



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

AMANDA CAVALCANTE RODRIGUES

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA ADERÊNCIA
PNEU-PAVIMENTO

FORTALEZA

2013

AMANDA CAVALCANTE RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA ADERÊNCIA
PNEU-PAVIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

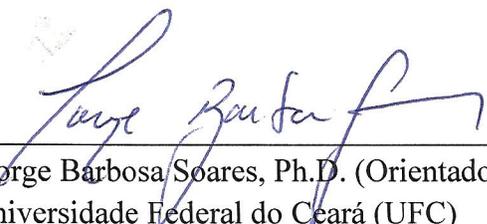
-
- R611a Rodrigues, Amanda Cavalcante.
Avaliação da influência da granulometria na aderência pneu-pavimento / Amanda Cavalcante Rodrigues. – 2013.
98 f. : il., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2013.
Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.
1. Transportes. 2. Atrito. 3. Pavimentos. 4. Segurança viária. I. Título.

AMANDA CAVALCANTE RODRIGUES

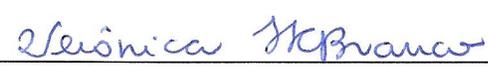
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA NA ADERÊNCIA
PNEU-PAVIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

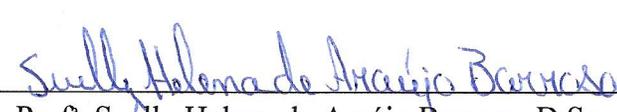
Aprovada em: 08 / 11 / 2013.



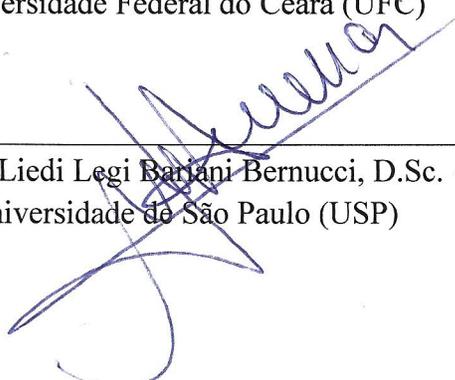
Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Profª. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Profª. Suely Helena de Araújo Barroso, D.Sc.
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Profª. Liedí Legi Bariani Bernucci, D.Sc.
Universidade de São Paulo (USP)

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter colocado na minha vida as pessoas aqui listadas;

Aos meus pais, Selma e Rosenildo, que sempre se preocuparam em proporcionar aos seus filhos uma educação decente seguida de bons exemplos;

Ao professor Jorge Soares por ter feito a diferença tanto na minha vida acadêmica como na minha vida pessoal. Por ter me posto a momentos que eu jamais pensei em viver e que foram essenciais na minha formação;

Às professoras Suelly Barroso e Verônica Castelo Branco por participarem da minha banca, tanto da qualificação como da defesa da dissertação. Além do conhecimento transmitido e por servirem de inspiração a muitos alunos como eu;

À professora Liedi Bernucci por ter aceitado a participar da minha banca e por ter feito grandes contribuições para o presente trabalho;

Ao professor Manoel Neto, ao Lucas Babadopulos e à Juceline Bastos pela ajuda na estatística e por serem tão solícitos;

Ao pessoal do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da UFC, em especial ao André, ao Daniel, ao Michel, ao Rômulo e ao Seu Francisco, que me ajudaram com os trabalhos em campo. À Annie, sempre muito atenciosa, ao Synardo e ao Jardel;

Aos amigos e aos colegas do DET, em especial ao Nelson, à Lucimar, ao Pedro Bastos, ao William, ao Fernando Dácio, ao Márcio, ao Antônio Jr, ao Felipe, ao Iuri, ao Isael e ao Zacarias;

À minha amiga e companheira, Kássia, que sempre esteve do meu lado me ajudando até nos trabalhos em campo;

À Copa Engenharia, em especial ao Eng. Alber, por ter me recebido nas obras e pelas informações fornecidas;

À Insttale, em especial ao Hamilton e ao David, por terem me permitido o acesso às obras;

Ao Dr. Franklin e ao Carlos Cunha pela atenção e pelas informações fornecidas;

Ao CNPq pela bolsa concedida;

Enfim, a todos, muito obrigada!

RESUMO

Uma dificuldade que acomete as empresas de construção pesada em relação à segurança viária é atingir valores mínimos de aderência exigidos em campo para o revestimento de pavimentos. Valores mínimos de microtextura, ensaiados através do pêndulo britânico, e faixas de macrotextura, ensaiadas pelo ensaio de mancha de areia, são encontrados no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT de 2006. Nas situações onde esses parâmetros ligados à aderência são controlados, o revestimento precisa ser reexecutado quando a micro e a macrotextura não se aproximam do exigido pelas normas. Trata-se de um problema apenas observado durante a fase de construção, uma vez que não se determina a aderência em laboratório, na fase de projeto. Pesquisas apontam que as mudanças nas propriedades dos agregados e na granulometria podem afetar a micro e a macrotextura da camada de rolamento. A fim de contribuir na questão da aderência, buscando a previsão desse parâmetro ainda indiretamente em laboratório, objetivou-se desenvolver uma metodologia capaz de testar granulometrias para verificar o efeito das frações dos materiais das peneiras nesta aderência da superfície do pavimento. A metodologia proposta consistiu em comparar a textura da massa asfáltica compactada em campo e em laboratório utilizando os ensaios de mancha de areia e de pêndulo britânico. Objetivou-se, ainda, desenvolver um modelo capaz de prever o valor de macrotextura da camada de rolamento através de granulometrias das misturas asfálticas estudadas. O modelo foi composto por dados de frações retidas entre as peneiras nº40 e 3/8". Os principais resultados obtidos levaram à conclusão de que a metodologia desenvolvida em laboratório foi consistente no aspecto de microtextura entre campo e laboratório. Em relação ao modelo, houve uma correlação considerada satisfatória, portanto, indicando o potencial da previsão da macrotextura ainda na fase de projeto a partir da granulometria a adotar.

PALAVRAS-CHAVE: atrito, granulometria, macrotextura, microtextura.

ABSTRACT

A difficulty that affects pavement contractors regarding road safety is to achieve minimum values of surface friction required to the pavement in the field. Minimum values of microtexture tested through the British pendulum and ranges of macrotexture tested by the sand patch test are found in the DNIT Manual of Asphalt Pavements Restoration (2006). In situations where the friction parameters are controlled, oftentimes the pavement needs to be reexecuted when the micro and macrotexture do not meet the required values. This is a problem only observed during the construction phase as friction is not determined indirectly in the laboratory during the design phase. Research indicates that changes in the properties of the aggregates and the particle size can affect the microtexture and macrotexture of the surface course. In order to contribute to the topic of friction, seeking the prediction of this parameter in the laboratory, this work aimed to develop a methodology capable of evaluating gradations and the effect of the sieve fractions of materials in the of pavement surface friction. The proposed methodology consisted in comparing the texture of the asphalt mixture compacted in laboratory, and field tests using sand patch and British pendulum. It also aimed to develop a model to predict the value of macrotexture of the surface course through the gradation of the asphalt mixtures studied. The model was composed by data of retained fractions in sieve #40 to 3/8". The main results obtained led to the conclusion that the methodology developed in the laboratory was consistent in the aspect of microtexture between field and laboratory. Regarding the model, there was a satisfactory correlation, indicating the potential of predicting macrotexture in the design phase from the mixture gradation.

KEYWORDS: friction, gradation, macrotexture, microtexture.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
INTRODUÇÃO	13
1.1. Considerações Iniciais.....	13
1.2. Problema de Pesquisa.....	15
1.3. Objetivos da Pesquisa	15
1.3.1. Objetivo Geral.....	15
1.3.2. Objetivos Específicos.....	15
1.4. Estrutura da Dissertação.....	16
CAPÍTULO 2.....	17
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Considerações Iniciais.....	17
2.2. Agregado	17
2.2.1. Propriedades dos Agregados	21
2.2.2. Forma, Angularidade e Textura	21
2.3. Aderência Pneu-Pavimento	23
2.3.1. International Friction Index - IFI	26
2.4. Textura do Pavimento	28
2.4.1. Características de Polimento	29
2.4.2. Métodos para Avaliação de Resistência ao Polimento e à Degradação	32
2.5. Compactação em Laboratório	40
2.6. Medidas de Textura e de Atrito.....	43
2.6.1. Textura	43
2.6.2. Atrito	46
2.7. Modelos Preditivos de Macrotextura	49
2.8. Considerações Finais.....	51
CAPÍTULO 3	52
MATERIAS E MÉTODOS.....	52
3.1. Considerações Iniciais.....	52
3.2. Metodologia Campo <i>versus</i> Laboratório.....	52
3.3. Local de Estudo.....	53
3.4. Granulometrias dos Trechos Ensaçados	54
3.5. Compactação em Campo <i>versus</i> em Laboratório.....	58
3.6. Considerações Finais.....	64
CAPÍTULO 4.....	65
APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	65

4.1.	Considerações Iniciais.....	65
4.2.	Análise dos Parâmetros Estatísticos: Campo <i>versus</i> Laboratório	65
4.3.	Comparação da Metodologia de Compactação: Campo <i>versus</i> Laboratório	67
4.4.	Análise das Granulometrias dos Trechos Estudados.....	73
4.5.	Estimativa da Macrot textura através da Granulometria	77
4.5.1.	Modelagem das Granulometrias dos Trechos Estudados.....	77
4.5.2.	Modelagem das Granulometrias de Outros Estudos	79
4.6.	Validação do Modelo Proposto.....	81
4.7.	Considerações Finais.....	83
CAPÍTULO 5		84
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS		84
5.1.	Considerações Iniciais.....	84
5.2.	Conclusões	84
5.3.	Recomendações para Pesquisas Futuras	86
REFERÊNCIAS		87
APÊNDICE A - TABELAS DE DADOS DOS 10 TRECHOS ESTUDADOS		93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de curvas granulométricas pelo SHRP-Superpave.....	20
Figura 2 - Propriedades dos agregados: forma, angularidade e textura	21
Figura 3 - Principais mecanismos de aderência pneu-pavimento	23
Figura 4 - Diferença entre macrotextura e microtextura	28
Figura 5 - Gráfico das faixas granulométricas para concreto asfáltico do DNIT	30
Figura 6 - Gráfico das faixas granulométricas para concreto asfáltico da DIRENG	31
Figura 7 - Conjunto para o ensaio Treton.....	34
Figura 8 - <i>Micro-Deval</i>	35
Figura 9 - Máquina PSV(a) e amostra (b).....	36
Figura 10 - AIMS	37
Figura 11 - Imagens dos agregados: partículas de agregados antes da solicitação com o <i>Micro-Deval</i> (a), partículas de agregados após a solicitação com o <i>Micro-Deval</i> (b), textura da superfície do agregado antes da solicitação com o <i>Micro-Deval</i> (c), textura da superfície do agregado após a solicitação com o <i>Micro-Deval</i> (d).....	38
Figura 12 - Agregados antes e depois de passarem pelo processo de abrasão <i>Los Angeles</i>	39
Figura 13 - Equipamento <i>Wehner-Schulze</i> (WS)	40
Figura 14 - Amostras de mistura asfáltica (a) e agregados (b).....	40
Figura 15 - Compactação da placa	42
Figura 16 - Aparelhagem usada para o ensaio de mancha de areia.....	43
Figura 17 - Procedimento de execução do ensaio de mancha de areia	44
Figura 18 - Perfilômetro a <i>laser</i> - <i>Virginia DOT Laser Texture Meter</i> - USA (Wambold e Henry, 2002)	45
Figura 19 - Pêndulo Britânico	46
Figura 20 - <i>MuMeter</i>	48
Figura 21 - Equipamento <i>Skiddometer</i>	48
Figura 22 - <i>Grip Tester</i>	49
Figura 23 - Trechos estudados	53
Figura 24 - Granulometrias dos oito trechos enquadradas na Faixa C do DNIT	55
Figura 25 - Granulometria do único trecho enquadrado na Faixa B do DNIT.....	55
Figura 26 - Granulometrias graúdas de acordo a classificação da AASHTO M 323 (2012).....	56
Figura 27 - Granulometrias miúdas de acordo a classificação da AASHTO M 323 (2012).....	56
Figura 28 - Procedimento em campo: compactação, ensaio de pêndulo britânico e ensaio de mancha de areia.....	59
Figura 29 - Procedimento de compactação em amostras de TS proposto por Pereira (2010b).....	61
Figura 30 - Procedimento para confecção de corpos de prova em laboratório proposto na presente pesquisa para a realização do ensaio de aderência	61

Figura 31 - Teste comparativo do ensaio de mancha de areia com volumes diferentes.....	63
Figura 32 - Variabilidade de HS para revestimentos novos	66
Figura 33 - Amostras após a compactação em laboratório	67
Figura 34 - Comparação dos dados de macrotextura: campo <i>versus</i> laboratório dos trechos estudados	68
Figura 35 - Comparação dos dados de microtextura: campo <i>versus</i> laboratório dos trechos estudados.....	68
Figura 36 - Comparação dos dados de microtextura: campo <i>versus</i> laboratório dos trechos estudados e amostras de laboratório com 20 e 10mm de espessura	70
Figura 37 - Comparação dos dados de microtextura: campo <i>versus</i> laboratório dos trechos estudados e amostras de laboratório com 20mm de espessura	70
Figura 38 - Texturas das amostras compactadas em laboratório com espessuras diferentes	71
Figura 39 - Comparação dos dados de macrotextura: campo <i>versus</i> laboratório dos trechos estudados e das amostras de laboratório com 20 e 10mm de espessura	72
Figura 40 - Comparação dos dados de macrotextura: campo <i>versus</i> laboratório dos trechos estudados e amostras de laboratório com 20mm de espessura	73
Figura 41 - <i>Ranking</i> da microtextura dos trechos em campo	74
Figura 42 - <i>Ranking</i> da macrotextura dos trechos em campo	74
Figura 43 - Faixas entre as peneiras 1/2" e nº10 responsável pela macrotextura.....	77
Figura 44 - Granulometrias SP enquadradas na antiga Faixa C do DNIT	80
Figura 45 - Granulometrias estudadas por Pereira (2010a) e do Trecho Experimental do Aeroporto Pinto Martins.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição de misturas densas miúdas e graúdas (AASHTO M 323, 2012)	20
Tabela 2 - Classificação do IFI (APS, 2006).....	27
Tabela 3 - Classificação da textura	28
Tabela 4 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico (DNIT 031/2004-ES)	30
Tabela 5 - Faixas granulométricas da DIRENG (Especificações Gerais 04.05.610, 2002)	31
Tabela 6 - Classificação dos resultados de mancha de areia (APS, 2006 e DNIT, 2006).....	45
Tabela 7 - Classificação pêndulo britânico (DNIT, 2006)	47
Tabela 8 - Classificação adaptada de misturas densas graúdas e miúdas da AASHTO M 323 (2012). 57	
Tabela 9 - Teor de ligante e volume de vazios das misturas dos trechos analisados	58
Tabela 10 - Tipo e nº de passadas dos rolos de pneu e liso utilizados na compactação dos trechos estudados	60
Tabela 11 - Resultados dos valores de HS com volume de 25cm ³ e de 12,5cm ³	64
Tabela 12 - Análise dos dados de pêndulo britânico dos trechos estudados em campo e em laboratório	66
Tabela 13 - Análise dos dados de mancha de areia dos trechos estudados em campo e em laboratório	66
Tabela 14 - Porcentagem de agregados passantes das misturas estudadas	75
Tabela 15 - Valores de HS medidos através do ensaio de mancha e areia e calculado através do modelo proposto.....	79
Tabela 16 - Resumo dos parâmetros dos modelos testados	81
Tabela 17 - Resultados de HS medido e de HS calculado pelos modelos desenvolvidos.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAF	Angularidade do Agregado Fino
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AIMS	<i>Aggregate Imaging Measurement System</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBTM	<i>Béton Bitumineux Très Mince</i> (Concreto Betuminoso muito Delgado)
BPN	<i>British Pendulum Number</i>
CA	Concreto Asfáltico
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CCP	Concreto de Cimento Portland
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPA	Camada Porosa de Atrito
DAC	Departamento de Aviação Civil
DER-CE	Departamento Estadual de Rodovias do Ceará
DIRENG	Diretoria de Engenharia da Aeronáutica
DM	Diâmetro Máximo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HM	Altura Média da Mancha de Areia
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
IRI	Índice Internacional de Irregularidade
IFI	<i>International Friction Index</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PDI	Processamento Digital de Imagens
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congress</i>
PRF	Polícia Rodoviária Federal
PSV	<i>Polish Stone Value</i>
SEINF	Secretaria da Infraestrutura
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SRT	<i>Skid Resistance Test</i>

TMN	Tamanho Máximo Nominal
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TS	Tratamento Superficial
USP	Universidade de São Paulo
V _v	Volume de Vazios
WS	<i>Wehner-Schulz</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Um pavimento é constituído por diversas camadas, sendo que para cada uma delas é selecionado geralmente, mais de um material de acordo com a função estrutural correspondente. A camada final, dita de rolamento, atende a requisitos volumétricos e mecânicos para que o mesmo suporte as cargas mecânicas do tráfego e as chamadas cargas ambientais, que são as intempéries. Além disso, há também o parâmetro funcional relativo à aderência pneu-pavimento para o qual, na maioria das vezes, não existe uma preocupação por parte dos órgãos rodoviários. É necessário que os parâmetros relatados sejam atendidos para oferecer segurança, conforto e economia ao usuário.

O bom desempenho do usuário depende da combinação de características, como pavimento, geometria da via, sinalização horizontal e vertical e da clara definição de circulação. Tais características somadas às propriedades dos veículos, aos fatores comportamentais e às condições climáticas influenciam diretamente no grau de conforto e segurança no sistema rodoviário e, conseqüentemente, na propensão para ocorrer acidentes (CNT, 2012). Muitos acidentes de trânsito ocorrem devido à má condição da camada de rolamento das rodovias, com depressões, recalques e/ou buracos que podem levar à perda da aderência pneu-pavimento causando, desse modo, colisões frontais por causa da mudança brusca de direção e perda de controle do veículo (CNT, 2012).

Em relação à geometria da via, que está diretamente relacionada à distância de visibilidade e à velocidade máxima que pode ser percorrida pelo motorista, aspectos como habilidade do motorista em manter o controle do veículo e identificar situações e características perigosas, afetam as condições de segurança viária. Assim, a implantação de projetos geométricos inadequados causa acidentes, limitações da capacidade do tráfego da rodovia e aumento dos custos operacionais (CNT, 2012). A sinalização rodoviária também é essencial para a segurança dos usuários e tem como objetivo transmitir aos motoristas informações adequadas no momento em que são necessárias, tais como: cuidados a tomar por motivo de segurança, informações quanto aos destinos a seguir e faixas de tráfego a utilizar.

Estudos de Nodari (2003) mostram que um dos maiores responsáveis pelos acidentes é o fator humano, seguido do fator viário ambiental, e, por último, do fator veículo. Foram considerados fatores humanos as deficiências em ação, em comportamento e saúde, erros de percepção e de falta de habilidade. Projeto desfavorável, meio ambiente adverso, sinalização e obstáculos foram computados à via; e aos veículos, os defeitos em pneus, freios ou outras falhas devido à falta de manutenção.

Em relação aos fatores responsáveis por acidentes, um estudo realizado por Sabey (1980) mostrou que nem sempre um fator ocorre isoladamente. Os resultados foram analisados por uma equipe multidisciplinar que buscou as causas de acidentes, considerando as possíveis interações que ocorrem. Ou seja, um acidente pode ocorrer por mais de um fator contribuinte.

Estudos mostram reduções de 25 a 54% no número total de acidentes quando há melhoria na resistência à derrapagem associada aos parâmetros de micro e de macrotextura. Considerando apenas os acidentes com pavimento molhado, os percentuais de redução são ainda mais expressivos, variando de 47 a 83% (NODARI, 2003). O aumento de 10% na referida resistência pode reduzir em 13% os níveis de acidentes em pistas molhadas (KOKKALIS e OLYMPIA, 1998). Com estes dados, a importância de estudos sobre a aderência em rodovias fica evidente, já que os acidentes rodoviários compõem um dos maiores problemas sociais e econômicos do Brasil, e ainda, uma das maiores causas de mortes no País, além de grande perda material e produtiva para a sociedade (CNT, 2012).

Outros fatores, desta vez relacionados à aderência pneu-pavimento como agregados e granulometria, podem afetar a micro e a macrotextura (STROUP-GARDINER *et al.*, 2001). Parâmetros característicos dos agregados tais como textura, angularidade e forma são determinados através de ensaios laboratoriais e por meio de imagens. Entretanto, o parâmetro de aderência não é tradicionalmente verificado em laboratório, apenas em campo, quando o revestimento já está executado. A finalidade do presente trabalho é contribuir na investigação, ainda em laboratório na fase de projeto, e por meio de um ensaio e de um modelo, sobre o efeito das porcentagens de agregados graúdos e miúdos (considerando o percentual passante em diferentes peneiras) na aderência em campo de misturas asfálticas.

1.2. Problema de Pesquisa

Muitos acidentes de trânsito são ocasionados, entre outros fatores, pela falta de aderência pneu-pavimento. Esta é agravada, em períodos chuvosos, pelo fenômeno de aquaplanagem. No Brasil, os revestimentos asfálticos são projetados para atender parâmetros volumétricos e mecânicos de dosagem (via de regra seguindo o procedimento de dosagem Marshall) sem, contudo, qualquer consideração sobre a questão da aderência, que é um fator importante no que diz respeito à segurança viária.

Há ocasiões em que a empresa de construção executa o revestimento conforme indicado no projeto e é cobrada para manter certo nível de aderência que muitas vezes não consegue ser atendido. Há diversos casos de não enquadramento destes revestimentos na exigência de aderência, principalmente em aeroportos, para as faixas granulométricas hoje estabelecidas. Não enquadramentos estes que levam a necessidade de reexecução e uma nova verificação da aderência só avaliada outra vez após a nova construção. Ou seja, é urgente um procedimento de verificação da aderência de misturas asfálticas em laboratório, com vistas a atender a critérios preestabelecidos deste importante parâmetro, ainda durante a fase de projeto, de modo a contribuir para segurança e evitar retrabalhos como os mencionados.

1.3. Objetivos da Pesquisa

1.3.1. *Objetivo Geral*

Avaliar a influência da granulometria dos agregados na aderência pneu-pavimento.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- I. Desenvolver uma metodologia capaz de comparar os resultados de laboratório de micro e de macrotextura com os resultados dos mesmos parâmetros obtidos em campo;
- II. Desenvolver um modelo capaz de prever o valor de macrotextura do revestimento através de frações de materiais retidos nas peneiras granulométricas de misturas asfálticas.

1.4. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho encontra-se organizado conforme descrito a seguir:

- **Capítulo 1:** apresenta o contexto no qual a pesquisa está inserida e os objetivos, além da organização da dissertação;
- **Capítulo 2:** traz a revisão bibliográfica, apresenta conceitos sobre agregados e granulometrias, discorre sobre aderência, tipos de medidas de textura e de atrito, além de aspectos importantes sobre as características de polimento de agregados em misturas asfálticas;
- **Capítulo 3:** apresenta os locais de estudo, as características das misturas asfálticas e das superfícies ensaiadas, além da metodologia proposta para a determinação da aderência em laboratório;
- **Capítulo 4:** apresenta as discussões sobre os resultados de micro e de macrotextura de campo e de amostras de laboratório, além do modelo de previsão proposto pela pesquisa;
- **Capítulo 5:** apresenta as conclusões obtidas na pesquisa, além de sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo, apresentam-se conceitos sobre agregados e granulometrias. Discorre-se sobre aderência e medidas de textura e de atrito do revestimento, assim como métodos de resistência ao polimento de agregados.

2.2. Agregado

Bernucci *et al.* (2010) definem agregado como um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas minerais em seu estado natural, ou britadas em seu estado processado, que podem ser artificiais de acordo com a sua natureza. Os agregados possuem propriedades geológicas, conforme a sua rocha de origem. Algumas características são importantes para a avaliação do desempenho em serviço, tais como: tipo de rocha, composição mineralógica, composição química, granulação, grau de alteração, tendência à degradação, abrasão ou fratura sob tráfego e o potencial de adesão do ligante asfáltico em sua superfície.

Os agregados podem ser classificados em três grupos quanto à natureza, o tamanho e a distribuição dos grãos (BERNUCCI *et al.*, 2010):

a) Quanto à natureza

- Naturais: são obtidos através de desmonte de rochas, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. Podem ser de origem ígnea, metamórfica e sedimentar. Exemplos: pedregulhos, britas, seixos, areias, etc;
- Artificiais: resíduos de origem industrial, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, argila calcinada (fabricada com o objetivo de alto desempenho) e argila expandida;
- Reciclados: materiais de reuso diversos, reciclagem de revestimentos asfálticos existentes e utilização de resíduos de construção civil. Esta forma reduz os impactos ambientais causados pela não disposição destes resíduos.

b) Quanto ao tamanho

Segundo DNIT 031/2004-ES, os agregados são classificados quanto ao tamanho em graúdo, miúdo e material de enchimento ou filler:

- Graúdo: material com dimensões maiores do que 2,00mm, ou seja, retido na peneira nº10;
- Miúdo: material com dimensões maiores do que 0,075mm e menores do que 2,00mm, ou seja, retido na peneira nº200 e passante na peneira nº10;
- Material de enchimento ou filler: material onde pelo menos 65% das partículas são menores do que 0,075mm, correspondente à peneira nº200.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM, C 294, 2012) considera como material graúdo o material retido na peneira de 4,75mm, correspondente à peneira nº4, e como material miúdo, aquele passante na mesma peneira. Algumas agências usam a peneira 2,38mm (Instituto de Asfalto) para a divisão entre agregado graúdo e miúdo.

Outro tipo de classificação quanto tamanho das partículas encontra-se descritas no método Bailey. O método avalia que os agregados graúdos são as partículas que, acondicionadas em certo volume, criam vazios que podem ser preenchidos por agregados de menor tamanho. Para isto, são necessárias mais de uma peneira de controle para divisão entre agregado graúdo e miúdo. A escolha da peneira irá depender do Tamanho Máximo Nominal (TMN), que, segundo a especificação Superpave, é definido como a 1ª peneira acima da peneira que retém mais do que 10% de material. Como decorrência da definição de graúdos e finos do Método Bailey, em uma mistura com TMN 37,5mm, por exemplo, as partículas de 9,5mm são consideradas agregado fino, pois preenchem os vazios deixados pelas partículas de 37,5mm, enquanto em uma mistura com TMN 12,5mm, as partículas com 9,5mm de diâmetro são consideradas agregado graúdo (CUNHA, 2004).

c) Quanto à distribuição dos grãos

A granulometria dos agregados é a distribuição das partículas por tamanho, expressa em função da porcentagem em peso ou volume total da mistura. A distribuição granulométrica afeta o desempenho das misturas asfálticas, no que diz respeito a quase todas as suas propriedades como: rigidez, trabalhabilidade, deformação permanente, entre outras, tornando-se assim uma característica importante.

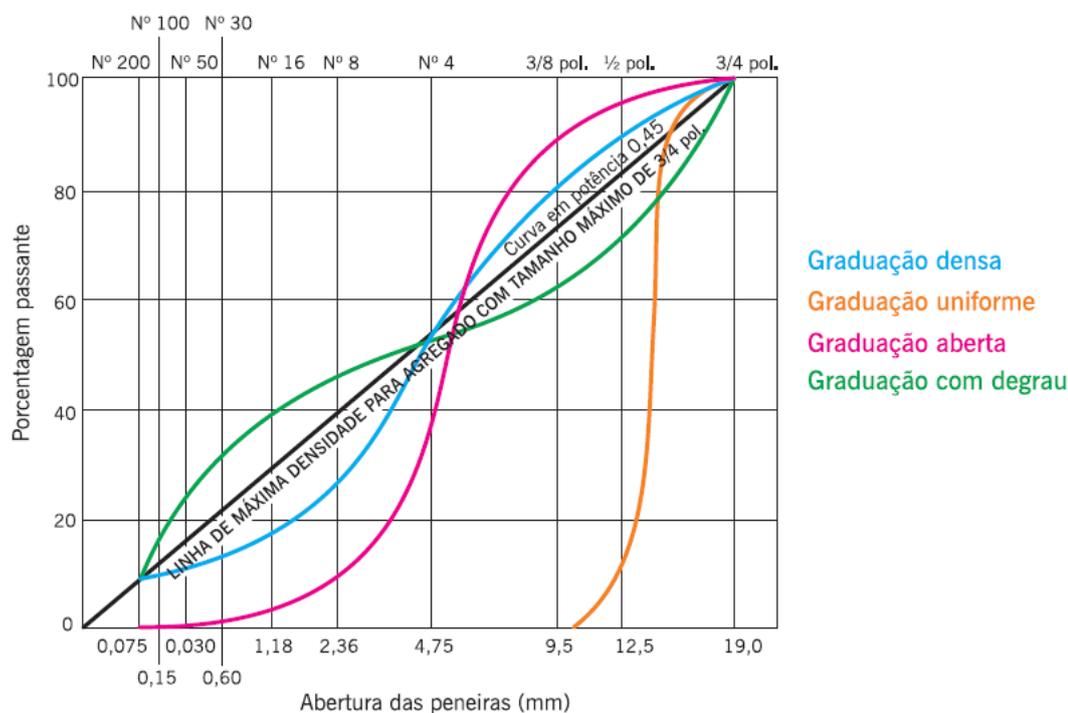
A análise das porcentagens dos agregados é realizada por meio de peneiramento, representada graficamente por uma curva granulométrica, onde a ordenada (em uma escala aritmética) indica a porcentagem total passante em peso em uma determinada peneira, e a abscissa (em escala logarítmica) indica as dimensões das aberturas das peneiras, como

descreve a norma DNER-ME 083/98. Já a metodologia SHRP-Superpave (2001) prescreve que, no eixo das abscissas, o tamanho das peneiras seja elevado à potência 0,45.

As principais graduações são: bem-graduada, aberta, uniforme e descontínua, e elas estão descritas a seguir (Figura 1) (BERNUCCI *et al.*, 2010).

- Bem-graduada: apresenta distribuição granulométrica contínua. Devido ao elevado contato entre as partículas e à diminuição dos vazios na mistura, esta graduação seria a melhor em termos de estabilidade;
- Aberta: apresenta distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de partículas finas (menor do que 0,075mm) para preencher os vazios entre os agregados de maior diâmetro, resultando em um volume elevado de vazios. Exemplo: Camada Porosa de Atrito (CPA);
- Uniforme: apresenta a maioria das partículas com tamanhos parecidos e encontra-se em uma faixa de dimensão bastante estreita;
- Descontínua ou graduação com degrau: apresenta pequena porcentagem de agregados com tamanhos intermediários. Há forte contato entre as partículas de agregados graúdos, aumentando a resistência à deformação permanente. Exemplo: *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

Figura 1 - Representação de curvas granulométricas pelo SHRP-Superpave



A AASHTO M 323 (2012) classifica as misturas densas como graúda e miúda de acordo com a sua granulometria. Misturas miúdas, em geral, apresentam granulometrias acima da linha de densidade máxima, enquanto que misturas graúdas apresentam granulometrias abaixo da linha de densidade máxima. As definições estão resumidas na Tabela 1. Para cada TMN de agregado foi identificada uma peneira de controle primário. Se a porcentagem passante da peneira de controle for igual ou maior que o valor especificado na Tabela 1, a mistura se classifica como uma mistura miúda, caso contrário, a mistura se classifica como graúda.

Tabela 1 - Definição de misturas densas miúdas e graúdas (AASHTO M 323, 2012)

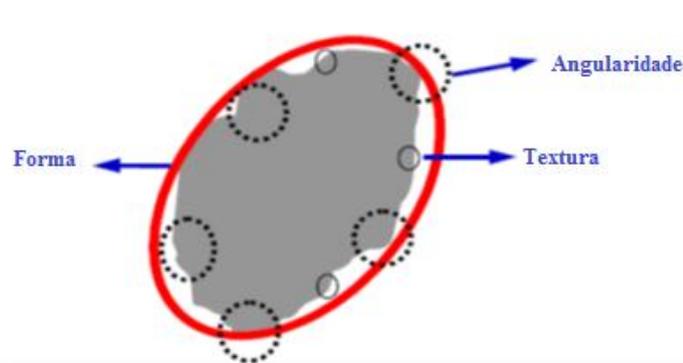
TMN das Misturas	Granulometria graúda	Granulometria miúda
37,5mm (1 1/2")	<47% passando na 4,75mm	>47% passando na 4,75mm
25,0mm (1")	<40% passando na 4,75mm	>40% passando na 4,75mm
19,0mm (3/4")	<47% passando na 4,75mm	>47% passando na 4,75mm
12,5mm (1/2")	<39% passando na 2,36mm	>39% passando na 2,36mm
9,5mm (3/8")	<47% passando na 2,36mm	>47% passando na 2,36mm

Fonte: Adaptado de NCHRP 673, 2011.

2.2.1. *Propriedades dos Agregados*

Há diferentes aspectos que constituem a geometria das partículas que é expressa em três propriedades independentes: forma, angularidade e textura. Nomeiam-se forma e angularidade variações nas proporções e nos contornos, respectivamente, das partículas. A textura é utilizada para descrever a irregularidade da superfície da partícula. A Figura 2 apresenta um diagrama esquematizando tais propriedades (MASAD, 2005).

Figura 2 - Propriedades dos agregados: forma, angularidade e textura



Fonte: Adaptada de Masad (2005)

2.2.2. *Forma, Angularidade e Textura*

Segundo Gouveia (2006), a forma ideal dos agregados para uso em misturas asfálticas é a arredondada; porém, ao levar em consideração que uma partícula deve ser também angulosa, pode-se entender que a forma ideal é a cúbica. Características de forma e de angularidade não devem ser confundidas; independente da sua forma, a partícula pode apresentar angularidades diferentes, ou seja, ter arestas e cantos agudos ou desgastados.

A forma das partículas pode influenciar no desempenho da mistura asfáltica. Por exemplo, os agregados com formas planas e/ou alongadas podem causar vários problemas, dentre eles, a quebra de partículas durante a compactação e a diminuição da trabalhabilidade da mistura com relação à quebra, além desta alterar a granulometria, pode permitir a entrada de umidade dentro do agregado devido à ruptura do filme do ligante, ocasionando problemas relacionados à adesividade. Outra questão é a diminuição da trabalhabilidade, dificultando a compactação e ocasionando maior consumo de ligante devido à superfície específica das partículas longas e/ou alongadas serem maiores do que a superfície específica das partículas cúbicas, além dos vazios. Em relação ao atrito, tem-se observado que materiais granulares

gráudos (maiores do que 4,75mm) apresentam maiores ângulos de atrito se comparados a materiais finos. (GOUVEIA, 2006).

Para as análises de forma, de angularidade e de textura, há alguns ensaios propostos pelo Superpave e estudados por Gouveia (2006) tais como: Angularidade do Agregado Fino (AAF) (ASTM C 1252, 2003), análises visuais e partículas planas e alongadas em agregados gráudos (ASTM D 4791, 2000), não são adequados por serem subjetivos e indiretos. Atualmente, técnicas com utilização do Processamento Digital de Imagens (PDI) são usadas na indústria de pavimentação. Estas análises permitem a obtenção de resultados com maior precisão e reprodutibilidade. Algumas técnicas são apresentadas a seguir.

Bessa *et al.* (2009) utilizaram o *ImageTool*, *software* que envolve uma técnica de PDI, para a análise de agregados naturais e alternativos em relação às suas propriedades de forma e de angularidade, além da estrutura interna de misturas asfálticas compostas por eles. Os resultados mostraram que com relação à esfericidade obtida através do PDI estes apresentaram a mesma tendência com relação aos resultados realizados em laboratório, porém os valores foram mais precisos. Com relação à orientação dos agregados após a compactação das misturas, observou-se que a distribuição e a orientação dos agregados foram similares para as três misturas estudadas. Conclui-se que independente do agregado utilizado, a estrutura interna da mistura asfáltica deve ter o mesmo esqueleto no que diz respeito à posição dos agregados para as misturas avaliadas no estudo.

Bessa (2012) avaliou o potencial do uso do PDI na análise das propriedades de forma, de angularidade e de textura de agregados de fontes distintas (gnaisse, granito e fonólito) e na análise da estrutura interna de misturas asfálticas composta por esses agregados. Os agregados foram analisados no equipamento *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) e os resultados obtidos para o material de cada pedra foram comparados entre si. Os principais resultados obtidos levaram a conclusão de que os agregados estudados são semelhantes no que diz respeito às suas propriedades de forma, de angularidade e de textura. Misturas produzidas com esses agregados apresentaram comportamento mecânico bastante similar, o que provavelmente se deve às características geométricas parecidas de seus agregados.

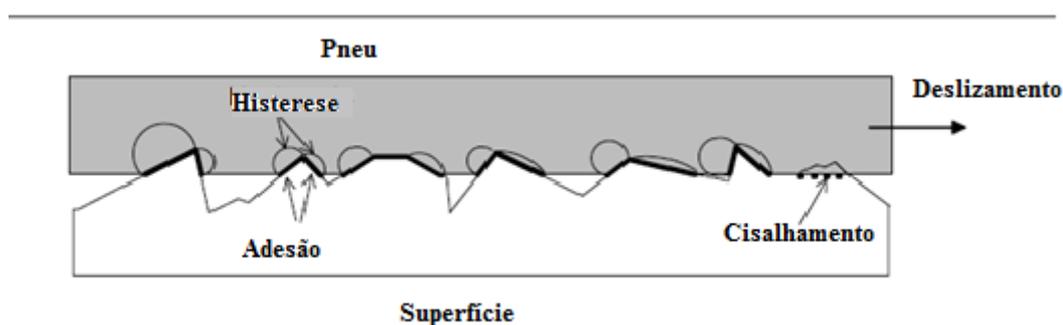
2.3. Aderência Pneu-Pavimento

A aderência é verificada pelo coeficiente de atrito existente na interação pneu-pavimento. Contudo, a aderência também é composta pela parcela proveniente da textura do pavimento. Portanto, entende-se como aderência pneu-pavimento a junção das características de atrito e de textura (PEREIRA, 2010a).

A força de atrito surge quando duas superfícies em contato apresentam tendência de se mover uma em direção à outra, gerando uma força resistente. Se a força aplicada não for suficiente para colocar o corpo em movimento, a força de atrito se opõe à força aplicada e é chamada de força de atrito estática. A constante de proporcionalidade é o coeficiente de atrito estático (μ_e). Caso o corpo entre em movimento, chama-se força de atrito cinética, cuja constante de proporcionalidade é o coeficiente de atrito cinético (μ_c). A intensidade da força de atrito entre duas superfícies em contato é diretamente proporcional ao coeficiente de atrito e à intensidade da força normal entre as duas superfícies (NCHRP 108, 2009).

O atrito do revestimento em um pavimento é o resultado de uma interação complexa entre dois componentes de força de atrito: adesão e histerese (Figura 3). A adesão é o atrito resultante da ligação de pequena escala/encravamento da borracha dos pneus do veículo e da superfície do pavimento quando estes estão em contato. Isto ocorre devido à força de cisalhamento pneu-pavimento.

Figura 3 - Principais mecanismos de aderência pneu-pavimento



Fonte: Adaptada de NCHRP 108 (2009).

Segundo Rodrigues Filho (2006), a adesão diz respeito às superfícies em contato (pneu-pavimento) e diminui rapidamente se a superfície apresentar contaminantes, podendo cessar totalmente se a separação das superfícies em contato exceder as separações de um

mícron. As perdas por adesão estão relacionadas à microtextura do pavimento, sendo consideradas micro-características do atrito (ANDRESEN e WANDBOLD, 1999).

A histerese da força de atrito é resultado da perda de energia ocasionada pela deformação do pneu do veículo quando deslizado sobre as irregularidades da pista (HALL *et al.*, 2009). De acordo com Rodrigues Filho (2006), o processo que produz as perdas por histerese ocorre em toda a superfície do pneu e é afetado pela textura superficial da pista. As perdas por histereses estão relacionadas com a macrotextura do pavimento, sendo consideradas macro-características do atrito (ANDRESEN e WANDBOLD, 1999). A combinação do comportamento adesão e perda por histerese é consequência da viscoelasticidade da borracha, sendo apresentado na perda de energia pela geração de calor em função dos movimentos intermoleculares (APS, 2006).

Os principais fatores que influenciam o atrito podem ser agrupados em categorias: características da superfície do pavimento, propriedades do pneu e fatores ambientais (NCHRP 108, 2009).

a) Características da superfície do pavimento

- Textura da superfície

Pode ser caracterizada pela rugosidade presente na superfície do pavimento. A rugosidade pode variar de micronível contido na partícula de agregado a uma extensão de irregularidades da pista. Os dois níveis que afetam predominantemente o atrito são a macrotextura e a microtextura, observados com mais detalhes no item 2.5.

- Propriedades do material da superfície

Algumas propriedades do material da superfície do pavimento, ou seja, agregados, características da mistura e padrões de texturas, podem ajudar a definir a textura da superfície. Estas propriedades afetam a durabilidade a longo-prazo através da capacidade do agregado de resistir ao polimento e abrasão/desgaste pelo tráfego (NCHRP 108, 2009).

b) Propriedades do pneu

- *Design* e condição da superfície de rodagem do pneu

A superfície do pneu (tipo, padrão e profundidade) apresenta influência significativa na drenagem da água que se acumula na superfície do pavimento. A água poderá ser expelida pelos canais fornecidos pelo pavimento e pela superfície de rodagem do pneu. A profundidade da superfície de rodagem do pneu é importante para os veículos sobre a lâmina d'água em altas velocidades. Alguns estudos reportam a diminuição do atrito em pistas molhadas de 45 a 70% para pneus totalmente desgastados comparados com novos (HENRY, 1983 *apud* NCHRP 108, 2009).

- Pressão de inflação dos pneus

Pneu pouco inflado pode reduzir o atrito em altas velocidades, pois permite que o centro da superfície de rodagem do pneu torne-se muito côncavo, resultando na constrição dos canais de drenagem no interior da banda de rodagem do pneu e na redução da pressão de contato. Já o pneu muito inflado resulta em uma pequena perda de atrito entre o pneu e o pavimento devido à redução da área de contato (NCHRP 108, 2009).

- Tipo de borracha

Pneus fabricados com componentes de borracha sintética (derivada do petróleo) geralmente apresentam resistência ao rolamento mais elevada do que os fabricados com borracha natural (RODRIGUES FILHO, 2006).

c) Ambiente

- Propriedades térmicas

Pneus automotivos são compostos por materiais viscoelásticos e suas propriedades são afetadas pela temperatura. Algumas pesquisas indicam que o atrito pneu-pavimento, em geral, diminui com o aumento da temperatura, embora seja difícil quantificar (NCHRP 108, 2009).

- Água

A água pode atuar como lubrificante e reduzir o atrito entre o pneu e o pavimento. O efeito da película de água é mínimo a baixas velocidades (<32km/h) e acentuado a altas velocidades (>64km/h). Alguns estudos indicam que apenas 0,05mm de água sobre a

superfície pode diminuir de 20 a 30% o coeficiente de atrito. Em alguns casos, uma película de água de 0,025mm pode reduzir o atrito de forma significativa (NCHRP 108, 2009).

- Contaminantes

Contaminantes são comumente encontrados em estradas. Incluem sujeira, areia, óleo, água e neve. Qualquer tipo de contaminante na interface pneu-pavimento terá efeito adverso sobre o atrito. Tais materiais agem como lubrificantes, reduzindo o atrito entre duas superfícies. Quanto mais grosso ou viscoso for o contaminante, maior deve ser a redução do atrito pneu-pavimento (NCHRP 108, 2009).

2.3.1. *International Friction Index - IFI*

O IFI (*International Friction Index*) é um dos parâmetros utilizados para quantificar a aderência pneu-pavimento, sendo, conseqüentemente, usado como ferramenta tendo em vista a redução de acidentes (APS, 2006).

Esse índice foi desenvolvido a partir de uma experiência internacional de comparação e organização de métodos de medidas de atrito e textura dos pavimentos conduzidos pelo Comitê de Características de Superfície (C1) da *Permanent International Association of Road Congress* (PIARC).

O experimento contou com a participação de 47 equipamentos de medição de 16 países. Foram medidos 33 parâmetros de textura e 34 parâmetros de atrito. O programa resultou em um banco de dados com mais de 15.000 valores numéricos, para diferentes tipos de superfícies, que foram utilizados para criar uma escala comum que quantificasse a aderência no pavimento molhado. Baseada em medidas de atrito (F60) e textura (Sp), esta escala comum foi denominada IFI - *International Friction Index*, cujo procedimento está descrito na ASTM E-1960 (1998).

Anteriormente, muitos estudos realizados com intenção de relacionar as medidas de atrito de diferentes equipamentos obtiveram boas correlações quando as superfícies eram constantes, caso contrário, as correlações eram ruins. Então, foi admitido que para relacionar as medidas de atrito realizadas com equipamentos distintos, era necessário incluir os efeitos da textura da camada de rolamento.

Com base no modelo da PIARC, o IFI é uma escala de referência que relaciona o atrito com a velocidade de deslizamento. Esse modelo pode estimar a constante de referência da velocidade (S_p) e o atrito a 60km/h (F_{60}) de um determinado pavimento. O par de valores, S_p e F_{60} , expressam o valor de IFI de um pavimento e permite calcular o valor de atrito, $F(S)$, a qualquer velocidade de deslizamento. O parâmetro S_p é dado pela Equação 1:

$$S_p = a + b \times T_x \quad (1)$$

Onde:

T_x : parâmetro de textura;

a e b : constantes determinadas em função do equipamento utilizado.

O parâmetro FR_{60} é dado pela Equação 2:

$$FR_{60} = FRS \times e^{(S-60)/S_p} \quad (2)$$

Onde:

FR_{60} : valor do atrito do equipamento convertido à velocidade de 60km/h;

FRS : valor de atrito medido à velocidade de deslocamento S ;

S : velocidade de deslizamento do equipamento.

O valor de F_{60} é dado pela Equação 3:

$$F_{60} = A + B \times FR_{60} + C \times T_x \quad (3)$$

Os valores A , B e C são constantes de calibração de acordo com os equipamentos utilizados no experimento. Esses valores são normatizados pela ASTM E 1960 (1998). Os valores constantes na Tabela 2 apresentam as faixas de classificação do IFI de Aps (2006).

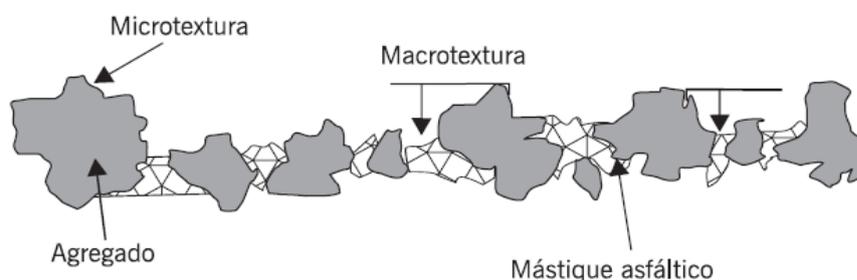
Tabela 2 - Classificação do IFI (APS, 2006)

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

2.4. Textura do Pavimento

A textura do pavimento está associada à aderência, e, segundo a PIARC, foram definidas três classes de texturas: microtextura, macrotextura e megatextura (WAMBOLD *et al.*, 1995). A classificação da textura estabelece limites entre os domínios de escalas de irregularidades de superfícies de pavimentos por meio de critérios de comprimento de ondas (horizontal) e amplitude (vertical), observadas na Tabela 3 (ASTM E-867, 1997). A Figura 4 ilustra os conceitos de micro e macrotextura.

Figura 4 - Diferença entre macrotextura e microtextura



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

Tabela 3 - Classificação da textura

Domínio	Intervalo de Dimensões	
	Horizontal	Vertical
Microtextura	0 - 0,5mm	0 - 0,2mm
Macrotextura	0,5mm - 50mm	0,2mm - 10mm
Megatextura	50mm - 500mm	1mm - 50mm
Irregularidade	0,5m - 50m	1mm - 20cm

Fonte: ASTM E-867 (1997).

A macrotextura depende da rugosidade formada pelo conjunto agregados e mástique. Pode ser classificada como aberta e fechada. A microtextura depende da aspereza da superfície dos agregados, podendo ser classificada como rugosa ou polida (BERNUCCI *et al.*, 2010). A megatextura está associada aos desvios da superfície do pavimento decorrente de fatores como: trilhas de roda, panelas, remendos, perda de agregado na superfície e também pelas juntas e fissuras de maiores dimensões. A irregularidade refere-se aos desvios de dimensão superiores a megatextura e afeta, além da resistência ao rolamento, a dinâmica do veículo, a qualidade do rolamento (associada ao conforto) e o custo operacional dos veículos.

A irregularidade é uma medida da condição geral do pavimento e é comumente expressa pelo Índice Internacional de Irregularidade (IRI) (LAY, 1998).

2.4.1. Características de Polimento

Muitas propriedades de agregados estão relacionadas com os parâmetros de desempenho, tais como tamanho e granulometria, forma e textura das partículas, porosidade, resistência à abrasão, limpeza, durabilidade, características de polimento e atrito, mineralogia e petrografia (KANDHAL e PARKER, 1998). A capacidade de um agregado resistir ao polimento durante a ação do tráfego é um fator importante, mas, este é frequentemente, ignorado na consideração da sua utilização na pavimentação. O polimento pode ser considerado um parâmetro de segurança, já que afeta a microtextura e a resistência à derrapagem do pavimento. A superfície de atrito deve manter um limite mínimo aceitável de segurança. Uma maneira de atingir este limite de segurança é utilizando agregados com uma elevada resistência ao polimento.

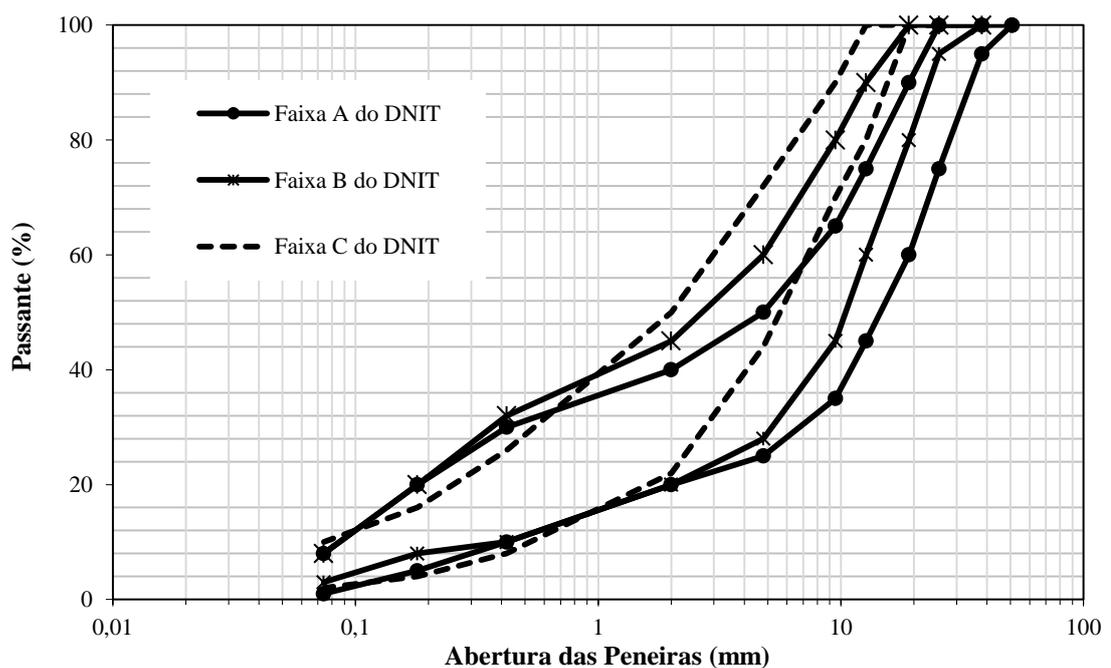
Abdul-Malak *et al.* (1996) indicaram que os agregados graúdos localizados na superfície são os principais responsáveis pela textura superficial do pavimento. De acordo com Stroup-Gardiner *et al.* (2001), a macrotextura está diretamente relacionada com o TMN do agregado, ou seja, quanto maior o TMN do agregado, maior será o valor de macrotextura. Segundo Aps (2006), quanto maior for o tamanho dos agregados melhores serão as características de resistência ao deslizamento e melhor será a macrotextura. Tais fatos não foram comprovados no presente estudo.

De acordo com NCHRP 108 (2009), a porcentagem do material passante entre as peneiras de 3/8" (9,5mm) e nº8 (2,36mm) influencia a macrotextura da mistura asfáltica. O aumento da quantidade de material passante entre essas peneiras reduz a macrotextura da mistura. Geralmente, a quantidade de agregados passantes nesses diâmetros depende do tipo de mistura (gradação densa, aberta, entre outros). Para aumentar a macrotextura, deve-se utilizar os valores do limite inferior das faixas recomendadas pelos órgãos rodoviários. O DNIT normatiza as faixas granulométricas descritas na Tabela 4. Tanto o Departamento Estadual de Rodovias do Ceará (DER-CE) como a Secretaria da Infraestrutura (SEINF) da Prefeitura de Fortaleza prescrevem as faixas granulométricas recomendadas pelo DNIT, visualizadas na Figura 5.

Tabela 4 - Faixas granulométricas para concreto asfáltico (DNIT 031/2004-ES)

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95-100	100	-	± 7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	± 7%
3/4"	19,1	60-90	80-100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	-	80-100	± 7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	± 7%
nº4	4,8	25-50	28-60	44-72	± 5%
nº10	2	20-40	20-45	22-50	± 5%
nº40	0,42	10-30	10-32	8-26	± 5%
nº80	0,18	5-20	8-20	4-16	± 3%
nº200	0,075	1-8	3-8	2-10	± 2%
		4,0-7,0	4,5-7,5	4,5-9,0	± 0,3%
Asfalto solúvel no CS ₂ (%)		Camada de ligação (Binder)	Camada de ligação e rolamento	Camada de rolamento	

Figura 5 - Gráfico das faixas granulométricas para concreto asfáltico do DNIT

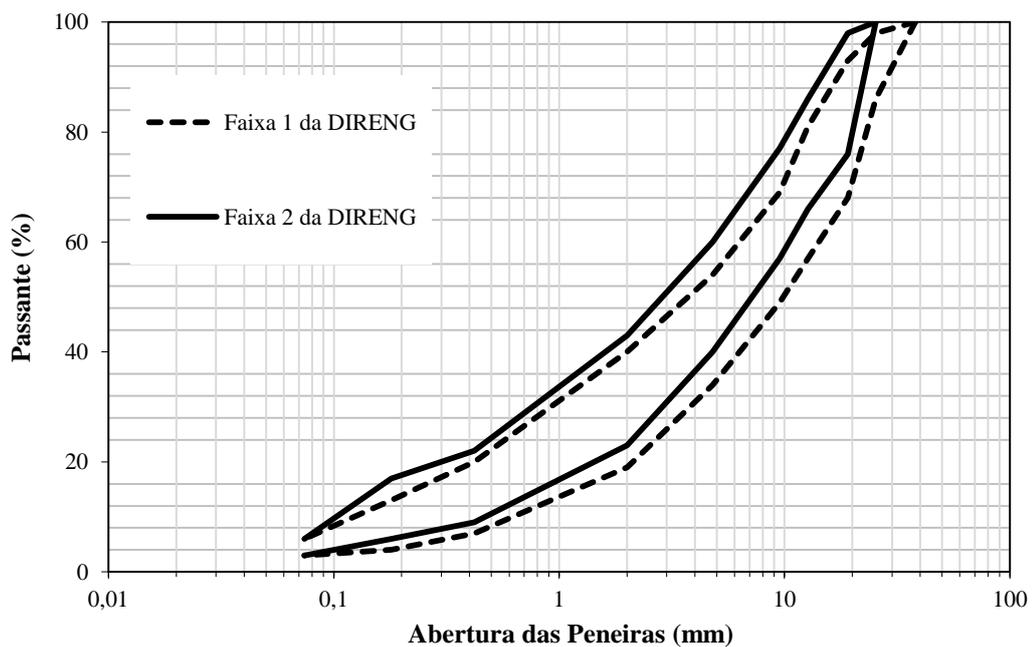


Em relação ao sistema aeroviário, a composição granulométrica da mistura dos agregados da camada obedecerá as Faixas 1 ou 2 das Especificações Gerais 04.05.610 - Concreto Betuminoso Usinado a Quente - Norma de Infraestrutura NSMA 85-2, da Diretoria de Engenharia/DIRENG. As faixas são visualizadas na Tabela 5 e na Figura 6.

Tabela 5 - Faixas granulométricas da DIRENG (Especificações Gerais 04.05.610, 2002)

Granulometria das misturas de projeto (%) passando em peso		
Peneira	Faixa 1	Faixa 2
1 1/2"	100	-
1"	86-98	100
3/4"	68-93	76-98
1/2"	57-81	66-86
3/8"	49-69	57-77
n°4	34-54	40-60
n°10	19-40	23-43
n°40	7-20	9-22
n°80	4-13	6-17
n°200	3-6	3-6
Teor de ligante asfáltico (%)	4,5-7,0	4,5-7,0

Figura 6 - Gráfico das faixas granulométricas para concreto asfáltico da DIRENG



Pereira (2010a) avaliou medidas de atrito através dos resultados de pêndulo britânico e constatou que os melhores resultados, dentre as misturas estudadas, foram aqueles encontrados para misturas com maior porcentagem de agregado graúdo no seu traço, considerando como agregado graúdo aqueles retidos na peneira nº10. A autora salienta a importância deste tipo de material na parcela de atrito.

Segundo Pottinger e Yager (1986), uma boa textura (microtextura e macrotextura) é função da resistência ao polimento/desgaste do agregado nos seus mais diversos aspectos. Essa característica é uma das mais importantes dos agregados em relação ao atrito. A suscetibilidade ao polimento de agregados é conferida às diferenças no conteúdo de minerais resistentes ao desgaste, sobretudo a sílica (REZAEI *et al.*, 2009; REZAEI, 2010). Estudos indicam que agregados contendo rochas ígneas e metamórficas podem proporcionar melhorias nas características de atrito na superfície do pavimento. Entretanto, agregados na mesma categoria, ou seja, sedimentares, diferem consideravelmente em sua resistência ao polimento dependendo da sua composição mineralógica. Liang e Chyi (2000) relataram que o incremento do teor de calcita e dolomita aumenta a suscetibilidade do agregado ao polimento.

Alguns testes são realizados para avaliar a resistência do agregado ao polimento. Esses métodos são classificados em dois grupos principais: os que medem a abrasão dos agregados (perda de angularidade e quebra) e os que medem o polimento do agregado (perda de textura). Além disso, existem os métodos que mudam a característica física do agregado, como por exemplo, o de durabilidade que utiliza o sulfato de magnésio ou de sódio.

É uma prática comum supor que os agregados com menor perda de abrasão *Los Angeles*, menor perda por sulfato, menor absorção e maior peso específico tenham melhor resistência ao polimento. No entanto, muitos pesquisadores acreditam que tais testes podem não produzir boas previsões de atrito em campo (PRASANNA *et al.*, 1999; WEST *et al.*, 2001; KOWALSKI, 2007; BESSA, 2012).

2.4.2. Métodos para Avaliação de Resistência ao Polimento e à Degradação

Existem diversas metodologias disponíveis para avaliar a resistência ao polimento de agregados e a alteração de suas características físicas. Alguns métodos são discutidos a seguir:

- Abrasão *Los Angeles*

Esse ensaio é uma indicação de degradação do agregado durante o transporte e o manuseio. No Brasil, este ensaio é utilizado para controlar as características de abrasão (DNER ME 035-98). Este representa o desgaste sofrido pelo agregado, quando este é colocado no equipamento *Los Angeles* juntamente com uma carga abrasiva, submetido a um determinado número de revoluções desta máquina numa velocidade estabelecida. Esse movimento submete o material a diferentes processos: abrasão, impacto e trituração. Segundo Rogers (1998), o ensaio acaba sendo mais um teste para avaliação de resistência ao impacto ao invés da resistência à abrasão por ser bastante severo. O autor ainda ressalta que a avaliação realizada através da utilização do ensaio de abrasão *Los Angeles* quantifica, na realidade, a resistência dos agregados em relação à quebra e não à abrasão. Isso se deve ao fato de que o ensaio resulta em um valor de porcentagem de massa perdida da amostra de agregado, não considerando a forma dos mesmos após as rotações do tambor e o contato com as esferas de aço.

- Treton

O ensaio de Treton é normatizado pelo DNER-ME 399/1999 que determina a perda ao choque no aparelho Treton, muito empregado para a caracterização de materiais aplicados como lastro em ferrovias, pois este tipo de esforço é bastante habitual para esse tipo de via durante a passagem dos vagões. O ensaio consiste em submeter uma amostra de partículas passando na peneira 19mm e retidas na malha 16mm, a dez golpes de um martelo com 14,9kg. O material resultante é passado na peneira 1,7mm e a perda é calculada pela diferença entre a massa original da amostra e a massa do material retido nesta peneira. A perda ao choque do material é a média aritmética dos resultados obtidos em no mínimo três ensaios. A Figura 7 apresenta o conjunto utilizado para a realização do ensaio (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Figura 7 - Conjunto para o ensaio Treton



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

- Durabilidade

O teste de durabilidade é normatizado pela ASTM C 88 (2005) e no Brasil pelo DNER ME 089 (1994) que indica a durabilidade dos agregados. Este envolve a submersão de amostras de agregados em solução de magnésio ou de sulfato de sódio durante um período de 16 a 18 horas à temperatura de 21°C. A amostra é então removida, escorrida durante 15 minutos, e seca em estufa até um peso constante (cinco ciclos de imersão e secagem típica). Durante o processo de imersão, a solução de sal penetra nos espaços permeáveis dos poros do agregado. A estufa desidrata o sal de sulfato precipitado nos poros. A força interna expansiva da reidratação após a reimersão simula a expansão da água sobre o congelamento. Após a conclusão final do ciclo, a amostra é peneirada e a perda média ponderada máxima é relatada como a perda de solidez através do sulfato (KHANDAL *et al.*, 1997). Conforme DNER ME 089-94, o agregado submetido a esse ensaio não deve apresentar perda superior a 12%.

- *Micro-Deval*

Este teste é descrito pela AASHTO T 327-05 (2012) e permite avaliar a capacidade do agregado de resistir à abrasão em ambiente úmido. O método originou-se na França em 1960, e foi utilizado no Canadá pelo *Ontario Ministry of Transportation*, sendo adotado pela AASHTO. O *Micro-Deval* é constituído de um recipiente de aço que é carregado com 5.000g de bolas de aço, 1.500g de amostra de agregados e 2.000ml de água. Este material é submetido de 9.600 a 12.000 rotações e a perda de peso é calculada. A Figura 8 apresenta o equipamento *Micro-Deval*.

Figura 8 - *Micro-Deval*

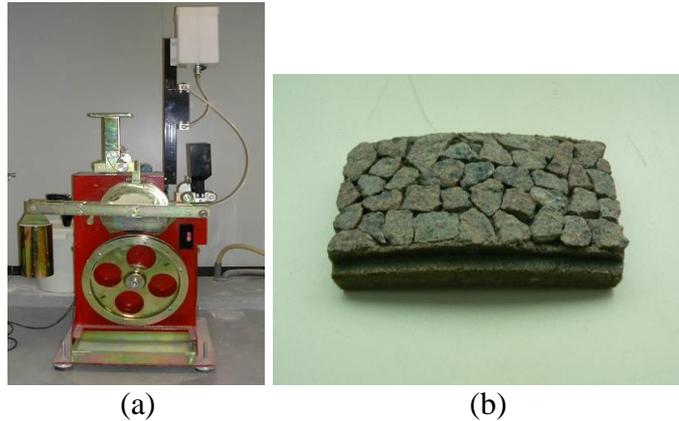
Fonte: Zhao (2011).

Este método representa melhor a resistência do agregado à abrasão do que outros testes como a abrasão *Los Angeles* (NCHRP 108, 2009). Além disso, o ambiente úmido do *Micro-Deval* simula a condição em campo mais desfavorável (ROGERS, 1998). Estudos mostram que este teste é mais reproduzível do que outros ensaios de degradação, tais como o teste de solidez de sulfato de magnésio (NCHRP 108, 2009).

- *Polished Stone Value - PSV*

O PSV é um teste utilizado para avaliar a resistência do agregado ao polimento. Este ensaio é realizado através de dois aparelhos: *The Accelerated Polishing Machine* – Máquina PSV (Figura 9a) e o pêndulo britânico. As amostras (Figura 9b) são preparadas colando-se os agregados em uma placa e fixando-as próximas à “roda de polimento” do PSV para serem polidas. Após este processo, o grau de polimento das amostras é medido através do ensaio com o pêndulo britânico. Segundo Zhao (2011), o teste apresenta a desvantagem de ser muito lento e ser apropriado apenas para alguns tipos de agregados, como o cascalho. O ensaio aplica-se apenas para agregados e não para misturas asfálticas.

Figura 9 - Máquina PSV(a) e amostra (b)

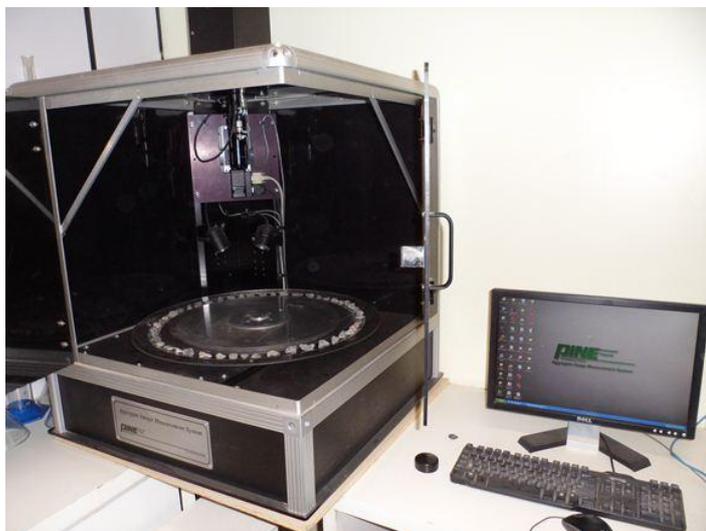


Fonte: Zhao (2011).

- *Aggregate Imaging Measurement System - AIMS*

Introduzido por Masad (2005), e normatizado pela AASHTO TP 081 (2012), é um dos métodos mais recentes para obtenção da textura de agregados através da aquisição de imagens e do processamento digital das mesmas. O sistema determina a angularidade, a forma e a textura de agregados graúdos, como também, a forma e a angularidade dos agregados miúdos. O AIMS não tem ferramentas capazes de fornecer valores de textura superficial para os agregados miúdos, porém um estudo, realizado por Masad *et al.* (2001), provou que existe uma forte correlação entre a angularidade (medida através de imagens em preto e branco) e a textura superficial (medida através de imagens em escalas de cinza) desses citados agregados. Ou seja, quanto maior for a angularidade de um dado agregado miúdo, maior será seu índice de textura. O AIMS utiliza uma configuração simples que consiste de uma câmara e de dois tipos de esquema de iluminação para capturar imagens de agregados em diferentes resoluções, no qual as propriedades de forma da partícula são medidas através de técnicas de análises de imagem (MASAD, 2005). A Figura 10 apresenta o equipamento AIMS existente na UFC.

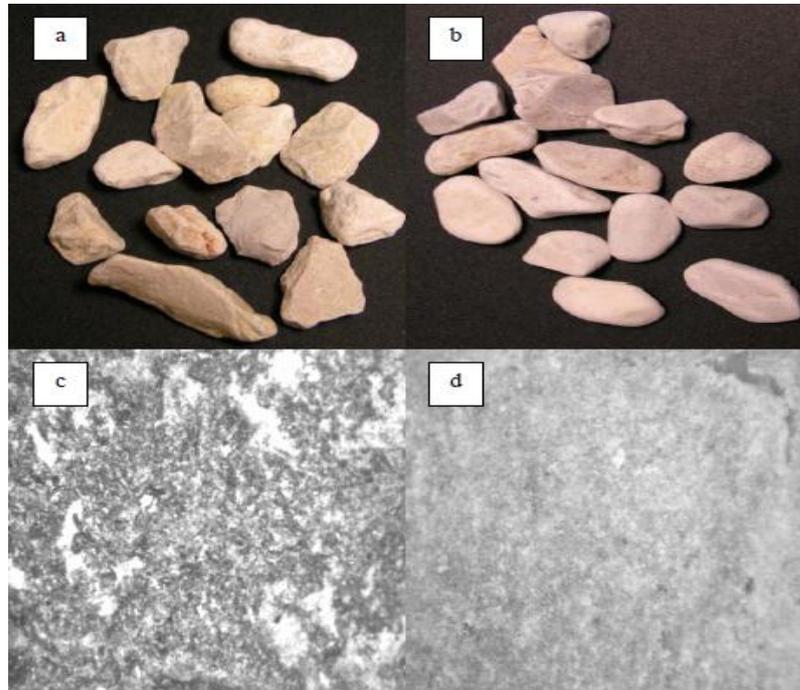
Figura 10 - AIMS



Fonte: Autora (2013).

Alguns estudos apresentam novos métodos de avaliação da resistência ao polimento dos agregados, sendo um deles a utilização do AIMS, que consiste em monitorar as mudanças na textura do agregado em função do tempo de polimento, como realizado por Mahmoud (2005) e Mahmoud e Masad (2007). Desenvolveu-se uma metodologia para medir a resistência do agregado ao polimento, que consistia em: (1) medição da textura inicial do agregado, (2) polimento do agregado e (3) medição da textura após o polimento. O AIMS foi utilizado para medir a textura e o equipamento *Micro-Deval* foi utilizado para polir o agregado. A Figura 11 mostra as imagens dos agregados antes e após o polimento com o uso do *Micro-Deval*. Mahmoud e Masad (2007) concluíram que os testes com o uso combinado do AIMS e do *Micro-Deval* são métodos rápidos e precisos para avaliar a resistência do agregado ao polimento, à abrasão e à quebra. O método é capaz de distinguir entre quebra e abrasão. A abrasão é definida como a redução da angularidade, enquanto que a quebra é definida pela fratura das partículas. Esse método de medir a resistência do agregado ao polimento foi adotado no estudo de Rezaei (2010).

Figura 11 - Imagens dos agregados: partículas de agregados antes da solicitação com o *Micro-Deval* (a), partículas de agregados após a solicitação com o *Micro-Deval* (b), textura da superfície do agregado antes da solicitação com o *Micro-Deval* (c), textura da superfície do agregado após a solicitação com o *Micro-Deval* (d)



Fonte: Mahmoud (2005).

Bessa, Castelo Branco e Soares (2011) avaliaram agregados de três fontes mineralógicas distintas, localizadas no estado do Ceará. As amostras foram ensaiadas no equipamento de abrasão *Los Angeles* para que fossem submetidas aos processos de polimento e de degradação. O AIMS foi utilizado para a determinação de propriedades dos agregados antes e depois da utilização do *Los Angeles*, como pode ser observado na Figura 12. Os resultados indicaram que os três agregados sofreram perda nas suas propriedades de angularidade e textura superficial, ficando, assim, com suas superfícies mais lisas e seus cantos mais arredondados. A angularidade foi o parâmetro considerado como indicativo de resistência à abrasão, enquanto que a textura superficial foi relacionada com a resistência ao polimento.

Figura 12 - Agregados antes e depois de passarem pelo processo de abrasão *Los Angeles*



Fonte: Bessa, Castelo Branco e Soares (2011).

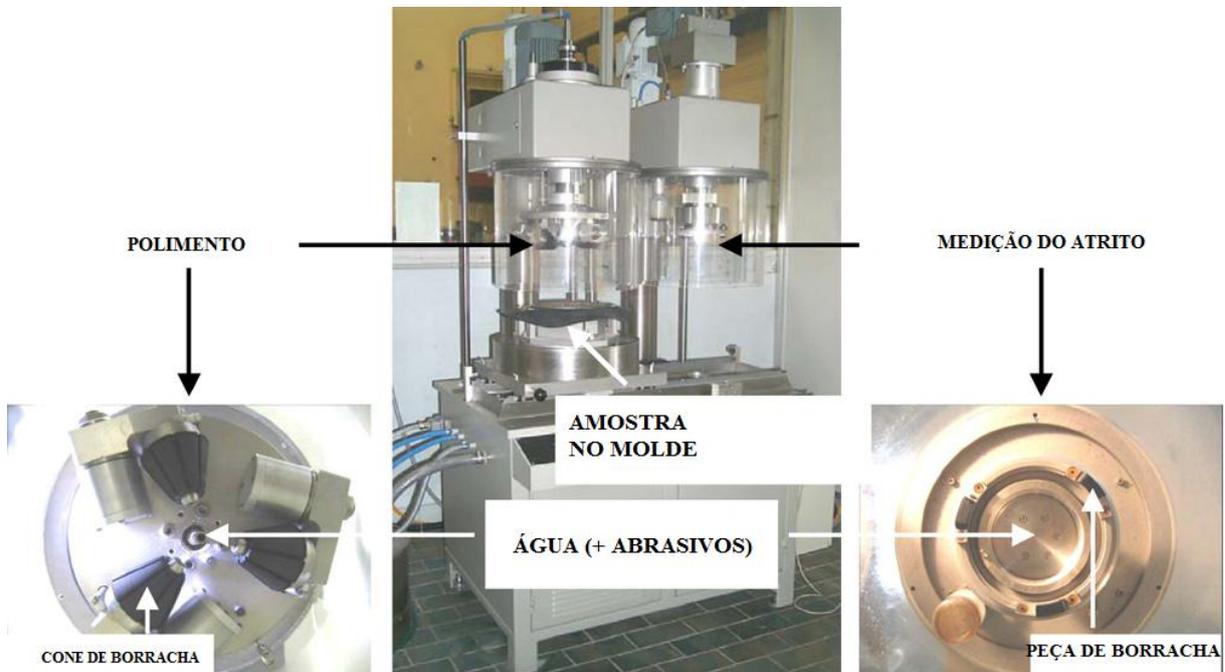
Um método de laboratório para avaliação de resistência ao polimento de agregado foi sugerido por Mullen *et al.* (1971). Trata-se do *Circular Track Wear Method* que se baseia no polimento de amostras de pavimento colocadas em uma pista circular submetida ao polimento através de pneus de pequeno diâmetro, durante 16 horas. O pêndulo britânico é utilizado em seguida para avaliação de textura.

Outras formas de ensaio de resistência ao polimento foram apresentadas por Do *et al.* (2007). Os autores estudaram uma metodologia de polimento utilizando o equipamento *Wehner-Schulze* (WS), apresentado na Figura 13. O WS consiste em polir e medir o atrito em placas circulares de 22,5cm de diâmetro que podem ser compostas de agregados ou misturas asfálticas (Figura 13). A ação de polimento pode ser realizada por meio de três cones de borracha rotativos e de rolamento na superfície da amostra. Uma mistura de água com pó de quartzo é projetada sobre a superfície das amostras durante as rotações. Após o polimento, a amostra é movida manualmente para o dispositivo de medição do atrito que é composto por um disco de três peças pequenas de borracha. Para a medição do atrito, o disco rotativo entra em contato com a superfície da amostra. A rotação é parada por atrito e a curva tempo-atrito é gravada. Para análise, é levado em consideração o valor de atrito a 60km/h.

Três rodovias foram monitoradas, desde a sua construção, para fornecer dados sobre a evolução do atrito. Amostras (Figura 14a) foram retiradas dos pavimentos logo após a construção e submetidas a testes de polimento em laboratório. Do *et al.* (2007) compararam as curvas de evolução do atrito das amostras de laboratório e dos dados de atrito das rodovias após dois anos e observaram que as curvas foram semelhantes. Os autores também estudaram o polimento dos agregados em amostras circulares (Figura 14b) no equipamento WS e

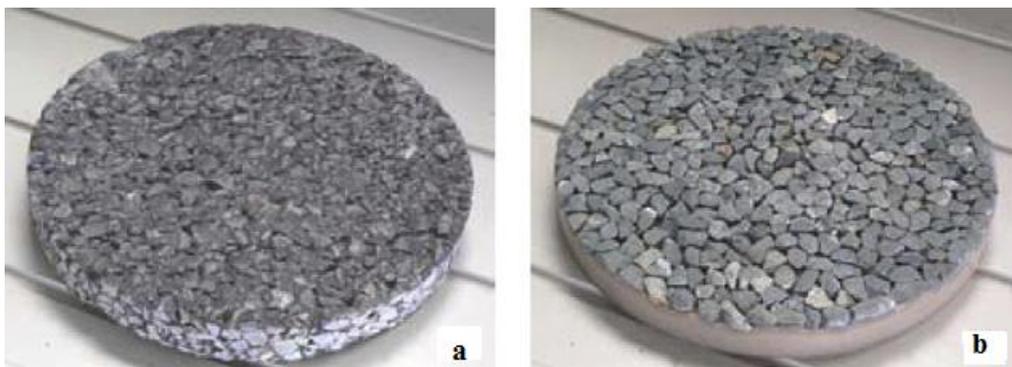
concluíram que a variação do atrito é controlada pelas partículas, uma vez que o ligante é removido pelo tráfego.

Figura 13 - Equipamento *Wehner-Schulze* (WS)



Fonte: Adaptado de Do *et al.* (2007).

Figura 14 - Amostras de mistura asfáltica (a) e agregados (b)



Fonte: Do *et al.* (2007).

2.5. Compactação em Laboratório

Alguns estudos analisaram micro e macrotextura em laboratório utilizando placas confeccionadas em mesas compactadoras, como descrito a seguir.

Momm (1998) estudou o efeito da granulometria sobre a macrotextura superficial de misturas do tipo CA. O autor analisou a dependência da macrotextura em relação ao tamanho máximo e a equação da granulometria sobre placas de CA produzidas em

laboratório. As placas foram confeccionadas no compactador de pneus LPC do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP. Os coeficientes de atrito foram medidos com o pêndulo britânico, porém os valores encontrados foram similares, praticamente idênticos para todas as placas avaliadas, porque os agregados eram da mesma fonte mineralógica, portanto as medidas de atrito com o pêndulo britânico não foram consideradas. A macrotextura foi medida através do ensaio de mancha de areia e drenabilidade. Segundo o referido autor, a compactação em campo com compactadores de pneu permite o destacamento dos agregados na superfície por causa da deformação da borracha. O rolo liso efetua o acabamento da superfície eliminando possíveis estrias deixadas pelo rolo de pneus. Nesta operação, o cilindro metálico enterra os agregados na massa asfáltica. O procedimento de acabamento com o rolo liso reduz a macrotextura, diminuindo a potencialidade de aderência pneu-pavimento. Momm (1998) concluiu que o tamanho máximo dos agregados e a porcentagem de finos influenciam na macrotextura da superfície de CA. Quanto maior for o tamanho máximo do agregado, maior a macrotextura da superfície. Por outro lado, a porcentagem de finos atua em sentido inverso. Quanto maior for a porcentagem de finos, menor tende a ser a macrotextura.

Maillard-Nunes *et al.* (2008) avaliaram a macrotextura de um revestimento do tipo *Béton Bitumineux Très-Mince* (BBTM), ou seja, concreto asfáltico muito delgado, e os diferentes métodos de medição utilizados para caracterizar a evolução da macrotextura. Esse tipo de revestimento tipicamente francês exerce o papel funcional com as seguintes características: impermeabilidade, drenabilidade, aderência pneu-pavimento, conforto ao rolamento e baixo ruído. O objetivo do trabalho foi comparar os resultados de macrotextura em laboratório com os resultados de campo. Os métodos utilizados para a avaliação da macrotextura das superfícies das amostras foram o ensaio de mancha de areia e a digitalização óptica por meio de medição a *laser*. Algumas metodologias de compactação foram realizadas dentre as quais se destaca a compactação com cilindro de aço. Placas (600mm × 400mm × 40mm) foram compactadas em laboratório com misturas coletadas em campo. A fim de aproximar as condições de campo, a mistura foi compactada utilizando um cilindro de aço incorporado ao pneu do compactador em laboratório como observado na Figura 15. Os autores concluíram que o procedimento de compactação em laboratório utilizado para esse tipo de mistura permite reproduzir a textura de campo satisfatoriamente.

Figura 15 - Compactação da placa



Fonte: Maillard-Nunes *et al.* (2008).

Pereira (2010a) moldou em laboratório misturas de CA existentes em rodovias de Pernambuco e da Paraíba com elevado número de acidentes. O ensaio de compactação seguiu a norma francesa NF P 98-253-1 com algumas adaptações sugeridas pelo Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP. Após a compactação, a mistura foi colocada no simulador de tráfego e mediu-se a deformação nos ciclos 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 passagens. Simultaneamente à simulação do tráfego, foram realizados os ensaios de mancha de areia e de pêndulo britânico, apresentados adiante no tópico 2.6 do presente trabalho, para verificar a existência de correlação entre os resultados de campo e de laboratório.

A autora observou, com relação ao atrito, que as medidas de laboratório tendem a apresentar um valor superior às medidas de campo. Este fato pode ser explicado devido à forma como é feita a simulação, pois o ensaio é realizado a 60°C, o ligante que se desprende do agregado fica na roda de simulação e parte tende a voltar a cobrir o agregado. Outro fato com relação às medidas superiores encontrados em laboratório é a parcela de aderência da sapata do pêndulo britânico com o ligante, principalmente no estágio inicial, sem a simulação do tráfego.

Com relação à macrotextura, Pereira (2010a) observou que as partículas de agregados vão ficando mais salientes com o passar da roda de simulação apresentando um falso ganho na medida de textura observado com destaque aos 30.000 ciclos. Relacionaram-se as medidas de campo com as de laboratório e percebeu-se, também, que elas não apresentaram o mesmo padrão encontrado em campo. A autora concluiu que quando se tenta relacionar resultados encontrados em campo e em laboratório, encontra-se uma grande dificuldade, principalmente para as medida de textura, devido às diferenças entre as formas de

compactação. Em campo existe a vibração e em laboratório não, influenciando diretamente os resultados.

2.6. Medidas de Textura e de Atrito

2.6.1. Textura

Os principais métodos de determinação de textura de superfícies de revestimentos estão descritos a seguir:

- Ensaio de Mancha de Areia

Uma das formas de determinação da macrotextura de um revestimento é através do ensaio simples de altura média da mancha de areia (ASTM E 965, 2001). Os materiais pertencentes ao ensaio são de baixo custo e são mostrados na Figura 16. No Brasil, encontra-se no âmbito da Comissão de Asfalto do IBP a norma “Misturas Asfálticas - medição da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos - Método da mancha de areia” prevista para 2014 e seguirá rigorosamente a norma americana da ASTM.

Figura 16 - Aparelhagem usada para o ensaio de mancha de areia



Fonte: Autora (2013).

A areia deve ser uniforme, arredondada, passante na peneira n°60 (0,177mm) e retida na peneira n°80 (0,250mm), com volume de $25.000\text{mm}^3 \pm 150\text{mm}^3$. A Figura 17 mostra

o procedimento do ensaio. Primeiramente, a superfície deve ser limpa com o auxílio de uma escova de mão macia e a areia deve ser espalhada sobre a superfície do pavimento com o auxílio de uma base de um pistão circular, que é movimentada em círculos, paralelamente à superfície do pavimento. O espalhamento é cessado quando algumas pontas dos agregados aparecem. Na sequência, mede-se o diâmetro do círculo formado com auxílio de uma trena ou régua, em quatro direções distintas e faz-se a média das determinações (ASTM E 965, 2001). A média da profundidade da altura da mancha de areia (HM) pode ser calculada pela equação (4):

$$HM = \frac{V \times 4}{D_m^2 \times \pi} \quad (4)$$

Onde:

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

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

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

Figura 17 - Procedimento de execução do ensaio de mancha de areia



Fonte: Autora (2012).

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (2006) apresenta os critérios de classificação de altura média de mancha de areia. Como pode ser observado na Tabela 6. Entretanto, Aps (2006) incorporou mais duas faixas para um melhor ajuste na classificação da mancha de areia para tornar compatível o número de faixas para o pêndulo britânico. Os novos limites definidos estão expressos também na Tabela 6 destacados em negrito.

Tabela 6 - Classificação dos resultados de mancha de areia (APS, 2006 e DNIT, 2006)

Textura Superficial	Limites de Aps (2006) (mm)	Limites do DNIT (2006) (mm)
Muito Fina	$HS \leq 0,20$	$HS \leq 0,20$
Fina	$0,20 < HS \leq 0,40$	$0,20 < HS \leq 0,40$
Medianamente Fina	$0,40 < HS \leq 0,60$	-
Média	$0,60 < HS \leq 0,80$	$0,40 < HS \leq 0,80$
Medianamente Grossa	$0,80 < HS \leq 1,00$	-
Grossa	$1,00 < HS \leq 1,20$	$0,80 < HS \leq 1,20$
Muito Grossa	$HS > 1,20$	$HS > 1,20$

- Perfilômetro a *laser*

O perfilômetro a *laser* pode ser instalado em equipamentos estacionários sobre uma viga ou ser armado em um veículo. Esses equipamentos, geralmente, projetam um raio (*laser*) sobre um ponto do pavimento, e um receptor situado na viga, mede a altura desse ponto. A Figura 18 apresenta um perfilômetro a *laser*. O perfilômetro é composto por módulos de medição a *laser*, sensores de aceleração vertical e de deslocamento longitudinal, integrados por micro controladores, e tem sua operação gerenciada por um computador portátil (LUGÃO, 2008).

Figura 18 - Perfilômetro a *laser* - *Virginia DOT Laser Texture Meter* - USA (Wambold e Henry, 2002)



Fonte: Wambold e Henry (2002).

2.6.2. Atrito

Os principais métodos de determinação do atrito estão descritos a seguir:

- Pêndulo Britânico

Para avaliação da microtextura, um equipamento simples como o pêndulo britânico é especificado pelo método da ASTM E-303-93 (1998). No Brasil, encontra-se em desenvolvimento pela Comissão de Asfalto do IBP a norma “Mistura Asfáltica – método de ensaio padronizado para medir propriedades do atrito de superfície utilizando o pêndulo britânico” prevista para 2014 e seguirá rigorosamente a norma americana da ASTM. Este equipamento pode ser usado em laboratório ou em campo sendo provido de um braço pendular cuja extremidade tem uma sapata recoberta de borracha para ser atritada contra a superfície do pavimento molhado. Esta barra deslizante tem dois tamanhos diferentes para testar amostras de agregados e superfície do pavimento. Para medir as propriedades do agregado é utilizada a sapata pequena de 1,25” de largura e para medir a resistência à derrapagem é utilizada a sapata grande de três polegadas de largura. A Figura 19 mostra o equipamento em questão. A Tabela 7 mostra as classes de microtextura dependente do Valor de Resistência à Derrapagem (VRD). O valor é expresso em *British Number Pendulum* (BPN) ou *Skid Resistent Test* (SRT) que é a perda de energia cinética e uma medida indireta da microtextura.

Figura 19 - Pêndulo Britânico



Fonte: Autora (2013).

Tabela 7 - Classificação pêndulo britânico (DNIT, 2006)

Classificação	Limites
Perigosa	< 25
Muito Lisa	25 – 31
Lisa	32 – 39
Insuficiente Rugosa	40 – 46
Medianamente Rugosa	47 – 54
Rugosa	55 – 75
Muito Rugosa	> 75

- *MuMeter*

O *MuMeter* é um equipamento rebocável, constituído de três rodas, sendo duas para medir o coeficiente de atrito e a terceira para indicar as distâncias percorridas (Figura 20). O equipamento pesa cerca de 245kg e os pneus têm 40cm de diâmetro, 10cm de largura e são inflados para operar com uma pressão de 70kPa (RODRIGUES FILHO, 2006).

As medições são realizadas pelo equipamento acoplado a um veículo rebocador, na velocidade de 65km/h. O sistema espargidor tem o objetivo de manter a lâmina de água de 1mm de espessura em frente a cada uma das rodas medidoras, para simular as condições de pista molhada. Quando o equipamento é rebocado, as forças laterais, resultantes do deslizamento lateral das rodas medidoras, são transmitidas aos braços móveis e medidas por uma célula de carga que transmite eletronicamente as informações a um sistema de coleta de dados. O processo de medição, além de ser simples, é de boa precisão (SANTOS, 2004).

No Brasil, o *MuMeter* é especificado pela Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC (DAC, 2001). Esta agência considera como nível de planejamento de manutenção o valor do coeficiente de atrito de 0,50. Alguns aeroportos possuem seus próprios planos de manutenção específicos que definem um valor, de acordo com suas condições operacionais. No caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza, o valor do coeficiente de atrito recomendado pela ANAC é mantido igual a 0,50 (OLIVEIRA, 2009).

Figura 20 - *MuMeter*

Fonte: Lugão (2008).

- *Skiddometer*

O *Skiddometer*, assim como o *Mu-Meter*, é um equipamento rebocável. O equipamento faz medições de atrito com a pista molhada com cerca de 1mm de filme de água, sendo necessário neste caso acoplar uma unidade de água no veículo, como apresentado na Figura 21. O sistema faz o controle de água de acordo com a especificação do filme de água definido. É equipado com uma roda teste para medição do atrito projetada para operar com uma taxa de deslizamento de 17%. O reboque possui uma estrutura soldada apoiado por três rodas em linha. As duas rodas laterais são para garantir a estabilidade do conjunto reboque do reboque e a roda intermediária para fazer as medições do coeficiente de atrito. As medidas de resistência são levadas a cabo por um sensor, os dados são coletados, processados e armazenados por um computador (MELO, 2009).

Figura 21 - Equipamento *Skiddometer*

Foto: COPA Engenharia (2012).

- *Grip Tester*

O equipamento encontra-se em operação no Brasil e é constituído por um reboque de três rodas que realiza medidas de atrito de modo contínuo (Figura 22). As três rodas são do tipo deslizômetro (*skiddometer*). A roda central é responsável pela medida do atrito e apresenta uma rotação retardada operando com uma taxa de deslizamento controlada de 15% e pode atingir velocidade de deslocamento até de 65km/h. Este tipo de equipamento registra o atrito em função do grau de deslizamento, ou seja, o bloqueio é variável; desde a roda girando livremente (0% de deslizamento) até o bloqueio total (100% de deslizamento).

Figura 22 - *Grip Tester*



Foto: Petrobrás/CENPES (2012).

2.7. Modelos Preditivos de Macrotextura

Uma grande preocupação dos pesquisadores é a medição de macro e de microtextura dos pavimentos relacionados à resistência a derrapagem. De acordo com Abe *et al.* (2000); Henry, (2000); Yandell *et al.* (1983) *apud* Masad *et al.* (2009), esta prática tem sido comum nos últimos anos. Os mesmos desejavam obter modelos computacionais utilizando dados de laboratório para prever o atrito no pavimento. Segundo Johsen (1997), a utilização de um modelo seria vantajosa, já que os métodos utilizados nos testes não são facilmente repetíveis e provavelmente o uso do modelo traria vantagens relacionadas ao tempo e aos custos.

Modelos foram estudados na tentativa de estimar a profundidade da textura utilizando parâmetros de projetos de misturas, tais como granulometria, tamanho de agregado e propriedades volumétricas da mistura. Alguns modelos são apontados a seguir os quais são utilizados na avaliação de macrotextura de misturas asfálticas projetados em laboratório.

- NCHRP Report 441 (STROUP-GARDINER e BROWN, 2000) – Este modelo prediz a profundidade média estimada de textura, em inglês *Estimated Mean Texture Depth* (EMTD), com base no tamanho dos agregados e nas características da granulometria. O tamanho de peneiras associado a 10, 30 e 60% passante é usado para o cálculo dos coeficientes de uniformidade e de curvatura (C_U e C_C , respectivamente). O coeficiente de regressão encontrado para a equação foi de 0,65.

$$\text{EMTD} = 0,0198 \text{ MS} - 0,004984 \text{ P4} + 0,1038 \text{ C}_C + 0,004861 \text{ C}_U \quad (5)$$

Onde:

EMTD: profundidade média estimada de textura (calculada utilizando o ROSANv, medidor a *laser* de textura);

MS: Tamanho Máximo de agregado, mm;

P4: Porcentagem passante da peneira nº4 (4,75mm);

C_C e C_U representam, respectivamente, o coeficiente de curvatura e de uniformidade.

Esses coeficientes são determinados a partir do uso das Equações 6 e 7.

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (6)$$

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7)$$

Onde:

D_{10} : Peneira com 10% passante, mm;

D_{30} : Peneira com 30% passante, mm;

D_{60} : Peneira com 60% passante, mm.

- *Virginia Smart Road* (DAVIS, 2001) – MPD – *Mean Profile Depth* ou Profundidade média do perfil é medida utilizando perfilômetro a *laser*. A análise é feita de acordo com as propriedades da mistura que compõe o revestimento do pavimento para determinar quais propriedades tiveram o maior efeito sobre o MPD. A equação resultante da análise de regressão é fornecida abaixo. O coeficiente de regressão encontrado para a equação foi de 0,97, indicando um excelente ajuste.

$$\text{MPD} = -3.596 + 0.1796 \text{ NMS} + 0.0913 \text{ P4} - 0.0294 \text{ VTM} + 0.1503 \text{ VMA} \quad (8)$$

Onde:

MPD: Profundidade média do perfil;

NMS: Tamanho Máximo Nominal do agregado do inglês *Nominal Maximum Size*, mm;

P4: Porcentagem passante da peneira nº4 (4,75mm);

VTM: Total de vazios da mistura;

VMA: Vazios no agregado mineral.

- *NCAT-Derived Model* (SULLIVAN, 2005) - as medições de texturas de superfície foram baseadas nos efeitos das granulometrias das misturas e do teor de ligante. A profundidade de textura pode ser estimada com precisão utilizando o teor de ligante e distância média ponderada da curva granulométrica com relação à Linha de Densidade Máxima (LDM). O modelo desenvolvido é apresentado a seguir. O coeficiente de regressão encontrado foi de 0,96, indicando um excelente ajuste.

$$\Omega = \Sigma\{[(SivS/MaxAgg)^{0,45} \times 100] - \%Pass\} \times SivS \quad (9)$$

Onde:

Ω : Distância ponderada da LDM;

SivS: Tamanho da peneira;

MaxAgg: Tamanho Máximo do agregado na mistura;

%Pass: Porcentagem passante da peneira.

$$MPD = 0,025 \times \Omega^2 + 0,037 \times \Omega - 0,0265 \times Pb + 0,052 \quad (10)$$

Onde:

Pb: Porcentagem do ligante em peso.

2.8. Considerações Finais

Neste capítulo abordaram-se as propriedades dos agregados, granulometrias e aderência pneu-pavimento. Além de métodos de avaliação à resistência ao polimento, de compactação e de ensaios de micro e de macrotextura em laboratório. Técnicas de medição de textura e de atrito assim como modelos de predição para macrotextura, também foram descritos.

CAPÍTULO 3

MATERIAS E MÉTODOS

3.1. Considerações Iniciais

Neste capítulo, a metodologia proposta para o estudo do efeito da granulometria das misturas asfálticas na aderência pneu-pavimento, bem como os locais de investigação e as características das superfícies ensaiadas são apresentadas.

3.2. Metodologia Campo *versus* Laboratório

A metodologia desenvolvida neste estudo objetivou comparar a micro e a macrotextura das misturas asfálticas investigadas em campo com aquelas produzidas em laboratório. Ela foi planejada visando criar um procedimento de laboratório que possibilitasse inferir a macro e a microtextura que a mistura projetada teria em campo. Nas poucas ocasiões, nas quais se examinam estes aspectos do atrito, a compactação em laboratório é feita por equipamentos como mesas compactadoras. Trata-se, portanto, de um procedimento restrito a poucos laboratórios no país. A estratégia da pesquisa foi de possibilitar que a compactação para o estudo da textura superficial das misturas pudesse ser efetuada em equipamentos simples, acessíveis a qualquer laboratório. Uma programação de ensaios de laboratório e de campo foi estabelecida para a validação do método. A programação envolveu os seguintes itens:

- Coleta de massa asfáltica em campo com o objetivo de verificar a metodologia proposta em laboratório;
- Ensaios de pêndulo britânico e mancha de areia com o objetivo de determinar a micro e a macrotextura em campo e em laboratório;
- Comparação das texturas das misturas asfálticas compactadas em campo e em laboratório;
- Avaliação das granulometrias das misturas asfálticas estudadas de modo a avaliar o seu efeito na aderência pneu-pavimento.

3.3. Local de Estudo

Nesta pesquisa os seguintes dez trechos de campo, ver Figura 23, todos localizados no estado do Ceará serviram como base de dados para o desenvolvimento do método: (I) BR 116 - CE km30, (II) CE 522/Acesso à Washington Soares, (III) Rua Ademar Paula, (IV) Av. Alberto Craveiro, (V) BR 222 - CE km11, (VI) BR 222/Sobral, (VII) Túnel/Iguatemi, (VIII) CE 060/Rodovia Mendel Steinbruch, (IX) Kartódromo Júlio Ventura e (X) Pátio da Arena Castelão. A escolha dos trechos recaiu sobre obras de pavimentação sendo executadas no Estado no período (2012-2013) correspondente ao desenvolvimento da dissertação.

Figura 23 - Trechos estudados



(I) BR 116 km30



(II) CE 522/Acesso à Washington Soares



(III) Rua Ademar Paula



(IV) Av. Alberto Craveiro



(V) BR 222 - CE km11



(VI) BR 222/Sobral



(VII) Túnel/Iguatemi



(VIII) CE 060/Rodovia Mendel Steinbruch



(IX) Kartódromo Júlio Ventura



(X) Pátio da Arena Castelão

3.4. Granulometrias dos Trechos Ensaçados

As superfícies ensaiadas em campo foram de CA nas Faixas B e C do DNIT. O traço das misturas foi estudado de modo a verificar a influência do mesmo nas características de aderência pneu-pavimento. O traço da mistura utilizada no trecho (VIII) foi o mesmo utilizado no trecho (X), ou seja, nove granulometrias serão estudadas nesta pesquisa. As Figuras 24 e 25 apresentam as granulometrias separadas por Faixas B e C do DNIT.

Figura 24 - Granulometrias dos oito trechos enquadradas na Faixa C do DNIT

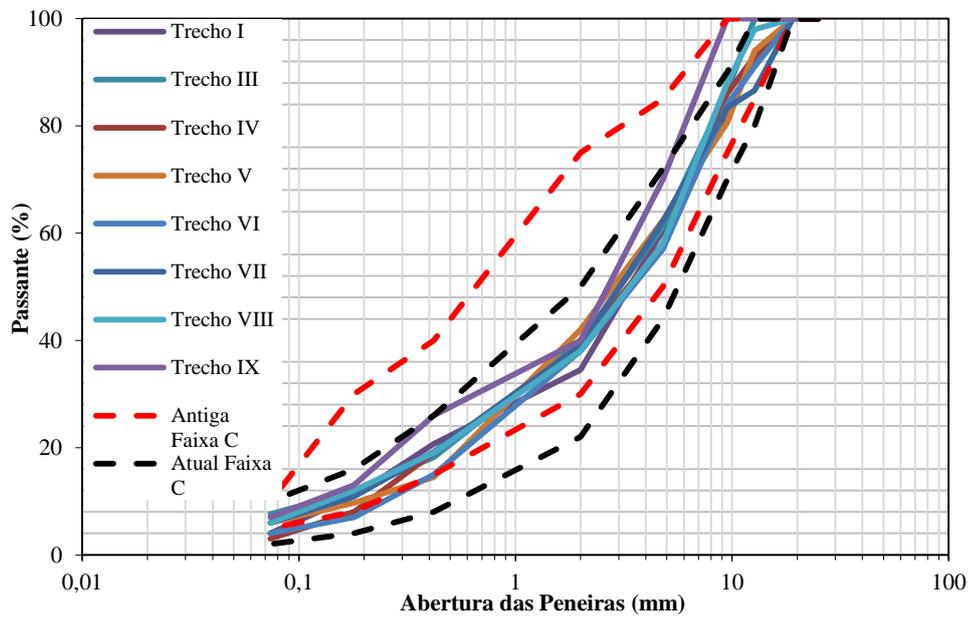
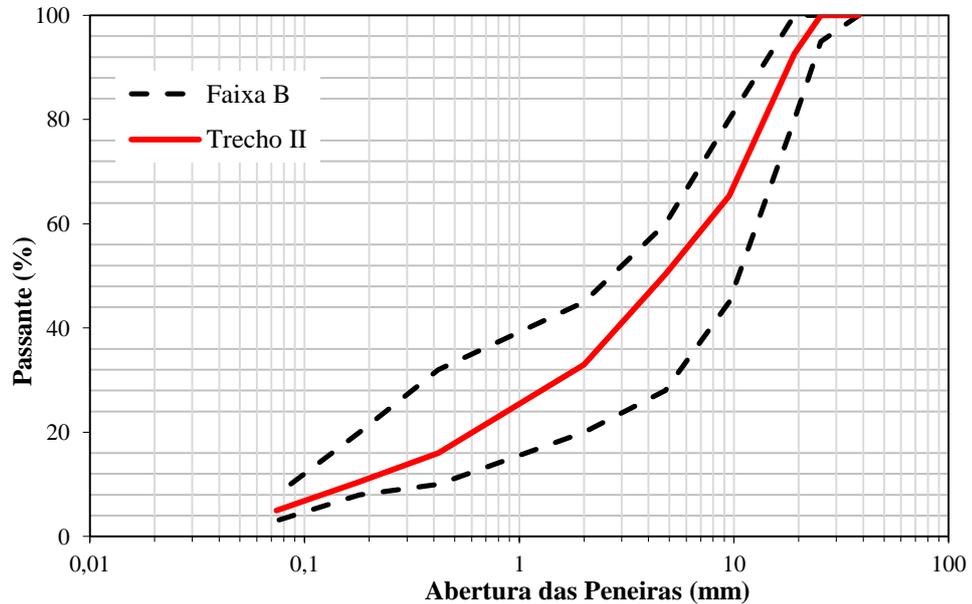


Figura 25 - Granulometria do único trecho enquadrado na Faixa B do DNIT



As Figuras 26 e 27 apresentam as granulometrias separadas em graúda e miúda de acordo com a AASHTO M 323 (2012), como exposto no Capítulo 2.

Figura 26 - Granulometrias graúdas de acordo a classificação da AASHTO M 323 (2012)

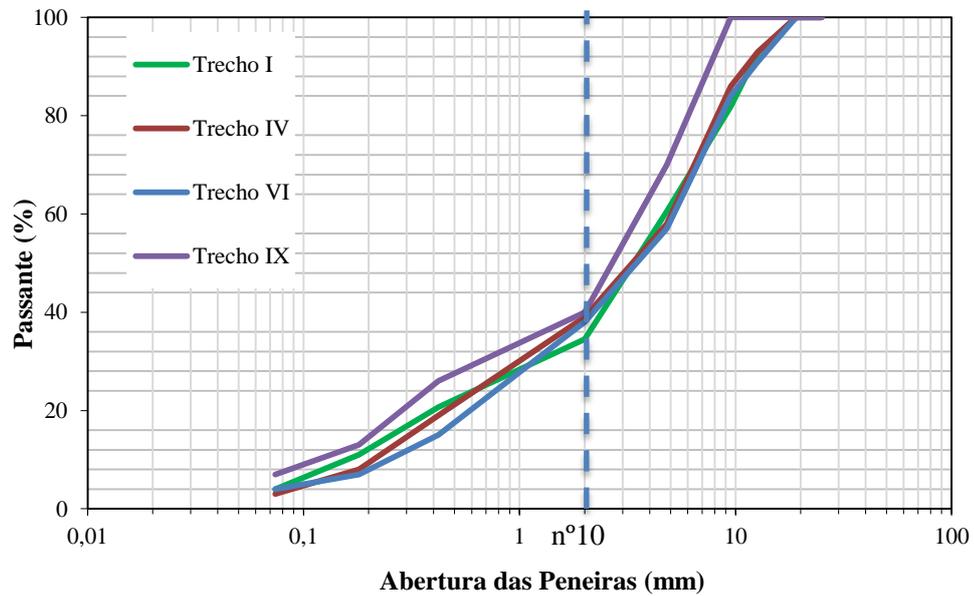
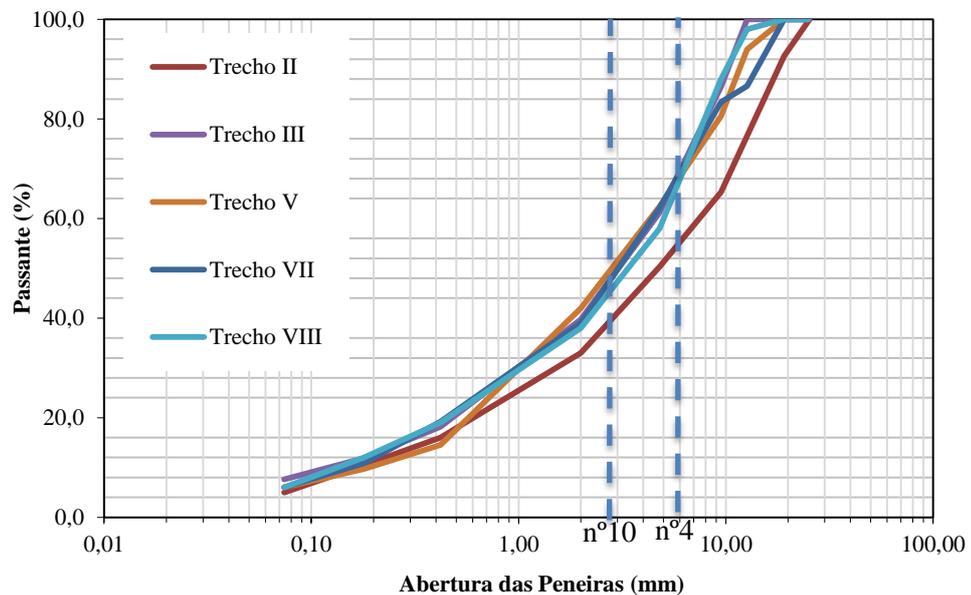


Figura 27 - Granulometrias miúdas de acordo a classificação da AASHTO M 323 (2012)



Algumas adaptações foram realizadas para as peneiras utilizadas no Brasil. A peneira n°8 (2,36mm) que pertence à série de peneiras norte americana, foi adaptada para peneira a n°10 (2,00mm) utilizada no Brasil. A porcentagem passante também teve que ser alterada através da equação (11) do Superpave (2001):

$$P = 100 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,45} \quad (11)$$

Onde:

P: porcentagem de material que passa na peneira de diâmetro d ;

d : diâmetro da peneira em questão;

D: Tamanho Máximo (TM) do agregado, definido como uma peneira acima do TMN.

Para facilitar o entendimento, observe-se como exemplo o item 4 da Tabela 8. De acordo com a Equação (11), o diâmetro da peneira em questão foi a peneira de controle primário adaptada para 2,00mm. O TM do agregado é dado pela 1ª peneira acima do TMN (12,5mm), ou seja, 19,0mm. A razão desses valores, elevada à potência de 0,45, multiplicada por 100 foi igual a 36%. O mesmo foi realizado para o item 5 da Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação adaptada de misturas densas graúdas e miúdas da AASHTO M 323 (2012)

Item	TMN	Peneira de Controle Primário (mm)	Peneira de Controle Primário (Adaptada) (mm)	Porcentagem Passante	Porcentagem Passante (Adaptada)
1	37,5mm (1 1/2")	9,5	9,5	≥ 47	≥ 47
2	25,0mm (1")	4,75	4,75	≥ 40	≥ 40
3	19,0mm (3/4")	4,75	4,75	≥ 47	≥ 47
4	12,5mm (1/2")	2,36	2,00	≥ 39	≥ 36
5	9,5mm (3/8")	2,36	2,00	≥ 47	≥ 44

Outras informações importantes são o teor de ligante e o Volume de vazios (Vv) de cada mistura dos trechos estudados. O teor de ligante nas misturas de CA influencia na aderência pneu-pavimento. O excesso de ligante tende a provocar a migração de finos e do ligante para a superfície, durante o processo de densificação pelo tráfego. A presença de finos e de ligante reduz a microtextura, o que diminui o potencial das arestas do agregado de romper a película d'água na interface pneu-pavimento. Em relação ao Vv, é importante a mistura possuir mais vazios para tornar o pavimento mais permeável e não manter o filme d'água na superfície, o que leva a hidroplanagem. A Tabela 9 apresenta as informações de teor de ligante e de Vv das misturas dos trechos estudados.

Tabela 9 - Teor de ligante e volume de vazios das misturas dos trechos analisados

Trechos	Teor de ligante (%)	V_v (%)
(I) BR 116 km30	5,1	3,3
(II) CE 522/Acesso à Washington Soares	4,7	4,6
(III) Rua Ademar Paula	6,5	3,7
(IV) Av. Alberto Craveiro	5,2	3,3
(V) BR 222 km11	5,3	3,7
(VI) BR 222/Sobral	5,3	3,2
(VII) Túnel/Iguatemi	5,8	3,6
(VIII) CE 060/Rod. Mendel Steinbruch*	5,3	3,4
(IX) Kartódromo Júlio Ventura	6,2	3,9
(X) Pátio da Arena Castelão*	5,3	3,4

*A mistura asfáltica aplicada na CE 060 foi a mesma aplicada para o Pátio da Arena Castelão.

3.5. Compactação em Campo *versus* em Laboratório

- Compactação em Campo

A compactação seguiu os procedimentos tradicionais de campo para todos os trechos (Figura 28): (a) inicialmente, com rolos compactadores pneumáticos e, em seguida, (b) com rolos compactadores lisos de aço. O número de passadas dos compactadores variou de acordo com cada trecho, como observado na Tabela 10. Realizaram-se, nos trechos avaliados, os ensaios de (c) pêndulo britânico e de (d) mancha de areia nas trilhas de roda dos revestimentos dos trechos, excetuando-se o trecho X por ser tratar de um pátio de estacionamento.

Figura 28 - Procedimento em campo: compactação, ensaio de pêndulo britânico e ensaio de mancha de areia



(a) rolo compactador de pneu



(b) rolo compactador liso de aço



(c) ensaio de pêndulo britânico



(d) ensaio de mancha de areia

Tabela 10 - Tipo e nº de passadas dos rolos de pneu e liso utilizados na compactação dos trechos estudados

Trechos	Rolo de pneu	nº de passadas	Rolo liso	nº de passadas
I	DYNAPAC CP 221	6	HAMM HD 75	2
II	DYNAPAC CP 224	6	DYNAPAC CC 142	2
III	MULLER AP 26	*	MULLER RT 62H	*
IV	DYNAPAC CP 221	8	DYNAPAC CC 224	3
V	DYNAPAC CP 224	6	HAMM HD 75	2
VI	BOMAG BW 25 RH	10	HAMM HD 75	2
VII	DYNAPAC CC 224	8	DYNAPAC CC 142	3
VIII	DYNAPAC CP 221	6	DYNAPAC RC 06	2
IX	BOMAG BW 24R	8	DYNAPAC CC 224	2
X	DYNAPAC CP 221	*	DYNAPAC CC 224	*

*Não informado.

A passagem do rolo compactador compreende três fases consecutivas: acomodamento ou rolagem inicial, rolagem intermediária e rolagem final. A rolagem de acomodamento compacta o material além da compactação pela acabadora. A rolagem intermediária densifica e sela a superfície. A rolagem final apaga as marcas dos rolos e outras imperfeições deixadas na rolagem anterior (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989).

Acredita-se que a textura final do revestimento é influenciada principalmente pelo rolo liso responsável pelo acabamento da camada final. Observou-se, nos trechos estudados, que o número de passadas do mesmo foi determinado de modo que se eliminassem as estrias deixadas pelo rolo pneumático, ou seja, não há um número específico de passadas do rolo liso. Outro equipamento também considerado influente na camada final do pavimento é a acabadora asfáltica que espalha a mistura numa camada uniforme de espessura e forma pretendidas. É fundamental que este equipamento esteja em boas condições para que a camada seja conformada de maneira correta sem alteração na textura final do revestimento.

- Compactação em Laboratório

O procedimento de compactação desenvolvido em laboratório baseou-se na pesquisa realizada por Pereira (2010b) para Tratamento Superficial (TS). Esse procedimento consiste em usar um cilindro preenchido por concreto, pesando cerca de 55kg, passando sobre as amostras de TS para acomodação dos agregados, conforme indicado na Figura 29. Para maiores detalhes dessa metodologia ver, também, Pereira (2013).

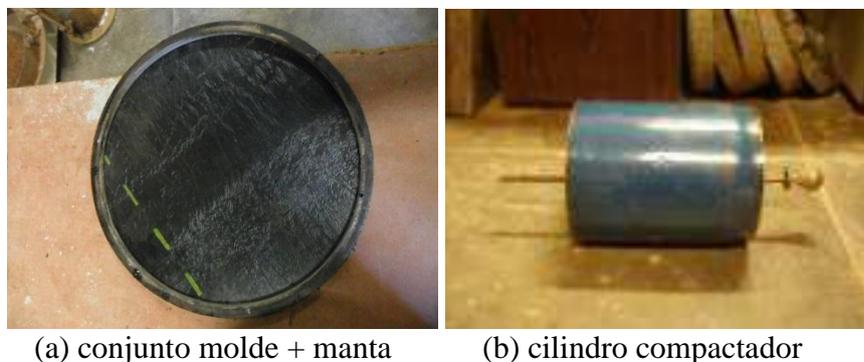
Figura 29 - Procedimento de compactação em amostras de TS proposto por Pereira (2010b)



Fonte: Pereira (2010b).

Utilizando o mesmo cilindro descrito, as amostras de CA foram confeccionadas para a avaliação da compactação em laboratório. Nesse processo a pressão do cilindro, a cada passada, é sempre a mesma. A metodologia desenvolvida está descrita a seguir e pode ser observada na Figura 30.

Figura 30 - Procedimento para confecção de corpos de prova em laboratório proposto na presente pesquisa para a realização do ensaio de aderência





(c) conjunto (a) e (b)



(d) amostra após a compactação



(e) ensaio de pêndulo britânico



(f) ensaio de mancha de areia

- Primeiramente, preparou-se um molde circular de ferro (286mm de diâmetro e 20mm de altura) sobre uma manta asfáltica (material impermeabilizante à base de asfalto modificado com polímeros) com função de apoio para receber misturas com TM de agregados com até 20mm, Figura 30(a). O molde circular foi adotado nesta pesquisa devido essa metodologia ser baseada na pesquisa de Pereira 2010b a qual utilizava amostras circulares para serem ensaiadas no *Wet Track Abrasion Test* (WTAT). O principal erro detectado em laboratório foi a aplicação de misturas de TMs maiores do que a espessura do molde, pois os agregados saltaram para a superfície, conseqüentemente, falseando os resultados. A verificação do TM do agregado e a espessura do molde são importantes para a adequação da superfície final da amostra. É indicado que a espessura da amostra para CA seja igual a 20mm ou mais, dependendo do TM dos agregados;

- Pesou-se 3.000g da massa asfáltica coletada em campo e, em seguida, a mesma foi posta na estufa até atingir a mesma temperatura daquela aplicada em campo, aproximadamente 155°C. O molde também foi aquecido à mesma temperatura. A temperatura ambiente de laboratório foi de aproximadamente 20°C;

- Ao atingir a temperatura, a massa asfáltica foi espalhada uniformemente no (a) conjunto (molde + manta) e compactada utilizando (b) o cilindro, como apresentado na Figura 30. Executou-se 15 passadas do (c) cilindro na amostra. O número de passadas foi determinado ao observar que, após 15 passadas, a textura (d) da amostra não se alterava mais. O critério de definição do número de passadas foi apenas visual;

- Após a compactação em laboratório, realizaram-se os (e) ensaios de pêndulo britânico e de (f) mancha de areia para fins de comparação com a micro e a macrotextura obtidas por estes ensaios em campo, Figura 30. Devido às amostras apresentarem uma dimensão restrita, o volume de 25cm^3 de areia no ensaio de mancha foi reduzido em laboratório pela metade, isto é, $12,5\text{cm}^3$, como realizado por Pereira (2010a) e Maillard-Nunes (2008).

Objetivando a comparação entre os dados de mancha de areia e os volumes de 25cm^3 e de $12,5\text{cm}^3$, foi realizado, em campo, um teste com os dois volumes mencionados. Primeiramente, realizou-se o ensaio de mancha de areia com o volume padrão de 25cm^3 e, em seguida, na mesma superfície, onde foi removida completamente a areia como indica a Figura 31(a), foi realizado o mesmo ensaio com a metade do volume, visto na Figura 31(b). Foram escolhidos oito pontos em um único trecho para a realização do teste comparativo.

Figura 31 - Teste comparativo do ensaio de mancha de areia com volumes diferentes



(a) remoção da areia da mancha com volume de 25cm^3



(b) mancha de areia com volume de $12,5\text{cm}^3$

A Tabela 11 apresenta os resultados do teste comparativo com a respectiva classificação de macrotextura.

Tabela 11 - Resultados dos valores de HS com volume de 25cm³ e de 12,5cm³

HS com 25cm ³	HS com 12,5cm ³	Classificação de HS com 25cm ³ /12,5cm ³
0,40	0,37	Fina/Fina
0,39	0,38	Fina/Fina
0,37	0,35	Fina/Fina
0,29	0,28	Fina/Fina
0,31	0,31	Fina/Fina
0,31	0,28	Fina/Fina
0,38	0,35	Fina/Fina
0,32	0,29	Fina/Fina

Os resultados apresentaram discrepância máxima de 0,03 unidades e a classificação de macrotextura tanto do HS com 25cm³ como do HS com 12,5cm³ foi a mesma. Ou seja, para as misturas semelhantes às aqui estudadas a redução do volume da areia pela metade não alterou o ensaio de mancha de areia. Entretanto, a redução do volume padrão pode induzir ao erro para misturas com macrotextura mais grossa, sendo necessária uma realização desse mesmo teste com diferentes texturas e variadas classes de classificação de macrotextura.

3.6. Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentados os trechos estudados com as respectivas características das misturas, especificamente: granulometrias (tanto por faixa do DNIT como na classificação graúda e miúda da AASHTO, 2012), teores de ligante e Vv. Descreveu-se a metodologia proposta na pesquisa e o teste comparativo dos volumes de areia do ensaio de mancha de areia dado que este teste foi adaptado para o desenvolvimento do estudo.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Considerações Iniciais

O presente capítulo apresenta os resultados de micro e de macrotextura de campo e das amostras de laboratório das misturas investigadas conforme a metodologia adotada e descrita no capítulo anterior. Apresenta-se ainda a discussão destes resultados.

4.2. Análise dos Parâmetros Estatísticos: Campo *versus* Laboratório

Visando caracterizar as superfícies de cada trecho investigado e das amostras moldadas em laboratório, utilizaram-se os valores de microtextura e de macrotextura obtidos em campo e em laboratório. Determinaram-se a Média (\bar{x}) e o Desvio Padrão (s) dos valores de BPN e HS dos pontos investigados em campo e das amostras moldadas em laboratório. Para verificar a homogeneidade dos dados, calculou-se o Coeficiente de Variação (CV), definido por:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (11)$$

As Tabelas 12 e 13 mostram um resumo dos resultados de micro e de macrotextura, respectivamente. Dados de IFI encontram-se no Apêndice A. Como observado, os valores de CV de macrotextura (HS) foram mais elevados comparados aos valores de microtextura (BPN). A alta variabilidade dos resultados de macrotextura (HS) em campo pode ser explicada por fatores como erros na misturação, manejo da mistura e compactação (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989). A heterogeneidade quanto à macrotextura, não somente dos revestimentos aqui estudados como também daqueles observados por empresas de construção do Estado, pode ser visualizada na Figura 32. É esperada a maior variabilidade da macrotextura uma vez que este parâmetro depende da granulometria, que pode sofrer variações de um lugar para outro (mesmo próximos), e do processo de execução, enquanto a microtextura é mais relacionada à característica dos agregados (mineralogia e propriedades dos agregados), portanto, menos suscetível a variações tão elevadas.

Figura 32 - Variabilidade de HS para revestimentos novos



Foto: Autora (2013).

Foto: COPA Engenharia (2012).

Tabela 12 - Análise dos dados de pêndulo britânico dos trechos estudados em campo e em laboratório

Trecho	\bar{x} (BPN)		s (BPN)		CV (%)	
	Campo	Laboratório	Campo	Laboratório	Campo	Laboratório
I	68,5	71,8	4,1	5,2	6,0	7,2
II	81,7	80,0	4,4	2,1	5,4	2,6
III	54,6	81,0	3,6	4,0	6,7	5,0
IV	92,2	75,6	5,3	5,2	5,7	6,9
V	59,5	83,3	3,5	4,1	6,0	5,0
VI	80,0	78,9	1,4	1,6	1,7	2,1
VII	81,0	82,0	0,7	1,6	0,8	2,0
VIII	83,8	75,7	6,6	1,6	7,9	2,1
IX	74,9	74,5	1,1	1,4	1,5	1,9
X	74,8	76,3	3,5	1,9	4,7	2,5

Tabela 13 - Análise dos dados de mancha de areia dos trechos estudados em campo e em laboratório

Trecho	\bar{x} (HS)		s (HS)		CV (%)	
	Campo	Laboratório	Campo	Laboratório	Campo	Laboratório
I	0,45	0,68	0,05	0,07	11,4	10,0
II	0,34	0,75	0,08	0,09	24,6	12,5
III	0,41	0,58	0,11	0,10	26,6	17,7
IV	0,43	0,64	0,11	0,10	16,1	25,0
V	0,47	1,02	0,04	0,14	8,2	13,6
VI	0,47	0,80	0,13	0,06	12,6	16,8
VII	0,51	0,75	0,10	0,01	2,3	14,1
VIII	0,45	0,47	0,09	0,09	19,9	18,5
IX	0,37	0,49	0,03	0,05	7,1	10,9
X	0,46	0,41	0,10	0,04	22,1	10,8

4.3. Comparação da Metodologia de Compactação: Campo *versus* Laboratório

Exemplos de amostras após a compactação em laboratório são apresentados na Figura 33. O número de amostras em laboratório foi determinado de acordo com a quantidade disponível de massa asfáltica trazida de campo, geralmente cinco amostras por trecho foram avaliadas. Adotou-se a classificação de macro e de microtextura do DNIT por ser a classificação normatizada no meio rodoviário, apesar da classificação proposta por Aps (2006) ser considerada mais completa pela adição de faixas, como discutido no Capítulo 2.

Figura 33 - Amostras após a compactação em laboratório



As Figuras 34 e 35 apresentam gráficos de comparação dos dados de micro e de macrotextura de campo e de laboratório. Os dados foram organizados de maneira que os valores máximos e mínimos de campo fossem comparados também com os valores máximos e mínimos de laboratório.

Figura 34 - Comparação dos dados de macrotextura: campo *versus* laboratório dos trechos estudados

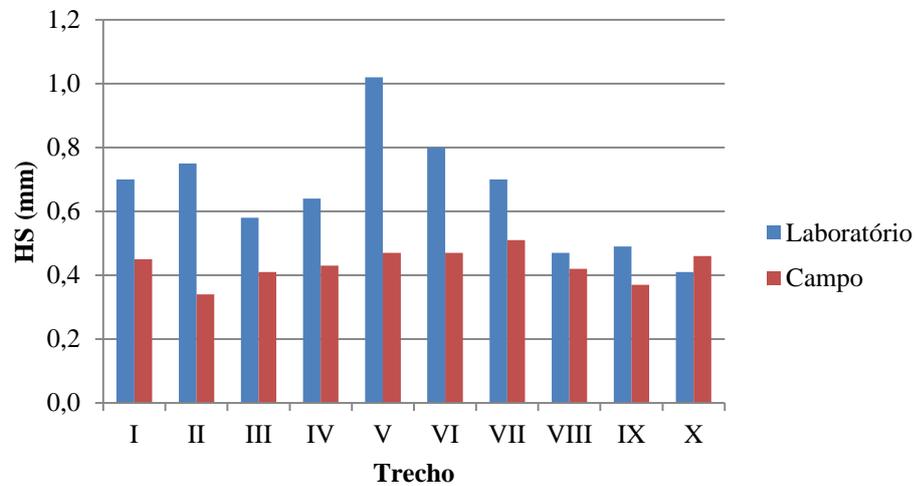
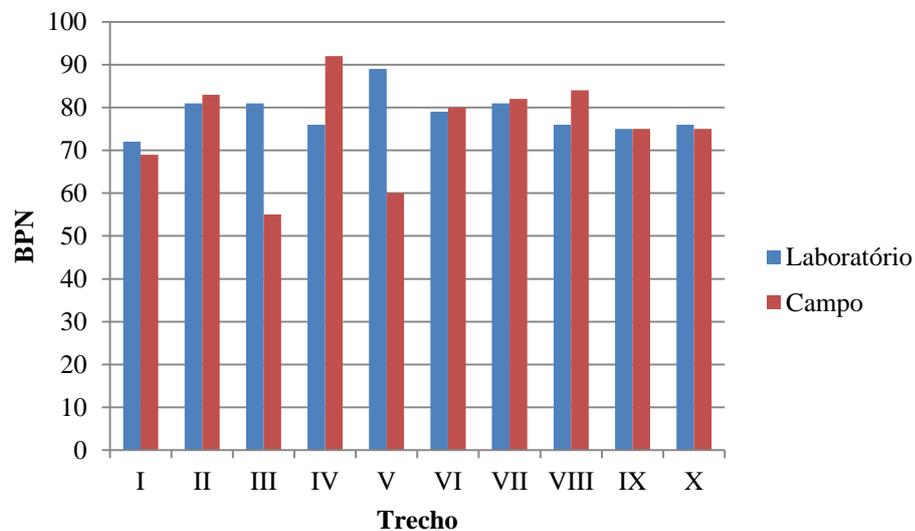


Figura 35 - Comparação dos dados de microtextura: campo *versus* laboratório dos trechos estudados



A maioria dos trechos estudados apresentou as médias dos resultados do ensaio de mancha de areia das amostras em laboratório maior quando comparadas às médias dos resultados do ensaio de mancha de areia nas superfícies em campo (Figura 34). Ou seja, a macrotextura das amostras em laboratório foi mais grossa ou mais aberta do que a macrotextura encontrada em campo. Acredita-se que a espessura das amostras em laboratório influenciou a macrotextura. Uma abordagem mais específica sobre este assunto será tratada mais adiante.

Em relação ao ensaio de pêndulo britânico, a Figura 35 mostra que as médias dos valores dos ensaios das amostras realizados em laboratório foram maiores quando comparadas às médias dos valores do ensaio das superfícies em campo dos trechos III e V. Ou seja, a microtextura das amostras em laboratório foi mais rugosa do que a microtextura das superfícies em campo. As médias dos resultados do ensaio de pêndulo britânico das amostras em laboratório foram semelhantes às médias dos resultados da superfície em campo dos trechos I, II, VI, VII, IX e X. Os trechos VI, VII e IX tiveram seus resultados de campo e de laboratório com dispersão de apenas 1%. As médias dos resultados de microtextura em campo foram maiores 22% e 11%, respectivamente, comparadas às médias dos resultados de laboratório para as amostras dos trechos IV e VIII. Uma abordagem sobre esses resultados também será tratada mais adiante. Em resumo, no que diz respeito à microtextura, o resultado de laboratório foi superior em dois trechos, igual ao de campo em seis trechos e inferior em dois trechos.

A mistura aplicada no trecho VIII foi também aplicada no trecho X. Esperou-se que os resultados de campo e de laboratório destes dois trechos produzissem o mesmo valor de microtextura. Não era esperado que os resultados de macrotextura fossem necessariamente iguais devido às variações principalmente de equipamentos e de temperatura, tanto da massa asfáltica como do ambiente. Ao comparar o resultado de microtextura de campo dos dois trechos citados, verificou-se que o valor de microtextura do trecho VIII foi maior quando comparado ao valor de microtextura do trecho X. Atribuiu-se o elevado valor do trecho VIII ao curto espaço de tempo entre a compactação da massa asfáltica e a realização do ensaio de pêndulo britânico. Como o ensaio foi realizado antes do completo resfriamento do revestimento, o ligante aderiu à sapata do pêndulo britânico dificultando o deslizamento fazendo com que os resultados fossem maiores 12% do que o esperado. Porém, os resultados de laboratório dos dois trechos foram bem próximos, conforme esperado.

As Figuras 36 e 37 apresentam a distribuição dos dados de microtextura de campo e de laboratório de todos os trechos ensaiados com relação à chamada “linha de igualdade”. O gráfico é composto por valores encontrados em laboratório localizados no eixo das abscissas e os valores encontrados em campo do mesmo parâmetro localizados no eixo das ordenadas. Os parâmetros são de micro e macrotextura. Quanto mais próximos os pontos estiverem da reta de igualdade, mais consistente será a relação campo e laboratório, ou seja, a metodologia adotada em laboratório seria validada.

Figura 36 - Comparação dos dados de microtextura: campo *versus* laboratório dos trechos estudados e amostras de laboratório com 20 e 10mm de espessura

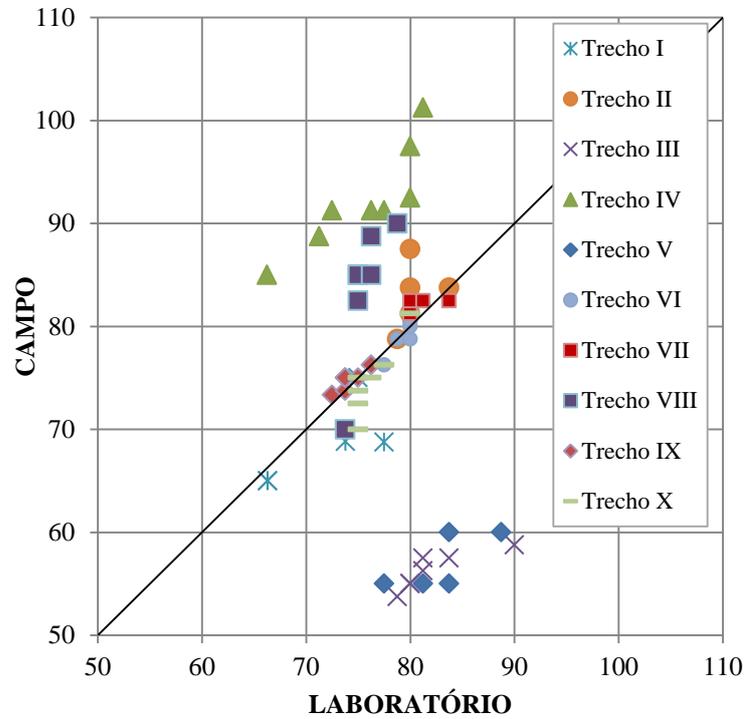
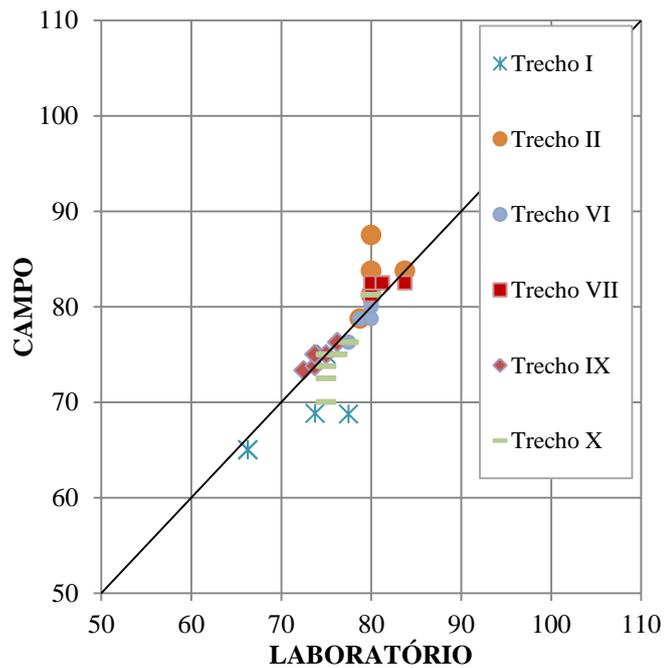


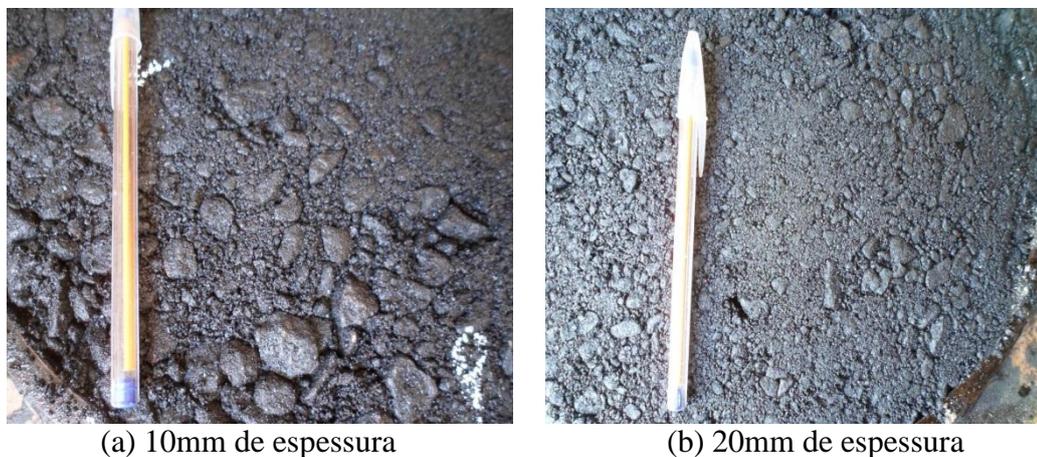
Figura 37 - Comparação dos dados de microtextura: campo *versus* laboratório dos trechos estudados e amostras de laboratório com 20mm de espessura



A Figura 36 apresenta os resultados de microtextura de campo e de laboratório de todos os trechos estudados. Os trechos I, II, VI, VII, IX e X apresentaram os melhores resultados no que diz respeito à consistência pretendida, como observado na Figura 37. Os resultados dos trechos IV e VIII situaram-se acima da reta, enquanto os resultados dos trechos III e V situaram-se abaixo da reta. Esses últimos trechos mencionados foram retirados da Figura 36 a fim de apresentar apenas os trechos com resultados satisfatórios na Figura 37.

É importante observar que os trechos que apresentaram os resultados consistentes entre campo e laboratório, tiveram as suas amostras em laboratório elaboradas com 20mm de espessura, enquanto que as outras amostras foram elaboradas com apenas 10mm de espessura, justamente as amostras retiradas para elaboração da Figura 37. Portanto, esta pode ser considerada uma indicação de que a espessura das amostras influenciou nos resultados de microtextura em laboratório, já que os agregados penetrarão mais na mistura se a espessura for maior, levando a uma acomodação dos mesmos. As Figuras 38 (a) e (b) apresentam a textura das amostras com 10mm e 20mm de espessura, respectivamente.

Figura 38 - Texturas das amostras compactadas em laboratório com espessuras diferentes



As Figuras 39 e 40 apresentam a distribuição dos dados com relação à macrotextura de campo e de laboratório de todos os trechos ensaiados com relação à “linha de igualdade”. A Figura 39 mostra que a maioria dos resultados de macrotextura em laboratório foi superior aos resultados de macrotextura encontrados em campo, ou seja, a macrotextura das amostras em laboratório foi mais grossa ou mais aberta do que a superfície em campo na maioria dos casos, conforme mencionado anteriormente. É possível que a energia de compactação, a área e a espessura restrita do molde utilizado influenciaram nos resultados de macrotextura em laboratório. Os pontos dos diversos trechos ficaram muito próximos uns dos

outros, devido às granulometrias serem parecidas, afinal é padrão no Ceará o uso da Faixa C do DNIT. Os dados de campo *versus* laboratório de macrotextura também foram separados por espessura da amostra. A Figura 40 apresenta somente as amostras preparadas com 20mm de espessura. Observou-se que, apenas para o trecho X foram gerados valores de campo e de laboratório consistentes, e os valores do trecho VIII se localizaram bem próximos a linha da igualdade. Ou seja, no que diz respeito à macrotextura, não houve propriamente uma tendência quando se comparam todos os resultados de campo e de laboratório. Embora os dados dos demais trechos não tenham apresentado a consistência esperada, identificou-se que dos dez trechos estudados, apenas três (II, V e IX) não obtiveram a mesma classificação de macrotextura em campo e em laboratório.

Figura 39 - Comparação dos dados de macrotextura: campo *versus* laboratório dos trechos estudados e das amostras de laboratório com 20 e 10mm de espessura

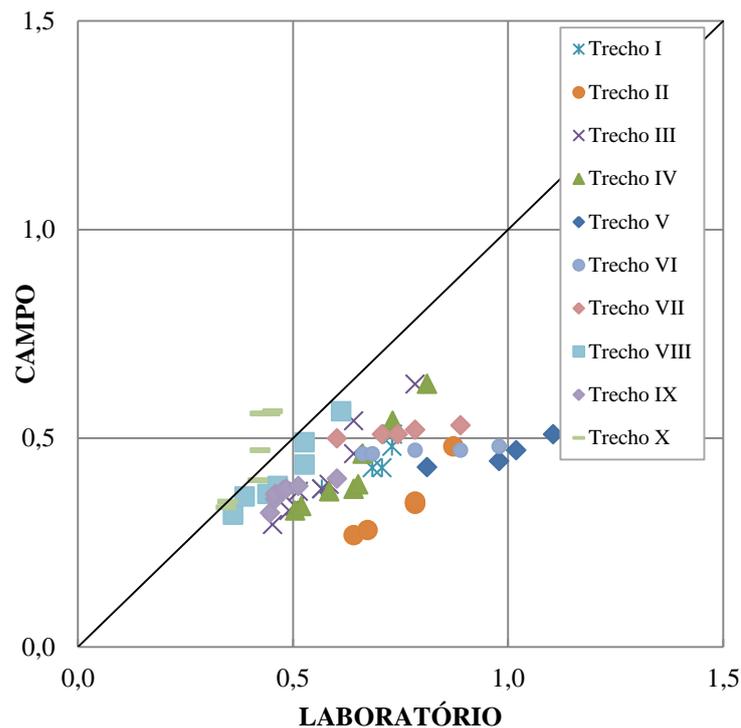
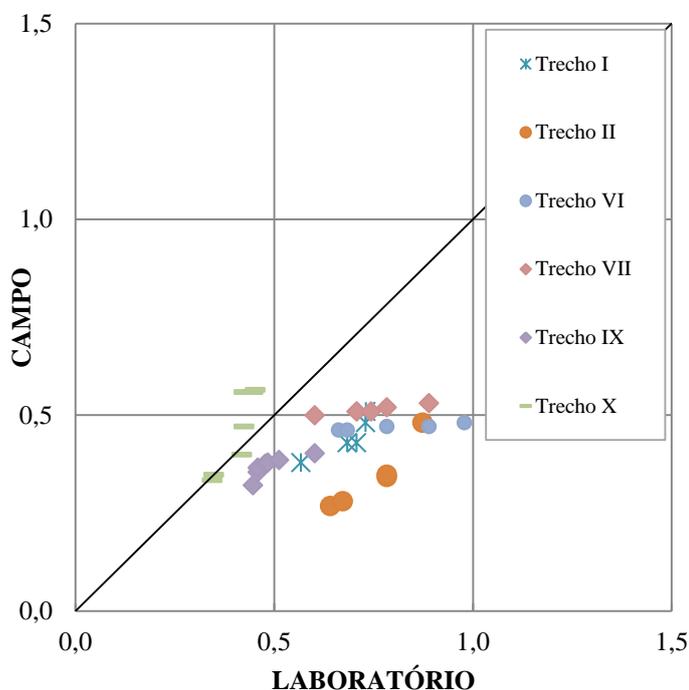


Figura 40 - Comparação dos dados de macrotextura: campo *versus* laboratório dos trechos estudados e amostras de laboratório com 20mm de espessura



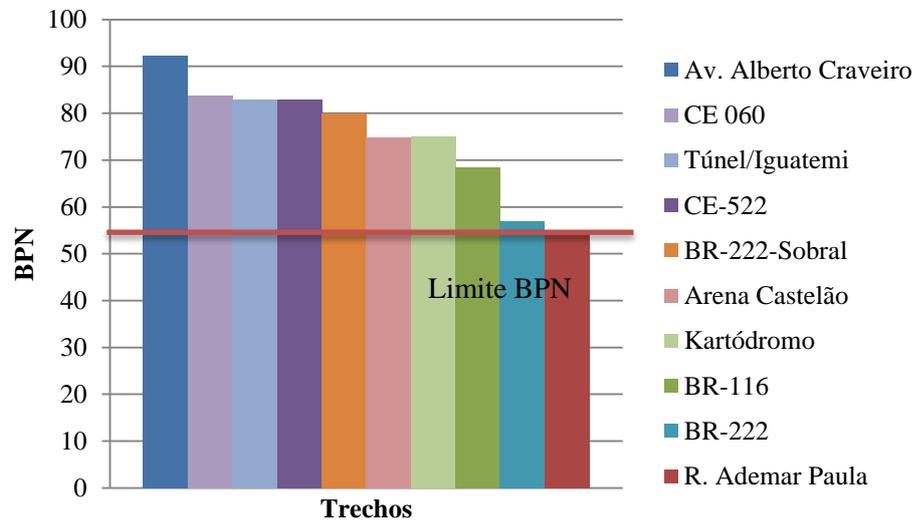
4.4. Análise das Granulometrias dos Trechos Estudados

As granulometrias das misturas utilizadas nos trechos avaliados nesse estudo foram analisadas a fim de se verificar a influência das mesmas nas propriedades de micro e de macrotextura das superfícies dos revestimentos dos trechos estudados em campo. Primeiramente, foi realizado o ranqueamento dos trechos quanto à micro e à macrotextura e, em seguida, foi feita a análise das frações de peneiras das granulometrias das misturas asfálticas.

A Figura 41 apresenta as médias dos dados dos resultados dos ensaios com o pêndulo britânico realizados nos trechos estudados em campo. Todos os trechos apresentaram valores satisfatórios de microtextura, considerando os valores limites de atrito como sendo uma superfície medianamente rugosa ($BPN = 47$). A microtextura está ligada a mineralogia e as propriedades dos agregados, entretanto tais características e as fontes mineralógicas desses agregados não foram investigadas nesta pesquisa. O revestimento do trecho IV apresentou a melhor microtextura. Constatou-se que esta mistura foi composta por material fresado, o que pode indicar o poder deste constituinte com relação à elevar a microtextura de um

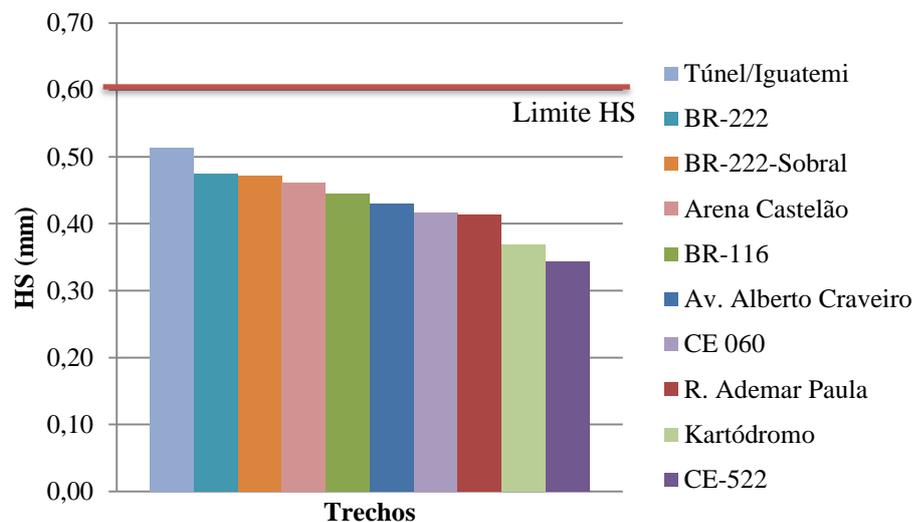
revestimento. Portanto, deve-se realizar um estudo mais detalhado com relação às propriedades dos agregados fresados do material.

Figura 41 - *Ranking* da microtextura dos trechos em campo



A mesma análise foi realizada para os dados de mancha de areia realizados em campo (Figura 42). Todos os trechos apresentaram valores abaixo do recomendado pelo DNIT (HS = 0,6mm). De antemão, esperou-se que o trecho II apresentasse o melhor resultado devido ao traço da mistura que apresentou maior Vv. Todavia, isso não foi observado na pesquisa.

Figura 42 - *Ranking* da macrotextura dos trechos em campo



O passo seguinte foi avaliar as porcentagens de material retido em cada fração de peneira em relação à macrotextura. Segundo NCHRP 108 (2009), as peneiras 3/8" (9,50mm) a n°8 (2,36mm) influenciam mais a macrotextura. Como exposto no Capítulo 3, a peneira n°8 (norte-americana) foi adaptada para a n°10 (usada no Brasil). A Tabela 14 apresenta as porcentagens de material passantes em cada peneira para todas as misturas estudadas com a respectiva classificação de granulometria em graúda e em miúda segundo a AASHTO M 323 (2012) como apresentado no Capítulo 3.

Tabela 14 - Porcentagem de agregados passantes das misturas estudadas

Peneiras	Trecho								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII*	IX
1"	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	100,0	92,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	92,8	-	100,0	93,0	94,0	91,0	86,6	98,0	100,0
3/8"	81,9	65,3	86,5	86,0	80,6	84,0	83,4	88,0	100,0
n°4	60,5	50,3	61,2	58,0	62,4	57,0	62,2	58,0	70,0
n°10	34,5	33,0	39,7	39,0	42,0	38,0	39,0	38,0	40,0
n°40	20,7	16,0	18,2	19,0	14,5	15,0	19,2	19,0	26,0
n°80	11,0	10,5	11,9	8,0	9,7	7,0	10,9	12,0	13,0
n°200	4,0	5,0	7,6	3,0	6,0	4,0	6,0	6,0	7,0
Classificação									
AASHTO M323 (2012)	Graúda	Miúda	Miúda	Graúda	Miúda	Graúda	Miúda	Miúda	Graúda

*granulometria do trecho VIII igual a granulometria do trecho X.

Primeiramente, analisaram-se as granulometrias em dois blocos: TMN e classificação graúda/miúda. Compararam-se entre si as granulometrias com o mesmo TMN de agregado e, depois, compararam-se entre si somente as granulometrias classificadas como graúdas ou miúdas. Em seguida, analisou-se a quantidade de material retido entre as peneiras n°10 e 1/2" de cada granulometria.

Para as granulometrias com TMN de 19,1mm (II e VII), observou-se que os dois trechos apresentaram a mesma classificação de granulometria (miúda). Entretanto, cada trecho situou-se na extremidade oposta de acordo com o *ranking* da Figura 42. O trecho VII obteve a macrotextura mais grossa (0,51mm) comparada ao trecho II (0,34mm). Ao analisar a porcentagem de material retido entre as peneiras de n°10 e 1/2", observou-se que o trecho VII possuía cerca de 47% e o trecho II possuía 59,3%.

Para as granulometrias com TMN de 12,7mm (I, III, V, e VIII), somente a granulometria do trecho I foi classificada como graúda. Esperava-se que a granulometria

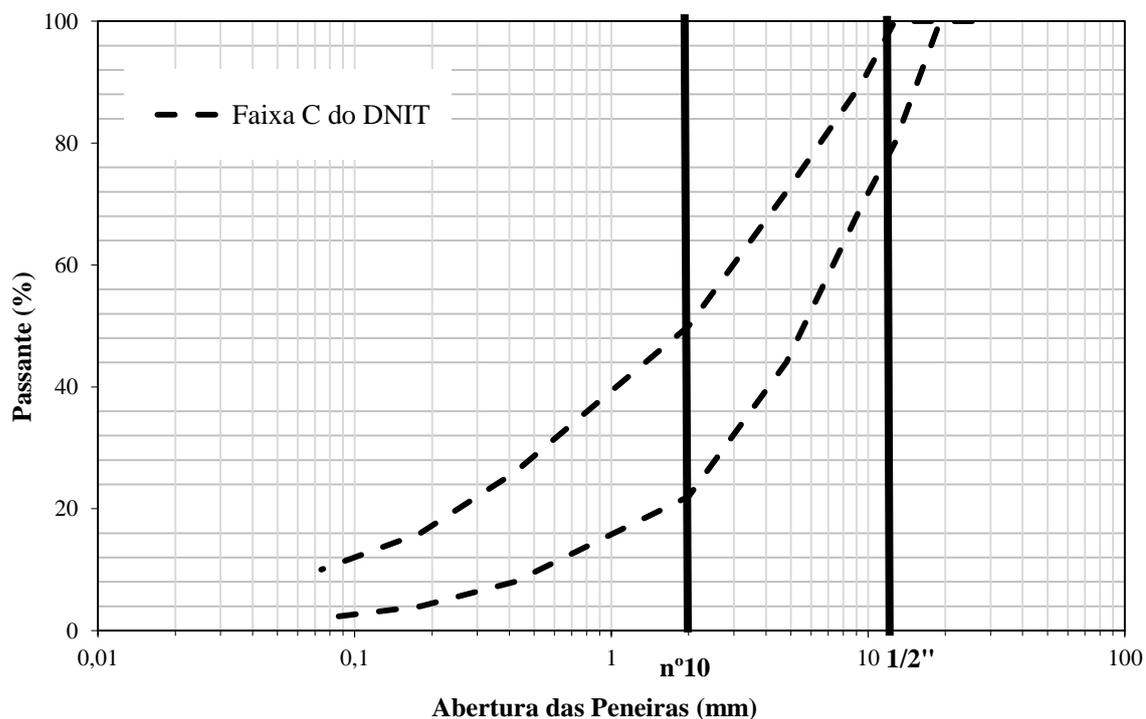
classificada como graúda apresentasse macrotextura mais grossa em relação às demais com o mesmo TMN, o que não foi observado. Compararam-se as granulometrias classificadas como miúdas (V, III, e VIII) e o trecho V gerou a macrotextura mais grossa quando comparada à macrotextura dos trechos III e VIII. Analisou-se a porcentagem de material retido entre as peneiras mencionadas e observou-se que a granulometria do trecho V continha aproximadamente 52% entre as peneiras nº 10 e 1/2” tanto a granulometria do trecho III como a granulometria do trecho VIII possuíam cerca de 60% das partículas localizadas entre estas peneiras.

Para as granulometrias com TMN de 9,5mm (IV, VI e IX), todos os trechos apresentaram a mesma classificação de granulometria (graúda). O trecho VI apresentou macrotextura mais grossa em relação às demais estudadas de mesmo TMN. A porcentagem de material retido entre as peneiras nº 10 e 1/2” das granulometrias dos trechos IV, VI e IX foram de 54%, 53% e 60%, respectivamente.

Em resumo, com relação ao TMN, esperava-se que, quanto maior fosse o TMN, maior seria a colocação no *ranking*, o que não foi observado. Além disso, esperava-se que as granulometrias classificadas como graúdas também gerassem a macrotextura mais grossa em relação às granulometrias classificadas como miúdas, o que também não foi observado.

Em relação à quantidade de material retido entre as peneiras nº10 e 1/2”, notou-se que as misturas com menor quantidade de material retido entre as mencionadas peneiras apresentaram macrotextura mais grossa ou aberta. Os resultados indicam que quanto menor for a quantidade de material retido entre as peneiras 1/2” e nº10 (Figura 43), mais aberta tende a ser a macrotextura, o que está coerente com a literatura reportada da NCHRP 108 (2009).

Figura 43 - Faixas entre as peneiras 1/2" e n°10 responsável pela macrotextura



As misturas com granulometrias enquadradas na Faixa C do DNIT apresentaram teores de ligante semelhantes (próximos de 5,3%), excetuando-se as misturas dos trechos III e IX, que apresentaram teores de 6,5% e 6,2%, respectivamente. Acredita-se que o elevado teor de ligante pode ter reduzido o valor de microtextura do trecho III.

Os valores de V_v de projeto das misturas também foram semelhantes (próximos a 3,5%). Como mencionado, esperava-se que a mistura enquadrada na Faixa B do DNIT do trecho II apresentasse maior macrotextura por ter o maior volume de vazios, 4,6%. Entretanto, a macrotextura encontrada foi fina (0,34mm) comparada à macrotextura dos outros trechos ensaiados. Ou seja, nenhuma evidência de tendência de macrotextura com relação ao V_v foi encontrada para os trechos estudados.

4.5. Estimativa da Macrotextura através da Granulometria

4.5.1. Modelagem das Granulometrias dos Trechos Estudados

No presente trabalho foi proposta a estimativa, através do desenvolvimento de um modelo, dos valores de macrotextura a partir das granulometrias das misturas dos trechos ensaiados. O programa aplicado foi o LAB Fit Ajuste de Curvas (SILVA *et al.*, 2004), *software* para tratamento e análise de dados experimentais.

Inicialmente, foram utilizadas como dados de entrada as porcentagens retidas das peneiras descritas anteriormente: n°10, n°4 e 3/8" das granulometrias estudadas, excetuando-se a granulometria do trecho do Kartódromo por não apresentar porcentagem retida na peneira 3/8", o que dificultaria a geração do modelo. A Equação 12 apresenta o modelo estatístico encontrado pelo *software*. O coeficiente de determinação R² obtido pelo modelo foi de 0,76.

$$HS = -1,69035 \times (\%ret.n^{\circ}10)^{-0,0825} + (\%ret.n^{\circ}4)^{-0,0308} + (\%ret.3/8'')^{-0,07354} \quad (12)$$

Onde:

HS: valor de macrot textura (calculado à partir do ensaio de mancha de areia);

%ret.n°10: porcentagem de material retido na peneira n°10;

%ret.n°4: porcentagem de material retido na peneira n°4;

%ret.3/8": porcentagem de material retido na peneira 3/8".

Posteriormente, acrescentaram-se mais peneiras ao modelo para verificação do R². As peneiras acrescentadas foram as de n°40, n°80 e n°200. A cada peneira adicionada produziu-se um modelo com R² diferente, i.e., 0,92, 0,93 e 0,93, respectivamente. Ou seja, o modelo elevou o valor de R² com o acréscimo das peneiras mencionadas. Adotou-se o modelo com a adição apenas da peneira n°40 para reduzir o número de variáveis dependentes, uma vez que tanto o acréscimo da peneira n°80 quanto da n°200 geraram R² = 0,93. A Equação 13 apresenta o modelo adotado para o presente trabalho.

$$HS = -3,20793 \times (\%ret.n^{\circ}40)^{-0,04013} + (\%ret.n^{\circ}10)^{0,13199} + (\%ret.n^{\circ}4)^{-0,02805} + (\%ret.3/8'')^{-0,05849} \quad (13)$$

Onde:

HS: valor de macrot textura (medido do ensaio de mancha de areia);

%ret.n°40: porcentagem de material retido na peneira n°40;

%ret.n°10: porcentagem de material retido na peneira n°10;

%ret.n°4: porcentagem de material retido na peneira n°4;

%ret.3/8": porcentagem de material retido na peneira 3/8".

A Tabela 15 apresenta os valores de HS de todos os trechos estudados medidos através do ensaio de mancha de areia e os valores de HS calculados através do modelo

adotado (Equação 13) com as respectivas classificações de macrotextura. Uma vez que a equação estatística é oriunda destes dados, e se obteve um bom coeficiente de correlação, era esperado que as classificações medidas e estimadas fossem as mesmas. Para validar o modelo, o mesmo deve ser testado com outros dados, externos à produção da equação de previsão, o que é feito adiante na Seção 4.6.

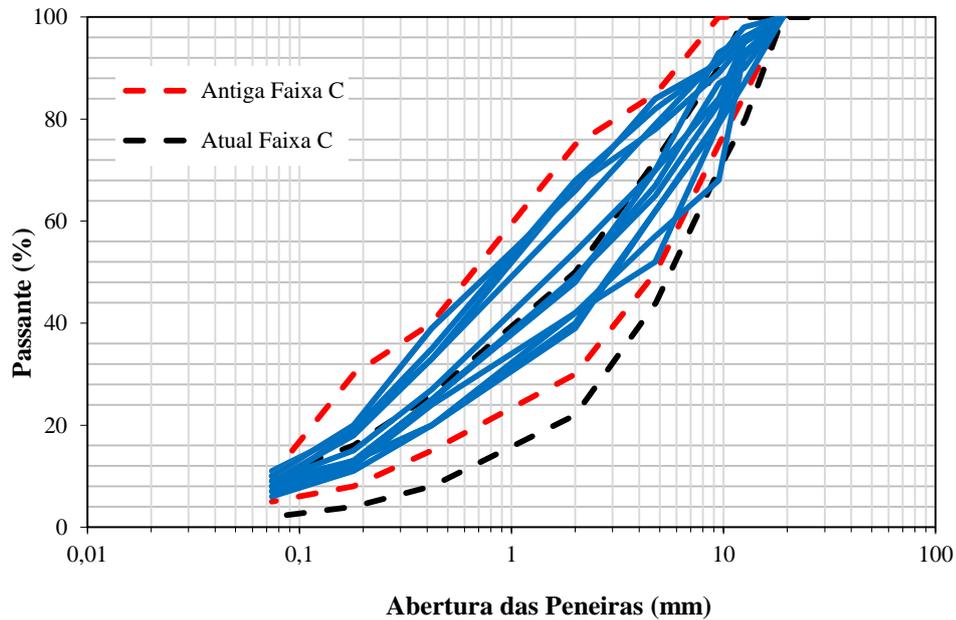
Tabela 15 - Valores de HS medidos através do ensaio de mancha e areia e calculado através do modelo proposto

HS (medido)	HS (calculado)	Classificação do HS (medido)	Classificação do HS (calculado)
0,47	0,46	Média	Média
0,47	0,45	Média	Média
0,45	0,44	Média	Média
0,41	0,44	Média	Média
0,43	0,43	Média	Média
0,34	0,34	Fina	Fina
0,51	0,52	Média	Média
0,42	0,42	Média	Média

4.5.2. Modelagem das Granulometrias de Outros Estudos

Ao longo desta dissertação, foram adquiridas mais 12 granulometrias de outros estudos com os respectivos valores de macrotextura para validação do modelo proposto (Equação 13) e para obtenção de novos modelos. As granulometrias adicionadas são provenientes da Rodovia Anhanguera, oficialmente denominada SP 330. Localizada no estado de São Paulo, a rodovia liga São Paulo com a região norte do estado e suas principais cidades industriais. A maioria das granulometrias enquadraram-se na antiga Faixa C do DNIT e todas foram classificadas como graúdas de acordo com a classificação da AASHTO M 323, sendo visualizadas na Figura 44. Para facilitar o entendimento, as 12 granulometrias foram nomeadas como SP.

Figura 44 - Granulometrias SP enquadradas na antiga Faixa C do DNIT



Primeiramente, tentou-se validar o modelo proposto na Equação (13) utilizando as granulometrias SP. Entretanto, apenas duas granulometrias foram consistentes com o modelo. Verificou-se que as granulometrias consistentes também se enquadravam na atual Faixa C do DNIT, assim como as granulometrias estudadas pela autora do presente trabalho. Ou seja, o modelo é consistente para uma faixa determinada. Posteriormente, foi proposto um modelo específico para as granulometrias SP, o que gerou um ajuste de $R^2=0,82$.

Classificaram-se em graúdas e em miúdas todas as granulometrias, tanto as estudadas pela autora como as adquiridas de São Paulo (SP). Totalizaram-se 21 granulometrias. Todas as granulometrias SP foram classificadas como graúdas. Das granulometrias estudadas pela autora, 5 foram classificadas como graúdas e 4 granulometrias foram classificadas como miúdas. Tentou-se modelar todas as granulometrias classificadas como graúdas, porém o ajuste não foi satisfatório ($R^2=0,26$). Acredita-se que características diversas destes dois blocos de informação tenham impedido uma maior consistência entre as granulometrias de São Paulo (SP) e do Ceará (CE), entre eles: características das misturas (Vv e teor de ligante, indisponíveis nas misturas de SP), métodos construtivos distintos nos dois estados (equipamentos, compactação), condições de ensaios. Vale por fim notar que os dados de São Paulo são de 1998.

As peneiras utilizadas para compor os novos modelos e gerar um melhor ajuste foram as peneiras de nº10 a 3/8”, ou seja, a peneira nº40 foi eliminada do modelo para gerar um melhor ajuste. Percebe-se que os modelos são satisfatórios (elevados R^2) quando se considera as granulometrias graúdas de SP e as cinco granulometrias miúdas estudadas pela autora. Entretanto, o mesmo foi considerado insatisfatório quando se considera a totalidade das granulometrias graúdas (SP+CE). A Tabela 16 apresenta um resumo dos modelos desenvolvidos, das constantes da regressão (A, B, C e D) e dos coeficientes de determinação.

Tabela 16 - Resumo dos parâmetros dos modelos testados

MODELOS	A	B	C	D	R²
Graúdo = SP	-1,68167	0,001159	0,281285	-0,03636	0,82
Graúdo = SP+CE	-1,95832	-0,03133	0,069748	-0,03819	0,26
Miúdo = CE	-3,35908	-0,31943	-0,07845	-0,03224	0,85

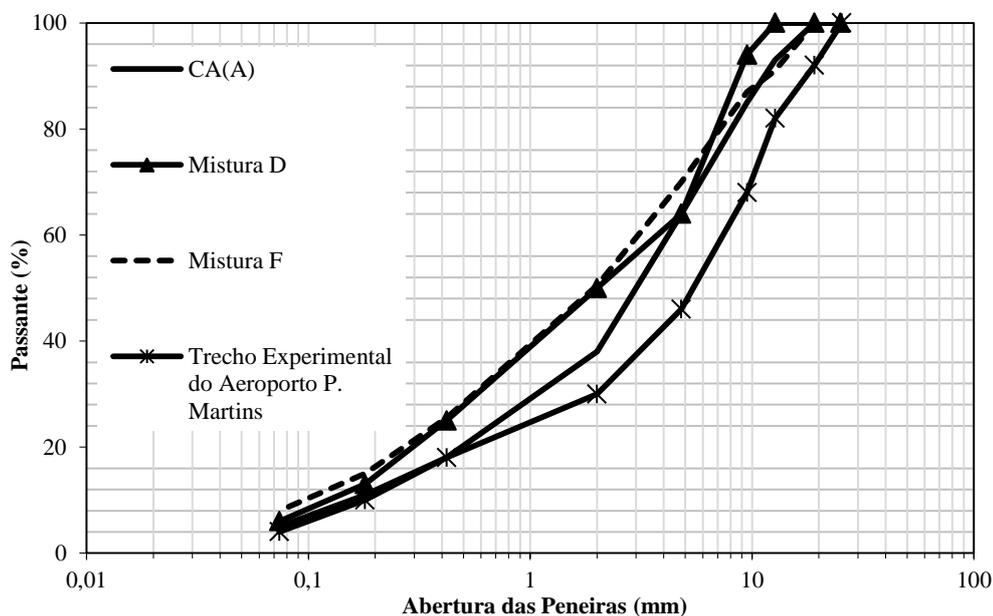
CE: granulometrias do Ceará estudadas pela autora.

4.6. Validação do Modelo Proposto

Para validar os modelos desenvolvidos apresentados na Tabela 16 e o modelo desenvolvido na Equação (13) utilizaram-se os dados de granulometria e de macrotextura da tese “Análise da Aderência Pneu-Pavimento em Rodovias dos estados de Pernambuco e da Paraíba com Elevado Índice de Acidentes” (PEREIRA, 2010a) e do trecho experimental do Aeroporto Internacional Pinto Martins - Fortaleza/CE executado em 2011.

Pereira (2010a) moldou placas de três tipos de CA nomeadas pela citada autora como: Mistura F, Mistura D e CA (A) todas enquadradas na Faixa C do DNIT. As granulometrias destas misturas encontram-se na Figura 45. Em seguida, foram realizados os ensaios de mancha de areia e de pêndulo britânico.

Figura 45 - Granulometrias estudadas por Pereira (2010a) e do Trecho Experimental do Aeroporto Pinto Martins



Dados de granulometria, de macro e de microtextura do trecho experimental do Aeroporto Internacional Pinto Martins de Fortaleza também foram utilizados para validar os modelos desenvolvidos. O trecho tem como finalidade o estudo de traços que resultem em valores de coeficientes de atrito iguais ou superiores a 0,50, recomendado na Resolução nº 88, de 11/05/2009 da ANAC para superfície nova, à velocidade de 65km/h. A Figura 45 também apresenta a granulometria da mistura do trecho experimental do Aeroporto Pinto Martins. A Tabela 17 apresenta os dados de HS medido e de HS calculado pelos modelos desenvolvidos que apresentaram ajustes acima de 0,80.

Tabela 17 - Resultados de HS medido e de HS calculado pelos modelos desenvolvidos

Misturas	% de agregados retidos				HS (mm) Medido	HS (mm) Calculado		
	nº40	nº10	nº4	3/8"		Graúdo= SP	Miúdo= CE	CE
MISTURA F	25	19,5	17	4	0,51	-	0,46	0,51
MISTURA D	25	14	30	6	0,41	-	0,26	0,41
CA (A)	20	26	21	8	0,51	1,59	-	0,50
Trecho Experimental do Aeroporto P. Martins	12	16	22	14	0,39	1,61	-	0,31

Os resultados de macrotextura tanto medidos em campo como calculados pelo modelo para as misturas enquadradas na Faixa C do DNIT apresentaram resultados próximos e mesma classificação de HS (média). Entretanto, o valor de HS medido e calculado para o Trecho Experimental do Aeroporto Pinto Martins apresentou uma diferença de 0,08 unidades. Acredita-se que esta discrepância ocorreu devido ao modelo se basear em granulometrias enquadradas apenas na Faixa C do DNIT, o que não aconteceu na situação do Trecho Experimental do Aeroporto Pinto Martins, cuja granulometria enquadrou-se na Faixa 2 da DIRENG.

Os valores de HS calculados pelo modelo gerado a partir de dados de granulometrias “Graúda” e “Miúda” não apresentaram resultados satisfatórios, observados na Tabela 17. Os valores obtidos pelos modelos apresentaram-se discrepantes do valor medido, de modo que, a classificação de macrotextura também fosse distinta. Apenas a Mistura F apresentou a mesma classificação de macrotextura entre os valores de HS calculado e medido de acordo com o modelo denominado nesta pesquisa como “Miúda”.

4.7. Considerações Finais

O Capítulo 4 apresentou as análises dos resultados realizados em campo e em laboratório dos parâmetros de micro e de macrotextura. Além dos modelos propostos pela pesquisa denominados como CE, Graúdo=SP e Miúdo=CE, o capítulo ainda apresenta a validação desses modelos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS

5.1. Considerações Iniciais

O presente capítulo apresenta as principais conclusões da pesquisa desenvolvida na dissertação e também as recomendações para pesquisas futuras.

5.2. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da granulometria na aderência pneu-pavimento. A partir disso, metas foram delineadas para atingir o objetivo central da pesquisa como as descritas a seguir:

Desenvolver uma metodologia capaz de comparar a micro e a macrotextura da massa asfáltica compactada em laboratório e em campo:

- A metodologia proposta foi capaz de reproduzir satisfatoriamente a microtextura de campo em laboratório. Entretanto, com relação à macrotextura, a maioria dos resultados de campo e de laboratório não seguiu uma tendência. Uma investigação do Vv e do grau de compactação poderá explicar tais resultados;
- Neste tipo de metodologia deve ser levada em conta a espessura da amostra, uma vez que a mesma, claramente, afetou os resultados, sendo importante que a espessura tenha pelo menos duas vezes o TM utilizado;
- Para as amostras do estudo, o ensaio de mancha de areia foi realizado com metade do volume padrão de 25cm³ definido pela norma, já que produziram a mesma classificação de HS tanto para o volume padrão como para a metade do volume padrão de areia. Ressalta-se que, a redução do volume padrão de areia pode induzir ao erro para misturas com macrotextura mais grossa;
- Os revestimentos novos estudados com granulometrias enquadradas na Faixa C do DNIT não atingiram o limite mínimo de macrotextura estabelecido pelo próprio órgão

rodoviário. A média de HS foi de 0,43mm para CA no início de sua vida útil, quando os limites devem estar entre 0,6 e 1,2mm;

- Em relação às medidas geradas no ensaio de pêndulo britânico, todos os trechos atenderam ao limite mínimo recomendado pelo DNIT, qual seja, de 47.

Desenvolver um modelo capaz de prever o valor de macrotextura do revestimento através de frações de materiais retidos nas peneiras granulométricas de misturas asfálticas:

- O modelo proposto na presente pesquisa mostrou-se satisfatório para granulometrias enquadradas na Faixa C do DNIT na predição do valor de HS, apresentando um coeficiente de ajuste (R^2) equivalente a 0,92;
- Os modelos propostos, tanto para as granulometrias graúdas como para as granulometrias miúdas, conforme classificação da AASHTO M 323(2012) apresentaram ajustes (R^2) satisfatórios e próximos de 0,80;
- O processo de validação dos modelos desenvolvidos se deu testando os mesmos com o uso de dados externos aqueles usados para geração de novos modelos. Observou-se que os valores de HS calculados e os valores de HS medidos ficaram próximos para o modelo envolvendo as misturas da Faixa C do DNIT. Entretanto, para os modelos graúdos e miúdos, conforme classificação da AASHTO M 323, os valores de HS se mostraram discrepantes e com classificação de macrotextura diferentes. Isso pode ser atribuído às diferenças entre as condições nas quais as informações foram colhidas em São Paulo e no Ceará, ou seja, distintas características das misturas, do método construtivo e da execução dos ensaios, valendo notar ainda que os dados de São Paulo são de 1998;
- É importante observar que o TMN dos agregados presentes nas granulometrias não influenciou na macrotextura dos revestimentos estudados, o que é corroborado por parte da literatura internacional como de Stroup-Gardiner *et al.* (2001). O que realmente influenciou neste parâmetro foi a quantidade de material retido entre as peneiras nº10 e 1/2", sendo estas as peneiras que devem ser observadas com maior cautela para obtenção da aderência desejada. Ressalta-se que, a influência das referidas peneiras vale apenas para misturas bem-graduadas.

5.3. Recomendações para Pesquisas Futuras

Ainda que a presente pesquisa tenha consistido de um trabalho de campo e de laboratório com nove misturas distintas, além de conter dados secundários recentes e antigos, não apenas do estado do Ceará, há claramente muito ainda a ser explorado no assunto aderência pneu-pavimento. Recomenda-se para pesquisas futuras:

- A investigação de granulometrias mais distintas para ampliar o espectro a fim de calibrar o modelo proposto. Neste item recomenda-se o uso não apenas das Faixas do DNIT ou DIRENG, mas da consideração da AASHTO M 323 (2012) sobre granulometrias graúdas e miúdas, e do método Bailey;
- A avaliação da metodologia proposta nesta pesquisa com investigação na determinação do Vv e da densidade das amostras, além de novos testes com moldes de amostras com diferentes formas e tamanhos;
- A utilização do AIMS para o estudo de propriedades de agregados fresado assim como de todos os outros, que levaram a maiores valores de microtextura da mistura, e a avaliação da influência deste constituinte no citado parâmetro de aderência, uma vez que é cada vez mais comum uso de misturas com materiais reciclados;
- O acompanhamento de trechos experimentais para a avaliação da evolução da micro e da macrotextura com o tráfego;
- A investigação da influência de equipamentos de construção, como a vibro-acabadora, na textura da camada final.

REFERÊNCIAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials *M 323 Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design*, 2012.

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials *TP 081 - Determining Aggregate Shape Properties by Means of Digital Image Analysis*, 2012.

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials *T 327 - Standard Method of Test for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus*, 2012.

ABDUL-MALAK, M.-A.U.; FOWLER, D.W.; CONSTANTINO, C.A. *Aggregate Characteristics Governing Performance of Seal Coat Highway Overlays*. Transportation Research Record 1547, Transportation Research Board, Washington, D.C, 1996.

ABE, H., HENRY, J.J.; TAMAI, A.; WAMBOLD, J. *Measurement of Pavement Macrottexture Using the CTMeter*. Transportation Research Record 1764, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2000.

ANAC Agência Nacional de Aviação Civil. Resolução nº88, 2009.

ANDRESEN, A.; WAMBOLD, J.C. *Friction Fundamentals, Concepts and Methodology*. MFT Mobility Friction Technology - TP 13837E, Canada, Norway, 1999.

APS, M. *Classificação da Aderência Pneu-Pavimento pelo Índice Combinado IFI - International Friction Index para Revestimentos Asfálticos*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. NF P 98-253-1. *Essais Relatifs aux Chaussées - Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés - partie 1: essais d'orniérage*. France, 1991.

ASTM American Society for Testing and Materials *C88 - Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*, 2005.

ASTM American Society for Testing and Materials *C294 - Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates*, 2012.

ASTM American Society for Testing and Materials *C1252 - Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influence by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*, 2003.

ASTM American Society for Testing and Materials *D4791 - Standard Test Method for Flat Particle, Elongated Particle, or Flat and Elongated Particle in Coarse Aggregate*, 2000.

ASTM American Society for Testing and Materials *E303 - Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*, 1998.

ASTM American Society for Testing and Materials *E867 - Standard Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems*, 1997.

ASTM American Society for Testing and Materials *E965 - Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth Using a Volumetric Technique*, 2001.

ASTM American Society for Testing and Materials. *E 1960 - Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface*, 1998.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. *Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros*. PETROBRAS, ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

BESSA, I.S. *Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BESSA, I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. *Caracterização de Agregados Convencionais e Alternativos Utilizando Técnicas de Processamento Digital de Imagens*. In: XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Vitória, ES, 2009.

BESSA, I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. *Avaliação da Resistência ao Polimento e à Degradação de Agregados Utilizando a Abrasão Los Angeles e o Processamento Digital de Imagens*. In: 7º. Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu, PR, 2011.

CNT Confederação Nacional do Transporte. *Pesquisa Rodoviária 2011: Relatório Gerencial*. Brasília, DF, 2012.

CUNHA, M.B. *Avaliação do Método Bailey de Seleção Granulométrica de Agregados para Misturas Asfálticas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DAC *Requisitos de Resistência à Derrapagem para Pistas de Pouso e Decolagem - IAC 4302*. Instrução de Aviação Civil. Departamento de Aviação Civil. Comando da Aeronáutica. Brasília, DF, 2001.

DAVIS, R.M. *Comparison of Surface Characteristics of Hot-Mix Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road*, Dissertação de Mestrado. Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001.

DIRENG *Especificações Gerais para Obras de Infraestrutura Aeroportuária*. EG N° 04.05.610, 2002.

DNER-ME 035 *Agregados - Determinação da Abrasão Los Angeles*, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.

DNER-ME 083 *Agregados - Análise Granulométrica*, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.

DNER-ME 089 *Agregados - Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio*, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil 1994.

DNER-ME 399 *Agregados - Determinação da Perda ao Choque no Aparelho Treton*, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil 1999.

DNIT-ES 031 *Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de Serviço*, 2004.

DNIT Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Manual de Restauração de pavimentos asfálticos*. 2.ed. - Rio de Janeiro. 310p. (IPR. Publ. 720), 2006.

DO, M.-T.; KANE, M.; TANG, Z.; LARRARD, F. *Pavement Polishing - Development of a Dedicated Laboratory Test and its Correlation with Road Results*. *Wear*, 263, 263: p36-42. 2007.

JOHNSEN, W.A. *Advances in the Design of Pavement Surfaces*. Ph.D. Dissertation, Worcester Polytechnic Institute, 1997.

GOUVEIA, L.T. *Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

HALL, J.W.; SMITH, K.L.; TITUS-GLOVER, L.; WAMBOLD, J.C.; TAGER, T.J.; RADO, Z. *Guide for Pavement Friction*, NCHRP Web-Only Document 108. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C, 2009.

HENRY, J.J. *Evaluation of Pavement Friction Characteristics*, NCHRP Synthesis 291, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C., 2000.

INFRAERO *Especificações de Serviços Técnicos de Reparo*. FZ.02/105.81/03632/13, 2011.

INSTITUTO DO ASFALTO *Manual de Asfalto - Série do manual no. 4 (MS-4)*, 1989.

KANDHAL, P.S.; PARKER F. JR.; MALLICK, R.B. *Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of the Practice*, NCAT Report No. 97-6, National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn, Alabama, 1997.

KANDHAL, P.S.; PARKER F. JR. *Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements*, NCHRP Report 405, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C, 1998.

KOKKALIS, A.G.; OLYMPIA, K.P. *Fractal Evaluation of Pavement Skid Resistance Variations I: Surface Wetting*. Thessaloniki, Greece, 1998.

KOWALSKI, K.J. *Influence of Mixture Composition on the Noise and Frictional Characteristics of Flexible Pavements*. Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 2007.

- LAY, J.B.C. *Friction and Surface Texture Characterization of 14 Pavement Test Sections in Greenville, North Carolina*. Transportation Research Record 1639, North Carolina, USA, 1998.
- LIANG, R.Y.; CHYI, L.L. *Polishing and Friction Characteristics of Aggregate Produced in Ohio*. Transportation Research Record. Transportation Research Board - TRB. Washington, D.C., 2000.
- LUGÃO, W.G. *Análise da Aderência entre Pneu e Pavimento com Camada Porosa de Atrito no Aeroporto Internacional Tancredo Neves - MG*. Tese (Doutorado em Engenharia de Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2008.
- MAHMOUD, E.M. *Development of Experimental Methods for the Evaluation of Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion and Breakage*. Thesis of Master Science. Texas A&M University, USA, 2005.
- MAHMOUD, E. M.; MASAD, E. *Experimental Methods for the Evaluation of Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion and Breakage*. Journal of Materials in Civil Engineering. USA, 2007.
- MAILLARD-NUNES, P.; BROSSAUD, Y.; DO, M-T.; MARSAC, P.; BERNUCCI, L.L.B.; QUINTANILHA, J.A. *Characterization of in Laboratory and in Situ Macrotecture of a BBTM 0/6 Mixture and Description of its Indicators*. Transportation Research Record 7, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C, 2008.
- MASAD, E.A. *Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications*. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. Project performed in cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Report nº FHWA/TX-05/5-1707-01-1, 2005.
- MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L. *Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance*. In: Transportation Research Record 1757. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, 148-156, 2001.
- MASAD, E.A.; REZAEI, A.; HOWDHURY, A.; HARRIS, P. *Predicting Asphalt Mixture Skid Resistance Based on Aggregate Characteristics*. FHWA/TX-09/0-5627-1, 2009.
- MELO, J.V.S. de. *Equipamentos de Medição do Coeficiente de Atrito Pneu/Pavimento*. Disponível em: <http://rodoviasverdes.ufsc.br/files/2010/05/Trabalho-Para-o-Site.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2013, 2009.
- MOMM, L. *Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotectura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- MULLEN, W.; DAHIR, S.; BARNES, B. *Two Laboratory Methods for Evaluating Skid-Resistance Properties of Aggregates*. Highway Research Record 37, 123-135, 1971.

NODARI, C.T. *Método de Avaliação da Segurança Potencial de Segmentos Rodoviários Rurais de Pista Simples*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

OLIVEIRA, F.H.L. *Proposição de Estratégias de Manutenção de Pavimentos Aeroportuários Baseadas na Macrot textura e no Atrito: Estudo de Caso do Aeroporto Internacional de Fortaleza*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

PEREIRA, C.A. *Análise da Aderência Pneu-Pavimento em Rodovias dos Estados de Pernambuco e da Paraíba com Elevado Índice de Acidentes*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010a.

PEREIRA, S.L.O. *Avaliação de Tratamentos Superficiais de Rodovias através de Análise de Laboratório*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010b.

PEREIRA, S.L.O. *Avaliação dos Tratamentos Superficiais Simples, Duplo e Triplo de Rodovias através do Emprego de Diferentes Agregados da Região Metropolitana de Fortaleza*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PRASANNA, R.; NAGESWARAN, B.; JAYAWICKRAMA, P.W. *Use of Relation Database Management Systems Principles in Reliable Prediction of Pavement Skid Resistance*. Transportation Research Record 1655, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington D.C., 1999.

POTTINGER, M. G.; YAGER, T. J. Overview. (1986) *In: The Tire Pavement Interface*. Baltimore: ASTM Standards, p. 9-15. (STP, 929).

REZAEI, A. *Development of a Prediction Model for Skid Resistance of Asphalt Pavements*. PhD. Texas A&M University, USA, 2010.

REZAEI, A.; MASAD, E.A.; CHOWDHURY, A.; HARRIS, P. *Predicting Asphalt Mixture Skid Resistance by Aggregate Characteristics and Gradation*. Transportation Research Record 2104, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2009.

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

ROGERS, C. *Canadian Experience with the Micro-Deval Test for Aggregates*. Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation 13, 139-147, 1998.

SABEY, B.E. *Road Safety and Value for Money*. Crownthorne: Transport and Road Research Laboratory, (Supplementary Report, 581), 1980.

- SANTOS, E.L. *Análise Histórica de Medição de Atrito das Pistas do Aeroporto Santos Dumont - RJ*. Trabalho de Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, São Paulo, 2004.
- SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S.; CAVALCANTI, C.G.B.; SILVA, D.D.P.S.; SOARES, I.B.; OLIVEIRA, J.A.S.; SILVA, C.D.P.S. *LAB Fit ajuste de curvas: um software em português para tratamento de dados experimentais*. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 26, n.º.4, São Paulo, 2004.
- STROUP-GARDINER, M.; BROWN, E.R. *Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements*, NCHRP Report 441, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C., 2000.
- STROUP-GARDINER, M.; STUDDARD, B.; WAGNER, C. *Influence of Hot Mix Asphalt Macrotecture on Skid Resistance*. Auburn University. Civil Engineering Department, USA, 2001.
- SULLIVAN, B.W. *Development of a Fundamental Skid Resistance Asphalt Mix Design Procedure*, Pavement Management Service, Sydney, Australia, 2005.
- SUPERPAVE *WesTrack Forensic Team Consensus Report*. Washington, D.C., 2001.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. NCHRP Report 673. Washington, D.C., 2011.
- WAMBOLD, J.C.; ANTLE, C.E.; HENRY, J.J.; RADO, Z. *International PIARC Experience to Compare and Harmonize Texture and Skid resistance Measurements*. Paris: PIARC, 423 p. (Publication, 01.04.T), 1995.
- WAMBOLD, J.C.; HENRY, J.J. *NASA Wallops Tie/Runway Friction: Workshops 1993-2002*. Montreal: TDC, 155p. (Publication, TP14190E), 2002.
- WEST, T.R.; CHOI, J.C.; BRUNER, D.W.; PARK, H.J.; CHO, K.H. *Evaluation of Dolomite and Related Aggregates Used in Bituminous Overlays for Indiana Pavements*. Transportation Research Record 1757, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2001.
- ZHAO, D. *Evolution de L'Adherence Des Chaussees: Influence des Materiaux, du Vieillissement et du Trafic - Variations Saisonnières*. Tese de Doutorado - l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Centre de Nantes, 2011.

APÊNDICE A - TABELAS DE DADOS DOS 10 TRECHOS ESTUDADOS

Trecho I: BR 116 km30

Tabela Apêndice A.1 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

nº de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,38	Fina	75,0	Rugosa	31,40	0,14	Regular
2	0,43	Média	68,8	Rugosa	37,10	0,13	Regular
3	0,43	Média	68,8	Rugosa	37,10	0,13	Regular
4	0,48	Média	65,0	Rugosa	42,93	0,13	Regular
5	0,51	Média	65,0	Rugosa	46,26	0,13	Regular

Tabela Apêndice A.2 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

nº de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,57	Média	75,0	Rugosa	52,84	0,14	Regular
2	0,68	Média	77,5	Muito Rugosa	66,14	0,14	Regular
3	0,71	Média	73,8	Rugosa	68,76	0,14	Regular
4	0,73	Média	66,3	Rugosa	71,33	0,13	Regular
5	0,73	Média	66,3	Rugosa	71,50	0,13	Regular

Trecho II: CE 522/Acesso à Washington Soares

Tabela Apêndice A.3 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

nº de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,27	Fina	78,8	Muito Rugosa	18,78	0,14	Regular
2	0,28	Fina	81,3	Muito Rugosa	20,15	0,15	Bom
3	0,34	Fina	83,8	Muito Rugosa	27,27	0,15	Bom
4	0,35	Fina	87,5	Muito Rugosa	27,92	0,15	Bom
5	0,48	Média	83,8	Muito Rugosa	42,93	0,15	Bom

Tabela Apêndice A.4 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

nº de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,64	Média	78,8	Muito Rugosa	61,28	0,14	Regular
2	0,67	Média	80,0	Muito Rugosa	64,88	0,14	Regular
3	0,78	Média	80,0	Muito Rugosa	77,44	0,14	Regular
4	0,78	Média	80,0	Muito Rugosa	77,44	0,14	Regular
5	0,87	Grossa	83,8	Muito Rugosa	87,60	0,15	Bom

Trecho III: Rua Ademar Paula

Tabela Apêndice A.5 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

nº de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,29	Fina	48,8	Medianamente Rugosa	21,60	0,11	Ruim
2	0,33	Fina	48,8	Medianamente Rugosa	25,43	0,11	Ruim
3	0,34	Fina	53,8	Medianamente Rugosa	26,64	0,12	Regular
4	0,37	Fina	55,0	Rugosa	30,66	0,12	Regular
5	0,38	Fina	55,0	Rugosa	31,40	0,12	Regular
6	0,39	Fina	56,3	Rugosa	32,53	0,12	Regular
7	0,46	Média	57,5	Rugosa	40,88	0,12	Regular
8	0,54	Média	57,5	Rugosa	49,89	0,12	Regular
9	0,63	Média	58,8	Rugosa	59,83	0,12	Regular

Tabela Apêndice A.6 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

nº de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,45	Média	76,3	Muito Rugosa	39,83	0,14	Regular
2	0,49	Média	77,5	Muito Rugosa	44,20	0,14	Regular
3	0,51	Média	78,8	Muito Rugosa	45,79	0,14	Regular
4	0,51	Média	80,0	Muito Rugosa	46,60	0,14	Regular
5	0,57	Média	80,0	Muito Rugosa	52,84	0,14	Regular
6	0,58	Média	81,3	Muito Rugosa	54,81	0,15	Bom
7	0,64	Média	81,3	Muito Rugosa	61,28	0,15	Bom
8	0,64	Média	83,8	Muito Rugosa	61,28	0,15	Bom
9	0,78	Média	90,0	Muito Rugosa	77,44	0,16	Bom

Trecho IV: Av. Alberto Craveiro

Tabela Apêndice A.7 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

nº de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,33	Fina	85,0	Muito Rugosa	25,43	0,15	Bom
2	0,34	Fina	88,8	Muito Rugosa	26,64	0,15	Bom
3	0,37	Fina	91,3	Muito Rugosa	30,66	0,16	Bom
4	0,38	Fina	91,3	Muito Rugosa	31,40	0,16	Bom
5	0,39	Fina	91,3	Muito Rugosa	32,53	0,16	Bom
6	0,46	Média	92,5	Muito Rugosa	40,88	0,16	Bom
7	0,54	Média	97,5	Muito Rugosa	49,89	0,16	Bom
8	0,63	Média	101,3	Muito Rugosa	59,97	0,17	Bom

Tabela Apêndice A.8 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

n° de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS (mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,51	Média	66,3	Rugosa	45,79	0,13	Regular
2	0,52	Média	71,3	Rugosa	47,44	0,13	Regular
3	0,58	Média	72,5	Rugosa	54,81	0,14	Regular
4	0,64	Média	76,3	Muito Rugosa	61,28	0,14	Regular
5	0,65	Média	77,5	Muito Rugosa	62,46	0,14	Regular
6	0,66	Média	80,0	Muito Rugosa	63,65	0,14	Regular
7	0,73	Média	80,0	Muito Rugosa	71,50	0,14	Regular
8	0,81	Grossa	81,3	Muito Rugosa	80,64	0,15	Bom

Trecho V: BR 222 - CE km11

Tabela Apêndice A.9 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

n° de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,43	Média	55,0	Rugosa	37,25	0,12	Regular
2	0,44	Média	55,0	Rugosa	38,93	0,12	Regular
3	0,47	Média	55,0	Rugosa	41,89	0,12	Regular
4	0,51	Média	60,0	Rugosa	46,26	0,12	Regular
5	0,52	Média	60,0	Rugosa	47,43	0,12	Regular

Tabela Apêndice A.10 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

n° de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,81	Grossa	77,5	Muito Rugosa	80,64	0,14	Regular
2	0,98	Grossa	81,3	Muito Rugosa	99,62	0,15	Bom
3	1,02	Grossa	83,8	Muito Rugosa	104,11	0,15	Bom
4	1,11	Grossa	83,8	Muito Rugosa	113,96	0,15	Bom
5	1,18	Grossa	88,8	Muito Rugosa	122,19	0,15	Bom

Trecho VI: BR 222/Sobral

Tabela Apêndice A.11 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

n° de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,46	Média	77,5	Muito Rugosa	40,88	0,14	Regular
2	0,46	Média	78,8	Muito Rugosa	40,88	0,14	Regular
3	0,47	Média	80,0	Muito Rugosa	41,89	0,14	Regular
4	0,47	Média	80,0	Muito Rugosa	41,89	0,14	Regular
5	0,48	Média	80,0	Muito Rugosa	42,93	0,14	Regular

Tabela Apêndice A.12 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

n° de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,66	Média	76,3	Muito Rugosa	63,65	0,14	Regular
2	0,68	Média	78,8	Muito Rugosa	66,14	0,14	Regular
3	0,78	Média	78,8	Muito Rugosa	77,44	0,14	Regular
4	0,89	Grossa	80,0	Muito Rugosa	89,47	0,14	Regular
5	0,98	Grossa	80,5	Muito Rugosa	99,62	0,14	Regular

Trecho VII: Túnel/Iguatemi

Tabela Apêndice A.13 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

n° de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,50	Média	81,25	Muito Rugosa	45,12	0,15	Bom
2	0,51	Média	81,25	Muito Rugosa	46,26	0,15	Bom
3	0,51	Média	82,5	Muito Rugosa	46,26	0,15	Bom
4	0,52	Média	82,5	Muito Rugosa	47,43	0,15	Bom
5	0,53	Média	82,5	Muito Rugosa	48,64	0,15	Bom

Tabela Apêndice A.14 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

n° de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,60	Média	80,0	Muito Rugosa	56,87	0,14	Regular
2	0,71	Média	80,0	Muito Rugosa	68,76	0,14	Regular
3	0,74	Média	80,0	Muito Rugosa	72,93	0,14	Regular
4	0,78	Média	81,3	Muito Rugosa	77,44	0,15	Bom
5	0,89	Grossa	83,8	Muito Rugosa	89,47	0,15	Bom

Trecho VIII: CE 060/Rodovia Mendel Steinbruch

Tabela Apêndice A.15 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

n° de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,32	Fina	70,0	Rugosa	24,27	0,13	Regular
2	0,36	Fina	82,5	Muito Rugosa	29,26	0,15	Bom
3	0,37	Fina	85,0	Muito Rugosa	29,95	0,15	Bom
4	0,39	Fina	85,0	Muito Rugosa	32,15	0,15	Bom
5	0,44	Média	85,0	Muito Rugosa	38,00	0,15	Bom
6	0,49	Média	88,8	Muito Rugosa	44,01	0,15	Bom
7	0,56	Média	90,0	Muito Rugosa	52,51	0,16	Bom

Tabela Apêndice A.16 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

n° de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,36	Fina	73,8	Rugosa	29,40	0,14	Regular
2	0,39	Fina	75,0	Rugosa	32,49	0,14	Regular
3	0,44	Média	75,0	Rugosa	38,48	0,14	Regular
4	0,47	Média	75,0	Rugosa	41,23	0,14	Regular
5	0,53	Média	76,3	Muito Rugosa	48,29	0,14	Regular
6	0,53	Média	76,3	Muito Rugosa	48,29	0,14	Regular
7	0,61	Média	78,8	Muito Rugosa	57,93	0,14	Regular

Trecho IX: Kartódromo Júlio Ventura

Tabela Apêndice A.17 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

n° de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,32	Fina	73,3	Rugosa	24,84	0,14	Regular
2	0,35	Fina	73,8	Rugosa	28,58	0,14	Regular
3	0,37	Fina	75,0	Rugosa	29,95	0,14	Regular
4	0,38	Fina	75,0	Rugosa	31,03	0,14	Regular
5	0,38	Fina	75	Rugosa	31,40	0,14	Regular
6	0,39	Fina	76,3	Muito Rugosa	32,15	0,14	Regular
7	0,40	Média	76,3	Muito Rugosa	34,11	0,14	Regular

Tabela Apêndice A.18 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

n° de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,45	Média	72,5	Rugosa	39,15	0,14	Regular
2	0,46	Média	73,8	Rugosa	40,52	0,14	Regular
3	0,46	Média	73,8	Rugosa	40,52	0,14	Regular
4	0,48	Média	73,8	Rugosa	42,68	0,14	Regular
5	0,48	Média	75,0	Rugosa	43,44	0,14	Regular
6	0,51	Média	76,3	Muito Rugosa	46,60	0,14	Regular
7	0,60	Média	76,3	Muito Rugosa	56,87	0,14	Regular

Trecho X: Pátio Arena Castelão

Tabela Apêndice A.19 - Dados de campo: macrotextura, microtextura e IFI

nº de pontos	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,33	Fina	70,0	Rugosa	26,33	0,13	Regular
2	0,35	Fina	72,5	Rugosa	27,92	0,14	Regular
3	0,40	Média	73,8	Rugosa	33,71	0,14	Regular
4	0,47	Média	75,0	Rugosa	41,89	0,14	Regular
5	0,56	Média	75,0	Rugosa	51,84	0,14	Regular
6	0,56	Média	76,3	Muito Rugosa	51,84	0,14	Regular
7	0,56	Média	81,3	Muito Rugosa	52,51	0,15	Bom

Tabela Apêndice A.20 - Dados de laboratório: macrotextura, microtextura e IFI

nº de amostras	Mancha de Areia		Pêndulo Britânico		IFI		
	HS(mm)	Classificação	BPN	Classificação	Sp	F60	Classificação
1	0,34	Fina	75,0	Rugosa	27,51	0,14	Regular
2	0,35	Fina	75,0	Rugosa	27,97	0,14	Regular
3	0,42	Média	75,0	Rugosa	35,95	0,14	Regular
4	0,42	Média	75,0	Rugosa	36,56	0,14	Regular
5	0,42	Média	76,3	Muito Rugosa	36,56	0,14	Regular
6	0,45	Média	77,5	Muito Rugosa	39,15	0,14	Regular
7	0,45	Média	80,0	Muito Rugosa	39,83	0,14	Regular