fixa ou móvel) chamado de mistura usinada, preparado na própria pista, denominado tratamento superficial ou produzida em usinas móveis especiais que promovem a mistura agregados-ligante imediatamente antes da colocação no pavimento, que é a lama asfáltica e o micro revestimento. Os revestimentos são também identificados quanto ao tipo de ligante: a quente com o uso de cimento asfáltico de petróleo (CAP), ou a frio com o uso de emulsão asfáltica (BERNUCCI et al, 2008).

Independentemente do tipo de mistura asfáltica a ser empregada em pistas aeroportuárias, diversos fatores interessam na obtenção de um adequado projeto de mistura do pavimento, os quais incluem a escolha de fontes de agregado, tamanho e graduação dos agregados, a relação entre os agregados e o ligante, e os métodos de construção para obter as propriedades de superfície necessárias (FAA, 1997)

3.1.1 Misturas Asfálticas Usinadas a Quente

Bernucci et al (2008) subdivide as misturas asfálticas usinadas a quente pelo padrão de distribuição granulométrica, destacando-se três tipos mais usuais:

- Graduação densa: curva granulométrica contínua e bem-graduada, em que os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores, de modo a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios, em torno de 3% a 5%. O principal exemplo é o concreto asfáltico (CA), tipo de mistura usinada mais empregada no Brasil, também denominado concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

O concreto asfáltico é uma mistura asfáltica muito resistente em todos os aspectos, desde que os materiais sejam selecionados e dosados adequadamente. Segundo Aps (2006), é uma graduação de elevada resistência ao cisalhamento devido ao arranjo dos grãos e ao grande entrosamento entre eles. Estas misturas tendem a possuir maior entrosamento, maior densidade, serem mais fechadas e densas em função de seu arranjo granulométrico.

O ligante asfáltico pode ser asfalto convencional ou especial com asfalto modificado por polímero ou com asfalto-borracha. Normalmente, a faixa de teor de asfalto em peso está entre 4,5% a 6,0%, dependendo da forma e massa específica dos agregados, da viscosidade e do tipo do ligante, podendo ocorrer variações em torno desses valores.

A Figura 3.1 mostra um exemplo de corpo-de-prova de mistura asfáltica de graduação densa (concreto asfáltico). A Figura 3.2 (a) ilustra um aspecto de um concreto asfáltico denso (faixa “C” do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT), com curva granulométrica contínua acarretando em uma textura superficial fechada e a Figura 3.2 (b) mostra um concreto asfáltico faixa “B” do DNIT (binder) com graduação mais grosseira, com maior consumo de agregados graúdos.



Figura 3.1 - Corpo de prova de revestimento tipo Concreto Asfáltico (BERNUCCI et al, 2008)

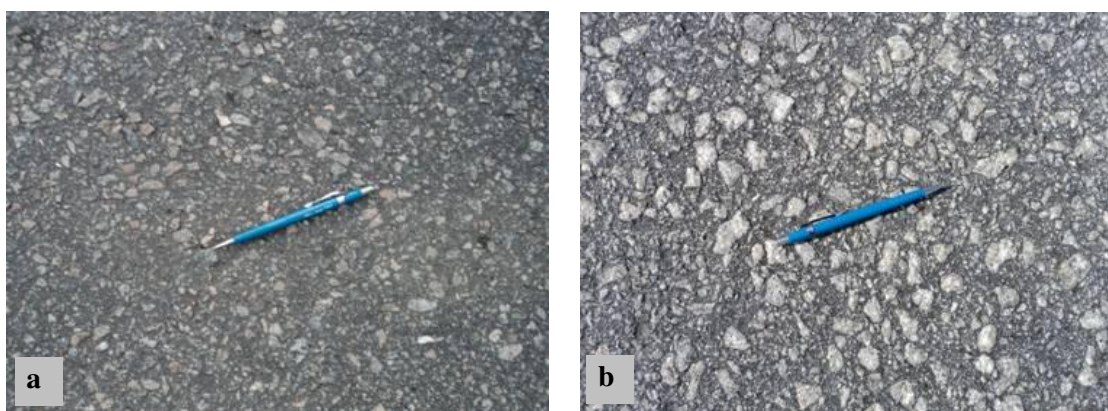


Figura 3.2 - Dois tipos de concretos asfálticos de graduação densa (arquivo próprio)

Aps (2006) afirma que as graduações mais “finas” de concreto asfáltico podem gerar misturas com macrotextura superficial fechada (Figura 2.20-a). As graduações com maior diâmetro máximo de agregados e maior quantidade de agregados graúdos, com curva mais “aberta”, tendem a fornecer melhores macrotexturas (Figura 2.20-b).

- Graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho e com insuficiência de material fino (menor que 0,075 mm) para preencher os vazios entre as partículas maiores, proporcionando um esqueleto mineral com muitos vazios interconectados (drenante) e possibilitando a percolação de água no seu interior.

Um exemplo de mistura de graduação aberta é a camada porosa de atrito (CPA) que possui normalmente entre 18 e 25% de vazios com ar (DNER-ES 386/99). O CPA possui finalidade de caráter funcional, que é proporcionar um aumento de aderência

entre o pneu e o pavimento em dias de chuva, através da coleta da água de chuva para o seu interior, promovendo uma rápida percolação devido à sua elevada permeabilidade.

A Figura 3.3 ilustra um corpo-de-prova extraído de revestimento asfáltico tipo CPA, apresentando uma superfície aberta com uma grande quantidade de vazios interligados.



Figura 3.3 - Corpo de prova extraído de revestimento tipo CPA – graduação aberta (arquivo próprio)

As Figuras 3.4 e 3.5 demonstram a CPA executada em 2003 no Aeroporto Santos Dumont no Rio de Janeiro e a realização do ensaio de permeabilidade, respectivamente. A Figura 3.6 ilustra a textura superficial de uma CPA.



Figura 3.4 - Camada Porosa de Atrito executada no Aeroporto Santos Dumont - RJ (BERNUCCI et al, 2008)



Figura 3.5 - Execução de Ensaio de Permeabilidade no Aeroporto Santos Dumont - RJ (BERNUCCI et al, 2008)



Figura 3.6 - Textura Superficial de uma Camada Porosa de Atrito (arquivo próprio)

De acordo com Silva (2005), pavimentos asfálticos de graduação aberta demonstram eficácia nos dias chuvosos. As águas precipitadas se infiltram na camada superficial porosa e os pneus dos veículos, independente do seu estado, tocam na superfície do pavimento, diminuindo ou eliminando o efeito da hidroplanagem, aumentando a segurança e reduzindo o número de acidentes.

- Graduação descontínua: curva granulométrica com predomínio de grãos de maiores dimensões, proporcionalmente, em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a se obter uma curva descontínua

em determinadas peneiras. O objetivo é tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente através da elevação do contato entre os agregados graúdos.

Um exemplo de graduação descontínua é a matriz pétrea asfáltica, mais conhecida como *Stone Matrix Asphalt* (SMA). Silva (2005) define o SMA como um revestimento asfáltico a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão e a resistência à ação do tráfego. A mistura se caracteriza por conter uma elevada quantidade de agregados graúdos (em torno de 70 % a 80 % maiores que 4,75 mm) e devido a esta particular graduação, forma-se um maior volume de vazios entre os agregados graúdos, que são preenchidos por uma argamassa composta da mistura da fração areia, filer, ligante asfáltico e fibras, fazendo com que a mistura apresente baixo índice de vazios, conforme ilustrado na Figura 3.7.

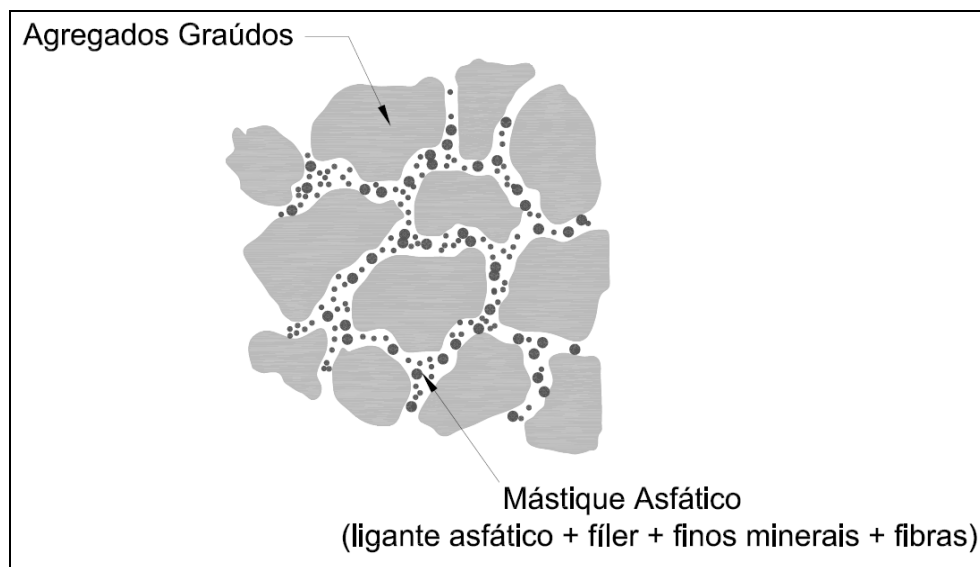


Figura 3.7 - Composição Esquemática da Mistura SMA

O SMA promove uma mistura em geral com boa macrotextura superficial decorrente da elevada quantidade de agregados graúdos (APS, 2006). A Figura 3.8 mostra um aspecto da graduação peculiar do SMA.



Figura 3.8 - Aspecto de uma camada de SMA (arquivo próprio)

Outro exemplo de graduação descontínua, mais recentemente introduzida no Brasil, é a graduação com intervalo (*gap*) – descontínua densa, conhecida por *gap-graded*, que é uma faixa granulométrica especial que resulta em macrotextura superficial aberta ou rugosa, mas não em teor de vazios elevado. A Figura 3.9 ilustra a textura do *gap-graded*.



Figura 3.9 - *Gap-graded* (arquivo próprio)

A Figura 3.10 mostra exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas a quente: Concreto Asfáltico (densa), CPA (aberta) e SMA (descontínua).

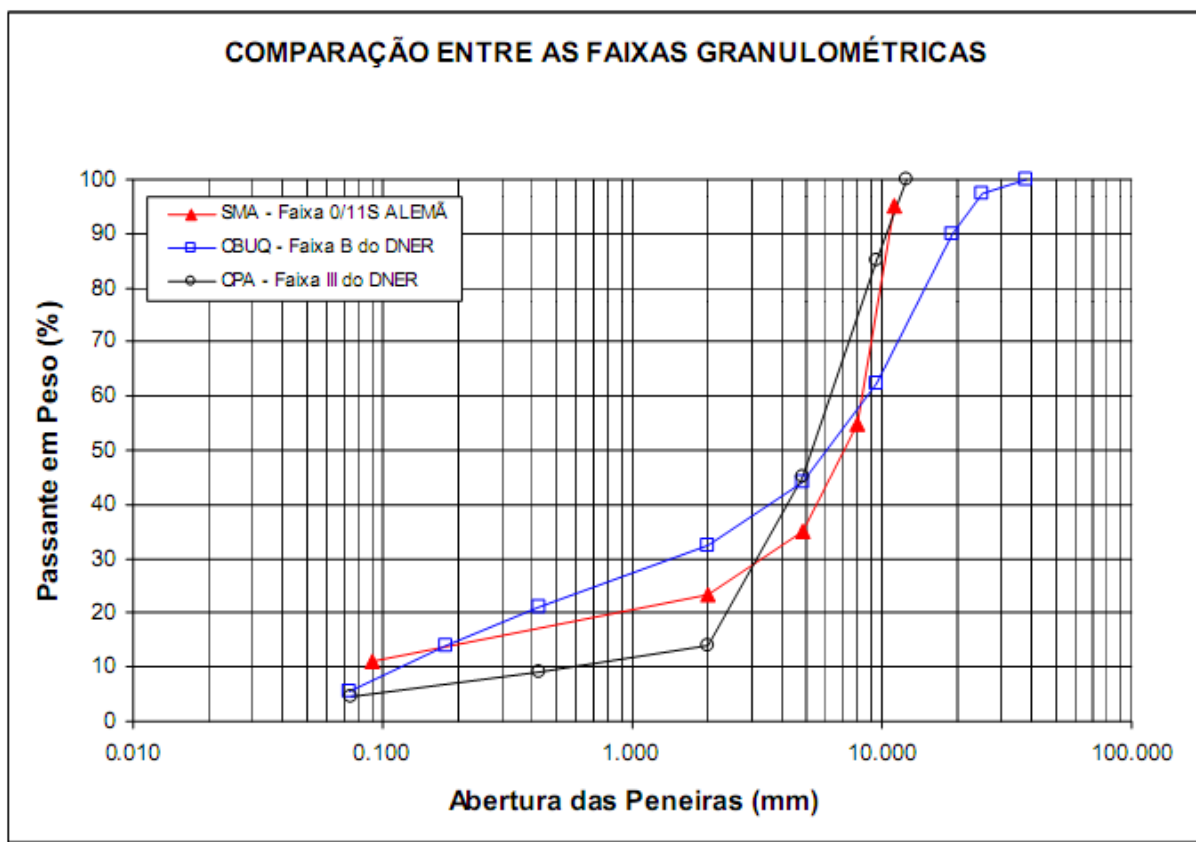


Figura 3.10 - Exemplos de curvas granulométricas das misturas asfálticas SMA, CBUQ e CPA (MOURÃO, 2003)

De acordo com a FAA (1997), um método utilizado para melhorar a resistência à derrapagem e mitigar a hidroplanagem do pavimento de pistas aeroportuárias é a aplicação de uma fina camada de concreto asfáltico na superfície do pavimento existente que varia de 25 mm a 40 mm de espessura, caracterizado por sua matriz de graduação aberta, chamada *Porous Friction Course* (PFC). Pesquisas conduzidas pelo Reino Unido e pelos Estados Unidos determinaram que o PFC pode alcançar elevado nível de atrito em pavimentos molhados. Estudos da FAA *Technical Center* demonstraram que um elevado nível de atrito pode ser mantido em camadas de PFC para todo o comprimento da pista.

O PFC tem uma textura de superfície áspera e é suficientemente poroso para permitir a drenagem da água internamente, ou seja, que a água de chuva penetre pelo curso e escoe transversalmente para o lado de fora da pista, prevenindo a formação de água na superfície e criando um pavimento relativamente seco em condições chuvosas. Uma combinação de alívio de pressão da água através dos vazios internos e de superfície e da textura rugosa promove o contato do pneu-agregado.

Segundo a FAA (1997), tem sido verificado que uma maior vida útil, bem como, uma melhor aderência, podem ser obtidas através da adição de partículas de borracha durante a usinagem da mistura. A Figura 3.11 ilustra uma vista lateral de uma típica camada de PFC.



Figura 3.11 - Camada de *Porous Friction Course* – PFC (FAA, 1997)

A FAA recomenda que não seja construída camada de PFC em pistas aeroportuárias que possuam elevado tráfego de operações de aeronaves (mais de 91 chegadas de turbojato por dia), pois caso não haja monitoramento, o acúmulo de borracha pode se tornar um problema grave. Se os depósitos de borracha não forem removidos antes de cobrirem completamente a superfície do pavimento e conectarem-se a espaços vazios na matriz da camada, a água não pode ser drenada internamente através de sua estrutura. Quando ocorre essa condição, é impossível remover os depósitos de borracha sem causar danos graves à integridade estrutural da camada.

Outro método que melhora a resistência a derrapagem é o *Open Graded Friction Course* (OGFC), o qual é similar ao PFC. Merighi et al (2006) relatam o OGFC como uma mistura asfáltica de elevado índice de vazios interconectados (variando de 15% a 25%), o que o torna poroso e com elevada permeabilidade. O excesso de água superficial pode ser drenado para a sua parte inferior e posteriormente removido através de uma camada impermeável logo abaixo, reduzindo o potencial de hidroplanagem das aeronaves. Segundo Robinson (2005), o OGFC tem sido utilizado nos Estados Unidos desde 1950 com o objetivo de melhorar a operacionalidade das superfícies de pavimento de asfalto.

As limitações do OGFC, de acordo com a *Federal Highway Administration* - FHWA (1990) são: exigência de técnicas especiais de reabilitação e remendos; aumento do potencial de remoção de superfície; requisição de métodos especiais de controle de neve e gelo; não agrega valor estrutural ao pavimento (seu desempenho é regido pela condição do pavimento subjacente); e pode desagregar e escorregar quando usado em locais com fortes movimentos de giro, terminais de rampa e outros locais com geometrias adversas.

Por fim, o FAA (1997) relata que estudos baseados no desempenho de superfícies de pavimentos em concreto asfáltico quanto à resistência a derrapagem apontaram para um tipo de revestimento que melhora temporariamente a textura da superfície de pavimento: a capa selante.

O Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo - DER/SP (2006) descreve a capa selante como uma camada de revestimento do pavimento executado por penetração invertida, constituída de uma aplicação de ligante asfáltico, coberta por uma camada de agregado mineral miúdo e submetida à compactação.

O principal objetivo de sua execução é o aumento das condições de impermeabilização, a diminuição da rugosidade e a recuperação de superfícies desgastadas pela exposição à ação do tráfego. Sua aplicação pode ser sobre revestimentos asfálticos recém-construídos do tipos tratamento superficial duplo e triplo, macadames asfálticos, pré-misturados abertos e de misturas asfálticas densas ou desgastadas superficialmente pela exposição a ação do tráfego e das intempéries.

Os materiais constituintes da capa selante são os agregados minerais miúdos e emulsões asfálticas catiônicas de ruptura rápida ou emulsões asfálticas modificadas por polímeros.

A adição de borracha na capa selante prolonga sua vida e proporciona uma melhor adesão à superfície do pavimento existente. A FAA (1997) recomenda a utilização de um método de adição de asfalto na superfície da capa selante, chamado *fog seal* que ajuda a minimizar perdas de agregado, prevenindo danos a aeronave.

3.1.2 Misturas Asfálticas Usinadas *in Situ*

As misturas asfálticas usinadas *in situ* se processam em usinas móveis especiais que promovem a mistura entre ligante e agregado imediatamente antes da aplicação no pavimento, sendo utilizadas principalmente para a selagem e restauração de algumas características funcionais. Essas misturas são relativamente fluidas, confeccionadas e aplicadas à temperatura ambiente, tal como a lama asfáltica e o micro revestimento.

Define-se lama asfáltica como “uma associação, em consistência fluida, de agregados minerais, material de enchimento ou fíler, emulsão asfáltica e água, uniformemente misturadas e espalhadas no local da obra, à temperatura ambiente” (BERNUCCI et al, 2008, p.185).

A principal utilização da lama asfáltica é na manutenção de pavimentos, sendo utilizada como agente impermeabilizante e rejuvenescedor da condição funcional de revestimentos com desgaste superficial e pequeno grau de trincamento. Em granulometria mais grossa, também é empregada para repor a condição de atrito e resistência à aquaplanagem da superfície do pavimento e como capa selante aplicada sobre tratamentos superficiais envelhecidos.

Conforme descrito pela FAA (1997), diversos estudos realizados com base no comportamento da resistência a derrapagem da superfície do pavimento conduziram para a lama asfáltica como um notável tratamento de superfície que melhora a textura da superfície do

pavimento asfáltico.

A lama asfáltica, graduação tipo II ou tipo III, pode proporcionar uma melhoria temporária da resistência à derrapagem para superfícies de pavimento, sendo recomendada pela FAA (1997) apenas como uma medida provisória até a sobreposição de outra camada de revestimento. A Figura 3.12 ilustra um pavimento com revestimento em lama asfáltica.



Figura 3.12 - Lama Asfáltica (arquivo próprio)

Micro revestimento asfáltico a frio consiste “na associação de agregado, material de enchimento (filler), emulsão asfáltica modificada por polímero do tipo SBS, água, aditivos se necessários, com consistência fluida, uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada” (DNIT, 2005).

Vale (2003) definiu o micro revestimento asfáltico a frio basicamente como um tipo de lama asfáltica com ligante asfáltico modificado por polímero e agregado de boa qualidade estrutural. Devido à grande estabilidade da mistura, o micro revestimento pode ser aplicado com espessuras maiores que da lama asfáltica, em camadas relativamente espessas.

Smith e Beatty (1999) descreveram a aplicação do micro revestimento, de forma geral, como camada de selagem de superfície que estabelece resistência à derrapagem adequada; preenchimento de trilhas de roda e pequenas depressões em pavimentos de concreto; redução do

desgaste e do polimento em pavimentos asfálticos e de superfícies de pontes ou viadutos.

Na Europa e nos Estados Unidos, o micro revestimento asfáltico é utilizado principalmente para a impermeabilização e selagem de trincas, texturização da superfície e preenchimento de trilhas de roda de pavimentos flexíveis (VALE, 2003).

No Brasil, o micro revestimento asfáltico tem sido utilizado, segundo DNIT (2005), como camada selante, impermeabilizante, regularizadora e rejuvenescedora ou como camada antiderrapante de pavimentos. A Figura 3.13 ilustra o aspecto superficial de um micro revestimento asfáltico.



Figura 3.13 - Micro Revestimento Asfáltico (arquivo próprio)

3.2 Grooving

O *grooving* foi o primeiro passo principal na execução de uma superfície de pavimento mais segura para operações de aeronaves em condições de chuva. A técnica do *grooving*, desenvolvida por Yager no ano de 1962, consiste de ranhuras transversais aplicadas nos pavimentos das pistas por meio da serragem com discos diamantados. Nos anos seguintes essa

técnica foi desenvolvida através de pesquisas, obtendo-se em 1966 uma configuração geométrica mais eficaz (Rodrigues Filho, 2006).

Estes estudos foram concluídos pela NASA no Centro de Pesquisa de Langley, na Virginia, em 1968. A FAA, através do seu Centro Técnico, em Atlantic City, New Jersey, dirigiu um programa de teste em tratamentos de superfícies do pavimento no *Naval Air Engineering Center*, em New Jersey, sendo o mesmo concluído em 1983. Ambos os estudos mostraram que um elevado nível de atrito pode ser alcançado em pavimentos molhados, através do *grooving*, que permite que a água da chuva escape para debaixo dos pneus das aeronaves na aterrissagem.

Portanto o *grooving* é uma técnica comprovada e eficaz para proporcionar resistência à derrapagem e prevenção de hidroplanagem em tempo chuvoso. A FAA (1997) considera a execução de *grooving* trabalho de segurança de alta prioridade para as pistas que servem aeronaves turbo. Para outras pistas, a determinação da necessidade de *grooving* leva em consideração fatores como: histórico dos acidentes de aviões e incidentes relacionados com a hidroplanagem no aeroporto; frequência de pista molhada (análise das taxas de precipitação pluviométrica e intensidade); inclinação transversal e longitudinal da pista ou qualquer anormalidade na superfície que possa impedir o escoamento da água; qualidade da textura de superfície; limitações de drenagem; comprimento das pistas disponíveis; efeitos de vento lateral, no caso particular de comprometimento do atrito de superfície; condição geral da pista.

Pavimentos existentes podem ter superfícies que não são adequadas para a execução de *grooving*, sendo indispensável uma vistoria para determinar se uma sobreposição ou reabilitação da superfície do pavimento é necessária antes da execução do mesmo. Essa análise inclui a verificação da condição funcional (defeitos na superfície) e estrutural do pavimento. Adicionalmente devem ser tomadas amostras de concreto asfáltico para determinar sua estabilidade em conformidade com a *American Society of Testing And Materials* - ASTM. Se a avaliação demonstrar que o pavimento existente não é adequado, o *grooving* não deve ser executado antes de uma sobreposição flexível ou rígida.

A execução de *grooving* em pavimentos existentes, tanto em concreto asfáltico como em *Portland Cement Concrete* – PCC, deve ser realizada através de serragem de ranhuras

transversais na superfície do revestimento. Em pavimentos em concreto asfáltico o *grooving* não deve ser iniciado até que concreto asfáltico seja suficientemente curado (normalmente 30 dias) para evitar o deslocamento do agregado. A Figura 3.14 mostra uma superfície de pavimento em concreto asfáltico com *grooving*.



Figura 3.14 - Concreto asfáltico com *grooving* na superfície (arquivo próprio)

De acordo com o FAA (1997), o *grooving* deve ser contínuo em todo o comprimento da pista e transversal ao sentido de pouso e decolagem, com seguintes as dimensões: 6 mm ($\pm 1,6$ mm) de profundidade por 6 mm (+1,6 mm, - 0 mm) de largura por 38 mm (- 3 mm, + 0 mm) para o espaçamento de centro a centro, conforme ilustrado na Figura 3.15. A profundidade de 60% ou mais dos sulcos não deve ser inferior a 6 mm.

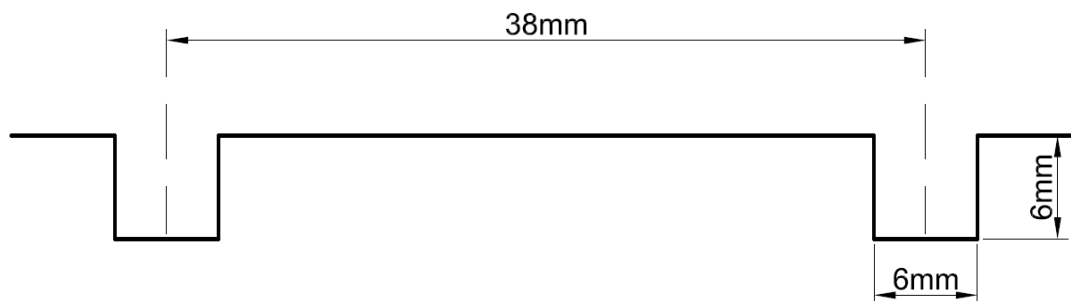


Figura 3.15 - Características geométricas do *grooving*

Em pistas molhadas, as áreas pintadas na superfície do pavimento, em todos os tipos de revestimentos aeroportuários, podem ser muito escorregadias, sendo de extrema importância a

manutenção das propriedades de resistência à derrapagem de superfícies pintadas similares às propriedades de superfícies não pintadas. O FAA (1997) descreve que normalmente isto pode ser realizado acrescentando-se uma pequena quantia de areia silicosa à mistura de pintura de forma a aumentar as propriedades de atrito da superfície pintada.

4 ADERÊNCIA PNEU-PAVIMENTO

4.1 Fatores que afetam a aderência pneu/pavimento

O atrito do pavimento é a força que resiste ao movimento relativo entre o pneu de um veículo e uma superfície de pavimento. De acordo com Hall et al (2009), o atrito do pavimento é o resultado de uma interação complexa entre dois principais componentes da força de atrito: aderência e histerese (Figura 4.1).

A aderência é o atrito que resulta do contato da borracha do pneu do veículo e a superfície do pavimento, em função da resistência ao cisalhamento da interface e da área de contato. O componente de histerese da força de atrito resulta da perda de energia devido à deformação do pneu do veículo ao redor da textura. Quando um pneu se comprime contra a superfície do pavimento, a distribuição da tensão faz com que a energia de deformação seja armazenada dentro da borracha. À medida que o pneu relaxa, parte da energia armazenada é recuperada, enquanto a outra parte é perdida na forma de calor (histerese). Essa perda causa uma força resultante de atrito que ajuda a cessar o movimento.

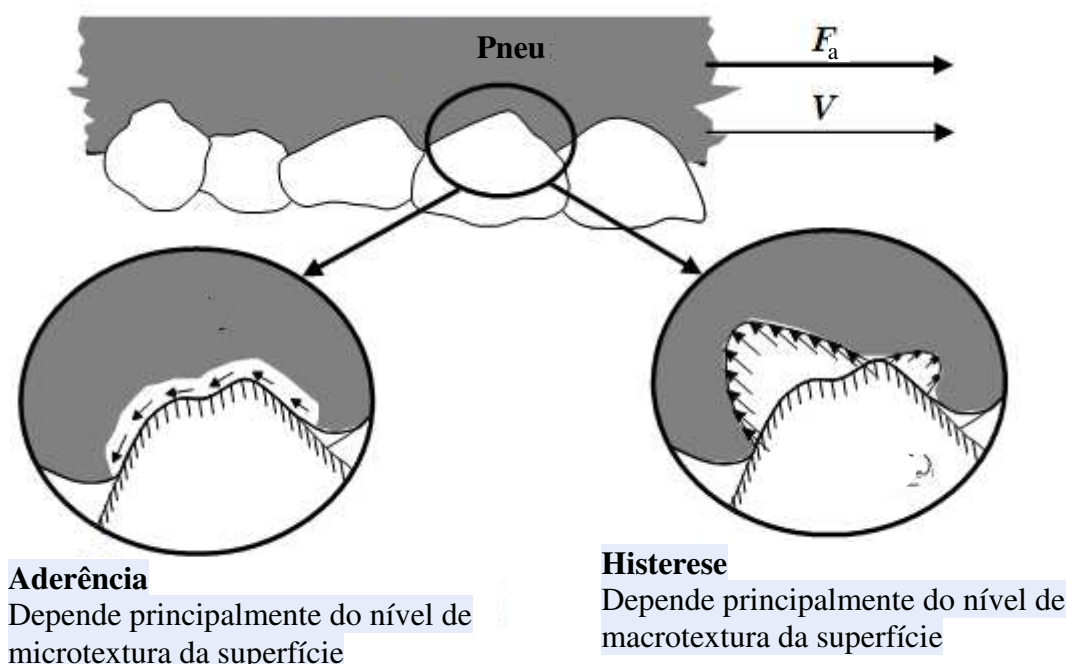


Figura 4.1 - Mecanismos chave de atrito pneu-pavimento (adaptado de HALL et al, 2009)

Existem outros elementos de atrito do pavimento, contudo quando comparados com os componentes da adesão e da histerese, se tornam insignificantes. Assim, o atrito pode ser visto como a soma das componentes de adesão e histerese.

Ambos os componentes dependem das características da superfície do pavimento, do contato entre o pneu e o pavimento e das propriedades do pneu. Além disso, como a borracha do pneu é um material visco-elástico, a temperatura e a velocidade de deslizamento afetam os referidos componentes.

A aderência é desenvolvida na interface pneu-pavimento, sendo mais sensível às asperezas da microtextura das partículas do agregado contidas na superfície do pavimento. Em contrapartida, a força de histerese desenvolvida dentro do pneu é mais sensível às asperezas da macrotextura formada na superfície do pavimento em função do projeto de mistura e/ou técnicas de execução. Portanto, segundo Hall et al (2009), a adesão rege o atrito global em pavimentos de textura fina e seca, enquanto a histerese é o componente dominante em pavimentos molhados e com textura áspera.

Entre os diversos parâmetros necessários para definir as características superficiais de um pavimento, do ponto de vista da segurança, a aderência pneu-pavimento é a mais importante. De acordo com estatísticas realizadas em vários países, a falta de aderência é responsável por um elevado percentual de acidentes ocorridos, o que torna de extrema importância a avaliação do atrito no monitoramento e manutenção de pavimentos (GEOTECNIA Y CIMENTOS, S.A – GEOCISA, s/d).

De acordo com o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER (1998) os principais fatores que afetam a aderência dos pavimentos são:

- Espessura da lâmina d'água (principal causa da falta de aderência): para que haja uma aderência elevada é fundamental a eliminação da água que se encontra na área de contato pneu-pavimento através do sulco da banda de rodagem do pneu ou pelo próprio revestimento.
- Pneumático: a aderência de um pavimento seco depende principalmente da área de contato pneu-pavimento, sendo máxima, nesse caso, em um revestimento com rugosidade muito fina e pneu completamente liso. Já em pavimentos molhados, a zona de contato deve ser a maior possível, cabendo ao pneu e ao revestimento garantir a evacuação da água. Nesse caso a aderência do pneu sulcado é superior a de um pneu liso.
- Revestimento: as características do revestimento que afetam a aderência são a macrotextura e microtextura.
- Velocidade: sobre revestimentos secos e limpos a velocidade tem pouca influência no coeficiente de atrito. Em pavimentos molhados geralmente há um decréscimo acentuado no coeficiente de atrito com a velocidade.
- Deslizamento da roda: em função da velocidade angular da roda. O aumento da aderência pelos dispositivos antiblocantes é importante, o que justifica os esforços dos fabricantes de veículos para que a roda permaneça dentro da faixa mais favorável de deslizamento.

- Fatores externos: poeira, manchas de óleo, barro, areia, folhas secas depositadas sobre o pavimento.

Hall et al (2009) agrupam os fatores que influenciam as forças de atrito do pavimento em quatro categorias: características da superfície do pavimento, parâmetros operacionais do veículo, propriedades dos pneus e fatores ambientais. Cada categoria é composta de diversos fatores, que desempenham individualmente um papel na definição de atrito do pavimento.

O atrito deve ser visto como um processo e não como uma propriedade inerente do pavimento, pois somente quando todos esses fatores são totalmente especificados, o atrito tem um valor definido. Os fatores mais críticos, de acordo com Hall et al (2009) são destacados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Fatores que afetam o atrito disponível no pavimento (adaptado de HALL et al, 2009)

Características de Superfície do Pavimento	Parâmetros de Operação do Veículo	Propriedades do Pneu	Ambiente
• Microtextura • Macrotextura • Megatextura / desigualdade • Propriedades dos materiais • Temperatura	• Velocidade de deslizamento - Velocidade do veículo - Ação de frenagem • Manobra de condução - Giro - Ultrapassagem	• Marca deixada pelo pneu • Desenho da banda de rodagem • Dureza e composição da borracha • Pressão de inflação • Carga • Temperatura	• Clima - Vento - Temperatura - Água - Neve e Gelo • Contaminantes - Material antiderrapante (sal, areia) - Sujeira, lama, detritos

No que tange aos aspectos ambientais, segundo Wilken (1978), as principais variáveis que interferem no escoamento superficial da água são a declividade do curso d'água, afetando diretamente a velocidade de escoamento superficial da água; a rugosidade da superfície de escoamento e a permeabilidade do terreno.

De acordo com a Prefeitura do Município de São Paulo (1999), o volume do escoamento superficial direto é primordialmente determinado pela quantidade de água precipitada, características de infiltração do solo, chuva antecedente, tipo de cobertura vegetal, superfície impermeável e retenção superficial. Já o tempo de trânsito das águas é função da declividade, rugosidade superficial, comprimento de percurso e profundidade d'água do canal.

O escoamento superficial de uma pista aeroportuária pode ser influenciado por diversas variáveis, dentre elas a rugosidade superficial do pavimento (macrotextura), características de permeabilidade do pavimento e a declividade da pista.

4.2 Características de Superfície

Há tempos tem-se reconhecido que as características de textura da superfície do pavimento influenciam diretamente nas forças de atrito que o pneu pode desenvolver para a aceleração, direção e frenagem dos veículos.

A textura da superfície do pavimento é definida por Hall et al (2009) como os desvios da superfície do pavimento em relação a uma superfície plana. Estes desvios ocorrem em três níveis distintos de escala, definidos pelo comprimento de onda (λ) e pela amplitude pico a pico (A) dos seus componentes. Os três níveis de textura estabelecidos pela *Permanent International Association of Road Congresses* (PIARC), realizado em Bruxelas no ano de 1987, são os seguintes:

- Microtextura: $\lambda < 0,5$ mm e $A = 1$ a 500 μ m. A qualidade da rugosidade da superfície (que é a nível microscópico) se dá em função das propriedades da superfície das partículas do agregado contidas no pavimento asfáltico ou de concreto.
- Macrotextura: $\lambda = 0,5$ a 50 mm e $A = 0,1$ a 20 mm. A qualidade da rugosidade da superfície é definida pelas propriedades da mistura (forma, tamanho e graduação dos agregados) do pavimento asfáltico e do método de acabamento/texturização usado em

superfícies de pavimento de concreto.

- Megatextura: $\lambda = 50$ a 500 mm e $A = 0,1$ a 50 mm. Textura com comprimentos de onda na mesma ordem de grandeza da interface pneu-pavimento, sendo em grande parte definida por defeitos ou ondulações na superfície do pavimento.

O *National Cooperative Highway Research Program* – NCHRP (2000) define os comprimentos de onda maiores que o limite superior da megatextura (20 polegadas ou 500 mm) como rugosidade ou irregularidade.

A Figura 4.2 ilustra as três faixas de textura, bem como um quarto nível de rugosidade/irregularidade representado por comprimentos de onda mais longos do que o limite superior da megatextura (20 polegadas ou 500 mm).

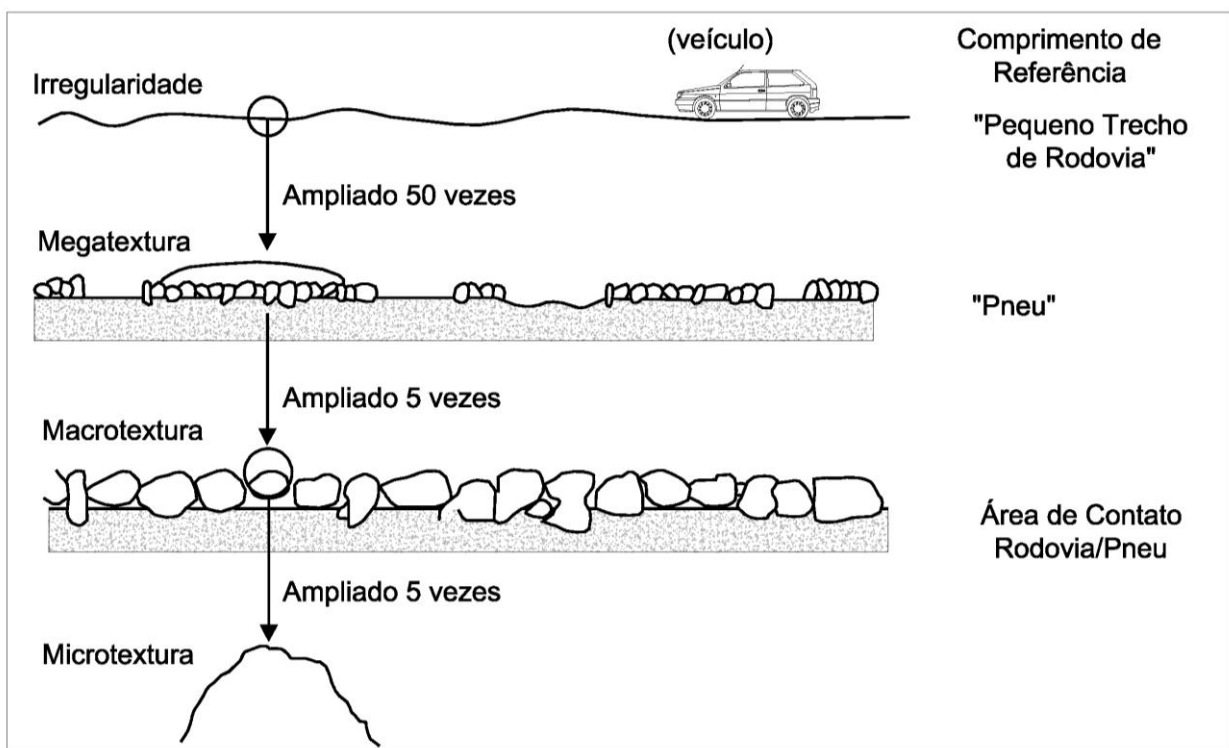


Figura 4.2 - Faixas de textura existentes para uma dada superfície do pavimento (adaptado de SANDBERG, 1998)

Os dois níveis de textura identificados pelo NCHRP (2000) que afetam predominantemente o atrito são a microtextura e a macrotextura. Ambos mantidos a níveis elevados proporcionam resistência a derrapagem em pavimentos molhados.

Segundo Merighi et al (2006), a macrotextura está relacionada com a rugosidade superficial do pavimento, associada às agregações pétreas presentes na superfície, ou seja, é o grau de rugosidade transmitido pelos desvios entre as partículas, podendo ser classificada em aberta (ou grosseira) e fechada (ou fina). A microtextura se deve a aspereza dos agregados pétreos individuais, ou seja, é o grau de rugosidade transmitida por cada partícula do agregado e pode ser classificada por rugosa ou polida (lisa). A superfície resultante depende, portanto, das características conjuntas da macro e microtextura. A Figura 4.3 ilustra a diferença entre a macrotextura e a microtextura.

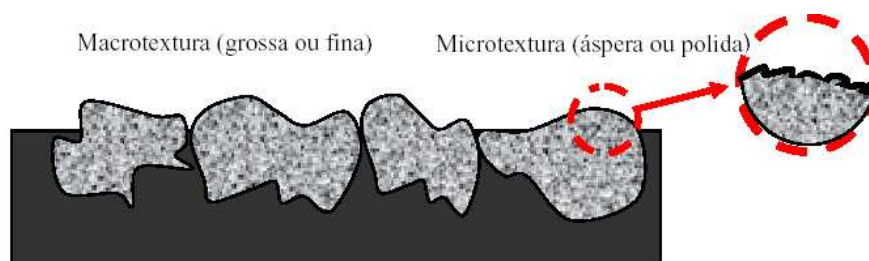


Figura 4.3 - Diferença entre microtextura e macrotextura (MERIGHI et al, 2006)

A Figura 4.4 ilustra a influência das faixas de comprimentos de onda da textura do pavimento em diversas interações do veículo-pavimento, em que se observa que o atrito é afetado principalmente pela macrotextura e pela microtextura.

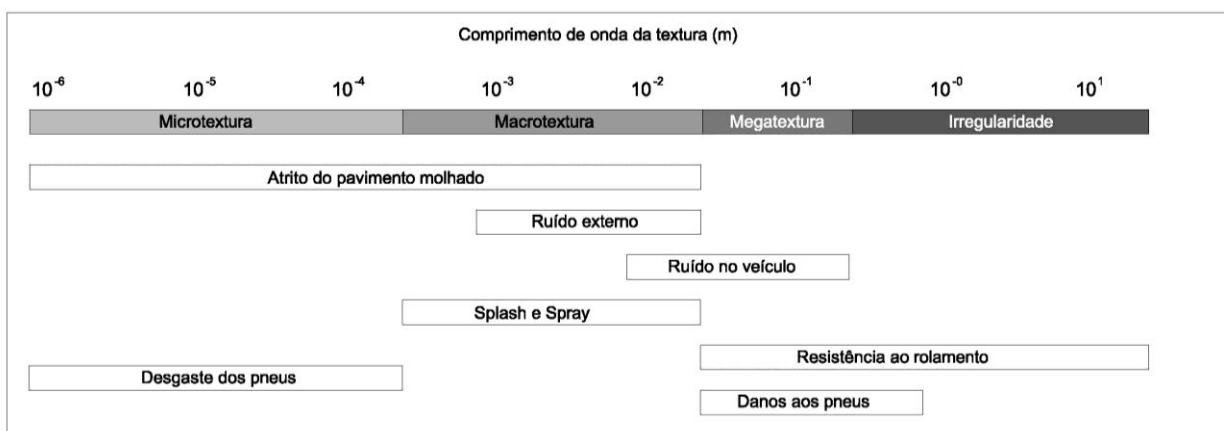


Figura 4.4 - Influência do comprimento de onda da textura nas características de superfície (adaptado de NCHRP, 2000)

A influência relativa que a microtextura, a macrotextura e a velocidade exercem no atrito do pavimento é demonstrada na Figura 4.5, onde Hall et al (2009) observaram que a microtextura influencia a magnitude do atrito dos pneus, enquanto que a macrotextura impacta no gradiente atrito-velocidade.

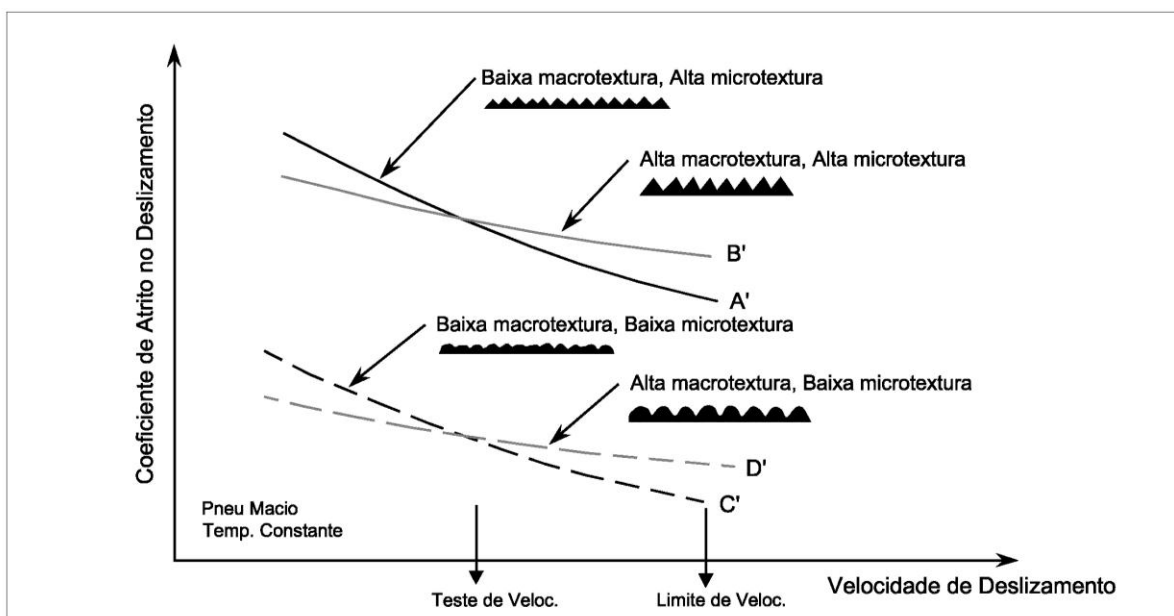


Figura 4.5 - Efeito da macrotextura e da microtextura na aderência pneu-pavimento em diferentes velocidades de deslizamento (adaptado de FLINTSCH et al, 2002 apud HALL et al, 2009)

Em pavimentos molhados o coeficiente de atrito diminui com o aumento da velocidade, ou seja, a resistência à derrapagem diminui à medida que a velocidade do pneu em relação à superfície do pavimento aumenta (NCHRP, 2000).

A microtextura é essencialmente responsável pelo atrito do pavimento em baixas velocidades, enquanto que em velocidades mais altas, uma elevada macrotextura facilita a drenagem da água de modo que a componente aderência do atrito proporcionada pela microtextura é restabelecida por estar acima da água.

De acordo com a FAA (1997), a microtextura e a macrotextura provê propriedades de atrito para aeronave que opera a baixas e altas velocidades, respectivamente. Em conjunto eles provêem adequadas propriedades de atrito para aeronave a uma gama de velocidades ao longo da sua aterrisagem/decolagem.

A macrotextura, segundo Hall et al (2009), é o principal responsável por reduzir o potencial de separação entre o pneu e a superfície do pavimento devido à hidroplanagem e por induzir o atrito causado pela histerese para os veículos em alta velocidade. A histerese aumenta exponencialmente com a velocidade, e em velocidades acima de 105 km/h representa mais de 95% do atrito (PIARC, 1987).

Os fatores que afetam a textura da superfície do pavimento, enumerados por Hall et al (2009) são os seguintes:

- Dimensões máximas do agregado;
- Tipo do agregado graúdo;
- Tipo do agregado miúdo;
- Viscosidade e conteúdo do material betuminoso;
- Graduação da mistura;
- Vazios da mistura;

- Espessura da camada;
- Dimensões e espaçamento da textura;
- Orientação da textura;
- Assimetria da textura.

A influência desses fatores na macrotextura e na microtextura para cada tipo de superfície de pavimento é indicada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Fatores que afetam a macrotextura e a microtextura (adaptado de Hall et al, 2009)

Tipo de Superfície do Pavimento	Fator	Microtextura	Macrotextura
Asfáltica	Dimensão máxima do agregado		X
	Tipo de agregado graúdo	X	X
	Tipos de agregado miúdo		X
	Graduação da mistura		X
	Vazios da mistura		X
	Ligante da mistura		X
Concreto	Tipo de agregado graúdo	X (para agregado exposto PCC)	X (para agregado exposto PCC)
	Tipos de agregado miúdo	X	
	Graduação da mistura		X (para agregado exposto PCC)
	Dimensão e espaçamento da textura		X
	Orientação da textura		X
	Assimetria da textura		X

Fernandes (1998) apresenta diversos fatores que contribuem para a evolução da macrotextura:

- O desgaste do agregado que aplaina sua superfície, de forma que a macrotextura tende a diminuir;
- A ruptura do agregado e a avulsão das partes faturadas do agregado que causa a redução da área de contato e, conseqüentemente, o aumento da macrotextura;
- A densificação do revestimento, que tende a nivelar o agregado graúdo com o restante do material mais fino na sua vizinhança, acarretando na redução da macrotextura;
- A desagregação que pode ocorrer em casos de falta de ligante na mistura do concreto asfáltico;
- A recompactação em função da ação do tráfego, tendendo a modificar o arranjo dos agregados da superfície.

Aps (2006) afirma que a microtextura depende basicamente da aspereza dos agregados da superfície, enquanto que a macrotextura depende essencialmente da graduação da mistura utilizada na camada de rolamento. A superfície resultante depende, portanto, das características conjuntas da macro e microtextura.

Em seu estudo, Aps (2006) classificou as combinações entre a macrotextura e a microtextura em quatro tipos de textura:

- Rugosa e aberta;
- Rugosa e fechada;
- Polida e aberta;
- Polida e fechada.

A Figura 4.6 apresentada a seguir, resume as classes de textura em questão.

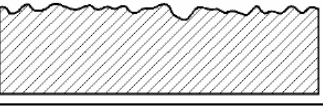
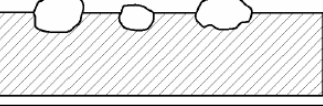
Microtextura	Macrotextura	Superfície	Tipo de Textura
Rugosa	Aberta		Rugosa e Aberta
	Fechada		Rugosa e Fechada
Polido ou Lisa	Aberta		Polida e Aberta
	Fechada		Polida e Fechada

Figura 4.6 - Tipo de superfície em função da classe de macrotextura e microtextura (APS, 2006)

Para se obter uma boa aderência entre o pneu e o pavimento, principalmente quando houver a presença de água, a camada de rolamento do pavimento deve apresentar textura que proporcione adequado potencial de drenagem, ou seja, uma macrotextura capaz de eliminar a água pelos seus micros canais, bem como conter em sua composição agregados que apresentem rugosidade suficiente para romper a lâmina de água residual (boa microtextura).

Portanto, conforme estudado por Aps (2006), o ideal é que a camada de rolamento apresente textura rugosa e aberta, admitindo-se dependendo da situação, textura rugosa e fechada ou polida e aberta e, devendo ser evitada condição de textura polida e fechada.

4.3 Medidas de Textura

Nas últimas décadas a medição da textura do pavimento tem sido de fundamental importância para as questões de segurança. Diversos tipos de equipamentos e técnicas de avaliação têm sido desenvolvidos e utilizados para medir esta propriedade do pavimento. As diferenças entre os equipamentos em termos de princípios e procedimentos de medição e do

modo como os dados de medição são processados e relatados podem ser significativas. O presente trabalho abordará apenas as técnicas para medição da macrotextura.

Aps (2006) divide a avaliação da macrotextura em três tipos de métodos:

- Método volumétrico conhecido como Mancha de Areia (MTD – *Mean Textute Depth* ou profundidade média de textura);
- Perfilômetros (RMS – *Root Mean Square of Texture Profile* ou raiz média quadrática do perfil da textura);
- Drenômetros (tal como o *outflow meter*).

4.3.1 Método Volumétrico - Mancha de Areia

A forma mais utilizada de medição da macrotextura é por meio do ensaio de Mancha de Areia que há muitos anos vem sendo utilizado para determinar a profundidade média da macrotextura da superfície da camada de desgaste, podendo ser aplicado a qualquer tipo de pavimento.

O ensaio de mancha de areia consiste no espalhamento, sobre uma área circular da superfície do pavimento, de um volume conhecido (25.000 mm^3) de areia natural limpa e seca, uniforme, de grãos arredondados, que passa na peneira com abertura de 0,3 mm e fica retida na peneira com abertura de 0,15 mm, ou de microesferas de vidro que apresentam as mesmas características granulométricas da areia. Este espalhamento é realizado por uma sapata circular padronizada, até o preenchimento total das rugosidades do revestimento, medindo-se o diâmetro da mancha de areia em quatro direções. De acordo com ASTM (1996), a medição do diâmetro médio desse círculo permite determinar a profundidade média de textura, conhecida como *Mean Texture Depth* (MTD), ou como é mais conhecida no Brasil, profundidade média de areia (HS), proporcionando uma medida de macrotextura da superfície. A profundidade média de areia é

obtida através da equação 4.1.

$$MTD = \frac{4v}{\pi D^2} \quad (4.1)$$

Onde:

MTD – Profundidade média de textura, em mm;

v – Volume da amostra de material, em mm³;

D – Diâmetro médio da área coberta pelo material, em mm.

A Figura 4.7, apresentada a seguir, ilustra a sequência executiva do ensaio de mancha de areia.

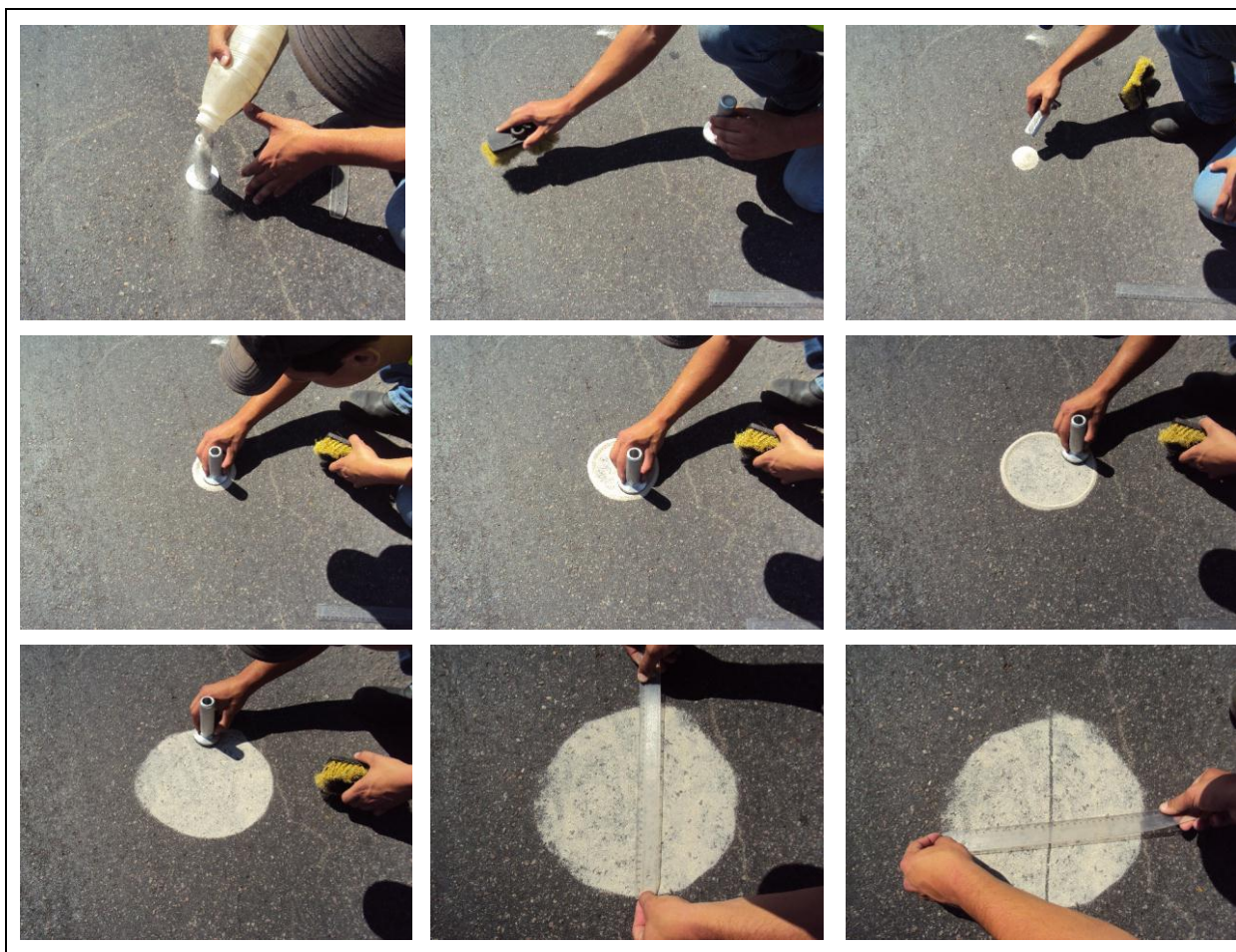


Figura 4.7 - Sequência executiva da técnica da mancha de areia utilizando areia normalizada (arquivo próprio)

De acordo com DNIT (2006), os conceitos de macrotextura podem ser definidos a partir da profundidade média de areia, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Avaliação da macrotextura / Método da altura da areia (DNIT, 2006)

Profundidade Média de Areia - HS (mm)	Classe da Pista
HS < 0,20 mm	Muito Fina ou Muito Fechada
0,20 mm < HS < 0,40 mm	Fina ou Fechada
0,40 mm < HS < 0,80 mm	Média
0,80 mm < HS < 1,20 mm	Grosseira ou Aberta
HS > 1,20 mm	Muito Grosseira ou Muito Aberta

Os valores de textura superficial recomendáveis pelo DNIT são entre 0,60 e 1,20 mm, caracterizando uma textura superficial média à grosseira.

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

A periodicidade das medições de textura para os aeroportos nacionais, estabelecida pela ANAC, é descrita na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Intervalos máximos entre medições de textura (adaptada de DAC, 2001)

Pousos diários de aeronaves à reação na pista	Frequência de Medições de Textura	
	Pavimentos não Estriados (Sem Tratamento Superficial)	Pavimentos Estriados ou Com Camada Porosa de Atrito
Menos de 50	Cada 12 meses	Cada 12 meses
51 a 250	Cada 6 meses	Cada 9 meses
251 a 450	Cada 4 meses	Cada 6 meses
451 a 700	Cada 3 meses	Cada 4 meses
701 ou mais	Cada 3 meses	Cada 3 meses

Ainda de acordo com o DAC (2001), 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 esse nível não for alcançado. A profundidade média da macrotextura recomendada para um pavimento novo é de 1 mm.

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

Um ponto a ser ressaltado é que existem duas diferentes recomendações para a execução do ensaio da mancha de areia: uma com granulometria de micro-esferas entre 0,177mm e 0,250mm de acordo com a Norma ASTM E-965-96 e outra que determina granulometria de areia entre 0,150 mm e 0,300 mm de acordo com recomendação da ANAC. A recomendação da ANAC não determina que tipo de areia a ser utilizada, apenas recomenda areia lavada.

Além dessas duas recomendações, ainda há uma areia padronizada produzida comercialmente pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, a Areia Normal, há mais de 30 anos no mercado.

De acordo com Lugão (2008), é necessário que haja uma padronização do ensaio, em que além do volume, especifique-se também, no caso particular da areia, o tipo a ser utilizado.

Estudos com o ensaio da mancha de areia realizados por Hegmon e Mizoguchi (1970 apud DOTY, 1974), relataram pobre repetitividade deste procedimento, especialmente entre os operadores. Doty (1974) também estudou a repetitividade do ensaio da mancha de areia, selecionando-se aleatoriamente quarenta locais de teste em um pavimento de concreto. Dois conjuntos de aparelhagem idênticos foram usados por dois operadores para testar cada local, ou seja, um total de 160 testes. Os resultados deste estudo indicaram que a repetição do teste não foi muito boa (Figura 4.8). O intervalo médio foi de 24% do valor médio para cada local, mas não havia dispersão considerável, mesmo neste valor. Portanto, concluiu-se que o teste de mancha da areia, modificada para o referido estudo, apresentou repetitividade pobre.

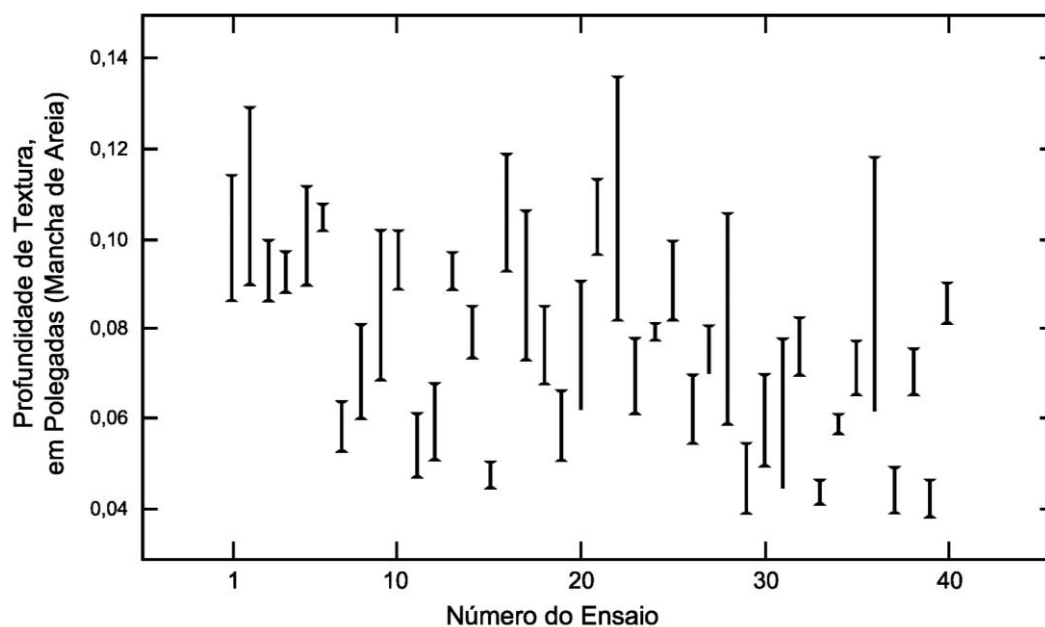


Figura 4.8 - Repetitividade do ensaio da Mancha de Areia (Doty,1974)

Wambold e Henry (2002), em um estudo realizado pela NASA, avaliaram a variação do resultado do ensaio de mancha de areia, executado por dois operadores, onde se verificou a correlação de resultados apresentada na Figura 4.9.

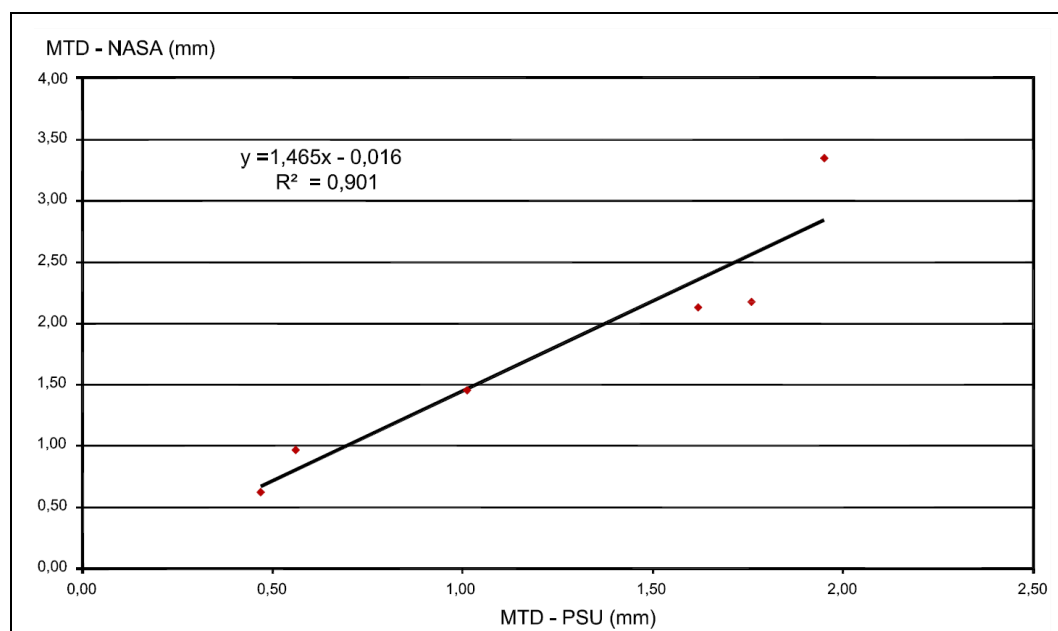


Figura 4.9 - Correlação entre os resultados do ensaio da mancha de areia realizados por dois operadores (Wambold e Henry, 2002)

4.3.2 Mancha de Graxa

A técnica da mancha de graxa foi desenvolvida na NASA *Langley Research Center* (YAGER e BUHLMANN, 1982). De acordo com Aps (2006) trata-se de uma variação do método da Mancha de Areia, sendo mais utilizado em pavimentos de aeroportos. O método consiste no espalhamento de um volume conhecido de graxa sobre uma superfície de pavimento limpa e seca por meio de um rodo, de forma que essa graxa preencha os vazios da textura superficial do pavimento. Primeiramente a área a ser ensaiada é demarcada com duas linhas paralelas de fita adesiva (espaçadas em 10 cm) e com uma linha perpendicular que tem a função de delimitar um dos extremos e auxiliar na definição da área a ser coberta pela graxa. Em seguida a superfície é limpa com o auxílio de uma escova macia e a graxa é distribuída na área delimitada pelas linhas de fita adesiva com um pequeno rodo de borracha, de modo a preencher os vazios da textura de superfície. Ao espalhar a graxa com o rodo de borracha, cuidados devem ser tomados para garantir que não haja quantidade considerável de graxa sobre a fita adesiva ou sobre o rodo (YAGER e BUHLMANN, 1982). Finalmente calcula-se a área do retângulo formado pela graxa e obtém-se a profundidade média de textura de superfície, em milímetro, dividindo-se o volume de graxa utilizada pela área do retângulo da mancha de graxa. A Figura 4.10 ilustra os equipamentos utilizados no ensaio da Mancha de Graxa.



Figura 4.10 - Ensaio de Mancha de Graxa (Wambold e Henry, 2002)

Uma relação bem estabelecida foi constatada por Yager e Buhlmann (1982) entre os procedimentos da mancha de graxa e da mancha de areia, verificado pelo elevado coeficiente de correlação R^2 de 0,95 (Figura 4.11).

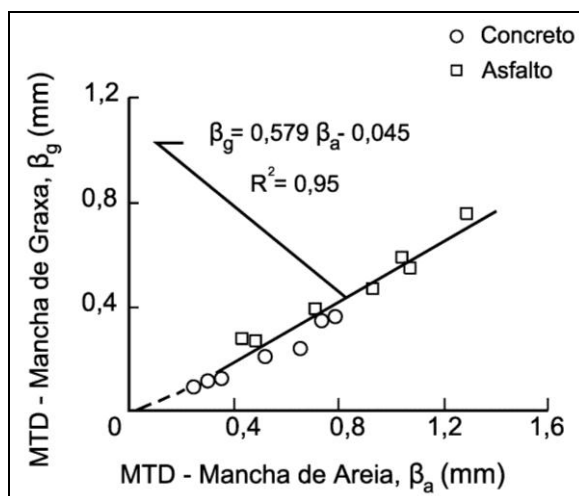


Figura 4.11 - Relação entre técnicas de medição da profundidade média de superfície – Mancha de Areia x Mancha de Graxa (YAGER e BUHLMANN, 1982)

4.3.3 Perfilômetro Laser

O Perfilômetro Laser permite medir os desvios altimétricos da superfície do pavimento em relação a um perfil ideal. Com base nesse perfil longitudinal é possível calcular os diversos indicadores da regularidade superficial do pavimento (LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL - LNEC, 2008). O perfil longitudinal pode incluir a medida do greide, da irregularidade e de textura do pavimento, dependendo de como e para que ele seja mensurado (BARELLA, 2008).

O LNEC (2008) descreve o Perfilômetro Laser como uma viga de alumínio, instalada na parte dianteira ou traseira de um veículo, equipada com lasers, que efetuam o levantamento do perfil da superfície do pavimento ao longo de alinhamentos paralelos ao sentido de deslocamento do veículo. A Figura 4.12 ilustra o Perfilômetro Laser.



Figura 4.12 - Perfilômetro Laser

De acordo com Alves (2007), este equipamento é adaptado a um veículo e permite que o ensaio seja realizado a velocidade de tráfego (entre 30 km/h e 100 km/h), sem que as medições sejam afetadas pela velocidade do veículo, possibilitando a obtenção de dados em tempo real.

Segundo Barella (2008) os perfilômetros laser trabalham com três elementos: ponto de referência, altura em relação ao ponto de referência e deslocamento longitudinal (Figura 4.13).

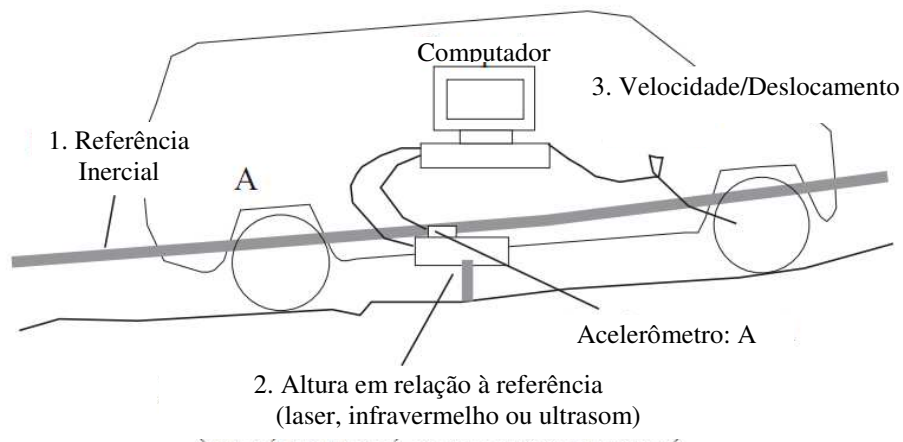


Figura 4.13 - Esquema dos três elementos presentes no perfilômetro (adaptado de SAYERS e KARAMIHAS, 1998)

Barella (2008) descreve o funcionamento dos perfilômetros da seguinte forma: em um momento inicial o veículo contendo o equipamento trafega sobre o pavimento e o computador registra simultaneamente o deslocamento longitudinal, a altura do veículo até o pavimento e a

aceleração vertical do veículo. No processamento dos dados obtidos, as acelerações verticais registradas são transformadas em deslocamento vertical do veículo através de duas integrações sucessivas. Com o valor do deslocamento calculado, o perfil é obtido através da correção de todas as medidas de altura realizadas pelos sensores laser.

O equipamento é constituído por um sistema de medição de distância entre o veículo e o pavimento, sensores de aceleração vertical, hodômetro de precisão, sistema eletrônico em que todos os sensores são conectados e por um software que gerencia a coleta de dados que verifica o funcionamento dos componentes do sistema.

LNEC (2008) afirma que para a obtenção do parâmetro MPD através do Perfilômetro Laser o levantamento é semelhante ao da avaliação da irregularidade, no entanto a frequência do laser é mais elevada (62,5 kHz) tendo em vista a medição da profundidade da textura.

De acordo com a norma ASTM E1845 (2005a), o perfil da macrotextura do pavimento medido é dividido em segmentos, para fins de análise, cada um com uma base de comprimento de 100 mm (Figura 4.14). O declive (se houver) de cada segmento é suprimido, subtraindo uma regressão linear do respectivo segmento. O segmento é dividido ao meio e o pico mais alto em cada metade do mesmo é determinado. A diferença entre a altura resultante e o nível médio do segmento é calculada para cada metade do segmento e a média de ambas as metades computadorizada. O valor médio de pico de todos os segmentos é relatado como MPD. Quando o MPD é usado para estimar o MTD por meio de uma equação de transformação, o valor calculado é chamado de *Estimated Texture Depth* (ETD).

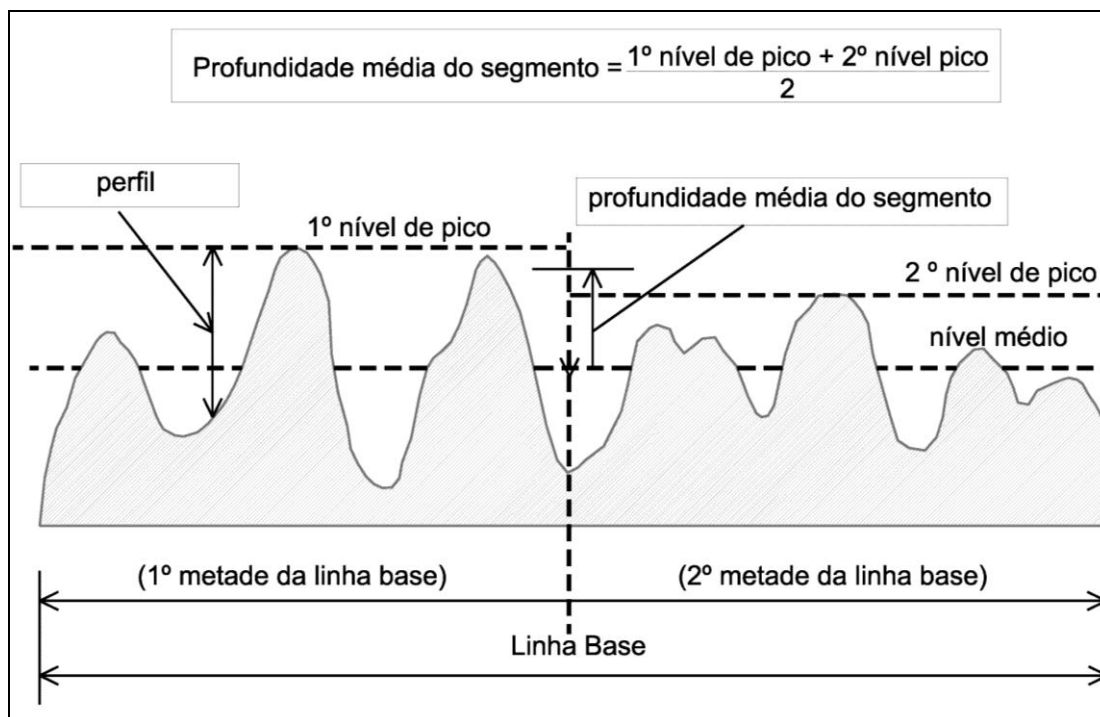


Figura 4.14 - Procedimento para o cálculo da profundidade média do segmento (adaptado de ASTM, 2005a)

Barella (2008) afirma que as características requeridas do medidor laser para fins de caracterização da macrotextura são diferentes das características requeridas para a medição de perfil longitudinal. As principais diferenças são que no caso da obtenção da macrotextura o ponto laser projetado no pavimento é de menor tamanho e a frequência de medição e exatidão das medidas devem ser maiores.

A ASTM (2005a) regulariza a medição do perfil médio da macrotextura do pavimento através do estabelecimento das características do equipamento que executa essa medição e da padronização dos cálculos e apresentação de resultados. Adicionalmente, a referida norma apresenta a correlação dessas medidas com as medidas da macrotextura obtidas com o ensaio de mancha de areia.

Flintsch et al (2003) comparam as medidas obtidas através do perfil a laser com as medidas obtidas com os testes de mancha de areia. As equações de regressão linear e exponencial foram sobrepostas aos dados experimentais e a equação linear indicou uma correlação (R^2) de

0,884. No entanto, o estudo verificou que a correlação obtida não está de acordo com o apresentado na norma ASTM E-1845 (Figura 4.15), o que sugere um possível viés no perfil a laser utilizado para esta investigação ou uma diferença no algoritmo usado para calcular o MPD.

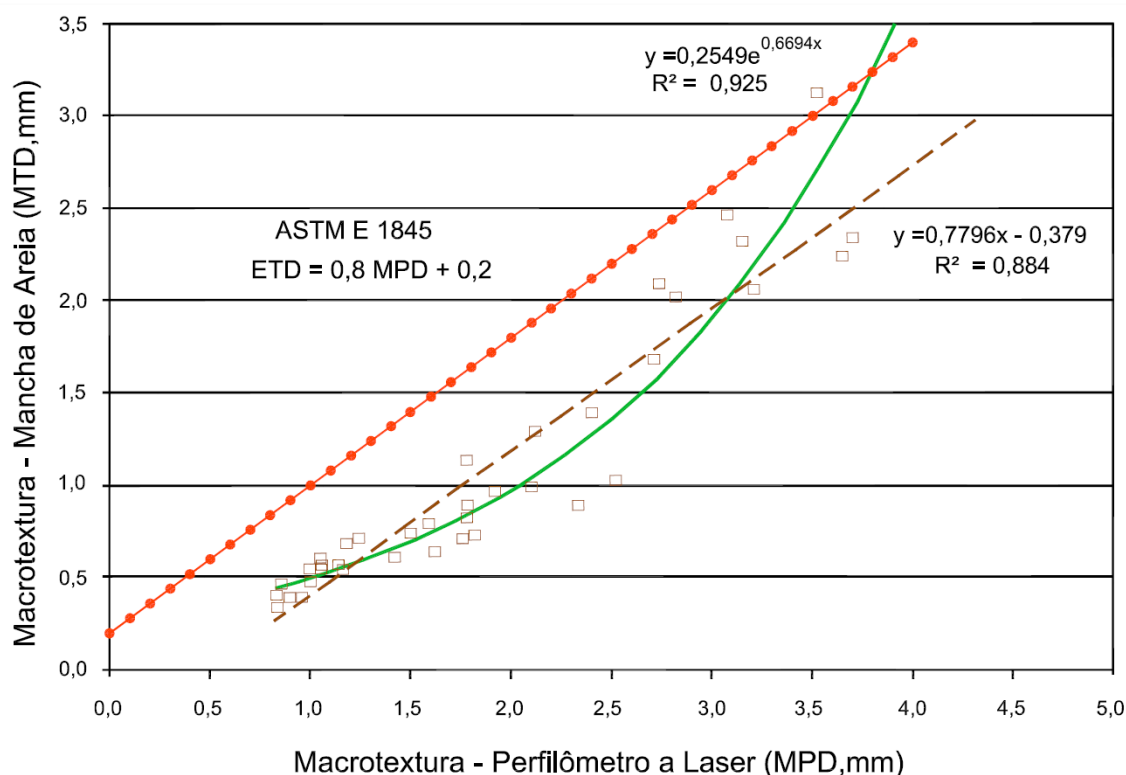


Figura 4.15 - Correlação entre as medidas obtidas através do Perfilômetro Laser e da Mancha de Areia (adaptado de FLINTSCH et al, 2003)

Flintsch et al (2003) também citam que alguns pesquisadores consideram questionáveis as medidas de macrotextura em superfícies classificadas como aberta, tendo em vista que o perfil a laser não consegue detectar alguns dos vazios que são preenchidos com areia. A correlação entre as medidas obtidas através do Perfilômetro Laser e do ensaio de Mancha de Areia para as diferentes superfícies de pavimento estudadas é apresentada graficamente na Figura 4.16.

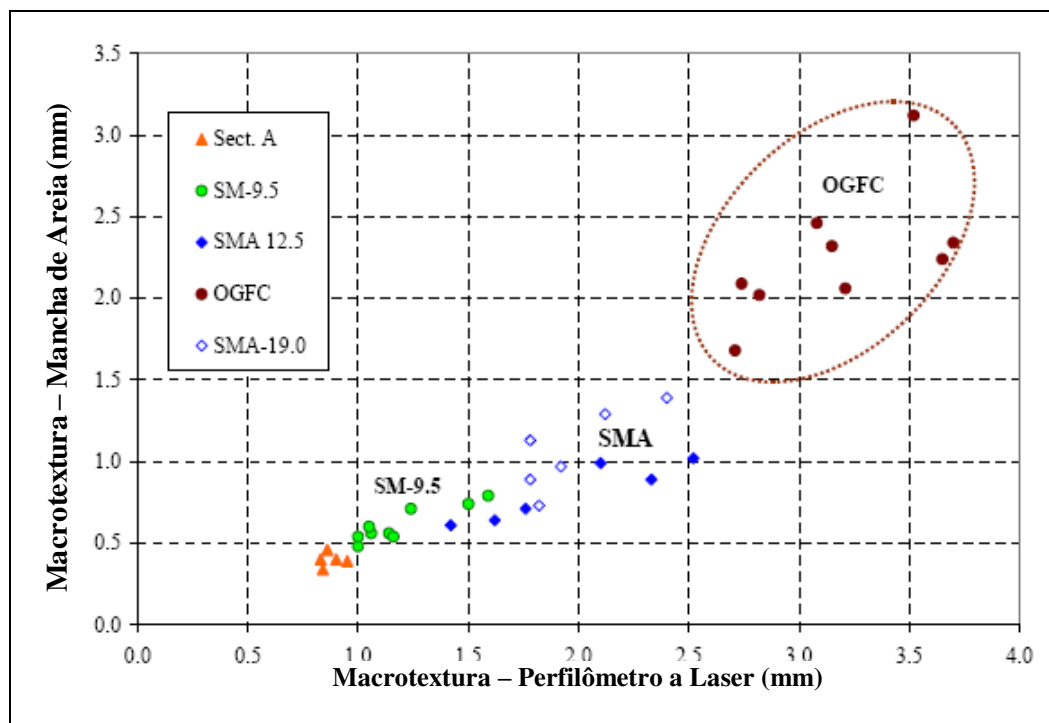


Figura 4.16 - Correlação entre as medidas obtidas através do Perfilômetro Laser e da Mancha de Areia para diferentes superfícies de pavimento (adaptado de FLINTSCH et al, 2003)

4.3.4 Circular Track Meter (CTMeter) (ASTM E 2157-01)

O *Circular Texture Meter* foi introduzido em 1998 e utiliza a tecnologia laser para determinar as características de macrotextura de um pavimento (ALVES, 2007). O CTMeter pode ser usado no laboratório, bem como no campo. É um equipamento que utiliza um laser para medir o perfil do pavimento de um círculo de 284 mm de diâmetro ou 892 mm de circunferência. O perfil é dividido em oito segmentos iguais de 111,5 milímetros, sendo a profundidade média do perfil (MPD) de cada segmento ou arco do círculo calculada de acordo com o procedimento da norma ASTM E 2157-01. O CTMeter é controlado por um computador portátil que também executa os cálculos e armazena a profundidade média de cada segmento. São computadas as médias dos oito segmentos, a média dos dois arcos que são perpendiculares à direção do tráfego, e a média dos dois segmentos no sentido de tráfego. Para estimar o MTD, verificou-se que os

melhores resultados são obtidos com a média da profundidade determinada para cada uma das oito áreas formadas (ABE et al, 2001).

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram um exemplo de CT Meter em operação e seu detalhe, respectivamente.



Figura 4.17 - Circular Track Meter em operação
(HALL et al, 2009)



Figura 4.18 - Vista do Circular Track Meter
(Wambold e Henry, 2002)

O estudo de Abe et al. (2001) demonstrou as medidas simultâneas de MPD pelo CTMeter e MTD pela técnica volumétrica da mancha de areia realizadas em três ocasiões: no *Wallops Flight Facility* da NASA nos anos de 1998 e 1999 e em uma pista perto de Berlim na *Sperenberg* no ano de 2000.

Os coeficientes de correlação (R^2), encontrados por Abe et al (2001), entre MTD e MPD são de 0,97 para os dados de 1998 e 1999 na *NASA Wallops Flight Facility* (Figuras 4.19 e 4.20), o que indica uma relação muito forte entre o MTD e MPD, segundo os autores do estudo. Os dados relativos a 2000, na pista de ensaio *Sperenberg* (Figura 4.21) apresentam três pontos isolados obtidos em superfícies altamente porosas em que as esferas de vidro fluíram para os poros obtendo-se valores elevados para o MTD. Quando esses dados foram eliminados o coeficiente de correlação (R^2) resultante aumentou de 0,80 para 0,98. A combinação de todos os dados para os três anos, exceto para as três superfícies porosas dos dados de 2000, resultou em um elevado coeficiente de correlação de 0,94 (Figura 4.22).

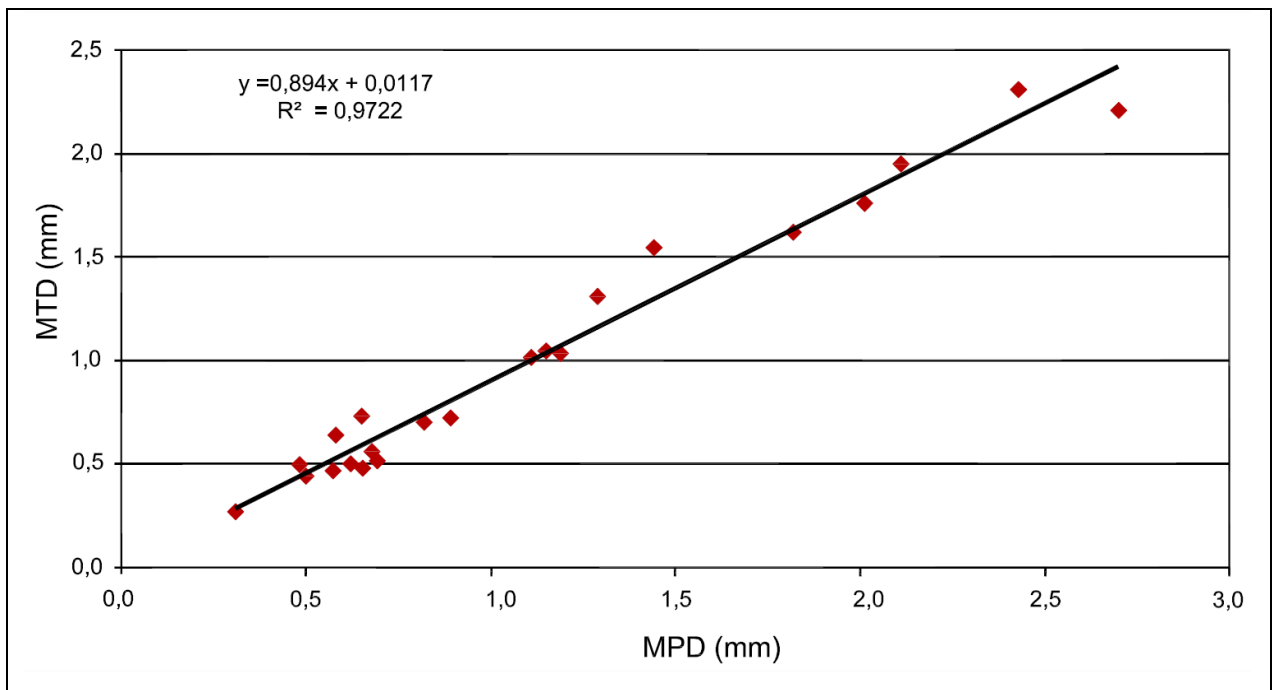


Figura 4.19 - MTD x MPD – Dados NASA Wallops Flight Facility -1998 (adaptado de ABE et al, 2001)

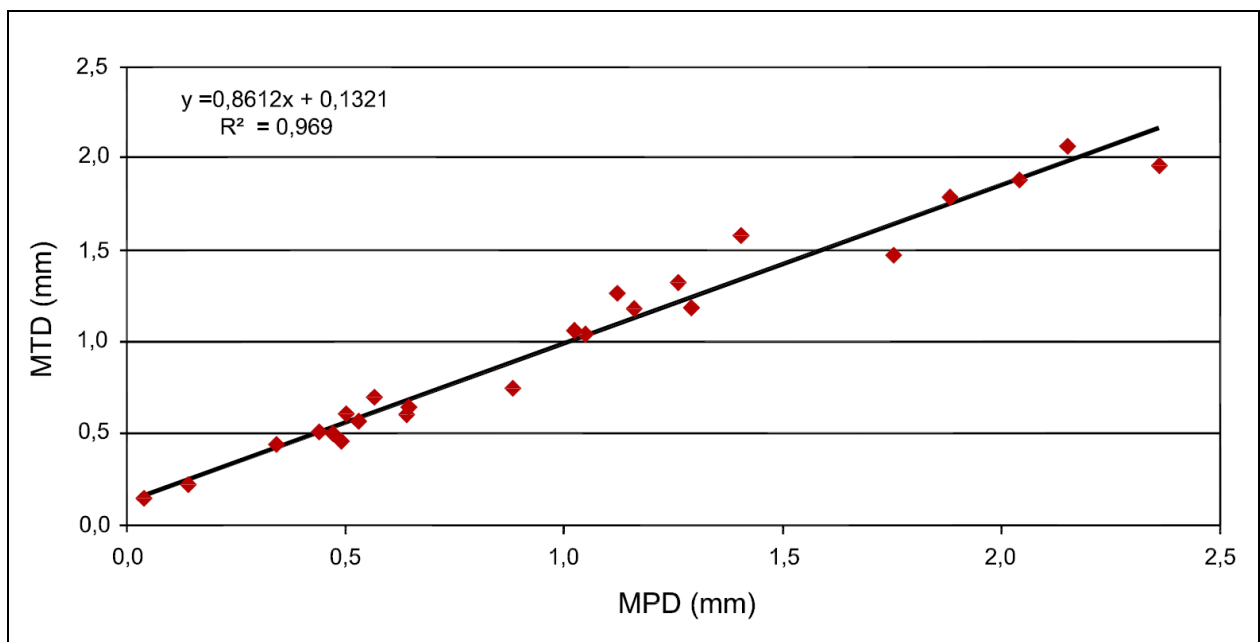


Figura 4.20 - MTD x MPD – Dados NASA Wallops Flight Facility – 1999 (adaptado de ABE et al, 2001)

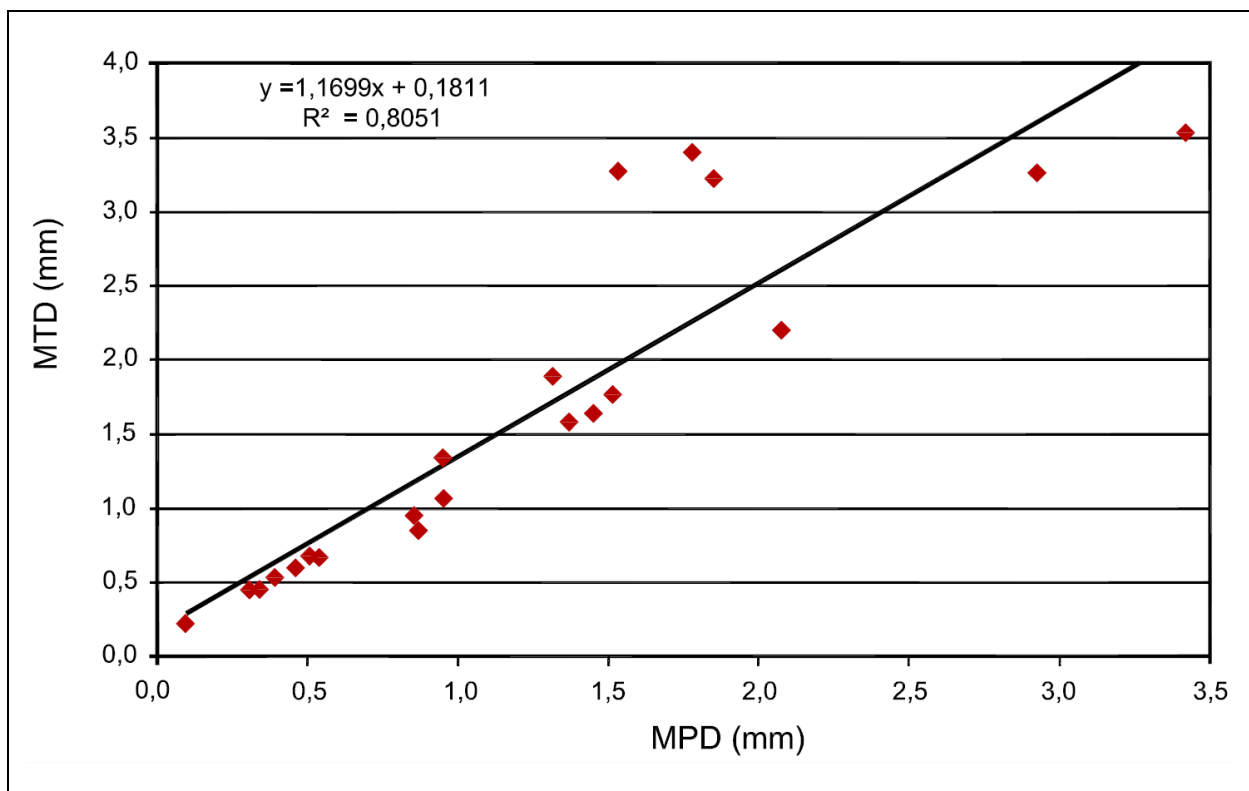


Figura 4.21 - MTD x MPD – Dados *Sørensen* – 2000 (adaptado de ABE et al, 2001)

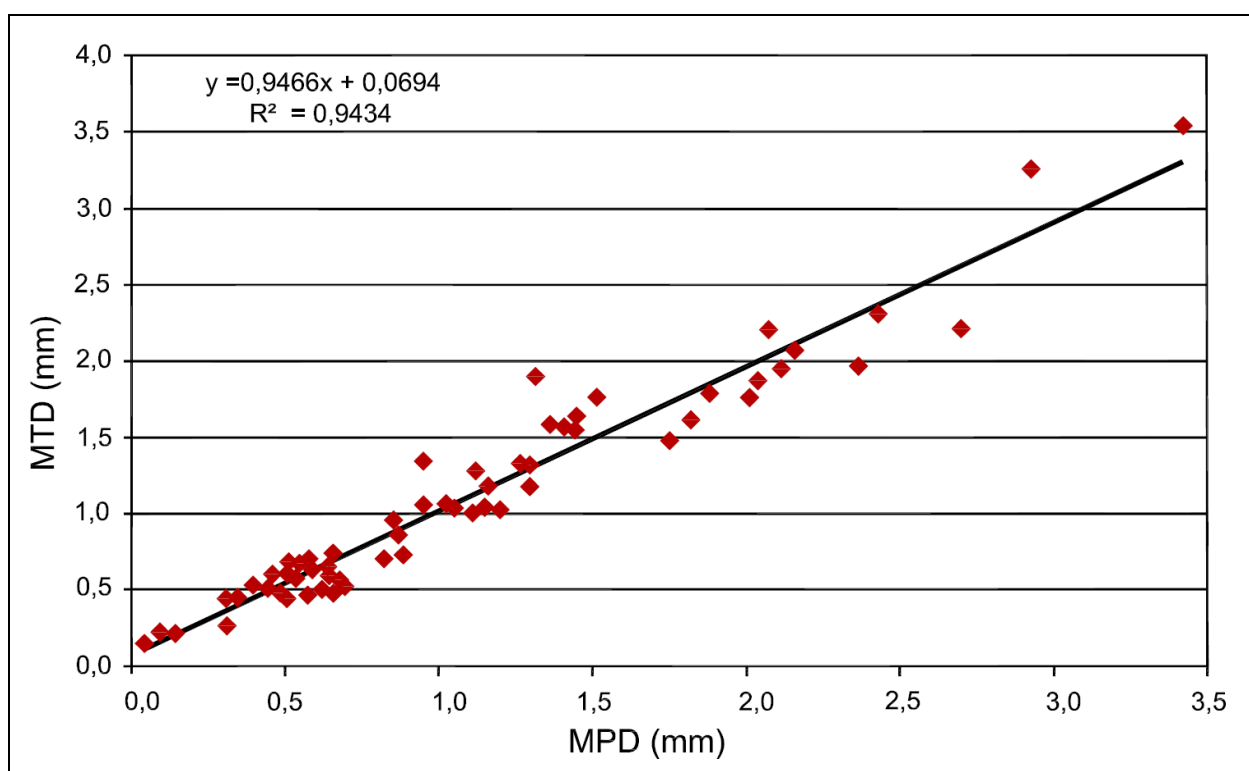


Figura 4.22 - MTD x MPD – Todos os dados - 1998 – 2000 (adaptado de ABE et al, 2001)

Hanson e Prowell (2004) avaliaram o CTMeter através da comparação do resultados obtidos com o procedimento da Mancha de Areia. A pesquisa abordou a realização de ensaios com o CT Meter e a Mancha de Areia em cinco locais aleatórios em cada uma das 45 seções teste da pista experimental do *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), construída em Opelika no Alabama, que oferece uma ampla gama de tipos de superfície, incluindo misturas Superpave com graduação grossa e fina densa, *Open Graded Friction Course* (OGFC), mistura *Hveem*, *Stone Mastic Asphalt* (SMA) e *Novachip* (fina camada de mistura asfáltica a quente com agregado graúdo sobre uma membrana asfáltica especial, composta de emulsão asfáltica modificada com polímero).

Os autores do estudo concluíram que o CTMeter produz resultados comparáveis ao ensaio de mancha da areia apresentando excelente correlação, quando as misturas de graduação aberta foram excluídas, conforme demonstrado na Figura 4.23.

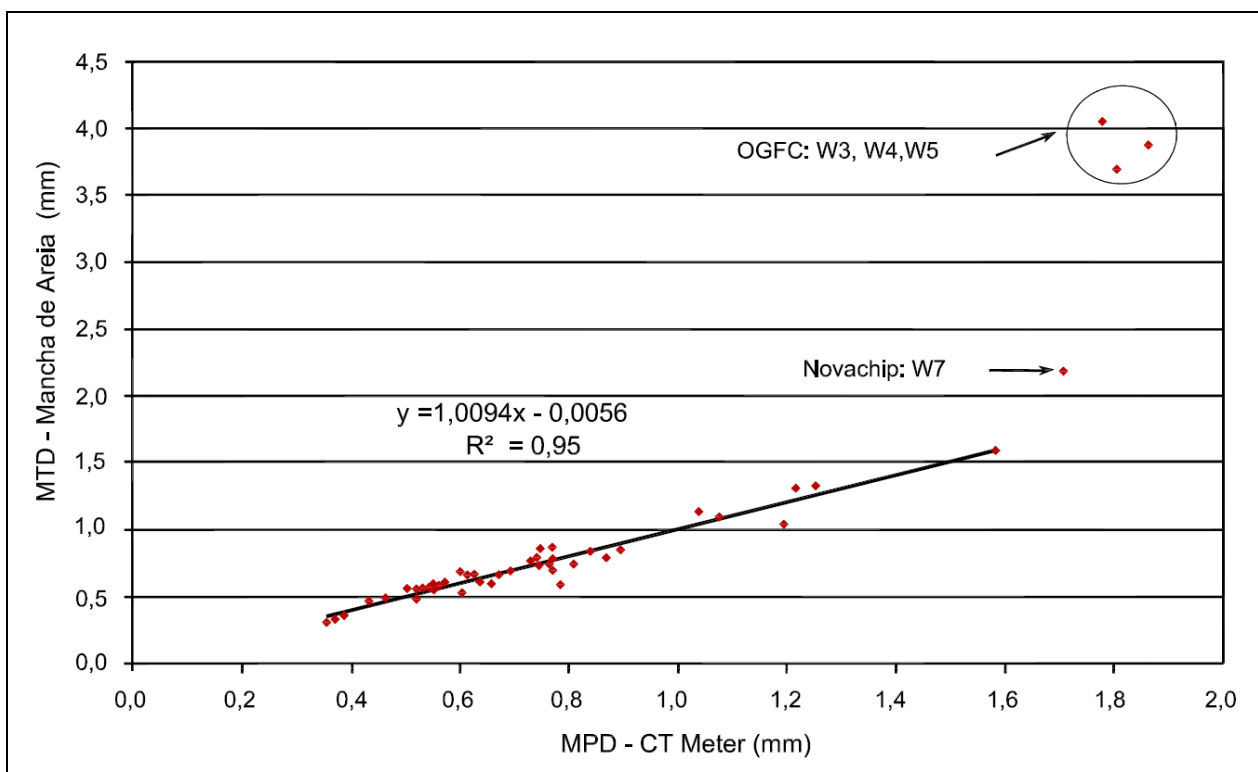


Figura 4.23 - Correlação entre os resultados obtidos com os ensaios CT Meter e de Mancha de Areia (adaptado de Hanson e Prowell, 2004)

Flintsch et al (2003) investigaram a correlação entre as medições realizadas com o CT Meter e os resultados obtidos com a Mancha de Areia utilizando diferentes revestimentos. De acordo com os autores, um excelente coeficiente de correlação (R^2) de 0,94 foi encontrado, como mostrado na Figura 4.24. Os autores afirmam que estes resultados são consistentes com aqueles relatados em outros lugares (ABE et al., 2001), e indicam que o teste de mancha da areia pode ser substituído pelo teste CTMeter que é mais objetivo e possui um elevado grau de precisão.

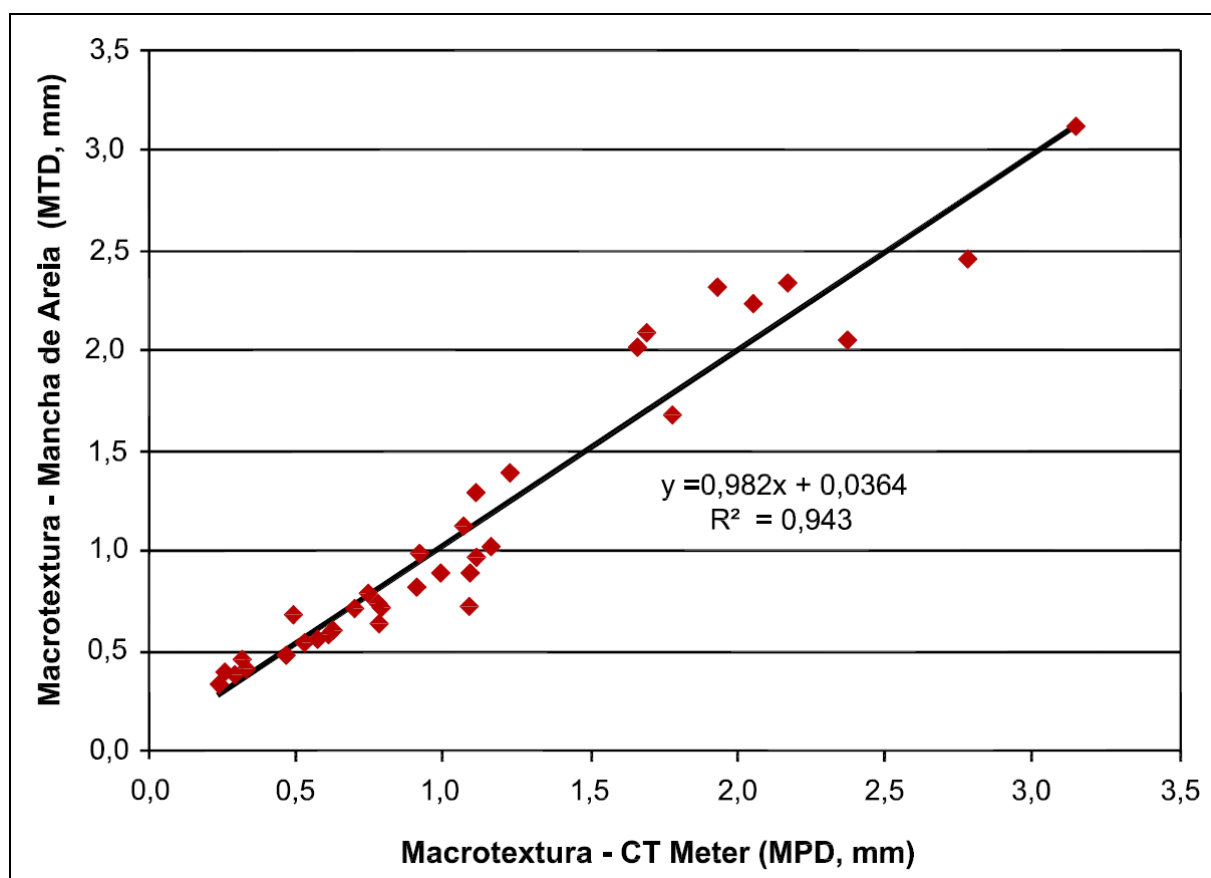


Figura 4.24 - Correlação entre os resultados obtidos com os ensaios CT Meter e de Mancha de Areia (adaptado de FLINTSCH et al, 2003)

4.3.5 Filosofia do Equipamento denominado Drenômetro

Esse procedimento tem o objetivo de avaliar a capacidade da macrotextura de drenar a água através dos canais da superfície de um pavimento. Um cilindro transparente é colocado sobre a superfície do pavimento, sendo em seguida preenchido com um volume conhecido de água, o qual escoar através de um orifício circular presente em uma placa acoplada ao fundo do recipiente (STRUFALDI, 2011). O tempo de escoamento da água (em segundos) passando por duas marcas existentes no tubo, de forma a apresentar um volume conhecido, pode ser medido manualmente com um cronômetro ou com temporizador eletrônico, que mede o tempo para o nível da água cair entre dois elétrodos suspensos no cilindro (WAMBOLD et al, 1995). A Figura 4.25 ilustra o drenômetro do *Swedish National Road and Transport Research Institute*.

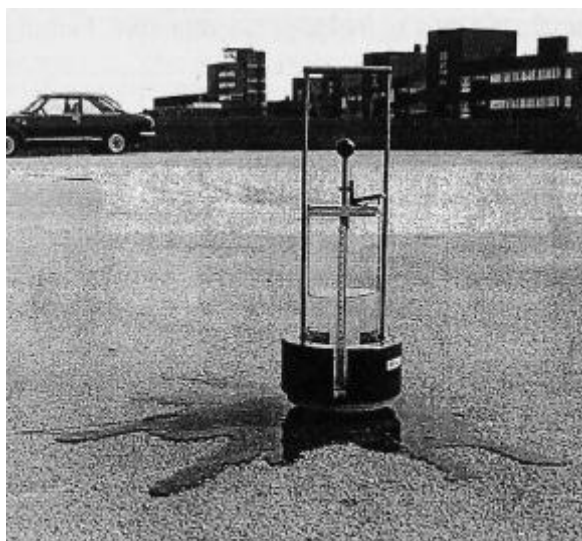


Figura 4.25 – Drenômetro do *Swedish National Road and Transport Research Institute* (SANDBERG, 1998)

Um ponto relevante deste método, de acordo com Aps (2006), é que pode ser utilizado em pavimentos de concreto e asfálticos, inclusive com *grooving* (Figura 4.26).



Figura 4.26 – Drenômetro no pavimento com *grooving* (RODRIGUES FILHO, 2006)

Existem modelos variados de drenômetros com diferentes dimensões, estrutura, método de medição do tempo, etc. No Brasil, Momm (1998) descreve um drenômetro desenvolvido no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo com as mesmas dimensões do drenômetro do *Institute of Highways, Railroads and Rock Engineering* (ISETH) de Zurique.

Esse equipamento mede o tempo de escoamento (em segundos) de 0,73 litros de água contido em cilindro de plástico transparente, acoplado a um fundo com um orifício circular de 5 cm de diâmetro, em contato com a superfície do pavimento. O objetivo desse ensaio é a verificação da capacidade drenante da textura do pavimento (APS, 2006). A Figura 4.27 ilustra o Drenômetro do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da Universidade de São Paulo (USP).



Figura 4.27 – Drenômetro LTP-USP (APS, 2006)

5 DRENÔMETRO (*OUTFLOW METER*)

5.1 Conceituação

Esse método de ensaio avalia a capacidade da macrotextura de drenar a água através dos canais da superfície do pavimento, com o objetivo de simular a drenagem da água que está entre a área de contato da banda de rodagem de um pneu em movimento. Resumidamente o drenômetro mede o tempo que leva para uma conhecida quantidade de água escapar através dos vazios no pavimento. Este teste fornece uma indicação da capacidade do pavimento escoar a água de forma a aliviar a pressão dos pneus do veículo. Isto proporciona ao engenheiro uma clara indicação do potencial de aquaplanagem em condições de pista molhada.

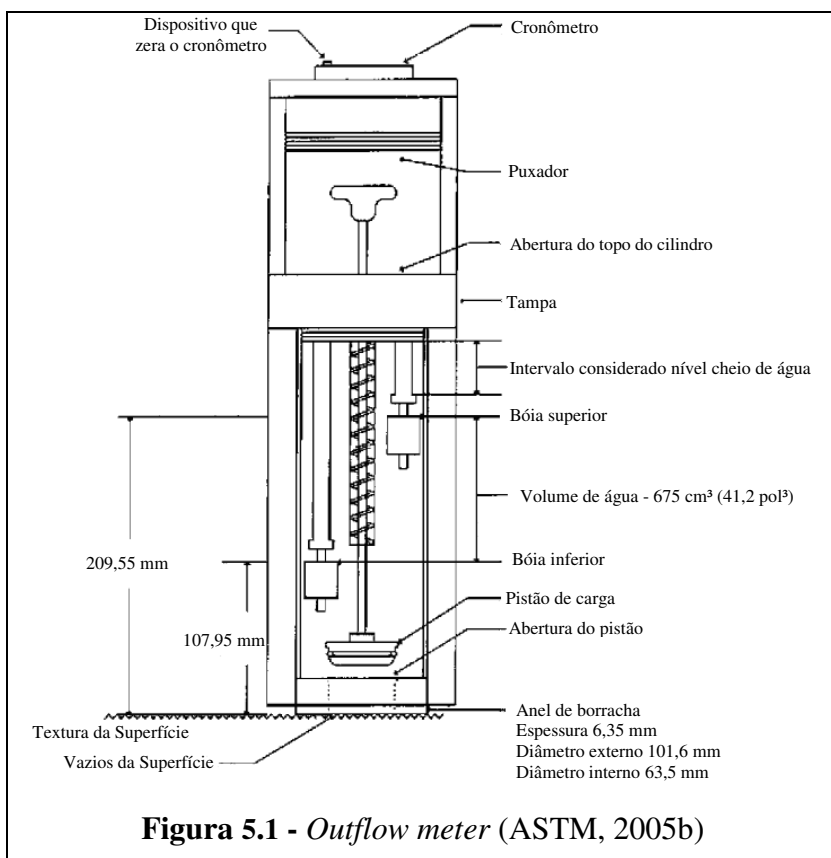
A norma americana ASTM E 2380 (ASTM, 2005b), relativa à medição da drenabilidade horizontal da superfície de um pavimento, descreve um método que permite determinar um indicador relacionado com a textura do pavimento utilizando um aparelho denominado *outflow meter* (Figuras 5.1 e 5.2).

O drenômetro (*outflow meter*) é um aparelho estacionário que consiste em um cilindro de plástico transparente fixo a uma base revestida de metal, que lhe confere estabilidade, e com um anel de borracha anexado à sua face de baixo. O cilindro é colocado no pavimento e carregado até que o anel de borracha entre em contato com a superfície, de maneira similar ao esperado do movimento do pneu. A água corre dentro do cilindro e o relógio mede o tempo requerido para um volume conhecido de água (indicado pelos dois marcadores do lado do

cilindro) escapar através dos poros ou canais do pavimento e entre o anel de borracha e a superfície do pavimento. A água no cilindro está abaixo da pressão atmosférica.

Através do tempo obtido com o *outflow meter* e do volume conhecido de água utilizado no ensaio é possível obter a vazão de escoamento superficial da água, ou seja, a drenabilidade, em m^3/s .

Curtos períodos de tempo (altas razões de fluência de água) são associados à superfície de pavimento com alta macrotextura, alta característica de permeabilidade ou ambos. Em outras palavras, quanto mais rápido a água escapar do *outflow meter*, menor a quantidade de água presente entre o pneu e o pavimento, e portanto, melhor a aderência entre eles.



Como este ensaio mede a drenabilidade pontual na área de contato entre o pneu e o pavimento, a seleção da área de ensaio deve ser escolhida cuidadosamente, de modo que esta represente o pavimento em estudo e, preferencialmente uma área homogênea, que não contenha tintas, fissuras e buracos. Também é recomendável que o ensaio seja efetuado nas áreas mais solicitadas pelos pneus dos veículos, por serem pontos usualmente críticos quanto à segurança.

Antes de iniciar o ensaio deve-se molhar a parte inferior do *outflow meter*. Em seguida o *outflow meter* é colocado sobre o pavimento, verificando-se a uniformidade do contato do anel de vedação de borracha com o pavimento. Posteriormente coloca-se água no interior do cilindro, zera-se o cronômetro e puxa-se a alça. O cronômetro registra o tempo que um determinado volume demora a ser escoado pelos poros do pavimento. A Figura 5.3 ilustra o ensaio com o *outflow meter*.



Figura 5.3 - Ensaio com o *outflow meter* (arquivo próprio)

Quanto maior o número de ensaios realizados, melhor será o resultado, bem como, a média do escoamento obtido. É recomendado o mínimo de quatro execuções aleatoriamente espaçadas e a média aritmética do tempo de cada ensaio será utilizada como o tempo médio obtido da seção de pavimento ensaiada (ASTM, 2005b).

A norma ASTM E 2380-05 indica a utilização da equação 5.1 para se estimar a profundidade média de textura (*Mean Profile Texture – MTD*).

$$MTD = \frac{3,114}{OFM} + 0,636 \quad (5.1)$$

Gransberg (2009) afirma que o *Federal Highway Administration* exige que cada Estado norte americano estabeleça suas próprias normas de resistência à derrapagem. Padrões de resistência à derrapagem são expressos em um índice adimensional chamado número de derrapagem. Esta unidade de medida mede o efeito composto da microtextura da superfície do pavimento e da macrotextura do pavimento através da mancha de areia ou do *outflow meter*.

5.2 Estudos Realizados Anteriormente

Ardani (2007) apresentou cinco anos de avaliação em nove seções de teste com diferentes características de texturas construídas próximo a Denver, no Colorado, em que foram medidos e comparados profundidade de textura e, números de derrapagem em diferentes velocidades. A profundidade de textura tomada com diferentes dispositivos de medição de textura, tais como *Texture Van*, *Outflow Meter*, *Texture Beam*, Mancha de Areia e *Tire Gauge* correlacionou positivamente com o “número de derrapagem” dos pneus lisos (obtido de acordo com o procedimento de ensaio ASTM E 274), indicando uma relação linear com fatores de correlação excelentes. Os resultados não foram tão lineares com o número derrapagem do pneu com nervuras.

Os gráficos apresentados por Ardani (Figuras 5.4 e 5.5) permitiram a correlação entre o método da mancha de areia e o *outflow meter*, alcançando-se um R^2 de 0,7 (Figura 5.6), em que se conclui que o *outflow meter* também se correlacionou com a mancha de areia.

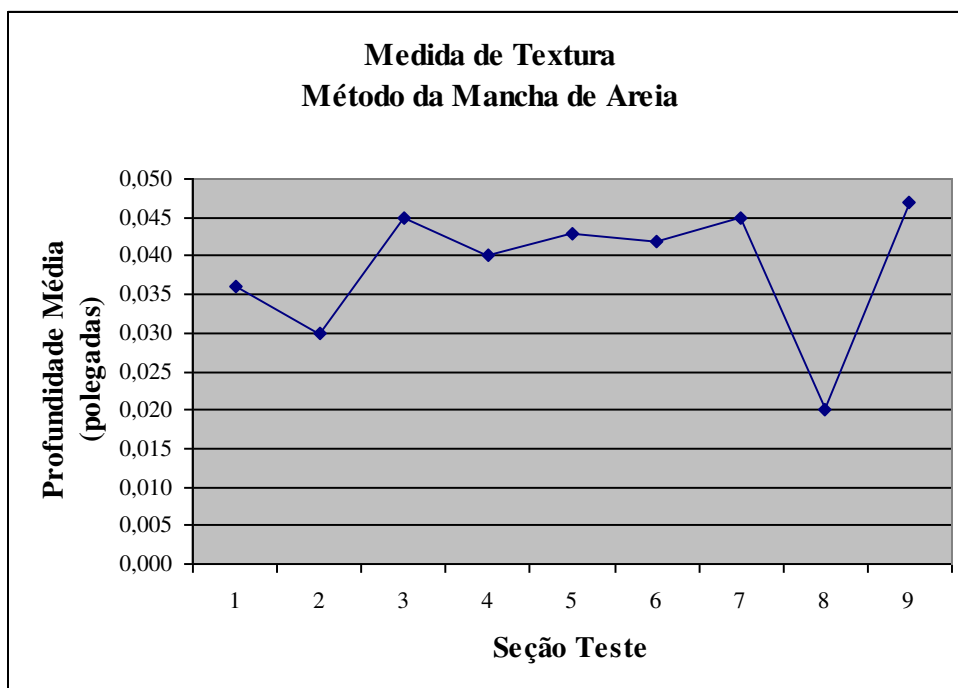


Figura 5.4 - Profundidade de Textura – Método da Mancha de Areia (ARDANI, 2007)

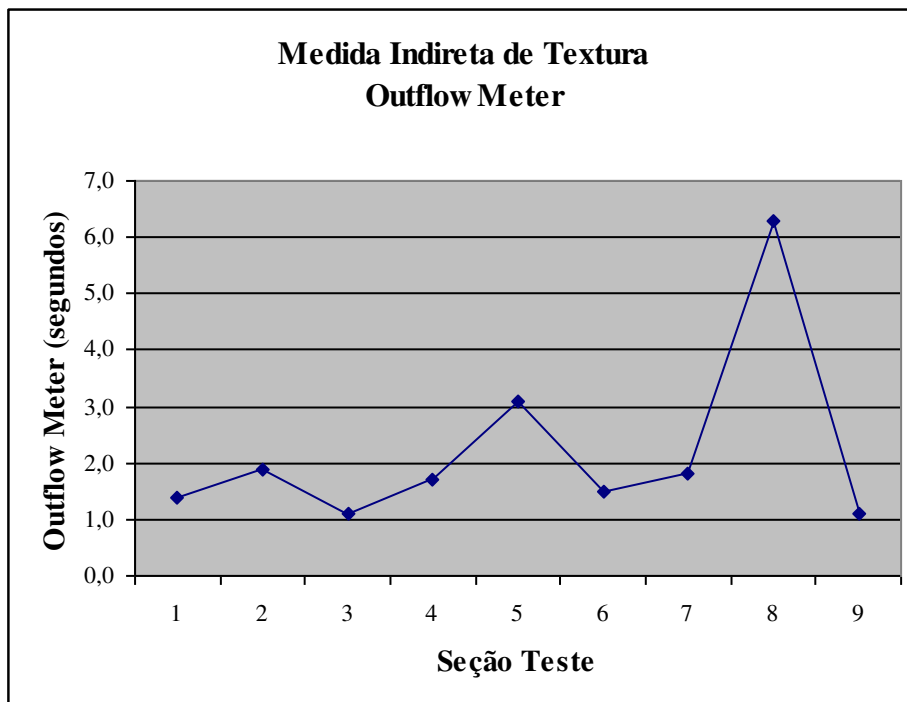


Figura 5.5 - Tempo de Dissipação - Método do *Outflow Meter* (ARDANI, 2007)

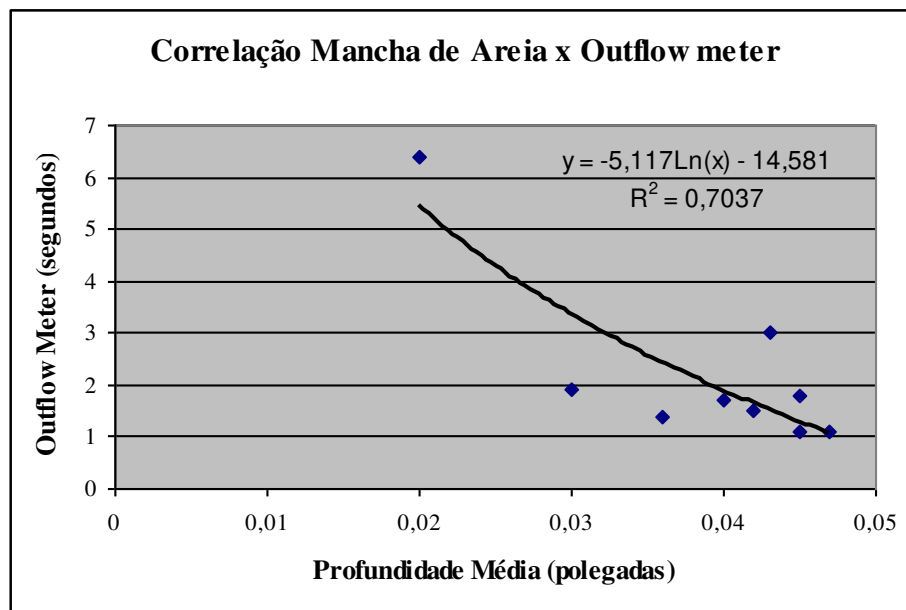


Figura 5.6 - Correlação Mancha de Areia (polegadas) x *Outflow meter* (tempo em segundos).

Weissmann e Martino (2009) avaliaram o *Circular Track Meter (CTMeter)* e o *Outflow Meter*, duas ferramentas portáteis disponíveis para medir a macrotextura do revestimento que demonstraram correlação com a resistência à derrapagem. O *outflow meter* é um dispositivo portátil, simples de usar, de baixo custo e requer apenas um técnico e água para operar. O *CTMeter*, que fornece uma medida direta do MPD, também é viável e prático para um técnico levar em seu caminhão, contudo, o *CTMeter* é várias vezes mais caro do que a *outflow meter*, que exige o uso de um computador portátil, e de preferência duas pessoas para operar.

Os resultados da pesquisa relatados por Weissmann e Martino (2009) mostraram que o MPD é um indicador eficaz para medir a qualidade do revestimento quanto à aderência. De acordo com os autores do estudo, também se verificou uma boa correlação ($R^2=0,75$) entre o *outflow meter* e o *circular track meter*, indicando que o *outflow meter* pode ser utilizado para medir a qualidade do revestimento e determinar se o revestimento tem falhado, utilizando-se os limites recomendados pela pesquisa. Na referida pesquisa foi definido que um revestimento é considerado falho quando apresentar MPD menor ou igual a 0,46 mm ou um tempo de escoamento maior ou igual a 14,5 segundos.

Abe et al (2001) utilizaram dados de dois anos de testes (1999 e 2000) para avaliar a correlação da profundidade média do perfil (MPD) obtida através do CTMeter e o tempo de escoamento com diversos modelos de *outflow meter*. Em todos os casos os coeficientes de correlação (R^2) foram elevados.

A Figura 5.7 apresenta os resultados obtidos nos testes realizados em 1999 no centro de pesquisa aeronáutica da NASA com um *outflow meter Skidabrader* com resolução de 1 segundo e os resultados dos testes realizados em uma pista de teste perto de Berlim, em Sperenberg, no ano de 2000 por um *outflow meter Skidabrader* diferente com resolução de 0,01 segundo.

A Figura 5.8 demonstra os resultados das medições com o *outflow meter* da FHWA no centro de pesquisa aeronáutica da NASA, com um temporizador eletrônico e resolução de 0,01 segundo.

Por fim, na Figura 5.9 são apresentados os resultados do *outflow meter* da Universidade Técnica de Berlim, na pista de ensaio em Sperenberg, o qual não possui temporizador eletrônico, sendo o tempo para o nível da água passar entre as duas linhas marcadas no cilindro medido com um cronômetro.

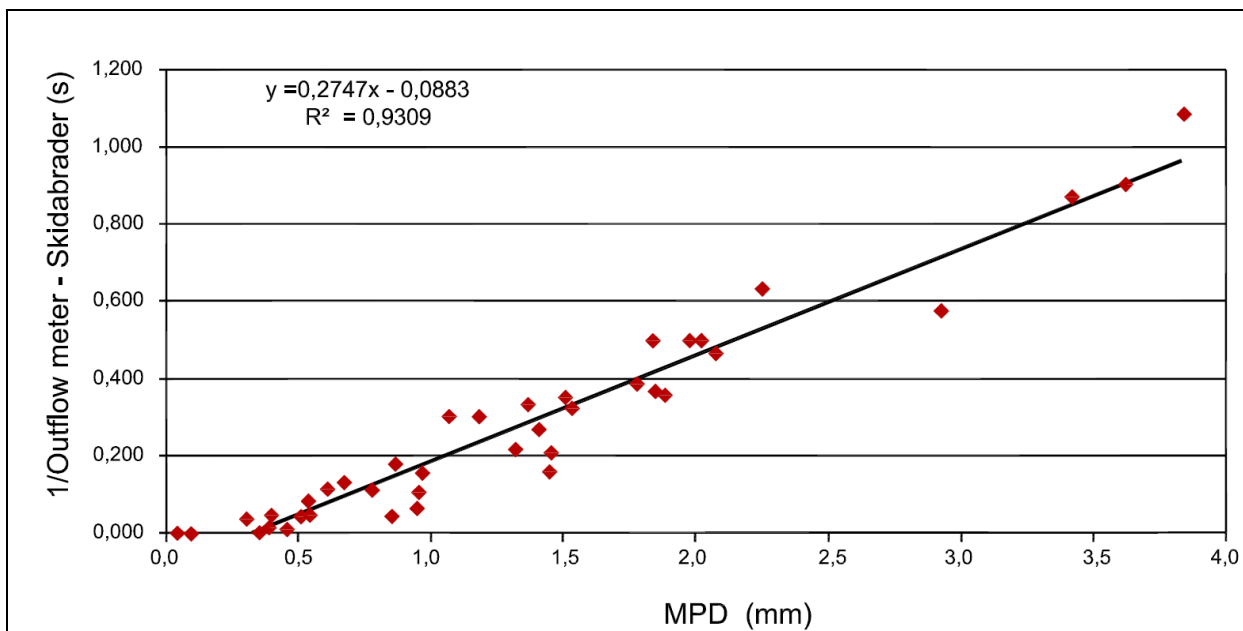


Figura 5.7 – 1/ Outflow meter Skidabrader x MPD – 1999/2000 (adaptado de ABE et al, 2001)

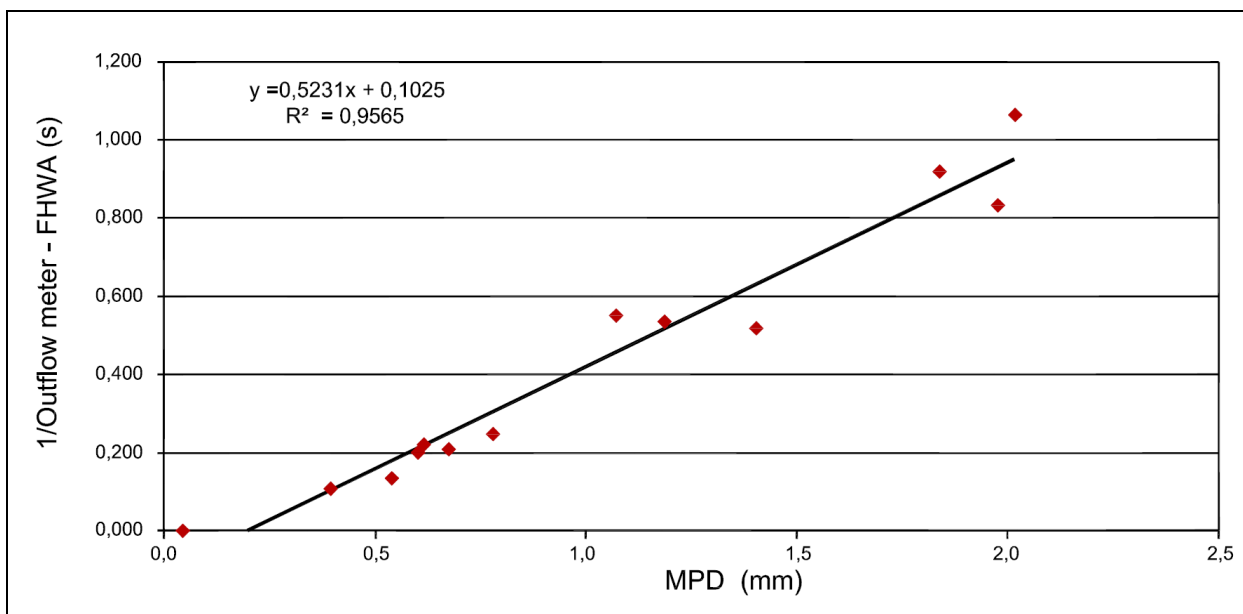


Figura 5.8 - $1/\text{Outflow meter FHWA} \times \text{MPD}$ - 1999 (adaptado de ABE et al, 2001)

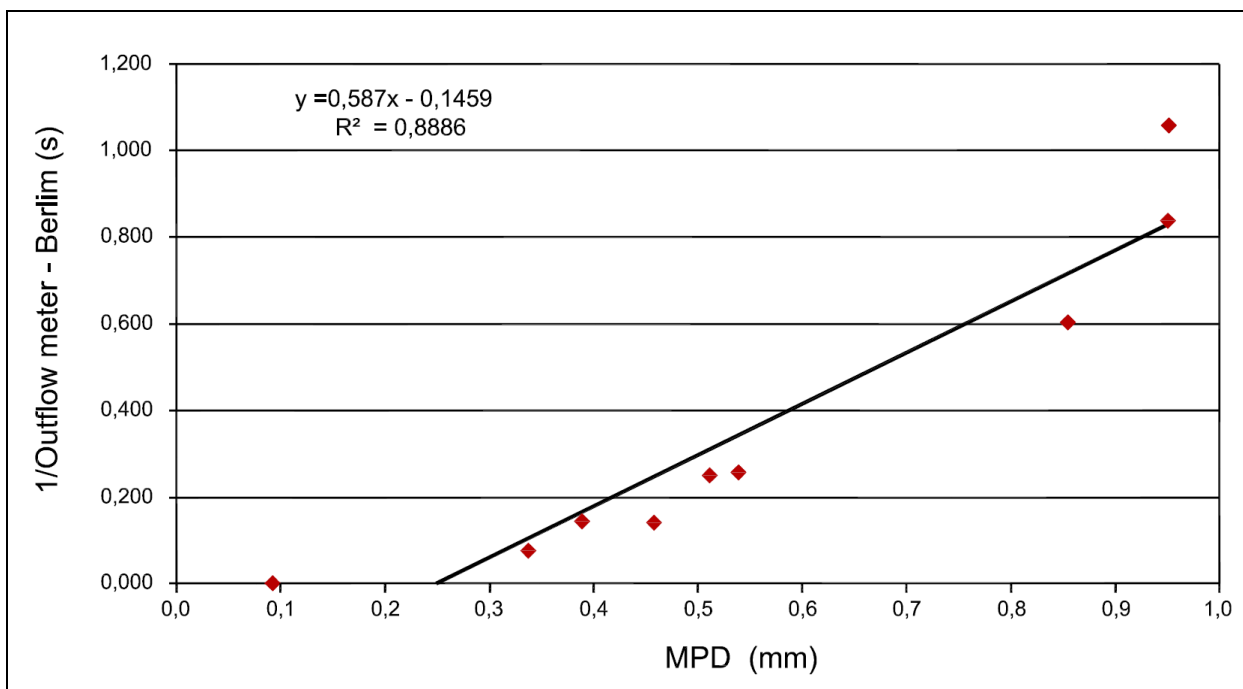


Figura 5.9 - $1/\text{Outflow meter Berlim} \times \text{MPD}$ - 2000 (adaptado de ABE et al, 2001)

De acordo com o estudo de Abe et al (2001) o *outflow meter* está altamente correlacionado com o MPD e o MTD para pavimentos não-permeáveis. As correlações de MPD com o *outflow meter* obtidas no referido estudo mostraram-se bastante linear com coeficientes de correlação elevados. Ressalta-se que a previsão do tempo de escoamento com o *outflow meter* do MPD foi muito boa para as três superfícies altamente porosas em uma das três pistas avaliadas, não sendo necessário eliminar as superfícies porosas para esta análise.

Em pesquisa realizada, Ribeiro et al (2008) verificaram a correlação entre o *outflow meter* e as medidas de mancha de areia, chegando a valores de R^2 de 0,73 e 0,77 quando estudadas correlações com todos os pontos da amostra e expurgando-se os pontos com o tempo de escoamento da água acima de 50 segundos, respectivamente (Figuras 5.10 e 5.11). Estes resultados são consistentes com aqueles relatados em outros lugares e indicam que utilização do mesmo é viável para a medição da macrotextura da superfície dos pavimentos, assim como a mancha de areia, possuindo ainda a vantagem sobre esta de ser um método objetivo, não influenciado por alteração de operadores do equipamento.

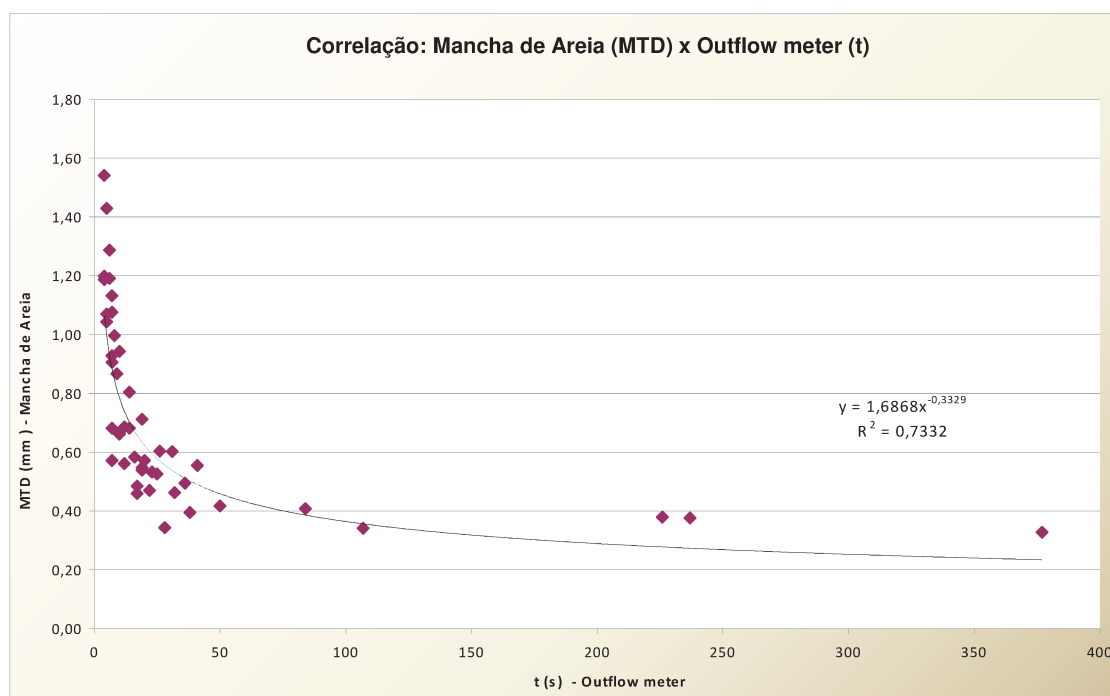


Figura 5.10 - Mancha de Areia (MTD em mm) x *Outflow meter* (tempo em segundos) (RIBEIRO et al, 2008)

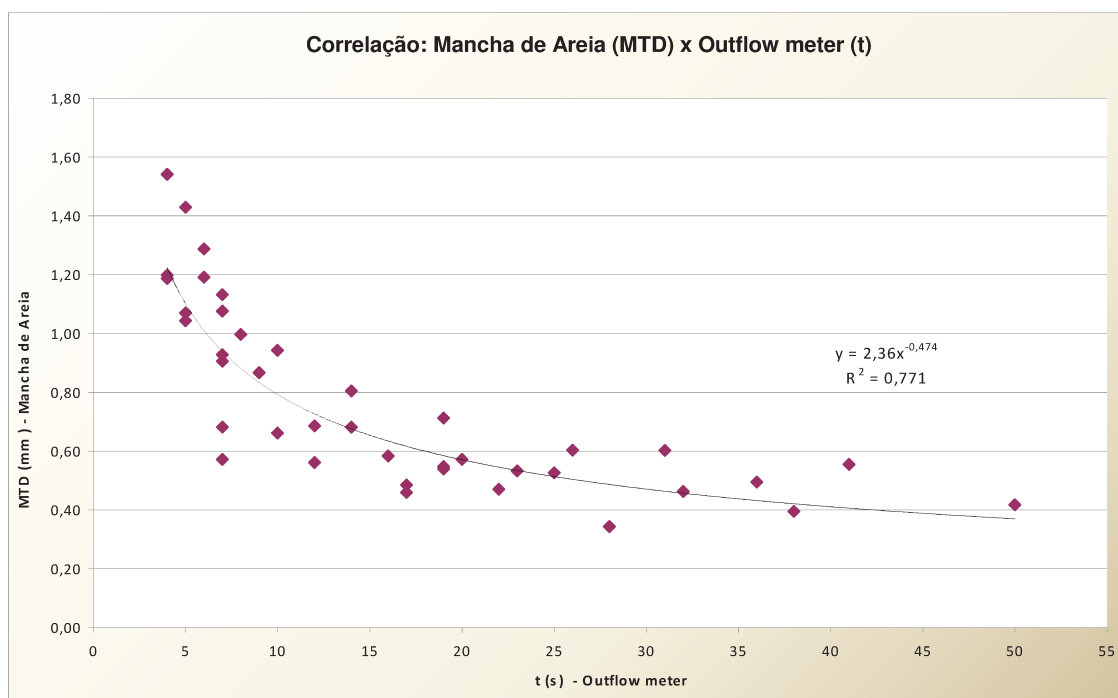


Figura 5.11 - Mancha de Areia (MTD em mm) x *Outflow meter* (tempo em segundos) - expurgando-se os pontos com o tempo de escoamento da água acima de 50 segundos (RIBEIRO et al, 2008)

Em 1995, o *Arizona Department of Transportation* (ADOT) iniciou projeto de pesquisa para identificar as alternativas de manutenção de pavimento adequadas, a serem avaliadas quanto ao desempenho e relação custo-benefício. Entre 1999 e 2002 mais de 200 seções de ensaio de pavimento asfáltico foram construídas em diferentes locais ao longo do Arizona para avaliação do desempenho dos diversos tipos de revestimentos betuminosos (PESHKIN, 2007).

Um dos locais do experimento foi a *State Route 66*, onde foram construídas 28 seções de teste. Nessa rodovia a macrotextura foi utilizada como critério de desempenho, medida utilizando-se um *outflow meter*, baseada em uma profundidade de textura média mínima (MTD), após construção, mantendo-se acima desse mínimo por 2 anos. Segundo Peshkin (2007), este provavelmente foi o melhor monitoramento de todos os locais de teste.

Um dos aspectos da pesquisa, citados por Peshkin (2007) é a identificação e especificação de uma ferramenta adequada para monitorar o desempenho do pavimento. O ADOT esperava utilizar seu recém-adquirido sistema de medição de textura de alta velocidade

para o monitoramento. No entanto, não funcionou e o acompanhamento do desempenho foi realizado com um *outflow meter* e com o *CTMeter*.

Moore (1969) cita em seu estudo que o *outflow meter* é considerado um indicador confiável da macro-geometria.

Yager e Buhlmann, (1982) avaliaram diversas técnicas de medição volumétrica e de drenagem para a classificação da macrotextura em 15 superfícies de concreto e de asfalto. Equações foram calculadas com base na análise de regressão linear, para indicar a relação entre os dados obtidos com três técnicas de medição da profundidade da macrotextura e dois dispositivos de drenagem *outflow meter* (um fornecido pelo FHWA e outro pelo ISETH)

A relação entre os dados da profundidade de textura da superfície e os dados de tempo de drenagem dos *outflow meters* encontrados por Yager e Buhlmann, (1982) apresentam que, em geral, o tempo de drenagem do *outflow meter* aumenta com a diminuição dos valores de profundidade de macrotextura da superfície. Os dados da mancha de graxa exibiram a maior sensibilidade, mas os dados de mancha de areia exibiram a melhor relação com os tempos de drenagem, conforme se pode observar nas figuras 5.12 e 5.13.

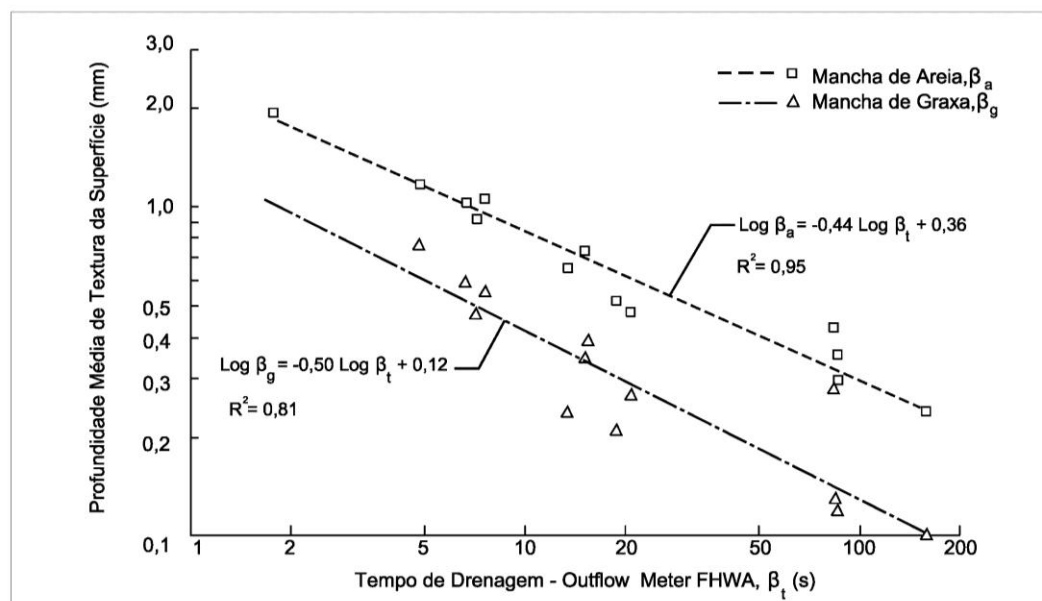


Figura 5.12 - Relação entre a profundidade de textura de superfície e as medidas de drenagem do FHWA *outflow meter* (adaptado de YAGER e BUHLMANN, 1982)

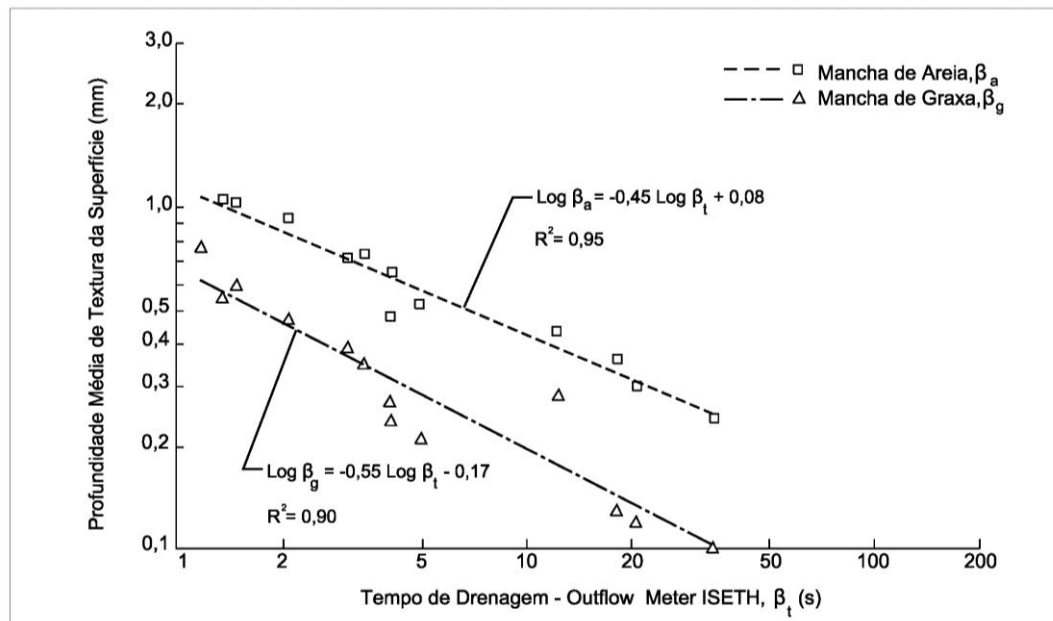


Figura 5.13 - Relação entre a profundidade de textura de superfície e medidas de drenagem do ISETH *outflow meter* (adaptado de YAGER e BUHLMANN, 1982)

Adicionalmente, Yager e Buhlmann, (1982) avaliaram o efeito de diversos acabamentos da superfície do pavimento e tratamentos da macrotextura de superfície (Figura 5.14) pela grande variação dos tempos de drenagem da água no FHWA *outflow meter*. As medições de drenagem foram obtidas em uma pista de concreto que foi construída em nível, tanto longitudinalmente como transversalmente, na NASA *Wallops Flight Center*.

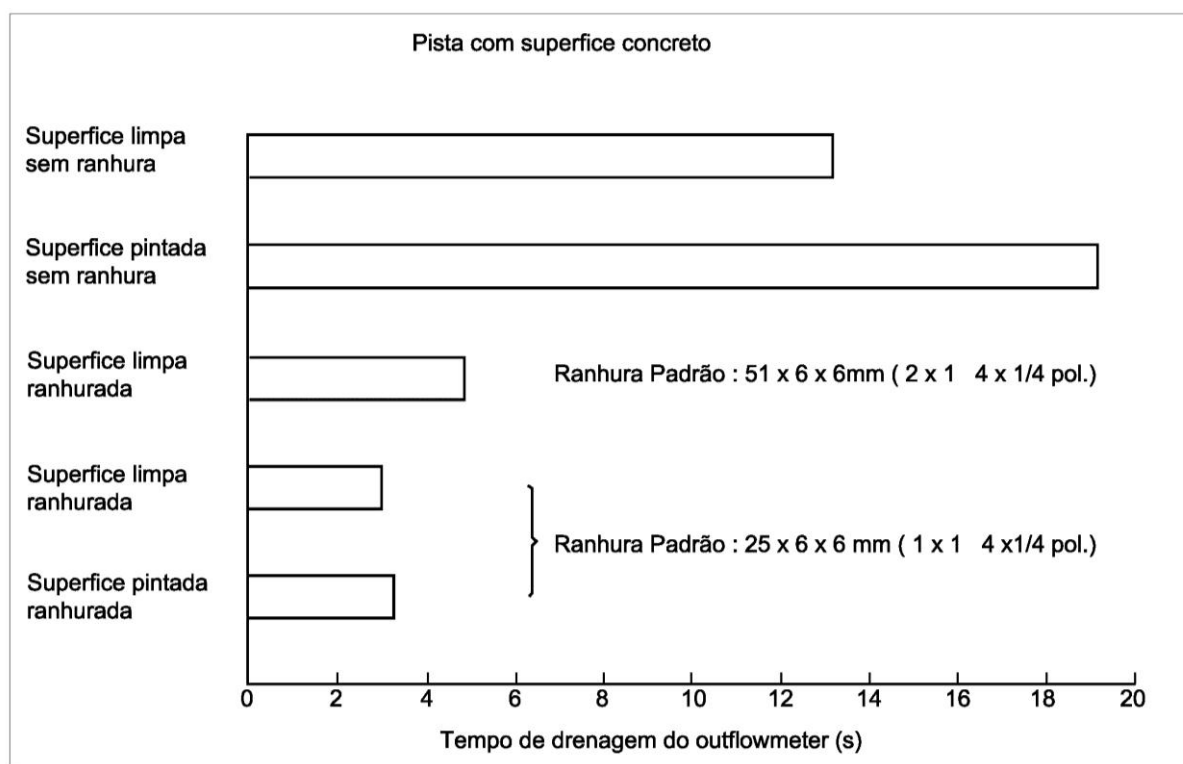


Figura 5.14 - Efeito de tratamentos de superfície nas medições de drenagem do *outflow meter* (YAGER e BUHLMANN, 1982)

Verificou-se que as marcas de pintura na pista central reduziram significativamente a macrotextura da superfície sem *grooving* (19 segundos contra 13 segundos) e que o *grooving* melhorou as taxas de drenagem superficial. Yager e Buhlmann, (1982) também constataram que o tempo de drenagem médio do *outflow meter* medido no padrão de groove espaçado 51 mm (2 pol.) foi de aproximadamente o dobro do que foi medido no padrão de groove espaçado 22 mm (1 pol.). A diferença de tempo de drenagem mostrada entre os dois padrões de groove, que diferiram apenas no espaçamento, pode ser parcialmente devido à colocação aleatória do *outflow meter* com relação à superfície de *groovers* uma vez que a abertura de descarga de água é de apenas 51 mm de diâmetro.

Em um estudo conduzido pela NASA, Wambold e Henry (2002) constataram uma forte correlação linear entre dois drenômetros diferentes (Figura 5.15), o que, de acordo com Aps (2006), mostra que certos aspectos geométricos destes equipamentos são facilmente contornáveis para a análise de resultados.

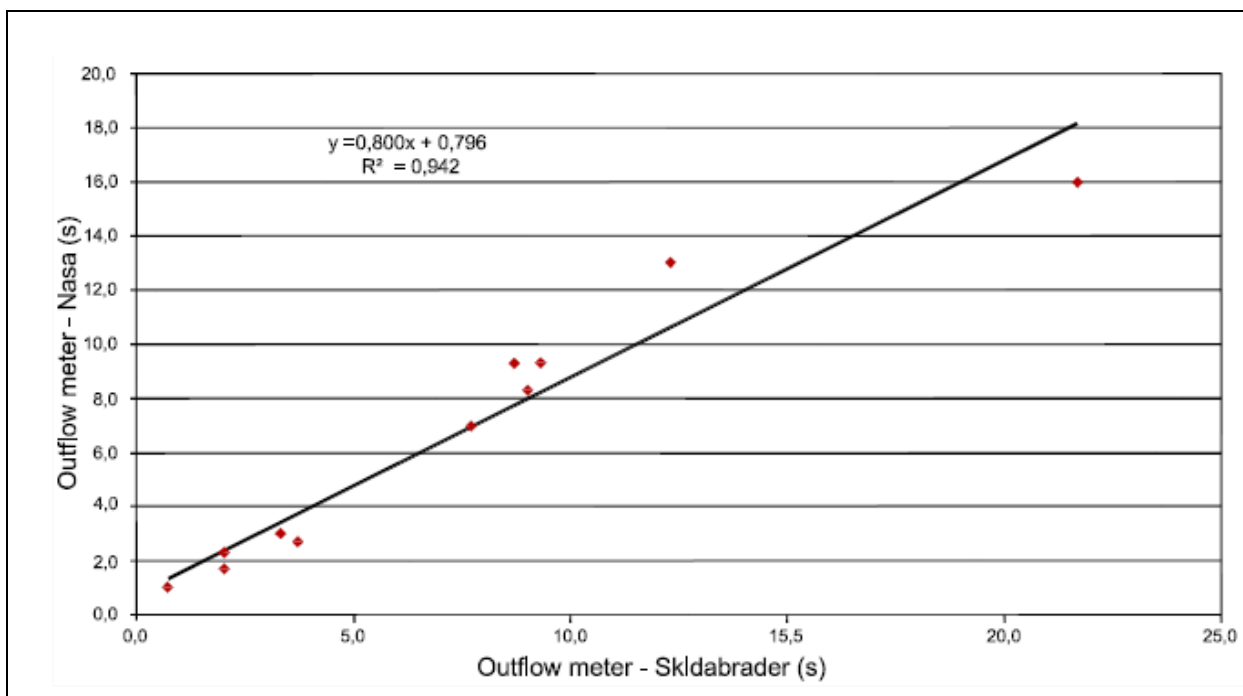


Figura 5.15 - Correlação entre dois diferentes drenômetros (Wambold e Henry, 2002)

De acordo com Hall et al (2009), as vantagens do *outflow meter* são a simplicidade do método, o custo relativamente baixo do equipamento e a indicação do potencial de hidroplanagem em pistas molhadas.

A Tabela 5.1 resume os métodos de ensaio utilizados pelas 45 agências norte americanas responsáveis para caracterizar a textura da superfície do pavimento. O quadro mostra que aproximadamente metade dos estados (vinte e três) não realiza testes de textura da superfície. Os demais estados normalmente usam um método de ensaio, sendo os mais comuns a Mancha de Areia e o Pêndulo Britânico. Quatro estados utilizam o drenômetro (*outflow meter*) para medir a textura da superfície do pavimento e cinco estados usam dois ou mais métodos.

Tabela 5.1 – Métodos de ensaio utilizados nos Estados Unidos para caracterizar a textura da superfície do pavimento (adaptado de HALL et al, 2009)

Método de Ensaio	Número de Agências
Mancha de Graxa	0
Mancha de Areia	15
Drenômetro (<i>outflow meter</i>)	4
Pêndulo Britânico	8
Dispositivo a Laser	2
Nenhum	23

No Brasil, o Departamento de Aviação Civil (2001), por meio da IAC 4302, recomenda para todos os aeródromos nacionais que as medições de textura superficial do pavimento sejam realizadas com base em ensaios volumétricos, pelo método da Mancha de Areia ou o método da Mancha de Graxa. O DNER (1998), responsável pelas rodovias federais e o DER-SP, responsável pelas rodovias paulistas também recomendam a utilização do ensaio de Mancha de Areia.

5.3 Considerações Finais

Diversos autores estudaram a correlação do *outflow meter* com outros métodos de medição da macrotextura do pavimento através da profundidade média do perfil (*Mean Profile Depth* - MPD) e da profundidade média de textura (*Mean Texture Depth* - MTD), tais como a mancha de areia, mancha de graxa e o *CTMeter*.

Os coeficientes de correlação obtidos entre o *outflow meter* e a mancha de areia variaram de 0,73 a 0,95 e os coeficientes obtidos entre o *outflow meter* e a mancha de graxa variaram de 0,81 a 0,90, em que se constatou que o *outflow meter* pode ser utilizado para a medição da macrotextura da superfície dos pavimentos.

As correlações obtidas entre o *outflow meter* e o *CTMeter* apresentaram variação dos valores de R^2 entre 0,75 e 0,95, sendo considerados como indicadores de boa correlação entre os dois métodos pelos respectivos autores.

6 METODOLOGIA DA PESQUISA

6.1 Introdução

Com o intuito de se estudar um novo método de ensaio no Brasil que possa ser empregado de forma sistemática em aeroportos brasileiros de pequeno e médio porte, como forma adicional de controlar a segurança operacional, primeiramente foram executados testes do ensaio com o equipamento do tipo *outflow meter* em quatro tipos de revestimentos distintos.

Posteriormente para a verificação da repetitividade e da reprodutividade do equipamento em estudo foram efetuados ensaios em três aeroportos de pequeno e médio porte do Estado de São Paulo.

Complementarmente, com vistas à correlação com o ensaio da mancha de areia, método tradicionalmente empregado no Brasil para medição de macrotextura, realizaram-se ensaios de mancha de areia nos mesmos locais em que foram obtidas as medidas de tempo com o equipamento do tipo *outflow meter*.

Também foi realizado um estudo teórico da influência da permeabilidade no ensaio de drenabilidade em questão e um e um estudo prático da influência da declividade no mesmo.

E, por fim, verificou-se a aplicabilidade e a consistência deste tipo de ensaio na caracterização dos pavimentos aeroportuários em termos de requisitos de segurança operacional de aeronaves.

6.2 Teste do Ensaio

Os recursos necessários para a execução do ensaio com o equipamento do tipo *outflow meter* são poucos. Basta o equipamento em si, um técnico para operá-lo e água, o que o torna um procedimento de baixo custo.

Para a execução do teste do ensaio foram selecionados quatro tipo distintos de revestimentos asfálticos, descritos a seguir, sendo realizados 5 ensaios em cada um destes:

- Concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ);
- *Open graded friction course* (OGFC);
- *Gap-graded*;
- Micro revestimento asfáltico.

Ressalta-se que todos os ensaios com o equipamento do tipo *outflow meter* foram realizados seguindo-se a metodologia subsequente:

- Seleção da superfície do pavimento a ser medida, de forma que a mesma seja uma área homogênea e sem características próprias, tais como pintura, buracos, fissuras, ou juntas.
- Colocação do equipamento sobre o pavimento a ser medido;
- Verificação da estabilidade e uniformidade do contato do anel de vedação de borracha com o pavimento;
- No primeiro teste, molha-se o anel de vedação do pistão;
- O pistão é empurrado para baixo de forma a vedar a saída da água;
- Enchimento do cilindro com água, de forma que o nível de água fique acima da boia superior, permitindo que as bolhas de ar aprisionadas entre a superfície do pavimento e

o pistão escapem, e que a água da superfície tenha a possibilidade de se estabelecer antes que o nível de água atinja a boia superior.

- O temporizador é zerado;
- O operador puxa o pistão do equipamento para cima, aplicando-se uma força contrária para baixo na alça.

As Figuras 6.1 a 6.8 demonstram a execução do ensaio com *outflow meter* nos diversos tipos de revestimentos ensaiados.



Figura 6.1 – Textura do CBUQ ensaiado



Figura 6.2 - Execução do ensaio com o *outflow meter* no CBUQ

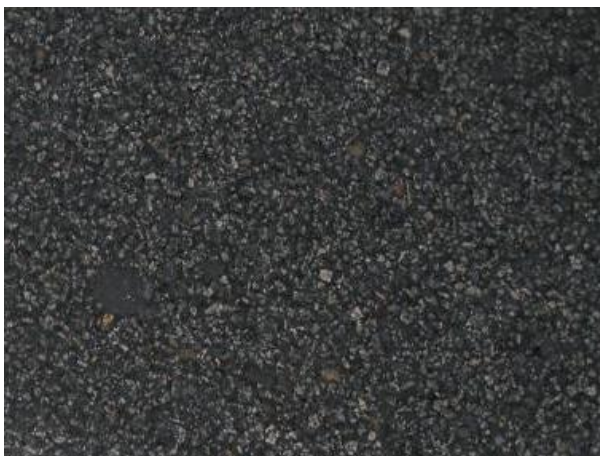


Figura 6.3 – Textura do OGFC ensaiado



Figura 6.4 - Execução do ensaio com o *outflow meter* no OGFC



Figura 6.5 – Textura do *gap-graded* ensaiado



Figura 6.6 - Execução do ensaio com o *outflow meter* no *gap-graded*



Figura 6.7 – Textura do micro revestimento asfáltico ensaiado



Figura 6.8 - Execução do ensaio com o *outflow meter* no micro revestimento asfáltico

6.3 Pesquisa de Repetitividade e Reprodutividade

De acordo com a *International Standard Organization* – ISO (1994), para a obtenção de um resultado confiável no ensaio de uma amostra, são necessários procedimentos que possibilitem a precisão do mesmo em sua realização. Esses procedimentos podem ser divididos basicamente na determinação de dois parâmetros: repetitividade e reprodutividade.

Ambas as normas ISO 5.725-2 (1994) e ASTM E691 (1992) definem o valor da repetitividade como o valor sob o qual a diferença absoluta entre dois resultados obtidos em condições de repetitividade apresenta 95% de probabilidade de ocorrer.

A reprodutividade reflete a variabilidade provocada pela mudança de avaliadores, períodos de tempo ou ajustes dos processos.

Deste modo, com o objetivo de se analisar a repetitividade e a reprodutividade do ensaio com o equipamento do tipo *outflow meter*, foram realizados ensaios em três aeroportos de pequeno e médio porte do Estado de São Paulo: Aeroporto Estadual Arthur Siqueira, no município de Bragança Paulista, Aeroporto Estadual Campo do Amarais, em Campinas e Aeroporto Estadual Bertram Luiz Leupolz, em Sorocaba.

Em cada um dos aeroportos estudados, os ensaios foram realizados dez vezes no mesmo local, sucessivamente, pelo mesmo operador, com vistas à análise de repetitividade. Para a análise de reprodutividade efetuaram-se trinta ensaios no mesmo local, com três operadores distintos, sendo que cada um executou dez ensaios.

Complementarmente, com vistas à análise de repetitividade e reprodutividade do ensaio da mancha de areia, atualmente recomendado, como padrão de determinação da macrotextura de pistas de aeroporto pela ANAC, realizaram-se dez ensaios pelo mesmo operador, no mesmo local (análise da repetitividade) e vinte ensaios por mais dois operadores distintos (análise da reprodutividade), totalizando trinta ensaios.

6.3.1 Aeroportos Estudados

Os três aeroportos selecionados para o estudo de caso atendem somente voos não regulares, sendo os mesmos descritos a seguir.

a) **Aeroporto Estadual Arthur Siqueira – Bragança Paulista**

- **Localização:** 3 km do centro do Município de Bragança Paulista. As Figuras 6.9 e 6.10 ilustram a vista aérea do Aeroporto Estadual Arthur Siqueira.



Figura 6.9 – Vista aérea do Aeroporto Estadual Arthur Siqueira (DAESP, 2012)



Figura 6.10 – Vista aérea do Aeroporto Estadual Arthur Siqueira (GOOGLE, 2012)

- **Tráfego de pouso e decolagem – Ano 2011:**

Tabela 6.1 – Tráfego de pouso e decolagem – Aeroporto Estadual Arthur Siqueira
(adaptado de DAESP, 2012)

Média Mensal			Total Anual
Voos Regulares	Voos Não Regulares	(Regulares + Não Regulares + Toque Arremetida)	(Regulares + Não Regulares + Toque Arremetida)
0	1.519	2.444	29.335

- **Pista de pouso e decolagem:**
 - **Extensão:** 1.200 metros;
 - **Largura:** 30 metros;
 - **Declividade transversal:** 1,5%;
 - **Tipo de revestimento:** concreto asfáltico.

b) Aeroporto Estadual Campo do Amarais - Campinas

- **Localização:** 8 km do centro do Município de Campinas. A Figura 6.11 ilustra a vista aérea do Aeroporto Estadual Campo do Amarais.



Figura 6.11 – Vista aérea do Aeroporto Estadual Campo do Amarais (DAESP, 2012)

- **Tráfego de pouso e decolagem – Ano 2011:**

Tabela 6.2 – Tráfego de pouso e decolagem – Aeroporto Estadual Campo do Amarais (adaptado de DAESP, 2012)

Média Mensal			Total Anual
Voos Regulares	Voos Não Regulares	(Regulares + Não Regulares + Toque Arremetida)	(Regulares + Não Regulares + Toque Arremetida)
0	2.079	3.954	47.457

- **Pista de pouso e decolagem:**
 - **Extensão:** 1.200 metros;
 - **Largura:** 30 metros;
 - **Tipo de revestimento:** concreto asfáltico.

c) Aeroporto Estadual Bertram Luiz Leupolz – Sorocaba

- **Localização:** 5 km do centro do Município de Sorocaba. A Figura 6.12 ilustra a vista aérea do Aeroporto Bertram Luiz Leupolz.



Figura 6.12 – Vista aérea do Aeroporto Estadual Bertram Luiz Leupolz (DAESP, 2012)

- **Tráfego de pouso e decolagem – Ano 2011:**

Tabela 6.3 – Tráfego de pouso e decolagem – Aeroporto Estadual Bertram Luiz Leupolz (adaptado de DAESP, 2012)

Média Mensal			Total Anual
Voos Regulares	Voos Não Regulares	(Regulares + Não Regulares + Toque Arremetida)	(Regulares + Não Regulares + Toque Arremetida)
0	2.209	5.449	65.395

- **Pista de pouso e decolagem:**
 - **Extensão:** 1.482 metros;
 - **Largura:** 30 metros;
 - **Tipo de revestimento:** concreto asfáltico.

6.3.2 Método do Ensaio

a) Repetitividade

De acordo com o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO (1995), repetitividade é o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, efetuadas sob as mesmas condições de medição, as quais são chamadas de condições de repetitividade, que incluem:

- Mesmo procedimento de medição;
- Mesmo observador;
- Mesmo instrumento de medição, utilizado nas mesmas condições;
- Mesmo local;
- Repetição em curto período de tempo.

A repetitividade pode ser expressa, quantitativamente, em função das características da dispersão dos resultados. O INMETRO (2003) sugere sete ou mais repetições para o cálculo do desvio padrão para cada concentração, chamado desvio padrão de repetitividade.

Assim, o método do ensaio para avaliação da repetitividade consistiu na seleção de um ponto em cada aeroporto estudado para a execução de 10 ensaios com o equipamento do tipo *outflow meter*, no mesmo local, realizados com o mesmo operador, em curto período de tempo.

Também foram realizados 10 ensaios de mancha de areia pelo mesmo operador, no mesmo local, com vistas à análise de repetitividade do ensaio.

As figuras 6.13 a 6.16 apresentam a execução dos ensaios com o equipamento *outflow meter* e dos ensaios de mancha de areia no Aeroporto Estadual Arthur Siqueira, em Bragança Paulista.



Figura 6.13 - Execução do ensaio com o *outflow meter* no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista



Figura 6.14 - Ensaio com o *outflow meter* no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista



Figura 6.15 - Execução do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista



Figura 6.16 - Detalhe do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista

As figuras 6.17 a 6.20 apresentam a execução os ensaios com o equipamento *outflow meter* e dos ensaios de mancha de areia no Aeroporto Estadual Campo do Amarais, em Campinas.



Figura 6.17 - Execução do ensaio com o *outflow meter* no Aeroporto Estadual de Campinas



Figura 6.18 - Detalhe do cronômetro do *outflow meter* no Aeroporto Estadual de Campinas



Figura 6.19 - Execução do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Campinas

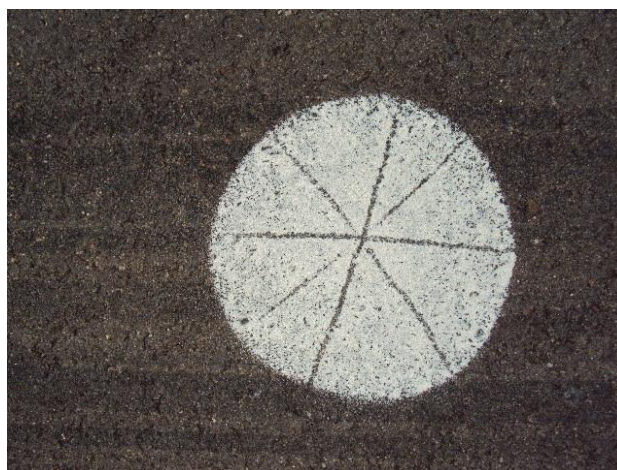


Figura 6.20 - Detalhe do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Campinas

As figuras 6.21 e 6.22 apresentam a execução os ensaios com o equipamento *outflow meter* e dos ensaios de mancha de areia no Aeroporto Estadual Bertram Luiz Leupolz, em Sorocaba.



Figura 6.21 - Execução do ensaio com o *outflow meter* no Aeroporto Estadual de Sorocaba



Figura 6.22 - Detalhe do ensaio da mancha de areia no Aeroporto Estadual de Sorocaba

b) Reprodutividade

Reprodutividade é o grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando, efetuadas sob condições variadas de medição (INMETRO, 1995).

Segundo Montgomery (2004), reprodutividade se refere à capacidade de diferentes avaliadores produzirem resultados consistentes quando utilizam os mesmos equipamentos e procedimentos.

Para a avaliação da reprodutividade foram utilizados os dez ensaios realizados com o equipamento do tipo *outflow meter* e os 10 ensaios executados pelo método da mancha de areia, com o mesmo operador (avaliação da repetitividade), além de outros vinte ensaios realizados por mais dois operadores diferentes (10 ensaios cada operador) , nos mesmos locais selecionados para o estudo da repetitividade (um local em cada aeroporto integrante deste estudo).

6.3.3 Método de Análise dos Resultados

Para realização da análise dos resultados coletados, inicialmente, faz-se a verificação da existência de valores que, eventualmente, possam ser considerados como dispersos, realizando-se a comparação dos resultados através da aplicação de quatro testes estatísticos: Dixon, Cochran, Grubbs e Snedecor.

O teste de Dixon tem por objetivo identificar valores afastados da amostra, de forma a estabelecer um critério para rejeição de valores extremos. É um teste bilateral, ou seja, são testados os valores mínimo e máximo.

Para um conjunto de resultados $Z(h)$, $h = 1, 2, \dots, H$, agrupados em ordem crescente, o Teste de Dixon utiliza equações em função do número de resultados obtidos, que no caso deste estudo foram trinta. Portanto, para o cálculo utilizam-se as equações 6.1 e 6.2.

$$D_{calc} = \frac{Z(3) - Z(1)}{Z(h-2) - Z(1)} \quad (6.1)$$

$$D_{calc} = \frac{Z(h) - Z(h-2)}{Z(h) - Z(3)} \quad (6.2)$$

O critério para a verificação da rejeição é descrito a seguir, sendo os valores críticos deste teste estatístico encontrados na Tabela 6.4.

- Se $D_{calculado} < D_{tabelado\ 5\%} \rightarrow$ o valor não é rejeitado;
- Se $D_{tabelado\ 1\%} > D_{calculado} > D_{tabelado\ 5\%} \rightarrow$ o valor é considerado suspeito ou estranho;
- Se $D_{calculado} > D_{tabelado\ 1\%} \rightarrow$ o valor é considerado disperso.

Tabela 6.4 – Valores críticos para o Teste de Dixon

H	5 %	1 %
3	0,970	0,994
4	0,829	0,926
5	0,710	0,821
6	0,628	0,740
7	0,569	0,680
8	0,608	0,717
9	0,564	0,672
10	0,530	0,635
11	0,502	0,605
12	0,479	0,579
13	0,611	0,697
14	0,586	0,670
15	0,565	0,647
16	0,546	0,627
17	0,529	0,610
18	0,514	0,594
19	0,501	0,580
20	0,489	0,567
21	0,478	0,555
22	0,468	0,544
23	0,459	0,535
24	0,451	0,526
25	0,443	0,517
26	0,436	0,510
27	0,429	0,502
28	0,423	0,495
29	0,417	0,489
30	0,412	0,483

No teste de Cochran, compara-se a maior variância de uma população de dados com a soma de todas as variâncias dessa população, para certa probabilidade. De acordo com Quilici (2006), sua aplicabilidade é para uma população maior ou igual a três conjuntos. O teste estatístico é obtido a partir da equação 6.3:

$$C = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^p S_i^2} \quad (6.3)$$

Onde:

C = estatística do Teste de Cochran;

S^2 = Maior variância encontrada;

p = número de conjuntos de uma população de dados.

Através da tabela de Cochran (Tabela 6.5) verifica-se qual é o valor de C tabelado em função do número de conjuntos (p) e do número de observações em cada grupo (n).

Tabela 6.5 – Valores críticos para o Teste de Cochran

p	n													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	16	36	144	∞
2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772	0,8534	0,8332	0,8159	0,8010	0,7880	0,7341	0,6602	0,5813	0,5000
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6771	0,6530	0,6333	0,6167	0,6025	0,5466	0,4748	0,4031	0,3333
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895	0,5598	0,5365	0,5175	0,5017	0,4884	0,4366	0,3720	0,3093	0,2500
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5441	0,5065	0,4783	0,4564	0,4387	0,4241	0,4118	0,3645	0,3066	0,2513	0,2000
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447	0,4184	0,3980	0,3817	0,3682	0,3568	0,3135	0,2612	0,2119	0,1667
7	0,7271	0,5612	0,4800	0,4307	0,3974	0,3726	0,3535	0,3384	0,3259	0,3154	0,2756	0,2278	0,1833	0,1429
8	0,6798	0,5157	0,4377	0,3910	0,3595	0,3362	0,3185	0,3043	0,2926	0,2829	0,2462	0,2022	0,1616	0,1250
9	0,6385	0,4775	0,4027	0,3584	0,3286	0,3067	0,2901	0,2768	0,2659	0,2568	0,2226	0,1820	0,1446	0,1111
10	0,6020	0,4450	0,3733	0,3311	0,3029	0,2823	0,2666	0,2541	0,2439	0,2353	0,2032	0,1655	0,1308	0,1000
12	0,5410	0,3924	0,3264	0,2880	0,2624	0,2439	0,2299	0,2187	0,2098	0,2020	0,1737	0,1403	0,1100	0,0833
15	0,4709	0,3346	0,2758	0,2419	0,2195	0,2034	0,1911	0,1815	0,1736	0,1671	0,1429	0,1144	0,0889	0,0667
20	0,3894	0,2705	0,2205	0,1921	0,1735	0,1602	0,1501	0,1422	0,1357	0,1303	0,1108	0,0879	0,0675	0,0500
24	0,3434	0,2654	0,1907	0,1656	0,1493	0,1374	0,1286	0,1216	0,1160	0,1113	0,9420	0,0743	0,0567	0,0417
30	0,2929	0,1980	0,1593	0,1377	0,1237	0,1137	0,1061	0,1002	0,0958	0,0921	0,0771	0,0604	0,0457	0,0333
40	0,2370	0,1576	0,1259	0,1082	0,0968	0,0887	0,0827	0,0780	0,0745	0,0713	0,0595	0,0462	0,0347	0,0250
60	0,1737	0,1131	0,0895	0,0765	0,0682	0,0623	0,0583	0,0552	0,0520	0,0497	0,0411	0,0316	0,0234	0,0167
120	0,0998	0,0632	0,0495	0,0419	0,0371	0,0337	0,0312	0,0292	0,0279	0,0266	0,0218	0,0165	0,0120	0,00830
∞	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

O critério para a verificação do Teste de Cochran, ou seja, da homogeneidade de variância entre os conjuntos é o seguinte:

- Se $C(\text{calculado}) > C(\text{tabelado}) \rightarrow$ Não há homogeneidade;
- Se $C(\text{calculado}) < C(\text{tabelado}) \rightarrow$ Há homogeneidade.

O teste de Grubbs detecta valores extremos de distribuições normais. Os dados testados são os valores mínimo e máximo. O resultado é uma probabilidade que indica se os dados pertencem ao núcleo de uma população de dados. O teste baseia-se na diferença entre a média da amostra e os dados mais extremos, considerando o desvio padrão.

Primeiramente verifica-se a existência de um valor disperso em cada extremidade do conjunto. Se nesta primeira análise, um dos dois valores for considerado disperso, ele é rejeitado, retirado do conjunto e então novo teste é realizado verificando-se a existência de um valor disperso em cada extremidade do conjunto, e assim sucessivamente. Caso se verifique a

existência de dois valores dispersos em cada extremidade do conjunto, o teste é então realizado para essa condição. Se nesta segunda análise os dois resultados de uma das extremidades forem considerados como dispersos, estes são rejeitados, retirados do conjunto, novo teste é aplicado e assim sucessivamente.

Dado um conjunto de resultados x_i , para $i=1, 2, \dots, p$, dispostos em ordem crescente, então para determinar se um determinado valor é um disperso, usando o teste de Grubbs, calcula-se as seguintes estatísticas:

Para testar o maior valor:

$$G_p = \frac{(x_p - \bar{x})}{S} \quad (6.4)$$

Para testar o menor valor:

$$G_1 = \frac{(\bar{x} - x_1)}{S} \quad (6.5)$$

Onde:

$\bar{x}$ = média aritmética do conjunto com todos os valores;

S = desvio padrão do conjunto com todos os valores.

O valor de G calculado (G_c) é comparado com um valor crítico tabelado (Tabela 6.6), em um nível de significância escolhido, sendo o critério de análise descrito a seguir:

- Se $G \text{ (calculado)} \leq G \text{ (tabelado)} 5\% \rightarrow$ o valor é aceito;
- Se $G \text{ (tabelado)} 5\% < G \text{ (calculado)} \leq G \text{ (tabelado)} 1\% \rightarrow$ o valor testado é denominado retardatário;
- Se $G \text{ (calculado)} > G \text{ (tabelado)} 1\% \rightarrow$ o valor é discrepante (*outlier*).

Tabela 6.6 – Valores críticos para o Teste de Grubbs (adaptado de ISO 5725-2, 1994)

p	Um valor		Dois valores		p	Um valor		Dois valores	
	1 %	5 %	1 %	5 %		1 %	5 %	1 %	5 %
3	1,155	1,155	-	-	22	3,060	2,758	0,3927	0,4711
4	1,496	1,481	0,000	0,000	23	3,087	2,781	0,4085	0,4857
5	1,764	1,715	0,002	0,009	24	3,112	2,802	0,4234	0,4994
6	1,973	1,887	0,012	0,035	25	3,135	2,822	0,4376	0,5123
7	2,139	2,020	0,031	0,071	26	3,157	2,841	0,451	0,5245
8	2,274	2,126	0,056	0,110	27	3,178	2,859	0,4638	0,536
9	2,387	2,215	0,085	0,149	28	3,199	2,876	0,4759	0,547
10	2,482	2,290	0,115	0,186	29	3,218	2,893	0,4875	0,5574
11	2,564	2,355	0,145	0,221	30	3,236	2,908	0,4985	0,5672
12	2,636	2,412	0,174	0,254	31	3,253	2,924	0,5091	0,5766
13	2,699	2,462	0,202	0,284	32	3,270	2,938	0,5192	0,5856
14	2,755	2,507	0,228	0,311	33	3,286	2,952	0,5288	0,5941
15	2,806	2,549	0,253	0,337	34	3,301	2,965	0,5381	0,6023
16	2,852	2,585	0,277	0,360	35	3,316	2,979	0,5469	0,6101
17	2,894	2,620	0,299	0,382	36	3,330	2,991	0,5554	0,6175
18	2,932	2,651	0,320	0,403	37	3,343	3,003	0,5636	0,6247
19	2,968	2,681	0,340	0,421	38	3,356	3,014	0,5714	0,6316
20	3,001	2,709	0,359	0,439	39	3,369	3,025	0,5789	0,6382
21	3,031	2,733	0,376	0,456	40	3,381	3,036	0,5862	0,6445

O teste de Snedecor, baseado na distribuição F, compara a variância de uma população de dados, duas a duas, para certa probabilidade. Isto é feito verificando se a variância de dois conjuntos da população de dados é igual para um desejado nível de confiança (95%). O teste estatístico é obtido a partir da equação 6.6, sendo $S_1^2 > S_2^2$:

$$F_{calc} = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (6.6)$$

Onde:

S^2 = variância de dois conjuntos da população de dados

A tabela de Snedecor (Tabela 6.7) indica qual é o valor de F tabelado para graus de liberdade do numerador e graus de liberdade do denominador. Foi utilizada a tabela de valores para a probabilidade p= 5%.

Tabela 6.7 – Distribuição F de Snedecor

Graus de liberdade no denominador	Graus de liberdade no numerador									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	240,54	241,88
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16
35	4,12	3,27	2,87	2,64	2,49	2,37	2,29	2,22	2,16	2,11
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08
45	4,06	3,20	2,81	2,58	2,42	2,31	2,22	2,15	2,10	2,05
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,20	2,13	2,07	2,03
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,10	2,03	1,97	1,93

O critério para a verificação a homogeneidade entre duas variâncias, através do Teste de Snedecor é o seguinte:

- Se $F(\text{tabelado}) > F(\text{calculado}) \rightarrow$ Há homogeneidade;
- Se $F(\text{tabelado}) < F(\text{calculado}) \rightarrow$ Não há homogeneidade.

Posteriormente, com vistas à verificação da repetitividade e reprodutividade do

equipamento, em conformidade com a norma ISO 5725-2 (1994) são calculadas as variâncias de repetitividade e reprodutividade, através das seguintes estatísticas:

- Variância da repetitividade (S_{rj}^2), através da equação 6.7:

$$S_{rj}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1) S_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1)} \quad (6.7)$$

Onde:

n_{ij} = número de resultados para o operador i no aeroporto j

S_{ij} = desvio padrão para o operador i no aeroporto j

- Variância entre laboratórios (S_{Lj}^2), através da equação 6.8:

$$S_{Lj}^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_{ij} (\bar{x}_{ij} - \bar{\bar{x}}_j)^2 \quad (6.8)$$

Em que:

$$S_{Lj}^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_{ij} (\bar{x}_{ij} - \bar{\bar{x}}_j)^2 \quad (6.9)$$

Onde:

$\bar{x}_{ij}$ = média dos resultados para o operador i no aeroporto j

$\bar{\bar{x}}_j$ = média geral dos resultados para o aeroporto j

p = número de operadores

- Variância da reprodutividade (S_{Rj}^2), através da equação 6.10:

$$S_{Rj}^2 = S_{rj}^2 + S_{Lj}^2 \quad (6.10)$$

Subsequentemente deve ser investigado se a precisão depende da média ($\bar{x}_{ij}$) e em caso positivo uma relação funcional deve ser determinada, utilizando-se o procedimento preconizado

pela ISO (1994) que estabelece três relações entre o desvio padrão da repetitividade (S_r) e a média obtida (m):

- **Reta passando pela Origem** – Equação I: $S_r = bm$
- **Reta interceptando a ordenada positiva** – Equação II: $S_r = a + bm$
- **Relação exponencial** – Equação III: $\log S_r = c + d \log m$

A tabela 6.8 apresenta o procedimento dos cálculos para obterem-se as três equações supracitadas.

Tabela 6.8 – Relação entre o desvio padrão da repetitividade e a média dos resultados

Equação I: $S_r = bm$	Equação II: $S_r = a + bm$	Equação III: $\log S_r = c + d \log m$
Onde: b = média de S_j/m_j S_r = desvio padrão da repetitividade S_j = desvio padrão m_j = média na célula	Onde: $a = \frac{T_3 T_4 - T_2 T_5}{T_1 T_3 T_2^2}$ $b = \frac{T_1 T_5 - T_2 T_4}{T_1 T_3 T_2^2}$ $T_1 = \sum_j W_j$ $T_2 = \sum_j W_j m_j$ $T_3 = \sum_j W_j m_j^2$ $T_4 = \sum_j W_j S_j$ $T_5 = \sum_j W_j m_j S_j$ $W_j = 1/S_j$	Onde: $c = \frac{T_2 T_3 - T_1 T_4}{q T_2 - T_1^2}$ $d = \frac{q T_4 - T_1 T_3}{q T_2 - T_1^2}$ $T_1 = \sum_j \log m_j$ $T_2 = \sum_j (\log m_j)^2$ $T_3 = \sum_j \log S_j$ $T_4 = \sum_j (\log m_j) \cdot (\log S_j)$

Para o cálculo da repetitividade um nível de confiança de 95%, a norma ASTM E691 (1992) sugere que se estime um parâmetro de precisão, de correlação com o desvio padrão, dado pela equação 6.11.

$$r = 2,8 * S_r \quad (6.11)$$

Onde:

r = valor de repetitividade;

S_r = desvio padrão de repetitividade.

Para se averiguar se o equipamento apresenta resultados que satisfaçam à condição de repetitividade recomendada pela ISO (1994) aplica-se a equação 6.12:

$$r'_e = \left(1 - \frac{E}{C}\right) \cdot 100 \quad (6.12)$$

Onde:

r' = valor da repetitividade obtida dos ensaios;

E = nº de diferenças entre leituras maiores que r ;

C = nº de diferenças totais entre as leituras, ou seja, combinação de n leituras, 2 a 2.

Utilizando-se a equação 6.13, define-se o intervalo de confiança com um nível de confiabilidade de 95% (Figura 6.23) para a estimativa obtida a partir dos valores dos ensaios realizados.

$$r_e = r'_e \pm \frac{z_\alpha}{2} \sqrt{\frac{r'_e(1 - r'_e)}{C}} \quad (6.13)$$

Onde:

r_e = valor da repetitividade real do equipamento;

r'_e = valor da repetitividade obtida dos ensaios;

z = multiplicativo do desvio padrão para determinação da envoltória de confiança, obtido a partir da Tabela 6.9.

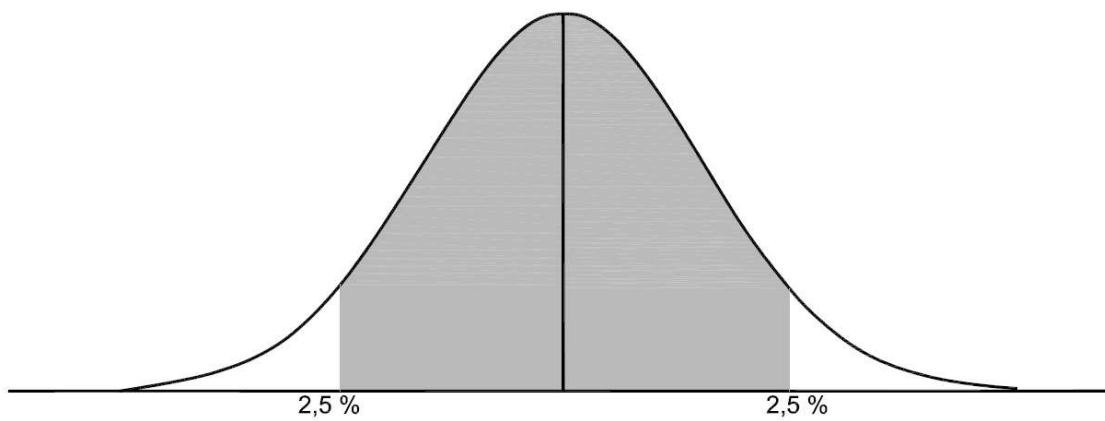


Figura 6.23 – Intervalo de confiança com confiabilidade de 95%

Tabela 6.9 – Distribuição Normal – valores de P ($0 \leq Z \leq z_0$)

z_0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0,0398	0,0438	0,0478	0,0517	0,0557	0,0596	0,0636	0,0675	0,0714	0,0753
0,2	0,0793	0,0832	0,0871	0,0910	0,0948	0,0987	0,1026	0,1064	0,1103	0,1141
0,3	0,1179	0,1217	0,1255	0,1293	0,1331	0,1368	0,1406	0,1443	0,1480	0,1517
0,4	0,1554	0,1591	0,1628	0,1664	0,1700	0,1736	0,1772	0,1808	0,1844	0,1879
0,5	0,1915	0,1950	0,1985	0,2019	0,2054	0,2088	0,2123	0,2157	0,2190	0,2224
0,6	0,2257	0,2291	0,2324	0,2357	0,2389	0,2422	0,2454	0,2486	0,2517	0,2549
0,7	0,2580	0,2611	0,2642	0,2673	0,2704	0,2734	0,2764	0,2794	0,2823	0,2852
0,8	0,2881	0,2910	0,2939	0,2967	0,2995	0,3023	0,3051	0,3078	0,3106	0,3133
0,9	0,3159	0,3186	0,3212	0,3238	0,3264	0,3289	0,3315	0,3340	0,3365	0,3389
1,0	0,3413	0,3438	0,3461	0,3485	0,3508	0,3531	0,3554	0,3577	0,3599	0,3621
1,1	0,3643	0,3665	0,3686	0,3708	0,3729	0,3749	0,3770	0,3790	0,3810	0,3830
1,2	0,3849	0,3869	0,3888	0,3907	0,3925	0,3944	0,3962	0,3980	0,3997	0,4015
1,3	0,4032	0,4049	0,4066	0,4082	0,4099	0,4115	0,4131	0,4147	0,4162	0,4177
1,4	0,4192	0,4207	0,4222	0,4236	0,4251	0,4265	0,4279	0,4292	0,4306	0,4319
1,5	0,4332	0,4345	0,4357	0,4370	0,4382	0,4394	0,4406	0,4418	0,4429	0,4441
1,6	0,4452	0,4463	0,4474	0,4484	0,4495	0,4505	0,4515	0,4525	0,4535	0,4545
1,7	0,4554	0,4564	0,4573	0,4582	0,4591	0,4599	0,4608	0,4616	0,4625	0,4633
1,8	0,4641	0,4649	0,4656	0,4664	0,4671	0,4678	0,4686	0,4693	0,4699	0,4706
1,9	0,4713	0,4719	0,4726	0,4732	0,4738	0,4744	0,4750	0,4756	0,4761	0,4767
2,0	0,4772	0,4778	0,4783	0,4788	0,4793	0,4798	0,4803	0,4808	0,4812	0,4817
2,1	0,4821	0,4826	0,4830	0,4834	0,4838	0,4842	0,4846	0,4850	0,4854	0,4857
2,2	0,4861	0,4864	0,4868	0,4871	0,4875	0,4878	0,4881	0,4884	0,4887	0,4890
2,3	0,4893	0,4896	0,4898	0,4901	0,4904	0,4906	0,4909	0,4911	0,4913	0,4916
2,4	0,4918	0,4920	0,4922	0,4925	0,4927	0,4929	0,4931	0,4932	0,4934	0,4936
2,5	0,4938	0,4940	0,4941	0,4943	0,4945	0,4946	0,4948	0,4949	0,4951	0,4952
2,6	0,4953	0,4955	0,4956	0,4957	0,4959	0,4960	0,4961	0,4962	0,4963	0,4964
2,7	0,4965	0,4966	0,4967	0,4968	0,4969	0,4970	0,4971	0,4972	0,4973	0,4974
2,8	0,4974	0,4975	0,4976	0,4977	0,4977	0,4978	0,4979	0,4979	0,4980	0,4981
2,9	0,4981	0,4982	0,4982	0,4983	0,4984	0,4984	0,4985	0,4985	0,4986	0,4986
3,0	0,4987	0,4987	0,4987	0,4988	0,4988	0,4989	0,4989	0,4989	0,4990	0,4990
3,1	0,4990	0,4991	0,4991	0,4991	0,4992	0,4992	0,4992	0,4992	0,4993	0,4993
3,2	0,4993	0,4993	0,4994	0,4994	0,4994	0,4994	0,4994	0,4995	0,4995	0,4995
3,3	0,4995	0,4995	0,4995	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4996	0,4997
3,4	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4997	0,4998
3,5	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998	0,4998
3,6	0,4998	0,4998	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,7	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,8	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999	0,4999
3,9	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000

Esse procedimento possibilita identificar fatores que causam maior variabilidade no ensaio, de maneira a se manter os valores de dispersão das medidas em um nível aceitável.

6.4 Correlação com a Mancha de Areia

Tendo em vista que o método da mancha de areia é tradicionalmente empregado no Brasil para a medição da macrotextura do pavimento e que atualmente é recomendado pela ANAC como padrão de determinação da macrotextura de pistas de aeroporto, realizou-se um estudo comparativo entre a medida indireta de macrotextura obtida por meio da drenabilidade superficial do pavimento com o equipamento do tipo *outflow meter* e a macrotextura obtida com o ensaio de mancha de areia.

Os ensaios foram realizados nas pistas de pouso e decolagem, a uma distância de 3 metros do eixo, com espaçamento de 100 em 100 metros alternados, ou seja, a cada 200 metros de um mesmo lado em relação ao eixo da pista, conforme recomendado pelo DAC (2001). Em ambos os métodos, os ensaios foram executados exatamente nos mesmos locais.

Complementarmente, foram realizados ensaios pelo método da mancha de areia nos mesmos pontos em que foi efetuado o teste do ensaio com o equipamento *outflow meter*, nos quatro tipos de revestimentos: CBUQ, OGFC, Gap-graded e micro revestimento asfáltico.

6.5 Informações sobre a Influência da Permeabilidade e da Declividade no Ensaio de Drenabilidade

6.5.1 Permeabilidade

Segundo Caputo (1973), permeabilidade é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo o seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade.

Com vistas a um estudo teórico da influência da permeabilidade no ensaio de drenabilidade em questão, foi realizado um comparativo da ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade de misturas betuminosas com a velocidade de escoamento superficial obtida com o drenômetro.

A Tabela 6.10 apresenta a classificação em termos de permeabilidade, em relação às misturas betuminosas, de acordo com Zoorob (2002 apud O'FLAHERTY, 2002).

Tabela 6.10 – Classificação das misturas betuminosas em termos de permeabilidade (ZOO ROB, 2002 apud O'FLAHERTY, 2002)

K (cm/s)	Permeabilidade
1×10^{-8}	Impermeável
1×10^{-6}	Praticamente impermeável
1×10^{-4}	Drenagem baixa
1×10^{-2}	Drenagem razoável
1×10^{-1}	Drenagem alta

Adotou-se um tempo médio obtido com o *outflow meter* nos aeroportos levantados e, sabendo-se a área do orifício de saída da água do drenômetro e o volume de água do equipamento, foram obtidas uma vazão e uma velocidade de escoamento superficial da água.

Assim, foi possível comparar a velocidade de escoamento superficial da água com um parâmetro teórico do coeficiente de permeabilidade para misturas betuminosas (com drenagem razoável, conforme Tabela 6.10).

6.5.2 Declividade Transversal da Pista

Com o objetivo de se verificar a influência da declividade no ensaio de drenabilidade com equipamento do tipo *outflow meter* foram realizados ensaios no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em uma placa de revestimento asfáltico retirada da Avenida Lineu de Paula, em São Paulo. A placa é retangular, com dimensões de 70 cm por 65 cm, em concreto betuminoso usinado a quente na espessura de 12 cm. Os ensaios foram executados com declividades da placa variando de 0 a 10%, sendo que para cada declividade efetuou-se três repetições do ensaio. As Figuras 6.24 a 6.27 demonstram a execução dos ensaios.



Figura 6.24 – Nivelamento da placa de CBUQ para realização do ensaio de drenabilidade.



Figura 6.25 - Ensaio de drenabilidade – inclinação da placa de CBUQ de 0%



Figura 6.26 – Resultado do ensaio de drenabilidade na placa de CBUQ.



Figura 6.27 – Ensaio de drenabilidade – inclinação da placa de CBUQ de 10%.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Teste do Ensaio

A Figura 7.1, apresentada a seguir, ilustra os tempos obtidos com o *outflow meter* para cada tipo de revestimento estudado.

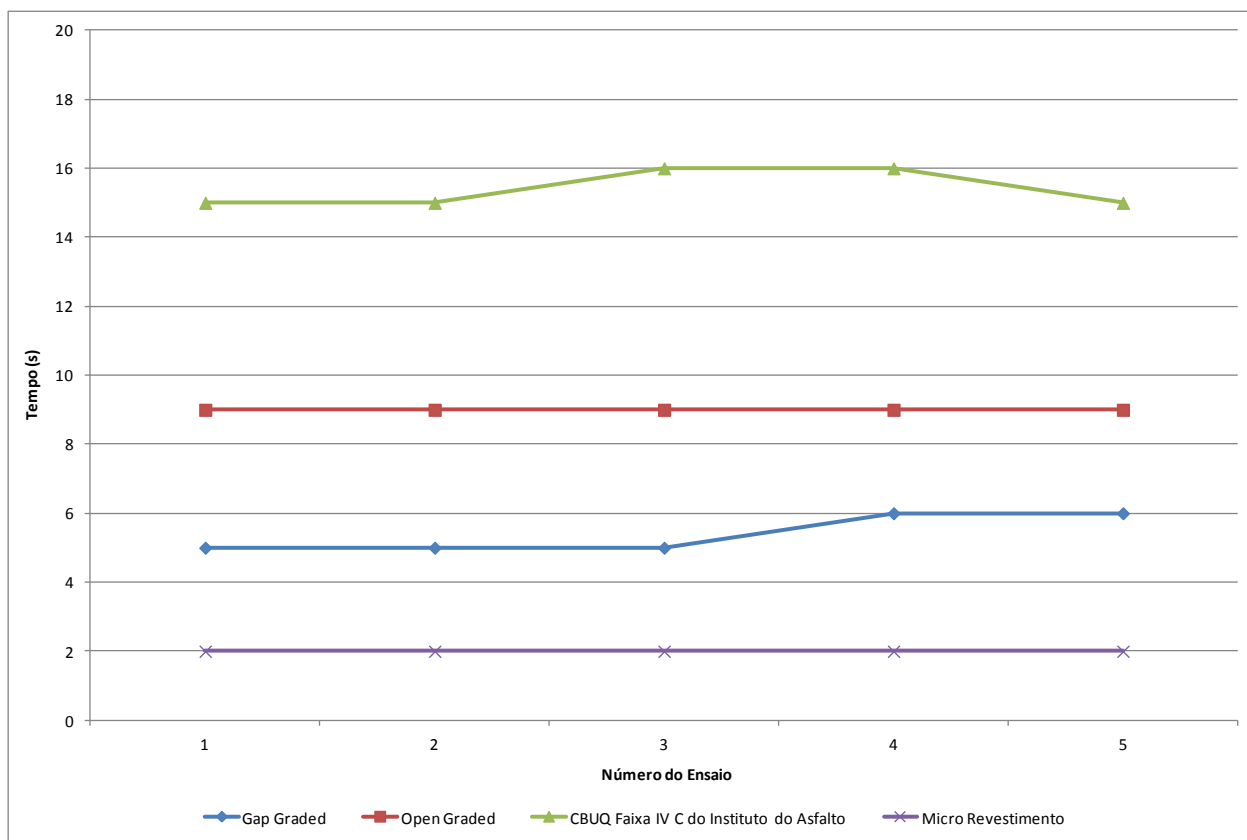


Figura 7.1 – Teste do Ensaio – Diversos tipos de revestimentos

O tempo de escoamento da água no CBUQ ficou na faixa de 15 a 16 segundos, em função de sua textura mais fechada. Para as texturas teoricamente consideradas abertas, *Open Graded* e o *Gap Graded*, foram obtidos tempos de escoamento da água nas faixas de 9 segundos e 5 a 6 segundos, respectivamente. Já o tempo de escoamento da água obtido no micro revestimento asfáltico foi de 2 segundos, o que surpreendeu, pois teoricamente seu tempo seria mais elevado que o do revestimento do tipo *Open Graded* em função de sua textura. No entanto, ressalta-se que na data da realização dos ensaios, o micro revestimento ainda não havia sido aberto para o tráfego e que as características do agregado e granulometria do *Open Graded* testado fazem com que sua textura não seja tão aberta.

Verificou-se que o ensaio é simples, com duração de aproximadamente 5 minutos, sendo realizado com sucesso por diversas pessoas e compreendido por diversos técnicos sem qualquer tipo de dificuldade, não gerando dúvidas na coleta de resultados.

7.2 Repetitividade e Reprodutividade

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o equipamento do tipo *outflow meter* e pelo método da mancha de areia.

7.2.1 Outflow Meter

A Tabela 7.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados com o equipamento do tipo *outflow meter*, para cada aeroporto estudado, sendo executados com três operadores distintos, cada qual com dez determinações.

Tabela 7.1 – Resultados obtidos nos ensaios com o *outflow meter*

Aeroporto Estadual de Bragança Paulista														
Operador	Repetição (s)										Tempo Médio (s)	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Variância
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	34	33	33	36	37	37	34	35	36	36	35,1	1,52	0,04	2,32
2	35	33	35	37	35	34	31	33	34	36	34,3	1,70	0,05	2,90
3	33	34	34	32	35	34	33	35	36	34	34,0	1,15	0,03	1,33

Aeroporto Estadual de Campinas														
Operador	Repetição (s)										Tempo Médio (s)	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Variância
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	16	16	16	16	17	17	17	17	17	17	16,6	0,52	0,03	0,27
2	17	17	17	17	17	18	18	18	18	18	17,5	0,53	0,03	0,28
3	16	15	15	16	16	15	15	16	16	16	15,6	0,52	0,03	0,27

Aeroporto Estadual de Sorocaba														
Operador	Repetição (s)										Tempo Médio (s)	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Variância
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	25	25	24	25	24	26	26	25	25	24	24,9	0,74	0,03	0,54
2	26	25	26	26	27	25	24	25	25	24	25,3	0,95	0,04	0,90
3	24	25	25	23	26	25	24	25	26	25	24,8	0,92	0,04	0,84

Observa-se que os coeficientes de variação das medidas realizadas com o *outflow meter* apresentam valores entre 3% a 5%, indicando uma baixa variação do desvio padrão em relação à média. Percebe-se também que a variação desse coeficiente é semelhante independente do operador que utilizou o equipamento.

As Tabelas 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 apresentam os resultados dos Testes de Dixon, Cochran, Grubbs e Snedecor, respectivamente.

Tabela 7.2 – Resultados obtidos no Teste de Dixon para os ensaios com *outflow meter*

Descrição	Aeroporto		
	Bragança Paulista	Campinas	Sorocaba
Zn	0,000	0,000	0,333
Z1	0,333	0,000	0,333
Valor crítico tabelado	0,412	0,412	0,412
Resultado	Não rejeitado	Não rejeitado	Não rejeitado

Tabela 7.3 – Resultados obtidos no Teste de Cochran para os ensaios com *outflow meter*

Aeroporto	Operador	Variância (S^2)	C (calculado)	C (tabelado)	Resultado
Bragança Paulista	1	2,32	0,44	0,6025	homogêneo
	2	2,90			
	3	1,33			
Campinas	1	0,27	0,34	0,6025	homogêneo
	2	0,28			
	3	0,27			
Sorocaba	1	0,54	0,39	0,6025	homogêneo
	2	0,90			
	3	0,84			
Para: p = 3 n = 10					

Tabela 7.4 – Resultados obtidos no Teste de Grubbs para os ensaios com *outflow meter*

Descrição	Aeroporto		
	Bragança Paulista	Campinas	Sorocaba
Média	34,467	16,567	25,033
Desvio Padrão	1,502	0,935	0,809
G_p	1,686	1,533	2,432
G_l	2,307	1,675	1,278
$G_{5\%}$ (tabelado)	2,908	2,908	2,908
$G_{1\%}$ (tabelado)	3,236	3,236	3,236
Resultado	Valor aceito	Valor aceito	Valor aceito

Tabela 7.5 – Resultados obtidos no Teste de Snedecor para os ensaios com *outflow meter*

Aeroporto	Variância			
	Combinação	Calculada	Tabelada	Resultado
Bragança Paulista	1 e 2	1,249	3,18	homogêneo
	1 e 3	1,742	3,18	homogêneo
	2 e 3	2,175	3,18	homogêneo
Campinas	1 e 2	1,042	3,18	homogêneo
	1 e 3	1,000	3,18	homogêneo
	2 e 3	0,960	3,18	homogêneo
Sorocaba	1 e 2	1,653	3,18	homogêneo
	1 e 3	1,551	3,18	homogêneo
	2 e 3	0,938	3,18	homogêneo

Verifica-se que pelos testes estatísticos de Dixon, Cochran, Grubbs e Snedecor nenhum resultado foi rejeitado, apresentando compatibilidade de resultados e comprovando a homogeneidade dos mesmos.

Os cálculos das variâncias de repetitividade e reprodutividade, em conformidade com a Norma ISO 5725, são apresentados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Valores das variâncias da repetitividade e reprodutividade - equipamento *outflow meter*

Aeroporto	Operador	Média ($\bar{x}$)	Média Geral ($\bar{\bar{x}}$)	Desv Pad (S _r)	S _r ²	S _d ²	S _L ²	S _R ²	S _r	S _R
Bragança	1	35,100	34,467	1,524	2,322	3,233	0,091	2,413	1,524	1,553
	2	34,300		1,703	2,900		0,033	2,933	1,703	1,713
	3	34,000		1,155	1,333		0,190	1,523	1,155	1,234
Campinas	1	16,600	16,567	0,516	0,267	9,033	0,877	1,143	0,516	1,069
	2	17,500		0,527	0,278		0,876	1,153	0,527	1,074
	3	15,600		0,516	0,267		0,877	1,143	0,516	1,069
Sorocaba	1	24,900	25,000	0,738	0,544	0,700	0,016	0,560	0,738	0,748
	2	25,300		0,949	0,900		0,000	0,900	0,949	0,949
	3	24,800		0,919	0,844		0,000	0,844	0,919	0,919

Os dados da tabela 7.6 indicam que a precisão não depende da média, podendo ser usados valores médios do desvio. Assim, as médias podem ser tomadas como valores finais para os desvios padrão de repetitividade e reprodutividade.

Para aplicações práticas os valores de precisão do método de medição podem ser considerados como independentes da textura do pavimento, sendo:

Desvio padrão de repetitividade $S_r=0,95$ segundos

Desvio padrão de reprodutividade $S_R=1,15$ segundos

Aplicando-se a equação 6.12, foram obtidos os valores de repetitividade apresentados na Tabela 7.7. Observa-se que para os três aeroportos estudados e para todos os operadores integrantes do estudo obtiveram-se valores de repetitividade acima de 95%, o que atende o especificado pela ISO 5725-2, ou seja, os resultados dos ensaios realizados demonstram que o equipamento *outflow meter* apresenta adequada repetitividade.

Tabela 7.7 – Valores da repetitividade obtida nos ensaios com *outflow meter*

Aeroporto	Operador	r	E	C	r_e'	Valor da Repetitividade
Bragança Paulista	1	4,139	0	100	100%	> 95%
	2	4,139	4	100	96%	
	3	4,139	0	100	100%	
Campinas	1	1,456	0	100	100%	> 95%
	2	1,456	0	100	100%	
	3	1,456	0	100	100%	
Sorocaba	1	2,446	0	100	100%	> 95%
	2	2,446	4	100	96%	
	3	2,446	4	100	96%	

Para o cálculo do intervalo de confiança com uma confiabilidade de 95%, aplicou-se a equação 6.13, obtendo-se valor da repetitividade real do equipamento, conforme apresentado na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 – Valores da repetitividade do equipamento *outflow meter*

Aeroporto	Operador	C	z_0	r_e
Bragança Paulista	1	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
	2	100	1,96	$(96 \pm 4) \%$
	3	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
Campinas	1	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
	2	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
	3	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
Sorocaba	1	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
	2	100	1,96	$(96 \pm 4) \%$
	3	100	1,96	$(96 \pm 4) \%$

7.2.2 Mancha de Areia

A Tabela 7.9 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados pelo método da mancha de areia, para cada aeroporto estudado, sendo executados com três operadores, cada qual com dez determinações. A análise da repetitividade foi realizada em função dos diâmetros da mancha de areia medidos em campo.

Tabela 7.9 – Resultados obtidos nos ensaios pelo método da mancha de areia

Aeroporto Estadual de Bragança Paulista														
Operador	Repetição (cm)										Diâmetro Médio (cm)	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Variância
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	25,18	24,65	25,23	24,78	24,83	25,35	25,13	25,58	25,13	25,33	25,115	0,287	0,01	0,08
2	24,90	25,35	24,85	24,93	25,40	25,65	25,28	25,93	25,60	25,90	25,378	0,397	0,02	0,16
3	25,58	26,10	26,43	26,53	26,48	26,55	26,15	26,95	27,33	26,65	26,473	0,477	0,02	0,23
Aeroporto Estadual de Campinas														
Operador	Repetição (cm)										Diâmetro Médio (cm)	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Variância
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	22,75	23,18	23,40	23,38	23,63	23,73	23,38	23,70	23,48	23,65	23,4250	0,29	0,01	0,09
2	25,25	26,58	28,05	28,20	28,55	27,20	28,53	28,18	25,45	26,75	27,2725	1,23	0,05	1,52
3	22,33	22,83	23,80	24,55	25,18	25,38	25,83	26,00	26,00	26,55	24,8425	1,44	0,06	2,06
Aeroporto Estadual de Sorocaba														
Operador	Repetição (cm)										Diâmetro Médio (cm)	Desvio Padrão	Coef. de Variação	Variância
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
1	24,13	24,02	23,35	23,58	23,68	23,38	24,15	23,75	23,93	23,83	23,7765	0,29	0,01	0,08
2	23,65	25,00	23,68	25,25	24,75	23,75	25,68	26,05	25,50	25,75	24,9055	0,92	0,04	0,84
3	24,45	23,30	25,75	24,15	23,70	24,25	25,18	26,35	25,75	25,40	24,8275	1,00	0,04	1,00

Os percentuais do coeficiente de variação do desvio padrão em relação à média dos diâmetros determinados no ensaio de mancha de areia se apresentam entre 1% e 6%. Entretanto, embora os resultados sejam baixos, mostrando pequena variação nos números finais, observa-se que a diferença nas variações constatadas com os distintos operadores é significativa. O coeficiente de variação dos resultados do operador 1, mais experiente e acostumado a realizar este tipo de ensaio, foi de 1% no três aeroportos estudados. Já os operadores 2 e 3 apresentaram coeficientes variando de 2 a 6%.

As Tabelas 7.10, 7.11, 7.12 e 7.13 apresentam os resultados dos Testes de Dixon, Cochran, Grubbs e Snedecor, respectivamente para os ensaios realizados pelo método da mancha de areia.

Tabela 7.10 – Resultados obtidos no Teste de Dixon para os ensaios de Mancha de Areia

Descrição	Aeroporto		
	Bragança Paulista	Campinas	Sorocaba
Zn	0,270	0,061	0,202
Z1	0,088	0,085	0,031
Valor crítico tabelado	0,412	0,412	0,412
Resultado	Não rejeitado	Não rejeitado	Não rejeitado

Tabela 7.11 – Resultados obtidos no Teste de Cochran para os ensaios de Mancha de Areia

Aeroporto	Operador	Variância (S^2)	C (calculado)	C (tabelado)	Resultado
Bragança Paulista	1	0,08	0,49	0,6025	homogêneo
	2	0,16			
	3	0,23			
Campinas	1	0,09	0,56	0,6025	homogêneo
	2	1,52			
	3	2,06			
Sorocaba	1	0,08	0,52	0,6025	homogêneo
	2	0,84			
	3	1,00			
Para: p = 3 n = 10					

Tabela 7.12 – Resultados obtidos no Teste de Grubbs para os ensaios de Mancha de Areia

Descrição	Aeroporto		
	Bragança Paulista	Campinas	Sorocaba
Média	25,655	25,180	24,503
Desvio Padrão	0,709	1,936	0,933
G_p	2,356	1,741	1,979
G_l	1,418	1,475	1,289
$G_{5\%}$ (tabelado)	2,908	2,908	2,908
$G_{1\%}$ (tabelado)	3,236	3,236	3,236
Resultado	Valor aceito	Valor aceito	Valor aceito

Tabela 7.13 – Resultados obtidos no Teste de Snedecor para os ensaios de Mancha de Areia

Aeroporto	Variância			
	Combinação	Calculada	Tabelada	Resultado
Bragança Paulista	1 e 2	1,911	3,18	homogêneo
	1 e 3	2,754	3,18	homogêneo
	2 e 3	1,441	3,18	homogêneo
Campinas	1 e 2	17,453	3,18	não homogêneo
	1 e 3	23,687	3,18	não homogêneo
	2 e 3	0,737	3,18	homogêneo
Sorocaba	1 e 2	10,255	3,18	não homogêneo
	1 e 3	12,223	3,18	não homogêneo
	2 e 3	1,192	3,18	homogêneo

Observa-se que pelos testes de Dixon, Cochran e Grubbs nenhum resultado foi considerado como uma discrepância (*outliers*). No entanto, o teste de Snedecor indicou a heterogeneidade entre as variâncias, principalmente na combinação do operador 1 com os outros operadores (2 e 3). Percebe-se na Tabela 7.13 que a variância dos dados obtidos com o operador 1 é significativamente menor que a variância dos dados obtidos pelos operadores 2 e 3. Isso pode ser explicado pela experiência dos operadores no ensaio em questão. O operador 1 tem vasta experiência neste ensaio, o operador 2 tem relativa experiência e o operador 3 tem pouca prática no ensaio.

Os cálculos das variâncias de repetitividade e reprodutividade, conforme preconizado na Norma ISO 5725, são apresentados na Tabela 7.14.

Tabela 7.14 – Valores das variâncias da repetitividade e reprodutividade – mancha de areia

Aeroporto	Operador	Média ($\bar{x}$)	Média Geral ($\bar{\bar{x}}$)	DesvPad (S_r)	S_r^2	S_d^2	S_L^2	S_R^2	S_r	S_R
Bragança	1	25,115	25,655	0,287	0,083	5,185	0,510	0,593	0,287	0,770
	2	25,378		0,397	0,158		0,503	0,660	0,397	0,813
	3	26,473		0,477	0,227		0,496	0,723	0,477	0,850
Campinas	1	23,425	25,180	0,295	0,087	37,862	3,778	3,864	0,295	1,966
	2	27,273		1,232	1,517		3,635	5,152	1,232	2,270
	3	24,843		1,435	2,059		3,580	5,640	1,435	2,375
Sorocaba	1	23,777	24,503	0,286	0,082	3,975	0,389	0,471	0,286	0,686
	2	24,905		0,916	0,840		0,314	1,153	0,916	1,074
	3	24,828		1,000	1,001		0,297	1,298	1,000	1,139

Os dados da Tabela 7.14 indicam que a precisão não depende da média dos resultados, podendo ser usados valores médios dos desvios. Assim, as médias podem ser tomadas como valores finais para os desvios padrão de repetitividade e reprodutividade.

Para aplicações práticas os valores de precisão do método de medição podem ser considerados como independentes da textura do pavimento, sendo:

Desvio padrão de repetitividade $S_r=0,7$ cm

Desvio padrão de reprodutividade $S_R=1,33$ cm

Aplicando-se a equação 6.12, foram obtidos os valores de repetitividade apresentados na Tabela 7.15.

Tabela 7.15 – Valores da repetitividade obtida nos ensaios pelo método da mancha de areia

Aeroporto	Operador	r	E	C	r_e'	Valor da Repetitividade
Bragança Paulista	1	1,11	0	100	100%	> 95%
	2	1,11	0	100	100%	> 95%
	3	1,11	4	100	91%	< 95%
Campinas	1	3,09	0	100	100%	> 95%
	2	3,09	7	100	84%	< 95%
	3	3,09	5	100	89%	< 95%
Sorocaba	1	2,24	0	100	100%	> 95%
	2	2,24	3	100	93%	< 95%
	3	2,24	4	100	91%	< 95%

Observa-se que o valor de repetitividade dos ensaios realizados pelo operador 1 foi de 100%, atendendo o especificado pela ISO 5725-2. Já os valores de repetitividade dos ensaios realizados pelos operadores 2 e 3 apresentaram-se abaixo de 95%, com exceção do operador 2 no Aeroporto Estadual de Bragança Paulista, o que não atende a referida norma. Tal fato em função da dificuldade de se ter boa repetitividade neste ensaio, sendo o resultado final condicionado ao operador que realiza as medições. No caso em questão o operador 1 possui grande prática neste ensaio e os operadores 2 e 3 têm média e pouca experiência respectivamente.

Para o cálculo do intervalo de confiança com uma confiabilidade de 95%, aplicou-se a equação 6.13, obtendo-se a repetitividade real do ensaio, conforme apresentado na Tabela 7.16.

Tabela 7.16 – Valores da repetitividade do ensaio de mancha de areia

Aeroporto	Operador	C	z_0	r_e
Bragança Paulista	1	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
	2	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
	3	100	1,96	$(91 \pm 8) \%$
Campinas	1	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
	2	100	1,96	$(84 \pm 10) \%$
	3	100	1,96	$(89 \pm 9) \%$
Sorocaba	1	100	1,96	$(100 \pm 0) \%$
	2	100	1,96	$(93 \pm 7) \%$
	3	100	1,96	$(91 \pm 8) \%$

Destaca-se que em diversas situações a repetitividade dos ensaios de mancha de areia realizados não atende ao especificado pela ISO 5725-2.

7.3 Correlação com a Mancha de Areia

As Figuras 7.2 a 7.4 apresentam os gráficos de correlação entre os ensaios realizados com o equipamento *outflow meter* e os ensaios realizados pelo método da mancha de areia nos Aeroportos Estaduais de Bragança Paulista, Campinas e Sorocaba, respectivamente.

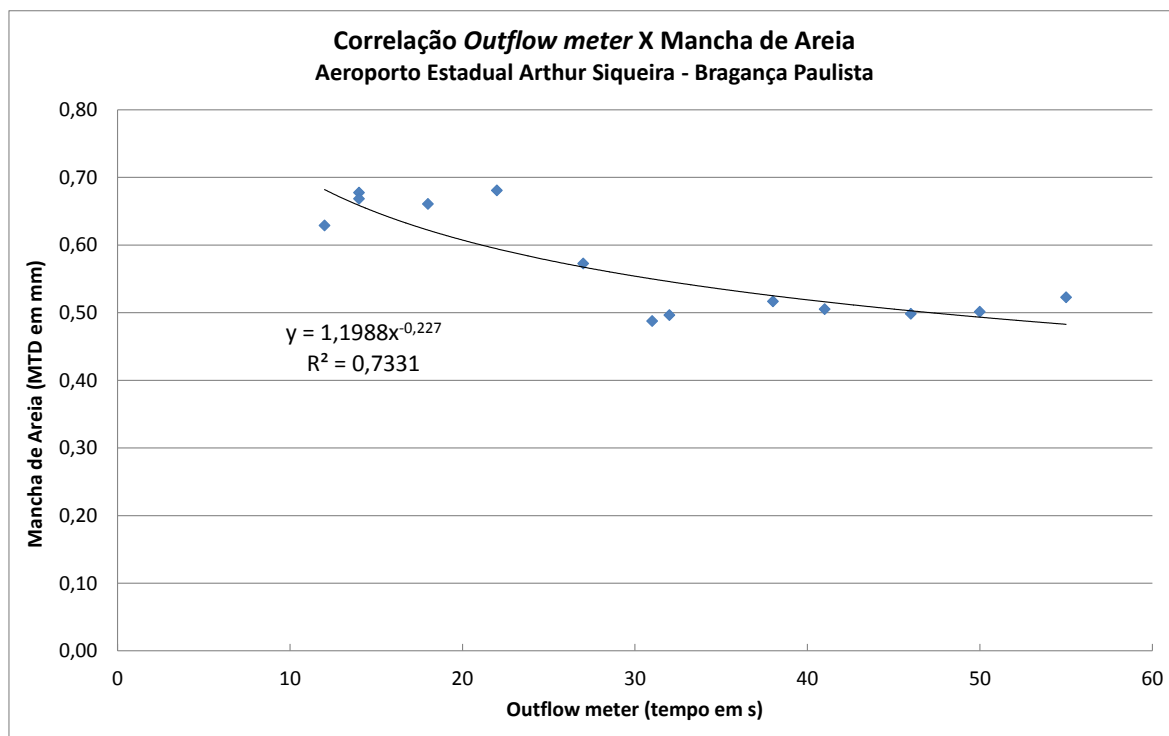


Figura 7.2 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x *Outflow meter* (tempo em s) – Aeroporto Estadual de Bragança Paulista

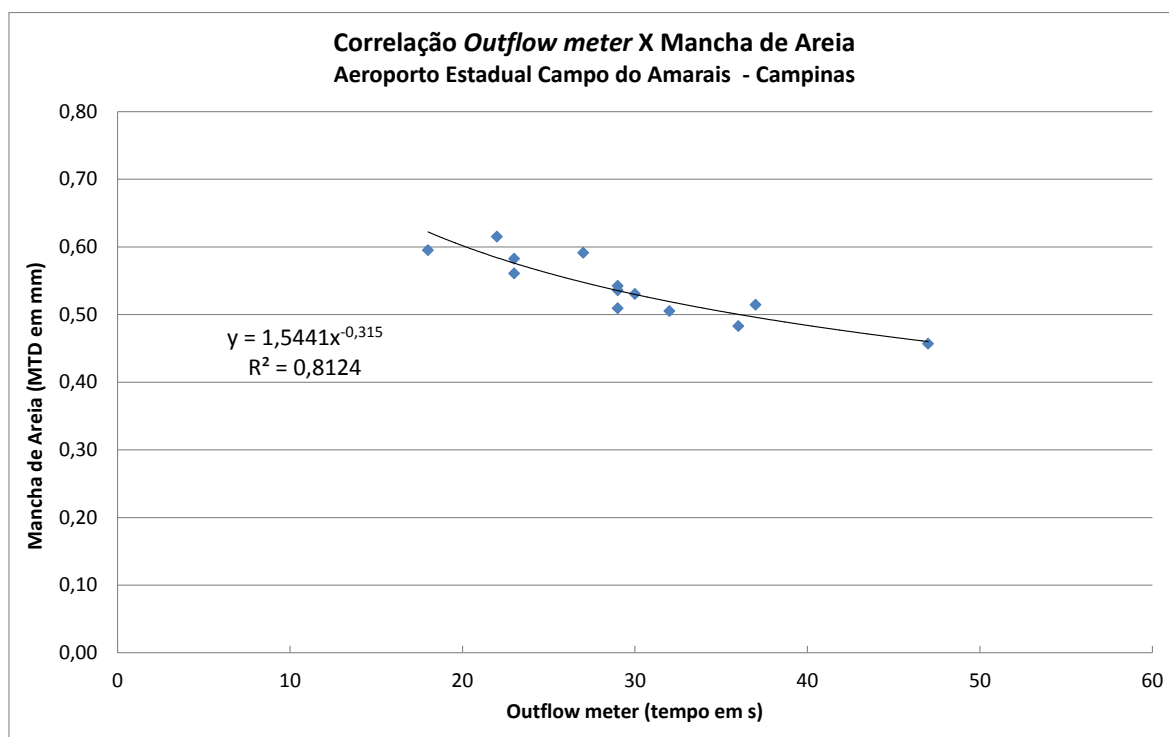


Figura 7.3 - Correlação Mancha de Areia x *Outflow meter* – Aeroporto Estadual de Campinas

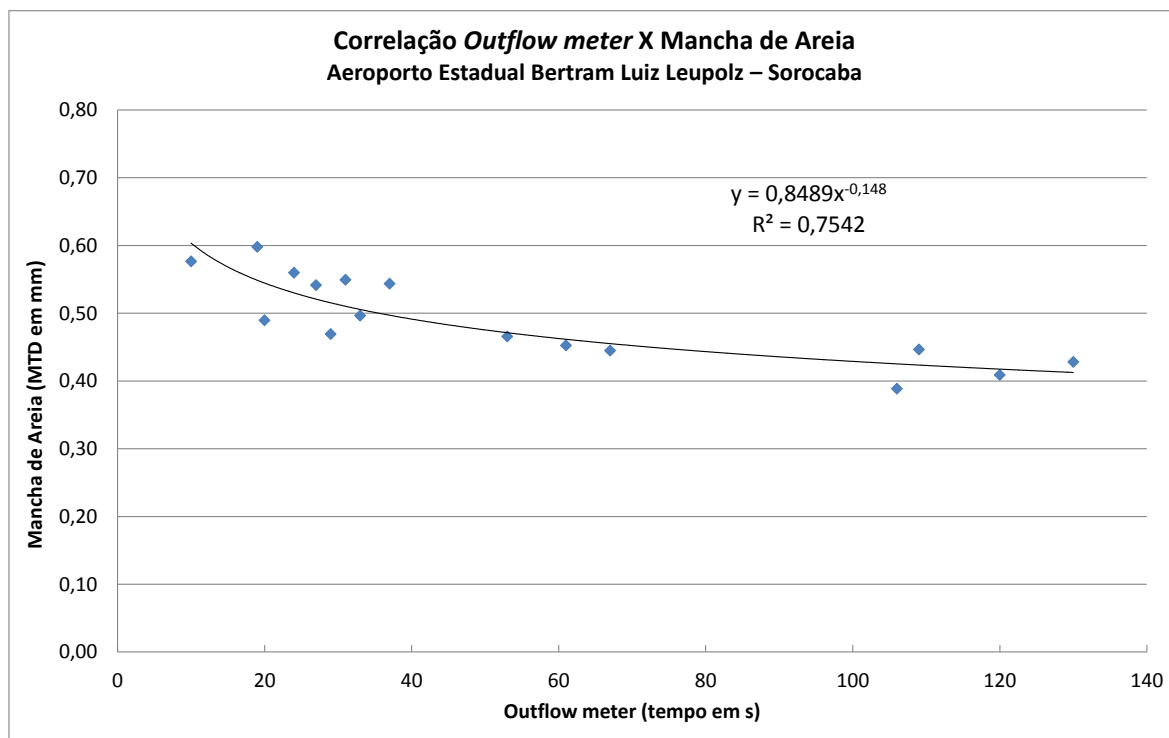


Figura 7.4 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x *Outflow meter* (tempo em s) – Aeroporto Estadual de Sorocaba

Os gráficos apresentados demonstram a correlação entre o tempo obtido com o *outflow meter* e as medidas de texturas obtidas com o ensaio da mancha de areia, com valores de R^2 variando de 0,73 a 0,81.

Agrupando-se todos os dados obtidos nos três aeroportos estudados também se verifica a correlação entre os ensaios, chegando-se a um R^2 de 0,72, conforme pode se observar na Figura 7.5.

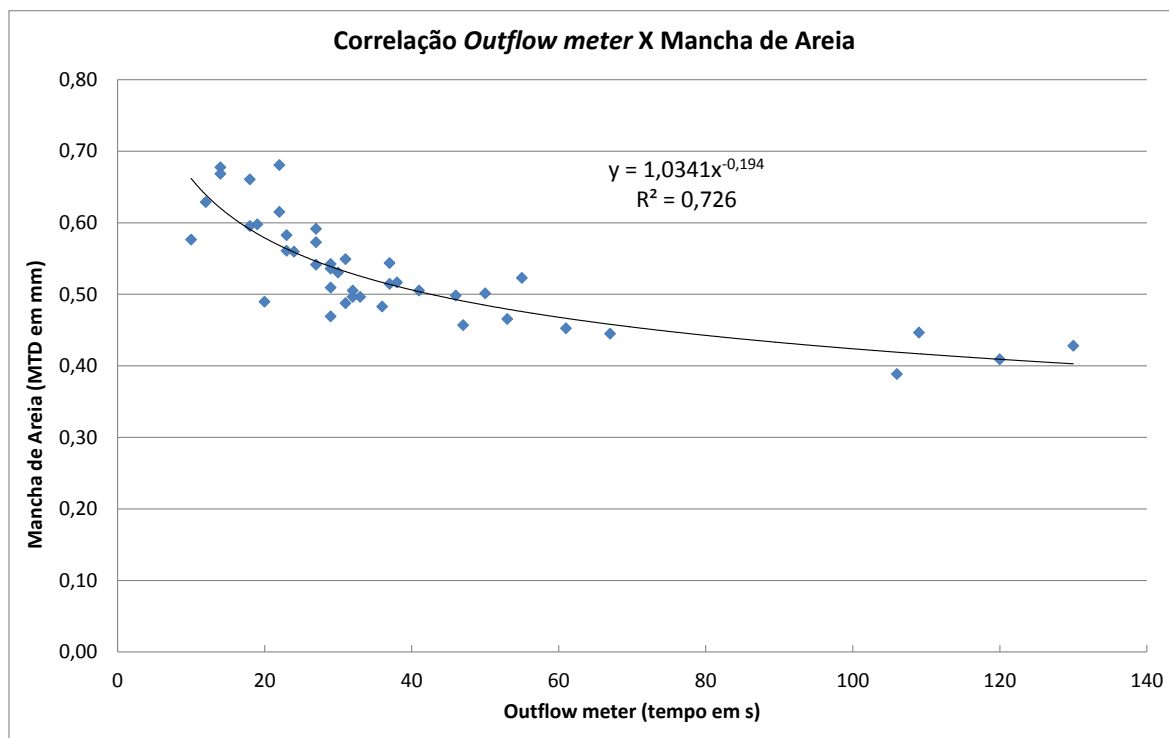


Figura 7.5 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x *Outflow meter* (tempo em s) - Todos aeroportos estudados

A Figura 7.6 ilustra a correlação obtida entre os ensaios realizados com o equipamento *outflow meter* e os ensaios executados pelo método da mancha de areia nos quatro tipos de revestimentos utilizados no teste do ensaio: CBUQ, OGFC, *Gap-graded* e micro revestimento asfáltico. O gráfico de correlação entre o tempo obtido com o *outflow meter* e o MTD da mancha de areia apresenta um R^2 de 0,85.

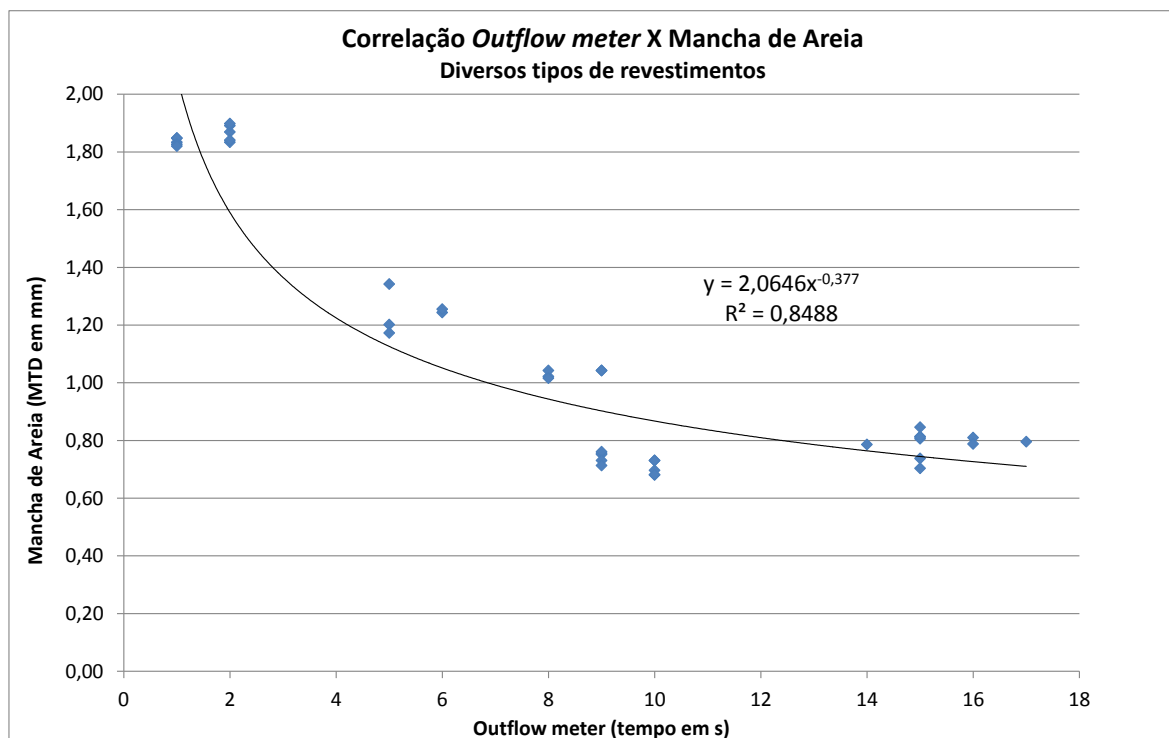


Figura 7.6 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x *Outflow meter* (tempo em s) – 4 tipos de revestimento

Com o intuito de se obter uma curva mais abrangente de resultados, foi realizada a correlação com todos os dados levantados, incluindo os três aeroportos e os quatro tipos de revestimentos estudados (Figura 7.7). Foi encontrada uma boa correlação ($R^2 = 0,9$) entre os dois ensaios avaliados.

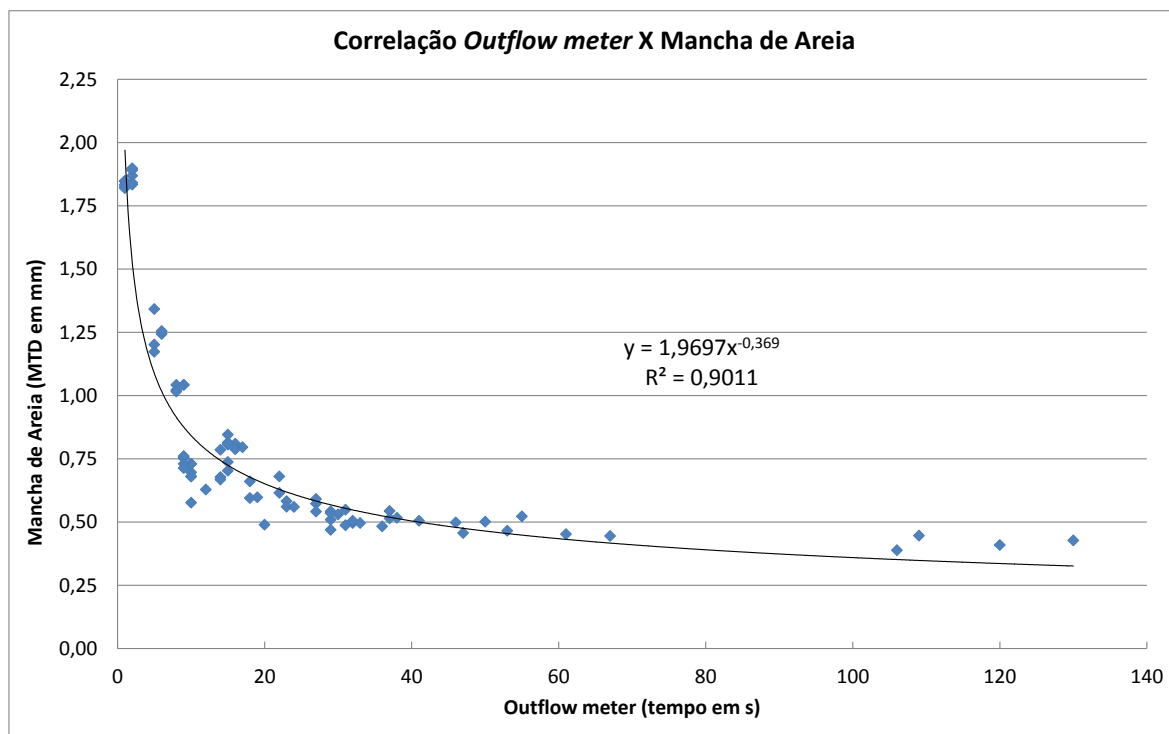


Figura 7.7 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x *Outflow meter* (tempo em s) - Todos os dados obtidos

Complementarmente, a Figura 7.8 ilustra a correlação do MTD obtido com o ensaio da mancha de areia e o MTD calculado através da equação 5.1 em função do tempo obtido com o *outflow meter*, de acordo com a norma ASTM 2380-05.

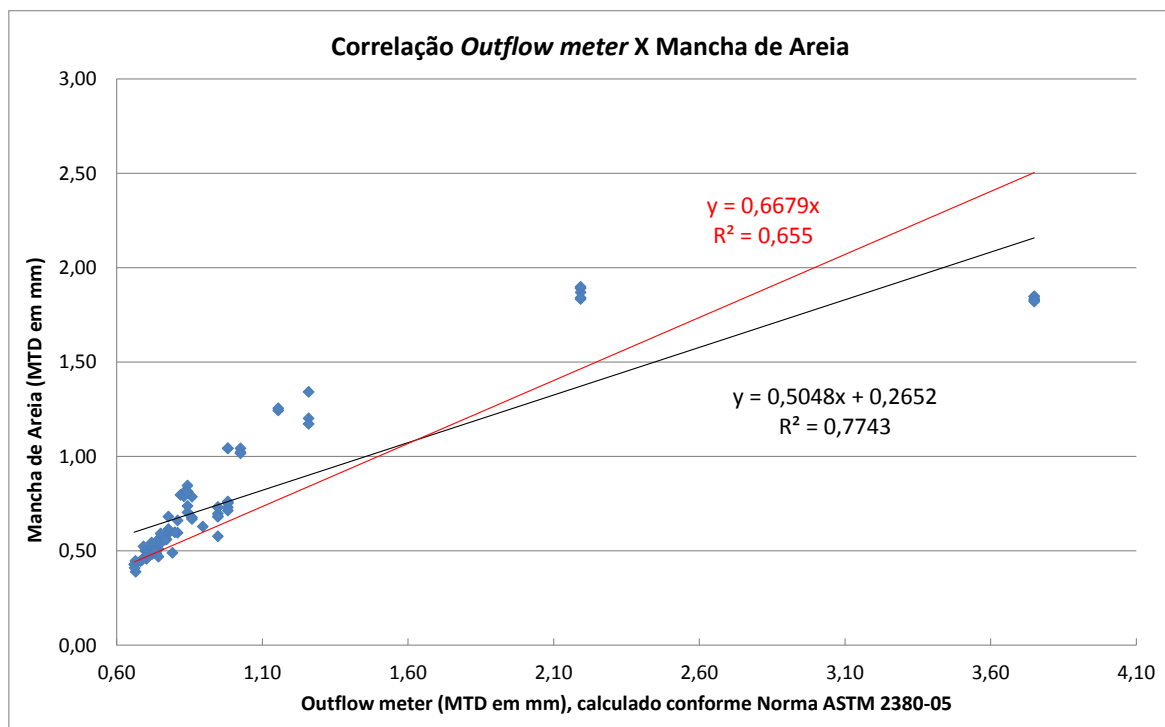


Figura 7.8 - Correlação Mancha de Areia (MTD em mm) x *Outflow meter* (MTD em mm), calculado conforme Norma ASTM 2380-05

Foram estabelecidas duas equações lineares no estudo em questão, a primeira sem definir uma obrigatoriedade entre os resultados na situação de textura perfeitamente lisa e a segunda obrigando-se a interseção a passar no ponto zero. Por esta segunda equação tem-se que a equação de correlação entre o tempo de escoamento obtido com o *outflow meter* e a altura de areia determinada no ensaio de mancha de areia apresentada na norma ASTM 2380-05 conduz a valores de MTD maiores que os efetivamente obtidos nesta pesquisa e que seria necessário um fator multiplicador de ajuste de 0,67 no referido modelo matemático.

Tais conclusões são corroboradas pela análise crítica da equação 5.1 da norma ASTM 2380-05, na qual se verifica que mesmo que o tempo determinado com o *outflow meter* seja extremamente alto (tendendo a infinito), indicando uma textura muito lisa, o menor valor encontrado para o MTD seria 0,636mm, ou seja, um valor associado a uma textura média de acordo com as normas brasileiras. Nesta análise tem-se que mesmo uma superfície perfeitamente lisa apresentaria altura média de areia associada a uma textura considerada média.

A título ilustrativo as agências de transporte brasileiras têm colocado nos Programas de Exploração de Rodovias a iniciativa privada o limite mínimo de 0,60 mm para a profundidade média de textura no ensaio de mancha de areia como indicativo da necessidade de uma ação corretiva. Se o controle for realizado com *outflow meter* e aplicando-se diretamente a equação estabelecida pela ASTM nunca haveria necessidade de intervenção, o que indica que a equação não pode ser empregada no Brasil nas mesmas condições americanas.

7.4 Informações sobre a Influência da Permeabilidade e da Declividade no Ensaio de Drenabilidade

7.4.1 Permeabilidade

Para a realização da análise comparativa da ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade de misturas betuminosas com a velocidade de escoamento superficial obtida com o drenômetro, tendo em vista o estudo teórico da influência da permeabilidade no ensaio de drenabilidade em questão, adotou-se como exemplo, um tempo médio obtido com o *outflow meter* nos aeroportos levantados de 40 segundos.

Assim, sabendo-se que a área do orifício de saída da água do drenômetro é de 31,67 cm² e que o volume de água do equipamento é 675 cm³, obtêm-se uma vazão de 16,9 cm³/s e uma velocidade de escoamento superficial de 0,53 cm/s, conforme demonstrado na Tabela 7.17.

Tabela 7.17 – Cálculo da velocidade de escoamento superficial - exemplo

Exemplo Drenômetro		
Descrição	Quantidade	Unidade
Diâmetro do orifício de saída do <i>outflow meter</i>	6,35	cm
Área do orifício de saída do <i>outflow meter</i>	31,67	cm ²
Volume de água do <i>outflow meter</i>	675	cm ³
Tempo médio obtido com o <i>outflow meter</i>	40	s
Vazão de escoamento superficial	16,88	cm ³ /s
Velocidade de escoamento superficial	0,53	cm/s
K para misturas betuminosas com drenagem razoável, conforme Tabela 6.27	1,00E-02	cm/s
Interferência no ensaio de drenabilidade	1,877%	%

Portanto, comparando-se a velocidade de escoamento superficial de 0,53 cm/s com o coeficiente de permeabilidade de misturas betuminosas (da ordem de 10^{-2} cm/s para uma drenagem razoável, conforme tabela 6.10), conclui-se que a influência da permeabilidade no ensaio de drenabilidade, no caso de misturas densas e coeficiente de permeabilidade de 10^{-2} cm/s, é extremamente pequena, da ordem de 2%.

7.4.2 Declividade Transversal da Pista

As medidas de tempo obtidas não variaram em função das diversas declividades até o limite de 9%, indicando que não houve influência no resultado do ensaio de drenabilidade determinado com o *outflow meter* para o tipo de revestimento e mistura testado. Tal fato pode estar associado à pequena área de contato do ensaio ou a precisão do cronômetro do equipamento.

7.5 Produto do Estudo das Correlações

O Comando da Aeronáutica, a ICAO e a FAA estabelecem limites para a profundidade média da macrotextura do pavimento de pistas de pouso e decolagem para fins de ação corretiva da textura (Tabela 7.18). Com base nesses limites e na correlação obtida entre o tempo do *outflow meter* e a profundidade média de textura da mancha de areia, foram estipulados limites para o tempo obtido com o *outflow meter*, conforme Tabela 7.18.

Tabela 7.18 – Limites da profundidade média da textura e do tempo obtido com *outflow meter* (adaptado de DAC, 2001; RODRIGUES FILHO, 2006)

Órgão	MTD (mm)		Tempo (s)		Observação
	Pavimento Existente	Pavimento Novo	Pavimento Existente	Pavimento Novo	
DAC	0,50	1,00	41	6	ação corretiva
ICAO	0,625	1,00	22	6	ação corretiva
FAA	-	1,14	-	4	
	< 1,14	-	> 4	-	monitoramento
	0,76 - 0,40	-	13 - 75	-	correção da deficiência num prazo de 1 ano
	< 0,25	-	> 269	-	correção da deficiência num prazo de 2 meses

O DAC (2001) indica ação corretiva no pavimento existente apenas quando a profundidade média de textura for igual ou inferior a 0,50 mm, o que equivale ao tempo de escoamento de 675 cm³ de água superior a 40 segundos. A ICAO recomenda uma textura média mínima de 0,625 mm, equivalente ao tempo de escoamento de 22 segundos. Já FAA adota três situações:

- Profundidade média de textura abaixo de 1,14 mm (equivalente a um tempo de escoamento acima de 4 segundos): a textura deve ser avaliada toda vez que houver medições de atrito;
- Profundidade média de textura entre 0,76 mm e 0,4 mm (equivalente a um tempo de escoamento entre 13 e 75 segundos): correção da deficiência de textura num prazo de um ano;

- Profundidade média de textura inferior a 0,25 mm (equivalente a um tempo de escoamento superior a 269 segundos): correção da deficiência de textura num prazo de dois meses.

Foi identificado que as três instituições indicam ação corretiva quando o pavimento está na faixa considerada como textura média (entre 0,4 mm e 0,8 mm, ou seja, entre 11 e 75 segundos), apesar da variação do MTD e do tempo de escoamento, com exceção da ação corretiva num prazo de 2 meses indicado pela FAA, em que o parâmetro equivale a uma textura fina, o que obriga a uma intervenção imediata para garantir a segurança dos usuários.

A tabela 7.18 fornece um parâmetro adicional para se determinar o momento de realizar uma ação corretiva em pavimentos aeroportuários através do ensaio com o equipamento *outflow meter* observando-se o tempo de escoamento limite.

Se for verificada a necessidade de ação corretiva, sugere-se a utilização do fluxograma ilustrado na Figura 7.9, apresentada a seguir.

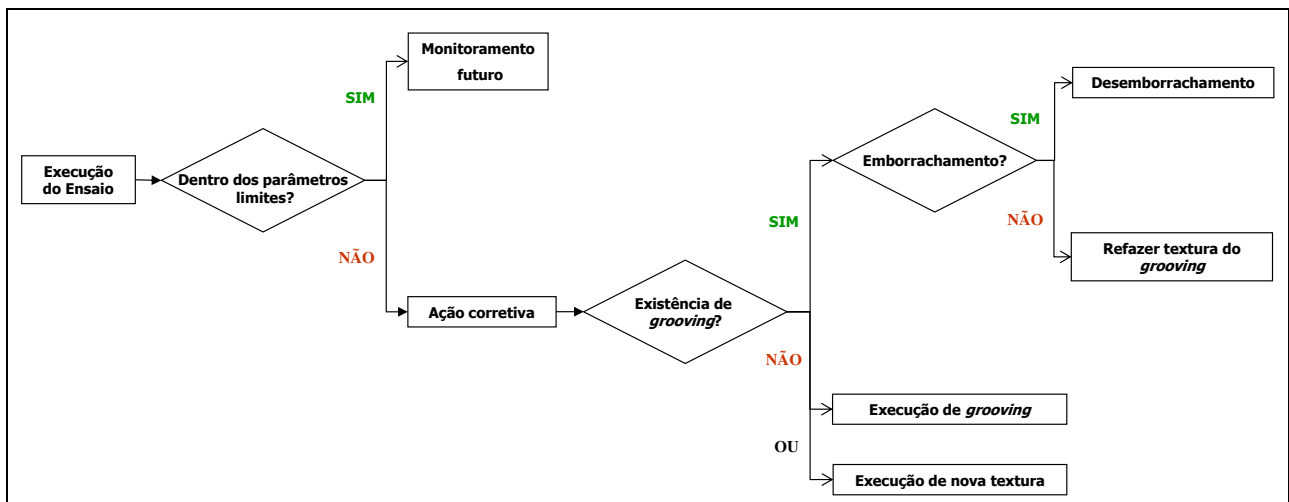


Figura 7.9 – Fluxograma de decisão da ação corretiva

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Este capítulo apresenta as principais conclusões sobre os estudos desenvolvidos na presente dissertação. São apresentadas ainda recomendações para trabalho futuros na mesma linha de pesquisa, no intuito de aprimorar e complementar os conceitos estudados.

8.1 Conclusões

O ensaio se mostrou de simples operação, rápido e de baixo custo. O tempo aproximado para a realização de cada ensaio é inferior a 5 minutos, necessitando de apenas o equipamento em si, um técnico para operá-lo e água. Além disso, o ensaio foi realizado com sucesso por diversos técnicos, não gerando dúvidas na coleta de resultados.

A análise de repetitividade dos ensaios com o equipamento do tipo *outflow meter* apresentou valores acima de 95% em todos os aeroportos estudados e com todos operadores integrantes do estudo, atendendo o especificado pela ISO 5725-2. Verificou-se que a reprodutividade, em função da alteração de operador, não afetou significativamente o ensaio.

Diferentemente, os ensaios realizados pelo método da mancha de areia apresentaram valores de repetitividade abaixo de 95% com dois operadores (2 e 3). Somente um operador (1) apresentou repetitividade acima de 95%. O operador 1 possui grande experiência na execução deste ensaio, já os operadores 2 e 3 possuem média e pouca prática na realização do ensaios, respectivamente. Assim, conclui-se que o ensaio da mancha de areia pode ser influenciado pelo

operador, ou seja, a reprodutividade do ensaio não foi satisfatória.

Considerando o atual cenário brasileiro, com crescentes investimentos em infraestrutura e a escassez de mão de obra operacional qualificada, o equipamento *outflow meter* mostra-se bastante adequado, já que os resultados de seus ensaios demonstraram pouca influência do operador, ao contrário do que ocorreu com o método da mancha de areia.

Outra vantagem do ensaio com o *outflow meter* é a possibilidade de sua execução em pistas molhadas e/ou úmidas, o que não ocorre o ensaio da mancha de areia. Além disso, este método de ensaio avalia a medida direta de um parâmetro em campo que é o tempo de escoamento, diferente do método da mancha de areia que avalia a profundidade média de textura calculada a partir do levantamento da média de quatro medidas executadas em campo.

A existência de duas diferentes recomendações para o tipo de material a ser utilizado no ensaio da mancha de areia (ASTM E-965-96 e ANAC), além da areia padronizada produzida comercialmente pelo IPT, pode acarretar em divergências nos resultados dos ensaios da mancha de areia. Este tipo de divergência nos procedimentos de ensaios não ocorre no ensaio com o *outflow meter*.

O ensaio de drenabilidade com equipamento do tipo *outflow meter* apresentou correlação com o ensaio da mancha de areia, tanto para as pistas aeroportuárias estudadas quanto para os quatro tipo de revestimentos ensaiados, indicando que o ensaio em estudo tem potencial para a medição da macrotextura do pavimento. Os valores de R^2 encontrados (entre 0,73 a 0,9) são próximos aos valores obtidos por outros autores.

Através da correlação obtida foi possível estabelecer um parâmetro adicional para se determinar o momento de realizar uma ação corretiva em pavimentos aeroportuários através do ensaio com o equipamento *outflow meter*, observando-se o tempo de escoamento limite.

A equação da norma ASTM E-2380-05 relativa à estimativa do MTD do *outflow meter*, não pode ser empregada no Brasil nas mesmas condições americanas, pois o valor mínimo possível de ser calculado é 0,636 mm, representando uma textura média, ou seja, por maior que

seja o tempo obtido com o *outflow meter*, não seria possível encontrar uma textura fina através da referida equação. Visto que as agências de transporte brasileiras têm colocado no Programa de Exploração de Rodovias o limite mínimo de 0,6 para a profundidade média de textura como indicativo para uma ação corretiva, aplicando-se a correlação da referida norma, nunca haveria necessidade de intervenção caso o ensaio da condição de macrotextura do pavimento se desse com o *outflow meter*. Pela correlação dos dados obtidos seria necessário um ajuste multiplicando-se o MTD calculado por 0,67 para o caso em questão.

A declividade da pista não interferiu no ensaio até o limite de 9%, indicando que não houve influência no resultado do ensaio de drenabilidade determinado com o *outflow meter* para o tipo de revestimento e mistura testado. Tal fato pode estar associado à área de contato entre a água e o pavimento durante a realização do ensaio ser pequena, praticamente não alterando o tempo de escoamento para declividades inferiores a 9%. Além disso, o equipamento apresenta uma limitação de precisão no cronometro, que não marca frações de segundos. Durante os ensaios detectou-se variação no tempo de escoamento de 4 segundos para 3 segundos apenas quando se chegou a 10% de declividade. Em função desta limitação pode-se assumir que de 0% a 9% de declividade o tempo de escoamento pode ter variado em até um segundo.

A influência da permeabilidade no ensaio de drenabilidade, no caso de misturas densas, é pequena, da ordem de 2% em relação a um coeficiente de permeabilidade de 10^{-2} cm/s, considerado como uma “drenagem razoável”.

8.2 Sugestões para novas pesquisas

- O presente estudo se limitou a três aeroportos revestidos por misturas asfálticas densas, deste modo, recomenda-se o estudo de outras texturas de revestimentos, bem como ensaios em pavimentos de concreto.
- Estudar texturas abertas, associando-se inclusive ensaios de laboratório para

determinação dos volumes de vazios, pois o *outflow meter* pode ter a limitação da influência da permeabilidade nesse tipo de textura.

- Analisar o ensaio com o equipamento do tipo *outflow meter* em pistas de pouso e decolagem com emborrachamento e também situações em que há *grooving*.
- Foi fornecido um parâmetro adicional para se determinar o momento de realizar uma ação corretiva em pavimentos aeroportuários através do ensaio com o equipamento *outflow meter* observando-se o tempo de escoamento limite, no entanto é importante a realização de novos estudos para a calibração dos mesmos.
- O estudo foi limitado a pistas de pouso e decolagem, sendo interessante estendê-lo para rodovias, principalmente em locais críticos, tais como proximidades de pedágio, curvas com declividades baixas.
- Estudar com maior abrangência a influência da declividade no ensaio com o *outflow meter*, visto que o presente estudo se limitou somente a um tipo de mistura.
- Desenvolver um procedimento de padronização na realização do ensaio pelo método da mancha de areia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, H. et al. Measurement of Pavement Macrotexture using the CTMeter. In: ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 80., 2001, Washington D.C. **Proceedings...** Washington D.C.: The National Academies, 2001.

AERO SAFETY WORLD. Alexandria, Virginia: Flight Safety Foundation, 2008 – Mensal.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Anuário do Transporte Aéreo 2008.** Brasília, 2009.

ALVES, T.S.F. **Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários:** Aplicação prática do radar de prospecção e do deflectômetro de impacto. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E691:** Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to determine the Precision of a Test Method. West Conshohocken, 1992.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-965-96:** Standard Test Method for Measuring Surface Macro Texture Depth using a Volumetric Technique. West Conshohocken, 1996.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM. E 1845-01** (Reapproved 2005): Standard practice for calculating pavement macrotexture mean profile depth. West Conshohocken, 2005a.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-2380-05:** Standard Test Method for Measuring Pavement Texture Drainage Using an Outflow Meter. West Conshohocken, 2005b.

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

APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – *international friction index* para revestimentos asfálticos.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ARDANI, P.E.A. Implementation of Longitudinal Tining in Colorado. In: ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 86., 2007, Washington D.C. **Proceedings...** Washington D.C.: The National Academies, 2007.

BAILEY, G. Slippery when wet. **Flight Safety Australia**, Canberra, p. 41-43, sept. oct. 2000.

BALKWILL, K. J. **Development of a Comprehensive Method for Modelling Performance of Aircraft Tyres Rolling or Braking on Dry and Precipitation-Contaminated Runways**. TP 14289E. Transportation Development Centre. Montreal, 2003.

BARELLA, R. M. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras - Abeda, 2008. ISBN 85-85227-84-2.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos**. Panorama Estatístico da Aviação Civil Brasileira para 2000 a 2009. Brasília, 2010.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora, 1973.

CENTRO DE INVESTIGAÇÃO E PREVENÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS. **Relatório Final A-Nº005/CENIPA/2008**. Brasília, 2008.

COSTA FILHO, A.F.; PAULA, C.M.C. Aviação Geral – Um estudo da importância desta enquanto modal de transporte. In: SIMPÓSIO DE TRANSPORTE AÉREO, 7, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: SBTA, 2008. P.168.

DEPARTAMENTO AEROVIÁRIO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Movimento Estatístico**. São Paulo, 2012. Disponível em: < <http://www.daesp.sp.gov.br/> >. Acesso em: 04 abr. 2012.

DEPARTAMENTO DE AVIAÇÃO CIVIL. **Requisitos de resistência à derrapagem para pistas de pouso de decolagem**. Instrução de Aviação Civil – Normativa, IAC 4302. Rio de Janeiro, 2001.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (São Paulo). **ET-DE-P00/037**: Capa Selante. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT

035/2005 – ES. **Pavimentos flexíveis – Micro revestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Rio de Janeiro, 2006.

DOTY, R. N. **A Study of the Sand Path and Outflow Meter Methods of Pavement Surface Texture Measurement.** In: ASTM ANNUAL MEETING, 77., 1974, Washington D.C. **Proceedings...** California: Business and Transportation Agency, 1974.

ES, G. W. H. et al. **Safety aspects of aircraft performance on wet and contaminated runways.** NLR-TP-2001-216. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Amsterdam 2001.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Measurement, construction, and maintenance of skid-resistant airport pavement surfaces.** Advisory Circular, AC 150/5320-12C. Washington D.C., 1997.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **NASDAC Review of NTSB Weather-Related Accidents.** Washington D.C., s/d. Disponível em: <http://www.asias.faa.gov/aviation_studies/weather_study/studyindex.html>. Acesso em: 05 jul. 2009.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Open Graded Friction Courses:** Technical Advisory. T 5040.31. Washington D. C., 1990.

FERNANDES, E.S. **Influência dos Agregados Rochosos na Aderência Pneu/Pavimento.** 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

FLIGHT SAFETY FOUNDATION. Aviation Safety Network. Alexandria, Virginia, [ca. 2007a]. Disponível em <<http://aviation-safety.net/database/record.php?id=20070323-2>>. Acesso em: 05 de julho de 2009.

FLIGHT SAFETY FOUNDATION. Aviation Safety Network. Alexandria, Virginia, [ca. 2007b]. Disponível em: <<http://aviation-safety.net/database/record.php?id=20070716-0>>. Acesso em: 20 jun. 2009.

FLIGHT SAFETY FOUNDATION. Aviation Safety Network. Alexandria, Virginia, [ca. 1999]. Disponível em: <<http://aviation-safety.net/database/record.php?id=19990922-0>>. Acesso em: 21 jun. 2009.

FLIGHT SAFETY FOUNDATION. Aviation Safety Network. Alexandria, Virginia, [ca. 2004]. Disponível em: <<http://aviation-safety.net/database/record.php?id=20040811-0>>. Acesso em: 21 jun. 2009.

FLINTSCH, G. W. et al. Pavement Surface Macrotexture Measurement and Application. In: ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 82., 2003, Washington

D.C. **Proceedings...** Washington D.C.: The National Academies, 2003.

FLINTSCH, G.W., I.L. Al-Qadi, R. Davis, and K.K. McGhee. 2002. **Effect of HMA Properties on Pavement Surface Characteristics**. Proceedings of the Pavement Evaluation Conference. Roanoke, Virginia, 2002.

FUOCCO, T. Frota da aviação geral cresce, mas está longe do patamar de 1993. **O Globo**, Rio de Janeiro, 13 ago. 2008. Disponível em:

<http://oglobo.globo.com/economia/mat/2008/08/13/frota_da_aviacao_geral_cresce_mas_esta_longe_do_patamar_de_1993-547725885.asp>. Acesso em: 18 abr. 2010.

GEOTECNIA Y CIMIENTOS, S.A. **Auscultación: Vehículo SCRIM com Texturómetro**.

Madrid, s/d. Disponível em: <<http://www.geocisacarreteras.com/pdfs/10.20.70.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2010.

GONÇALVES, G. Crescimento da aviação regional cria polos em aeroportos fora do Rio e SP.

Estado de São Paulo, São Paulo, 10 jul. 2010. Disponível em: <

<http://www.estadao.com.br/noticias/impreso,crescimento-da-aviacao-regional-cria-polos-em-aeroportos-fora-do-rio-e-sp,579090,0.htm>>. Acesso em: 12 jul. 2010.

GRANSBERG, D.D. Life Cycle Cost Analysis of Surface Retexturing with Shotblasting as an Asphalt Pavement Preservation Tool. In: ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 88., 2009, Washington D.C. **Proceedings...** Washington D.C.: The National Academies, 2009.

GUZMÁN, B. R. **Tratamientos y Mezclas Resistentes al Deslizamiento**. El Asfalto: Boletín nº 71 de la Comisión Permanente del Asfalto. Buenos Aires, 1995.

HALL, J. W. et al. **Guide for Pavement Friction**. National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C., 2009.

HANSON, D. I.; PROWELL, B. D. **Evaluation of circular texture meter for measuring surface of pavements**. NCAT Report 04-05. National Center for Asphalt Technology. Auburn, Alabama, 2004.

HEGMON, R. R., MIZOGUCHI, M. M. **Pavement Texture Measurements by the Sand Patch and Outflow Meter Methods**. Report S40. Pennsylvania State University. Pennsylvania, 1970.

HORNE, W. B.; DREHER, R. C. **Phenomena of Pneumatic Tire Hydroplaning**. National Aeronautics and Space Administration. Washington D. C., 1963.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia – VIM**. Rio de Janeiro, 1995.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Orientações sobre validação de métodos de ensaios químicos**. Rio de Janeiro,

2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 5.725-2 (1994). **Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method**, Genebra, 1994.

INTERSTATE AVIATION COMMITTEE. **Final Report: on the results of the investigation of the accident**. Moscou, 2007.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (Portugal). **Perfilômetro Laser**. Lisboa, 2008. Disponível em: <<http://www.lnec.pt/organizacao/dt/nira/perfilometro>>. Acesso em: 11 maio 2010.

LUGÃO, W. G. **Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG**. 2008. Tese - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

MANTOVANI, F.; MERIGHI, J.V. Estudo do Desempenho da Frenagem de Aeronaves a Propulsão Durante o Pouso. In: CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2., 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2008.

MERIGHI, J.V.; FORTES, R.M. **Estudo de revestimentos asfálticos anti-derrapantes em pistas aeroportuárias que operam em situações críticas**. Relatório de Pesquisa desenvolvida no curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2007.

MERIGHI, J. V.; FORTES, R. M.; BANDEIRA, A. A. Study of the concept of porous concrete for use on airport runways. In: ANNUAL SOUTHERN AFRICAN TRANSPORT CONFERENCE, 25., 2006, Pretoria. **Proceedings...** Pretoria - South Africa, 2006.

MERIGHI, J.V.; PERES, R.; SILVA, G.T. Influência da Natureza da Superfície de Contato na Geração de Aderência nos Pavimentos Aeroportuários. In: JORNADAS LUSO-BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS: POLÍTICAS E TECNOLOGIAS, 5, 2006, Recife. **Anais...** São Paulo: Associação Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.

MOORE, D.F. A History of Research on Surface Texture Effects. **Wear**: an international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear, Netherlands, v.13, p. 381-412, 1969. Lausanne: Elsevier Sequoia S.A. , 1969.

MOURÃO, F. A. L. **Misturas Asfálticas de Alto Desempenho tipo SMA**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Evaluation of Pavement Friction Characteristics**. A Synthesis of Highway Practice. National Technical Information Service: Springfield, Virginia, 2000.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Annual review of U.S. general aviation accident data 2005**. Annual Review of Aircraft Accident Data NTSB/ARG-09/01. Washington D.C., 2009.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Factual Report Aviation**. ATL07WA113. Washington D.C., [ca. 2007]. Disponível em: <<http://www.nts.gov/nts/GenPDF.asp?id=ATL07WA113&rpt=fa>>. Acesso em: 02 abr. 2009.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Factual Report Aviation**. DCA05RA088. Washington D.C., [ca. 2005]. Disponível em <<http://www.nts.gov/nts/GenPDF.asp?id=DCA05RA088&rpt=fa>>. Acesso em: 12 maio 2009.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Runway overrun and collision, southwest airlines flight 1248, Boeing 737-7H4, N471WN, Chicago Midway International Airport, Chicago, Illinois, December 8, 2005**. Aircraft Accident Report NTSB/AAR-07/06. Washington D.C., 2007.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Runway overrun during landing, American Airlines Flight 1420, McDonnell Douglas MD-82, N215AA – Little Rock, Arkansas, June 1, 1999**. Aircraft Accident Report NTSB/AAR-01/02. Washington D.C., 2001.

O'FLAHERTY, C. A. **Highways - The location, design, construction and maintenance of road pavements**. Oxford : Butterworth Heinemann, 2002.

PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES (PIARC). Report of the Committee on Surface Characteristics. In: WORLD ROAD CONGRESS, 18, 1987, Brussels, **Proceedings...** Paris: PIARC, 1987.

PESHKIN, D.G. A Summary and Assessment of Arizona DOT's Maintenance Cost Effectiveness Study. In: ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 86., 2007, Washington D.C. **Proceedings...** Washington D.C.: The National Academies, 2007.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo**. São Paulo, 1999.

QUILICI, V. Uso da Estatística como Ferramenta para Determinar a Periodicidade das Calibrações: Exemplos. In: CONGRESSO E FEIRA DA QUALIDADE EM METROLOGIA, 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Rede Metrológica do Estado de São Paulo, 2006.

RANGANATHAN, A. Preventing wet runway accidents. **The Hindu**, Chennai, 10 ago. 2005. Disponível em: <<http://www.thehindu.com/2005/08/10/stories/2005081005841100.htm>>. Acesso em: 18 maio 2009.

RIBEIRO, L.M.B. et al. Medição de Macrotextura com Equipamento do tipo “Outflow Meter”. In: CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2., 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2008.

ROBINSON, W. J. **Design and Performance of Open Graded Friction Course Hot Mix Asphalt**. 2005. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) - Department of Civil Engineering, Faculty of Mississippi State University, Mississippi State, 2005.

RODRIGUES FILHO, O.S. **Características de Aderência de Revestimentos Asfálticos Aeroportuários – Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de São Paulo / Congonhas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SANDBERG, U. **Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy, and Safety: A State-of-the-Art Study Regarding Measures and Measuring Methods**. Swedish National Road and Transport Research Administration. VTI notat 53A-1997. Linköping, Sweden, 1998.

SAYERS, M. W.; KARAMIHAS, S. M. **The Little Book of Profiling**. University of Michigan. Ann Arbor, 1998.

SILVA, C. E. D. B. D. **Estudo da Permeabilidade de Misturas Asfálticas de Graduação Aberta**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2005.

SILVA, J. P. S. **Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SILVA, P. B. **Estudos em laboratório e em campo de misturas asfálticas SMA 0/ 8S**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SMITH, R. E.; BEATTY, C. K. Microsurfacing Usage Guideliness. **Journal of the Transportation Research Board**, Washington D.C., v. 1680. 1999.

STRUFALDI, E. G. B. **Mitigação de ruído gerado pelo tráfego de veículos em rodovias**. São Paulo, 2011.

VALE, A. F. **Estudo e aplicação de micro revestimento asfáltico a frio (Mraf)**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

VIRGINIA DEPARTMENT OF AVIATION. **Airport Program Manual**. Richmond , 2008.

WAMBOLD, J.C. et al. **International PIARC experience to compare and harmonize texture and skid resistance measurements**. Paris: PIARC, 1995.

WAMBOLD, J. C., HENRY, J. J. **NASA Wallops Tie/Runway Friction: Workshops 1993-2002**. Transport Canada Publication n° TP 14190E. Montreal, 2002.

WEISSMANN, J.; MARTINO, M.M. Evaluation of Seal Coat Performance Using Macro-Texture Measurements. In: ANNUAL MEETING OF TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 88., 2009, Washington D.C. **Proceedings...** Washington D.C.: The National Academies, 2009.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1978.

YAGER, T. J.; BUHLMANN, F. **Macrotexture and Drainage Measurements on a Variety of Concrete and Asphalt Surfaces**. Pavement Surface Characteristics and Materials. ASTM STP 763. C. M. Hayden. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1982.