

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

**CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS E MECÂNICAS DE
MISTURAS ASFÁLTICAS PARA REVESTIMENTO DE
PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS**

JANAINA LIMA DE ARAÚJO

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 177/09

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2009

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

**CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS E MECÂNICAS DE
MISTURAS ASFÁLTICAS PARA REVESTIMENTO DE
PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS**

JANAINA LIMA DE ARAÚJO

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

APROVADA POR:

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

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

**LIÉDI LÉGI BARIANI BERNUCCI, DSc (Escola Politécnica da USP)
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 31 do MARÇO de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, JANAINA LIMA DE	
Características Funcionais e Mecânicas de Misturas Asfálticas para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários [Distrito Federal] 2009	
xix, 147 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2009)	
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil	
1. Aeroportos	2. Característica Mecânica
3. Avaliação Funcional	4. Dimensionamento
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, J. L. (2009). Características Funcionais e Mecânicas de Misturas Asfálticas para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-177/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 147 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Janaina Lima de Araújo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Características Funcionais e Mecânicas de Misturas Asfálticas para Revestimento de Pavimentos Aeroportuários.

GRAU / ANO: Mestre / 2009

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

Janaina Lima de Araújo
Rua José Ferreira da Costa, 41
CEP 59.900-000 Pau dos Ferros/RN – Brasil
e-mail: lima.jana@gmail.com

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, **Absalão e Judith**, que sempre lutaram, trabalharam e se dedicaram para que eu e minhas irmãs pudéssemos ter uma das maiores heranças que se podem deixar: o Estudo.*

HOMENAGEM PÓSTUMA

*Gostaria neste trabalho de prestar uma homenagem ao meu grande mestre de graduação da
Universidade Federal de Campina Grande-PB.*

Profº José Afonso Gonçalves de Macêdo

*Que pela vontade de Deus não se encontra presente fisicamente entre nós. Porém, sempre
estará em minhas lembranças como a sua alegria, e pelo grande professor que foi o pai da
minha vida acadêmica.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **DEUS** por me fazer acreditar sempre em dias melhores e permitir minha realização pessoal.

Aos meus pais, **Absalão** e **Judith**, que sempre me acompanharam e foram grandes incentivadores na realização dos meus sonhos, me deram a vida, me deram asas e eu estou aqui aprendendo a voar.

As minhas irmãs **Vera**, **Verônica**, **Janieiry**, **Jany Evane** e **Jane Lane**, e meu irmão **Verinaldo** por fazem parte da minha vida mesmo distante. *“Os irmãos são a melhor ponte com o passado e, possivelmente, os que sempre irão te apoiar no futuro”*. Aos meus sobrinhos **Juliana**, **Rafael**, **Nícolas**, **Gabriela** e **Lucas** – ouvi-los ao telefone sempre foi uma dose de ânimo para suportar a saudade.

Agradeço ao Prof. **Márcio Muniz de Farias** pela paciência e orientação durante a realização deste trabalho.

Aos **professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação de Geotecnia**, que contribuíram com o desempenho de seus papéis durante estes dois anos.

Ao Laboratório de Engenharia Rodoviária – LER do **CEFTRU/UnB** por ter sido cenário na idealização deste trabalho. Aos técnicos **Gilson** e **Osvaldo**, agradeço pela grande ajuda na realização dos ensaios. A minha chefinha e amiga **Márcia Mascarenha**, meu agradecimento especial.

Ao amigo **João Paulo**, agradeço pela ajuda, pelo tempo que a mim dispusera, e principalmente pelo grande exemplo de amizade e companheirismo.

A **Lorena**, **Joseleide** e **Maria Tâmara**, pessoas indispensáveis nesses dois anos, vocês são as melhores amigas que eu poderia ter, cada uma do seu jeito. Irmãs de coração.

A todos os **amigos mestrandos e doutorandos** de Geotecnia/UnB, Alexandre Resque, Aureliano, Carlos Eduardo, Cláudia Champi, Cláudia Muneton, Eder Santos, Helen, Igor, Jacqueline, James, Juliana, Luiz Gustavo, Paola Alves, Paula Emanuela, Pedro Paulo, Rafaela, Roberto Cardim e tantos outros que com compreensão e amizade colaboraram para

meu crescimento profissional e pessoal. Em especial ao **Marcus Vinícius**, pelos cuidados constantes, sempre me dando forças nesses momentos finais do trabalho. E ao **Luiz Guilherme** pela grande ajuda com o programa de dimensionamento.

A **Família Sarmento**, em especial aos meus “pais” **Carlos Eduardo e Jeane**, pelo carinho, pelos cuidados, pela preocupação constante com meu bem estar.

A **Família Müller**, minha terceira família, **tio Sérgio e tia-mãe Jeni, Ana Luiza e Renata** minhas primas-irmãs. A tia **Jaci** e ao **Victor**, agradeço a todos vocês pelo carinho.

Agradeço ainda e especialmente ao Prof^o. **Afonso Macêdo** (*in memória*) por ter sido meu grande orientador o qual será para sempre meu mestre, ao Eng^o **Fabiano Pereira** da JBR Engenharia que se dispuseram tão prontamente a guiar-me na minha formação como Engenheira da graduação até agora. A Professora **Laura Motta** pela ajuda virtual, com meus pedidos sempre atendidos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todos os outros membros da minha família, tios, primos que fazem parte da minha vida e que contribuíram de alguma forma para as vitórias que obtive até hoje.

E aos amigos que ficaram por onde passei (Natal-RN, Campina Grande-PB e Brasília-DF) pela ajuda, força, conselhos e amor com o qual sempre me presentearam.

A todos vocês,

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo sobre misturas asfálticas para fins aeroportuários. Foram analisadas três misturas enquadradas na faixa granulométrica denominada Faixa 2, proposta na Especificação de Serviço da Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG). Estas misturas foram denominadas AZR, DZR e BZR, quando suas curvas granulométricas passavam, respectivamente, acima, dentro ou abaixo da zona de restrição da metodologia Superpave. A seleção e caracterização dos materiais seguiram, de um modo geral, os procedimentos e atenderam os requisitos mínimos normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e pela DIRENG. A avaliação da aderência pneu-pavimento foi realizada por meio da avaliação da macrotextura (método Mancha de Areia), microtextura (atrito medido com Pêndulo Britânico) e drenabilidade (Vazão obtida com Drenômetro). Estes ensaios foram realizados em placas especialmente compactadas no laboratório para esta finalidade. As misturas foram caracterizadas por meio de suas propriedades mecânicas, dadas pela resistência à tração por compressão diametral (RT), pelo módulo de resiliência (MR) e pela vida de fadiga. Estes ensaios foram realizados em amostras cilíndricas compactadas na prensa Marshall. Os experimentos conduziram a revestimentos asfálticos satisfatórios em relação às características funcionais e mecânicas. Com os valores de módulo de resiliência e a vida de fadiga determinados em laboratório, foram definidos os parâmetros necessários a um projeto de pista aeroportuária baseado em critérios mecânicos de acordo com o método da FAA (*Federal Aviation Administration*), codificado no programa FAARFIELD (*Pavement Airport Design*). Para tanto, tomou-se como estudo de caso a segunda pista do Aeroporto Internacional de Brasília inaugurada em 2005, analisando-se sua estrutura de projeto e o revestimento com os três tipos de misturas formuladas em laboratório, além da mistura de fato aplicada na pista. As respostas das estruturas simuladas com o programa foram comparadas com a obtida no método de dimensionamento tradicional baseado no CBR, utilizada no projeto executivo. A análise mecânica revelou que a aeronave A319-100 e a que produz mais danos às estruturas analisadas, enquanto que a metodologia tradicional prescreve a aeronave MD-11 com base no seu maior peso bruto. Para a estrutura atual e, considerando-se o tráfego projeto e os parâmetros mecânicos adotados, previu-se uma vida de fadiga total de cerca de oito anos. Para as três misturas estudadas, os resultados mostram um melhor desempenho da mistura DZR para as condições de tensão geradas pelo tráfego previsto e a espessura adotada de 14 cm no projeto. Entretanto é possível se projetar pistas com qualquer das três misturas, adotando-se uma espessura adequada aos seus respectivos critérios de fadiga.

ABSTRACT

This dissertation presents the results of a study about hot mix asphalts (HMA) to be used as surface course of airport pavements. Three mixes were designed according to the specifications for dense mixtures (Grade 2) of the Brazilian Bureau for Aeronautics Engineering (DIRENG). The mixes were designated as AZR, DZR and BZR, if their grading curve passed above, through or below the restriction zone of the Superpave methodology, respectively. The materials were characterized using the norms prescribed by DIRENG and by the Brazilian Department of Infrastructure for Transports (DNIT) and the results satisfied the limit values required by these institutions. The functional characteristics related to tire-pavement adhesion were investigated by means of tests to evaluate macrotexture (Sand Patch Test), microtexture (British Pendulum Test) and surface drainability using the Flowmeter. These tests were carried out on slabs specially compacted in the laboratory. The mechanical characteristics of the three mixes were evaluated by means of Indirect Tensile Strength, Resilient Modulus and Fatigue tests on Marshall samples. All designed and tested mixes presented satisfactory results with respect to their functional and mechanical characteristics. The mechanical properties obtained from laboratory and field tests were used as input of mechanistic analyses using the new method proposed by the Federal Aviation Administration (FAA) of the USA, which is coded in a program called FAARFIELD (Pavement Airport Design). The second runway of Brasilia International Airport, which was inaugurated in 2005, was used as a case study. Its structure was reanalyzed using the as built project and the three HMA designed in laboratory. The response obtained from the mechanistic approach was compared with the results predicted with the conventional method based on the California Bearing Ratio (CBR), used in the original design. The tensional analyses revealed that most of the fatigue damage impaired to the runway was due the airbus A319-100, contracting the project aircraft MD-11 adopted in the conventional CBR method, which is based on the gross weight of the airplane. The analyses forecasted a fatigue life of about eight years for the new runway, considering the traffic estimates and material parameters adopted in the project. Among the mixes designed in laboratory, that designated as DZR showed the best performance considering the level of stresses generated by the predicted aircraft traffic and the HMA layer thickness of 14 cm adopted in the project. However, it is possible to apply any of three the mixes if the appropriate surface layer thickness is computed according to the fatigue life curves for each mixture.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....1

Introdução

1.1. MOTIVAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	1
1.2. OBJETIVO DA PESQUISA	3
1.3. METODOLOGIA UTILIZADA	3
1.4. ESCOPO DO TRABALHO	4

CAPÍTULO 2.....6

Revisão Bibliográfica

2.1. CONSIDERAÇÃO INICIAL	6
2.2. PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS VERSUS RODOVIÁRIOS	6
2.2.1. TRÁFEGO.....	8
2.2.2. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO.....	10
2.2.3. COMPRIMENTO DA PISTA DE POUSO E DECOLAGEM	14
2.3. ACIDENTES AEROPORTUÁRIOS.....	16
2.3.1. CONDIÇÃO METEOROLÓGICA	17
2.3.2. O HOMEM.....	18
2.3.3. A AERONAVE	19
2.3.4. A INFRAESTRUTURA.....	20
2.4. ACIDENTES NA AVIAÇÃO EM NÚMEROS.....	21
2.5. IMPORTÂNCIA DAS AVALIAÇÕES FUNCIONAIS E ESTRUTURAIS NOS PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS	23
2.5.1. ANÁLISE FUNCIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS	24
2.5.1.1. COEFICIENTE DE ATRITO	24
2.5.1.2. INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO	26
2.5.1.3. AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA EM PISTAS MOLHADAS	26
2.5.1.4. TEXTURA DA SUPERFÍCIE DOS PAVIMENTOS	30
2.5.1.5. ÍNDICE INTERNACIONAL DE ATRITO (IFI)	36
2.5.2. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL.....	37
2.5.2.1. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO.....	39
2.5.2.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS PISTAS AEROPORTUÁRIAS.....	41
2.5.2.3. AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS EM LABORATÓRIO	43
2.6. MISTURAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS NAS PISTAS DO PAÍS	44

CAPÍTULO 3.....47

Materiais e Métodos de Ensaio

3.1. INTRODUÇÃO	47
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	48
3.2.1. AGREGADO MINERAL	48
3.2.2. LIGANTE ASFÁLTICO.....	56
3.2.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DO ASFALTO - ENSAIOS CORRENTES	57
3.2.3. PROCEDIMENTOS DE DOSAGEM E COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	63
3.2.3.1. SELEÇÃO DA GRANULOMETRIA.....	63
3.2.3.2. METODOLOGIA DE DOSAGEM MARSHALL.....	65
3.2.3.3. PROCEDIMENTO DE DOSAGEM UTILIZADO	70
3.3. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIOS MECÂNICOS	72
3.4. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIOS FUNCIONAIS	73
3.5. CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS E MECÂNICAS.....	75
3.5.1. ENSAIOS FUNCIONAIS	75
3.5.1.1. MANCHA DE AREIA	75
3.5.1.2. DRENABILIDADE (OUTFLOW)	76
3.5.1.3. PÊNDULO BRITÂNICO (ATRITO ESTÁTICO)	77
3.5.1.4. CÁLCULO DO IFI.....	78
3.5.2. ENSAIOS MECÂNICOS.....	80
3.5.2.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	80
3.5.2.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA	82
3.5.2.3. VIDA FADIGA.....	85
3.5.3. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	88

CAPÍTULO 4.....91

Apresentação e Análise dos Resultados

4.1. INTRODUÇÃO	91
4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS	91
4.2.1. CARACTERÍSTICAS DO CAP.....	91
4.2.2. CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MINERAL	93
4.3. AVALIAÇÃO FUNCIONAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	97
4.3.1. AVALIAÇÃO DAS PLACAS	99
4.3.2. AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA	101
4.3.3. AVALIAÇÃO DA DRENABILIDADE	103

4.3.4. AVALIAÇÃO DA MICROTEXTURA.....	105
4.3.5. ATRITO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	107
4.4. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL.....	108
4.4.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	109
4.4.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	112
4.4.3. VIDA DE FADIGA	114
CAPÍTULO 5.....	116
<i>Estudo Mecânico do Dimensionamento da nova pista de AIB</i>	
5.1. INTRODUÇÃO.....	116
5.2. O MÉTODO EMPÍRICO DE DIMENSIONAMENTO	116
5.2.1. ESTRUTURA DO PAVIMENTO DA NOVA PISTA DO AIB.....	119
5.3. MÉTODO MECÂNICO – PROGRAMA FAARFIELD	121
5.3.1. REAVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO DA NOVA PISTA DO AIB.....	125
5.3.2. AVALIAÇÃO DA VIDA DE FADIGA COM AS MISTURAS AZR, DZR E BZR.....	130
CAPÍTULO 6	136
<i>Conclusões</i>	
6.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Dimensões de uma aeronave (Alves, 2007).	10
Figura 2.2 - Forma esquemática da distribuição transversal da carga nas rodovias e nos aeródromos, respectivamente (Medina & Motta, 2005).....	11
Figura 2.3 - Distribuição típica de tensão sob uma roda de carga (Haas e Hudson, 1978).....	11
Figura 2.4 - Efeito das rodas duplas sobre os pavimentos; (a) base de pequena espessura (aprox. 25 cm); (b) base de grande espessura (aprox. 150 cm) (Medina & Motta, 2005).	12
Figura 2.5 - Fatores contribuintes; Perda de controle em voo, período de 1998 a 2007 (CENIPA, 2007).	19
Figura 2.6 - Caixa de inspeção com cerca de 22 cm de altura na lateral da Pista 17R/35L (CENIPA, 2008).	20
Figura 2.7 - Acidentes e fatalidades de aeronaves por fases de voo (Boeing, 2008).	22
Figura 2.8 - Acidentes aéreos x Frota de aeronaves no Brasil (CENIPA, 2007).....	22
Figura 2.9 - Defeitos encontrados na pista antiga do AIB (Silva, 2008).....	23
Figura 2.10 - Fenômeno da hidroplanagem.....	27
Figura 2.11 - Acidentes ocorrido na pista do aeroporto de Congonhas SP.....	28
Figura 2.12 - Revestimento com grooving bastante contaminado; Detalhe do revestimento antes e após o desemborrachamento (Rodrigues Filho, 2006).....	29
Figura 2.13 - Processo de emborrachamento das pistas de pouso e decolagem.....	30
Figura 2.14 - Microtextura e macrotextura na superfície de um revestimento asfáltico.....	30
Figura 2.15 - MuMeter - INFRAERO	31
Figura 2.16 - Pêndulo britânico utilizado; LER-Ceftru-UnB	32
Figura 2.17 - Drenômetro desenvolvido pelo ISETH “flow-meter” e drenômetro desenvolvido pelo LER-Ceftru-UnB, respectivamente.....	35
Figura 2.18 - Correlação entre os ensaios de mancha de areia e drenabilidade (Rodrigues Filho, 2006)	36
Figura 2.19 - Representação esquemática das deformações em misturas asfálticas (Sides et al.,1985).	38
Figura 2.20 - Trincheira para inspeção na nova pista do AIB (Farias & Falcão, 2006).....	40
Figura 2.21 - Faixa granulométrica camada de rolamento – CBUQ.....	45
Figura 2.22 - Aspecto geral do corpo-de-prova extraído da pista 17R/35L (Rodrigues Filho, 2006) ..	46
Figura 3.1 - Agregado calcário utilizado na pesquisa, Brita 01.....	49
Figura 3.2 - Máquina Los Angeles; LER-Ceftru-UnB.....	50
Figura 3.3 - Ensaio de densidade de agregado graúdo.....	51
Figura 3.4 - Determinação do peso específica do pó-de-pedra; Frasco de Chapmam	52
Figura 3.5 - Determinação do peso específica do filer; Frasco Le Chatelier.....	53

Figura 3.6 - Adesividade do agregado graúdo; Aspecto da amostra antes e após a imersão	55
Figura 3.7 - Cimento asfáltico de petróleo; (a) Estado viscoelástico na temperatura ambiente; (b) Estado líquido a altas temperaturas.....	56
Figura 3.8 - Ensaio de ponto de amolecimento.	57
Figura 3.9 - Ensaio de penetração; Equipamento LER-Ceftru-UnB.....	58
Figura 3.10 - Equipamento para determinação do ponto de fulgor; Vaso aberto de Cleveland; LER-Ceftru-UnB	59
Figura 3.11 - Moldagem dos corpos-de-prova e execução do ensaio de ductilidade.....	60
Figura 3.12 - Ensaio de viscosidade; Viscosímetro Saybolt-Furol – LER-Ceftru-UnB	61
Figura 3.13 - Viscosímetro Brookfield LER-Ceftru-UnB; (a) equipamento completo; (b) controlador de temperatura	62
Figura 3.14 - Requisitos Superpave para granulometria de misturas contínuas aeroportuárias	64
Figura 3.15 - Esquema ilustrativo dos parâmetros volumétricos de uma mistura asfáltica compactada (Bernucci et. al., 2006).....	67
Figura 3.16 - Gráfico de obtenção do teor de projeto; Curva DZR	72
Figura 3.17 - Processo de confecção dos corpos-de-prova	73
Figura 3.18 - Etapas da moldagem das placas asfáltica	74
Figura 3.19 - Ensaio funcionais realizados em laboratório.....	75
Figura 3.20 - Aparelhagem e procedimento de ensaio de mancha de areia	76
Figura 3.21 - Execução do ensaio de drenabilidade; LER-Ceftru-UnB	77
Figura 3.22 - Execução do ensaio de pêndulo na placa	78
Figura 3.23 - Esquema do ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral (DNER-ME 138/94)	81
Figura 3.24 - Prensa mecânica utilizada para realização dos ensaios de resistência à tração; LER-Ceftru-UnB.....	82
Figura 3.25 - Equipamento pneumático de carga repetida; LER-Ceftru-UnB	83
Figura 3.26 - Últimos 05 pulsos de carregamento fornecidos pelo programa.....	84
Figura 3.27 - Representação dos tipos de solicitações (Pinto, 1991).....	85
Figura 3.28 - Ensaio de fadiga em andamento	88
Figura 4.1 - Comparação entre as viscosidades Saybolt-Furol e Brookfield do CAP 50/70 na determinação da faixa de mistura e de compactação.	92
Figura 4.2 - Granulometria dos agregados	94
Figura 4.3 - Distribuições granulométrica adotadas	96
Figura 4.4 - Adesividade do agregado calcário ao ligante betuminoso.....	97
Figura 4.5 - Comportamento do atrito global das misturas estudadas para diversas velocidades	107
Figura 4.6 - Equipamento de carregamento cíclico e suas partes constituintes.....	109
Figura 4.7 - Análise visual da distribuição granulométrica das misturas AZR, DZR e BZR, respectivamente	112

Figura 4.8 - Valores de resistência à tração (MPa) das misturas ensaiadas nesta pesquisa.....	112
Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de módulo de resiliência com os respectivos teores de projeto de cada mistura.....	113
Figura 4.10 - Vida de fadiga das misturas estudadas	115
Figura 5.1 - Curvas de determinação da espessura dos pavimentos flexíveis	118
Figura 5.2 - Estrutura do pavimento da segunda pista do AIB, dimensões em metros	120
Figura 5.3 - Fator acumulativo de dano. Efeito combinado das aeronaves que compõem o tráfego (FAARFIELD versão 1.203, 2008).....	123
Figura 5.4 - Trincheira de inspeção e realização de ensaios de campo. Aparelho Geogauge em uso no AIB (Farias & Falcão, 2006).....	125
Figura 5.5 - Ponto de cálculo das tensões principais utilizando o programa Kenlayer.....	128
Figura 5.6 - Estruturas com os MR obtidos com o Geogauge e MR convergidos analisadas no programa FAARFIELD.....	129
Figura 5.7 - Estruturas analisadas	130
Figura 5.8 - Extrapolação das curvas de fadiga de laboratório.....	134
Figura 5.9 - CDF laboratório x Espessuras de revestimento	135

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características das pistas e dos veículos: rodovias e aeródromos (Medina & Motta, 2005).	7
Tabela 2.2 - Características de algumas aeronaves de transporte.....	9
Tabela 2.3 - Dimensões das pistas dos principais aeroportos do País (Infraero, 2008).....	15
Tabela 2.4 - Tamanho necessário da pista para determinadas aeronaves (Aero Museu; Space Virtual Airline, 2009).....	16
Tabela 2.5 - Classificação da microtextura com pêndulo britânico (ABPv, 1999).....	32
Tabela 2.6 - Classificação da macrotextura segundo a altura da mancha de areia (Aps, 2006).	33
Tabela 2.7 - Resultados de mancha de areia no Aeroporto de Congonhas (Aps, 2006).	34
Tabela 2.8 - Classificação do IFI para velocidade padrão de 60 km/h (Aps, 2006).	37
Tabela 3.1 - Quantidade de material e cargas abrasivas.....	51
Tabela 3.2 - Massa das frações das amostras e conjunto dos crivos redutores.....	54
Tabela 3.3 - Faixas granulométricas para camada de rolamento (DIRENG, 2002).....	63
Tabela 3.4 - Tipo de misturas de acordo o pavimento onde serão utilizadas (DIRENG, 2002).....	70
Tabela 3.5 - Parâmetros físicos das misturas asfálticas (DIRENG, 2002).	71
Tabela 3.6 - Mínimo de vazios do agregado mineral (DIRENG, 2002).....	71
Tabela 4.1 - Propriedades convencionais da amostra do CAP 50/70 utilizado neste estudo	92
Tabela 4.2 - Resultado do peso específico real e aparente e da absorção dos materiais.....	94
Tabela 4.3 - Composição do traço para mistura do tipo AZR.....	95
Tabela 4.4 - Composição do traço para mistura do tipo DZR.....	95
Tabela 4.5 - Composição do traço para mistura do tipo BZR.....	95
Tabela 4.6 - Parâmetros previstos para as placas compactadas com rolo monocilindro.....	98
Tabela 4.7 - Parâmetros obtidos para as placas compactadas e ensaiadas neste estudo	98
Tabela 4.8 - Níveis de significância (p%) de valores de % Vv dos CPs retirado da placa BZR	99
Tabela 4.9 - Níveis de significância (p%) de valores de % Vv dos CPs retirado da placa AZR.....	100
Tabela 4.10 - Níveis de significância (p%) de valores de % Vv dos CPs retirado da placa DZR.....	101
Tabela 4.11 - Medidas da altura da mancha de areia; média e desvio padrão amostral.....	102
Tabela 4.12 - Distribuição “t” de Student para valores da mancha de areia obtidos nas placas.....	102
Tabela 4.13 - Valores médios e possível classificação da macrotextura das placas em estudo.....	103
Tabela 4.14 - Níveis de significância (p%) de valores de macrotextura das placas em estudo.....	103
Tabela 4.15 - Medidas da vazão (l/s) nos quatros pontos ensaiados; média e desvio padrão amostral da drenabilidade	104
Tabela 4.16 - Distribuição “t” de Student para valores da drenabilidade das placas deste estudo	104

Tabela 4.17 - Valores médios da vazão da água (l/s) pelos canais da mistura	105
Tabela 4.18 - Média e desvio padrão amostral da microtextura (em BPN)	105
Tabela 4.19 - Distribuição “t” de Student para valores de pêndulo britânico	106
Tabela 4.20 - Valores médios da microtextura medida com o pêndulo britânico.....	106
Tabela 4.21 - Níveis de Significância (p%) de valores de microtextura	106
Tabela 4.22 - Valores de Sp e de F60 para as misturas analisadas	107
Tabela 4.23 - Média e desvio padrão amostral da resistência à tração	110
Tabela 4.24 - Distribuição “t” de Student para valores de resistência à tração	110
Tabela 4.25 - Valores médios da resistência à tração das misturas	111
Tabela 4.26 - Níveis de significância (p%) de valores de resistência à tração	111
Tabela 4.27 - Valores médios dos módulos de resiliência das misturas deste estudo.....	113
Tabela 4.28 - Níveis de significância (p%) dos valores de módulo de resiliência.....	114
Tabela 4.29 - Valores dos coeficientes k_2 , n_2 e do coeficiente de determinação R^2	115
Tabela 5.1 - Fatores de conversão de trens de pouso.....	117
Tabela 5.2 - Faixas granulométricas da DIRENG ES de 1998 e ES de 2002.	121
Tabela 5.3 - Valores de módulo de elasticidade em diferentes pontos (Farias & Falcão, 2006).....	126
Tabela 5.4 - Dados do tráfego aéreo utilizado (Planorcon, 2003)	126
Tabela 5.5 - Valores interativos dos módulos de resiliência dos materiais de base e sub-base.....	129
Tabela 5.6 - Valores do CDF para o revestimento asfáltico e subleito	129
Tabela 5.7 - Fator acumulativo de danos para o revestimento asfáltico e subleito das estruturas analisadas	131
Tabela 5.8 - Número de solicitações para a mistura AZR por tipo de aeronave	132
Tabela 5.9 - Número de solicitações para a mistura DZR por tipo de aeronave	133
Tabela 5.10 - Número de solicitações para a mistura BZR por tipo de aeronave.....	134

NOMECLATURAS E ABREVIACÕES

ABPv	Associação Brasileira de Pavimentação
ACN	Aeroporto Internacional de Brasília
AIB	Aircraft Condition Number (Número de condição da aeronave)
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional do Petróleo
<i>apud.</i>	Citado por
ASG	Air Safety Group
ASTM	American Society for Testing and Materials
AZR	Acima da Zona de Restrição
BPN	British Pendulum Number
BZR	Abaixo da Zona de Restrição
CAP	Concreto Asfáltico de Petróleo
CDF	Fator Cumulativo de Dano
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CEFTRU	Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo-de-prova
DAC	Departamento de Aviação Civil do Comando da Aeronáutica do Brasil
DCP	Cone Dinâmico de Penetração (Dynamic Cone Penetration)
DIRENG	Diretoria de Engenharia da Aeronáutica
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DZR	Dentro da Zona de Restrição
<i>et. al.</i>	E outros
FAA	Federal Aviation Administration (Agência Federal de Aviação dos Estados Unidos)
FAARFIELD	Airport Pavement Design
FOD	Foreing Object Damage
IAC	Instrução de Aviação Civil
ICAO	International Civil Aviation Organization (Organismo das Nações Unidas para assuntos de aviação civil no mundo todo)
IFI	International Friction Index
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária

LER	Laboratório de Engenharia Rodoviária
LEDFAA	Layered Elastic Design
LDM	Linha de Densidade Máxima
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MR	Módulo de Resiliência
N	Vida de Fadiga
MuMeter	Equipamento inglês de medição contínua de atrito
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NOTAM	Notice to Airmen (Aviso aos Aeronavegantes)
PCI	Pavement Condition Index (Índice de Condição do Pavimento)
PCN	Pavement Condition Number (Número de condição do pavimento)
RBV	Relação Betume-Vazios
RT	Resistência a Tração Estática por Compressão Diametral
TC	Tensão Controlada
UnB	Universidade de Brasília
UNIT	Unidade de Infraestrutura de Transportes
USACE	United States Army Corps of Engineers
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VCB	Vazios Cheios com Betume
Vv	Volume de Vazios
ZR	Zona de Restrição
%Mín	Porcentagem Mínima
%Máx	Porcentagem Máxima

SÍMBOLOS

CBR	Capacidade de Suporte
cm ³	Centímetro cúbico
D _m	Diâmetro médio da Mancha de Areia
<i>E</i>	Módulo de Elasticidade
FRS	Valores de atrito medidos com Pêndulo Britânico
FR ₆₀	Fator ajustado de atrito para a velocidade de 60 km/h
HS	Altura média da Mancha de Areia
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
km/h	Quilômetro por hora
l/s	Litros por segundo
mm	Milímetro
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
MPa	Mega Pascal
n	Número de determinações
N	Força Normal
<i>p</i>	Nível Observado de Significância
P	Carga aplicada
s	Desvio Padrão
S	Velocidade de deslocamento
Sp	Constante de velocidade
Tx	Parâmetro de textura, determinado a partir de valores obtidos para determinação da macrotextura em função do equipamento utilizado.
V	Volume de areia
μ	Coefficiente de atrito
μ _a	Atrito devido à adesão
μ _D	Coefficiente de atrito ao deslizamento
μ _h	Atrito devido à histerese
%	Porcentagem

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. MOTIVAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DA PESQUISA

O Brasil é o sexto agrupamento populacional no planeta, somando cerca de 194 milhões de habitantes espalhados irregularmente sobre 8,5 milhões de km² (*Indicators on Population*, 2007). Dotado de uma malha rodoviária pavimentada relativamente pequena em relação à malha total, e por vezes mal conservada, com poucas ferrovias e uma rede fluvial de baixa utilização, o transporte aéreo torna-se uma alternativa relevante de deslocamento e, às vezes, única de acesso a determinadas regiões.

A indústria do transporte é responsável por cerca de 3,5% do PIB do país. Dentre os elementos que compõem os sistemas de transporte brasileiro, o transporte aéreo pode ser não apenas um negócio comercial, mas também servir como apoio estratégico, político e social. E para o seu desenvolvimento é necessária a evolução da infraestrutura aeroportuária e dos seus auxílios para que a prestação de serviços se efetue com eficiência, isto é, com rapidez, conforto e segurança.

No Brasil, a matriz de transporte é predominantemente rodoviária, com esta modalidade correspondendo a 96,2% da matriz de transporte de passageiros e a 61,8% da matriz de transporte de cargas. Por sua vez, o transporte aéreo tornou-se um dos setores mais dinâmicos da economia nacional, ampliando sua importância na matriz brasileira de transportes, representando, por seus atributos, uma opção cada vez mais relevante na escolha, de pessoas e empresas, de um meio de transporte rápido e confiável. Ainda de forma tímida, porém consistente, o transporte aéreo vem crescendo gradativamente com a economia, respondendo a cerca de 0,31% da matriz de cargas e a 2,45% da matriz de passageiros (CNT, 2006).

Segundo a ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil - o total de aeródromos no país é de 2014, sendo 715 públicos e 1299 privados. Dentre os públicos, os mais importantes são geridos pela Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - Infraero - que administra 67 Aeroportos, 32 Terminais de Logística de Carga e 80 Estações de Apoio à Navegação Aérea. Estes aeroportos geridos pela Infraero concentram aproximadamente 97% do movimento do transporte aéreo regular do Brasil, o que equivale a 2,0 milhões de pousos e decolagens de aeronaves nacionais e estrangeiras, transportando cerca de 110 milhões de passageiros anualmente, com um aumento de 8,24% entre 2006 e 2007 (INFRAERO, 2009).

Atualmente, o país encontra-se em meio a uma “crise” de confiabilidade referente à segurança do meio de transporte aéreo que por anos vendeu sua imagem de transporte mais seguro em relação aos demais. Inúmeros são os questionamentos a respeito da gênese do problema. Vários casos de acidentes de aeronaves em pouso, principalmente, chamam a atenção para as próprias pistas dos aeródromos.

Rodrigues Filho (2006), ao estudar as características de aderência do revestimento asfáltico utilizado na pista de pouso do aeroporto de Congonhas em São Paulo, afirma que num acidente aeronáutico quatro fatores contribuintes são os mais importantes: o avião, o homem, a condição meteorológica e a infraestrutura.

O Brasil é um país tropical sujeito a fenômenos meteorológicos que provocam chuvas intensas, que têm como características a curta duração e grande volume precipitado. O acúmulo de água na superfície do revestimento asfáltico associado à velocidade de deslocamento dos veículos e das aeronaves, normalmente alta, provocam o fenômeno da hidroplanagem (ou aquaplanagem). Esta falta de aderência entre o pneu e o pavimento faz com que as aeronaves e os veículos entrem num estado de flutuação sobre o lençol de água.

As estatísticas da Boeing mostram que 35% dos acidentes aeronáuticos ocorrem nas corridas de pouso ou decolagem, ou seja, nas pistas dos aeroportos, colocando os fatores contribuintes associados a essas fases do voo entre os mais recorrentes (Boeing, 2008).

De acordo com ICAO (1994), os dados de acidentes e incidentes relacionados a aeronaves que saíram das pistas, seja pelas extremidades ou pelas laterais, indicam que, em muitos casos, a causa principal, ou pelo menos um fator contribuinte foi a característica de atrito das pistas e a eficácia de frenagem do avião.

A pavimentação aeroportuária brasileira tem tido seu comportamento comprometido em diversas situações. Além da falta de especificações próprias, utilizando adaptações de especificações rodoviárias e estrangeiras, o excesso de carga das aeronaves devido à modernização das frotas de aeronaves, mais modernas e conseqüentemente mais pesadas, o “mau” dimensionamento da estrutura, o uso de materiais impróprios - em particular, as misturas asfálticas utilizadas nas pistas, os problemas constantes de drenabilidade, vêm causando deterioração e conseqüentemente aumentando o número de acidentes com aeronaves em pista, contribuindo assim o prolongamento da crise aérea no país.

O crescente interesse pelo desenvolvimento de misturas asfálticas mais resistentes para os pavimentos aeroportuários se insere no contexto da melhoria das condições das pistas, a partir da diminuição dos defeitos funcionais e estruturais (deterioração por fadiga e deformações permanentes) que podem ocorrer em decorrência das solicitações de cargas elevadas associadas a elevadas temperaturas.

1.2. OBJETIVO DA PESQUISA

O principal objetivo deste trabalho é avaliar se as especificações utilizadas atualmente no país para a confecção de misturas asfálticas a serem empregadas em pistas aeroportuárias conduzem a revestimentos que atendam às características desejadas de drenabilidade e atrito, indispensáveis à boa aderência pneu-pavimento, além de possuírem propriedades mecânicas adequadas para resistir aos esforços repetitivos do tráfego aéreo durante sua vida de projeto.

1.3. METODOLOGIA UTILIZADA

Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico abordando os principais aspectos relacionados aos pavimentos executados nos principais aeroportos do Brasil e do mundo, de modo a estabelecer uma base teórica relacionada ao escopo do trabalho.

Dentre os assuntos de maiores interesses destacam-se: os tipos de misturas asfálticas utilizadas nas pistas de pouso e decolagem, suas propriedades mecânicas e funcionais. Após o levantamento bibliográfico foi feita a seleção dos ensaios necessários para o estudo em

questão e das principais variáveis do processo de fabricação das misturas asfálticas. Em seguida, procedeu-se a seleção e caracterização dos materiais necessários à realização da pesquisa, como por exemplo, o ligante asfáltico convencional e o agregado mineral utilizado na confecção das misturas asfálticas. Uma vez caracterizados os materiais e selecionado os parâmetros necessários para o processo de fabricação das misturas asfálticas, diferentes composições granulométricas destes materiais foram agrupados para a realização dos ensaios desejados. Neste trabalho foram utilizadas misturas asfálticas densas de graduação contínua do tipo CBUQ. O estudo dessas misturas foi dividido em cinco fases: dosagem, fabricação e compactação, ensaios mecânicos, ensaios funcionais e análise dos resultados.

Com os resultados dos ensaios mecânicos foram definidos parâmetros necessários a um projeto de pista aeroportuária baseado em critérios mecanísticos de acordo com o programa da FAA (*Federal Aviation Administration*) codificado no programa FAARFIELD (*Pavement Airport Design*). Para tanto se tomou como estudo de caso a segunda pista do Aeroporto Internacional de Brasília (AIB) inaugurada em 2005. As estruturas simuladas com o programa foram comparadas com a obtida no método de dimensionamento tradicional baseado no CBR.

1.4. ESCOPO DO TRABALHO

Para que os estudos realizados possam ser entendidos de maneira objetiva, esta dissertação está dividida em seis capítulos, nos quais estão abordados os seguintes assuntos:

CAPÍTULO 1 - *Introdução*

Como já visto, este capítulo apresenta uma perspectiva geral de onde o presente trabalho se insere no atual contexto da engenharia aeroportuária, sua importância, os seus objetivos e a metodologia utilizada no estudo dos materiais e das misturas asfálticas.

CAPÍTULO 2 – *Revisão Bibliográfica*

É apresentada uma revisão bibliográfica a partir dos principais trabalhos da área, sobre a pavimentação aeroportuária, bem como sobre as diferentes granulometrias e procedimentos de dosagem de misturas asfálticas. São apresentados assuntos relacionados tais como, a condições das pistas dos principais aeroportos do país, diferenças e semelhanças entre

pavimentação aeroportuária e rodoviária, textura de pavimentos flexíveis como microtextura e a macrotextura, mecanismo de interação pneu pavimento (condição de atrito), acidentes em pistas, mostrando também a importância das avaliações funcionais e estruturais de pavimentos aeroportuários.

CAPÍTULO 3 – *Materiais e Métodos*

Nesse capítulo são apresentados os materiais empregados nesta pesquisa (agregado e ligante asfáltico), além do resultado da caracterização dos mesmos com um resumo do desenvolvimento dos ensaios, apresentando os equipamentos necessários para sua realização e os procedimentos adotados. Inclui a descrição detalhada dos procedimentos dos ensaios funcionais e mecânicos e descrição da preparação das placas e dos corpos-de-prova cilíndricos.

CAPÍTULO 4 – *Apresentação e Análise dos Resultados*

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos das análises de caracterização mecânica e funcional das misturas estudadas, os dados são tratados por meio da Distribuição “t” de Student, a fim de se determinar um intervalo de confiança entre os dados levantados em cada ensaio. Em seguida, os resultados contidos no intervalo de confiança são analisados estatisticamente por meio de Análise de Variância, a fim de se observar a maior ou menor relação entre eles.

CAPÍTULO 5 – *Estudo mecanístico do dimensionamento da nova pista do AIB*

São analisadas duas metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis de aeroportos. Como estudo de caso, é comparado o método CBR, já utilizado no memorial de cálculo da segunda pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Brasília (AIB), com o método mecanístico-empírico da FAA por meio do programa FAARFIELD (*Pavement Airport Design*).

CAPÍTULO 6 – *Conclusões e Recomendações Futuras*

São apresentadas as conclusões deste estudo, bem como recomendações para pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1. CONSIDERAÇÃO INICIAL

Nas pistas de pouso e decolagem, principalmente, e também nas de taxiamento, importa que a interação entre a aeronave e o pavimento não leve a uma resposta dinâmica capaz de prejudicar a operação da aeronave ou o conforto dos passageiros. Nas áreas de toque (cabeceiras), o emborrachamento da superfície é problemático, por reduzir os níveis de atrito.

Neste capítulo, são apresentados assuntos relacionados à pavimentação aeroportuária (pistas de pouso e decolagem), será mostrada uma breve comparação entre a pavimentação aeroportuária e rodoviária, além de uma explanação das condições das pistas dos principais aeroportos do país, conceitos sobre os mecanismos e causas de acidentes aeronáuticos, textura de pavimentos flexíveis, mecanismo de interação pneu-pavimento (condição de atrito), além da importância das avaliações funcionais e estruturais de pavimentos aeroportuários.

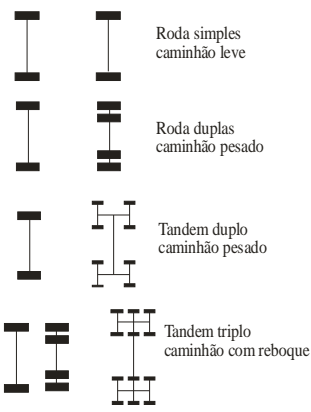
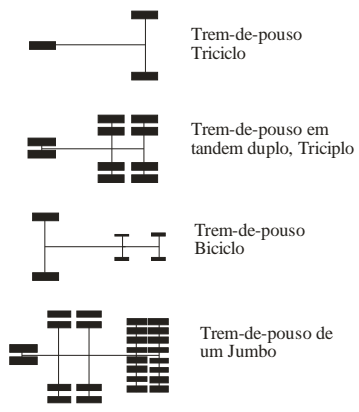
2.2. PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS *VERSUS* RODOVIÁRIOS

Os pavimentos aeroportuários apresentam similaridades com os pavimentos rodoviários em termos do tipo de materiais e serviços utilizados na sua constituição e aplicação, mas diferem consideravelmente na magnitude da carga aplicada, a pressão dos pneus, a seção geométrica do pavimento e o número de repetições de carga durante sua vida útil (Tabela 2.1).

Os pavimentos aeroportuários são construídos para suportar as cargas impostas pelas aeronaves, devendo apresentar um bom desempenho, sendo estáveis e resistentes às intempéries. Cargas mais pesadas e menor número de solicitações ocorrem nas pistas de

aeródromos se comparada com as cargas que ocorrem nas rodovias, sendo grande o impacto da aeronave no pavimento na hora do pouso.

Tabela 2.1 - Características das pistas e dos veículos: rodovias e aeródromos (Medina & Motta, 2005).

CARACTERÍSTICAS	RODOVIAS	AERÓDROMOS
Largura das pistas	7 a 10 m	23 a 45 m (táxis 10 a 23 m)
Comprimento	Vários Quilômetros	Até cerca de 4.000 m
Cargas	10 tf por eixo – Veículo 40 tf máximo.	100 tf ou mais por trem de pouso principal - Aviões de até 400 tf
Pressão dos pneus	1,5 a 6 kgf/cm ² (0,15 a 0,60 MPa)	10 a 30 kgf/cm ² (1,0 a 3,0 MPa)
Impacto do veículo no pavimento	Pequeno	Grande no pouso, porém minorado pela sustentação do ar e amortecimento
Ação de carga dinâmica (vibrações) de veículos parados	Não considerada	É importante nas cabeceiras das pistas, na decolagem e nas pistas de taxiamento
Geometria de Rodas	 <p>Roda simples caminhão leve</p> <p>Roda duplas caminhão pesado</p> <p>Tandem duplo caminhão pesado</p> <p>Tandem triplo caminhão com reboque</p>	 <p>Trem-de-pouso Triciclo</p> <p>Trem-de-pouso em tandem duplo, Triciclo</p> <p>Trem-de-pouso Biciclo</p> <p>Trem-de-pouso de um Jumbo</p>
Ação de frenagem	Não é relevante; nas ruas sim, nos semáforos, cruzamentos, pontos de ônibus, etc.	Importante quando do acionamento dos motores, com as rodas do trem de pouso travadas, antes da decolagem.

2.2.1. TRÁFEGO

As características do tráfego afetam a qualidade dos pavimentos flexíveis, devido a isto é que se tornou um importante parâmetro a ser considerado no projeto de um pavimento seja ele para fins rodoviários ou aeroportuários. Solicitações acima das previstas em projeto podem ocasionar degradações severas no material da superfície de rolamento.

O tráfego rodoviário é muito variado quanto ao tipo de veículos e cargas transportadas. Algumas das dificuldades no dimensionamento de pavimentos são a previsão da evolução do tráfego ao longo do tempo e a avaliação do poder de destruição, de modo comparativo, que exercem as várias cargas a diferentes níveis de repetições. Em virtude desta heterogeneidade, no caso rodoviário, o tráfego dos diferentes tipos de veículos geralmente é expresso em termos do número equivalente de solicitações do eixo padrão, um eixo simples de roda dupla com carga total de 82 kN (ou 8,2 tf).

Dessa forma, torna-se necessário classificar o mais detalhadamente possível a frota circulante, principalmente no que se refere aos caminhões. Porém, ocorrem inúmeros problemas para estimativa do tráfego rodoviário e um dos principais é a falta de controle da pressão de inflação de pneus dos veículos comerciais. A pressão de inflação em um eixo padrão é de 560 kPa (80 psi ou cerca de 5,62 kgf/cm²), mas na prática a pressão de inflação utilizada é 25% maior em torno de 690 kPa (100 psi ou 7,03 kgf/cm²). A consequência é a alteração da distribuição de tensão, causada pelo aumento da pressão de contato, que é admitida como igual à pressão de inflação do pneu.

Albano (1998), concluiu que a vida útil de um pavimento típico de rodovia vicinal pode sofrer uma redução de até 80% na vida útil, quando os excessos de carga chegam à ordem de 20%.

Com relação aos aeroportos, para se determinar o volume de tráfego é necessário o levantamento do número de partidas (decolagens) anuais por tipo de aeronave. Ao se fazer o planejamento da infraestrutura de um aeroporto é imprescindível o conhecimento das características físicas de cada aeronave que nele irá operar. Essas características são as dimensões, sua área de influência e os diversos tipos de composição do peso.

Para aviação, a segurança é vital seja na decolagem, no voo ou durante o pouso, de modo que nunca se transgrida a carga máxima. Ela é estabelecida levando-se em conta a estrutura do avião, as condições de operação nas pistas e a etapa de voo. Do peso bruto de um avião de

1500 kN (150 tf), cerca de 500 kN (50 tf) são de combustível. Já em rodovias as transgressões são frequentes, e as consequências são a degradação acelerada dos pavimentos e a sobrecarga das pontes e viadutos; mas, também, se verifica o desgaste maior do veículo e a redução da segurança na direção (Medina & Motta, 2005).

Com relação às cargas de aviões tem-se que o peso de um avião se divide nas parcelas, peso vazio de operação (avião, tripulação e equipamento de voo) – aproximadamente 5%

a) Carga paga ou *pay load* (passageiros, mala postal, carga) – aproximadamente 14%

b) Reservas de combustível – aproximadamente 6%

c) Peso zero Combustível – aproximadamente 35%

Onde o peso de pouso de uma aeronave se dá pela soma dos itens (a), (b) e (c), e a soma de todos os itens é o peso bruto máximo de decolagem (Horonjeff, 1966). Chega-se à conclusão de que o peso de uma aeronave é composto de uma constante, o peso vazio de operação e duas variáveis, o “*pay load*” e o combustível. A variedade de aeronaves que compõem as frotas comerciais pode ser observada na Tabela 2.2 que resume algumas das principais características: tamanho (m), peso (ton), capacidade, comprimento de pista requerido (m) etc.

Tabela 2.2 - Características de algumas aeronaves de transporte

<i>ANV</i>	<i>Env</i>	<i>Com</i>	<i>Bas</i>	<i>Bit</i>	<i>Mot</i>	<i>Pax</i>	<i>PMV</i>	<i>PMA</i>	<i>PVO</i>	<i>PZC</i>	<i>LP</i>
A320	34	38	13	8	2	150	74	65	41	61	2080
A300	45	54	19	10	2	266	165	138	90	130	2080
B737	29	34	12	5	2	141	57	52	32	48	2080
B777	61	64	26	11	2	340	243	202	136	191	3200
B747	60	70	26	11	4	496	352	260	174	243	2350

A envergadura (*Env*) e o comprimento (*Com*) da aeronave governam a geometria do Lado Aéreo do aeroporto, ou seja, as pistas de pouso e decolagem, as faixas de pista, as pistas de táxi ou rolamento e o pátio de estacionamento das aeronaves. A base (*Bas*), distância entre o trem de nariz e o eixo dos trens principais, e a bitola (*Bit*), distância entre os trens principais, impõem dimensões nas pistas e seus cruzamentos e curvaturas (Figura 2.1).

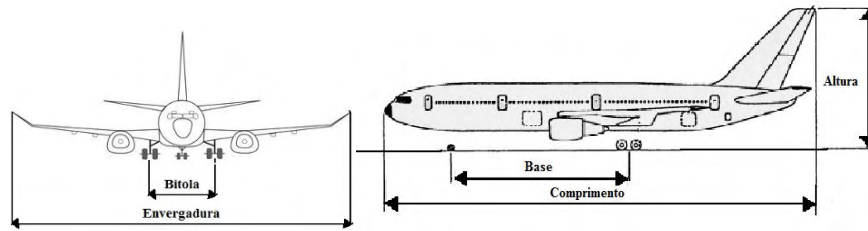


Figura 2.1 - Dimensões de uma aeronave (Alves, 2007).

Os pesos (PMD - Peso Máximo de Decolagem, PMA - Peso Máximo de Aterrissagem, PVO - Peso Vazio de Operação, PZC – Peso Zero Combustível), o empuxo gerado pelos motores (Mot) e a Carga paga ou *payload*, que pode ser expressa em termos de número de passageiros (Pax) definem as condições requeridas de operação para quantificação do comprimento de pista (LP). O LP, para as aeronaves citadas, está quantificado para as condições de referência, isto é, vento nulo, sem declividade de pista, ao nível de mar e na temperatura padrão.

Outras características podem assumir papel extremamente relevante. Por exemplo: as características do trem de pouso que faz a distribuição/interfaceamento do peso da aeronave com a pista por meio das áreas de contato dos pneus. Algumas aeronaves, mesmo que mais pesadas, acarretam, em função da configuração dos trens, uma necessidade de suporte de pavimento menor do que outras aeronaves mais leves (Alves, 2007).

A distribuição do peso da aeronave entre o trem de nariz e os trens principais é função do tipo da aeronave e da localização do seu centro de gravidade. Isto é variável ao longo de uma extensão denominada de passeio do centro de gravidade. Na análise de pavimentos considera-se uma distribuição de peso teórica tal que 5% do peso é recebido pelo trem de pouso do nariz e os 95% restantes pelos trens principais, de forma equitativa.

2.2.2. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Os pavimentos rodoviários e aeroportuários são dimensionados em função das características de suporte do material da fundação, das características dos materiais das camadas deste pavimento e, de forma preponderante, pela ação do tráfego de veículos que atuam sobre a superfície da pista durante um determinado número de anos que é chamado de vida útil ou período de projeto.

Com relação à distribuição transversal de cargas, praticamente não se faz diferenciação no dimensionamento de pistas rodoviárias, porém esta distribuição diferencia-se consideravelmente no dimensionamento transversal das pistas de aeródromos (Figura 2.2).

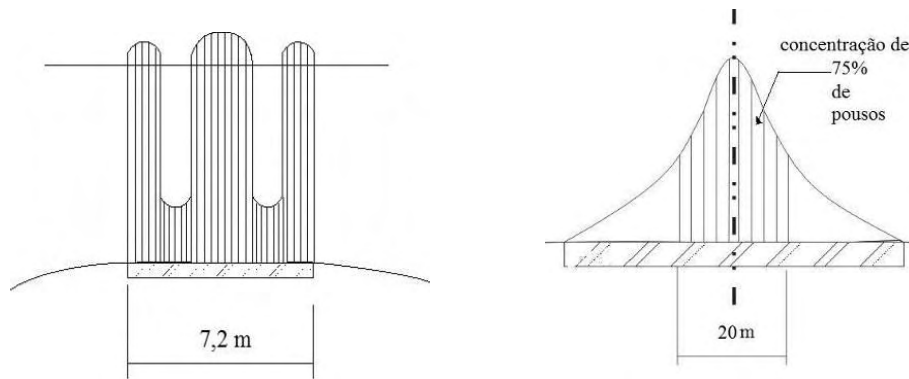


Figura 2.2 - Forma esquemática da distribuição transversal da carga nas rodovias e nos aeródromos, respectivamente (Medina & Motta, 2005).

A diferenciação do dimensionamento no sentido transversal em faixas contíguas de mesmo sentido de tráfego não é comum no Brasil. Recomenda-se fazer esta diferenciação nas rodovias de pistas separadas e de mais de duas faixas de tráfego (Medina & Motta, 2005).

No caso das pistas de pouso e decolagem de aeródromos, a intensidade de solicitações variáveis longitudinal e transversalmente, é levada em consideração no dimensionamento com a definição de áreas críticas e não críticas. Os revestimentos destas estruturas em geral são submetidos a esforços de compressão e de tração devidos à flexão, ficando as demais camadas submetidas principalmente à compressão (Figura 2.3). A Figura 2.4 mostra o efeito das rodas duplas sobre um revestimento flexível típico dos aeroportos, mostrando também a área de influência das rodas.

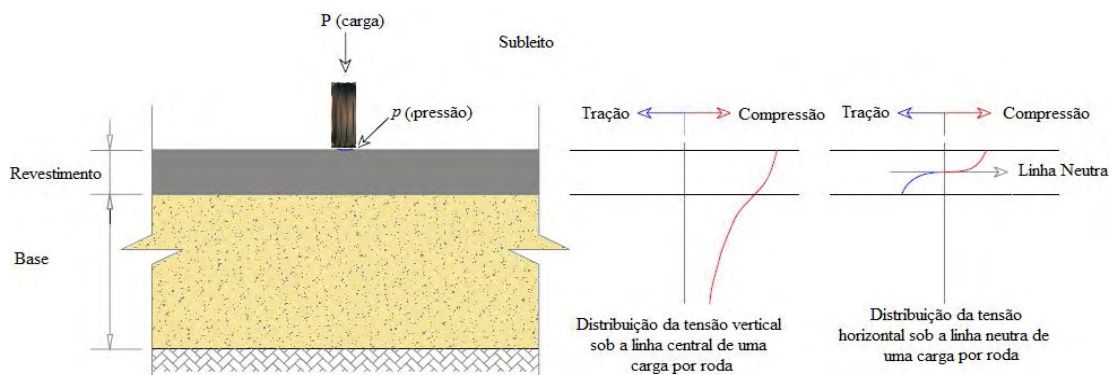


Figura 2.3 - Distribuição típica de tensão sob uma roda de carga (Haas e Hudson, 1978)

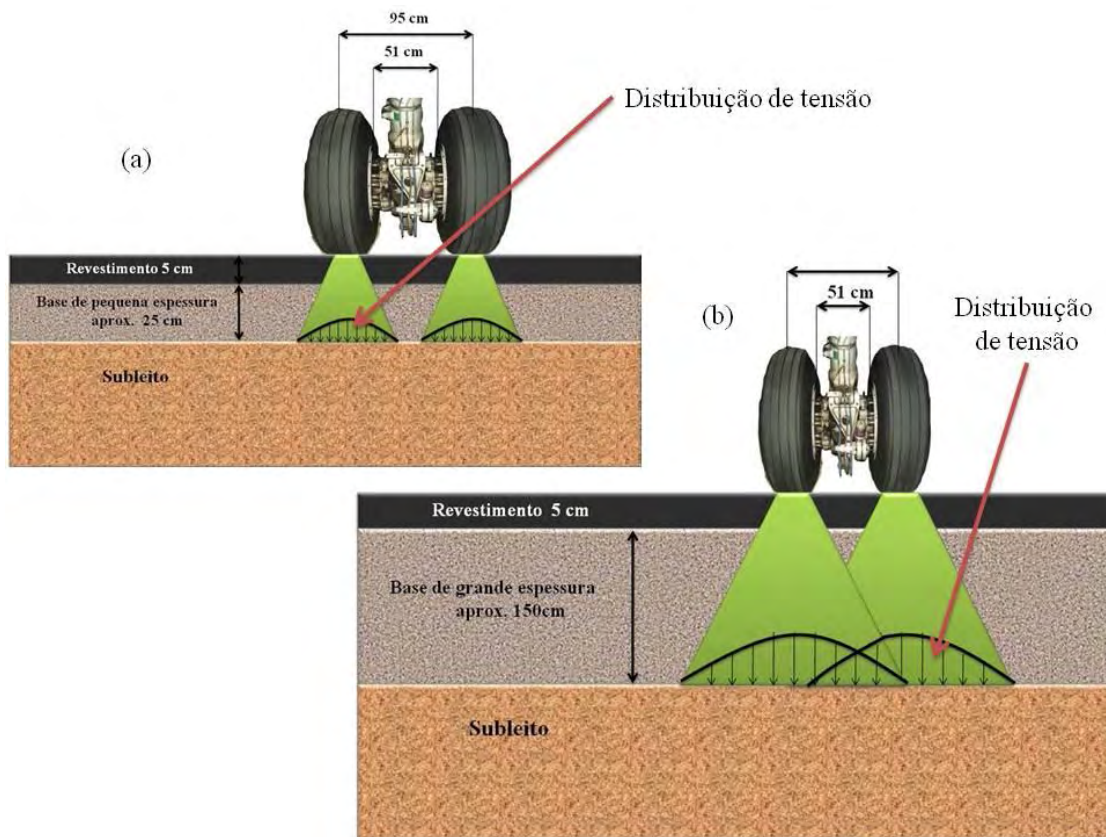


Figura 2.4 - Efeito das rodas duplas sobre os pavimentos; (a) base de pequena espessura (aprox. 25 cm); (b) base de grande espessura (aprox. 150 cm) (Medina & Motta, 2005).

Numa emergência de guerra, período da Segunda Guerra Mundial, ocorreu à necessidade de se obter um método de dimensionamento de pistas que fosse específico para aeroportos, foi então que se passou a utilizar o método do CBR (*Califórnia Bearing Ratio*) para cálculos de dimensionamento desses pavimentos devido principalmente à simplicidade dos ensaios do subleito e dos materiais componentes do pavimento. O método ainda hoje é utilizado no Brasil tanto para dimensionamento rodoviário, quanto para o aeroportuário.

Embora os projetos, tanto rodoviários quanto aeroportuários, sejam baseados em medidas de CBR, existem algumas diferenças importantes quanto às características geométricas e físicas decorrentes das solicitações de veículos em rodovias e em aeródromos, além de as cargas em aeródromos serem mais pesadas e em menor frequência do que em rodovias, como já visto anteriormente na Tabela 2.1.

A tarefa do dimensionamento deve-se à grande quantidade de variáveis de naturezas diversas. A consideração simultânea de tensões devidas ao tráfego, as variáveis climáticas, como

temperatura e umidade, a resistência do solo de fundação e dos materiais de construção disponíveis, a magnitude e a repetição das cargas de tráfego, a durabilidade do revestimento, são apenas alguns exemplos do alto grau de dificuldade existente na execução de um dimensionamento.

O projeto de pavimentos de aeroportos é um problema complexo que envolve um grande número de variáveis e de interações. No que se refere ao dimensionamento das pistas de pouso e decolagem, e de taxiamento, o método descrito no Boletim Técnico nº 17 da Associação Brasileira de Pavimentação (método da FAA-ICAO) tem como objetivo dimensionar pavimentos aeroportuários para uma vida útil de 20 anos. A metodologia é função do valor do Índice de Suporte Califórnia (CBR) do subleito e do número de repetições de um eixo padrão da aeronave de projeto.

Nos últimos anos, tem-se adotado processos empírico-mecanísticos para dimensionamento de diversas rodovias e pista de aeródromos, que além de mais racionais conduzem a melhores resultados. Esta abordagem mecanística implica no conhecimento das características resilientes dos materiais de pavimentação e da fadiga que ocorre nos revestimentos asfálticos, bem como na avaliação das mesmas em laboratório por meio de ensaios dinâmicos adequados, implicando na determinação das espessuras e escolha de materiais que vão compor as camadas.

Na década de 1990, a indústria aeronáutica passou a produzir aviões mais pesados de configurações de trens de pouso bastante diferentes aqueles em atividade, a FAA não repetiu o procedimento anterior, baseado no CBR do subleito e em ábacos de aeronaves padrão. A aplicação da mecânica dos pavimentos permitiu desenvolver o novo método de dimensionamento de pavimentos aeroportuários, denominado FAARFIELD (*Airport Pavement Design*) da FAA (FAA, 1995).

Em 2004, a FAA publicou um procedimento atualizado de dimensionamento baseado principalmente nos conceitos da mecânica dos pavimentos (Grag *et. al.*, 2004). Este novo procedimento possibilitou além da consideração de novos tipos de trens de pouso, a consideração dos parâmetros mecânico da teoria da elasticidade como fatores decisivos para um dimensionamento racional, levando em os módulos de resiliência dos materiais asfálticos e granulares, além da consideração da vida de fadiga do material asfáltico bem como a deformação vertical máxima admissível do subleito.

2.2.3. COMPRIMENTO DA PISTA DE POUSO E DECOLAGEM

A pista é o elemento de um aeroporto que mais demanda atenção, seja na determinação de seu comprimento e de sua espessura, seja em sua orientação magnética - de forma a levar em consideração os ventos existentes em um dado local, seja na determinação de suas demais características, como seus *greides* e áreas de segurança.

A determinação do comprimento de pista exige um rigor para que, uma vez atendidos os requisitos de segurança, possa-se ter um custo baixo. Ou seja, como em tantos outros aspectos de dimensionamento de transportes, e de aviação em particular, seja feito um equilíbrio entre segurança e economia, sempre priorizando a primeira. O comprimento de pista é tal que a aeronave em condições normais pouso e pare em 60% do comprimento de pista disponível para pouso. Durante o pouso a aeronave sobrevoa a cabeceira da pista a uma altura de cerca de 15 metros, com velocidade constante igual a 1,3 da velocidade de estol VS (velocidade mínima para se sustentar no ar). A título de exemplo, um Boeing 737 pouso numa velocidade entre 210 e 260 km/h, dependendo do peso e das condições meteorológicas.

Em termos gerais, o comprimento de pista de um aeroporto é função das características dos aviões que lá irão operar sejam eles já existentes ou em projeto, do peso destes aviões, uma vez que, quanto mais pesados maior será a pista necessária; dos aspectos meteorológicos e de *greide* da pista, que serão denominados, em termos gerais, de aspectos ambientais (ambiente meteorológico e físico); dos aspectos de segurança, que sempre farão com que sejam consideradas margens que aumentem a segurança das operações de aterragem e de decolagem; e do tipo e qualidade da superfície de rolamento da pista.

À medida que o transporte aéreo passou a se popularizar, tornando-se quase um transporte de massa para distâncias médias e grandes, os aeroportos modificaram-se de forma a atender a uma demanda com características distintas. De fato, ampliou-se a capacidade no espaço aéreo, permitindo um maior fluxo de aviões, o que implicou, por sua vez, em um maior aproveitamento das pistas. Assim foi necessário ampliar o terminal de passageiros, que passou a ter um papel mais importante entre os diversos subsistemas de um aeroporto.

A constante evolução da tecnologia na aviação é visível. Outros modelos de aviões estão sendo projetados e fabricados, como por exemplo, a Airbus A 380. Esse avanço é traduzido no aumento da capacidade de transporte de passageiros, no aumento da autonomia em voo e

em maiores velocidades, assim as aeronaves passam a necessitar de pistas de pousos cada vez maiores, e de pistas com camadas superficiais mais adequadas, para que os procedimentos de pouso e decolagem sejam realizados com maior segurança e conforto possíveis.

Usando dados da Infraero, sobre o comprimento efetivo (retirado o comprimento de segurança) das pistas dos principais aeroportos do país, foi constatado que a extensão de pista necessária para o pouso das aeronaves das principais companhias aéreas do país é próxima à extensão das pistas existentes. A Tabela 2.3 mostra dados referentes ao comprimento das pistas principal dos principais aeroportos do país.

Tabela 2.3 - Dimensões das pistas dos principais aeroportos do País (Infraero, 2008)

REGIÃO	AEROPORTOS	UF	PISTAS (comp. x largura, m x m)	
			PISTA 1	PISTA 2
Sul	Internacional de Navegantes	SC	1701 x 45	-
	Internacional de Florianópolis	SC	2300 x 45	1500 x 45
	Internacional Salgado Filho	RS	2280 x 42	-
	Internacional de Pelotas	RS	1980 x 42	1230 x 38
	Internacional Afonso Pena - Curitiba	PR	2215 x 45	1800 x 45
	Internacional de Foz do Iguaçu - Cataratas	PR	2195 x 45	-
Sudeste	Internacional Tancredo Neves	MG	3000 x 45	-
	Internacional do Rio de Janeiro-Galeão	RJ	4000 x 45	3180 x 47
	Santo - Dumont	RJ	1323 x 42	1260 x 30
	Internacional de Viracopos	SP	3240 x 45	-
	Internacional de Guarulhos	SP	3700 x 45	3000 x 45
	Campo de Marte	SP	1600 x 45	-
	Congonhas	SP	1640 x 45	1345 x 45
Centro-Oeste	Internacional JK - Brasília	DF	3200 x 45	3300 x 45
	Internacional Marechal Rondon	MT	2300 x 45	-
	Internacional Campo Grande	MS	2600 x 45	-
Norte	Internacional Rio Branco	AC	2158 x 45	-
	Internacional Eduardo Gomes - Manaus	AM	2700 x 45	-
	Internacional de Belém	PA	2800 x 45	1830 x 45
Nordeste	Internacional de Alagoas	AL	2600 x 45	-
	Internacional de Salvador	BA	3005 x 45	1520 x 45
	Internacional Pinto Martins	CE	2545 x 45	-
	Internacional Marechal Cunha Machado	MA	2385 x 45	1525 x 41
	Internacional Presidente Castro Pinto	PB	2515 x 45	-
	Internacional de Recife-Guararapes	PE	3300 x 45	-
	Internacional Augusto Severo	RN	2600 x 45	1825 x 45

A título de exemplo pode ser dado o Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu - Cataratas. De acordo com os dados da Infraero, o aeroporto possui uma pista de 2.195 metros de extensão por 45 metros de largura, e neste mesmo aeroporto opera aeronaves do tipo Boeing B747/100 e B747/200, estas aeronaves necessitam respectivamente, de 2.897 e 3.721 metros de extensão de pista para se realizar uma manobra de pouso em segurança.

Aeroportos como, Santos-Dumont (RJ), Congonhas (SP), Campo de Marte (SP), Salgado Filho (RS) entre outros, estão com suas pistas comprometidas, visto que, em situações de pista molhada a aeronave irá necessitar de um comprimento maior.

A Tabela 2.4 mostra valores de comprimentos necessários para pista de pouso e decolagem para aeronaves que compõem as frotas das principais companhias aéreas do país, em condições de peso máximo de decolagem.

Tabela 2.4 - Tamanho necessário da pista para determinadas aeronaves (Aero Museu; Space Virtual Airline, 2009)

<i>Fabricante</i>	<i>Aeronave</i>	<i>Tamanho necessário da pista em MTOW* (m)</i>	<i>Companhia Aérea</i>
Boeing	B777-300	3.410	TAM
	B777-300ER	3.200	TAM
	B767-3ER	2.080	TAM
	B737-800	2.080	Gol/Varig
	B737-700	2.080	Gol/Varig
Airbus	A319-100	1.950	TAM
	A320-200	2.090	TAM
	A321-100	2.080	TAM
	A330-200	2.080	TAM
	A330-200	2.080	TAP

* Peso Máximo de Decolagem (PMD, em inglês: *Maximum Take-Off Weight*, MTOW) é o peso máximo com o qual um determinado avião pode alçar vôo com segurança.

2.3. ACIDENTES AEROPORTUÁRIOS

Os acidentes aeronáuticos eram tratados como resultado único de falhas do avião (equipamento) ou do piloto (falha humana). Com o passar do tempo, este conceito foi modificado devido a um melhor entendimento das falhas inerentes à aviação. Atualmente, sabe-se que um acidente é resultado de inúmeras causas, também conhecidas como fatores

contribuintes, que juntas desencadeiam uma série de eventos e acabam por ocasionar o acidente.

Para o Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos – CENIPA, acidente aeronáutico é toda ocorrência relacionada com a operação de uma aeronave, havida entre o período em que uma pessoa nela embarca com a intenção de realizar um voo, até o momento em que todas as pessoas tenham dela desembarcado. O qual ocorra danos a aeronave ou danos aos passageiros.

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

Quando ocorre um acidente aéreo, logo se questionam quais as causas que levaram à ocorrência. Raramente encontra-se um único motivo, o que faz com que a resposta para este evento seja complexa. De acordo com a ICAO, as causas são ações, omissões, eventos, condições ou qualquer combinação que leve a um incidente ou acidente. A definição de causa leva em consideração os diversos eventos ocorridos em um incidente ou acidente, podendo ser considerados como elos.

Investigações de acidentes nos Estados Unidos revelaram cadeias de até 20 elos (fatores contribuintes), sendo que a média situa-se em torno de quatro fatores contribuintes que mais frequentemente aparecem relacionados a acidentes aeronáuticos, que de acordo com Rodrigues Filho (2006) e Silva (2008) são estes descritos a seguir.

2.3.1. CONDIÇÃO METEOROLÓGICA

Em países de climas tropicais, assim como o Brasil, sujeitos a fenômenos meteorológicos que provocam chuvas intensas, que têm como características a curta duração e grande volume precipitado, pouco adianta ao piloto saber que num período de tantas horas poderá chover. O piloto necessita de informações sobre as reais condições de tempo que irá encontrar quando estiver efetuando uma aproximação para pouso. Esta ausência de exatidão das informações meteorológicas faz com que, muitas vezes, o piloto encontre condições adversas com as quais não contava e, conseqüentemente, para as quais não estava preparado.

2.3.2. O HOMEM

O homem, por sua natureza, possui três principais fontes de informação pelas quais é capaz de manter o equilíbrio em relação à superfície da Terra: o sistema visual, o aparelho vestibular (ouvido interno) e o sistema proprioceptivo (pele e articulações). Este fator é considerado um contribuinte de extrema importância na ocorrência de um acidente. Visto que, em terra fontes de informações naturais funcionam devidamente bem e conjuntas, no entanto, em voo o corpo pode ser afetado bruscamente.

Uma variedade de acelerações fazendo com que somente os olhos sejam confiáveis para fornecer uma verdadeira imagem da altitude do corpo no espaço, isto claro, se receber informações corretas do mundo externo ou dos instrumentos de voo. Entretanto, as mais variadas ilusões de ótica podem acontecer, prejudicando sua interpretação.

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

A Figura 2.5 mostra alguns fatores contribuintes na aviação geral referentes à perda de controle em voo, por exemplo, como se é observado fatores como aplicação de comandos, julgamento, aspecto psicológico, pouca experiência de voo, todos estes estão diretamente ligados ao homem (CENIPA, 2007).

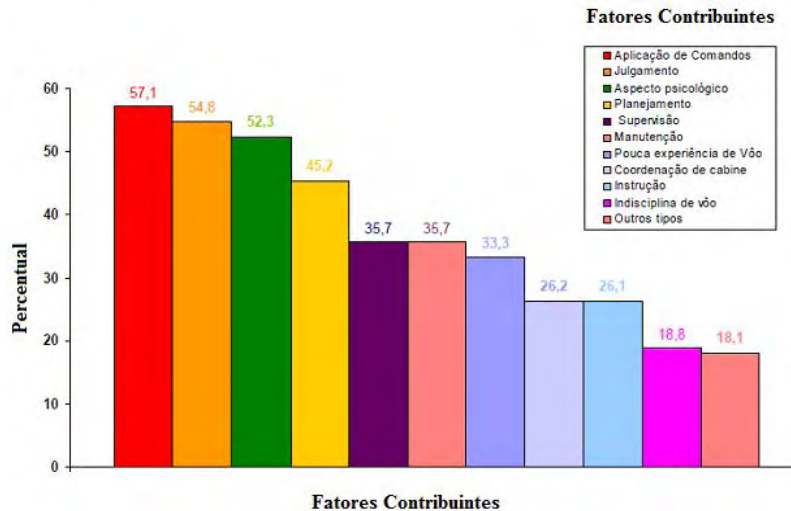


Figura 2.5 - Fatores contribuintes; Perda de controle em voo, período de 1998 a 2007 (CENIPA, 2007).

2.3.3.A AERONAVE

Rodrigues Filho (2006) e Silva (2008), em seus trabalhos, relatam que um dos maiores problemas encontrados era a falta de confiabilidade dos motores das aeronaves. Atualmente, devido ao elevado nível de tecnologia empregado na fabricação das aeronaves, raramente ocorrem falhas referentes a este fator. Entretanto, quando isso acontece, cria-se um desbalanceamento de forças que, além de reduzir o desempenho da máquina, gera sérios problemas de controlabilidade, que exigem o máximo da habilidade do piloto.

Da mesma forma, diversos instrumentos existentes na cabine de pilotagem de um avião moderno permitem que ele seja operado com segurança nas mais variadas condições de tempo. Todavia, como todo sistema complexo, estes dispositivos também criam a possibilidade do piloto, por qualquer motivo, operá-los erradamente. Esses dois exemplos indicam que a tecnologia aeronáutica, apesar de, sob certos aspectos ter facilitado a operação de um avião, acabou por criar outros problemas, que precisam ser solucionados para que um voo se torne mais seguro.

2.3.4. A INFRAESTRUTURA

De acordo com a CBAER (1986) a infraestrutura aeroportuária é bastante complexa, constituída pelo conjunto de aeródromos brasileiros, com todas as pistas de pouso, pistas de táxi, pátio de estacionamento de aeronaves, terminal de carga aérea, terminal de passageiros e as demais facilidades.

Devido a sua complexidade, vários fatores contribuintes de acidentes aeronáuticos são gerados dentro da infraestrutura aeroportuária. Destes, talvez os mais importantes relacionem-se às pistas de pouso e as faixas de pistas. As condições reais de macrotextura e microtextura da pista, o seu comprimento, a existência de obstáculo junto às pistas impõem elevado risco a segurança das operações, tornando o fator infraestrutura um dos mais relevantes na contribuição de acidentes aeronáuticos.

No caso do acidente com a aeronave PT-MFK, modelo ATR-42-300 da linha Aérea Pantanal ocorrido em 16 de julho de 2007 na pista principal do Aeroporto de Congonhas, por exemplo, dois fatores contribuintes para o acidente estão relacionados diretamente com a infraestrutura. O acúmulo de água na superfície da pista, em consequência da insuficiente drenagem, por falta de “*grooving*”, viabilizou a hidroplanagem. Além da existência de obstáculos na faixa de pista, da pista 17R/35L (Figura 2.6). Conforme descrito no relatório emitido pelo CENIPA (2008), após sair pela lateral esquerda da pista devido à hidroplanagem, a aeronave sofreu danos em virtude da colisão com caixas de concreto.



Figura 2.6 - Caixa de inspeção com cerca de 22 cm de altura na lateral da Pista 17R/35L (CENIPA, 2008).

Embora no acidente não tenha havido lesões às pessoas embarcadas, a colisão de aeronave com obstáculos robustos em velocidades altas, como as usuais logo após o pouso, pode

resultar em fogo ou explosão (CENIPA, 2008). Além das caixas de concreto atingidas, existem outras, às margens das pistas, que se constituem em obstáculos. Tal situação impõe riscos desnecessários à segurança das aeronaves e contraria a legislação aplicável ao assunto.

2.4. ACIDENTES NA AVIAÇÃO EM NÚMEROS

Estatísticas sobre a atividade do transporte aéreo no mundo indicam que os índices de acidentes têm uma relação direta com a evolução do número de aeronaves comerciais de grande porte em operação e a atividade do transporte aéreo no mundo. Neste sentido, a *Boeing Commercial Airplanes* vêm a cada ano atualizando esses resultados.

Em julho de 2008, ela apresentou dados referentes ao período de 1988 a 2007, sobre a evolução do número de aeronaves comerciais de grande porte em operação e a atividade do transporte aéreo no mundo, em termos de número de decolagens e de horas voadas. No ano de 2007 registraram-se cerca de 21 milhões de decolagens (correspondentes da mesma forma a 21 milhões de pousos) e cerca de 43 milhões de horas de voo.

No período de 1998 a 2007, pode-se observar que 35% dos acidentes, ou seja, 32 acidentes aconteceram nas fases da corrida de pouso ou decolagem, quando as aeronaves encontram-se nas pistas dos aeroportos, resultando em 23% do total, ou seja, 1155 vítimas fatais em acidentes com aeronaves em pista (Boeing, 2008). A Figura 2.7 apresenta o número de acidentes ocorridos, com aeronaves comerciais a jato, em cada fase do voo.

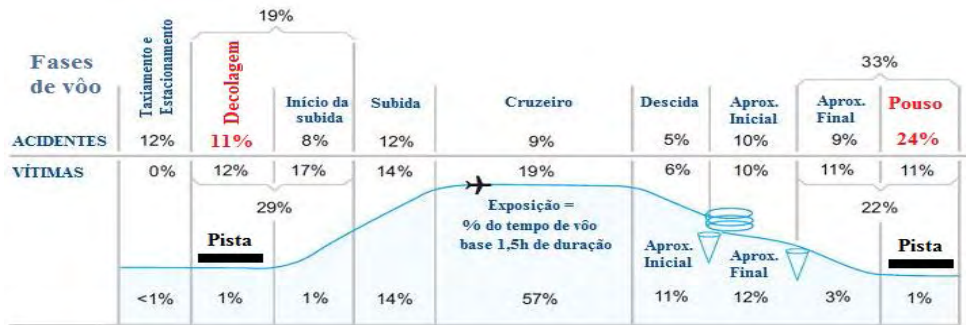


Figura 2.7 - Acidentes e fatalidades de aeronaves por fases de voo (Boeing, 2008).

No Brasil, segundo Infraero (2009), durante o ano de 2008 foi transportado um total de cerca de 112 milhões de passageiros, entre voos nacionais e internacionais somando embarque mais desembarque (mais conexão, sem militar). O número de aeronaves-pouso mais decolagem (sem militar) girou em torno de 2,1 milhões.

O CENIPA (2007) apresentou números que relacionaram os acidentes aéreos com a frota de aeronaves no Brasil (Figura 2.8). Apesar do crescente número de passageiros, o número de acidentes sofreu decréscimo ao longo dos anos. Esta redução no número de ocorrências pode ser atribuída ao aparato tecnológico disponível nas aeronaves além de adequações na infraestrutura e mão-de-obra qualificada.

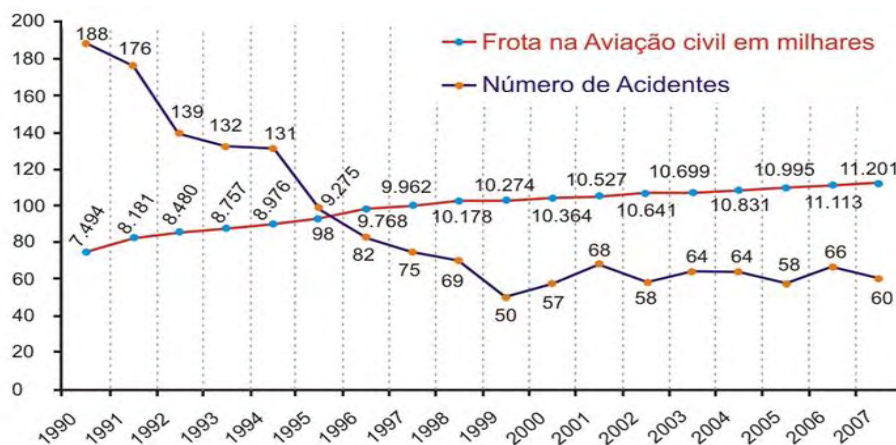


Figura 2.8 - Acidentes aéreos x Frota de aeronaves no Brasil (CENIPA, 2007)

2.5. IMPORTÂNCIA DAS AVALIAÇÕES FUNCIONAIS E ESTRUTURAIS NOS PAVIMENTOS AEROPORTUÁRIOS

Os pavimentos são estruturas que apresentam deterioração funcional e estrutural a partir do tráfego imposto. A avaliação funcional tem como palavras-chave: conforto ao rolamento, condição da superfície, interação pneu-pavimento, defeitos e irregularidades. Por sua vez, a avaliação estrutural, está associada ao conceito de capacidade de carga, que pode ser vinculado diretamente ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento.

Segundo Silva (2008) os parâmetros funcionais mais relevantes desta avaliação na pavimentação aeroportuária estão relacionados à segurança contra a derrapagem das aeronaves, a qual é função de uma boa interação pneu-pavimento.

Os aspectos estruturais de uma pista estão relacionados com a deterioração por fadiga dos revestimentos asfálticos visto que a queda na vida útil do pavimento tem se acelerado em função do acréscimo de carga e mudança nos padrões das aeronaves, cada vez mais pesadas, bem como da escolha das misturas que estão sendo empregada nestas pistas.

A Figura 2.9, mostra defeitos comuns ocorridos nas pistas dos aeroportos brasileiros. Esses defeitos, embora não sejam sentidos pelos passageiros das aeronaves são os causadores de muitos acidentes e incidentes, visto que pequenos buracos, trincas (executivas), desgaste da superfície de rolamento, provocam acúmulo de água na pista, diminuindo a aderência entre o pneu da aeronave e a pista, e conseqüentemente aumentam o risco de acidentes.



Figura 2.9 - Defeitos encontrados na pista antiga do AIB (Silva, 2008)

2.5.1. ANÁLISE FUNCIONAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Problemas funcionais da pista afetam diretamente o usuário da via, seja ela rodoviária ou aeroportuária, na forma de conforto ao rolamento. Quando o conforto é prejudicado, significa que o veículo também sofre mais intensamente as consequências desses defeitos. Essas consequências acarretam maiores custos operacionais, relacionados a maiores gastos com peças de manutenção dos veículos, com consumo de combustível e de pneus, com o tempo de viagem e segurança (custo com acidentes). Portanto, atender o conforto ao rolamento também significa economia nos custos de transporte (Bernucci *et. al.*, 2006).

Shahin (1994) comenta que uma avaliação funcional é geralmente aceita como sendo um processo de avaliação racional e que o desempenho funcional de um pavimento deve estar baseado na análise da resistência ao deslizamento (atrito) e potencial de danos por objetos estranhos (FOD - *Foreign Object Damage*) às aeronaves.

As características de aderência produzidas na interação pneu-pavimento, fornecidas pela textura e pelo atrito, representam um papel importante na segurança de vias urbanas, de rodovias e de aeroportos. Camadas de rolamento com boa aderência, ou seja, com adequadas características superficiais podem reduzir a distância de frenagem, principalmente em pavimentos molhados, e manter em todo o tempo de percurso a trajetória desejada para o veículo. Para entendimento do que ocorre nessa interação há necessidade da revisão de alguns fenômenos e conceitos, detalhados a seguir.

2.5.1.1. COEFICIENTE DE ATRITO

Para os físicos, o atrito é dado como sendo uma força natural (tangencial) que atua quando um objeto está em contato com outro e sofre a ação de outra força (externa) que tende a colocá-lo em movimento.

O atrito é representado por um índice, denominado coeficiente de atrito (μ), razão entre a força tangencial, resistente ao movimento entre dois corpos, e a força normal aplicadas a estes corpos. Este índice demonstra o grau de rugosidade entre dois corpos. Matematicamente o coeficiente de atrito é descrito pela Equação 2.1.

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2.1)$$

Onde:

μ = Coeficiente de atrito

F = Força tangencial

N= Força Normal

Normalmente, no meio rodoviário e aeroportuário, assume-se que o coeficiente de atrito pneu-pavimento é composto de duas parcelas: o atrito devido à adesão, proveniente da atração molecular das superfícies, e o atrito devido à perda por histerese, resultante da deformação cíclica da superfície dos pneus e pelas asperezas do pavimento, conforme expresso na Equação 2.2.

$$\mu_d = \mu_a + \mu_h \quad (2.2)$$

Onde:

μ_d = coeficiente de atrito devido ao deslizamento;

μ_a = coeficiente de atrito devido à adesão;

μ_h = coeficiente de atrito devido à histerese.

Este comportamento combinado é consequência direta da viscoelasticidade da borracha, e traduz-se na perda de energia por meio da geração de calor devido aos movimentos intermoleculares. É devido ao atrito que uma aeronave consegue realizar o procedimento de decolagem, no qual parte do repouso e atinge a velocidade ideal para levantar voo, bem como o procedimento de pouso, em que a aeronave se aproxima a uma determinada velocidade e tem de parar com conforto e segurança (Santos, 2004).

O atrito é fortemente influenciado pela qualidade da área de contato pneu-pavimento, ou seja, pelo material utilizado nas camadas de rolamento dos pavimentos, sendo que a presença de água ou não é um fator importante a ser considerado.

2.5.1.2. INTERAÇÃO PNEU-PAVIMENTO

Na interação do pneu com o pavimento são possíveis duas situações extremas de contato, as quais vão definir os mecanismos de aderência e desgaste: o *pneu rodando* e o *pneu sob deslizamento* na superfície do pavimento com a roda travada, durante uma frenagem de emergência.

Uma adequada operação de pouso ou decolagem depende, além de outros fatores, do contato pneu-pavimento e da aderência de ambos. Condições inadequadas de aderência na interação pneu-pavimento podem ocasionar acidentes em um sistema viário seja urbano, rodoviário ou aeroportuário. O termo aderência refere-se ao limite de atrito, desenvolvido entre os pneus do veículo e a superfície da camada de rolamento do pavimento, que assegura a mobilidade e dirigibilidade do veículo.

Os fatores que mais afetam a resistência ao deslizamento são os agregados, a natureza ou textura da superfície, a presença de água principalmente devido às condições climáticas, chuvas e neve, além da geometria da via, das características dos pneus, velocidade do veículo e a intensidade de tráfego. Como fatores que afetam a resistência ao deslizamento, em segundo grau estão o tipo de revestimento do pavimento, os métodos de construção e manutenção da via, a temperatura, o sistema de freios e suspensão do veículo, a carga por roda, e a presença de óleo na camada de rolamento (Aps, 2006).

2.5.1.3. AVALIAÇÃO DE ADERÊNCIA EM PISTAS MOLHADAS

É importante avaliar a interação pneu-pavimento, principalmente em dias de chuva, que envolve a quantificação da resistência à derrapagem que é função da aderência. Estas condições de aderência de pavimentos constituem-se fatores de grande relevância nas

avaliações de superfície e na decisão de manutenções, principalmente das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos.

Vários fatores colaboram para a aderência pneu-pavimento em pistas molhadas, mas dois são essenciais: a textura superficial da pista, dividida em macrotextura e microtextura, e características dos pneus (ranhuras, pressão de inflação, dimensões e tipo).

O acúmulo de água na superfície do revestimento asfáltico associado à velocidade de deslocamento dos veículos e das aeronaves, normalmente alta, provocam o fenômeno da hidroplanagem (ou aquaplanagem). Esta falta de aderência entre o pneu e o pavimento faz com que as aeronaves e ou os veículos entrem num estado de flutuação sobre o lençol de água (Figura 2.10).

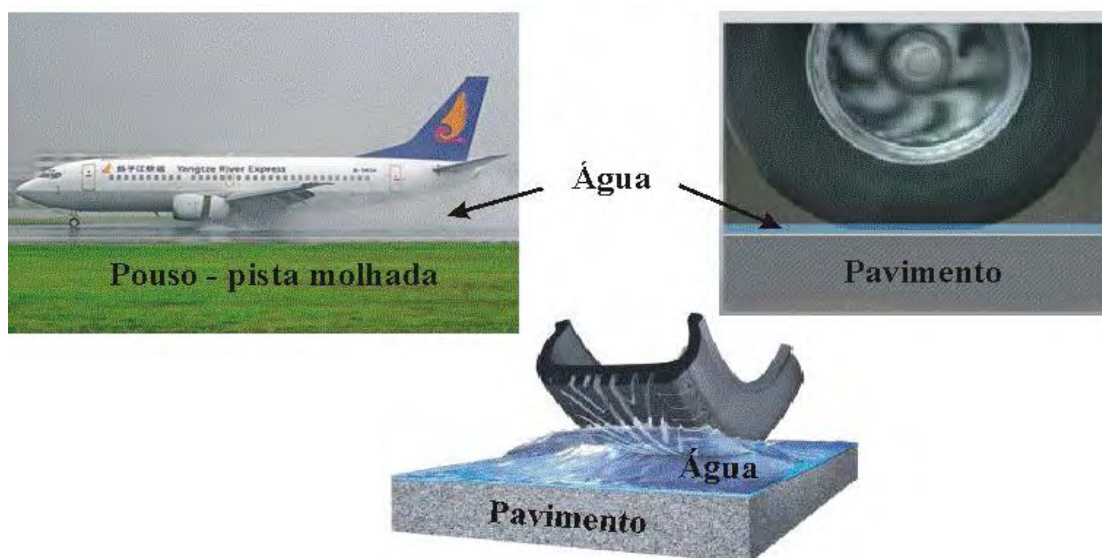


Figura 2.10 - Fenômeno da hidroplanagem

A manutenção do contato entre as superfícies é essencial, para evitar este fenômeno. É por este contato que se pode garantir o atrito, que é mobilizado quando uma das superfícies está em movimento em relação à outra. Quando o atrito fica reduzido, pode-se perder o controle da direção e a frenagem também fica prejudicada.

Um fator que interfere consideravelmente na redução do atrito é o aumento de velocidade de deslocamento de uma das superfícies (no caso os pneus) em relação à outra (no caso os pavimentos). O contato de um pneu com um pavimento é uma interação complexa, dependendo de fatores como adesão entre a borracha e a microtextura do pavimento e

histerese decorrente da deformação do pneu provocada principalmente pelos agregados (macrotextura) presentes na superfície.

As pistas de pouso e decolagem dos aeródromos do Brasil, mais especificamente, a pista de pouso e decolagem do Aeroporto Internacional de Congonhas em São Paulo (SP) tornou-se cenário constante de muitos acidentes e incidentes com aeronaves em pista, principalmente na hora do pouso.

Estas pistas são, em sua grande maioria, de concreto asfáltico, às vezes com serviço complementar de *grooving* (ranhuras transversais), que têm a finalidade de facilitar o escoamento da água da chuva para as laterais da pista, melhorando a drenabilidade da superfície do pavimento e aumentando o atrito entre pneu e o pavimento, proporcionando maior área de contato não encharcada. A Figura 2.11, mostra breve retrospectiva dos acidentes no local ocorridos com o estado da pista molhada.



FONTE: G1 – O Portal de Notícias da Globo / 2007

Figura 2.11 - Acidentes ocorrido na pista do aeroporto de Congonhas SP

Embora a técnica de *grooving* seja uma maneira eficaz em situações de pousos em pistas molhadas, esta não deve ser vista com a única solução para os problemas de drenabilidade, visto que a interação pneu-pavimento depende da macrotextura e microtextura, ou seja, do tipo de mistura asfáltica utilizada para compor a camada de revestimento das pistas e consequentemente do material mineral utilizado nesta mistura.

Outro problema encontrado constantemente nas pistas de pouso e decolagem dos aeroportos e que prejudica intensamente as ranhuras, refere-se à contaminação no revestimento asfáltico por causa da desvulcanização dos pneus das aeronaves.

Durante o pouso de um avião, ocorre processo de emborrachamento das pistas provocado pelo atrito pneu-pavimento. Devido ao número acentuado de pousos e decolagens nas pistas aeroportuárias o processo de emborrachamento ocorre constantemente, acumulando uma grande quantidade de borracha na pista, que por sua vez fecha as ranhuras, reduzindo significativamente os valores da macrotextura, fazendo com que a superfície perca suas qualidades drenantes, que é a característica mais importante do *grooving* (Figura 2.12).



Figura 2.12 - Revestimento com grooving bastante contaminado; Detalhe do revestimento antes e após o desemborrachamento (Rodrigues Filho, 2006)

Uma aeronave do porte do Boeing 747, por exemplo, deposita cerca de 700 gramas de borracha por pneu/pouso. Com o passar do tempo, isto faz com que as medidas da condição de atrito aproximem-se ou fiquem abaixo do nível de planejamento e manutenção do aeroporto. A Figura 2.13 mostra o processo de emborrachamento das pistas de pouso e decolagem: (a) momento do primeiro toque na pista; (b) rastro de borracha deixado pelo pneu; (c) banda de rodagem de um pneu aeronáutico.

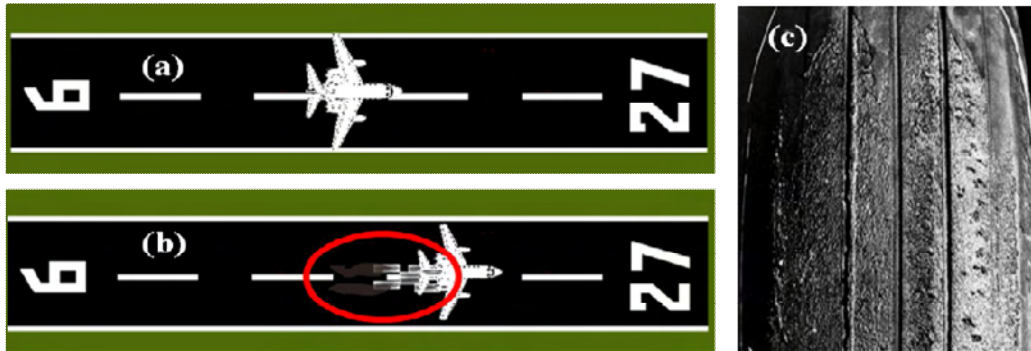


Figura 2.13 - Processo de emborrachamento das pistas de pouso e decolagem

2.5.1.4. TEXTURA DA SUPERFÍCIE DOS PAVIMENTOS

A principal maneira de caracterizar a superfície de um pavimento é por meio da avaliação da textura, reconhecida em quatro escalas: microtextura e macrotextura, megatextura e irregularidade.

Segundo Bernucci *et. al.* (2006) a megatextura e a irregularidade interferem na dinâmica veicular e no contato do veículo com o pavimento, afetando também a estabilidade direcional e a aderência em pistas molhadas. No entanto, nesta pesquisa para a avaliação da textura da superfície no que se refere à aderência serão enfocadas a microtextura, dependente da superfície e aspereza (rugosidade) dos agregados utilizados, e a macrotextura, função do tipo de mistura e traço adotados para o revestimento (Figura 2.14).

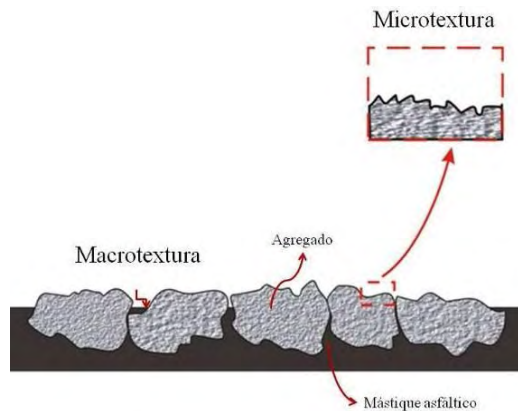


Figura 2.14 - Microtextura e macrotextura na superfície de um revestimento asfáltico

A microtextura pode ser avaliada com o auxílio de diversos equipamentos, entre os mais conhecidos e utilizados estão o MuMeter e o Pêndulo Britânico. O MuMeter, por exemplo, é um aparelho do tipo de ângulo de deslizamento lateral, ou seja, realiza a medição de atrito a

partir de uma roda alinhada diagonalmente com a direção de avanço é mais utilizado no território nacional brasileiro pela DIRENG e pela Infraero (Figura 2.15). O processo de medição do MuMeter, além de ser simples e de boa precisão, utiliza uma programação de computador para auxiliar o operador em suas medições.



Figura 2.15 - MuMeter - INFRAERO

O Departamento de Aviação Civil do Comando da Aeronáutica do Brasil – DAC, na instrução normativa a IAC 4302/01, faz algumas recomendações inerentes aos estudos da macrotextura e microtextura no que diz respeito valor mínimo admissível para o atrito médio, o valor de atrito de 0,50 em segmentos de 100 metros deve ser considerado como *nível de manutenção*, medido com o aparelho MuMeter, exceto o caso de aeroportos que possuam planos especiais de manutenção, nos quais o nível de manutenção passa a ser aquele definido nesses planos. As medições dos coeficientes de atrito das pistas de pouso e decolagem deverão ser realizadas na velocidade de 65 km/h.

Outro equipamento simples e portátil para medir o atrito é o pêndulo britânico (ASTM E 303/93), esse equipamento simula a passagem de um veículo a 10 km/h sobre a superfície do pavimento. É munido de um braço pendular cuja extremidade tem uma sapata recoberta de borracha para ser atritada contra a superfície do pavimento umedecida. Ao soltar-se a haste do pêndulo sobre o pavimento, a sapata desliza sobre o mesmo. A perda de energia decorrente desse movimento serve como medida de atrito, e é registrada numa escala graduada.

A Figura 2.16 mostra o equipamento pêndulo britânico sendo operado em campo para a determinação do valor de resistência à derrapagem BPN - *British Pendulum Number*. A Tabela 2.5 mostra as classes de microtextura dependentes do BPN.



Figura 2.16 - Pêndulo britânico utilizado; LER-Ceftru-UnB

Tabela 2.5 - Classificação da microtextura com pêndulo britânico (ABPv, 1999)

VALOR DE RESISTÊNCIA À DERRAPAGEM	CLASSIFICAÇÃO
$BPN < 25$	Perigosa
$25 \leq BPN \leq 31$	Muito Lisa
$32 \leq BPN \leq 39$	Lisa
$40 \leq BPN \leq 46$	Insuficientemente Rugosa
$47 \leq BPN \leq 54$	Medianamente Rugosa
$55 \leq BPN \leq 75$	Rugosa
$BPN > 75$	Muito Rugosa

No meio rodoviário, tem-se recomendado o valor mínimo de 47 BPN para garantir pelo menos uma microtextura medianamente rugosa. A microtextura é uma característica muito importante para rompimento da película de água e promoção do contato pneu-pavimento para baixas velocidades de deslocamento, de até cerca de 40 km/h (Bernucci *et. al.*, 2006).

Por sua vez, a macrotextura de um pavimento influencia nas condições de rolamento e resistência à derrapagem. De acordo com Wambold *et.al.* (1995) *apud* Aps (2006) a macrotextura pode ser avaliada por três métodos. Pelo método volumétrico, conhecido como mancha de areia, com o uso de perfilômetros e por drenômetros, sendo este último uma medida indireta da macrotextura.

O método volumétrico é a forma de medição mais simples no meio rodoviário e aeroportuário. De acordo com a norma ASTM E 965/96, o ensaio conhecido como mancha de areia consiste em colocar sobre a superfície do pavimento um volume pré-determinado de areia fina e espalhá-la circularmente utilizando-se um disco especial.

Com a medida da área (A) da mancha de areia sobre o pavimento e o volume de areia (V) utilizado, calcula-se uma profundidade média (HS) dos vazios preenchidos por areia, valor utilizado como medida de macrotextura superficial. Devem-se fazer no mínimo três medições de profundidade da textura do pavimento por ensaio nas áreas consideradas (DAC, 2001).

De acordo com o DAC (2001), a profundidade média da macrotextura do pavimento de uma pista de pouso e decolagem, medida de acordo com a metodologia da mancha de areia, não deverá ser inferior a 0,50 mm, ou outro valor específico constante de plano especial de manutenção, quando houver, sendo necessária ação corretiva apropriada, toda vez que esses níveis não forem alcançados. A profundidade média da macrotextura recomendada para um pavimento novo é de um (1) milímetro.

Aps (2006) enquadra textura superficial para revestimentos asfálticos com base nas informações contidas na Tabela 2.6 a seguir. Esses valores são para pavimentos asfáltico rodoviários, visto que estes não possuem o *grooving*, porém diversos autores fazem uso dessa classificação dos revestimentos de pistas aeroportuárias que possuam ou não os *grooving*.

Tabela 2.6 - Classificação da macrotextura segundo a altura da mancha de areia (Aps, 2006).

<i>PROFUNDIDADE MÉDIA (mm)</i>	<i>TEXTURA SUPERFICIAL</i>
$HS \leq 0,20$	Muito Fina ou Muito Fechada
$0,20 < HS \leq 0,40$	Fina ou Fechada
$0,40 < HS \leq 0,60$	Medianamente Fina
$0,60 < HS \leq 0,80$	Média
$0,80 < HS \leq 1,0$	Medianamente Grossa
$1,0 < HS \leq 1,20$	Grosseira ou Aberta
$HS > 1,20$	Muito Grosseira ou Muito Aberta

A macrotextura é uma das características mais importantes numa avaliação funcional e que afetam a aderência, principalmente para velocidades de deslocamento acima de 50 km/h. De acordo com a ABPv (1999), é recomendado para pavimentos asfálticos rodoviários uma macrotextura na faixa entre 0,60 mm e 1,2 mm de altura média da mancha de areia. Acima de

1,2 mm para os pavimentos rodoviários, a textura é muito aberta, causando desgaste excessivo nos pneus, maior consumo de combustível e tendência a maior ruído ao rolamento. Abaixo de 0,60 mm, a macrotextura passa a ter uma tendência de ser fechada e aumenta o risco de hidroplanagem, o que ocorre nas pistas de pouso e decolagem dos aeroportos do Brasil é que a exigência mínima contida na IAC 4302-01 já está abaixo do valor recomendando para pistas rodoviárias.

Aps (2006) apresenta resultados de manchas de areia na pista do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas, realizados em outubro de 2003. Os revestimentos dos pavimentos de ambas as pistas de acordo com Aps (2006) e Rodrigues Filho (2006) é de Concreto Asfáltico de textura bem fechada, com a aplicação de *grooving* (ranhuras transversais serradas). Na Tabela 2.7 são apresentados valores em locais com *grooving*, sem *grooving* (concreto asfáltico), com *grooving* emborrachado (*Grooving/E*) e com *grooving* sem emborrachamento (*Grooving S/E*).

Tabela 2.7 - Resultados de mancha de areia no Aeroporto de Congonhas (Aps, 2006).

UNIDADE DE AMOSTRAGEM		MACROTEXTURA		
Nº	Tipo	Diâmetro médio (cm)	HS (mm)	Classificação
1	Concreto Asfáltico	27,7	0,41	Med. Fina
2	<i>Grooving</i>	17,3	1,06	Grosseira
3	<i>Grooving</i>	18,8	0,90	Med. Grossa
4	<i>Grooving</i>	14,0	1,62	Muito Grosseira
5	<i>Grooving</i>	15,9	1,27	Muito Grosseira
6	<i>Grooving S/E</i>	17,3	1,06	Grosseira
7	<i>Grooving S/E</i>	15,0	1,41	Muito Grosseira
8	<i>Grooving E</i>	21,3	0,70	Média
9	<i>Grooving E</i>	19,0	0,88	Med. Grossa
10	<i>Grooving E</i>	16,1	1,22	Muito Grosseira
11	<i>Grooving E</i>	16,0	1,24	Muito Grosseira

Estes resultados mostram que em pavimentos aeroportuários com ranhuras, os resultados do ensaio de mancha de areia podem não representar a macrotextura real do revestimento. Isto ocorre devido à aplicação do *grooving* (tecnologia antiderrapante) nas pistas de pouso e decolagem, visto que nestes pontos da pista ocorre penetração excessiva dos grãos de areia nos poros vazios, o que leva à redução da área da mancha de areia e à maximização da medida de macrotextura.

Uma medida indireta de macrotextura pode ser obtida por meio da drenabilidade superficial do pavimento. Este método de ensaio permite, por meio da avaliação da capacidade de escoamento da água superficial por entre os canais da rugosidade, caracterizar a textura do revestimento.

O drenômetro utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido aos moldes do Drenômetro do *Institute of Highways, Railroads and Rock Engineering* (ISETH) de Zurique. O drenômetro do LER-CEFTRU-UnB permite medir o tempo de escoamento de água contida em cilindro de plástico transparente, de volume 0,73 litro, acoplado a um fundo com um orifício circular de 5 cm de diâmetro, em contato com a superfície do pavimento (Figura 2.17).

O tempo de escoamento para um volume de água, medido com um cronômetro comum, representa uma medida da textura, pois são as características da macrotextura do revestimento asfáltico que determinam a vazão da água. A duração do escoamento será tanto maior quanto mais lisas forem as superfícies, verificando-se o contrário com superfícies extremamente rugosas. O resultado desse ensaio é expresso em termos de tempo de escoamento ou de vazão de água escoada, cujo objetivo é de verificar a capacidade drenante da textura do pavimento frente a chuvas.

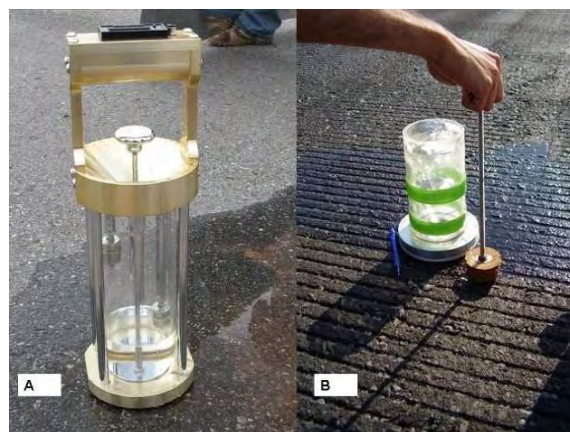


Figura 2.17 - Drenômetro desenvolvido pelo ISETH “*flow-meter*” e drenômetro desenvolvido pelo LER-Ceftru-UnB, respectivamente.

Uma forte correlação foi observada por Rodrigues Filho (2006) para o revestimento da pista do Aeroporto de Congonhas em São Paulo, que possui uma textura fechada, porém com *grooving* (Figura 2.18). De fato esta correlação existe, já que os dois métodos avaliam a mesma condição de textura. Porém, Aps (2006) comenta que para revestimentos cujas

texturas são muito grossas (abertas) ou texturas muito fechadas ou muito finas a correlação entre o ensaio de mancha de areia e o de drenabilidade pode não ser válida.

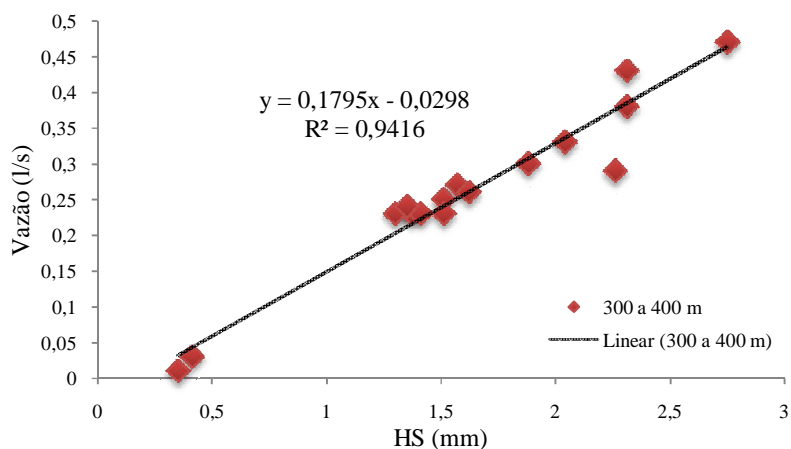


Figura 2.18 - Correlação entre os ensaios de mancha de areia e drenabilidade (Rodrigues Filho, 2006)

Embora seja questionável a classificação da textura de uma superfície asfáltica com *grooving*, devido aos canais formados pela execução das ranhuras, visto que estas tendem a “mascarar” os resultados, dando uma falsa idéia de macrotextura favorável, Silva (2008) realizou análise de macrotextura, por meio dos dois tipos de ensaios, na pista antiga (11L/29R) do Aeroporto Internacional de Brasília, assim como Rodrigues Filho (2006), observou uma boa correlação entre os ensaios de drenabilidade e mancha de areia em pista com *grooving*.

Nos ensaios realizados na pista antiga do Aeroporto Internacional de Brasília, Silva (2008) classifica a textura da pista em estudo após o desemborramento, como medianamente grossa conforme classificação proposta por Aps (2006).

2.5.1.5. ÍNDICE INTERNACIONAL DE ATRITO (IFI)

O IFI (*Internacional Friction Index*), índice que combina os resultados de avaliação da macrotextura e da microtextura de um pavimento indicando as condições de aderência da superfície. É representado por dois números situados entre parênteses e separados por uma vírgula, com o primeiro referindo-se ao atrito e o segundo a textura. O primeiro número é adimensional (F60) e o segundo é expresso em km/h (Sp). Ambos fornecem os parâmetros

relativos para uma velocidade padrão de 60 km/h e por meio deles pode-se calcular o valor de atrito $F(S)$, a qualquer velocidade de deslocamento (S).

Aps (2006) propõe uma classificação do IFI por meio de faixas, onde o índice de atrito é composto por meio de medições com aparelhagem portátil, mancha de areia para medida de textura (T_x) e o pêndulo britânico para medida de atrito (FR). Possibilitando os órgãos rodoviários a usarem o IFI (Sp ; $F60$) como uma ferramenta de gerência de pavimentos para avaliarem as condições de aderência em pista molhada de suas vias ou de locais específicos, objetivando, quando necessária, a realização de intervenções (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Classificação do IFI para velocidade padrão de 60 km/h (Aps, 2006).

<i>LIMITES IFI – (SP;F60)</i>	<i>CLASSIFICAÇÃO</i>
<i>IFI < 0,05</i>	Péssimo
<i>0,06 < IFI < 0,08</i>	Muito Ruim
<i>0,09 < IFI < 0,11</i>	Ruim
<i>0,12 < IFI < 0,14</i>	Regular
<i>0,15 < IFI < 0,21</i>	Bom
<i>0,22 < IFI < 0,35</i>	Muito Bom
<i>IFI > 0,35</i>	Ótimo

2.5.2. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

Na previsão do comportamento e desempenho de um pavimento são necessários que sejam avaliados dois aspectos o funcional e o estrutural. O primeiro aspecto como já exposto, está relacionado ao conforto e segurança do usuário. O segundo implica na aptidão da estrutura responder aos esforços solicitantes adequadamente, segundo as prescrições de projeto.

Os projetos de reforço de uma estrutura de pavimento no estado de deterioração atual são sempre precedidos da avaliação estrutural. Que é a avaliação das características de deformabilidade e resistência à ruptura por cisalhamento do sistema em camadas, tornando o comportamento estrutural dos pavimentos uma avaliação complexa e, portanto, para tornar viável uma análise deste tipo, utilizam-se simplificações como a de considerar a estrutura puramente elástico linear ou elástico não-linear.

Em geral, supõe-se que as misturas asfálticas apresentam comportamento, aproximadamente, visco-elasto-plástico. Logo, os deslocamentos provocados dependem, principalmente, dos carregamentos e da temperatura as quais será submetido, além do tempo.

Sides *et. al.* (1985) afirmam que as deformações em misturas asfálticas possuem componentes recuperáveis e irrecuperáveis, podendo ser dependentes ou não do tempo. A deformação total é então decomposta em quatro componentes conforme indicado na Figura 2.19.

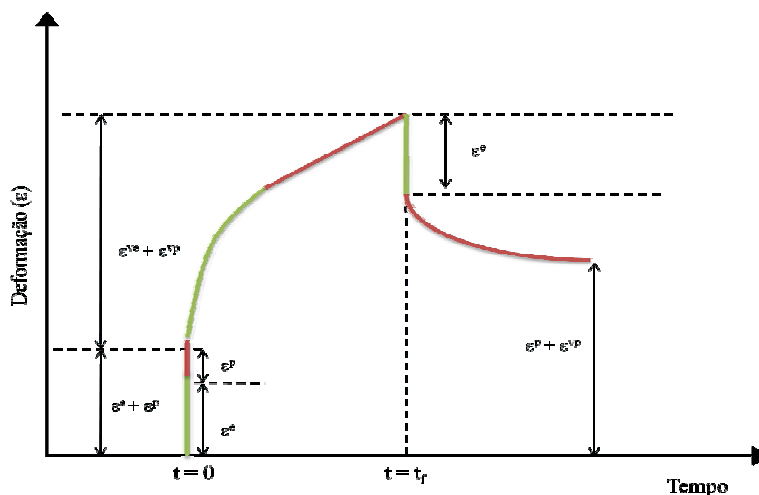


Figura 2.19 - Representação esquemática das deformações em misturas asfálticas (Sides *et al.*,1985).

Matematicamente, essas componentes podem ser escritas como:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^{ve} + \varepsilon^{vp} \quad (2.3)$$

Onde:

ε = deformação total;

ε^e = deformação elástica (recuperável e independente do tempo);

ε^{ve} = deformação viscoelástica (recuperável e dependente do tempo);

ε^p = deformação plástica (irrecuperável e independente do tempo);

ε^{vp} = deformação viscoplástica (irrecuperável e dependente do tempo).

Portanto, a avaliação do desempenho estrutural de pavimentos flexíveis deve considerar as deformações plásticas ou permanentes, observadas nos afundamentos das trilhas de roda, ocasionados por dois tipos distintos de solicitações, a compressão que gera a densificação dos

materiais constituintes das camadas dos pavimentos, e o cisalhamento que gera movimentos laterais de uma ou mais camadas; e as deformações elásticas ou resilientes ocasionadas pela solicitação cíclica das cargas, que gera as trincas por fadiga.

2.5.2.1. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Em geral, a avaliação estrutural de um pavimento, em campo, pode ser feita por métodos destrutivos, semidestrutivos ou não-destrutivos.

Um método destrutivo é aquele que investiga a condição estrutural de cada camada que compõe o pavimento por abertura de trincheiras ou poços de sondagem, permitindo recolher amostras de cada material até o subleito e realizar ensaios de capacidade de carga *in situ*. Pela sua própria natureza destrutiva só pode ser empregado em alguns poucos pontos selecionados como representativos de cada segmento a ser avaliado.

Farias & Falcão (2006) realizaram uma análise das possíveis causas do surgimento de trincas longitudinais em trechos do pavimento da nova pista do aeroporto de Brasília, neste trabalho foram abertas trincheiras a aproximadamente 10,0 metros da borda esquerda da pista para as devidas inspeções do problema.

A Figura 2.20 mostra claramente todas as camadas do pavimento, de cima para baixo: capa (cinza claro), binder (preto), base em brita (segunda camada em cinza escura, primeira camada em bege) e sub-base de cascalho laterítico (avermelhado). Uma linha preta foi adicionada, mapeamento a trinca. Nota-se a trinca descendo verticalmente pelas camadas de brita que compõem a base. Percebe-se o efeito da água que infiltrou pela trinca. No detalhe da figura percebe-se que a trinca segue pela camada de cascalho da sub-base, e vê-se a trinca correndo longitudinalmente pela última camada da argila compactada no reforço de subleito.



Figura 2.20 - Trincheira para inspeção na nova pista do AIB (Farias & Falcão, 2006).

Um método semidestrutivo é aquele que se vale de aberturas menores de janelas no pavimento que permitam utilizar um instrumento portátil de pequenas dimensões para avaliar a capacidade de carga de um pavimento, tal como o uso de cones dinâmicos de penetração – DCP (Trichês e Cardoso, 2001; Trichês *et. al.*, 2004). A aplicação deste ensaio só permite em geral correlação com o CBR dos materiais, com certa precisão.

A avaliação mais adequada para ser feita em grandes e pequenas extensões de pistas seja ela rodoviária ou aeroportuária, e com possibilidade de inúmeras repetições no mesmo ponto, de forma a acompanhar a variação da capacidade de carga com o tempo, é a que lança mão de medidas não-destrutivas, representadas por medidas de deflexão.

Os equipamentos utilizados em avaliações não-destrutivas podem ser divididos devido a forma de carregamento, ensaio de placa e viga Benkelman com quase-estático, o dynaflect e o Geogauge com carregamento vibratório, e o FWD com um carregamento por impacto.

Cavalcante *et. al.* (2006) realizaram uma avaliação empírico-mecânica na pista de pouso e decolagem do Aeroporto de Marabá/PA, o trabalho tinha como objetivo principal determinar as características mecânicas “*in situ*” do sistema pavimento/subleito após os serviços de recuperação realizados no ano de 2004 naquela pista. A aeronave de projeto, segundo os estudos de tráfego apresentados no projeto de restauração, foi à aeronave do tipo Airbus

A320-200. Foram medidas bacias de deformação com a viga Benkelman em vários eixos paralelos definidos na pista de pouso e decolagem. A partir das linhas de influência medidas, pela técnica de retroanálise, foram obtidos os módulos de resiliência das camadas constituintes da estrutura.

Embora tenha sido classificada como binder no levantamento geotécnico, os autores observaram que o material utilizado para esta camada mais se assemelhava a um solo-betume executado com solo proveniente de jazida, possivelmente misturado em usina, além de não possuir características de cimentação de concreto asfáltico, e nem mesmo a uniformidade presente em misturas usinadas com agregados controlados. Como resultado de módulo de resiliência, os autores por meio de retroanálise pelo RETRAN5-L, foi determinado valores de $MR = 3862 \pm 1744$ MPa, a partir de 505 amostras.

Farias e Falcão (2006) realizaram ensaios com o aparelho Geogauge em diferentes pontos durante a construção da segunda pista do AIB. Foram determinados valores de módulos para as camadas de base (BGS) em torno de 195 MPa, para camada de Sub-base de cascalho em torno de 135 MPa e para o material de Subleito uma valor em torno de 90 MPa. Estes valores servem para estabelecer uma ordem de grandeza de módulo elástico dos materiais que compõem a estrutura do pavimento da pista 11R/29L do AIB.

2.5.2.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS PISTAS AEROPORTUÁRIAS

Para pavimentos aeroportuários uma ferramenta bastante difundida é a avaliação da resistência da pista por meio de um método onde se determina a relação entre um número de classificação da aeronave (ACN) e o número de classificação de pavimentos (PCN). Este método, segundo ICAO-Anexo 14 (ICAO, 2004) é denominado ACN/PCN.

O primeiro número, o ACN, exprime o efeito relativo de uma aeronave sobre um pavimento, para determinada resistência normalizada do terreno de fundação. O método faz uso de uma Carga de Roda Simples Equivalente, derivada matematicamente, para definir a iteração trem de pouso/pavimento. Isto é feito igualando a espessura dada pelo modelo matemático para um trem de pouso de uma aeronave, com a espessura para uma carga de roda simples sob a pressão padronizada de 1,25 MPa.

Já o número PCN indica a resistência de um pavimento para operações sem restrições. O valor é determinado para a máxima carga admissível no pavimento e deve levar em consideração fatores tais que representam o tráfego (frequência de operações) e tensões e deformações admissíveis no pavimento.

Em publicações aeronáuticas, o método ACN/PCN objetiva a difusão de dados sobre a resistência dos pavimentos; onde esta determinação é utilizada como parâmetro para os usuários avaliarem se é possível ou não a utilização de uma determinada pista por um determinado tipo de aeronave.

O PCI para aeroportos, também foi publicado como metodologia de teste pela ASTM em 1993 (ASTM D 5340-04e1, revisada em 2003). O método tem como objetivo obter um Índice numérico da Condição do Pavimento (PCI), no qual os valores variam entre 0 (ruim) e 100 (condição excelente). Para calcular o PCI, a pista deve ser dividida em seções de inspeção para então determinar o número de amostras a inspecionar. A quantidade de amostras requeridas depende do uso do pavimento, sendo que esta divisão deve ser mantida para eventuais inspeções futuras. A inspeção deve identificar todas as unidades de amostras “incomuns” e inspecioná-las como unidades “adicionais” incluindo a seção no cálculo do PCI, alterando-o ligeiramente.

De acordo com Silva (2008), a avaliação técnica do PCN geralmente não apresenta valores coerentes, pois quaisquer recursos dentro desta metodologia desconsideram a fadiga a qual o pavimento está sujeito, causada pela ação contínua do tráfego de aeronaves.

Assim, é importante ressaltar que esta avaliação deve ser apenas indicativa da capacidade estrutural da pista. Para uma melhor avaliação da situação estrutural de um pavimento devem ser utilizados métodos onde são consideradas as relações tensão-deformação dos materiais das camadas do pavimento, obtidas por meio de ensaios de laboratório ou por meio de retroanálises de medidas de deflexão induzidas no pavimento com aplicação de cargas dinâmicas, como é o caso do FWD.

2.5.2.3. AVALIAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS EM LABORATÓRIO

De acordo com Bernucci *et. al.* (2006) a caracterização das misturas asfálticas, bem como dos outros materiais de pavimentação, era estritamente empírica, correspondendo às abordagens de dimensionamento dos pavimentos tal como o método do CBR ou o método da AASHTO até 1986. Para as misturas asfálticas, os ensaios consagrados nessas abordagens foram o de estabilidade Marshall e o de estabilidade Hveem. No Brasil, o primeiro é ainda extensamente usado, principalmente no meio técnico rodoviário e aeroportuário.

Numa abordagem mecânica, os resultados da análise estrutural dos pavimentos – tensões, deformações e deslocamentos – são comparados com critérios de dimensionamento predefinidos de modo a evitar os principais tipos de defeitos, principalmente trincamento por fadiga e deformação permanente. Esses critérios podem ser estabelecidos a partir de valores limites de resistência dos materiais (Motta, 1991; Benevides, 2000).

No caso de misturas, resultados do ensaio de vida de fadiga têm sido usados com frequência como critério de dimensionamento (Pinto, 1991). As cargas usadas nesse ensaio, por sua vez, são determinadas em função de outro ensaio limite, o de resistência à tração estática, comumente realizada de forma indireta devido à maior simplicidade. Por possuir um modo de falha definido, ele também tem sido usado como parâmetro de controle na dosagem de misturas, em substituição à estabilidade Marshall.

Na pavimentação aeroportuária, o método de dimensionamento mecânico, conta com programa o FAARFIELD – *Airport Pavement Design* - FAA, o programa traz embutidas algumas equações de fadiga para as misturas asfálticas e para o concreto, bem como a equação de deformação vertical máxima admissível para o subleito. O programa será apresentado no Capítulo 5, o qual foi utilizado para avaliação do dimensionamento da nova pista do Aeroporto Internacional de Brasília inaugurada em 2005, de modo a ser comparado com o método CBR, que consta no memorial de cálculo da segunda pista de pouso e decolagem do AIB.

Os ensaios de laboratório são utilizados extensivamente com o objetivo de proporcionar maior entendimento do comportamento mecânico dos materiais em campo, visto que os ensaios “*in situ*”, ou trechos experimentais são, muitas vezes, de difícil realização. Os ensaios de laboratório devem reproduzir tanto quanto possível a situação de campo, isto é, temperatura,

tempo de carregamento, níveis de tensão, grau de compactação, etc. Contudo, essas condições sofrem mudanças continuamente em campo, tornando a seleção de condições de ensaio apropriadas uma tarefa não trivial.

2.6. MISTURAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS NAS PISTAS DO PAÍS

Com o avanço tecnológico, os veículos e aeronaves estão cada vez mais velozes e a interação pneu-pavimento tornou-se cada vez mais importante. De acordo com Rodrigues Filho (2006) vários projetos de pesquisa com ênfase no problema da frenagem de aeronaves a jato já foram desenvolvidos pelos órgãos governamentais norte-americanos. Segundo o mesmo autor, a *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, a *Federal Aviation Administration (FAA)* e a *United States Air Force (USAF)* concentraram esforços de suas pesquisas em duas grandes áreas:

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

Para pavimentos aeroportuários procura-se ter uma mistura de graduação mais aberta e descontínua, a fim de se ter um revestimento de maior capacidade drenante. Porém, como mostra a Figura 2.21, a faixa granulométrica utilizada como camada de rolamento das pistas dos aeródromos do país, principalmente quando se realiza as restaurações desta camada é a denominada Faixa 3, a qual pouco ou quase nada difere da Faixa C rodoviária do DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.

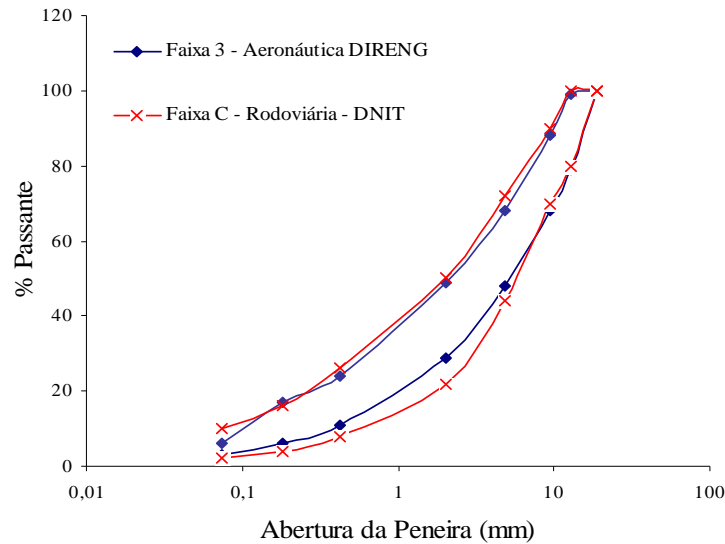


Figura 2.21 - Faixa granulométrica camada de rolamento – CBUQ

De acordo com a ES 04.05.610/02 da DIRENG para as obras de infraestrutura aeroportuária, as misturas asfálticas destinadas para camada de rolamento das pistas dos aeródromos são projetadas seguindo basicamente as especificações norte-americanas utilizadas para pavimentos aeroportuários, que incluem o artigo P-401 *Plant Mix Bituminuos Pavements* documentados na circular consultiva da FAA, C.A. 150/5370-10C, que tem como principal parâmetro o valor da estabilidade e da fluência e das propriedades de densidade e vazios para se determinar a mistura betuminosa a ser utilizada nas pistas de pouso e decolagem.

O revestimento da pista principal do Aeroporto Internacional de Congonhas/SP, por exemplo, é constituído por CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), com graduação contínua, bem graduada, densa e bem fechada, este resultado foi devido a um recapeamento realizado no ano de 2000.

Por meio da extração de corpos-de-prova da pista principal do Aeroporto de Congonhas, Rodrigues Filho (2006) pôde observar que há poucos agregados graúdos na camada superior de revestimento asfáltico, já a camada inferior de regularização ou a camada antiga de revestimento é composta por agregados mais graúdos (Figura 2.22).

O autor constatou que em obras do tipo restauração, por não ser uma obra contínua, a mistura asfáltica do recapeamento sofre variações, seja granulométrica, seja de dosagem, como também de estado devido às condições de serviço tais como: temperatura da massa asfáltica,

temperatura ambiente, disponibilidade de equipamentos de distribuição e compactação, dificuldades executivas, entre outros.

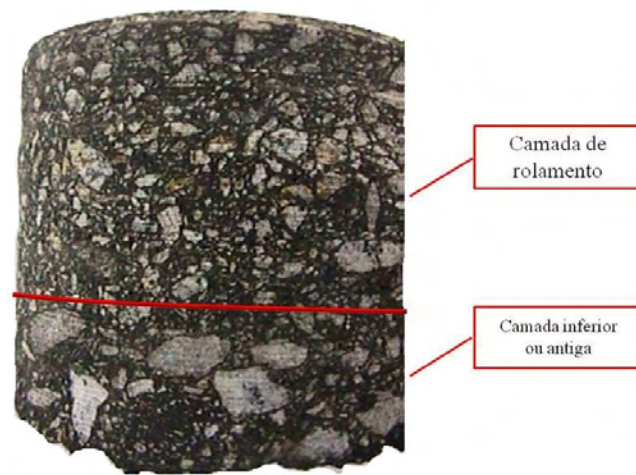


Figura 2.22 - Aspecto geral do corpo-de-prova extraído da pista 17R/35L (Rodrigues Filho, 2006)

O quinto aeroporto em movimento operacional no Brasil, o Aeroporto Campo de Marte em São Paulo, não possui linhas aéreas regulares é voltado essencialmente para aviação executiva, escolas de pilotagem, além de serviço aerotático das Polícias Civil e Militar do Estado de São Paulo. Possui uma pista de 1.600 m de extensão com revestimento em Concreto Asfáltico sem *grooving*.

Aps (2006) apresenta resultados de ensaios de medidas textura realizados neste aeroporto em junho de 2003. Estes resultados mostram claramente que a pista possui uma textura bem fechada, com classificação em torno Fina a Fechada, apresentando valores de altura de areia em torno de 0,37 mm.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos de Ensaio

3.1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho investigam-se algumas características funcionais e mecânicas de misturas asfálticas utilizadas nas pistas de pouso e decolagem dos aeródromos do país, mais especificamente três misturas enquadradas na faixa granulométrica contínua denominada Faixa 2, contida na norma aeroportuária de especificação de serviço ES nº 04.05.610/02. Nesse propósito, será utilizado o método de compactação Marshall para dosagem e determinação do teor de projeto de ligante asfáltico, e conseqüentemente para moldagem dos corpos-de-prova a serem utilizados na determinação das características mecânicas, e a compactação por rolagem na moldagem de placas a serem utilizadas na determinação das características funcionais.

Assim, neste capítulo, serão apresentadas as três misturas asfálticas estudados neste trabalho, os ensaios de caracterização do agregado mineral e do cimento asfáltico utilizados, a metodologia de dosagem e confecção, além dos métodos de ensaio utilizados para a determinação das propriedades mecânicas e funcionais das mesmas. Este capítulo foi dividido basicamente em três etapas.

1ª Etapa – Caracterização dos materiais: foram realizados ensaios de caracterização dos materiais asfálticos e granulares utilizados para compor as três misturas de CBUQ;

2ª Etapa – Estudo de dosagem: Seleção da granulometria, determinação dos parâmetros volumétricos para a obtenção das faixas de trabalho a serem estudadas;

3ª Etapa – Características funcionais e mecânicas das misturas: foram realizados os ensaios de medidas de atrito e textura, para caracterização funcional, e os ensaios de resistência à tração, módulo de resiliência e fadiga para a caracterização mecânica das misturas em estudo.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais envolvidos no preparo da mistura asfáltica utilizada na camada de rolamento das pistas de pouso e decolagem dos aeroportos do país, foi realizada priorizando os aspectos preponderantes para a sua durabilidade e funcionamento. Todos os ensaios realizados nesta pesquisa, com exceção do ensaio de índice de forma, foram realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária - LER do Centro de formação de recursos humanos em transporte - Ceftru da Universidade de Brasília.

3.2.1. AGREGADO MINERAL

Os agregados minerais utilizados nas misturas asfálticas empregadas nas camadas de revestimentos dos pavimentos flexíveis têm grande influência no comportamento mecânico das mesmas. Estes materiais constituem cerca de 95% em peso da mistura e são responsáveis pela formação de uma estrutura sólida necessária para resistir às solicitações impostas pelas cargas do tráfego, daí a relevância de caracterizá-los.

A caracterização priorizou o conhecimento da constituição mineralógica dos agregados, bem como das características mecânicas, físicas e geométricas, as quais influenciam na durabilidade e funcionamento da mistura. Os agregados escolhidos para serem empregados nesta pesquisa foram: brita 01, pedrisco, pó-de-pedra e fíler, de natureza carbonáticas, provenientes da Briccal Indústria Comércio e Mineração Ltda., localizada na região do Distrito Federal. Em geral, os agregados calcários empregados na confecção das misturas asfálticas (Figura 3.1) são caracterizados por apresentarem baixa resistência ao polimento, elevada porosidade, grande percentual de partículas alongadas, dentre outras desvantagens. Porém, devido à predominância deste tipo de agregados e o uso intenso nas obras rodoviárias na região do Distrito Federal, este agregado foi escolhido para compor a presente pesquisa.



Figura 3.1 - Agregado calcário utilizado na pesquisa, Brita 01.

De acordo com a DIRENG (2002), o agregado graúdo que compõem a mistura do concreto asfáltico deverá ser submetido a ensaios de laboratório e ter suas características enquadradas dentro dos limites estabelecidos abaixo:

- a) O percentual de desgaste, determinado pelo ensaio de abrasão *Los Angeles*, não poderá ser superior a: 40%, quando a mistura for destinada a camadas de superfície ou rolamento (capa); e a 50%, para camadas de regularização ou binder;
- b) O índice de forma, determinado pelo método DNER-ME 086/94, deverá ser superior a 0,6;
- c) Nas regiões de clima frio, onde há ocorrência de geada ou congelamento, os agregados graúdos deverão ser ensaiados quanto à durabilidade a sulfatos (DNER-ME 089), sendo toleradas perdas de até 10% em relação ao sulfato de sódio e de até 13% em relação ao sulfato de magnésio.

O agregado miúdo deverá ser constituído de materiais provenientes da britagem de rocha, tais como pó-de-pedra, e que sejam resistentes e possuam moderada angulosidade. Deverão ser isentos de torrões de argila ou silte e de materiais pulverulentos. Areia natural poderá ser utilizada como parte do agregado miúdo para ajustar a granulometria ou para melhorar a trabalhabilidade do concreto asfáltico. No entanto, o total em peso de areia em relação ao total em peso do agregado não poderá exceder em 20%.

Para a caracterização e classificação dos agregados foram realizados os seguintes ensaios.

➤ Desgaste à Abrasão *Los Angeles*

Durante o processo de manuseio e execução de revestimentos asfálticos, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão. A abrasão ocorre também durante a ação do tráfego. Eles devem

apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração.

O Ensaio de Abrasão *Los Angeles* é preconizado pela norma DNER-ME 035/98. As frações de brita 01 e pedrisco foram individualmente submetidos a esse procedimento, após terem sido lavadas e secadas em estufa a 105 °C.

Tal método consiste em submeter uma determinada fração granulométrica dos agregados graúdos a um dado número de revoluções, dentro de um tambor girando à velocidade de 30 rpm a 33 rpm, juntamente com um conjunto de esferas de aço padronizadas (Figura 3.2). O desgaste é convencionalmente expresso pela percentagem, em peso, do material que passa pela peneira de malha quadrada cuja abertura é igual 1,7 mm.

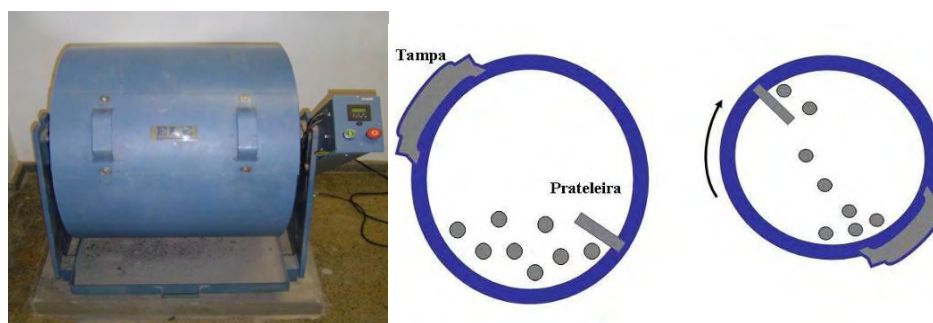


Figura 3.2 - Máquina *Los Angeles*; LER-Ceftru-UnB

A abrasão *Los Angeles* do agregado é calculada a partir de uma relação entre a massa total seca da amostra colocada no tambor e a massa da amostra lavada e seca, após o ensaio e retido na peneira 1,7 mm, Equação 3.1.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

A_n = Abrasão *Los Angeles* da graduação n, com aproximação de 1%

n = Graduação escolhida para o ensaio

m_n = Massa total da amostra seca, colocada no tambor

m'_n = Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de 1,7 mm)

A graduação na qual cada material se enquadrou com as respectivas quantidades das amostras e as cargas abrasivas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Quantidade de material e cargas abrasivas

<i>ABERTURA DAS PENEIRAS (mm)</i>		<i>MASSAS PARCIAIS DAS AMOSTRAS (g)</i>	
<i>Passando</i>	<i>Retido</i>	<i>Pedrisco</i>	<i>Brita 01</i>
<i>25,0</i>	<i>19,1</i>	-	-
<i>19,1</i>	<i>12,5</i>	-	2500±10
<i>12,5</i>	<i>9,5</i>	-	2500±10
<i>9,5</i>	<i>6,3</i>	2500±10	-
<i>6,3</i>	<i>4,8</i>	2500±10	-
<i>Massa Total (g)</i>		5000±10	5000±10
<i>Nº de Rotações do tambor</i>		500	500
<i>Quantidade de Esferas</i>		8	11

➤ Densidade e Absorção dos agregados

A densidade dos agregados é essencial para o cálculo dos parâmetros volumétricos da mistura asfáltica. A absorção de água, usada como estimativa da absorção do ligante pelo agregado, é de fundamental importância para o processo de dosagem, pois influencia no consumo de ligante e na adesividade do par ligante e agregado.

Os ensaios de densidade e absorção do agregado graúdo foram realizados seguindo a norma ASTM C 127-01 (semelhante ao procedimento descrito na norma DNER-ME 081/98). A Figura 3.3 ilustra alguns passos do procedimento de ensaio: (a) agregados seco em estufa, (b) imersão dos agregados em água por 24h e (c) agregados na condição saturada superfície seca (SSS), condição em que os agregados estão com os poros preenchidos com água (após 24h de imersão), porém a superfície dos grãos está seca. Nesta metodologia a amostra é formada pelos grãos retidos na peneira de abertura 4,75 mm.

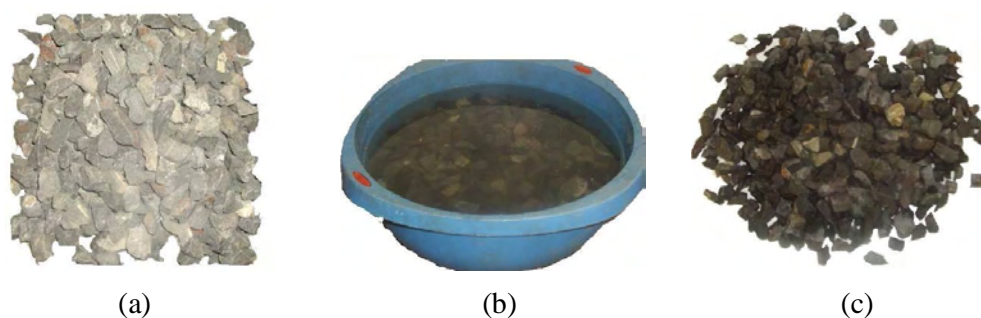


Figura 3.3 - Ensaio de densidade de agregado graúdo

No caso do pó-de-brita, foi executado o método de ensaio DNER-ME 194/98 – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapmam. Neste método a amostra é formada pelos grãos que passam na peneira de abertura 4,75 mm e ficam retidos na malha de abertura 0,075 mm. O ensaio consiste em colocar uma amostra de 500 g dentro do referido frasco, o qual se encontra com água até a marca de 200 cm³, o procedimento de ensaio é ilustrado na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Determinação do peso específica do pó-de-pedra; Frasco de *Chapmam*

A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume ocupado pelo conjunto água e agregado, que é usado para calcular a massa específica real do agregado por meio da Equação 3.2.

$$\rho = \frac{500}{L - 200} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ = massa específica real do pó-de-brita (g/cm³);

L = leitura no frasco (cm³).

Este método não permite obter o valor do peso específico aparente e da absorção de água, pois é executado usando o frasco de “Chapman”. Para o fíler adotou-se o método de ensaio DNER-ME 85/64 - Frasco *Le Chatelier* (Figura 3.5). O procedimento de ensaio é similar ao ensaio realizado com o Frasco de *Chapmam*. Embora esta norma recomende expressar o resultado como massa específica, optou-se por apresentá-lo como peso específico.



Figura 3.5 - Determinação do peso específica do filler; Frasco *Le Chatelier*

➤ Granulometria e Equivalente de areia

A análise granulométrica dos agregados brita 01, pedrisco e pó-de-brita e filler foram executados por meio do método de ensaio DNER-ME 083/98. Caso o material apresente quantidade significativa de material pulverulento a norma DNER-ME 083/98 recomenda ensaiar as amostras conforme o método DNER-ME 266/97 e considerar o teor de materiais pulverulentos no cálculo da composição granulométrica. Esta recomendação foi seguida apenas para o pó-de-brita.

A determinação do teor de material pulverulento consiste basicamente em adicionar água à amostra logo após ter sido secada em estufa, removendo-se em seguida a água juntamente com as partículas dissolvidas ou em suspensão. Para evitar perda de material, utilizam-se a peneira n° 200 (# 0,075 mm) durante esse procedimento, o qual é repetido até a remoção completa do material pulverulento. Após o término desse processo, a amostra é colocada para secar em estufa a 105 °C, sendo então determinada a sua massa final seca. A diferença entre a massa inicial seca e a massa final seca expressa a quantidade de material pulverulento presente na amostra. Dividindo essa quantidade pela massa inicial seca obtém-se o teor de material pulverulento.

➤ Índice de forma

Os agregados empregados na confecção da mistura asfáltica devem apresentar um índice de forma superior a 0,6 conforme previsto na Especificação Geral para Obras de Infraestrutura Aeroportuárias ES 04.05.610, determinado pelo método DNER-ME 086/95 (DIRENG, 2002).

O método de ensaio descrito na norma rodoviária determina a variação dos eixos multiderecionais das partículas que compõem os agregados, definindo-a pelo índice de forma. Tal método fornece como resultados valores entre 0 e 1. O que significa que quanto mais próximo de 1, menor a variação dos eixos e mais cúbico é o agregado. Valores menores que 0,5 indicam grande variação dos eixos e, portanto, partículas lamelares ou alongadas.

No intuito de avaliar os agregados brita 01 e pedrisco em relação a este parâmetro procedeu-se à execução desse método para cada um desses agregados. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Solos do DER-DF. Neste método, após ter sido determinada a granulometria do material seleciona-se a graduação na qual ele se enquadra. A seguir, selecionam-se as quantidades das frações que constituirão a amostra, usando-se as peneiras com crivos de aberturas circulares. Na Tabela 3.3 apresentam-se as frações nas quais se enquadraram cada um dos agregados, acompanhadas dos conjuntos de crivos redutores empregados.

Tabela 3.2 - Massa das frações das amostras e conjunto dos crivos redutores

<i>MATERIAL</i>	<i>GRADUAÇÃO</i>	<i>CRIVOS DE ABERTURA CIRCULAR</i>		<i>FRAÇÕES DA AMOSTRA (g)</i>	<i>CRIVOS REDUTORES</i>	
		<i>PASSANTE*</i>	<i>RETIDO</i>		<i>CRIVO I</i>	<i>CRIVO II</i>
Brita 01	C	19,0	16,0	2000	9,5	6,3
		16,0	12,7	2000	8,0	5,3
		12,7	9,5	2000	6,3	4,2
Pedrisco	D	12,7	9,5	1000	6,3	4,2
		9,5	6,3	1000	4,8	3,2

* Tamanho diretriz – diâmetro do menor crivo de abertura circular em que passam todos os grãos de uma fração, das que compõem a graduação escolhida.

O ensaio consiste em passar as partículas de cada fração no crivo de abertura igual à metade do tamanho diretriz correspondente (crivo I), separando as retidas e determinando a sua massa. O material passante no crivo I deve ser passado em um segundo crivo redutor de abertura igual a 1/3 do tamanho diretriz da fração (crivo II), anotando-se o peso do material retido. Para cada fração que compõe a graduação determina em relação ao seu peso inicial, as percentagens retidas em cada crivo redutor. O índice de forma é calculado pela Equação 3.3.

$$f = \frac{P_1 + 0,5 \cdot P_2}{100 \cdot n} \quad (3.3)$$

Onde:

f = Índice de forma;

P_1 = Soma das percentagens retidas nos crivos I;

P_2 = Soma das percentagens retidas nos crivos II;

n = número de frações (ou de tamanhos diretrizes) que compõem a graduação escolhida.

➤ Adesividade do agregado ao material betuminoso

O método empregado é preconizado pela norma DNER-ME 078/94, o qual consiste em determinar se há ou não deslocamento do filme de ligante, após a amostra ser mantida por 72 horas imersa em água a temperatura de 40 °C. A Figura 3.6 mostra o aspecto da amostra antes e após a imersão em água, respectivamente.



Figura 3.6 - Adesividade do agregado graúdo; Aspecto da amostra antes e após a imersão

A adesividade depende do par ligante e agregado, e pode ser vista sob dois aspectos: o da adesividade ativa e o da adesividade passiva. A adesividade ativa é a desenvolvida quando o ligante irá cobrir a superfície do agregado, sendo imprescindível para que ela ocorra que o ligante molhe o agregado. Já a adesividade passiva diz respeito à resistência ao deslocamento do filme de ligante apresentada pela superfície dos agregados já envolvidos.

3.2.2. LIGANTE ASFÁLTICO

No Brasil o asfalto mais utilizado para confecção de misturas a quente, como o CBUQ, é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo, e recebe a denominação CAP – cimento asfáltico de petróleo. O CAP tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água.

Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento tanto na rede rodoviária como na rede aeroportuária. O uso intensivo do CAP em pavimentação se deve ao fato da forte união com os agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável, grande poder impermeabilizante, além de ser um material durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos.

O CAP é um produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente, líquido a altas temperaturas e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas em especificações que serão mostradas mais adiante. A Figura 3.7 (a) e (b) a seguir, mostra o CAP em seu estado viscoelástico e estado líquido, respectivamente.

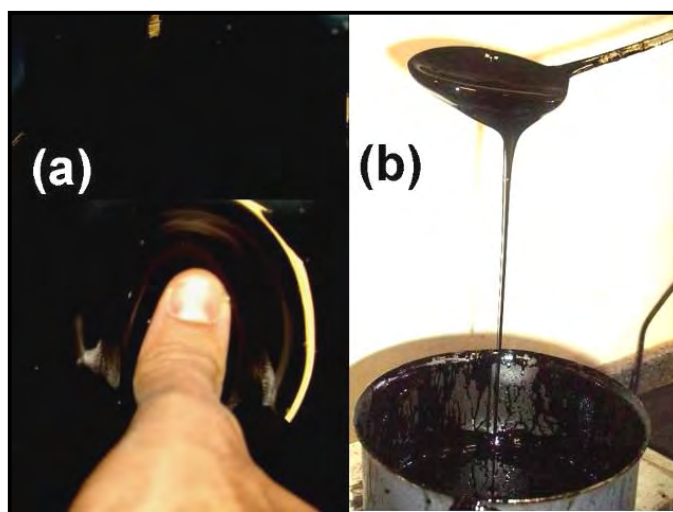


Figura 3.7 - Cimento asfáltico de petróleo; (a) Estado viscoelástico na temperatura ambiente; (b) Estado líquido a altas temperaturas.

O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi o CAP 50/70 obtido na distribuidora de asfalto Centro Oeste Asfaltos Ltda., localizada em Brasília – DF, o CAP desta distribuidora é produzido na REGAP, Refinaria de Betim - MG. O material após chegada no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER) do Ceftru da Universidade de Brasília foi caracterizado conforme etapas que serão apresentadas a seguir.

3.2.2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DO ASFALTO - ENSAIOS CORRENTES

Para se especificar um determinado asfalto como adequado para pavimentação, a maioria dos países utiliza medidas simples de características físicas do ligante, pela facilidade de execução nos laboratórios de obras. As duas principais características utilizadas são: a “dureza” medida pela penetração de uma agulha padrão na amostra de ligante, e a resistência ao fluxo, medida em ensaios de viscosidade. Os ensaios físicos dos cimentos asfálticos podem ser categorizados em ensaios de consistência, de durabilidade, de pureza e de segurança.

➤ Ensaio de ponto de amolecimento

Conforme preconizado pela norma DNER-ME 247/94, a amostra foi fundida, colocada em um molde que consiste de um anel de latão. O anel foi mantido suspenso em um banho à temperatura controlada, e, sobre ele, colocada uma esfera de aço. O conjunto foi então aquecido, fazendo com que a amostra amoleça dentro do anel e ceda ao peso da esfera que se deslocará a uma determinada distância (Figura 3.8)

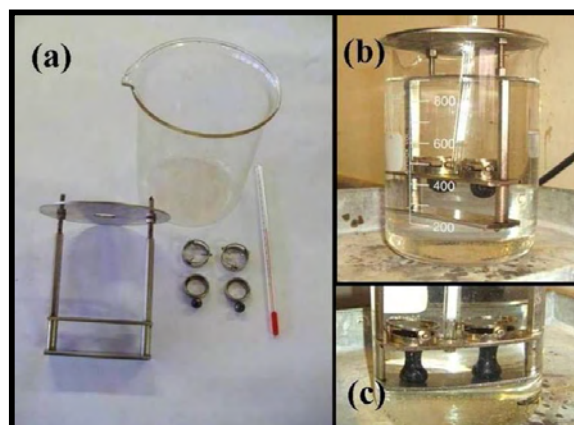


Figura 3.8 - Ensaio de ponto de amolecimento.

➤ Ensaio de penetração

De acordo com as especificações do DNER-ME 003/99, foi determinada a consistência de 50 gramas de CAP e suas variações pela penetração da agulha, submetida a uma carga pré-estabelecida de 100g, durante 5 segundos a uma temperatura de 25°C, conforme ilustrado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Ensaio de penetração; Equipamento LER-Ceftru-UnB

Este ensaio forneceu uma idéia da consistência para fins de classificação. Neste sentido, foram realizadas seis determinações, sendo o valor da penetração, a média entre os valores obtidos.

➤ Ensaio de ponto de fulgor

Ponto de fulgor é a temperatura na qual os vapores originados pelo aquecimento do produto asfáltico se inflamam quando em contato com uma chama padronizada. Ou seja, é a temperatura limite que pode o material asfáltico atingir em obra sem risco de incêndio. É um indicativo da presença de certos constituintes voláteis indesejáveis no asfalto. É um ensaio de segurança.

O ensaio consiste em determinar a temperatura em que ocorre um lampejo, provocado pela inflamação dos vapores da amostra, pela passagem de uma chama piloto, conforme a NBR 11341 – MB 50. A temperatura da amostra é aumentada, de início rapidamente e depois lentamente, a uma taxa constante na medida em que se aproxima do ponto de fulgor. A

intervalos de tempo especificados, uma pequena chama piloto é passada sobre a cuba. Foram realizados dois ensaios, onde se determinou o ponto de fulgor como sendo a média das duas determinações (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Equipamento para determinação do ponto de fulgor; Vaso aberto de Cleveland;
LER-Ceftru-UnB

➤ Ensaio de ductilidade

Ductilidade é a propriedade de um material suportar grandes deformações (alongamento) sem ruptura. Este ensaio tem por finalidade medir a resistência à flexibilidade. A medida da ductilidade é dada pela distância (em cm) que um corpo-de-prova de material betuminoso, em condições padronizadas, submetido a um esforço de tração, também em condições especificadas, se rompe. A maioria dos cimentos asfálticos para pavimentação tem ductilidade superior a 100 cm.

Conforme DNER-ME 163/98, a amostra para o ensaio de ductilidade foi previamente preparada, a fim de se realizar o ensaio em temperatura ambiente.

Foram moldados dois corpos-de-prova, colocando-os para esfriar a temperatura ambiente por 30 minutos, depois foi cortado o excesso de material por meio de uma espátula ligeiramente aquecida, de maneira a se ter o molde cheio com faces planas. Foi retirado o molde da placa e submeteu-se o corpo-de-prova imediatamente ao ensaio de tração no Ductilômetro, com velocidade uniforme especificada (5 cm/min \pm 0,25 cm/min), até que os corpos-de-prova viessem a romper-se (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Moldagem dos corpos-de-prova e execução do ensaio de ductilidade.

➤ Ensaio de viscosidade

A viscosidade mostra o grau de mobilidade molecular e a magnitude das forças atrativas em líquidos e é influenciada diretamente pela temperatura no asfalto. Assim, com o aumento da temperatura, as forças intermoleculares diminuem, aumentando o poder de molhagem do asfalto, possibilitando o aumento da área de recobrimento na superfície do agregado. A diminuição da viscosidade pode contribuir para que ocorra uma pequena absorção de asfalto pelo agregado, melhorando assim o intertravamento das partículas.

No Brasil, o viscosímetro mais utilizado para os materiais asfálticos é o *Saybolt-Furol*, descrito na norma DNER-ME 004/94. A viscosidade determinada pelo equipamento é o tempo em segundos em que 60 ml de amostra de ligante asfáltico flue pelo orifício *Saybolt-Furol* numa determinada temperatura (Figura 3.12).

O ensaio foi realizado, preenchendo o tubo de ensaio com ligante, ajustada a temperatura do banho até que a temperatura da amostra permaneça constante. As temperaturas de ensaio preconizadas na norma brasileira são respectivamente 135, 150 e 177°C.



Figura 3.12 - Ensaio de viscosidade; Viscosímetro *Saybolt-Furol* – LER-Ceftru-UnB

A viscosidade também foi determinada pelo método rotacional, utilizando o equipamento conhecido como viscosímetro Brookfield (Figura 3.13). A viscosidade medida é a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de cisalhamento de um líquido. Esta razão é também chamada de coeficiente de viscosidade dinâmica.

Este coeficiente é a medida da resistência ao escoamento do líquido, comumente chamada de viscosidade dinâmica. A unidade no sistema internacional (SI) é o Pascal-segundo (Pa.s). No sistema CGS, a unidade é o Poise e é equivalente a 0,1 Pa.s. O centipoise (cP) é equivalente ao milipascal-segundo (mPa.s) e é frequentemente usado como unidade de viscosidade para determinações utilizando o Brookfield (Morilha, 2004).

Conforme preconizado na ASTM D 4402, após estabilização da temperatura de ensaio, 135 a 215°C, iniciou-se a rotação do *spindle* (ou torpedão) e a viscosidade é lida diretamente no equipamento em centipoise (cP). A norma brasileira DNER ME 004/94 exige realização do ensaio em apenas 3 temperaturas: 135, 150 e 177 °C.

Essas temperaturas foram determinadas, com a finalidade de construir uma curva temperatura versus viscosidade, com o objetivo de se determinar a faixa de temperatura de trabalho do ligante asfáltico no processo de dosagem e moldagem dos corpos-de-prova.

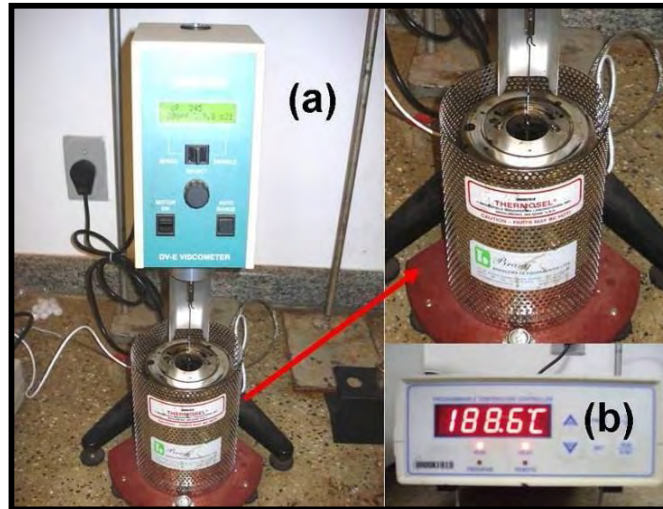


Figura 3.13 - Viscosímetro Brookfield LER-Ceftru-UnB; (a) equipamento completo; (b) controlador de temperatura

➤ Índice de Susceptibilidade Térmica

Susceptibilidade térmica é a capacidade que o ligante asfáltico tem de manter suas características reológicas inalteradas sob uma larga faixa de temperaturas. Em climas mais frios, o ligante permanece mais flexível e aumenta a resistência do revestimento à fissuração e ao trincamento.

Em climas quentes, como no caso do Brasil, o maior ponto de amolecimento e a maior viscosidade do ligante aumentam a resistência à deformação permanente. Assim, uma alta susceptibilidade térmica faz com que sejam evitadas as aplicações em locais de tráfego pesado, lento, canalizado e diante de altas temperaturas.

O Índice de Suscetibilidade Térmica (IST), também chamado de *Índice de Pfeiffer e Van Doormaal*, que nas especificações brasileiras pode variar de -1,5 a +1,0, indica a seguinte tendência: valores maiores que +1,0 indicam asfaltos pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços quando a temperatura é baixa, e valores menores que -1,5 indicam asfaltos muito sensíveis a elevadas temperaturas, ou seja, amolecem rapidamente.

De acordo com ANP (2005), o Índice de Susceptibilidade Térmica pode ser determinado utilizando a Equação 3.4.

$$IST = \frac{[500 \times \log(PEN)] + [20 \times (T^\circ C)] - 1951}{120 - [50 \times \log(PEN)] + (T^\circ C)} \quad (3.4)$$

Onde:

T °C = Ponto de amolecimento;

PEN = penetração a 25°C, 100g, 5seg.

3.2.3. PROCEDIMENTOS DE DOSAGEM E COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A seguir serão apresentados os procedimentos de seleção das granulometrias para as três misturas, a metodologia de dosagem e conseqüentemente a determinação do teor de projeto (ótimo) de ligante, e o método de compactação utilizada para confecção dos corpos-de-prova utilizados na caracterização funcional e mecânica.

3.2.3.1. SELEÇÃO DA GRANULOMETRIA

A especificação de serviço aeroportuária ES 04.05.610/02, estabelece quatro faixas dentre as quais a composição granulométrica da misturas destinada a camada de rolamento de uma pista de um aeródromo deve se enquadrar (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Faixas granulométricas para camada de rolamento (DIRENG, 2002)

PENEIRAS		PERCENTUAL PASSANTE (%)			
Nº	Abertura (mm)	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4
1½"	38,1	–	–	–	–
1"	25,4	86 – 98	100	–	–
¾"	19,1	68 – 93	76 – 98	100	–
½"	12,7	57 – 81	66 – 86	79 – 99	100
3/8"	9,5	49 – 69	57 – 77	68 – 88	79 – 99
4	4,8	34 – 54	40 – 60	48 – 68	58 – 78
10	2,0	19 – 40	23 – 43	29 – 49	35 – 55
40	0,42	7 – 20	9 – 22	11 – 24	15 – 29
80	0,18	4 – 13	6 – 17	6 – 17	9 – 19
200	0,074	3 – 6	3 – 6	3 – 6	3 – 6
Teor de Asfalto (%)		4,5 – 7,0	4,5 – 7,0	5,0 – 7,5	5,5 – 8,0
Espessura mínima da camada (cm)		6,0	4,0	3,0	2,0

Para selecionar as três granulometrias a serem estudadas nesta pesquisa, foi escolhido o requisito descrito na *Engineering Brief* N° 59A Item P-401-*Plant Mix Bituminous Pavements* (Superpave) da FAA. Nesta metodologia, assim como na metodologia Superpave original, a curva granulométrica é plotada com a percentagem passante no eixo das ordenadas versus a abertura da peneira elevada à potência 0,45 na abscissa, ao contrário da curva mono-log usada tradicionalmente.

Segundo os requisitos da metodologia, a granulometria de uma mistura é baseada em quatro peneiras principais, que são a peneira máxima, a peneira máxima nominal, a peneira de 2,36 mm e a peneira de 0,075 mm de abertura, que formam os pontos de controle, e funcionam como pontos mestres por onde a curva granulométrica deve passar.

A peneira de tamanho máximo nominal (TMN) é uma peneira de tamanho imediatamente acima da primeira peneira que reter mais de 10% do agregado combinado e a peneira máxima é um tamanho acima da peneira de tamanho máximo nominal. Outra característica do gráfico contendo a distribuição granulométrica é a linha de densidade máxima (LDM) uma linha reta que parte da origem e vai até o ponto de agregado de tamanho máximo.

Para a metodologia aplicada para pavimentos de aeródromos, a zona de restrição (ZR), ou seja, a área formada em ambos os lados da LDM, limitada nas peneiras intermediárias (2,36 ou 4,75mm) e na peneira de 0,3mm de abertura, foi extinta. A Figura 3.14 ilustra os requisitos Superpave para granulometria de misturas contínuas com 19,0 mm de TMN, como exemplo.

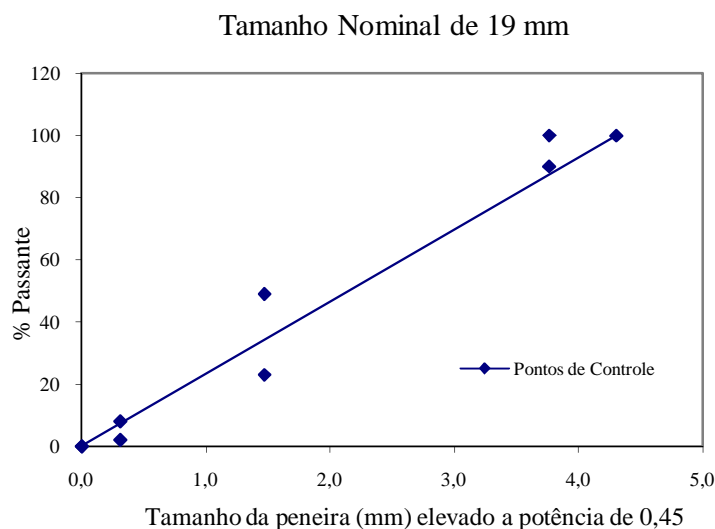


Figura 3.14 - Requisitos Superpave para granulometria de misturas contínuas aeroportuárias

A zona de restrição inicialmente foi proposta com a finalidade de evitar que uma quantidade excessiva de areia natural seja usada na mistura, além de assegurar que um mínimo de vazios no agregado mineral (VAM) seja atingido.

A especificação de granulometria para misturas asfálticas rodoviária dosadas pela metodologia Superpave recomendavam a não passagem da granulometria pela ZR, e ainda à medida que o volume de tráfego aumentasse as misturas com granulometria abaixo da ZR (BZR) deveriam ser utilizadas em preferência às que passavam acima da ZR (AZR). E que a mistura com granulometria que passavam por dentro da ZR (DZR) deveria ser evitada.

Porém, nos últimos anos, a zona de restrição foi foco de inúmeras pesquisas as quais se referenciavam principalmente sobre a sua eficiência na determinação de uma curva granulométrica. Vasconcelos (2004) cita vários estudos a respeito da utilização da zona de restrição como requisito de determinação de uma granulometria, bem como a respeito da extinção da mesma dos procedimentos Superpave de dosagens.

Em seu levantamento bibliográfico, a mesma autora observou que a ZR era um fator ineficiente na definição da granulometria da mistura a ser adotada. E que os três tipos de granulometria (AZR, DZR e BZR) poderiam apresentar melhor comportamento mecânico em relação uns aos outros, a depender dos testes escolhidos para análise e dos materiais adotados.

Embora a extinção da zona de restrição na metodologia aeroportuária, neste trabalho ela será utilizada apenas para dar nome as granulometrias, são elas: granulometria que passa acima da zona de restrição (AZR), granulometria que passa dentro da zona de restrição (DZR) e a que passa abaixo da zona de restrição (BZR).

3.2.3.2. METODOLOGIA DE DOSAGEM MARSHALL

O processo de dosagem das misturas asfálticas na metodologia Marshall é realizado basicamente em quatro etapas.

Em primeiro momento (1ª Etapa) se dá a escolha e caracterização dos materiais empregados (agregados, material de enchimento e ligantes asfálticos); em seguida como segundo procedimento (2ª Etapa) ocorre a determinação das percentagens com que os diferentes tipos

de agregados devem contribuir na mistura de modo a atender as especificações com relação à granulometria; a etapa três (3ª Etapa) ocorre a determinação do teor ótimo de ligante, ou de uma faixa ótima, que pode ser feita por tentativas ou com o uso de fórmulas que fornecem o teor ótimo de uma maneira aproximada, baseada na granulometria da mistura de agregados; por fim, a última etapa (4ª Etapa) ocorre a comparação dos parâmetros físicos (granulometria, estabilidade, fluência, relação betume - vazios, etc) da mistura com os valores constantes nas especificações.

A estabilidade Marshall fornece uma indicação da capacidade da mistura de resistir à deformação sob o efeito da aplicação de carga. A resistência oferecida pelo corpo-de-prova à ruptura durante o ensaio representa a resistência ao cisalhamento da mistura, onde o atrito é desenvolvido no arcabouço sólido formado pelos agregados e a coesão é fornecida pelo ligante asfáltico. Já a fluência é definida como sendo o deslocamento diametral total sofrido por um corpo-de-prova cilíndrico da mistura asfáltica durante o ensaio Marshall (Dantas Neto, 2001).

Por muito tempo estes dois parâmetros eram os mais importantes no processo de dosagem, ou seja, na determinação do teor de ligante para uma mistura asfáltica. Porém esses parâmetros apresentam algumas limitações, sendo uma das principais críticas, o fato de que tanto a estabilidade, como a fluência serem parâmetros empíricos que não representam o comportamento mecânico das misturas.

Devido a isto, os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas no estado compactado vêm se tornando parâmetros de fundamental importância no processo de dosagem. Estes permitem dentre outras coisas, avaliar a eficiência do processo de compactação e quantificar a quantidade de vazios existentes.

A Figura 3.15 apresenta de forma ilustrativa os parâmetros volumétricos da mistura asfáltica compactada. E serão descritos a seguir.

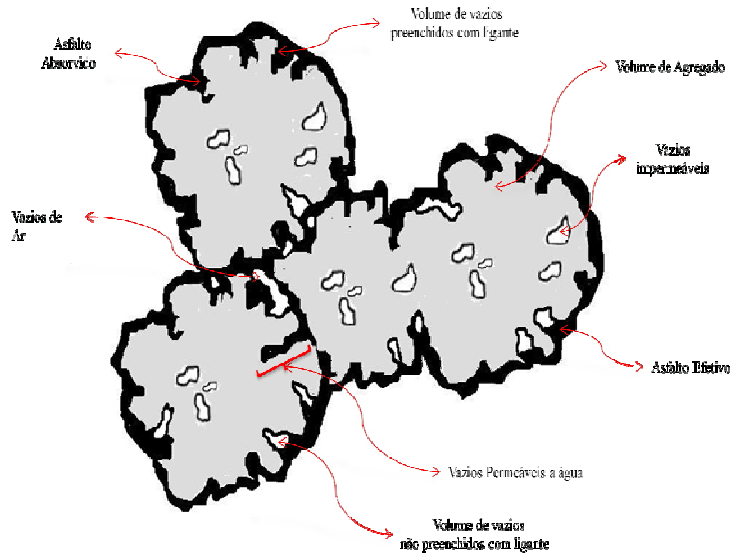


Figura 3.15 - Esquema ilustrativo dos parâmetros volumétricos de uma mistura asfáltica compactada (Bernucci *et. al.*, 2006)

A densidade aparente (d_a ou G_{mb}) é a densidade do material como um todo. Este parâmetro é determinado com o emprego da balança hidrostática, sendo calculado de acordo com a Equação 3.5.

$$d_a = \frac{M}{M - M_i} \quad (3.5)$$

Onde:

d_a = densidade aparente da mistura;

M = massa do corpo-de-prova ao ar;

M_i = massa do corpo-de-prova em imersão.

A densidade máxima teórica da mistura (DMT ou G_{mm}) corresponde à densidade da mistura asfáltica sem vazios. Ou seja, a DMT é numericamente igual à razão entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto e total de asfalto (Roberts *et al.*, 1996). Pode

ser calculada a partir das percentagens de cada um dos componentes da mistura e das densidades relativas destes, segundo a Equação 3.6.

$$Dt = \frac{M_t}{V_{CAP} + V_f + V_{am} + V_{ag}} = \frac{100}{\frac{\% CAP}{d_{CAP}} + \frac{\% f}{d_f} + \frac{\% am}{d_{am}} + \frac{\% ag}{d_{ag}}} \quad (3.6)$$

Onde:

Dt = densidade máx. teórica da mistura;

M_t = massa total da mistura;

$\% CAP$ = teor de ligante na mistura;

$\% f$ = percentagem de fíler na mistura;

$\% am$ = % de agregado miúdo na mistura;

$\% ag$ = % de agregado graúdo na mistura;

d_{CAP} = densidade real do ligante;

d_f = densidade real do fíler;

d_{am} = densidade real do agregado miúdo;

d_{ag} = densidade real do agregado graúdo.

Vasconcelos (2004) mostra a diferença entre a determinação da DMT por meio da ponderação das densidades reais dos materiais constituintes, e do procedimento com aplicação de vácuo (DMM) pelo Método Rice, os métodos embora resultem em valores numericamente próximos, produzem parâmetros volumétricos e conseqüentemente em teores de projeto distintos.

A Percentagem de volume de vazios da mistura compactada (% Vv) é a relação entre o volume de vazios e o volume total da mistura. Representa a concentração de volume de ar

dentro da amostra compactada. Este parâmetro é de grande importância no estudo do comportamento das misturas asfálticas, pois influencia a rigidez e a coesão destas.

A sua determinação é feita com o uso da densidade aparente e da densidade máxima teórica da mistura, conforme a Equação 3.7.

$$\%V_v = \frac{DMT - d_a}{DMT} \cdot 100 \quad (3.7)$$

Onde:

$\% V_v$ = porcentagem do volume dos vazios;

DMT = densidade máxima teórica da mistura;

D_a = densidade aparente da mistura.

A Percentagem de vazios do agregado mineral (% VAM) é o volume de espaço vazio intergranular entre as partículas de agregado de uma mistura compactada que inclui os vazios e o teor efetivo de asfalto. Este parâmetro normalmente é fixado nas especificações em função do diâmetro máximo do agregado e pode ser calculado usando-se a Equação 3.8 a seguir:

$$\%VAM = \frac{V_v + V_{CAP}}{V_t} \cdot 100 = \frac{D_t - d}{D_t} \cdot 100 + \frac{d \cdot \%CAP}{d_{CAP}} \quad (3.8)$$

Onde:

$\% VAM$ = porcentagem de vazios do agregado mineral;

V_v = volume ocupado pelos vazios da mistura;

V_{CAP} = volume ocupado pelo ligante na mistura;

V_t = volume total da mistura.

A Relação Betume-Vazios (%RBV) indica a percentagem de vazios de agregados mineral que está preenchido pelo material betuminoso. Expressa na Equação 3.9 como uma percentagem do volume total da mistura ou do VAM.

$$\% RBV = \frac{\% V_v}{\% VAM} \cdot 100 \quad (3.9)$$

Onde:

%RBV = relação betume-vazios da mistura;

% V_v = percentagem do volume de vazios;

% VAM = percentagem de vazios do agregado mineral.

3.2.3.3. PROCEDIMENTO DE DOSAGEM UTILIZADO

A especificação geral para obras de Infraestrutura Aeroportuárias para misturas asfálticas a quente ES 04.05.610/02 da DIRENG divide as misturas em dois tipos (A e B), de acordo com o pavimento onde serão utilizadas, segundo os critérios na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Tipo de misturas de acordo o pavimento onde serão utilizadas (DIRENG, 2002).

“Tipo A”	“Tipo B”
Para pavimentos que se destinam a operações de aeronaves de massa bruta superior a 27.300 kgf ou dotadas de pneus de pressões superiores a 0,70 MPa;	Para pavimentos que se destinam a operações de aeronaves de massa bruta inferior a 27.300 kgf, ou dotadas de pneus de pressões iguais ou inferiores a 0,70 MPa;
Para pavimentos que se destinam ao tráfego de viaturas com carga de eixo superior a 10.000 kgf ou com tráfego superior a 10.000 repetições anuais;	

A Tabela 3.5 apresenta a faixa de valores dos parâmetros físicos requeridos pelas especificações gerais para obras de infraestrutura aeroportuárias para misturas asfálticas a

quente empregadas na execução das camadas de revestimento dos pavimentos flexíveis para CBUQ na Faixa 2.

Tabela 3.5 - Parâmetros físicos das misturas asfálticas (DIRENG, 2002).

CARACTERÍSTICAS	TIPO	
	A	B
Estabilidade (N)	Mín. 9.500 Máx. 16.000	Mín. 6.000 Máx. 9.000
Fluência máxima (mm)	2,5 – 3,5	2,5 – 4,5
Volume de Vazios (%)	2,8 – 4,2	2,8 – 4,2
Relação Betume-Vazios (%)	70 – 80	75 – 82
Nº de golpes (por face)	75	50

Os agregados minerais utilizados na mistura de projeto deverão atender aos valores mínimos de vazios no agregado mineral (VAM), estes valores é função do tamanho máximo do agregado, indicados na Tabela 3.6 a seguir.

Tabela 3.6 - Mínimo de vazios do agregado mineral (DIRENG, 2002)

TAMANHO MÁXIMO DO AGREGADO (mm)	MÍNIMO VAZIO (VAM) %
12,5	16
19,0	15
25,0	14
38,1	13

Como observado, na tabela anterior, a norma aeroportuária é baseado em dois parâmetros volumétricos: Volume de vazios (Vv) e relação betume-vazios (RBV).

Atualmente o teor de projeto de ligante asfáltico na dosagem Marshall para misturas a quente é determinado baseado em parâmetros volumétricos, geralmente volume de vazios (Vv) e relação betume-vazios (RBV). Este procedimento de dosagem é o adotado pela 3ª UNIT/DNIT e será utilizado na pesquisa para determinação do teor de projeto das misturas aeroportuárias, seguindo os requisitos para misturas do Tipo A.

A dosagem das misturas com as três granulometrias definidas anteriormente, seguiu o seguinte procedimento: Moldagem de três corpos-de-prova (CPs) em cinco diferentes teores de ligante asfáltico; desses CPs foram determinados o Vv e o RBV de forma a traçar uma gráfico onde a abscissa é dada pelo percentual de CAP, a ordenada y_1 pelo Vv e a ordenada y_2

pelo RBV, conforme mostrado na Figura 3.16. O teor de projeto (TP) é dado pela média dos dois valores centrais de CAP, obtidos pelas retas verticais provenientes das especificações de Vv e RBV.

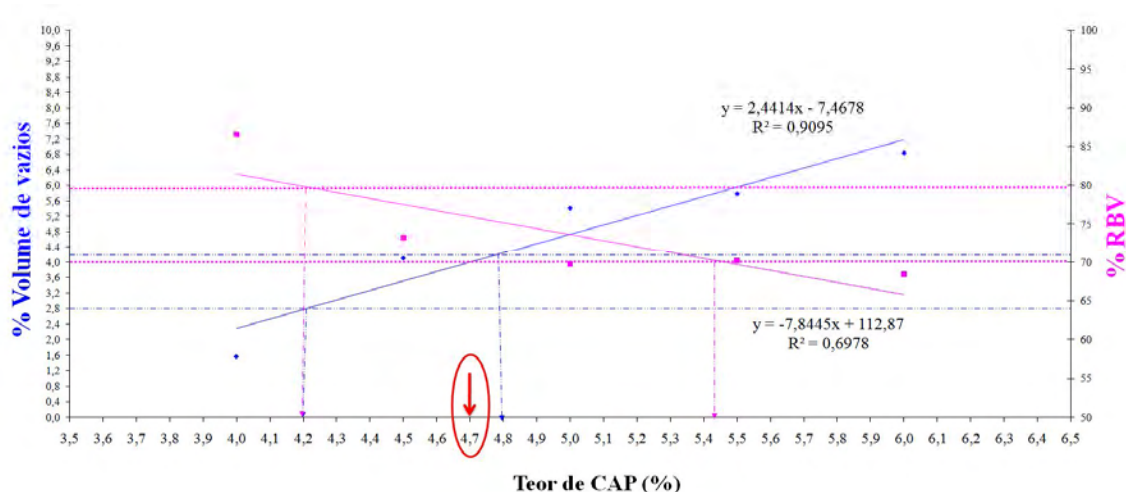


Figura 3.16 - Gráfico de obtenção do teor de projeto; Curva DZR

A temperatura do ligante para a confecção da mistura e para a compactação foram determinadas a partir do gráfico - Viscosidade x Temperatura do CAP e da prescrição contida na ES 04.05.610/02 da DIRENG, a qual diz que a temperatura recomendável de compactação é aquela para a qual o cimento asfáltico apresenta uma viscosidade (Saybolt-Furol) de 140 ± 15 sSF ($280\text{cP} \pm 30\text{cP}$), e a temperatura da mistura é aquela a qual o cimento asfáltico apresenta uma viscosidade (Saybolt-Furol) de 85 ± 10 sSF ($170 \pm 20\text{cP}$).

3.3. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIOS MECÂNICOS

Para determinação das características mecânicas das misturas asfáltico das três faixas de trabalho (AZR, BZR e DZR), optou-se por realizar a compactação Marshall, de forma semelhante ao que é adotado na maior parte das universidades e órgãos rodoviários brasileiros. Adotou-se 75 golpes por face com soquete Marshall, levando em consideração os requisitos para misturas do tipo A da norma aeroportuária.

Foram compactados conjuntos de 20 corpos-de-prova para cada faixa granulométrica, para determinação das características mecânica. O procedimento adotado para a confecção dos corpos-de-prova consistiu basicamente das seguintes etapas:

1ª Etapa - Pesagem dos agregados minerais e do ligante asfáltico na proporção de 95,2% em peso de agregado e 4,8% em peso de CAP para mistura do tipo AZR; 95,4% em peso de agregado e 4,7% peso de CAP para mistura do tipo DZR, e 95,7% em peso de agregado e 4,3% em peso de CAP. Vale ressaltar que o peso de um corpo-de-prova Marshall é de 1.200g;

2ª Etapa - Secagem dos agregados minerais em estufa nas temperaturas de 160 °C;

3ª Etapa - Preparo da mistura asfáltica manualmente na temperatura determinada no gráfico, viscosidade x temperatura. Durante toda compactação dos corpos-de-prova, a temperatura foi verificada para que esta não chegasse a uma elevação maior que determinada;

4ª Etapa - Compactação da mistura asfáltica, em um molde metálico cilíndrico, de acordo com a norma rodoviária DNER-ME 043/95, aplicando-se 75 golpes por face com o compactador mecânico do LER-CEFTRU-UnB. A Figura 3.17, ilustra as etapas mais detalhadamente: (a) mistura manual do agregado com o CAP; (b) colocação do molde na prensa; (c) prensa de compactação Marshall.



Figura 3.17 - Processo de confecção dos corpos-de-prova

3.4. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIOS FUNCIONAIS

Os corpos-de-prova utilizados nas análises funcionais foram moldados em forma de placas, a compactação das placas foi realizada por um rolo monocilindro manual. Foram compactadas três placas, uma para cada faixa granulométrica.

O processo de mistura entre os agregados minerais e os ligantes asfálticos foi realizado utilizando-se uma misturadora mecânica com capacidade de misturar 20 kg de material em cada operação. O procedimento adotado para a confecção das placas asfálticas consistiu basicamente das etapas descritas a seguir.

1ª Etapa - Pesagem dos agregados minerais e do ligante asfáltico numa quantidade tal que a mistura final apresentasse após a compactação a densidade aparente de projeto determinada no estudo de dosagem;

2ª Etapa - Pré-mistura em uma betoneira e secagem dos agregados minerais em estufa nas temperaturas de 160 °C;

3ª Etapa - Preparação da mistura asfáltica no misturador mecânico;

4ª Etapa - Colocação da mistura asfáltica no estado solto em estufa durante 1 hora à temperatura de compactação, definida no gráfico, viscosidade x temperatura;

5ª Etapa - Compactação da mistura asfáltica, em um molde metálico com dimensões 5,0 x 50,0 x 50,0 cm, utilizando-se um rolo liso manual, confeccionado no LER-Ceftru-UnB, até atingir a densidade aparente de projeto especificada para cada tipo de mistura.

A Figura 3.18, ilustra as etapas mais detalhadamente: (a) homogeneização da faixa granulométrica; (b) misturador mecânico; (c) controle de temperatura; (d) rolo monocilindro (200 kg); (e) molde metálico; (f) placa compactada.



Figura 3.18 - Etapas da moldagem das placas asfáltica

O produto final deste processo é uma placa com as dimensões do molde metálico, conforme mostrado na Figura 3.18(f), apresentando as propriedades volumétricas definidas no estudo de dosagem para cada tipo de mistura.

Nas placas, foram realizados os ensaios necessários para a avaliação do comportamento funcional das misturas asfálticas (Figura 3.19).



Figura 3.19 - Ensaio funcionais realizados em laboratório

3.5. CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS E MECÂNICAS

Retornando ao objetivo deste trabalho, a caracterização funcional e mecânica das misturas asfálticas em estudo, foram determinadas a partir de ensaios realizados em laboratório, descritos a seguir.

3.5.1. ENSAIOS FUNCIONAIS

3.5.1.1. MANCHA DE AREIA

O ensaio de Mancha de Areia avalia a macrotextura e caracteriza a superfície do pavimento quanto a sua capacidade de drenar a água confinada entre o pneu e o pavimento, e quantifica a profundidade média entre os grãos individuais de agregados aflorados na superfície do pavimento. É preconizado pela norma ASTM-E-965/96, e consiste em fazer o espalhamento circular de um volume conhecido ($V = 25 \text{ cm}^3$) de um solo passante na peneira #60 e retido na #80 sobre o pavimento.

A Figura 3.20 mostra a aparelhagem e o procedimento de execução do ensaio de mancha de

areia. Mede-se o diâmetro do círculo da “mancha” obtida em quatro direções, o diâmetro (D_m) será o resultado da média obtida nas quatro medições. A altura média da areia (HS, do francês *Hauteur de Sable*) é expressa pela Equação 3.10, a seguir.

$$HS = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D_m^2} \quad (3.10)$$

No presente trabalho, foram realizadas quatro medidas de manchas em cada placa, conforme descrito anteriormente, a profundidade média da macrotextura do pavimento foi enquadrada com base na classificação proposta por Aps (2006), apresentada no Capítulo 4. As manchas de areia executadas em cada placa foram definidoras dos pontos para realização dos demais ensaios funcionais.



Figura 3.20 - Aparelhagem e procedimento de ensaio de mancha de areia

3.5.1.2. DRENABILIDADE (*OUTFLOW*)

Esse método avalia a capacidade da macrotextura de drenar a água por meio dos canais da superfície de um pavimento, conforme preconizado pelo Doty (1975). O método de ensaio utiliza um cilindro transparente com um volume conhecido, acoplado ao fundo uma placa com um orifício circular, em contato com a superfície do pavimento. O resultado desse ensaio é expresso em termos de tempo de escoamento (*Outflow Time* – OFT), cujo objetivo é verificar a capacidade drenante da textura do pavimento frente a chuvas.

Como dito anteriormente, as manchas de areia definiram quais seriam os pontos de amostragem nas placas. Em cada ponto amostrado, foram realizadas três medidas de tempo de escoamento, com precisão de milésimos de segundo, a fim de determinar a capacidade drenante como sendo a média entre as leituras (Figura 3.21). A avaliação consistiu em

verificar o comportamento da superfície do pavimento em presença de água e identificar as diferenças de superfície e capacidade de escoamento de água da chuva.



Figura 3.21 - Execução do ensaio de drenabilidade; LER-Ceftru-UnB

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos com detalhes os resultados desta análise que serão confrontados com altura média de rugosidade superficial (macrotextura) para verificação da correlação existente.

3.5.1.3. PÊNDULO BRITÂNICO (ATRITO ESTÁTICO)

O pêndulo britânico é um equipamento portátil e sua utilização é especificada pelo método da ASTM E 303/93, podendo ser usado em laboratório e em ensaios de campo. Seu princípio de funcionamento baseia-se em um pêndulo padronizado com uma base de borracha, que é lançado em direção ao pavimento molhado simulando a passagem de um veículo a velocidade de 10 km/h, com o objetivo de medir-se a perda de energia por atrito da sapata de borracha do pêndulo quando esta desliza sobre a superfície do pavimento. O valor é expresso em BPN (*British Number Pendulum*) ou SRT (*Skip Resistent Test*).

O pêndulo britânico avalia a microtextura do pavimento asfáltico. Neste sentido, em cada ponto da amostragem foram realizadas cinco determinações, sendo o valor de BPN respectivo, a média entre os valores obtidos (Figura 3.22).

Os resultados obtidos foram classificados em função da rugosidade, conforme informações apresentadas no Capítulo 2. A análise detalhada dos resultados, bem como comparação das condições de atrito é apresentada no Capítulo 4.



Figura 3.22 - Execução do ensaio de pêndulo na placa

3.5.1.4. CÁLCULO DO IFI

Determinados os parâmetros de textura da superfície de rolamento, procede-se ao cálculo do IFI (S_p , F_{60}) para cada mistura asfáltica analisada. A constante de velocidade S_p é determinada por meio de uma medida de macrotextura, no caso a altura média da rugosidade (H_S) obtida no ensaio de mancha de areia, utilizando na Equação 3.11 a seguir.

$$S_p = a + b \cdot T_x \quad (3.11)$$

Onde:

S_p = Constante de Velocidade;

T_x = valores da altura média da rugosidade (H_S), em mm;

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

A partir daí é então obtido o FR_{60} - Fator ajustado de atrito para a velocidade de 60 km/h pela equação 3.12.

$$FR_{60} = FRS \times e^{\left(\frac{S-60}{Sp}\right)} \quad (3.12)$$

Onde:

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

FRS = valores de BPN medidos com o Pêndulo Britânico;

Sp = Constante de Velocidade obtida pela Equação (3.11);

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

Em seguida é a obtido o Número de Atrito, F_{60} (*Friction Number*) pela Equação 3.13.

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot Tx \quad (3.13)$$

Onde:

F_{60} = Número de Atrito;

FR_{60} = Fator ajustado de atrito para a velocidade de 60 km/h, obtido pela Equação 3.3;

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

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

Definidos o par $(Sp; F_{60})$, pode-se então calcular o IFI de um pavimento a qualquer velocidade de passeio S , por meio da seguinte Equação 3.14.

$$IFI(S) = F_{60} \times e^{\left(\frac{60-S}{Sp}\right)} \quad (3.14)$$

Foram determinados valores de IFI para as três misturas asfálticas, classificados de acordo com proposta de Aps (2006), apresentada no Capítulo 2. Os resultados são apresentados e comentados no Capítulo 4.

3.5.2. ENSAIOS MECÂNICOS

A condição estrutural de um pavimento denota sua adequação ou sua capacidade de resistir mecanicamente às solicitações provocadas pela passagem das cargas do tráfego. Uma condição inadequada ou uma capacidade estrutural insuficiente, para um tráfego atuante, acelerará a geração de defeitos de superfície nas camadas asfálticas, por exemplo, as trincas de fadiga, bem como a queda do nível de serventia com o tempo em decorrência da geração de afundamentos plásticos em trilha de roda e ondulações.

As misturas selecionadas para realização dos ensaios mecânicos foram referentes às granulometrias anteriormente mencionadas. No presente trabalho, o comportamento mecânico das misturas foi avaliado por meio dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, fadiga por compressão diametral a tensão controlada, conforme exposto nos itens seguintes.

3.5.2.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de tração indireta por compressão diametral, também conhecido como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro em 1953 com a finalidade de determinar a resistência à tração de corpos-de-prova de concreto de cimento Portland por solicitações estáticas. A extensão do uso para misturas asfálticas se deve possivelmente ao fato de os revestimentos asfálticos, quando sujeitos às solicitações do tráfego, desenvolverem tensões de tração por flexão em suas fibras inferiores.

O ensaio é realizado em corpos-de-prova cilíndricos segundo a norma DNER-ME 138/94 e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, conforme ilustrado na Figura 3.23, a fim de se obter tensões de tração ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga.

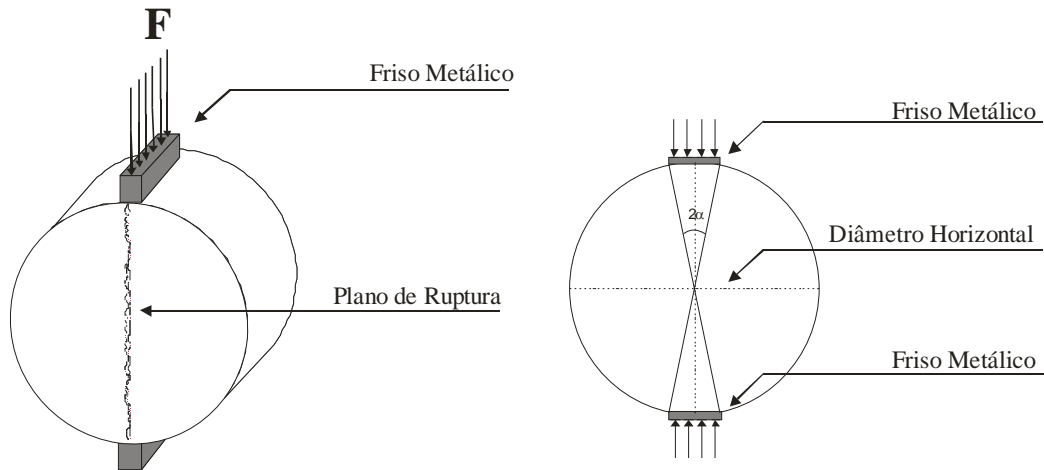


Figura 3.23 - Esquema do ensaio de resistência à tração estática por compressão diametral (DNER-ME 138/94)

O ensaio tem por objetivo determinar a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos. Com o valor da carga de ruptura (F), a resistência à tração do corpo de prova é calculada segundo a Equação 3.15, a seguir:

$$RT = \frac{2F_R}{100 \cdot \pi \cdot D_{cp} \cdot h_{cp}} \quad (3.15)$$

Onde:

RT = resistência à tração, MPa;

F_R = carga de ruptura, N;

D_{cp} = diâmetro do corpo de prova, cm;

h_{cp} = altura do corpo de prova, cm.

A aparelhagem necessária à execução do ensaio consiste em uma prensa mecânica com sensibilidade inferior ou igual a 19,6N (ou 2,0kgf), com êmbolo movimentando-se a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s (Figura 3.24); Estufa capaz de manter a temperatura entre 30 e 60°C; Sistema de refrigeração capaz de manter a temperatura em torno de 25°C; Paquímetro para medições dos corpos-de-prova.



Figura 3.24 - Prensa mecânica utilizada para realização dos ensaios de resistência à tração;
LER-Ceftru-UnB.

O procedimento de ensaio realizado neste trabalho pode ser resumido conforme descrito a seguir:

Foram realizadas medição da altura (h_{cp}) do corpo-de-prova com paquímetro em quatro posições diametralmente opostas, sendo adotada como altura a média aritmética das quatro leituras, e medição do diâmetro (D_{cp}) do corpo-de-prova com paquímetro, em três posições, sendo adotada como diâmetro a média aritmética das três leituras. Os corpos-de-prova foram mantidos em sala com refrigeração controlada, por um período de duas horas, de modo a se obter a temperatura requerida para o ensaio (25, 30, 45 ou 60°C), no presente trabalho a temperatura de ensaio foi a de 25°C. Foram realizados ajustes dos pratos da prensa até que obtivesse uma leve compressão, capaz de manter o corpo-de-prova em posição;

A aplicação da carga foi dada progressivamente, com velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, até que se desse a ruptura do corpo-de-prova segundo o plano diametral vertical; com o valor de carga de ruptura (F_R) obtida, foi calculada a resistência à tração do corpo-de-prova segundo a Equação 3.15. Os resultados obtidos para as misturas analisadas serão apresentados e discutidos no Capítulo 4.

3.5.2.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

De acordo com Medina & Motta (2005) os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com Francis Hveem,

que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Foi ele também quem adotou o termo “resiliência”, que é definido classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. O nome módulo de resiliência foi criado para que não fosse confundido com o módulo de *young*, determinado estaticamente.

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado no país pela DNER-ME 133/94 (DNER, 1994). Em resumo, pode-se dizer que o módulo de resiliência (MR) de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração (σ_t) aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável (ϵ_r) correspondente a tensão aplicada, numa temperatura (T °C), para certa frequência de aplicação de carga (Medina & Motta, 2005).

O carregamento vertical é aplicado e distribuído por meio de um friso de carga curvo e o deslocamento horizontal é medido por transdutores do tipo LVDT (Figura 3.25). A aplicação da teoria da elasticidade a misturas asfálticas no ensaio de compressão diametral, é admissível a níveis de tensão de tração de 50% ou menos em relação à de ruptura e a temperaturas inferiores a 35°C. Atribui-se o coeficiente de Poisson de 0,25 a 0,30 para as misturas asfálticas a quente.

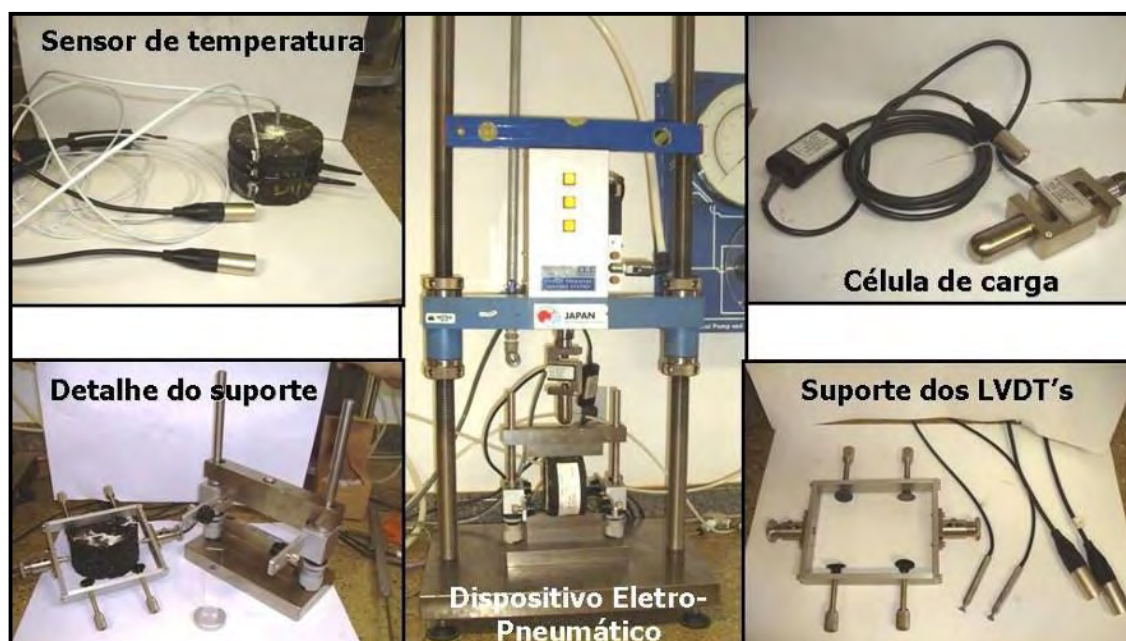


Figura 3.25 - Equipamento pneumático de carga repetida; LER-Ceftru-UnB

Neste trabalho, o ensaio de módulo de resiliência (MR) foi executado a temperatura controlada de $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$ (ambiente climatizado), a temperatura dos corpos-de-prova durante todos os ensaios de MR foi verificada por meio de sensores de temperaturas num corpo-de-prova de controle. Similar ao ensaio de resistência à tração (RT) foi tomada as dimensões diametralmente opostas, sendo o corpo-de-prova, em seguida, ajustado no molde (Figura 3.25).

Para medição dos deslocamentos horizontais, induzidos pelo carregamento vertical, foram dispostos dois LVDT's (*Linear Variable Differential Transducers*) em posições diametrais, visando minimizar o efeito de possíveis irregularidades na superfície do corpo-de-prova.

O equipamento utilizado nesta pesquisa, de propriedade do LER-Ceftru-UnB, adota os procedimentos especificados na ASTM D 4123/95. Para cada faixa granulométrica em estudo, a carga utilizada para determinar o módulo de resiliência foi de 1200 N, carga esta que em nenhum caso ultrapassou o limite de 25% da resistência à tração da carga de ruptura.

O procedimento de ensaio realizado neste trabalho consistiu em aplicar 405 pulsos de carga, onde 400 destes referem-se à fase de condicionamento da amostra. O resultado do ensaio corresponde à média aritmética dos últimos 05 pulsos de carregamento, tendo sido fornecido diretamente pelo programa que controla o equipamento (Figura 3.26). A frequência de carregamento utilizada foi 1s para cada ciclo, correspondendo à aplicação de carga 0,1 s e descanso de 0,9 s.

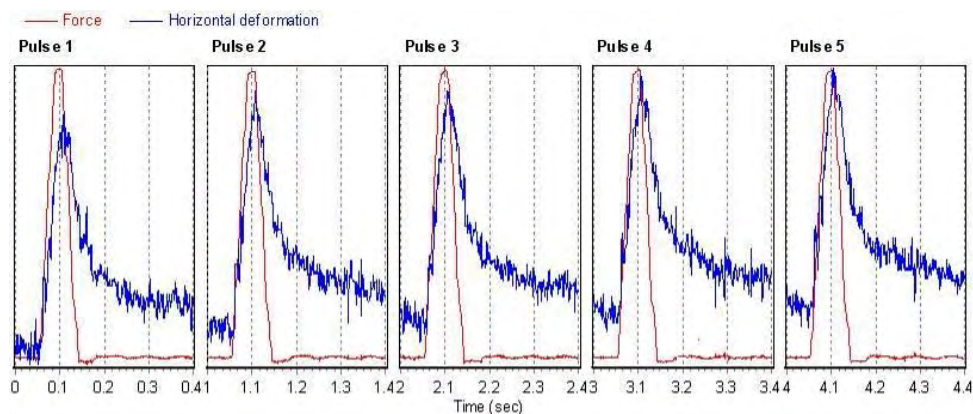


Figura 3.26 - Últimos 05 pulsos de carregamento fornecidos pelo programa

3.5.2.3. VIDA FADIGA

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica é definida em termos de vida de fratura (N_f) ou vida de serviço (N_s). A primeira se refere ao número total de aplicações de certa carga necessária à fratura completa da amostra e a segunda ao número total de aplicações dessa mesma carga que reduza o desempenho ou a rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido.

A fadiga constitui-se em um fator degradante do pavimento, em especial nas misturas asfálticas. É dependente de vários fatores, relacionados com as características do tráfego, com as condições climáticas de modo que acelera com a presença de baixas temperaturas, fazendo com que a mistura asfáltica se enrijeça e não resista à repetição das cargas, e com as características inerentes ao pavimento (tipo de mistura, volume de tráfego).

A estimativa da vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório permite a aplicação de carregamentos cíclicos ao material, sob regime de tensão constante ou controlada, e de deformação constante ou controlada. A Figura 3.27-a e Figura 3.27-b apresenta esquematicamente os tipos de solicitações, deformações controladas e tensão controlada respectivamente.

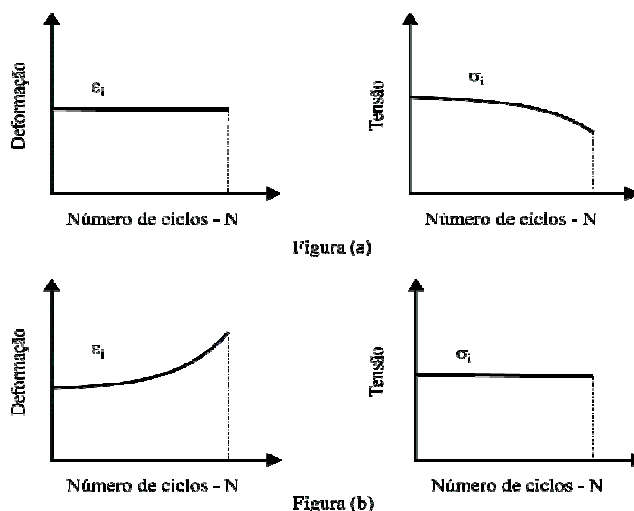


Figura 3.27 - Representação dos tipos de solicitações (Pinto, 1991).

Em quaisquer das condições de ensaio a vida de fadiga é expressa pelo número de solicitações (N), relacionado à tensão de tração (σ_i) ou a deformação inicial de tração (ϵ_i) em gráficos mono-log, empregando-se a Equação 3.16 ou Equação 3.17 para ensaios a deformação controlada ou tensão controlada, respectivamente.

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_1} \quad (3.16)$$

Onde:

N = vida de fadiga;

ε_i = deformação resiliente inicial (cm);

k_1, n_1 = parâmetros experimentais (determinados no ensaio).

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad (3.17)$$

Onde:

N = vida de fadiga;

$\Delta\sigma$ = diferença de tensão (MPa);

k_2, n_2 = parâmetros experimentais (determinados no ensaio).

Tradicionalmente o ensaio laboratorial de vida de fadiga realizado no país para definição do número de repetições de carga é feito por compressão diametral à tensão controlada (TC), sendo a carga aplicada numa frequência de 1 Hz, ou seja 60 aplacações por minuto, por meio de equipamento pneumático (Pinto, 1991; Medina & Motta, 2005). Pode-se considerar que o ensaio em compressão diametral gera um estado biaxial de tensão em um corpo-de-prova cilíndrico Marshall convencional. No decorrer do ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento completo do corpo-de-prova, como pode ser observado na Figura 3.27-b.

Embora ainda não normatizado, o ensaio de fadiga tem sido largamente realizado no país, geralmente à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas. A fadiga na camada de revestimento ocorre devido à aplicação de um carregamento solicitando dinamicamente o pavimento, despertando uma tensão de flexão (σ_f) na face inferior do revestimento

betuminoso e provocando a ruptura do mesmo após, a n-enesésima aplicação da carga, considera-se, geralmente, a carga proveniente do “eixo simples padrão” de 8,2 tf.

Para a estimativa da vida de fadiga, inicialmente é calculado o carregamento vertical a ser aplicado em função de uma percentagem da carga de ruptura, utilizando-se a Equação 3.18.

$$F_v = \frac{100 \times \pi \times D_{cp} \times h_{cp} \times \sigma_t^*}{2} \quad (3.18)$$

Onde:

F_v = Carga vertical aplicada (N);

σ_t^* = Tensão de tração, correspondente a uma percentagem da resistência à tração (MPa);

h_{cp} = Altura do corpo de prova (cm);

D_{cp} = Diâmetro do corpo de prova (cm).

As diferenças de tensões e de deformações resilientes são obtidas pela Equação 3.19 e Equação 3.20, respectivamente.

$$\Delta\sigma = \frac{8F_v}{100 \times \pi \times D_{cp} \times h_{cp}} \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_t}{MR} \quad (3.20)$$

Onde:

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

ε_i = deformação resiliente (mm);

MR = módulo resiliente (MPa).

Nesta pesquisa, o ensaio realizado para estimar a vida de fadiga consistiu na aplicação de pulsos de carga, de *forma haversine*, com frequência de 1s, sendo 0,1s correspondentes ao tempo de aplicação da carga e 0,9s correspondente ao tempo de descanso. Os carregamentos utilizados foram 30%, 40% e 50% da resistência à tração referente a cada mistura. Foram realizados ensaios à tensão controlada, cujo critério de fadiga está associado à fratura total da amostra. Em geral, a vida de fadiga (N) é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à ruptura total da amostra, em condições térmicas em torno de $25 \pm 0,5$ °C. O critério de parada utilizado, nesta pesquisa, foi a ruptura total do corpo-de-prova (Figura 3.28).

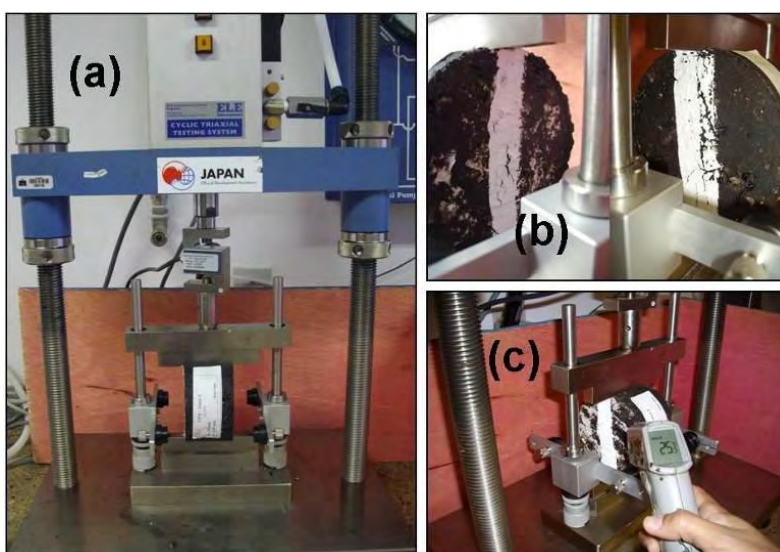


Figura 3.28 - Ensaio de fadiga em andamento

3.5.3. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os dados de atrito e textura, e os dados mecânicos de resistência à tração e módulo de resiliência levantados em para cada uma das três mistura asfáltica (AZR, DZR e BZR) consistem em observações sobre respostas de indivíduos ou objetos experimentais selecionados aleatoriamente de uma única população.

Visto que estes dados levantados apresentavam populações com “n” pequeno ($n < 30$) não seria possível determinar um intervalo de confiança baseado numa distribuição normal. Assim, foi realizada análise estatística utilizando a distribuição “t” de Student, onde foi calculado o intervalo de confiança com base na média e desvio padrão amostral pela equação

3.21 e 3.22, a seguir, a um nível de confiança de 95% ($\alpha=0,05$) por apresentar um intervalo mais restrito, pois intervalos maiores exigem uma perda de precisão.

$$X_{\min} = \bar{x} - \left(t_{\alpha,gl} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (3.21)$$

$$X_{\max} = \bar{x} + \left(t_{\alpha,gl} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (3.22)$$

Onde:

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

α = nível de significância da análise estatística;

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

n = número de determinações;

S = desvio padrão amostral;

\bar{x} = média amostral.

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

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

$$H_0 : (V)_i = (V)_j \quad (3.23)$$

$$H_1 : (V)_i \neq (V)_j \quad (3.24)$$

Onde:

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

i = Faixa de mistura: AZR, DZR e BZR;

j = Faixa de mistura: AZR, DZR e BZR

As hipóteses testadas para cada par, relativos aos valores de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência, são respectivamente:

Onde:

$$V = \begin{cases} \text{RT: valor da resistência à tração;} \\ \text{MR: valor do módulo de resiliência;} \end{cases}$$

Foram determinadas matrizes, informando o nível observado de significância (probabilidade de hipótese verdadeira) também conhecido como “p” (nível descritivo do teste) onde foram comparados para cada par de misturas asfáltica, para cada tipo de ensaios realizado em laboratório. A fim de verificar o quanto as misturas se parecem ou não. Os resultados, bem como as devidas considerações são apresentados no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

Apresentação e Análise de Resultados

4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios preliminares de laboratório de caracterização dos materiais utilizados para confecção das misturas, o agregado calcário e o CAP 50/70, realizados conforme as metodologias descritas no capítulo anterior.

Também são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados para avaliação das propriedades funcionais e mecânicas das misturas em estudo. Foram utilizados testes de hipóteses, utilizando a distribuição “*t*” de *Student* e análise de variância (ANOVA), para análise dos dados por meio de um tratamento estatístico.

4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAS

4.2.1. CARACTERÍSTICAS DO CAP

Os ensaios de caracterização do ligante asfáltico utilizado para confecção das misturas asfálticas, foram realizados no Laboratório de Engenharia Rodoviária do Ceftru – UnB, para obter parâmetros essenciais à dosagem da mistura e ao controle de qualidade desse material.

A viscosidade do ligante, por exemplo, determina as condições de preparo da mistura asfáltica e exerce grande influência sobre as propriedades da mesma. É uma propriedade física que depende da temperatura na qual se encontra o cimento asfáltico. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados da caracterização do ligante utilizado nas misturas em estudo.

Tabela 4.1 - Propriedades convencionais da amostra do CAP 50/70 utilizado neste estudo

<i>PROPRIEDADES</i>	<i>ESPECIFICAÇÃO ANP N° 19 PARA O CAP 50/70</i>	<i>VALOR OBTIDO</i>	
Penetração (100g, 5s, 25°C), 0,1 mm.	Entre 50 e 70 mm	55 mm	
Ponto de amolecimento (°C)	Mínimo 46°C	46,5 °C	
Ponto de Fulgor	Mínimo 235°C	382°C	
Ductilidade (25°C, 5 cm/min), cm.	Mínimo 60 cm	> 100 cm	
Viscosidade <i>Saybolt-Furol</i>	135°C	Mínimo 141 s	174 sSF
	150°C	Mínimo 50 s	94 sSF
	177°C	Entre 30 e 150 s	40 sSF
Viscosidade Brookfield (SP 21, 20 rpm)	135°C	Mínimo 274 cP	385 cP
	150°C	Mínimo 112 cP	165 cP
	177°C	Entre 57 e 285 cP	60 cP
Índice de Susceptibilidade térmica (IST)	-1,5 a +1,0	- 1,8	

Conforme visto no Capítulo 3, no estudo de misturas a quente, a escolha das temperaturas de mistura e de compactação é feita com base na viscosidade do ligante, que é obtida pelo viscosímetro *Saybolt-Furol* ou do Brookfield. Na Figura 4.1 apresenta-se a viscosidade *Saybolt-Furol* do CAP 50/70, comparando-a com a obtida através do viscosímetro Brookfield. Embora a unidade do valor obtido no viscosímetro *Saybolt-Furol* (sSF) seja diferente daquela obtida do Brookfield (cP), esta foi colocada em mesma escala, por meio de uma conversão de valores, para possível comparação.

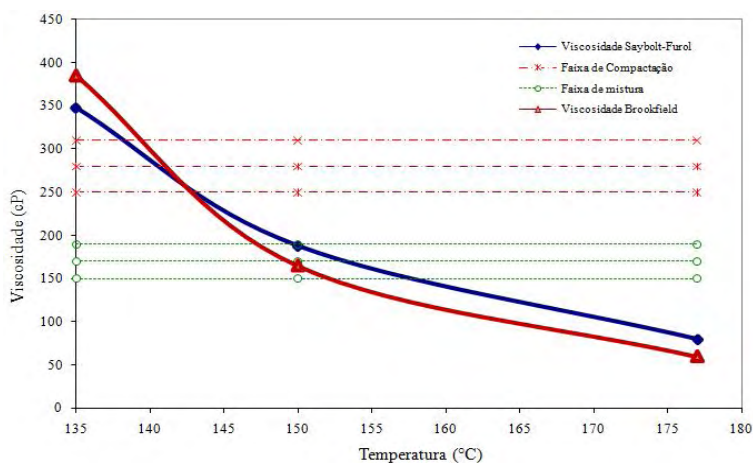


Figura 4.1 - Comparação entre as viscosidades *Saybolt-Furol* e Brookfield do CAP 50/70 na determinação da faixa de mistura e de compactação.

A temperatura do ligante pela viscosidade Saybolt-Furol para a confecção da mistura ficou entre 150°C a 158°C e a temperatura de compactação entre 139°C a 143°C. Pela viscosidade Brookfield a faixa de trabalho para compactação da mistura foi entre 140°C a 143°C e para confecção da mistura entre 148°C a 153°C. Durante a realização da confecção das misturas e da compactação dos corpos-de-prova, procurou-se trabalhar com temperaturas iguais a 150 °C para a mistura e 140°C para a compactação.

Pode-se observar na Tabela 4.1 que o *IST* da amostra é menor que o limite inferior especificado indicando que o CAP 50/70 utilizado é muito sensível a elevadas temperaturas.

4.2.2. CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MINERAL

Para uma boa avaliação da mistura asfáltica é fundamental o conhecimento dos materiais usados no seu preparo, principalmente em relação aos aspectos inerentes à durabilidade da mistura ao longo da vida de serviço do revestimento. Com relação ao agregado mineral utilizado, os ensaios preliminares de caracterização são apresentados a seguir.

Os resultados obtidos do desgaste à abrasão *Los Angeles* dos materiais utilizados foi de 24% para a Brita 1 e 23% para o pedrisco. De acordo com estes resultados todas as frações avaliadas apresentaram valores de desgaste satisfatórios, isto é, menores que o valor de 40% requerido na ES 04.05.610/02 da DIRENG para agregados graúdos empregados nas misturas destinadas a camadas de superfície de rolamento do pavimento.

Os valores do peso específico real e aparente e os da absorção de água dos agregados graúdos (brita 1 e pedrisco) foram obtidos pelo método de ensaio apresentado na norma ASTM C 127-01. Nesta metodologia a amostra é formada pelos grãos retidos na peneira de abertura 4,75 mm. No caso do pó-de-brita, empregou-se o método de ensaio DNER-ME 194/98, no qual a amostra é formada pelos grãos que passam na peneira de abertura 4,75 mm e ficam retidos na malha de abertura 0,075 mm. Este método não permite obter o valor do peso específico aparente e da absorção de água, pois é executado usando o frasco de *Chapman*, assim para o fíler o peso específico real foi determinado conforme descrito no método de ensaio DNER-ME 85/64, utilizando o Frasco “*Le Chatelier*”.

Os valores dos pesos específicos, real e aparente, e os da absorção de água dos agregados estão apresentados na Tabela 4.2 a seguir. Estes resultados foram usados para determinação do teor de projeto de ligante das misturas estudadas.

Tabela 4.2 - Resultado do peso específico real e aparente e da absorção dos materiais

PROPRIEDADE FÍSICA	UNID.	BRITA 01	PEDRISCO	PÓ-DE-PEDRA	FÍLER
<i>Peso específico real</i>	<i>g/cm³</i>	2,765	2,726	2,732	2,312
<i>Peso específico aparente</i>	<i>g/cm³</i>	2,728	2,690	-	-
<i>Absorção</i>	<i>%</i>	0,82	1,23	-	-

Com relação aos valores de absorção, estes apresentaram valores medianos, porém esperado para o tipo e origem do agregado. Esta absorção favorece a adesividade entre o CAP 50/70 e o agregado calcário, como observado por Ramos (2009).

A distribuição granulométrica de cada agregado mineral é fundamental para se obter uma mistura asfáltica com propriedades adequadas à sua finalidade. A Figura 4.2 apresenta as curvas granulométricas dos agregados brita 01, pedrisco e pó-de-brita, os quais foram usados na composição do traço juntamente com o fíler.

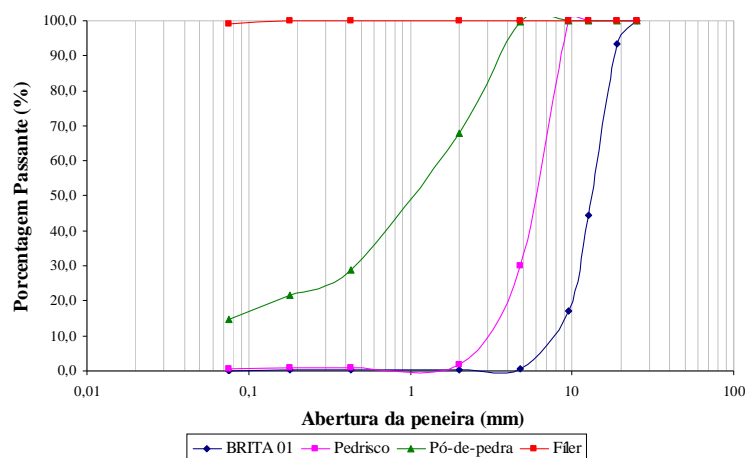


Figura 4.2 - Granulometria dos agregados

A partir da granulometria de cada um dos agregados e do fíler, foi possível chegar à composição do traço das três misturas adotadas, conforme apresentando nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.3 - Composição do traço para mistura do tipo AZR

Peneiras	Porcentagem em peso passando nas peneiras				DIRENG			
	Brita 1	Pedrisco	Pó-de-pedra	Projeto AZR	Faixa 2		Faixa de Trabalho	
Nome	%	%	%	%	% Mín	% Máx	% Mín	% Máx
1"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	93,4	100,0	100,0	95,0	76,0	98,0	95,0	95,0
1/2"	44,5	100,0	100,0	74,0	66,0	86,0	68,0	80,0
3/8"	17,0	100,0	100,0	62,0	57,0	77,0	56,0	68,0
Nº 4	0,6	30,0	99,7	45,0	40,0	60,0	39,0	51,0
Nº 10	0,2	1,7	68,0	28,0	23,0	43,0	23,0	33,0
Nº 40	0,2	0,9	28,8	13,0	9,0	22,0	9,0	17,0
Nº 80	0,2	0,9	21,5	9,0	6,0	17,0	6,0	12,0
Nº 200	0,1	0,7	14,7	4,0	3,0	6,0	2,0	6,0

Tabela 4.4 - Composição do traço para mistura do tipo DZR

Peneiras	Porcentagem em peso passando nas peneiras				DIRENG			
	Brita 1	Pedrisco	Pó-de-pedra	Projeto DZR	Faixa 2		Faixa de Trabalho	
Nome	%	%	%	%	% Mín	% Máx	% Mín	% Máx
1"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	93,4	100,0	100,0	95,0	76,0	98,0	95,0	95,0
1/2"	44,5	100,0	100,0	78,0	66,0	86,0	72,0	84,0
3/8"	17,0	100,0	100,0	67,0	57,0	77,0	61,0	73,0
Nº 4	0,6	30,0	99,7	50,0	40,0	60,0	44,0	56,0
Nº 10	0,2	1,7	68,0	33,0	23,0	43,0	28,0	38,0
Nº 40	0,2	0,9	28,8	16,0	9,0	22,0	12,0	20,0
Nº 80	0,2	0,9	21,5	12,0	6,0	17,0	9,0	15,0
Nº 200	0,1	0,7	14,7	5,0	3,0	6,0	3,0	7,0

Tabela 4.5 - Composição do traço para mistura do tipo BZR

Peneiras	Porcentagem em peso passando nas peneiras				DIRENG			
	Brita 1	Pedrisco	Pó-de-pedra	Projeto BZR	Faixa 2		Faixa de Trabalho	
Nome	%	%	%	%	% Mín	% Máx	% Mín	% Máx
1"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	93,4	100,0	100,0	95,0	76,0	98,0	95,0	95,0
1/2"	44,5	100,0	100,0	81,0	66,0	86,0	75,0	87,0
3/8"	17,0	100,0	100,0	70,0	57,0	77,0	64,0	76,0
Nº 4	0,6	30,0	99,7	55,0	40,0	60,0	49,0	61,0
Nº 10	0,2	1,7	68,0	38,0	23,0	43,0	33,0	43,0
Nº 40	0,2	0,9	28,8	19,0	9,0	22,0	15,0	23,0
Nº 80	0,2	0,9	21,5	15,0	6,0	17,0	12,0	18,0
Nº 200	0,1	0,7	14,7	6,0	3,0	6,0	4,0	8,0

Essa composição de traço permitiu o enquadramento das misturas de agregados minerais e fíler na Faixa 2 da especificação de serviço DIRENG-ES 04.05.610/02. Uma acima da zona de restrição (curva AZR), uma segunda com grãos passando dentro zona de restrição (curva DZR) e uma terceira com grãos passando abaixo da zona de restrição (curva BZR), conforme apresentado graficamente na Figura 4.3.

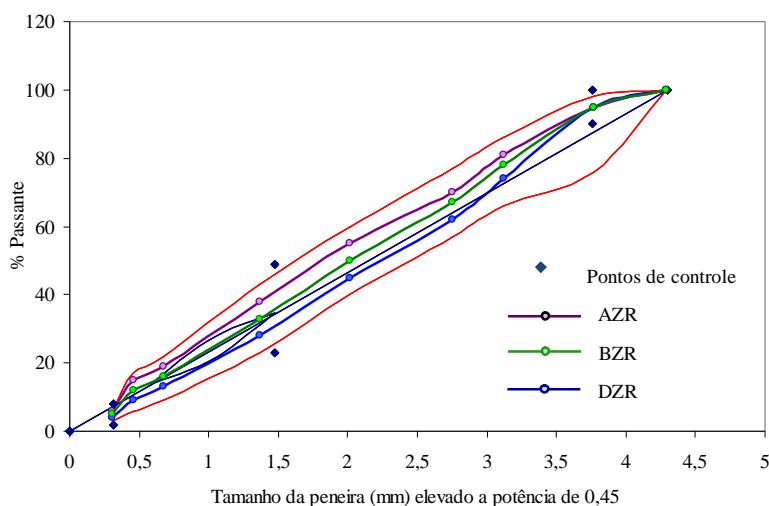


Figura 4.3 - Distribuições granulométrica adotadas

Com relação à quantidade de material pulverulento, foi encontrado um percentual de 18,2% em peso de pó calcário na fração pó-de-brita. A porcentagem de material passando na peneira n° 200 é de aproximadamente 15%. Essa diferença ocorre em razão de eventuais perdas de material pulverulento ocorridas no ensaio de granulometria (DNER-ME 083/98).

Devido ao alto teor de material pulverulento no material pó-de-pedra surgiu a necessidade de realização do ensaio de equivalente de areia (DNER-ME 054/97), especificado para avaliar a contaminação dos granulares por finos. Tal parâmetro expressa o valor da relação entre a altura de agregados e a altura de finos em suspensão numa solução, multiplicado por 100. Assim, quanto maior a altura de finos em suspensão, menor o valor do equivalente de areia e, portanto, mais contaminado o agregado.

A especificação de serviço para obras aeroportuárias, ES 04.05.610/2002, fixa um equivalente de areia igual ou superior a 35% para os materiais miúdos. Para a fração pó-de-brita utilizada nesta pesquisa obteve-se um equivalente de areia igual a 66%, portanto, satisfatório.

Quanto aos ensaios de índice de forma, os resultados obtidos e fornecidos pelo Laboratório de

Solos do DER-DF para o agregado brita 1 e o agregado pedrisco, foram de 0,3 e 0,4 respectivamente. Estes valores estão abaixo do valor de 0,6 recomendando pela ES 04.05.610/02 da DIRENG. Ainda assim, a utilização desses agregados para compor as misturas asfálticas foi adotada, visto a larga utilização desses materiais na pavimentação da região do Distrito Federal.

Com respeito à adesividade ao ligante betuminoso, o método contido na norma DNER-ME 078/1994 permitiu avaliar qualitativamente essa propriedade dos agregados graúdos. Do ponto de vista da adesividade ativa, o agregado calcário tem boa atividade química com os cimentos asfálticos de petróleo devido à sua natureza eletropositiva. Por isso, observa-se um rápido e fácil envolvimento do grão por essa modalidade de ligante no preparo de misturas a quente.

Com relação a adesividade passiva, que diz respeito à resistência ao deslocamento do filme de ligante apresentada pela superfície dos agregados já envolvidos, a baixa porosidade do agregado calcário pode vir a prejudicá-la.

O agregado calcário utilizado apresentou uma adesividade satisfatória, isto é, não se verificou descolamento da película de ligante ao final de 72 horas de imersão da amostra em água na temperatura de 40 °C (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Adesividade do agregado calcário ao ligante betuminoso

4.3. AVALIAÇÃO FUNCIONAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A caracterização funcional das misturas asfálticas em estudo foi realizada em placas cuja compactação foi feita por meio de um rolo monocilíndrico manual confeccionado no laboratório de engenharia rodoviária (LER). A mistura foi feita em uma misturadora mecânica com capacidade de 20 kg de material, em cada operação. Para se chegar à densidade aparente

(d_a) desejada, obtida na compactação Marshall, era necessário para cada tipo de mistura aproximadamente 31 kg de material conforme detalhado a Tabela 4.6.


Tabela 4.6 - Parâmetros previstos para as placas compactadas com rolo monocilindro

<i>MISTURA</i>	d_a (g/cm ³)	V_{placa} (cm ³)	<i>Massa requerida</i> (g)
<i>AZR</i>	2,457	12500	30713
<i>DZR</i>	2,477	12500	30963
<i>BZR</i>	2,463	12500	30775

Durante a execução das placas, observou-se que o rolo compactador possuía algumas limitações, cuja principal era referente ao seu peso (200 kg), além disso, a dimensão da placa (50 x 50 cm) foi dada como pequena com relação ao comprimento do rolo (70 cm). Estas falhas não prejudicaram a continuação do trabalho, visto que os corpos-de-prova retirados do centro da placa atingiram uma melhor compactação, fornecendo corpos-de-prova com índice de vazios menores, do que aqueles que se posicionavam nas extremidades da placa.

Considerando as limitações de materiais, apenas uma placa por condição experimental foi compactada, totalizando três placas, uma para cada faixa granulométrica para os ensaios de medidas de atrito e textura. A Tabela 4.7 apresenta os valores reais das placas compactadas e ensaiadas, com volume de vazios médio geral das três placas de 6,1%. O grau de compactação (G.C), calculado pela relação entre a massa utilizada e a massa requerida para o mesmo volume, foi em média de 97,4% considerando as três placas.

Tabela 4.7 - Parâmetros obtidos para as placas compactadas e ensaiadas neste estudo

<i>Posicionamento dos corpos-de-prova retirados das placas</i>	<i>MISTURA</i>	d_a médio (g/cm ³)	V_{placa} (cm ³)	<i>Massa utilizada</i> (g)	<i>G.C.</i> (%)
	<i>AZR</i>	2,388	12500	29850	97,2
	<i>DZR</i>	2,428	12500	30232	97,6
	<i>BZR</i>	2,421	12500	29950	97,3

4.3.1. AVALIAÇÃO DAS PLACAS

Para validar as placas estudadas, foi realizada uma análise estatística do parâmetro de volume de vazios dos CPs retirados das placas. Os corpos-de-prova foram divididos em quatro grupos de cores (vermelho, verde, laranja e lilás) de acordo com o seu posicionamento na placa, e a direção de passagem do rolo, conforme ilustrado na primeira coluna das Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10. O grupo vermelho é composto pelos quatro CPs nos cantos da placa (1, 4, 13 e 16); o grupo verde pelos CPs 5, 8, 9 e 12, nos bordos esquerdo e direito em relação à direção de compactação; o grupo laranja pelos CPs 2, 3, 14 e 15, nos bordos superior e inferior da placa; e o grupo lilás pelos quatro CPs centrais (6, 7, 10 e 11). Com finalidade de verificar se os valores faziam parte da mesma população, além dos desvios de amostragem, foi utilizada a distribuição “*t*” de *Student*, com nível de confiança de 95%. Diante dos valores médios encontrados estes foram combinados em pares de grupos, na expectativa de verificação do nível de significância, ou seja, verificar o quanto os resultados de um grupo se aproximam de outra pelo método ANOVA-Fator único, e assim mostrar o quanto a compactação das placas estava homogênea. Os resultados para as placas AZR, DZR e BZR são apresentados nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, respectivamente. Na primeira coluna observa-se a disposição dos CPs e seus valores individuais de volume de vazios (V_v). Na segunda coluna das tabelas, são informados o volume de vazios médio (\bar{x}) e o desvio padrão (s) de cada grupo amostral. O nível observado de significância “*p*”, obtido na análise para cada um dos pares de grupos, é mostrado em forma de matriz nas três últimas linhas e colunas.

A placa com a mistura AZR foi a primeira a ser compactada. Os resultados para esta placa, apresentados na Tabela 4.8, foram os que apresentaram uma maior homogeneidade entre os grupos, porém nesta placa encontram-se também os valores mais elevados de volume de vazios com uma média geral de 6,7%. O grupo central de CPs é o que apresentou uma melhor compactação, embora apenas marginalmente melhor que os outros grupos. Além da falta de experiência inicial com o processo de compactação, estes resultados podem ter sido influenciados pela maior quantidade de finos na mistura AZR, com possível segregação.

Para a placa com a mistura DZR, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.9, o volume de vazios médio foi $V_v=5,9\%$. Novamente a melhor compactação foi alcançada na parte central da placa para o grupo lilás, o qual apresentou grande similaridade ($p=96,6\%$) com o grupo na laranja, nas colunas centrais e na mesma direção do rolo compactador.

A placa com a mistura BZR (Tabela 4.10) apresentou um volume de vazios médio de 5,6%, o mais baixo entre as placas ensaiadas. O grupo lilás de CPs centrais é o que apresenta a melhor compactação, com um volume de vazios médio de 4,7%. Este grupo apresenta alguma semelhança ($p=34,5\%$) com o grupo laranja de CPs nos bordos superior e inferior da placa. O grupo vermelho de CPs nos cantos da placa é o que apresenta a pior compactação, com V_v médio de 6,3%. Este grupo tem alguma semelhança ($p=43\%$) com o grupo verde de CPs nos lados esquerdo e direito da placa.

Tabela 4.8 - Níveis de significância (p%) de valores de %Vv dos CPs retirado da placa AZR

% Vv e distribuição dos CP na placa AZR	Grupos	Vermelho	Verde	Laranja
	Vermelho $x = 6,5\%$ $s = 0,05\%$			
	Verde $x = 6,8\%$ $s = 0,9\%$	5,5%		
	Laranja $x = 6,9\%$ $s = 0,3\%$	62,9%	71,9%	
	Lilás $x = 6,4\%$ $s = 0,2\%$	57,2%	4,8%	55,9%

Tabela 4.9 - Níveis de significância (p%) de valores de %Vv dos CPs retirado da placa DZR

% Vv e distribuição dos CP na placa DZR	Grupos	Vermelho	Verde	Laranja
	Vermelho $x = 6,3\%$ $s = 0,3\%$			
	Verde $x = 5,6\%$ $s = 0,4\%$	12,8%		
	Laranja $x = 5,9\%$ $s = 0,1\%$	2,3%	15,0%	
	Lilás $x = 5,6\%$ $s = 0,3\%$	1,7%	11,7%	96,6%

Tabela 4.10 - Níveis de significância (p%) de valores de % Vv dos CPs retirado da placa BZR


% Vv e distribuição dos CP na placa BZR		Grupos	Vermelho	Verde	Laranja				
	6,4%	4,3%	6,4%	6,6%	Vermelho $x = 6,3\%$ $s = 0,3\%$				
	4,7%	4,1%	5,3%	6,3%		Verde $x = 5,7\%$ $s = 1,0\%$	43,0%		
	5,1%	4,2%	5,3%	6,9%					
	5,9%	4,8%	5,7%	5,5%		Laranja $x = 5,3\%$ $s = 0,9\%$	14,7%	54,8%	
				Lilás $x = 4,7\%$ $s = 0,7\%$	1,6%				14,7%

De uma forma geral, os resultados mostram que o processo de compactação foi mais eficiente na faixa central da placa. Os corpos de prova nos cantos apresentaram os valores mais elevados de Vv e devem ser descartados ou analisados com cuidado para utilização em ensaios mecânicos. Porém, acredita-se que o grau de compactação médio atingido, da ordem de 97,4%, não invalida os ensaios de mancha de areia, drenabilidade e atrito, os quais em geral envolveram a região central das placas.

4.3.2. AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA

Os valores da macrotextura obtidos por meio do ensaio de mancha de areia foram avaliados para as três misturas (AZR, DZR e BZR) com finalidade de verificar se as mesmas conduziram a revestimentos que atendam às características desejadas de textura (Tabela 4.11). Para cada placa foram feitos ensaios de mancha de areia em quatro pontos, conforme indicado na foto na primeira coluna da tabela.

Tabela 4.11 - Medidas da altura da mancha de areia; média e desvio padrão amostral

<i>Posição dos ensaios</i>	<i>HS (mm)</i>			
	<i>Mistura</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
	Ponto 1	1,12	0,89	1,09
	Ponto 2	1,36	1,27	1,04
	Ponto 3	1,19	1,12	1,00
	Ponto 4	1,45	1,15	0,96
	Soma	5,12	4,43	4,09
	Média	1,28	1,11	1,02
	Desvio padrão	0,152	0,159	0,056
	Nº de pontos (n)	4	4	4

Com finalidade de verificar se os valores faziam parte da mesma população, além dos desvios de amostragem, foi utilizada a distribuição “*t*” de *Student*, com nível de confiança de 95%. A Tabela 4.12 mostra os valores obtidos com intervalo de confiança com base na média e desvio padrão amostrais, para a distribuição “*t*” de *Student*.

Tabela 4.12 - Distribuição “*t*” de *Student* para valores da mancha de areia obtidos nas placas

<i>Mistura</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>	
Média amostral	1,28	1,11	1,02	
Desvio padrão amostral	0,15	0,16	0,06	
Graus de liberdade	3	3	3	
Nível de Significância	95%	95%	95%	
<i>t</i> (Student)	2,353	2,353	2,353	
Intervalo de confiança	\bar{X} mínimo	1,10	0,92	0,96
	\bar{X} máximo	1,46	1,29	1,09

Observa-se que para a mistura DZR o valor de 0,89 mm referente ao ponto 1 está fora do intervalo de confiança determinado por meio da distribuição “*t*” de *Student*. Este ponto foi excluído, e uma nova distribuição realizada, e uma nova média determinada.

Os resultados apresentados na Tabela 4.13 mostram que os valores levantados, com exceção do valor do ponto 1 da mistura DZR, pertencem à mesma população, podendo então ser utilizados nas demais análises estatísticas que forem necessárias.

Tabela 4.13 - Valores médios e possível classificação da macrotextura das placas em estudo

MISTURA	AZR	DZR	BZR
HS média (mm)	1,28	1,18	1,02
s (Desvio padrão)	0,152	0,159	0,056
Classificação (Aps, 2006)	Muito Grosseira ou Muita Aberta	Grosseira ou Aberta	Grosseira ou Aberta

Verifica-se que a macrotextura das misturas DZR e BZR têm comportamento semelhante, enquadrada como “grosseira ou aberta”, diferentemente da mistura AZR que apresentaram macrotextura “muito grosseira ou muito aberta”.

Diante desta semelhança encontrada, os valores médios da macrotextura foram combinados em pares, na expectativa de verificação do nível de significância, ou seja, verificar o quanto os resultados de uma mistura se aproximam de outra pelo método ANOVA-Fator único. O resumo dos resultados é apresentado Tabela 4.14 em forma de matriz, informando o nível observado de significância “p”, obtido na análise para cada um dos pares encontrados.

Tabela 4.14 - Níveis de significância (p%) de valores de macrotextura das placas em estudo

MISTURA	AZR	DZR	BZR
AZR			
DZR	2,13%		
BZR	1,89%	2,63%	

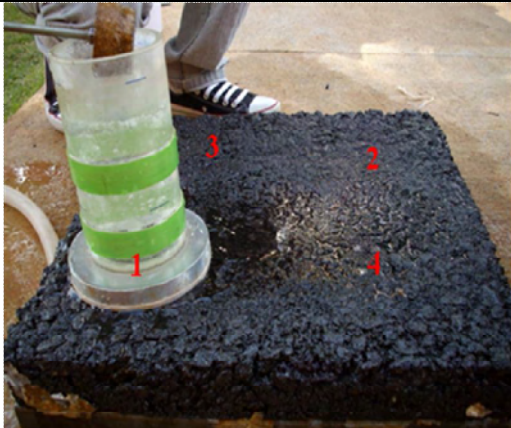
Embora as misturas DZR e BZR apresentassem comportamento semelhante no que diz respeito à classificação da macrotextura, enquadrada como “grosseira ou aberta”, a relação entre as combinações de pares de misturas apresentou baixos níveis de significância.

4.3.3. AVALIAÇÃO DA DRENABILIDADE

Como medida indireta da macrotextura, os valores obtidos por meio da drenabilidade também foram avaliados para cada mistura com finalidade de verificar se as mesmas conduzem a revestimentos que atendam às características desejadas de drenabilidade para as pistas de pouso e decolagem dos aeroportos do país. A Tabela 4.15 mostra valores da média amostral da drenabilidade em termo de vazão em litros/segundo. Para cada placa também foram feitos

ensaios de drenabilidade em quatro pontos, conforme indicado na foto na primeira coluna da tabela.

Tabela 4.15 - Medidas da vazão (l/s) nos quatros pontos ensaiados; média e desvio padrão amostral da drenabilidade

<i>Posição dos ensaios</i>	DRENABILIDADE - VAZÃO (l/s)			
	<i>Mistura</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
	Ponto 1	0,091	0,038	0,140
	Ponto 2	0,095	0,088	0,101
	Ponto 3	0,049	0,056	0,097
	Ponto 4	0,076	0,059	0,132
	Soma	0,31	0,24	0,47
	Média	0,078	0,060	0,118
	Desvio padrão	0,021	0,021	0,022
	Nº de pontos (n)	4	4	4

Assim como foi feito para a mancha de areia, foi verificado se os valores da drenabilidade, para cada mistura, faziam parte da mesma população, além dos desvios de amostragem, novamente os dados foram analisados por meio da distribuição “t” de Student, com nível de confiança de 95%. A Tabela 4.16 mostra os valores obtidos como intervalo de confiança com base na média e desvio padrão amostral, para a distribuição “t” de Student.

Tabela 4.16 - Distribuição “t” de Student para valores da drenabilidade das placas deste estudo

<i>Mistura</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
Média amostral	0,078	0,060	0,118
Desvio padrão amostral	0,021	0,021	0,022
Graus de liberdade	3	3	3
Nível de Significância	95%	95%	95%
t (Student)	2,353	2,353	2,353
Intervalo de confiança	<i>X</i> mínimo	0,053	0,036
	<i>X</i> máximo	0,102	0,085

Observa-se que para todas as três misturas os valores referentes aos quatro pontos estão dentro do intervalo de confiança determinado por meio da distribuição “t” de Student. Os resultados apresentados na Tabela 4.17 mostram que os quatros valores levantados para cada

mistura isolada, pertencem à mesma população, logo a média e o desvio padrão são as mesmas que aquelas determinadas no meio amostral.

Tabela 4.17 - Valores médios da vazão da água (l/s) pelos canais da mistura


<i>MISTURA</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
<i>Vazão (l/s)</i>	0,078	0,060	0,118
<i>s (Desvio padrão)</i>	0,021	0,021	0,022

Devido às misturas apresentarem texturas muito grossas (abertas), as correlações entre o ensaio de mancha de areia e o de drenabilidade para as misturas AZR e BZR não foram válidas, embora para a mistura DZR essa correlação tenha sido mais significativa.

4.3.4. AVALIAÇÃO DA MICROTEXTURA

De maneira semelhante à macrotextura e à drenabilidade para as três misturas estudadas foram avaliados os resultados da microtextura obtidos por meio do ensaio pêndulo britânico com finalidade de verificar se as mesmas conduzem a revestimentos que atendem às características desejadas de atrito. Na Tabela 4.18 são mostrados os valores médios amostral de BPN adquiridos para cada mistura, assim como a classificação das mesmas, segundo a classificação de microtextura proposta pela ABPv (1999).

Tabela 4.18 - Média e desvio padrão amostral da microtextura (em BPN)

<i>Posição dos ensaios</i>	<i>Valor BPN</i>			
	<i>Mistura</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
	Ponto 1	68	80	90
	Ponto 2	75	78	95
	Ponto 3	64	85	94
	Ponto 4	70	74	95
	<i>Soma</i>	277	317	374
	<i>Média</i>	69	79	94
	<i>Desvio padrão</i>	5	5	2
	Nº de pontos (n)	4	4	4

A Tabela 4.19 mostra os valores obtidos como intervalo de confiança com base na média e desvio padrão amostral, para a distribuição “*t*” de *Student*.

Tabela 4.19 - Distribuição “*t*” de *Student* para valores de pêndulo britânico

<i>Mistura</i>		AZR	DZR	BZR
<i>Média amostral</i>		69	79	94
<i>Desvio padrão amostral</i>		5	5	2
<i>Graus de liberdade</i>		3	3	3
<i>Nível de Significância</i>		95%	95%	95%
<i>t (Student)</i>		2,353	2,353	2,353
<i>Intervalo de confiança</i>	<i>X mínimo</i>	64	74	91
	<i>X máximo</i>	75	85	96

Os resultados apresentados na Tabela 4.20 mostram que os valores levantados pertencem à mesma população, podendo então ser utilizados nas demais análises estatísticas que forem necessárias.

Tabela 4.20 - Valores médios da microtextura medida com o pêndulo britânico

<i>MISTURA</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
<i>BPN</i>	69	79	94
<i>s (Desvio padrão)</i>	5	5	2
<i>Classificação</i>	Rugosa	Muito Rugosa	Muito Rugosa

Verifica-se novamente as misturas DZR e BZR têm comportamento semelhante também quanto à microtextura, enquadrada como “muito rugosa” na classificação proposta pela ABPv (1999), diferentemente da mistura AZR que apresentaram microtextura “rugosa”.

Diante desta semelhança encontrada, os valores médios da microtextura foram combinados em pares, na expectativa de verificação do nível de significância, ou seja, verificar o quanto os resultados de uma mistura se aproximam da outra pelo método ANOVA-Fator único. O resumo dos resultados é apresentado Tabela 4.21 em forma de matriz, informando o nível observado de significância “*p*”, obtido na análise para cada um dos pares encontrados.

Tabela 4.21 - Níveis de Significância (*p*%) de valores de microtextura

<i>MISTURA</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
<i>AZR</i>			
<i>DZR</i>	2,13%		
<i>BZR</i>	0,01%	0,15%	

Assim como na avaliação da macrotextura, embora as misturas DZR e BZR possuíssem a mesma classificação da microtextura, enquadrada como “muito rugosa”, a relação entre as combinações de pares de misturas apresentou baixos níveis de significância.

4.3.5. ATRITO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Após determinação dos parâmetros de textura e atrito da superfície das placas asfálticas, procedeu-se ao cálculo das constantes de velocidade S_p e do Número de Atrito F_{60} para as misturas asfálticas analisada, AZR, DZR e BZR (Tabela 4.22).

Tabela 4.22 - Valores de S_p e de F_{60} para as misturas analisadas

<i>MISTURA</i>	<i>HS médio (mm)</i>	<i>BPN médio</i>	<i>S_p</i>	<i>FR₆₀</i>	<i>F₆₀</i>
AZR	1,28	69	133,81	47,49	0,44
DZR	1,18	79	122,45	52,52	0,48
BZR	1,02	94	104,27	58,19	0,52

Definidos então, S_p e F_{60} , pode-se finalmente calcular o IFI de cada misturas a qualquer velocidade de passeio S , por meio Equação 3.14, descrita no capítulo anterior.

A partir dos valores calculados e visando conhecer o comportamento do atrito para diferentes velocidades, foi determinado o IFI para cada mistura avaliada, sendo o gráfico apresentado na Figura 4.5, a seguir. Pode-se observar que a condição de atrito para as três misturas se assemelha a altas velocidades.

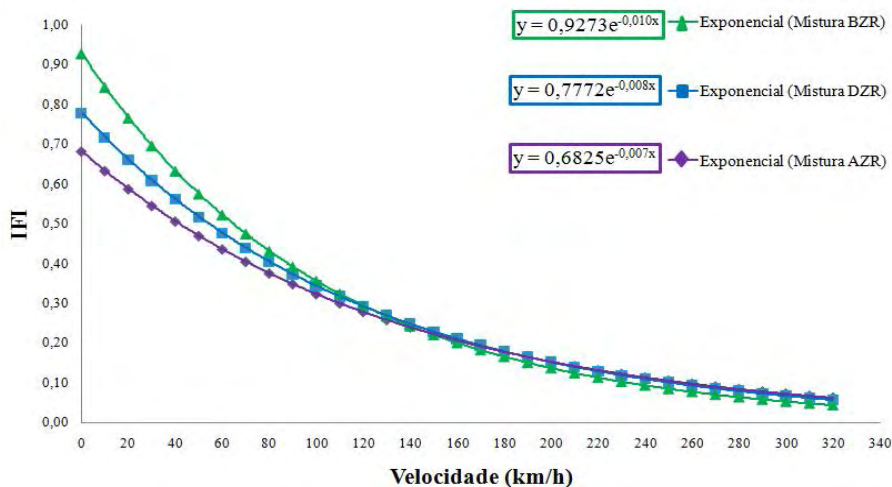


Figura 4.5 - Comportamento do atrito global das misturas estudadas para diversas velocidades

De acordo com o DAC o valor mínimo admissível para o atrito médio é de 0,50 medido com o aparelho MuMeter a uma velocidade de 65 km/h.

Ao observar os valores do IFI para esta velocidade de 65 km/h, as misturas asfálticas apresentariam os valores de 0,42 para a mistura AZR, 0,46 para a mistura DZR e 0,50 para a mistura BZR. Mostrando que para o índice de atrito mínimo requerido pelo DAC, só uma mistura estaria dentro do limite mínimo. Porém, vale ressaltar que as medidas de macrotextura e microtextura foram realizadas por meio dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico, respectivamente.

De um modo geral, analisando este comportamento, pode-se observar que mesmo em condições de precipitação, uma vez que a grande maioria dos acidentes e incidentes em pista ocorrem durante as manobras de pouso em dias de chuva, as misturas asfálticas originadas da Faixa 2 do DIRENG proporcionaram bons resultados no que diz respeito as características de drenabilidade e atrito, mostrando-se adequadas à boa aderência pneu-pavimento. Entretanto, a mistura BZR, cuja curva granulométrica passa abaixo da zona de restrição da metodologia Superpave, foi a que apresentou melhores resultados.

4.4. AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

No presente trabalho, o comportamento mecânico das misturas asfálticas foi avaliado por meio dos ensaios de resistência à tração estática por compressão diametral, módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral a tensão controlada.

Assim como foi realizado na análise funcional, na análise mecânica, foram utilizados testes de hipóteses, utilizando a distribuição “*t*” de Student e análise de variância (ANOVA), envolvendo comparações entre as grandezas levantadas durante a pesquisa, para validar os dados obtidos por meio dos ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência.

Para os ensaios dinâmicos de carregamento cíclico, módulo de resiliência e fadiga, utilizou-se uma prensa do tipo Universal Testing Machine (UTM), fabricada pela IPC Global, com capacidade de 12 kN. O sistema apresenta interface computacional, com *software* para controle do ensaio e aquisição de dados, capacidade para variação nos tipos de pulsos de cargas, na frequência de aplicação destes e nas condições de confinamento. Na Figura 4.6

visualiza-se o equipamento do LER-Ceftru-UnB, utilizado para caracterização mecânica das misturas asfálticas e algumas de suas partes constituintes.

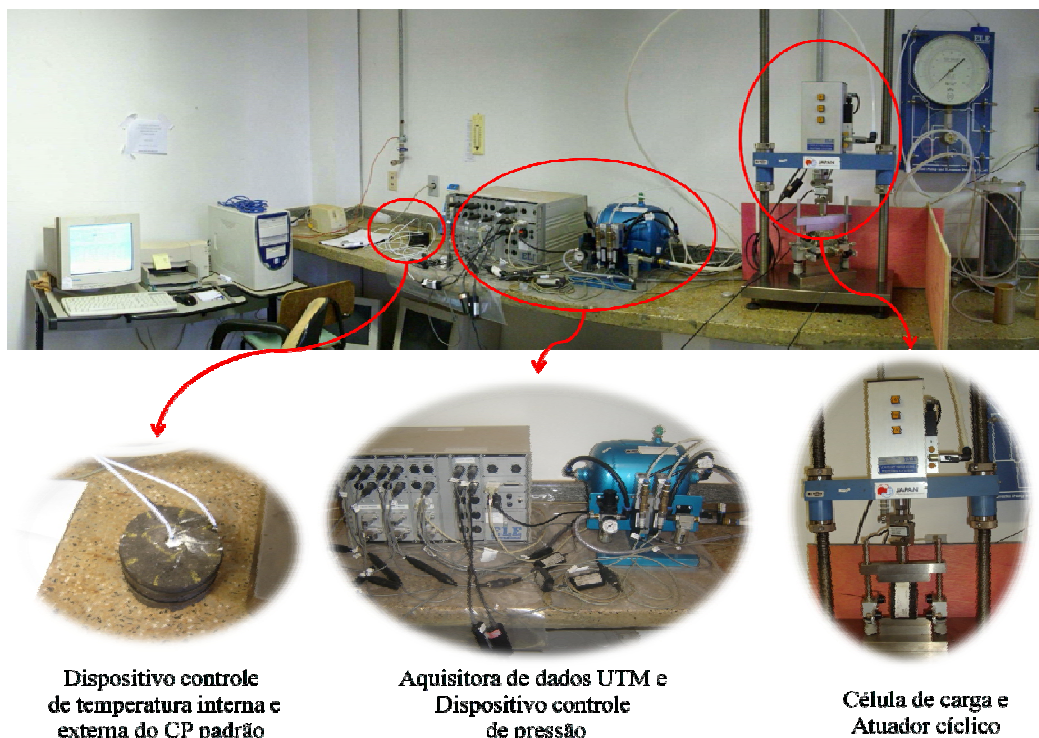


Figura 4.6 - Equipamento de carregamento cíclico e suas partes constituintes

4.4.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO


O ensaio de resistência à tração por compressão diametral estática foi conduzido para estimativa aproximada da tensão máxima de ruptura das misturas, além de estimar as tensões que poderiam ser utilizadas nos ensaios de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral dinâmica.

Uma vez que esse ensaio teve finalidade auxiliar na presente pesquisa e considerando-se as limitações de tempo e de materiais, apenas três corpos-de-prova por condição experimental foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral estática.

A média amostral destes corpos-de-prova é o resultado de resistência à tração de cada mistura estudada (RT, em MPa). Os resultados foram calculados de acordo com o método de ensaio DNER-ME 138/94, a partir da carga de ruptura (F, em N), do diâmetro do corpo-de-prova

(D_{cp} , em cm) e da altura (h_{cp} , em cm), utilizando a Equação 3.15, conforme descrito no Capítulo 3, e apresentados na Tabela 4.23 a seguir.

Tabela 4.23 - Média e desvio padrão amostral da resistência à tração

<i>Detalhe do ensaio</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>			
	<i>Mistura</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
	CP 1	0,80	0,81	1,12
	CP 2	0,87	0,88	1,09
	CP 3	0,80	0,92	1,10
	Soma	2,43	2,61	3,31
	Média	0,83	0,87	1,10
	Desvio padrão	0,040	0,055	0,017
	Nº de pontos (n)	3	3	3

Para validar a avaliação mecânica com relação aos valores da resistência à tração, a distribuição “*t*” de *Student* foi utilizada com finalidade de verificar se os valores faziam parte da mesma população, além dos desvios de amostragem. Com nível de confiança de 95%. A Tabela 4.24 mostra os valores obtidos como intervalo de confiança com base na média e desvio padrão amostral, para a distribuição “*t*” de *Student*.

Tabela 4.24 - Distribuição “*t*” de *Student* para valores de resistência à tração

<i>Mistura</i>	AZR	DZR	BZR
Média amostral	0,83	0,87	1,10
Desvio padrão amostral	0,040	0,055	0,017
Graus de liberdade	2	2	2
Nível de Significância	95%	95%	95%
<i>t</i> (Student)	2,920	2,920	2,920
$X_{\text{mínimo}}$	0,76	0,78	1,07
$X_{\text{máximo}}$	0,89	0,96	1,13

Observa-se que para todas as misturas os valores estão dentro do seu intervalo de confiança determinado por meio da distribuição “*t*” de *Student*. Os resultados apresentados na Tabela 4.21 mostram que os valores levantados, pertencem à mesma população, podendo então ser utilizados nas demais análises estatísticas que forem necessárias, conforme mostrado na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 - Valores médios da resistência à tração das misturas

<i>MISTURA</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
<i>RT médio (MPa)</i>	0,83	0,87	1,10
<i>s (Desvio padrão)</i>	0,040	0,055	0,017

Os valores médios foram combinados em pares, na expectativa de verificação do nível de significância, ou seja, verificar o quanto os resultados de uma mistura se aproximam de outra pelo método ANOVA-Fator único. O resumo dos resultados é apresentado Tabela 4.26 em forma de matriz, informando o nível observado de significância “p”, obtido na análise para cada um dos pares encontrados.

Tabela 4.26 - Níveis de significância (p%) de valores de resistência à tração

<i>MISTURA</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
<i>AZR</i>			
<i>DZR</i>	31,71%		
<i>BZR</i>	0,04%	0,22%	

Por possuírem valores próximos, a relação entre as combinações de pares das misturas AZR e DZR apresentaram Níveis de Significância consideráveis.

Em busca de uma resposta mais plausível para esta semelhança entre os valores de resistência à tração entre as duas misturas AZR e DZR, foram cerrados corpos-de-prova no sentido diametral para verificar a distribuição dos agregados destas misturas a partir da compactação Marshall. O resultado desta análise visual foi uma grande semelhança na distribuição granulométrica. A Figura 4.7-a, 4.7-b e 4.7-c mostra os corpos-de-prova das misturas AZR, DZR e BZR respectivamente.

Vale ressaltar também que o teor de projeto de ligante para as duas misturas foram bem próximos (4,8% de CAP para a mistura AZR e 4,7% de CAP para a mistura DZR).

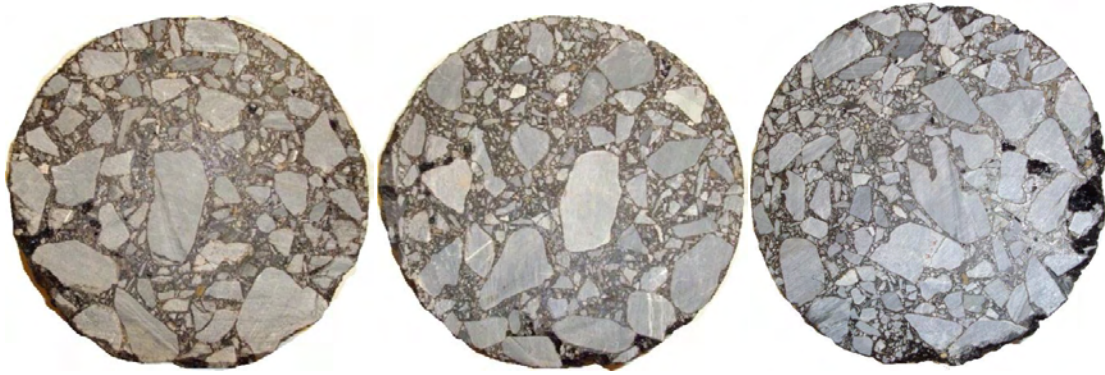


Figura 4.7 - Análise visual da distribuição granulométrica das misturas AZR, DZR e BZR, respectivamente .

Os resultados dos valores médios da resistência à tração foram lançados em gráfico em função do teor de ligante asfáltico empregado na mistura e podem ser observados na Figura 4.8, para agregados com distribuições granulométricas correspondentes as curvas BZR, DZR e AZR, respectivamente. Os mesmo indicaram maior resistência à tração na mistura do tipo BZR. Vale ressaltar que a metodologia de especificação da granulometria da Superpave recomenda que as misturas asfálticas possuam granulometria abaixo da zona de restrição.

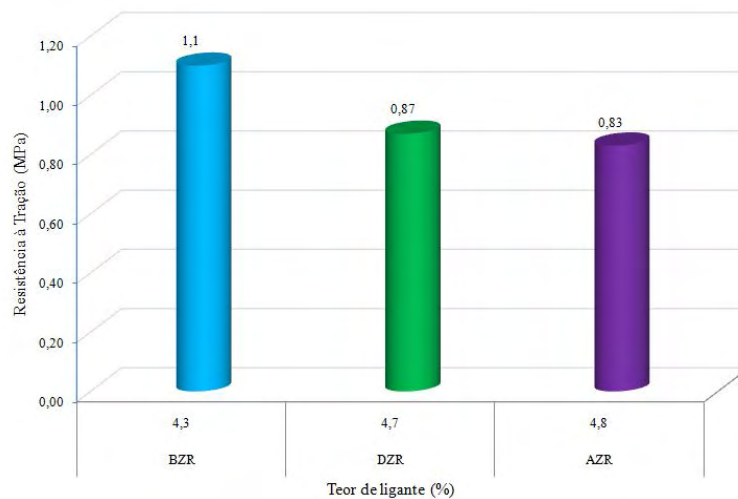


Figura 4.8 - Valores de resistência à tração (MPa) das misturas ensaiadas nesta pesquisa

4.4.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Como introduzido no Capítulo 3, para o presente estudo, o MR foi determinado em corpos-de-prova moldados em laboratório, a 25°C, e o resultado foi obtido da deformação instantânea. As tensões cíclicas máximas empregadas nos ensaios de RT atingiram entre 15 e

25%, a depender da mistura, devido a sensibilidade dos LVDTs (0,006 mm) do equipamento de compressão diametral do LER-Ceftru-UnB.

Para todas as misturas foi utilizada uma carga de 1200 N, carga esta que em nenhum caso ultrapassou o limite de 25% da resistência à tração. A norma brasileira limita esse percentual em 30%, enquanto a norma americana recomenda que a deformação vertical total acumulada não ultrapasse 0,025 mm, recomendando que a mesma varie entre 10 e 50% do valor de RT, a depender da temperatura de ensaio. Os resultados obtidos para as três misturas analisadas encontram-se resumidos na Tabela 4.27. Estes valores apresentados são a média aritmética de três a quatro CPs a depender da mistura e da variação dos valores dentro do intervalo determinado pela distribuição “*t*” de Student.

Tabela 4.27 - Valores médios dos módulos de resiliência das misturas deste estudo

MISTURA	AZR	DZR	BZR
MR médio (MPa)	5574	4909	6502
s (Desvio padrão)	377	198	364

Esses valores podem ser visualizados na Figura 4.9. Vale ressaltar que os maiores valores apresentados foram os para as misturas do tipo BZR, corroborando os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração.

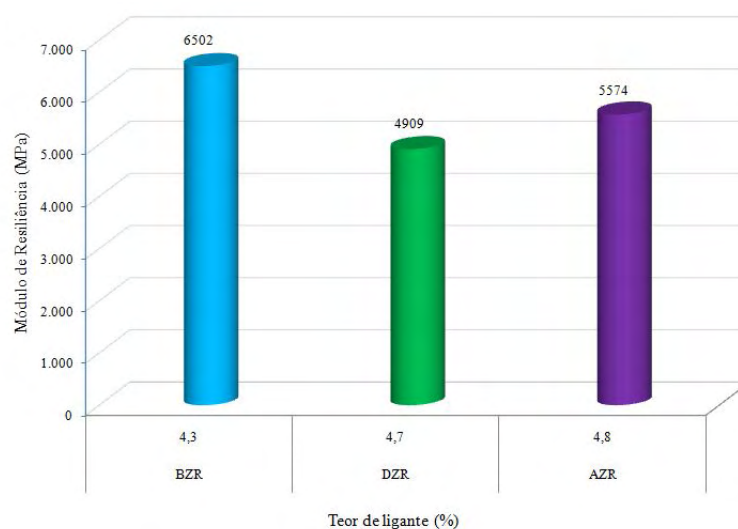


Figura 4.9 - Resultados dos ensaios de módulo de resiliência com os respectivos teores de projeto de cada mistura

Da mesma forma que os resultados de RT, os valores médios de MR foram combinados em pares, na expectativa de verificação do nível de significância, ou seja, verificar o quanto os resultados de uma mistura se aproximam de outra pelo método ANOVA-Fator único. O resumo dos resultados é apresentado Tabela 4.28 em forma de matriz, informando o nível observado de significância “p”, obtido na análise para cada um dos pares encontrados.

Tabela 4.28 - Níveis de significância (p%) dos valores de módulo de resiliência

<i>MISTURA</i>	<i>AZR</i>	<i>DZR</i>	<i>BZR</i>
<i>AZR</i>			
<i>DZR</i>	7,90%		
<i>BZR</i>	3,75%	0,18%	

A relação entre as combinações de pares de misturas apresentou baixos níveis de significância.

4.4.3. VIDA DE FADIGA

O ensaio realizado para estimar a vida de fadiga consistiu na aplicação de pulsos de carga, com frequência de 1s, sendo 0,1s correspondentes ao tempo de aplicação da carga e 0,9s correspondente ao tempo de descanso. Os carregamentos utilizados foram um percentual da resistência à tração referente a cada mistura (30%, 40% e 50% de RT), devido ao tempo disponível para execução dos ensaios.

Para cada nível de tensão foram ensaiados de três a quatro CP, a depender da dispersão dos resultados. Foram realizados ensaios à tensão controlada, cujo critério de fadiga está associado à fratura total da amostra, em condições térmicas em torno de $25 \pm 0,5$ °C.

O desempenho apresentado pelas misturas, sob esforços repetitivos, é visualizado na Figura 4.10 num gráfico log-log. Tem-se nas abscissas a diferença de tensão (diferença entre a tensão de tração e tensão de compressão, ambas solicitadas no centro do corpo-de-prova) e nas ordenadas o número de solicitações (N). A Tabela 4.29 apresenta os valores de k_2 , n_2 e R^2 referentes à Equação 3.13, para as linhas de tendência das três misturas.

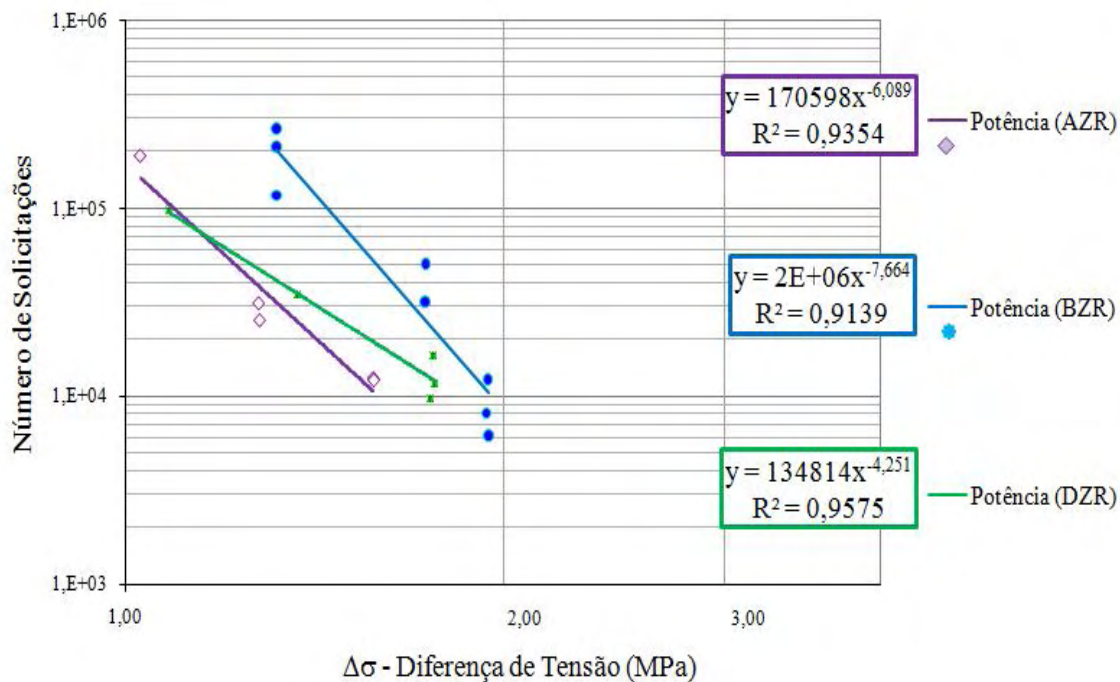


Figura 4.10 - Vida de fadiga das misturas estudadas

Tabela 4.29 - Valores dos coeficientes k_2 , n_2 e do coeficiente de determinação R^2

<i>MISTURA</i>	k_2	n_2	R^2
<i>AZR</i>	170.598	6,089	0,9354
<i>DZR</i>	134.814	4,251	0,9575
<i>BZR</i>	1.736508	7,664	0,9139

Os resultados obtidos para as três misturas levam a algumas conclusões: (i) as misturas AZR e DZR apresentaram menor dispersão entre os resultados se comparadas com a mistura BZR; (ii) a mistura BZR apresentou vida de fadiga maior que as misturas AZR e DZR; (iii) a inclinação da reta para a mistura BZR tem uma leve semelhança com a inclinação obtida para a mistura AZR, apresentando valores de n_2 próximos; (iv) das três misturas analisadas, a DZR foi a mistura que apresentou menor vida de fadiga.

CAPÍTULO 5

Estudo mecanístico do dimensionamento da nova pista do AIB

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são analisadas duas metodologias de dimensionamento de pavimentos flexíveis de aeroportos: o método empírico da *Federal Aviation Administration* (FAA), baseado no índice de suporte Califórnia (CBR) do subleito, e o novo método mecanístico-empírico da FAA, codificado no programa FAARFIELD. Como estudo de caso analisa-se a estrutura da segunda pista do Aeroporto Internacional de Brasília (AIB).

5.2. O MÉTODO EMPÍRICO DE DIMENSIONAMENTO

A pavimentação aeroportuária brasileira vem utilizando o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis e rígidos criado pela FAA, conforme a circular Nº AC 150/5320-6D de 1995 para definições de soluções técnicas, seja no projeto de pavimentos novos ou na restauração de pavimentos deteriorados. Esse método é basicamente função do valor do CBR do subleito e do número de repetições do trem de pouso de uma aeronave de projeto.

A Associação Brasileira de Pavimentação publicou um boletim técnico que descreve todo o projeto de pavimento aeroportuário criado pela FAA-ICAO (ABPv, 1996). Neste processo de dimensionamento os dados mais relevantes de projeto são o peso máximo estrutural de decolagem, a geometria do trem de pouso de todos os aviões que deverão operar naquela pista (simples, duplo, duplo tandem, duplo-duplo tandem), a previsão de volume de tráfego anual por tipo de avião e o valor do CBR dos materiais que irão compor o pavimento.

A metodologia de dimensionamento é brevemente descrita a seguir. Para cada tipo de avião é identificado seu peso máximo estrutural de decolagem e seu tipo de trem de pouso. Em seguida, obtém-se a carga por roda para cada tipo de avião, resultado da divisão de 95% do peso máximo estrutural de decolagem pelo número de rodas nos trens de pouso principais. Daí é identificado o avião crítico ou de projeto, ou seja, o que possui maior peso por roda. Determinada a aeronave de projeto, converte-se o número de decolagens dos trens de pouso de todos os aviões em decolagens do trem de pouso do avião crítico com o auxílio dos fatores de conversão os quais são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Fatores de conversão de trens de pouso

Converter de...	Para...	Multiplicar as decolagens por:
Roda simples	Roda dupla	0,8
Roda simples	Duplo tandem	0,5
Roda dupla	Duplo tandem	0,6
Duplo-duplo tandem	Duplo tandem	1,0
Duplo tandem	Roda simples	2,0
Duplo tandem	Roda dupla	1,7
Roda dupla	Roda simples	1,3
Duplo-duplo tandem	Roda dupla	1,7

Com base no número de decolagens de cada tipo de avião, já convertido para um único tipo de trem de pouso, obtém-se um número equivalente de decolagens de cada avião em termos do avião crítico, por meio da seguinte formulação empírica:

$$\log R_1 = \log R_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^{1/2} \quad (5.1)$$

Onde:

R_1 – equivalente anual das partidas da aeronave crítica (aeronave de projeto);

R_2 – decolagens anuais expressas em termos do trem de pouso da aeronave crítica;

w_1 – carga de roda da aeronave crítica;

w_2 – carga por aeronave em questão

O somatório das decolagens equivalentes de cada avião em termos do avião crítico fornece o número total equivalente de decolagens deste avião.

Para cada tipo de trem de pouso e com o peso do avião, a resistência do solo (por meio do índice CBR - *Califórnia Bearing Ratio*) e o número total de decolagens, entra-se em um ábaco que relaciona todos esses parâmetros (Figura 5.1) e obtém-se a espessura total do pavimento.

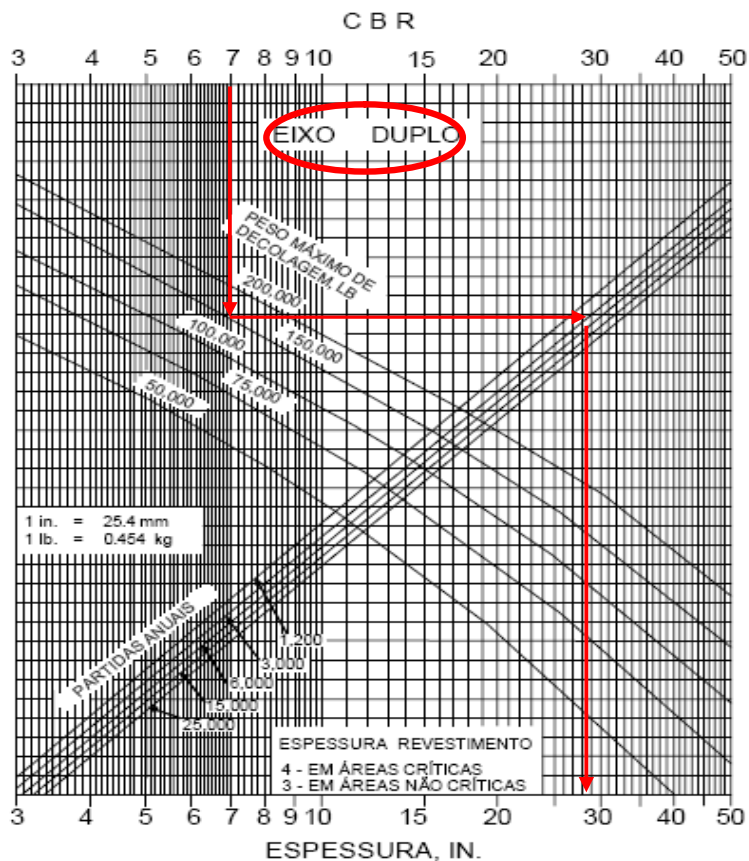


Figura 5.1 - Curvas de determinação da espessura dos pavimentos flexíveis

A consideração da equivalência das deflexões entre as diversas configurações do trem de pouso das aeronaves traz um inconveniente quando se trata de aeronaves de grande porte. Para essas aeronaves, caso sejam a aeronave de projeto, a metodologia admite que elas sejam consideradas como aeronaves com trem de pouso Duplo Tandem e peso máximo de 1361 kN (136.100 kgf), limitando assim o peso de todas as aeronaves maiores.

5.2.1. ESTRUTURA DO PAVIMENTO DA NOVA PISTA DO AIB

Segundo informações da Infraero, o Aeroporto Internacional de Brasília (AIB) é o terceiro em movimentação de passageiros e aeronaves do Brasil. Por sua localização estratégica, é considerado um “*hub*” da aviação civil, ou seja, ponto de conexão para destinos em todo o País. Com isso, a movimentação de pousos e decolagens é bastante intensa.

Para atender a esta demanda, em dezembro de 2005 foi entregue a segunda pista de pouso e decolagem que ampliou a capacidade operacional do aeroporto para 555 mil pousos e decolagens por ano.

A nova pista do AIB (11R/29L) tem uma extensão de 3.300m por 45 m de largura. A estrutura do pavimento flexível foi dimensionada utilizando a metodologia descrita anteriormente, originária da circular AC 150/5320-6D da *Federal Aviation Administration* (FAA). Essa metodologia considera o valor do índice de suporte Califórnia do subleito e o número de repetições de um eixo padrão da aeronave de projeto, para determinar a espessura de projeto.

De acordo com o estudo de tráfego contido no memorial de cálculos da construção da pista, foi determinado o avião MD-11 como aeronave de projeto (Planorcon, 2003). A estrutura dimensionada é composta pelas camadas de sub-base, base e revestimento (capa + binder) que segundo o memorial de cálculo do dimensionamento da estrutura do pavimento da segunda pista foi construída sobre um subleito regularizado cujo CBR igual a 12%, conforme ilustra a Figura 5.2.

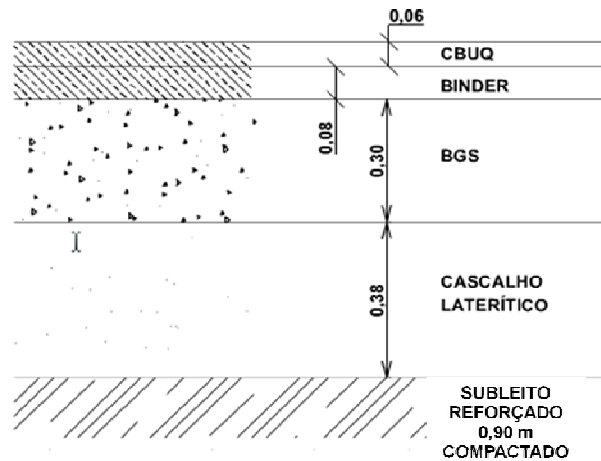


Figura 5.2 - Estrutura do pavimento da segunda pista do AIB, dimensões em metros

De acordo com Farias & Falcão (2006), a estrutura do pavimento e os materiais especificados são descritos a seguir:

- Capa em CBUQ (Faixa 2) com 6,0 cm de espessura;
- Binder em CBUQ (Faixa 7) com 8,0 cm de espessura;
- Base em Brita Graduada Simples (BGS) granítica com CBR mínimo de 80% e 30,0 cm de espessura, dividida em duas camadas de 15,0 cm (1ª camada inferior e 2ª camada superior);
- Sub-base estabilizada granulometricamente em Cascalho Laterítico com CBR mínimo de 40% e 38,0 cm espessura, dividida em duas camadas de 19,0 cm (1ª camada inferior e 2ª camada superior);
- Reforço de Subleito argiloso com CBR de no mínimo 12%, espessura de 90 cm, compactado em quatro camadas de 22,5 cm (1ª camada inferior e 4ª camada superior), sendo as duas primeiras camadas com grau de compactação GC de no mínimo 90% e as duas últimas com GC de no mínimo 95% na energia Proctor Modificado.

De acordo com DIRENG (2002), o revestimento asfáltico é classificado segundo sua destinação. No caso na segunda pista do AIB, o revestimento asfáltico foi enquadrado na categoria “tipo A”, que é destinada a operações de aeronaves de massa bruta superior a 273 kN (27.300 kgf) ou pressões de pneus superiores a 0,70 MPa, mesma categoria em que foram enquadradas as misturas asfálticas analisadas nesta pesquisa.

As camadas de capa e binder são diferenciadas de acordo com a faixa granulométrica utilizada na mistura. De acordo com o memorial descritivo de cálculos, a faixa granulométrica utilizada para compor a capa asfáltica foi a Faixa 2 e para compor o binder foi usada a Faixa 7.

Entretanto, nesta pesquisa verificou-se que para os estudos de dimensionamento da nova pista do AIB foi utilizada a especificação de serviço da DIRENG datada do ano de 1998. Nesta especificação a Faixa 2 e a Faixa 7 possuem agregado de tamanho nominal máximo de 19,0 mm e uma lacuna na peneira 3/8", cuja abertura corresponde a 9,5 mm. Para realização desta pesquisa utilizou-se a ES 04.05.640/2002 para compor as faixas granulométricas das três misturas e foi observado que a Faixa 7 não existe mais na norma de especificação mais atual, e que a Faixa 2 não possui a lacuna mencionada, conforme mostra a Tabela 5.2. A Figura 5.3 ilustra as três curvas granulométrica e pode-se observar a proximidades do limite inferior das três curvas em questão.

Tabela 5.2 - Faixas granulométricas da DIRENG ES de 1998 e ES de 2002.

PENEIRAS		PERCENTUAL PASSANTE (%)		
Número	Abertura (mm)	Faixa 2 (Rolamento ES de 1998)	Faixa 7 (Binder ES de 1998)	Faixa 2 (Rolamento de ES 2002)
1 1/2"	38,1	–	–	–
1"	25,4	100	100	100
3/4"	19,1	80 - 98	72 - 96	76 - 98
1/2"	12,7	68 - 93	61 - 89	66 - 86
3/8"	9,5	–	–	57 - 77
Nº4	4,8	45 - 75	38 - 66	40 - 60
Nº10	2,0	32 - 62	25 - 50	23 - 43
Nº40	0,42	16 - 37	12 - 28	9 - 22
Nº80	0,18	10 - 24	7 - 18	6 - 17
Nº 200	0,074	3 - 8	3 - 7	3 - 6

5.3. MÉTODO MECANÍSTICO – PROGRAMA FAARFIELD

Diversos procedimentos mecanísticos para dimensionamento de pavimentos se desenvolveram com base na teoria das camadas elásticas ou em métodos numéricos considerando ainda o comportamento dos materiais de pavimentação sob as condições dinâmicas do tráfego e, eventualmente, as condições climáticas.

Estes métodos têm como principais parâmetros de entrada os módulos de resiliência das camadas sobrepostas do pavimento, visto que os materiais utilizados em pavimentação têm seu comportamento tensão-deformação influenciados por duas parcelas: a elástica, que cessa

quando a estrutura é descarregada; e outra relativa à parcela plástica, que dá origem às deformações permanentes. É por meio do Módulo de Resiliência que se quantifica a deformabilidade elástica.

A FAA atualmente utiliza o programa FAARFIELD (versão 1.203, 31/07/08) para o cálculo das tensões e deformações desenvolvidas na estrutura do dimensionamento, em substituição ao programa LEDFAA, de acordo com a AC N° 150/5320-6E (ainda em planejamento).

O código numérico existente no interior do programa denominado LEAF não foi alterado e usa a teoria das multicamadas lineares elásticas para análise do pavimento sob ação de cargas circulares em um meio semi-infinito (Hayhoe, 2002).

O programa permite, entre várias outras opções, o dimensionamento de pavimentos flexíveis ou rígidos e recapamentos sobre pavimentos já existentes. A nova metodologia não só permite projetar a estrutura do pavimento para a proteção do subleito, mas também para considerar a vida de fadiga do revestimento asfáltico.

A metodologia antiga, baseada no CBR, devido a uma limitação dos ábacos de dimensionamento, não possibilita o dimensionamento de pavimentos com o tráfego de aeronaves de grandes dimensões e com geometrias dos trens de pouso mais complexas. Já para a nova metodologia, o programa FAARFIELD possui um banco de dados com diversos tipos de aeronaves e trens de pouso, que permite o projetista realizar a composição do tráfego aéreo real, considerando as aeronaves individualmente, com suas respectivas cargas por roda. O novo programa calcula os efeitos destrutivos de cada aeronave num tráfego misto. Assim, o conceito de aeronave de projeto é substituído pelo conceito de consumo de fadiga, expresso pelo Fator Acumulativo de Danos (CDF), ilustrado na Figura 5.3.

O somatório dos efeitos destrutivos de todas as aeronaves é feito de acordo com a Lei de Miner. Esta lei baseia-se na hipótese de que os efeitos de cada aeronave se superpõem, sendo assim, faz-se um somatório dos consumos de resistência à fadiga correspondente a cada aeronave, no período de projeto, de acordo com a seguinte expressão.

$$\sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad (5.2)$$

Onde

n_i = número de ciclos aplicados de tensão máxima

N_i = número que provoca a ruptura

O programa traz ainda um banco de dados com tipos de materiais usualmente utilizados nos EUA, embora o projetista tenha a liberdade de usar camadas com características diferentes.

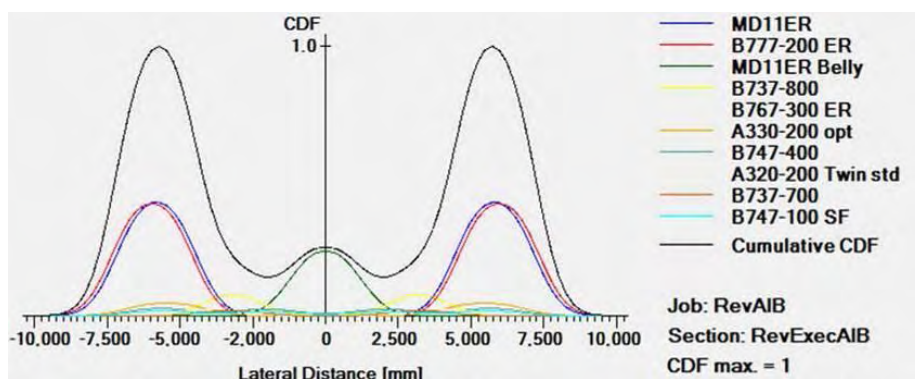


Figura 5.3 - Fator acumulativo de dano. Efeito combinado das aeronaves que compõem o tráfego (FAARFIELD versão 1.203, 2008)

Os critérios de ruptura pré-determinados no dimensionamento consideram a deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico e a deformação de compressão no subleito. As formulações foram originadas da pista de teste da NAPTF – *National Airport Pavement Test Facility* (Garg *et. al.* 2004). As Equações 5.2, 5.3 e 5.4 mostram os critérios de ruptura adotados pelo programa FAARFIELD.

Para o revestimento asfáltico:

$$\log C = 2,68 - 5 \cdot \log \varepsilon_H - 2,665 \cdot \log E_A \quad (5.3)$$

Onde:

C = Número de “coberturas” permitidas para rupturas;

ε_H = Máxima deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico;

E_A = Módulo elástico do revestimento asfáltico (psi)

Para o subleito:

$$C = \left[\frac{0,004}{\varepsilon_v} \right]^{8,1}, \text{ quando } C \leq 12.100 \quad (5.4)$$

$$C = \left[\frac{0,002428}{\varepsilon_v} \right]^{14,21}, \text{ quando } C > 12.100 \quad (5.5)$$

Onde:

ε_v = Máxima deformação de compressão no topo do subleito

Medina & Motta (2005) definem a cobertura do pavimento pelo tráfego quando os pontos da seção transversal da trilha de roda de uma faixa tiverem sido solicitados pelas rodas pelo menos uma vez, ou seja, é o número de passagens de um determinado veículo necessárias para que toda a faixa pré-determinada do pavimento seja solicitada pelo menos uma vez. O conceito de cobertura é comumente utilizado em aeródromos devido à grande quantidade de solicitações variáveis transversalmente.

O dimensionamento do pavimento se dá por um processo iterativo de determinação das espessuras das camadas que resulte no somatório do *Fator Cumulativo de Dano* (CDF) igual a um. O fator de dano é determinado para os critérios de ruptura do revestimento asfáltico e do subleito para cada aeronave, como mencionado anteriormente. Entretanto, certa estrutura de pavimento pode atender a um critério de ruptura, como por exemplo, o subleito, mas não atender ao critério de ruptura do revestimento asfáltico.

Dessa forma, o FAARFILED considera o critério do subleito como sendo o padrão para o dimensionamento. Cabe ao projetista verificar o CDF calculado para o revestimento asfáltico e avaliar a necessidade de uma mudança na estrutura do pavimento. O CDF matematicamente é determinado pela Equação 5.6.

$$CDF = \frac{\text{número de coberturas aplicadas}}{\text{número de coberturas permitidas}} \quad (5.6)$$

O número de “coberturas” aplicadas pode ser determinado pelo número de decolagens anuais de cada aeronave, multiplicado pela vida útil esperada e dividido pelo número de operações por cobertura.

De maneira resumida, o valor do CDF define a fração da vida útil consumida pelo carregamento imposto. Dessa forma um valor de CDF igual a 1 representa que, para um determinado critério, o carregamento consumiu 100% da vida útil considerada. Valores maiores que a unidade representam teoricamente que o pavimento chegará à ruptura antes do período esperado. Já um valor menor que o valor unitário significa que o pavimento foi superdimensionado para o tráfego em questão.

5.3.1. REAVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO DA NOVA PISTA DO AIB

Com o objetivo de reavaliar a estrutura do pavimento da segunda pista do AIB considerando os conceitos mecânicos, foi realizada uma análise da estrutura por meio do programa FAARFIELD, descrito anteriormente.

Para o dimensionamento de uma estrutura nesta nova metodologia da FAA, baseada na teoria da elasticidade, é preciso conhecer os parâmetros de rigidez dos materiais que compõem a estrutura, bem como o tráfego previsto durante a vida útil do pavimento.

Farias & Falcão (2006) realizaram ensaios com o aparelho Geogauge na superfície da camada de base em brita graduada simples (BGS), a qual foi exposta em uma trincheira de inspeção. A Figura 5.4 mostra a utilização do aparelho Geogauge na trincheira da pista do AIB, próximo a um furo de controle de compactação (Frasco de Areia). Os resultados deste trabalho são resumidos na Tabela 5.3.



Figura 5.4 - Trincheira de inspeção e realização de ensaios de campo. Aparelho Geogauge em uso no AIB (Farias & Falcão, 2006)

Tabela 5.3 - Valores de módulo de elasticidade em diferentes pontos (Farias & Falcão, 2006)

<i>CAMADA</i>	<i>Módulos médios (MPa)</i>	<i>Desvio padrão (MPa)</i>
<i>Base</i>	195	22
<i>Sub-base</i>	135	20
<i>Subleito</i>	90	15

O valor do módulo de resiliência (MR) do revestimento foi estimado com base em ensaios de laboratório, apresentados por Farias & Falcão (2006), com uma média de 3900 MPa e desvio padrão de 700 MPa. Estes resultados servem para estabelecer uma ordem de grandeza de módulo e de desvio padrão dos materiais.

A Tabela 5.4 apresenta a composição de tráfego utilizada no dimensionamento da pista pela metodologia baseada no CBR do subleito, e que também será utilizada na nova análise. Nota-se que a carga por roda das aeronaves de grande porte como o MD11, que foi a aeronave de projeto, está limitada no valor 161,6 kN (16.160 kgf) no cálculo utilizado no dimensionamento com o método convencional. Entretanto, o programa empírico-mecanístico FAARFIELD permite que seja utilizado o valor real da aeronave que é de 287,1 kN .

Tabela 5.4 - Dados do tráfego aéreo utilizado (Planorcon, 2003)

<i>AVIÕES</i>	<i>PMDO</i>	<i>Média Decolagem Anual</i>	<i>Carga por roda (Kg)</i>	<i>Trem de pouso</i>
<i>A319/100</i>	70.000	6.776	16.625	Roda Dupla
<i>B737/200</i>	52.400	296	12.445	Roda Dupla
<i>B737/500</i>	60.550	7.502	14.381	Roda Dupla
<i>A320/200</i>	73.500	6.024	17.456	Roda Dupla
<i>B737/300</i>	63.300	2.164	16.644	Roda Dupla
<i>B737/700</i>	70.080	5.158	18.766	Roda Dupla
<i>B737/800</i>	79.015	3.858	15.675	Roda Dupla
<i>A310/200</i>	132.000	47	16.160	Duplo tandem
<i>A330/200</i>	233.000	140	13.739	Duplo tandem
<i>B757/200</i>	115.700	294	14.543	Duplo tandem
<i>B757/300</i>	122.470	116	16.160	Duplo tandem
<i>B767/200ER</i>	175.550	442	16.160	Duplo tandem
<i>B767/300ER</i>	184.600	977	16.160	Duplo tandem
<i>MD-11</i>	285.100	900	16.160	Duplo tandem+Center gear
<i>B747/100</i>	340.100	1.328	16.160	Duplo-Duplo tandem
<i>B777/400</i>	397.000	203	16.160	Duplo-Duplo tandem
<i>B777/200</i>	300.600	1.328	16.160	Triplo tandem

O dimensionamento considerando a metodologia convencional, baseada no valor do CBR do subleito para uma vida útil de 20 anos, resultou na estrutura descrita anteriormente e apresentada na Figura 5.2. Mello & Farias (1996) realizaram um estudo nesta mesma pista do AIB considerando os conceitos mecanísticos, utilizando os parâmetros de rigidez determinados pelo aparelho Geogauge descrito anteriormente (Tabela 5.3) e utilizando o programa LEDFAA. A análise acusou uma ruptura prematura excessivamente precoce do revestimento da segunda pista do AIB, o que não se confirmou na prática. O maior problema encontrado foi relativo a grande diferença de rigidez entre as camadas de revestimentos asfáltico e a rigidez do material de base (BGS).

A baixa rigidez obtida para a camada de base e para a camada de sub-base pelo ensaio Geogauge pode ser irreal, pois sabe-se que a rigidez de materiais granulares, como a BGS e cascalho laterítico, é altamente influenciada pelo confinamento, enquanto que o aparelho Geogauge faz medições na superfície não confinada.

Assim, foram realizadas simulações matemáticas para a determinação das tensões principais atuantes no meio da camada de base para se determinar o módulo de resiliência aproximado pelo processo de convergência. Neste processo adota-se um valor fixo para o módulo de uma camada e calculam-se as tensões atuantes com o auxílio de um programa baseado na teoria da elasticidade para múltiplas camadas. Com os valores das tensões e com o auxílio de um modelo não-linear para o módulo de resiliência, calcula-se um novo valor para este parâmetro. Este novo valor é atualizado novamente para calcular as tensões e recalculam os módulos até que estes converjam dentro de uma dada tolerância.

Foi utilizado o programa *Kenlayer*, o qual considera o pavimento um sistema de múltiplas camadas. A carga atuante escolhida foi representada pelo trem de pouso da aeronave MD11, com pressão do pneu de 1420 kPa. A Figura 5.5-a mostra o trem de pouso do MD11 e a Figura 5.5-b mostram a estrutura analisada e o ponto no centro da camada de base, para o qual se deseja calcular o módulo de resiliência.

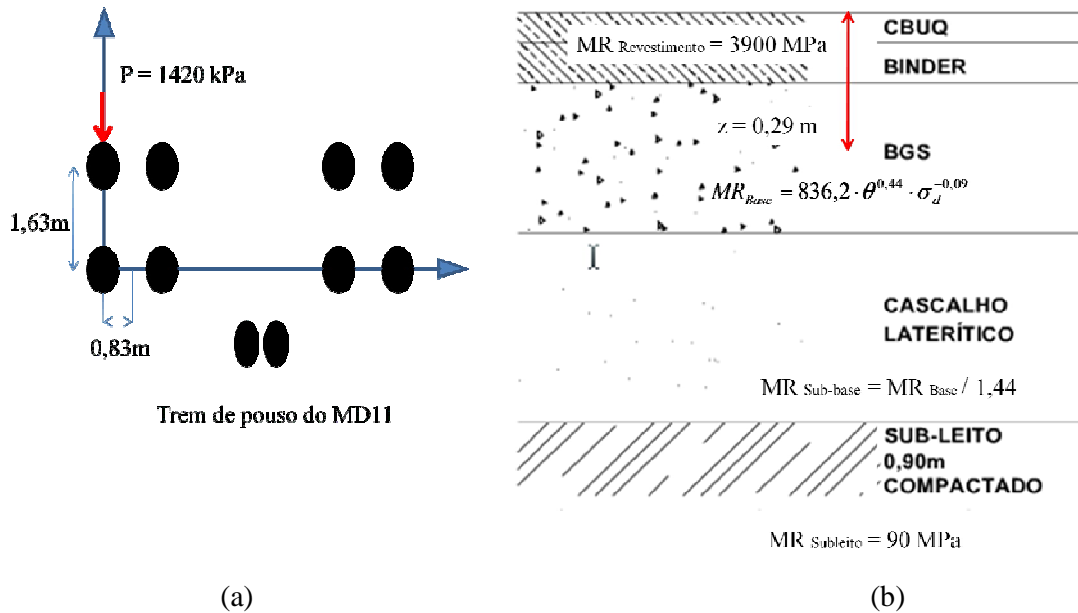


Figura 5.5 - Ponto de cálculo das tensões principais utilizando o programa *Kenlayer*.

Para o cálculo do módulo de resiliência da brita graduada simples granítica, considerando a não linearidade induzida pelas tensões confinantes e desviadoras, adotou-se o modelo composto proposto por Ramos (2003), com base na média de vários ensaios realizados com BGS granítica compactada na energia proctor modificada. Este modelo está descrito em Medina & Motta (2005) e é dado pela seguinte expressão:

$$MR_{Base} = 836,2 \cdot \theta^{0,44} \cdot \sigma_d^{-0,09} \quad (5.7)$$

Onde θ é o somatório das tensões principais ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) e σ_d é a tensão desviadora dada pela diferença de tensões ($\sigma_1 - \sigma_3$).

Pela falta de um modelo de módulo de resiliência representativo para o cascalho utilizado no AIB, o valor do módulo da sub-base foi calculado a partir do valor do MR da base, e da relação do $MR_{base}/MR_{Sub-base}$ obtida pelo ensaio com o Geogauge. De acordo com os dados da Tabela 5.3 esta relação é igual a 1,44. Para o subleito argiloso adotou-se o valor de módulo obtido com o aparelho Geogauge, uma vez que, se assume que o módulo de resiliência de argilas é pouco influenciado pelas tensões confinantes. Os valores do coeficiente Poisson adotados foi igual a 0,25 para a mistura asfáltica e de 0,30 para os demais materiais.

A Tabela 5.5 mostra o número de iterações realizadas, as tensões encontradas a cada iteração e os módulos de resiliência dos materiais de base e sub-base. O processo convergiu para fins práticos na terceira iteração, mas continuou-se o cálculo por mais alguns passos.

Tabela 5.5 - Valores iterativos dos módulos de resiliência dos materiais de base e sub-base

Nº de iterações	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	θ (MPa)	σ_d (MPa)	MR _{Base} (MPa)	MR _{Sub-base} (MPa)
Valor Inicial	-	-	-	-	-	195	135
1ª Iteração	4,00E-01	-1,04E-02	-1,35E-02	3,76E-01	4,14E-01	589	408
2ª Iteração	5,24E-01	-3,50E-02	-3,90E-02	4,49E-01	5,62E-01	619	429
3ª Iteração	5,37E-01	-2,47E-02	-2,78E-02	4,85E-01	5,65E-01	640	443
4ª Iteração	5,41E-01	-2,45E-02	-2,75E-02	4,89E-01	5,68E-01	642	445
5ª Iteração	5,41E-01	-2,44E-02	-2,73E-02	4,90E-01	5,69E-01	643	445

Assim, pelo processo iterativo foram determinados os valores convergidos do MR da base é igual a 642 MPa e MR da sub-base igual a 445 MPa. Esses valores foram então considerados como os valores aproximados de módulos destas camadas, e foram usados para verificação da estrutura com o programa. A Figura 5.6 ilustra as primeiras estruturas analisadas com o programa FAARFIELD, cujos resultados em termos de *Fator Acumulativo de Danos* do revestimento e do subleito estão mostrados na Tabela 5.6.

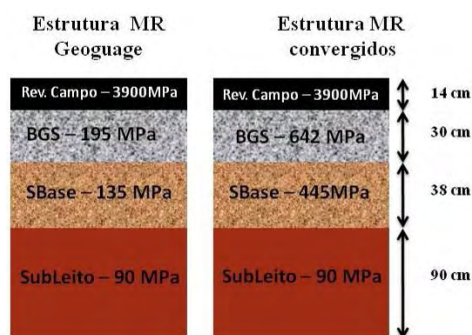


Figura 5.6 - Estruturas com os MR obtidos com o Geogauge e MR convergidos analisadas no programa FAARFIELD

Tabela 5.6 - Valores do CDF para o revestimento asfáltico e subleito

PAVIMENTO	CDF _{Revestimento}	CDF _{Subleito}
<i>Estrutura MR Geogauge</i>	133,61	9,38
<i>Estrutura MR convergidos</i>	2,53	0,29

Verificou-se que para a estrutura original, e com os módulos obtidos em campo com o aparelho Geogauge, os valores de CDF, tanto do subleito quanto para revestimento asfáltico, estão muito acima do valor unitário. Isso mostra que o pavimento chegaria à ruptura muito antes do período esperado, o que não foi observado. Porém, para a estrutura que possui os módulos determinados pelo processo iterativo, os resultados mostram valores bem inferiores de CDF. Pode-se também observar que o critério crítico de ruptura é o referente à fadiga do revestimento asfáltico, o qual mostra uma tendência de ruptura prematura, devido ao CDF de 2,53. Isto indica que a necessidade de reforço do revestimento após cerca de oito anos de uso da nova pista do AIB, embora a estrutura tenha um fator de segurança adequado quanto à ruptura do subleito ($CDF_{\text{Subleito}} = 0,29$). De fato, o projeto original já previa uma reavaliação e reforço da pista após 10 anos de serviço.

5.3.2. AVALIAÇÃO DA VIDA DE FADIGA COM AS MISTURAS AZR, DZR E BZR

O critério de ruptura do revestimento asfáltico implementado no programa FAARFIELD é um critério empírico baseado na pista de teste da NAPTF e descrito pela Equação 5.2.

Com o objetivo de avaliar a vida de fadiga com base nos ensaios de laboratório (módulo de resiliência e fadiga) nas misturas asfálticas avaliados neste trabalho (AZR, DZR e BZR), foram feitas novas análises mecânicas da estrutura do AIB em três novas configurações, modificando o material utilizado no revestimento asfáltico. A Figura 5.7 ilustra as novas configurações da estrutura que foram analisadas com o programa.

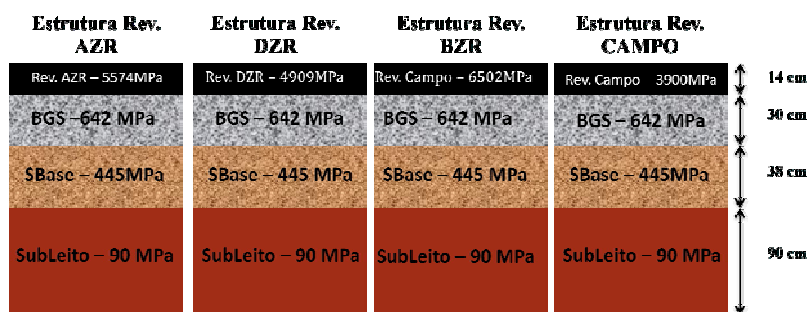


Figura 5.7 - Estruturas analisadas

Na Tabela 5.7, encontram-se os valores do fator acumulativo de danos para os dois critérios de ruptura com base nos critérios empíricos embutidos no programa FAARFIELD. Pode-se

observar que o critério crítico de ruptura ainda é o referente ao revestimento asfáltico, o qual mostra uma tendência de ruptura prematura desta camada, devido aos valores de CDF maiores que o valor unitário. As misturas estudadas nesta pesquisa apresentaram desempenho inferior ao da mistura utilizada na construção da segunda pista do AIB. Isto era de se esperar, visto que os módulos de resiliência das três misturas estudadas são maiores que o módulo do revestimento aplicado. Entretanto, o programa FAARFIELD não considera as diferentes vidas de fadiga para as misturas utilizadas.

Tabela 5.7 - Fator acumulativo de danos para o revestimento asfáltico e subleito das estruturas analisadas

PAVIMENTO	CDF <i>Revestimento</i>	CDF <i>Subleito</i>
Estrutura Campo	2,53	0,29
Estrutura AZR	4,16	0,20
Estrutura DZR	3,52	0,23
Estrutura BZR	4,91	0,17

Por meio de ensaio de fadiga, realizado nas misturas asfálticas, objeto desta pesquisa, foram determinadas a lei de fadiga para cada uma delas, de acordo as equações a seguir:

$$N_{AZR} = 170598 \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{6,089} \quad (5.8)$$

$$N_{DZR} = 134814 \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{4,251} \quad (5.9)$$

$$N_{BZR} = 1736508 \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{7,664} \quad (5.10)$$

Onde:

N_i = vida de fadiga da mistura i

$\Delta\sigma$ = diferença de tensão (MPa)

Por meio da análise de tensões calculadas pelo programa FAARFIELD, pode-se calcular o número de repetições de carga que cada mistura resistiria. Os valores obtidos com base nas curvas de fadiga de laboratório são muito rigorosos e devem ser multiplicados por um fator

campo-laboratório (f_{C-L}). Este fator é de difícil determinação, mas seu valor exato não é relevante para os fins desta pesquisa, uma vez que se deseja apenas fazer uma análise comparativa das três misturas estudadas. Portanto, adotou-se um valor de f_{C-L} igual a 1000 seguindo as sugestões de Pinto (1991) que situa este fator na faixa de 10^3 a 10^4 .

As Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 mostram os valores de vida de fadiga (N_i) calculada para cada mistura, por tipo de aeronave. Com o número anual de decolagem prevista e com o número de solicitações resistentes para cada mistura pode-se determinar, por exemplo, se estes revestimentos com suas leis de fadiga próprias resistiriam ou não aos 20 anos de projeto previsto no dimensionamento. De acordo com a *Lei de Miner*, a qual se baseia na hipótese de que os efeitos de cada aeronave se superpõem, faz-se um somatório dos consumos de fadiga correspondente a cada aeronave, no período de projeto.

Tabela 5.8 - Número de solicitações para a mistura AZR por tipo de aeronave

ESTRUTURA AZR			$\Delta\sigma$ (MPa)	Nº decolagem prevista em 20 anos	$f_{C-L} \times N_{AZR}$	N/ N_{AZR}
AERONAVES	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)				
A319-100	1,39E+00	-7,18E-01	2,11E+00	135520	1803830	0,08
B737-200	6,70E-01	-4,26E-01	1,10E+00	5920	97724846	0,00
B737-500	1,33E+00	-6,68E-01	2,00E+00	150040	2491190	0,06
A320-200	1,05E+00	-4,93E-01	1,54E+00	120480	12160838	0,01
B737-300	1,38E+00	-6,95E-01	2,08E+00	43280	1980884	0,02
B737-700	1,43E+00	-7,37E-01	2,16E+00	103160	1554412	0,07
B737-800	1,44E+00	-7,79E-01	2,22E+00	77160	1325498	0,06
A310-200	1,30E+00	-7,20E-01	2,02E+00	940	2354340	0,00
A330-200	1,43E+00	-9,20E-01	2,35E+00	2800	932094	0,00
B757-200	1,19E+00	-6,35E-01	1,83E+00	5880	4370465	0,00
B757-300	1,27E+00	-6,75E-01	1,94E+00	2320	2996517	0,00
B767-200ER	1,29E+00	-7,90E-01	2,08E+00	8840	1976250	0,00
B767-300ER	1,36E+00	-8,28E-01	2,19E+00	19540	1455643	0,01
MD11-ER	1,41E+00	-9,23E-01	2,33E+00	18000	991983	0,02
M11ER BELLY	1,25E+00	-8,04E-01	2,05E+00	18000	2128981	0,01
B747-100	1,57E+00	-8,56E-01	2,43E+00	26560	765026	0,03
B777-200ER	1,34E+00	-8,62E-01	2,20E+00	4060	1391128	0,00
B777-300ER	1,43E+00	-9,65E-01	2,39E+00	26560	838825	0,03
					SOMA	0,41

Tabela 5.9 - Número de solicitações para a mistura DZR por tipo de aeronave

ESTRUTURA DZR			$\Delta\sigma$ (MPa)	Nº decolagem prevista em 20 anos	$f_{C-L} \times N_{DZR}$	N/N _{DZR}
AERONAVES	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)				
A319-100	1,75E+00	-6,62E-01	2,41E+00	135520	3179131	0,04
B737-200	8,93E-01	-4,00E-01	1,29E+00	5920	45340673	0,00
B737-500	1,67E+00	-6,15E-01	2,28E+00	150040	4018944	0,04
A320-200	1,28E+00	-4,48E-01	1,73E+00	120480	13173381	0,01
B737-300	1,73E+00	-6,40E-01	2,37E+00	43280	3418912	0,01
B737-700	1,80E+00	-6,79E-01	2,48E+00	103160	2854381	0,04
B737-800	1,84E+00	-7,21E-01	2,56E+00	77160	2488490	0,03
A310-200	1,65E+00	-6,65E-01	2,32E+00	940	3801170	0,00
A330-200	1,89E+00	-8,62E-01	2,75E+00	2800	1835974	0,00
B757-200	1,49E+00	-5,84E-01	2,08E+00	5880	6016419	0,00
B757-300	1,59E+00	-6,20E-01	2,21E+00	2320	4628926	0,00
B767-200ER	1,67E+00	-7,35E-01	2,41E+00	8840	3214130	0,00
B767-300ER	1,76E+00	-7,71E-01	2,53E+00	19540	2602087	0,01
MD11-ER	1,86E+00	-8,66E-01	2,72E+00	18000	1913354	0,01
M11ER BELLY	1,67E+00	-7,53E-01	2,42E+00	18000	3155538	0,01
B747-100	1,97E+00	-7,90E-01	2,76E+00	26560	1789246	0,01
B777-200ER	1,75E+00	-8,03E-01	2,55E+00	4060	2516573	0,00
B777-300ER	1,88E+00	-9,02E-01	2,78E+00	26560	1734890	0,02
					SOMA	0,23

Os resultados, considerando as curvas de fadiga obtidas em laboratório, corroboram qualitativamente com aqueles calculados segundo o critério de fadiga da Equação 5.3. Assim, o melhor desempenho estrutural seria obtido com a mistura DZR, seguindo da mistura AZR e finalmente pela mistura BZR. O alto consumo de fadiga da mistura BZR está relacionado ao valor mais elevado de módulo de resiliência ($MR = 6502$ MPa) e sua maior dependência de vida de fadiga com o nível de tensões desviadoras, refletida no maior valor do expoente $n_2 = 7,664$.

A maior rigidez da mistura BZR, induz diferenças de tensões ($\Delta\sigma$) mais elevadas em relação às demais misturas como pode ser visto, por exemplo, para a aeronave B777-330ER. Neste caso a tensão desvio atingiu um valor de 3,35 MPa, bem superior ao nível de tensões ensaiado em laboratório. Para este nível de tensões a mistura BZR tem menos vida de fadiga se observa da extrapolação das curvas de laboratório, conforme ilustrado na Figura 5.8.

Tabela 5.10 - Número de solicitações para a mistura BZR por tipo de aeronave

ESTRUTURA BZR			$\Delta\sigma$ (MPa)	Nº decolagem prevista em 20 anos	$f_{C-L} \times N_{BZR}$	N/N _{BZR}
AERONAVES	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)				
A319-100	2,23E+00	-5,93E-01	2,83E+00	135520	602039	0,23
B737-200	1,20E+00	-3,66E-01	1,57E+00	5920	55029856	0,00
B737-500	2,12E+00	-5,50E-01	2,67E+00	150040	933363	0,16
A320-200	1,58E+00	-3,96E-01	1,98E+00	120480	9419197	0,01
B737-300	2,20E+00	-5,73E-01	2,78E+00	43280	694838	0,06
B737-700	2,29E+00	-6,09E-01	2,90E+00	103160	491146	0,21
B737-800	2,37E+00	-6,50E-01	3,02E+00	77160	363044	0,21
A310-200	2,12E+00	-5,99E-01	2,72E+00	940	816958	0,00
A330-200	2,51E+00	-7,89E-01	3,30E+00	2800	185609	0,02
B757-200	1,90E+00	-5,23E-01	2,42E+00	5880	1979680	0,00
B757-300	2,02E+00	-5,55E-01	2,57E+00	2320	1237486	0,00
B767-200ER	2,20E+00	-6,68E-01	2,86E+00	8840	547456	0,02
B767-300ER	2,31E+00	-7,00E-01	3,01E+00	19540	375848	0,05
MD11-ER	2,48E+00	-7,92E-01	3,27E+00	18000	198595	0,09
M11ER BELLY	2,24E+00	-6,90E-01	2,93E+00	18000	458600	0,04
B747-100	2,51E+00	-7,10E-01	3,21E+00	26560	225309	0,12
B777-200ER	2,32E+00	-7,30E-01	3,05E+00	4060	340402	0,01
B777-300ER	2,52E+00	-8,23E-01	3,35E+00	26560	165453	0,16
					SOMA	1,39

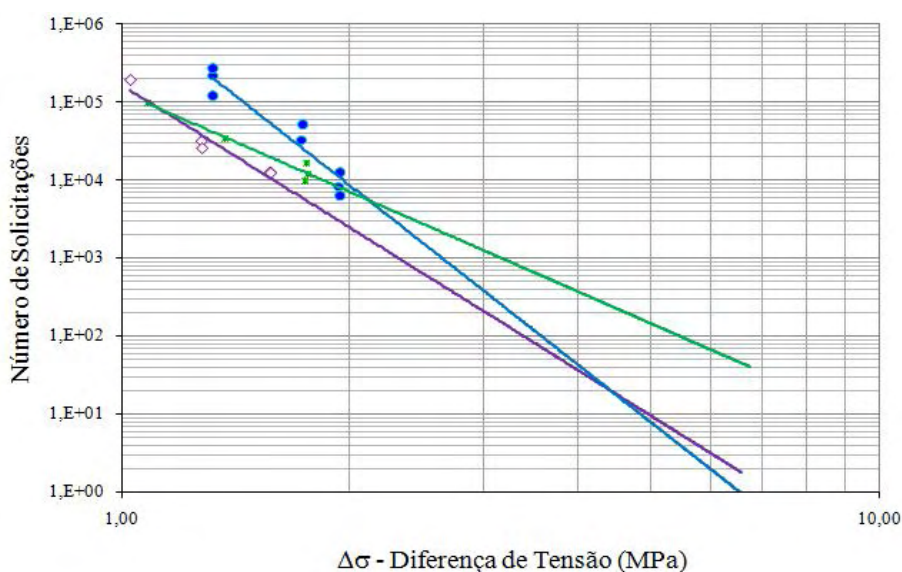


Figura 5.8 - Extrapolação das curvas de fadiga de laboratório

Apesar do desempenho inferior da mistura BZR para a estrutura adotada com uma espessura de revestimento de 14 cm, é possível chegar a um desempenho compatível e até superior ao das demais misturas variando-se a espessura desta camada. Deve-se ter em mente que a rigidez de uma camada depende não apenas do módulo de resiliência do material que a compõe, mas principalmente de sua espessura. Este fato pode ser apreciado na Figura 5.9 que mostram a variação do CDF com a espessura da camada de revestimento, considerando o critério de fadiga de laboratório (corrigido pelo fator campo-laboratório, $f_{C-L}=1000$). Percebe-se que o critério de fadiga seria satisfeito para duas situações: (1) com uma espessura abaixo de um valor crítico h_1 , ou (2) para uma espessura superior a uma espessura crítica (h_2). Portanto, para um dado tráfego, estrutura e um conjunto de materiais disponíveis, é possível determinar uma espessura de revestimento mais econômica que satisfaz à vida de projeto quanto ao critério de fadiga.

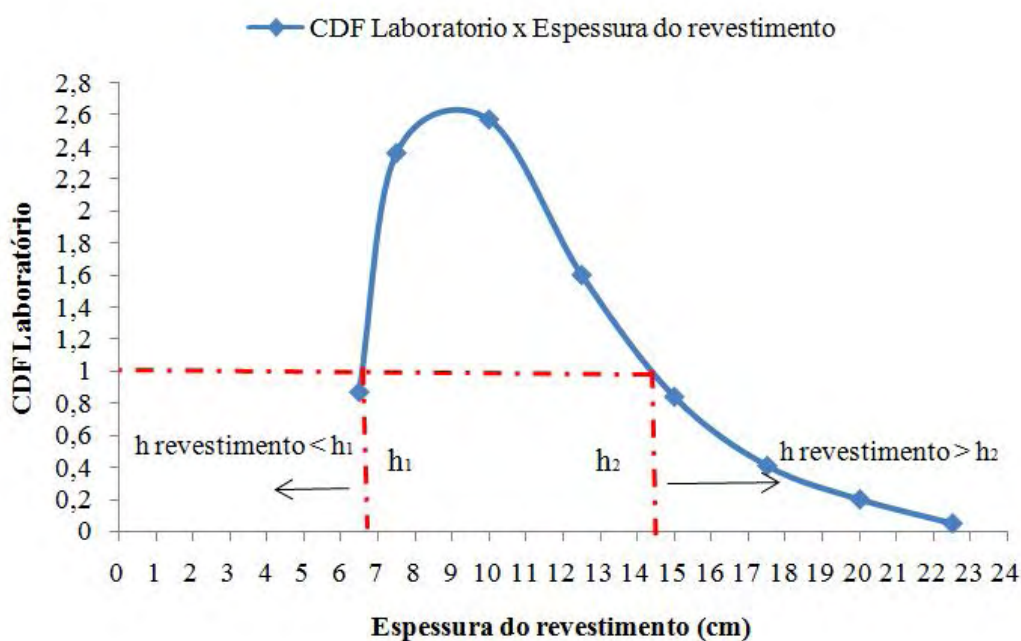


Figura 5.9 - CDF laboratório x Espessuras de revestimento

Finalmente, há outro ponto importante a ser analisado. Para todas as análises realizadas e para todas as misturas estudadas, e considerando-se o tráfego projetado e as deformações de tração geradas no revestimento, o maior consumo de fadiga individual foi observado para a aeronave A319-100. Portanto, esta seria a aeronave crítica e não o MD-11 escolhido pela metodologia empírica convencional, baseada no CBR do subleito e na aeronave mais pesada.

CAPÍTULO 6

Conclusões

Indo ao encontro do objetivo desta pesquisa, conclui-se que para a faixa granulométrica escolhida neste trabalho (Faixa 2) para compor as três misturas asfálticas estudadas, segundo a distribuição granulométrica proposta pela metodologia da Superpave, a especificação ES 04.05.610/2002 da DIRENG de um modo geral conduz a um revestimento asfáltico satisfatório em relação às características desejadas tanto no quesito funcional quanto mecânico. Dentre as misturas enquadradas na Faixa 2 da DIRENG, aquela cuja curva granulométrica passa abaixo da zona de restrição da metodologia da Superpave (aqui denominada como BZR) foi a que apresentou melhor comportamento funcional. Seu comportamento estrutural, entretanto, dependerá da estrutura do pavimento como um todo e do nível de tensões gerado pelo tráfego.

Na análise dos resultados da pesquisa chegou-se as seguintes conclusões:

1) Quanto aos materiais utilizados na composição da mistura

A seleção e caracterização dos materiais seguiram de um modo geral, os procedimentos e os requisitos mínimos normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e pela Diretoria de Engenharia da Aeronáutica (DIRENG). Com relação ao CAP 50/70 utilizado, este atendeu a quase todas as restrições, mas apresentou um índice de susceptibilidade térmica (IST) inferior ao limite especificado. Isto indica que o CAP 50/70 utilizado é muito sensível a elevadas temperaturas, o que pode resultar eventualmente em elevadas deformações permanentes, tendo em vista as altas temperaturas encontradas nas

pistas do aeroporto internacional de Brasília. Entretanto, este aspecto não foi analisado neste trabalho.

2) Quanto ao procedimento de dosagem

O procedimento simplificado de dosagem adotado para CBUQ, adotado pela 3ª UNIT/DNIT e baseado nos parâmetros volumétricos Vv e RBV, se mostrou adequado para a dosagem de misturas asfálticas contínuas para fins aeroportuários. Este método não contempla a determinação da estabilidade e da fluência, e estes dados não foram medidos neste trabalho.

3) Quanto à compactação das placas

A relação entre as combinações de pares de grupos mostrou que a placa AZR foi a que apresentou uma compactação mais homogênea, visto que, de um modo geral mostrou melhores níveis de significância entre os grupos. Já a placa DZR foi a que apresentou o pior resultado apresentando níveis de significância mais baixos entre os grupos e assim, apresentando valores de %Vv mais dispersos. Também, a placa AZR foi a que apresentou o maior volume de vazio médio 6,7%, enquanto a placa BZR e placa DZR apresentaram volume de vazios médio igual a 5,6% e 5,9%, respectivamente. Embora as placas não tenham atingido a compactação desejada em projeto, de uma forma geral, os resultados mostram que o processo de compactação foi mais eficiente na faixa central da placa. Os corpos de prova nos cantos apresentaram os valores mais elevados de Vv e devem ser descartados ou analisados com cuidado para utilização em ensaios mecânicos. Porém, acredita-se que o grau de compactação médio atingido, da ordem de 97,4%, não invalida os ensaios de mancha de areia, drenabilidade e atrito, os quais em geral envolveram a região central das placas.

4) Quanto às Características Funcionais

A mistura cuja curva granulométrica passa acima da zona de restrição da metodologia da Superpave, aqui denominada como AZR, apresentou uma macrotextura muito aberta, de acordo com os resultados dos ensaios de mancha de areia. No ensaio de drenabilidade, esta

mistura apresentou uma vazão média de 0,078 l/s, valor este intermediário com relação às demais misturas.

Embora os ensaios de mancha de areia e de drenabilidade determinem de maneira direta ou indireta a profundidade média dos canais superficiais de escoamento da água, os resultados destes ensaios não apresentaram uma boa correlação. Isto é devido à macrotextura muito aberta apresentada pela mistura AZR, visto que ela apresentou maior percentual de agregado graúdo na composição da mistura.

Quanto à microtextura, caracterizada com Pêndulo Britânico, a mistura AZR foi classificada como “rugosa”, enquanto as demais se enquadraram como “muito rugosas”.

A mistura DZR, cuja curva granulométrica passa dentro da zona de restrição da metodologia da Superpave, apresentou uma macrotextura aberta, a partir de medidas de mancha de areia. Apresentou ainda a menor vazão da água pelos canais naturais da mistura (0,060 l/s) no ensaio de drenabilidade, com relação às demais misturas. Quanto à microtextura, os valores obtidos com Pêndulo Britânico para a mistura DZR apresentaram classificação que pode ser enquadrada como Muito Rugosa.

Já a mistura BZR, cuja curva granulométrica passa abaixo da zona de restrição da metodologia da Superpave, foi a que apresentou melhores resultados em todos os ensaios funcionais. Apresentando uma macrotextura aberta, a partir de medidas de mancha de areia. Apresentou ainda a melhor vazão da água pelos canais naturais da mistura (0,118 l/s) no ensaio de drenabilidade, com relação às demais misturas.

Quanto à microtextura, os valores obtidos com Pêndulo Britânico para a mistura BZR apresentaram classificação que pode ser enquadrada como Muito Rugosa.

De uma forma geral não se encontrou uma boa correlação entre os resultados do ensaio de mancha de areia e drenabilidade para as medidas estudadas, em função de serem muito abertas.

Com relação ao atrito médio das três misturas, a combinação dos parâmetros de macrotextura e microtextura resultou no cálculo do Índice Internacional de Atrito (IFI) que foi determinado para diferentes velocidades. Ao observar os valores do IFI para velocidade de 65 km/h, velocidade referente ao aparelho MuMeter utilizado pela Infraero para medir o atrito das pista

de pouso dos principais aeroportos do país, as misturas asfálticas apresentaram os valores de 0,42 para a mistura AZR, 0,46 para a mistura DZR e 0,50 para a mistura BZR. Considerando-se que para o índice de atrito mínimo requerido pelo DAC que é de 0,50, apenas a mistura BZR atenderia a esta especificação. Porém, vale ressaltar que as medidas de macrotextura e microtextura foram realizadas por meio dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico, respectivamente.

5) Quanto às Características Mecânicas

A resistência à tração das misturas AZR e DZR apresentaram valores de RT inferiores em relação à mistura BZR. Sendo que o menor valor foi o determinado para a mistura AZR.

Da mesma forma para os valores de Módulo de Resiliência, um maior módulo foi determinado para a mistura BZR e o menor valor para a mistura DZR.

A faixa BZR, que possuía uma quantidade maior de material fino foi a que teve a melhor vida de fadiga para a faixa de tensão imposta nos ensaios de laboratório. Entretanto esta mistura apresentou o valor mais elevado para o expoente n_2 , sendo, portanto, mais sensível ao estado de tensões para determinação de sua vida de fadiga.

6) Quanto ao dimensionamento da nova pista do AIB

Nota-se que o método convencional de dimensionamento utilizado está desatualizado devido à inexistência de novos ábacos para as aeronaves de grande porte. Isto faz com que a carga por roda destas aeronaves seja limitada no valor de 16.160 kgf, bem inferior aos valores reais.

Com relação à utilização da nova metodologia usada pela FAA, por meio da utilização o programa FAARFIELD para o cálculo das tensões e deformações desenvolvidas na estrutura do dimensionamento, os resultados encontrados para a estrutura do pavimento construído no Aeroporto Internacional de Brasília mostram uma tendência de ruptura prematura do revestimento asfáltico, devido ao Fator Acumulativo de Danos (CDF) para este critério de ruptura ser maior que o valor unitário. Isto indica que a necessidade de reforço do revestimento após cerca de oito anos de uso da nova pista do AIB.

Com relação às três leis de fadiga obtidas em laboratório, os revestimentos asfáltico AZR e DZR apresentaram melhor desempenho, considerando a espessura adotada de 14 cm de revestimento e o nível de tensões gerado pelas solicitações das aeronaves. Entretanto é possível determinar uma espessura adequada para que cada mistura, inclusive a BZR, que atenda ao critério de ruptura de fadiga dentro da vida de projeto.

As análises mecánísticas com o programa FAARFILED mostraram que o maior consumo de fadiga para a estrutura e tráfego da segunda pista do AIB é devido à aeronave Airbus A319-100 e não a ao Avião de projeto (MD-11), prescrito pela metodologia convencional.

6.1. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para continuidade desta pesquisa, recomenda-se:

1. Analisar misturas para fins aeroportuários confeccionadas com ligantes modificados para uma possível comparação com as misturas aqui analisadas. Estes ligantes modificados têm como característica o maior ponto de amolecimento e a maior viscosidade com relação ao ligante convencional apresentando maior resistência a deformações permanentes a elevadas temperaturas;
2. Confeccionar placas maiores e utilizando um compactador de rolo mecânico, mais pesado e mais eficiente;
3. Complementar a campanha de ensaios mecânicos, incluindo ensaios de fluência estática e dinâmica;
4. Analisar mecanicamente possíveis corpos-de-prova retirados das placas. Para comparações das influências do tipo de compactação utilizadas;
5. Realizar ensaios de deformação permanente para verificar a resistência das misturas em relação ao afundamento nas trilhas de roda;
6. Realizar uma análise mecánística que considere a evolução de danos na camada de revestimento asfáltico com base na Teoria de Danos em Meios Contínuos.

Referências Bibliográficas

- ABPv. (1999). Associação Brasileira de Pavimentação. Informativo técnico sobre avaliação da resistência à derrapagem através da aparelhagem portátil. Boletim Técnico nº 18. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ABPv. (1996). Associação Brasileira de Pavimentação. Projeto de Pavimento de Aeroportos - Método FAA-ICAO. Boletim técnico Nº 17. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Albano, J. F. (1998). Efeitos da variação de carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) . Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS: 1998, 138p.
- Alves, C. (2007). Módulo 2 - Aeronaves e Comprimento de Pistas. Acesso em Janeiro de 2009, disponível: http://www.armazemvirtual.com/gema/conteudo_arquivo/150907_0944A5.pdf
- ANBT. (1989). Derivado de Petróleo - Determinação dos Pontos de Fulgor e de Combustão em vaso aberto Cleveland: NBR 11341 - MB 50. Rio de Janeiro, RJ/ Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ANP. (2005). Agência Nacional de Petróleo. Resolução ANP Nº 19, de 11 de julho de 2005 .
- Aps, M. (2006). Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo índice combinado IFI - International Friction Index para Revestimentos Asfálticos. Tese de Doutorado, USP, São Paulo, 2006. 179p.
- ASG. (2007). Aviação Comercial: Por que caem os aviões. Air Safety Group, Disponível em <http://www.airsafetygroup.com.br/>, Acesso em Janeiro 2009.
- ASTM. (2001-a). American Society for Testing and Materials C 127-01. Standart test Method for Density, Relative Density (Specfic Gravity), and Absorption of coarse Aggregate . Current edition approved Aug. 10, 2001. Published October 2001. Originally published as C 127 – 36 T. Last previous edition C 127 – 88 (2001).
- ASTM. (2001-b). American Society of Testing Materials. ASTM E 965. Standard test method for measuring pavement macro texture depth using a volumetric technique . USA.
- ASTM. (1995-a). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer: ASTM D 4402/05. American Society for Testing and Materials.
- ASTM (1995-b) Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures: ASTM D 4123-82. American Society for Testing and Materials.
- Benevides, S. (2000). Análise comparativa dos métodos de dimensionamento dos pavimentos asfálticos – método tradicional do DNER e método de resiliência da COPPE. 2000. 176 f. Dissertação (Mestrado). Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

- Bernucci, L., Motta, L., Ceratti, J., & Soares, J. (2006). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2006. 504 f. Incluindo Bibliografia. Patrocínio Petrobrás.
- Boeing. (2008). statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959 - 2007. Acesso em Outubro de 2008, disponível em Boenig: <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>
- Brill, D., & Hayhoe, G. (2004). Multiple-Gear Analisis for Flexible Pavement Design in LEDFAA. FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference. Atlantic City, New Jersey, USA: 10p.
- Cavalcante, F., Cavalcante Filho, P., Macêdo, J., Albernaz, C., & Sales, E. (2006). Avaliação Estrutural Empírico-Mecanística da Pista de Pouso e Decolagem do Aeroporto de Marabá/PA. Goiânia, GO, Brasil: 37ª Reunião Anual de Pavimentação. 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária.
- CBAER. (1986). Código Brasileiro de Aeronáutica - Lei nº 7.565 de 19 de dezembro de 1986. Título III: Da Infra-Estrutura Aeronáutica. Capítulo II: Da Infra-Estrutura Aeroportuária, Seção I: Dos Aeródromos, Artigo 30.
- CENIPA. (2007). Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, Disponível em www.cenipa.aer.mil.br, Acesso em março 2008.
- CENIPA. (2008). Centro de Investigação e Previção de Acidentes Aeronáuticos. Relatório Final A-Nº 005/CENIPA/2008. Comando da Aeronáutica: Estado-Maior da Aeronáutica.
- CENIPA. (2009). O que é considerado acidente aéreo. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, Disponível em www.cenipa.aer.mil.br, Acesso em Janeiro 2009.
- CNT. (2006). Atlas do Transporte. 1ª Edição, <http://www.cnt.org.br>: Acesso: Janeiro de 2009.
- CONTRAN. (2006). Conselho Nacional de Trânsito, Resolução Nº 210 - Art. 2º - § 1º. Brasília, DF, Brasil: MINISTÉRIO DAS CIDADES.
- DAC. (2001). Departamento de Aviação Civil. Requisitos de Resistência à Derrapagem para pistas de pouso e decolagem. Instrução de Aviação Civil - Normativa - IAC 4302. Brasil: Departamento de Aviação Civil - Comando da Aeronáutica.
- Dantas Neto, S. A. (2001). Materiais Asfáltico Alternativos para uso em Pavimentação. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 170p.
- DIRENG. (2002). Especificação Gerais para Obras de Infraestrutura Aeroportuárias. ES: 04.05.610 - Concreto Betuminoso Usinado a Quente . Comando da Aeronáutica. Diretoria de Engenharia da Aeronáutica. Aprovada pela Portaria nº 08/DIR de 28 de Novembro de 2002.

- DNER. (1998). Agregado - Análise Granulométrica: ME 083/98. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Método de Ensaio: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1994). Agregado - Determinação do Índice de Forma: ME 086/94. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Método de Ensaio: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1997). Agregado - Determinação do teor de materiais pulverulentos: ME 266/97. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Método de Ensaio: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1998). Agregados - Abrasão Los Angeles: ME 035/98. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Método de Ensaio: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1997). Equivalente de Areia: ME 054/97. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Método de Ensaio: Departamento de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1998). Materiais Betuminosos - Determinação da Ductilidade : ME 163/98. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária Método de Ensaio, RJ/Brasil: Departamento de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1999). Material Betuminoso - Determinação da Penetração: ME 003/99. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária Método de Ensaio, RJ/Brasil: Departamento De infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1994). Material Betuminoso - Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura método da película delgada: ME 004/94. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária Método de Ensaio, RJ/Brasil: Departamento de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1994). Material finamente pulverizado - Determinação da Massa Específica Real: ME 085/94. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Método de Ensaio, RJ/Brasil: Departamento de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1994). Material termoplástico para determinação viária - Determinação do Ponto de Amolecimento (Método Anel e Bola): ME 247/94. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária Método de Ensaio, RJ/Brasil: Departamento de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1995). Misturas Betuminosas a Quente - Método Marshall: ME 043/95. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Método de Ensaio, RJ/Brasil: Departamento de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1997). Pavimentação - Concreto Betuminoso: ES 313/97. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Especificação de Serviços: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.
- DNER. (1997). Pavimentação - Concreto Betuminoso: ES 313/97. Rio de Janeiro, Norma Rodoviária de Especificação de Serviço, RJ/Brasil: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte.

- DOTY, R.N. (1975). "Study of Sand Patch and Outflow Meter Methods of Pavement Surface Texture Measurement". In Surface Texture versus Skidding Measurement, Frictional Aspects and Safety Features of Tire- Pavements Interactions, ASTM STP 583, ASTM, PP. 42-61.
- Drenth, K. (2002). Pavement Design Considerations Regarding the Introduction of the A380. FAA Airport Technology Transfer Conference, 13p.
- Duval, J., & Buncher, M. (2004). SUPERPAVE for Airfields. Presented for the 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference. Atlantic City, New Jersey, USA. 11p.
- FAA. (Draft for Planning Purposes). Airport Pavement Design and Evaluation. AC N° 150/5320-6E U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. Date: DRAFT FOR PLANNING PURPOSES Initiated by: AAS-100.
- FAA. (1995). Airport Pavement Design and Evaluation - AC N° 150/5320-6D. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, D.C., USA, 165p.
- FAA. (2006). Engineering Brief N° 59A Item P-401-Plant Mix Bituminous Pavements. Federal Aviation Administration, U.S Department of Transportation
- FAA. (2004). Measurement Construction, and maintenance of skid-resistant airport pavement surfaces. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation. Advisory Circular AC 150/5320-12C Change 1, 16/04/2004.
- FAA. (2007). Standard for Specifying Construction of Airports. Federal Aviation Administration, U.S Department of Transportation, Advisory Circular A.C 150/5370-10C, 29/09/2007: www.faa.gov.
- Farias, M. M., & Falcão, P. (2006). Relatório Técnico - Diagnóstico das causas para o aparecimento de trincas longitudinais na pista 11R/29L do Aeroporto Internacional de Brasília - DF. Interessado - Construtora BETER S.A. Brasília , DF, Brasil: Publicação G.RE.MMF – 001A/06.
- Garg, N., & Guo, E. M. (2004). Operational Life of Airport Pavements - Final Report. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington D. C., USA, 117 p.
- Haas, R., & Hudson, W. (1978). Pavement Management Systems. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 455p.
- Heyhoe, G. (2002). LEAF - A New Layered Elastic Computational Program for FAA Pavement Design and Evaluation Procedures. FAA Airport Technology Transfer Conference, 14p.
- Horonjeff, R. (1966). Aeroportos - Planejamento e Projeto (Planning and Design of Airports). Tradução e Adaptação por Heitor Lisboa de Araújo . Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 513p.

- ICAO. (1994). International Standards and Recommended Practices : Aircraft Accident and Incident Investigation. Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation. Montreal, Canadá: 8th ed.
- ICAO. (2004). International Standards and Recommended Practices. Aerodromes: Aerodrome Design and Operations. International civil Aviation Organization. Annex 14, 4th ed., v. 1, Montreal, Canadá. 2004.
- INFRAERO. (2009). A Infraero e o desafio do novo Brasil. Acesso em Janeiro de 2009, disponível em INFRAERO: http://www.infraero.gov.br/item_gera.php?gi=instempr&menuid=inst
- INFRAERO. (2008). Complexo Aeroportuário. Fonte: Aeroportos: www.infraero.gov.br
- INFRAERO. (2009). Superintendência de Planejamento e Gestão - PRPG / Movimento Operacional Acumulado da REDE INFRAERO (Janeiro até Dezembro de 2008). Acesso em Janeiro de 2009, disponível em Infraero - Aeroportos Brasileiros: http://www.infraero.gov.br/upload/arquivos/movi/mov.operac_1208.pdf
- James, R. S., Allen Cooley Jr., L., Ahlrich, R., Brown, E. R., & Prowell, B. (2008). Implementation of Superpave mix design for Airfield Pavements. Presented for the 2008 Transportation systems Workshop. Phoenix, Arizona.
- Joel, R., & Rapol, J. C.-1. (2006). Engineering Brief No. 59A Item P-401 Plant Mix Bituminous Pavements (Superpave). FAA- Federal Aviation Administration.
- Macedo, M. C. (2005). Estudo para a base técnica de um Sistema de Gerência de Pavimentos para redes regionais de aeroportos. São José dos Campos, SP, Brasil: Tese de Doutorado, ITA. 233p.
- Medina, J.; Motta, L. M. G. (2005). Mecânica dos Pavimentos, 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: UFRJ.
- Mello, L.; Farias, M. M. (1996). Avaliação de uma estrutura de um pavimento aeroportuário considerando os conceitos mecanísticos. 37ª Reunião Anual de Pavimentação. 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. 37ª RAPv/11º ENACOR. Goiânia-GO-Brasil.
- Merigui, J.; Peres, R.; SILVA, G. (2006). Influência da Natureza da Superfície de contato na geração de aderência nos pavimentos aeroportuários. V Jornada luso-Brasileira de Pavimentos: Políticas e Tecnologias . Recife, PE: V-039.
- Morrilha Jr., A. (2004). Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas. Florianópolis, Santa Catarina/SC, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.
- Motta, L. M. G.(1991). Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. 1991. 366 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- Motta, L., Tonial, I., Leite, L., & Constantino, R. (1996). *Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas*. Tradução Comentada. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Museu, A. (2009). Acesso em Janeiro de 2009, disponível em Aviação Comercial Brasileira - Frota Atual: <http://www.aeromuseu.com.br/frota.pdf>
- Pinto, S. (2001). *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. 1991. 478 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Planorcon. (2003). *Memorial de Cálculo do Pavimento Flexível*. Planorcon Estudos e Projetos de Engenharia.
- Population, I. O. (2007). In United Nations Statistics Division. *Demographic and Social Statistics. Statistical Products and Databases. Social Indicators*. <http://unstats.un.org/unsd/demographic/products/socind/population.htm>: acessado em Janeiro 2009.
- Ramos, P. P. M. (2009). *Análise de Deformações Transientes em Misturas Asfálticas Aplicadas como Elemento Impermeabilizante em Barragens de Enrocamento*. Publicação GDM- 171/2009, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 182 p.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brow, R., Lee, D., & Kennedy, T. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA. Maryland, USA.
- Rodrigues Filho, O. S. (2006). *Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários - Estudo de caso do Aeroporto Internacional de São Paulo/Congonhas*. 263p. São Paulo, SP, Brasil: Dissertação de Mestrado, ITA.
- Santos, E. L. (2004). *Análise histórica de medição de atrito das Pistas do Aeroporto Santos Dumont - RJ*. Monografia de Graduação, ITA, São José dos Campos, SP, 124p.
- Shahin, M. (1994). *Pavement Management Airports, Roads and Parking Lots*. New York: Chapman & Hall, 450p.
- Shahin, M. Y. (1994). *Pavement management for airports, roads and parking lots*. New York, USA: Chapman & Hall, 450p.
- Silva, J. P. (2008). *Aderência Pneu-pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários*. Publicação xix, 134 p., 297 mm ENC/FT/UnB, Dissertação de Mestrado, Geotecnia, 2008. Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Soares, J., Freitas, F., Castelo Brasco, J., & Motta, L. (2000). *Método de Previsão do Teor ótimo de ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ*. 32ª Reunião Anual de Pavimentação, APBv, Brasília, v. I, p. 148-160.
- Space Virtual Airline. (2009). Acesso em Janeiro de 2009, disponível em Space Virtual Airline - Frota- Médio Curso- Longo Curso: www.spaceva.org

- Trichês, G., & Cardoso, A. (2001). Avaliação da capacidade de aterros e subleito de rodovias utilizando o penetrômetro dinâmico de cone e a Viga Benkelman. São Paulo, SP, Brasil: In: Transporte em transformação. Makron Books, 2001. v. 1. p. 35-49.
- Trichês, G., Fontes, L., & Dal Pai, C. (2004). Procedimentos técnicos para o emprego do cone de penetração e investigação de pavimentos urbanos. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 35. 2004. Anais...v. 1. p. 1 - 13.
- Vasconcelos, K. (2004). Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transporte, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 149fl.