



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

VICTOR MOSCA DE CARVALHO ARAUJO

**AVALIAÇÃO DA TEXTURA DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM FACE A
COMPACTAÇÃO PARA USO EM REVESTIMENTOS AEROPORTUÁRIOS A
PARTIR DO USO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS**

FORTALEZA
2017

VICTOR MOSCA DE CARVALHO ARAUJO

AVALIAÇÃO DA TEXTURA DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM FACE A
COMPACTAÇÃO PARA USO EM REVESTIMENTOS AEROPORTUÁRIOS A PARTIR
DO USO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Dissertação submetida à coordenação do 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.

Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

FORTALEZA
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A692a Araujo, Victor Mosca de Carvalho.
Avaliação da textura de misturas asfálticas para uso em revestimentos aeroportuários a partir do uso do processamento digital de imagens / Victor Mosca de Carvalho Araujo. – 2017.
104 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

1. Misturas Asfálticas. 2. Aderência. 3. Textura. 4. Grau de Compactação. 5. Processamento Digital de Imagens. I. Título.

CDD 388

VICTOR MOSCA DE CARVALHO ARAUJO

AVALIAÇÃO DA TEXTURA DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA USO EM
REVESTIMENTOS AEROPORTUÁRIOS A PARTIR DO USO DO PROCESSAMENTO
DIGITAL DE IMAGENS

Dissertação submetida à coordenação do 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.

Orientadora: Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Verônica T. F. Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Prof. Elisabete Fraga de Freitas, Ph.D. (Examinadora Externa)
Universidade do Minho

Aos meus familiares e amigos, por sempre me apoiarem em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

À minha família, Paulo Roberto, Geórgia, Livia, José Osvaldo, Vera, Audizio e Verônica, além de todos os meus tios e primos, por todos os ensinamentos e por todo carinho e apoio durante toda a minha jornada até aqui.

À minha esposa, Raiza, por todo amor, apoio e compreensão, principalmente nas horas mais difíceis.

À minha orientadora, Profa. Verônica, por ter me tratado como um filho, apoiando quando preciso, entendendo minhas dificuldades e sempre me incentivando a ser um profissional e uma pessoa melhor.

Ao Professor Jorge e Professora Elisabete por aceitarem fazer parte dessa banca.

Aos meus amigos de infância, Evandro, Marcelo, Cícero, Daniel, Sebastião, Everardo, Paulo Sergio, pela amizade incondicional e em especial ao Renato, que contribuiu bastante durante meu caminho até aqui.

Aos amigos do DET, Iuri, Lucas, Lorrán, Jardel, Daianne, Lara, Dani, Juceline, Fernando, Alessandra e Annie por esses anos de amizade e cooperativismo constante.

Aos alunos de IC Renan e Camilla, que foram bastante solícitos e fizeram de tudo para ajudar a finalizar este trabalho, sem eles não seria possível.

Ao Rômulo, pela amizade e toda a ajuda com as questões de laboratório, sem esse apoio eu não teria conseguido.

Ao Geânio, laboratorista da Insttale Engenharia, que me apoiou de todas as formas com os trechos experimentais.

Aos amigos da Insttale Engenharia, Hamilton e Peter pelos ensinamentos constantes.

A Insttale Engenharia pela disponibilidade e financiamento para execução dos trechos experimentais.

RESUMO

Durante o desenvolvimento do projeto de uma mistura asfáltica para composição de revestimentos aeroportuários, além da preocupação com parâmetros estruturais, o atrito e a textura do revestimento asfáltico devem ser considerados. Com a operação de aeronaves turbojatos no transporte aéreo comercial, com maior peso e maiores velocidades de aterrissagem, o desempenho de frenagem, tornou-se um ponto crítico para a operação dos aeroportos. A depender das condições do pavimento, pode ocorrer hidroplanagem ou perda de tração inaceitável da aeronave, o que pode ocasionar a falta de controle de direção por parte do piloto, sendo a aderência no sistema pneu-pavimento fator preponderante para minimizar a ocorrência dessa situação. Apesar do que foi previamente citado, ainda não há métodos que permitam prever as propriedades de textura e o atrito superficial durante a fase de projeto de misturas asfálticas mesmo ciente de que o projetista precisa avaliar a escolha dos materiais que irão compor a mistura asfáltica, visando também melhorar a aderência pneu-pavimento. A textura e o atrito superficial de um pavimento são funções de alguns parâmetros, dentre os quais é possível citar a granulometria, as propriedades de forma dos agregados, o Grau de Compactação (GC) da mistura asfáltica e o método de compactação utilizado. Devido a pluralidade destas características, é uma tarefa complexa correlacionar essas propriedades com as características de textura e de atrito da mistura asfáltica que será utilizada na camada de revestimento destes pavimentos. Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo é apresentar um método para avaliar a textura superficial de misturas asfálticas que compõem pavimentos aeroportuários verificando como (i) as propriedades de forma dos agregados, (ii) a compactação, e (iii) a estrutura interna da mistura asfáltica se correlacionam com a macrotextura e com a microtextura destes materiais. Os resultados mostraram que a granulometria impactou nos resultados de macrotextura, sendo preponderante em relação a angularidade dos agregados. Além disso a metodologia de compactação utilizada em campo e laboratório, interferem na textura superficial do revestimento asfáltico, havendo uma tendência de aumento da macrotextura com a diminuição do GC. Os resultados de macrotextura obtidos através do PDI tiveram uma boa correlação ($R^2 = 0,71$) com os resultados de mancha de areia quando o distanciamento de leitura do equipamento é 0,30mm, já quando comparada a estrutura interna a correlação ($R^2 = 0,43$) entre orientação dos contatos dos agregados e macrotextura não foi satisfatória.

Palavras-chave: Misturas Asfálticas. Aderência. Textura. Grau de Compactação. Processamento Digital de Imagens.

ABSTRACT

Asphalt mixture design for application as surface layer in airport runways has to consider not only structural parameters, but must also consider texture and friction properties of the asphalt coating. Turbojet aircraft operation in commercial air transport increases the weight and the landing speed that airport pavements are subjected to. With that, the braking performance has become critical to the operation of airports. Depending on the pavement conditions, it is possible to occur hydroplaning or loss of traction and it can lead to take the pilot to lose airplane control. The adherence in the tire-pavement system is important to minimize the occurrence of such problem. However, there are not available methodology to predict texture properties and surface friction during the design of asphalt mixture. It happens even knowing that it is essential to select the mixture materials based on the adherence performance of the tire-pavement system. Texture and surface friction of a pavement is dictated by some parameters, such as: particle size distribution, aggregates shape properties, mixture compaction level and compaction method. Due the plurality of these properties, it is a hard to correlate them with texture and friction characteristics the asphalt mixtures that are used as surface layer of pavements. Based on that, the main objective of this work is to present a new methodology to evaluate surface texture of asphalt mixture applied in airports runways. The proposed technology verifies how aggregates shape properties, compaction, and inner structure of asphalt mixture correlate with the macro-texture and micro-texture of those material. Results showed that the aggregate gradation has influence in the results of macro-texture, being preponderant regarding the angularity of the aggregates. In addition, the compaction methodology used in the field and laboratory interferes in the surface texture of the asphalt coating. The macro-texture tends to increase as compaction level decreases. The macro-texture results obtained using digital image processing has a good relationship ($R^2 = 0.71$) with the sand patch results when the reading distance of the equipment was 0.30mm. When compared to the inner structure the correlation ($R^2 = 0.43$) between the orientation of the contacts of the aggregates and macro-texture was not satisfactory.

Keywords: Asphalt Mixture. Adherence. Texture. Compaction Level. Digital Image Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de macrotextura e microtextura.....	8
Figura 2 - Mecanismo de atrito durante processo de frenagem.....	10
Figura 3 - Relação entre TRF e Textura.....	14
Figura 4 - Comportamento dos parâmetros SK e KU	16
Figura 5 - Propriedades de forma de uma partícula de agregado	19
Figura 6 - (a) Vibroacabadora, (b) Rolos Pneumático e Tandem.....	23
Figura 7 - Percentual de agregados retido por peneira antes e após a compactação	24
Figura 8 - Localização da Pedreira	26
Figura 9 - Granulometria dos agregados utilizados na pesquisa	27
Figura 10 - <i>Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)</i>	28
Figura 11 - Faixas granulométricas das misturas asfálticas avaliadas neste estudo.....	30
Figura 12 - Fluxograma de ensaios das misturas asfálticas avaliadas.	31
Figura 13 - Curvas granulométricas das duas misturas asfálticas avaliadas: (a) Faixa 2 DIRENG, (b) Faixa 3 DIRENG, (c) Curvas das Misturas CA1 e CA2.....	32
Figura 14 - Usina asfáltica de produção contínua	34
Figura 15 - Localização das misturas asfálticas aplicadas em campo.....	35
Figura 16 - Execução dos trechos experimentais da Insttale Engenharia Ltda, utilizando (a) compactação com a vibroacabadora, o rolo de pneus e (b) o rolo duplo tandem..	36
Figura 17 - Disposição dos revestimentos asfálticos de campo	37
Figura 18 - Sequência de realização do ensaio de mancha de areia.....	40
Figura 19 - Pêndulo Britânico	41
Figura 20 - Perfil de superfície de um CP fornecida pelo AIMS	42
Figura 21 - Planilhas de resultados de macrotextura e microtextura obtidos através do AIMS	44
Figura 22 - CPs avaliados no AIMS	44
Figura 23 - Eixos dos CP analisados no AIMS quanto a macrotextura e a microtextura	44
Figura 24 - Interface do <i>software</i> para as análises de textura no AIMS.....	45
Figura 25 - Esquema de cálculo do <i>Mean Profile Depth</i>	48
Figura 26 - Contato verificado através do iPas2.....	49
Figura 27 - Esquema de cálculo de orientação na zona de proximidade.....	50
Figura 28 - Regiões de segregação radial e vertical	51
Figura 29 - Fluxograma de ensaio do iPas2	53

Figura 30 - Resultados fornecidos pelo iPas2	54
Figura 31 - Serragem dos CPs avaliados no iPas2	55
Figura 32 - Gráfico de correlação entre GC e HS para misturas compactadas com rolo tandem	60
Figura 33 - Gráfico de correlação entre GC e BPN para misturas compactadas com rolo tandem	61
Figura 34 - Gráficos de correlação entre HS e MPD.....	63
Figura 35 - Gráficos de correlação entre BPN e Microtextura AIMS.....	67
Figura 36 - (a) Gráfico de número de contatos <i>versus</i> GC; (b) Gráfico de comprimento de contatos <i>versus</i> GC.....	72
Figura 37 - (a) Gráfico de Δc <i>versus</i> HS (b) Gráfico de Δc <i>versus</i> BPN	74
Figura 38 - (a) Gráfico de número de contatos <i>versus</i> GC; (b) Gráfico de comprimento de contatos <i>versus</i> GC.....	75
Figura 39 - (a) Gráfico de número de contatos <i>versus</i> GC (b) Gráfico de comprimento de contatos <i>versus</i> GC	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupos de aeronaves baseado na Velocidade de Aproximação (Adaptado da ICAO, 2005; Melo, 2014).....	1
Tabela 2 - Parâmetros mínimos referentes aos ensaios de medição de atrito.....	2
Tabela 3 - Frequência das medições de atrito e textura em pistas de aeroportos (Resolução ANAC 236, 2012).....	3
Tabela 4 - Caracterização básica dos agregados utilizados neste estudo.	27
Tabela 5 - Classificação das propriedades de forma dos agregados.	29
Tabela 6 - Parâmetros da Especificação Geral DIRENG 04.05.610 - CBUQ.....	30
Tabela 7 - Parâmetros de dosagem das Misturas Asfálticas I e II.	33
Tabela 8 - Composição das camadas granulares utilizadas no trecho experimental	34
Tabela 9 - Quantidade de passadas de rolos por trecho.....	38
Tabela 10 - Classificação da macrotextura de misturas asfálticas de acordo com o resultado do ensaio de mancha de areia (Aps, 2006).	39
Tabela 11 - Classificação da microtextura de misturas asfálticas de acordo com o ensaio de pêndulo britânico (Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2006).	41
Tabela 12 - Resultados das propriedades de forma dos agregados investigados	56
Tabela 13 - Classificação dos agregados investigados.....	56
Tabela 14 - Resultados de lamelaridade	57
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico.	58
Tabela 16 - Resultados de macrotextura obtidos com o uso do AIMS	62
Tabela 17 - Resumo das equações de correlação entre MPD e HS(mm) para cada distância adotada e equação da ASTM E 1845 (2009).....	64
Tabela 18 - Classificação subjetiva da correlação dos parâmetros avaliados (TRB, 2002).....	65
Tabela 19 - Resultados de microtextura obtidos com o uso do AIMS	66
Tabela 20 - Resumo das equações de correlação entre BPN e Microtextura AIMS para cada distância adotada	68
Tabela 21 - Angularidade e textura superficial da matriz pétreo do CA1 e CA2.....	69
Tabela 22 - Resultados de macrotextura e microtextura do AIMS para o CPs compactados em laboratório.....	69
Tabela 23 - Resultados de caracterização da estrutura interna das misturas asfálticas	71

Tabela 24 - Médias e CV dos resultados de caracterização da estrutura interna das misturas asfálticas	72
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δ	Vetor Magnitude Agregados
Δ_c	Vetor Magnitude Contatos
AAA _c	Média Absoluta dos Ângulos de Orientação
AIMS	<i>Aggregate Imaging Measurement System</i>
AIMS 2	<i>Aggregate Imaging Measurement System 2</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPN	<i>British Pendulum Number</i>
C1	Comitê de Características de Superfície
CA	Concreto Asfáltico
CA1	Concreto Asfáltico faixa 2 da DIRENG
CA2	Concreto Asfáltico faixa 3 da DIRENG
CA3	Concreto Asfáltico faixa 4 da DIRENG
CA4	Concreto Asfáltico faixa 2 da DIRENG com agregados polidos
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório Superpave
CM	Compactador Marshall
CI	Compactação Inteligente
CP	Corpo de Prova
CTMeter	<i>Circular Track Meter</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DFT	<i>Dynamic Friction Tester</i>
DP	Deformação Permanente
F ₆₀	Medida de atrito a 60km/h
FN	<i>Flow Number</i>
GC	Grau de Compactação
HS	Macrotextura medido através do ensaio de mancha de areia
IAC	Instrução de Aviação Civil
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IFI	<i>International Friction Index</i>
iPas2	<i>Image Processing and Analysis System</i>
KU	Grau de Achatamento dos Picos
MC	Mesa Compactadora
MD	<i>Micro-Deval</i>

MDV9	<i>Micro-Deval Voids at 9-hours</i>
MMLS3	<i>Model Mobile Load Simulator</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PDI	Processamento Digital de Imagens
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congress</i>
PM	<i>Polishing machine</i>
PTA	<i>Pavement Texture Analyzer</i>
RBV	Relação Betume Vazio
Sp	Constante de referência da velocidade
SK	Assimetria da Distribuição dos Picos do Relevo Superficial do Agregado
SLP	<i>Stationary Laser Profilometer</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
T ³ CM	<i>Tennessee Terminal Textural Condition Method</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
TRF	Transformada Rápida de Fourier
UIAIA	<i>University of Illinois Aggregate Image Analyzer</i>
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VRD	Valores de Resistência a Derrapagem
Vth	Velocidade de Aproximação
VV	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Problema e Questões de Pesquisa	4
1.2	Problema de Pesquisa	4
1.3	Questões de Pesquisa	5
1.4	Objetivos	5
1.4.1	<i>Objetivo Geral</i>	5
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	6
1.5	Estrutura do trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	Aderência Pneu-Pavimento	8
2.2	Processamento Digital de Imagens (PDI)	16
2.3	Propriedades de Forma de Agregados	18
2.4	Relação entre Estrutura Interna e Compactação de Misturas Asfálticas	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Materiais	26
3.2	Análise das Propriedades de Forma dos Agregados	27
3.3	Misturas Asfálticas	29
3.4	Compactação das Misturas Asfálticas	34
3.5	Ensaio Convencionais para a Determinação da Textura de Misturas Asfálticas	38
3.5.1	<i>Ensaio de Mancha de Areia</i>	38
3.5.2	<i>Ensaio de Pêndulo Britânico</i>	40
3.6	Ensaio para Determinação de Textura de Misturas Asfálticas Utilizando o PDI	41
3.7	Avaliação dos Resultados de Macrotextura Obtidos Através do AIMS	48
3.8	Ensaio da Estrutura Interna das Misturas Asfálticas	49
4	RESULTADOS	56

4.1	Análise dos Agregados Através do Uso do PDI (AIMS)	56
4.1.1	<i>Propriedades de Forma</i>	56
4.2	Resultados de Textura das Misturas Asfálticas Avaliadas	58
4.2.1	<i>Resultados obtidos em campo</i>	58
4.2.2	<i>Resultados obtidos em laboratório</i>	62
4.3	Resultados de Estrutura Interna das Misturas Asfálticas Avaliadas	70
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

Durante o desenvolvimento de projetos de misturas asfálticas existe a preocupação em escolher materiais que possibilitem ao pavimento condições estruturais adequadas para o tipo de carregamento que este será submetido. Para o caso específico de pavimentos aeroportuários, além do alto suporte estrutural, visto que as aeronaves geram cargas solicitantes superiores as cargas ocasionadas em rodovias, há uma preocupação com as propriedades de aderência na interface pneu-pavimento, visto que estas propriedades contribuem para a promoção da segurança na operação das aeronaves.

Com o surgimento de aeronaves turbojatos no transporte aéreo comercial, com maior peso e a possibilidade de desenvolvimento de maiores velocidades de aterrissagem, o desempenho da frenagem, principalmente quando as pistas encontram-se molhadas, tornou-se um ponto crítico para a operação de aeroportos. A depender das condições do pavimento, pode ocorrer a derrapagem, fenômeno da hidroplanagem ou a perda de tração, o que é inaceitável para aeronaves, podendo levar o piloto a perder o controle de direção (IAC 4302, 2001). De acordo com a velocidade que a aeronave toca a pista, também conhecida como Velocidade de Aproximação (V_{th}), o *International Civil Aviation Organization* (ICAO), classifica as aeronaves em 5 grupos (Tabela 1).

Tabela 1: Grupos de aeronaves baseado na Velocidade de Aproximação (Adaptado da ICAO, 2005; Melo, 2014).

Grupo	V_{th} (km/h)	Exemplos de Aeronaves
A	Até 169	DC3, DHC6, DHC7
B	Entre 169 e 222	Avro RJ 100, DC6, DC7, Fokker F7
C	Entre 222 e 259	A300, A310, A320, A330, B707-320, B727,
D	Entre 259 e 306	A340, B747, B777, DC8 (61 e 63), DC10-30/40,
E	Acima de 306	F-4

A aderência pneu-pavimento é influenciada por algumas variáveis da mistura asfáltica, dentre as quais se destacam as propriedades de forma dos agregados, a resistência ao polimento dos agregados, a compactação e a estrutura interna da mistura asfáltica. Esses fatores determinarão a textura do pavimento asfáltico. A literatura tem dividido a aderência pneu-pavimento em duas propriedades: atrito e textura.

Apesar da norma DNIT 031/2006 determinar que o revestimento de concreto asfáltico recém executado deve apresentar Valores de Resistência a Derrapagem (VRD) maior ou igual a 45 e altura de areia entre 0,6 e 1,2mm, obtidos através dos ensaios de Pêndulo Britânico e de Mancha de Areia, respectivamente, a falta de fiscalização possibilita que o pavimento rodoviário recém-executado apresente valores de textura capazes de contribuir para a falta de segurança das vias. Em aeroportos, a aderência do sistema pneu-pavimento é requerida já que esta é de extrema importância para a segurança, principalmente durante o pouso da aeronave. A Resolução ANAC 236 (2012) regulamenta as medições de atrito em aeródromos, de acordo com o equipamento utilizado. A Tabela 2 apresenta os parâmetros mínimos para os ensaios de medição de atrito.

Tabela 2: Parâmetros mínimos referentes aos ensaios de medição de atrito

Equipamento	Pressão do Pneu (kPa)	Velocidade do teste (km/h)	Espessura de lâmina de água (mm)	Coeficiente de atrito	
				Nível de manutenção	Nível aceitável
Mu-meter	70	65	1,00	0,52	0,42
	70	95	1,00	0,38	0,26
Skiddometer	210	65	1,00	0,60	0,50
	210	95	1,00	0,47	0,34
Surface friction tester vehicle	210	65	1,00	0,6	0,5
	210	95	1,00	0,47	0,34
Runway friction tester vehicle	210	65	1,00	0,6	0,5
	210	95	1,00	0,54	0,41
Tatra	210	65	1,00	0,57	0,48
	210	95	1,00	0,52	0,42
Runar	210	65	1,00	0,52	0,45
	210	95	1,00	0,42	0,32
Grip Tester	140	65	1,00	0,53	0,43
	140	95	1,00	0,36	0,24

Já para a análise de textura do revestimento deve ser realizado o ensaio de Mancha de Areia a cada 100m, em pontos localizados a 3m do eixo da pista, alternadamente a esquerda e a direita, onde o valor mínimo deve ser 0,60mm, sob pena de multa para o aeródromo. A Tabela 3 mostra a frequência em que deve ser realizada o monitoramento da textura e atrito das pistas de pouso e decolagem como modo de avaliar a resistência a derrapagem, sendo essa

característica descrita como o valor das forças de atrito nas rodas de veículos que evitam a ocorrência de deslizamento de pista em condições molhada ou seca.

Tabela 3: Frequência das medições de atrito e textura em pistas de aeroportos (Resolução ANAC 236, 2012)

Pousos Diários	Frequência das Medições	
	Atrito	Textura
<15	A cada 360 dias	A cada 360 dias
16 a 30	A cada 180 dias	A cada 180 dias
31 a 90	A cada 90 dias	A cada 90 dias
91 a 150	A cada 30 dias	A cada 60 dias
151 a 210	A cada 15 dias	A cada 45 dias
>210	A cada 7 dias	A cada 30 dias

Para avaliar a textura da camada de revestimento, podem ser utilizados alguns ensaios, tais como: Mancha de Areia (ASTM E 965, 1996), Drenabilidade (ASTM E 2380, 2005) e Pêndulo Britânico (ASTM E 303, 1993). Além destes ensaios, os avanços da informática vêm fornecendo meios para mensurar a textura de misturas asfálticas através do uso de técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI). O uso do PDI permite obter dados mais confiáveis, pois, com o uso dessa técnica ainda em campo e laboratório, os resultados obtidos são embasados na teoria, diferente dos ensaios empíricos ainda bastante utilizados. Além disso, o PDI apresenta outras vantagens com relação a realização dos ensaios em laboratório, pois promove melhor reprodutibilidade dos resultados e oferece menos risco à segurança do operador, se comparado aos ensaios realizados em campo, uma vez que não expõe o mesmo por tanto tempo a condições inseguras na rodovia como este seria exposto se realizasse os ensaios convencionais. Por ser um método normalmente não destrutivo, o PDI também apresenta a vantagem de poder ser realizado nas mesmas amostras que posteriormente podem ser utilizadas para a execução de outros ensaios.

Contudo, vale lembrar que a aderência pneu-pavimento, apesar de prevista pelas normas, não é avaliada durante a metodologia de dimensionamento ou de dosagem do revestimento de aeroportos, podendo a mistura asfáltica atender a todos os parâmetros mecânicos e volumétricos e não atingir as características de textura e atrito que sejam consideradas seguras para a operação das aeronaves. Normalmente, a Infraero exige, através das especificações técnicas, a execução de uma pista de teste em dimensões pré-definidas com

o intuito de avaliar se o revestimento asfáltico atendem aos parâmetros recomendados na Resolução ANAC 236 (2012).

1.1. Problema e Questões de Pesquisa

1.2. Problema de Pesquisa

No Brasil, não é comum a inclusão de análises de textura e de atrito em projetos de misturas asfálticas. Em geral, não há preocupação com esse aspecto funcional durante a concepção do projeto do revestimento asfáltico de rodovias visto que as velocidades praticadas pelos automóveis são, em geral, consideradas baixas. Porém, quando se trata de revestimentos aeroportuários a preocupação com a aderência pneu-pavimento é premente, visto que as velocidades praticadas, em geral, são consideradas altas, necessitando de propriedades de aderência, na interface pneu-pavimento, superiores. Contudo, não há meios satisfatórios que permitam prever, em laboratório, as propriedades de textura e de atrito durante a fase de projetos das misturas asfálticas. Assim, o projetista precisa avaliar a escolha dos materiais que irão compor a mistura asfáltica, observando, principalmente, a granulometria e as propriedades de forma dos agregados, visando uma melhor aderência.

Pode-se citar, também, a questão relativa a escolha de agregados com características que possam fornecer parâmetros de textura à mistura asfáltica que favoreçam a segurança dos usuários de rodovias. A textura de um pavimento é função de uma série de parâmetros, o que dificulta a tentativa de correlacionar essa propriedade com as características de forma dos agregados que compõem a mistura asfáltica que será utilizada na camada de revestimento. Sendo assim, avaliar a correlação entre as características de forma, angularidade e textura superficial de agregados e a textura da mistura asfáltica em si torna-se um tarefa complexa.

Além do que foi exposto acima, é possível citar, também, a compactação como um parâmetro que pode influenciar consideravelmente nas características de textura das misturas asfálticas, visto que tanto o Grau de Compactação (GC) como a forma de compactação (tipo e sequência de rolos utilizados) interferem diretamente na textura superficial da mistura asfáltica, onde um revestimento asfáltico com maior GC tende a ter resultados de textura e atrito inferiores em relação ao mesmo revestimento asfáltico com menor GC. Assim como o GC, o método de compactação pode influenciar bastante nas características de aderência pneu-pavimento, não sendo simples comparar misturas compactadas em laboratório com

misturas compactadas em campo, assim como comparar misturas compactadas em campo de diferentes métodos.

1.3. Questões de Pesquisa

Baseado no problema de pesquisa exposto anteriormente, foram elaboradas as seguintes questões de pesquisa:

- Qual a influência da granulometria na textura de misturas asfálticas?
- Como a textura superficial e a angularidade dos agregados afetam a textura de misturas asfálticas compostas pelos mesmos?
- Como o método de compactação impacta nas propriedades de textura das misturas asfálticas, levando em consideração o GC, tipo e sequência dos rolos e a estrutura interna?
- Como se correlacionam com os métodos de compactação utilizados em laboratório com método utilizado em campo quanto as propriedades de textura superficial?
- Como a mudança de parâmetros de análise de textura de misturas asfálticas de técnicas de PDI interferem nos resultados obtidos?
- Existe correlação entre os resultados de ensaios convencionais e aqueles obtidos através do PDI para avaliação da textura de misturas asfálticas projetadas para uso em pavimentos aeroportuários?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo Geral

Por estar ligado diretamente à questão principal da pesquisa, o objetivo geral deste estudo é apresentar um método para avaliar a textura superficial de misturas asfálticas que compõem pavimentos aeroportuários verificando como (i) as propriedades de forma dos agregados, (ii) a compactação, (iii) a estrutura interna se correlacionam com a macrotextura e microtextura das misturas asfálticas. Para tanto serão utilizadas técnicas tradicionais (mancha de areia, drenabilidade e pêndulo britânico) e técnicas de PDI (*Aggregate Imaging*

Measurement System) para análise de textura, buscando prever as propriedades de textura das misturas asfálticas.

1.4.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos indicarão as atividades a serem realizadas durante a pesquisa, procurando responder às questões de pesquisa apresentadas anteriormente. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar a influência da granulometria na textura de misturas asfálticas através de ensaios convencionais e a partir do uso do PDI;
- Verificar como as propriedades de textura superficial e angularidade dos agregados impactam nas propriedades de textura das misturas asfálticas;
- Investigar como o método de compactação impacta na textura de misturas asfálticas, avaliando o GC, sequência e tipos de rolos utilizados e a estrutura interna;
- Avaliar como se correlaciona com os métodos de compactação utilizados em laboratório com o método utilizado em campo em relação as propriedades de textura;
- Verificar como a variação de parâmetros do AIMS impacta nos resultados de macrotextura;
- Obter correlações entre os resultados obtidos através do uso do PDI e os resultados obtidos através do uso de ensaios convencionais para a avaliação da textura de misturas asfálticas.

1.5. Estrutura do trabalho

Este documento está organizado em 5 capítulos, descritos da seguinte forma:

Capítulo 1 apresenta o tema com uma introdução, descrevendo o problema de pesquisa, as questões de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos.

Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, trazendo informações relativas aos principais temas do trabalho, como aderência pneu-pavimento, PDI, propriedade de forma dos agregados, estrutura interna e compactação de misturas asfálticas.

Capítulo 3 traz informações sobre a metodologia do trabalho como descrição dos ensaios realizados nos agregados, método de dosagem das misturas asfálticas, método de

polimento de agregados, método de análise de textura de misturas asfálticas, método de compactação e de estrutura interna de misturas asfálticas.

Capítulo 4 mostra os resultados obtidos nos ensaios de propriedades de forma dos agregados, assim como dos ensaios de textura realizados em campo e em laboratório.

Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas através dos resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

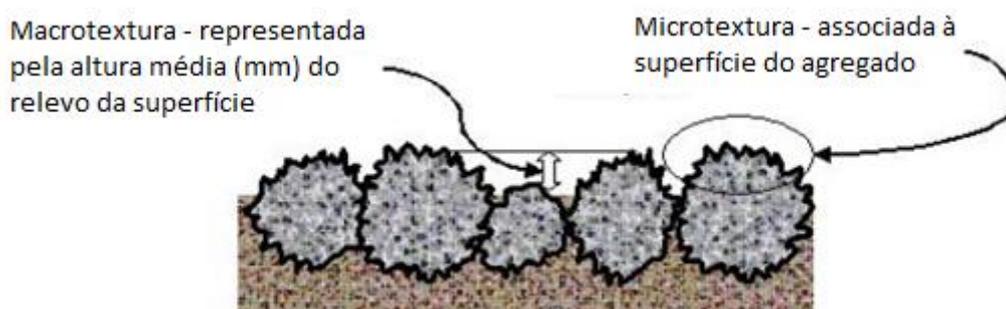
2.1. Aderência Pneu-Pavimento

Além de um projeto geométrico que respeite os parâmetros determinados em norma, como traçados de curvas verticais, caimentos transversais, comprimento e largura de pistas, os aeródromos devem apresentar um pavimento projetado para suportar a carga das aeronaves, devendo, na medida do possível, conservar suas características estruturais e funcionais ao longo da sua vida útil. Em revestimentos asfálticos aeroportuários uma propriedade importante é a aderência do sistema pneu-pavimento.

No sistema pneu-pavimento, a aderência refere-se ao limite de atrito desenvolvido entre o pneu e o pavimento que irá assegurar mobilidade e dirigibilidade aos usuários das vias. A aderência do sistema pneu-pavimento é composta por duas parcelas: a textura do pavimento e o atrito (APS, 2006; PEREIRA, 2010).

A textura do pavimento desempenha papéis importantes com relação as propriedades funcionais da estrutura, dentre os quais é possível citar: o desenvolvimento das forças de atrito no sistema pneu-pavimento, a resistência ao movimento (com possibilidade de interferência no consumo de combustível), o desgaste dos pneus devido a pequenos deslizamentos, o ruído e as vibrações transmitidas ao volante e aos usuários de veículos (MENEZES, 2008). A textura do pavimento, de acordo com a ASTM E-867 (2012), pode ser dividida em microtextura e macrotextura. A microtextura corresponde às dimensões de comprimento de onda inferiores a 0,5mm, enquanto a macrotextura corresponde aos comprimentos de onda superiores a 0,5mm. A Figura 1 apresenta ilustração de macrotextura e microtextura.

Figura 1: Ilustração de macrotextura e microtextura



Fonte: Rodrigues Filho (2006)

A microtextura está ligada à rugosidade da superfície dos agregados, podendo ser classificada como rugosa ou lisa. Já a macrotextura é função da granulometria dos agregados utilizados na mistura asfáltica aplicada na camada de rolamento do pavimento, podendo ser classificada como fina ou grosseira. Dentre outros fatores, macrotextura e microtextura estão diretamente ligadas ao fenômeno de aderência existente entre o pneu e o pavimento. Enquanto a microtextura é responsável pela ruptura da película de água que se forma entre o pneu e o pavimento quando este está molhado, a macrotextura está associada ao tempo de drenagem desta mesma lâmina de água (PEREIRA, 2010).

Além das funções citadas anteriormente, a textura do pavimento contribui para a segurança do motorista quando a pista está molhada. Segundo Ferreira (2002), a eliminação da água que se encontra na região de contato entre o pneu e o pavimento é um dos fatores importantes para que seja desenvolvida aderência satisfatória, sendo as texturas do pavimento e dos pneus fatores que auxiliam na expulsão da água. De acordo com Rodrigues Filho (2006), quanto mais grosseira for a macrotextura do pavimento, maior deverá ser a profundidade da lâmina de água necessária para causar o efeito da hidroplanagem.

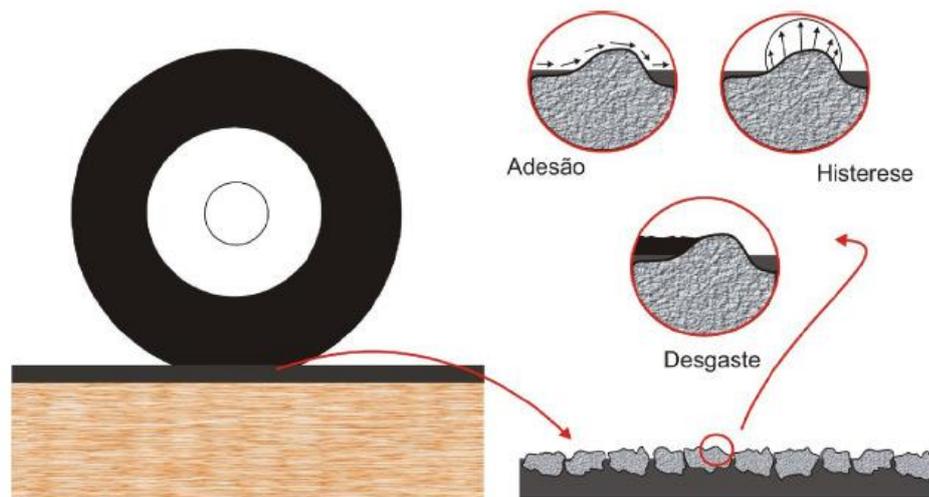
Como foi dito anteriormente, a textura do pavimento e a força de atrito são os fatores responsáveis pela aderência que ocorre no sistema pneu-pavimento, sendo a aderência geralmente medida através do atrito. A força de atrito pode ser definida como a força tangencial resistente que atua na interface entre dois corpos, resultante da força externa de um corpo que se move ou tende a se mover sobre o outro (APS, 2006).

De acordo com Aps (2006), o sistema pneu-pavimento é composto por dois tipos de interação: mecanismos de aderência e de desgaste, sendo definidos como o pneu rolando sobre o pavimento e como pneu travado durante uma frenagem de emergência, respectivamente. Esses dois mecanismos são desenvolvidos na área de contato entre o pneu e o pavimento durante o movimento do veículo, tendo uma área maior onde ocorre o atrito por rolamento e uma área menor onde a força atuante no sistema pneu-pavimento supera o limite de aderência provocando deslizamentos localizados.

Durante o processo de frenagem, ocorre o deslizamento entre o pneu e o pavimento. O atrito causado por esse deslizamento é resultante de três fenômenos que estão ligados diretamente à textura superficial da mistura asfáltica: adesão, histerese e desgaste (APS, 2006; RODRIGUES FILHO, 2006; SILVA, 2008; PEREIRA, 2010). Estes mecanismos de atrito (Figura 2) podem ser definidos da seguinte forma:

- Adesão é proveniente da atração molecular entre as superfícies (força de Van der Waals). A força de adesão depende do tempo de contato, da composição do pneu e da macrotextura do revestimento;
- Histerese é a consequência da deformação que ocorre no pneu durante o deslizamento sobre as irregularidades da via. Devido às deformações cíclicas que o pneu sofre durante o deslizamento, ocorre uma perda de energia por calor. A perda por histerese está ligada à macrotextura do revestimento e à velocidade de deslizamento;
- Desgaste refere-se ao pneu, sendo definido como a perda de partículas do pneu para o pavimento. Com relação ao pavimento, o desgaste é conhecido como emborrachamento, sendo este um termo bastante comum quando se fala em pavimentos aeroportuários. Este fenômeno também está ligado à macrotextura do revestimento.

Figura 2: Mecanismo de atrito durante processo de frenagem



Fonte: Silva (2008)

Como existem vários ensaios destinados a avaliação da textura e do atrito de pavimentos, foi criado o *International Friction Index* (IFI), índice proveniente de um estudo com vários resultados de ensaios de atrito e de textura de pavimentos, com o intuito de unificar, em uma única escala, os resultados de todos esses ensaios. Os experimentos foram

conduzido pelo Comitê de Características de Superfície (C1) da *Permanent International Association of Road Congress (PIARC)* e contou com resultados provenientes de ensaios realizados com o uso de 47 equipamentos de medição oriundos de 16 países. Por meio destes ensaios, foram medidos 67 parâmetros diferentes, sendo 33 de textura e 34 de atrito. O experimento resultou em um banco de dados contendo 15.000 valores numéricos, referentes a diferentes tipos de superfície, que foram utilizados para criar a escala comum, baseada em medidas de atrito (F_{60}) e de textura (S_p), denominada IFI. A Equações 1 e 2 mostram como o IFI (S_p, F_{60}) é obtido.

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

Onde:

a e b = constantes determinadas em função do equipamento;

T_x = parâmetro de textura, determinado a partir do de valores obtidos para determinação de macrotextura em função do ensaio utilizado.

$$F_{60} = A + B \times FRS^{[(S-60)/(S_p)]} + C \times Tx \quad (2)$$

Onde:

A, B e C = constantes determinadas em função do equipamento;

FRS = atrito medido pelo equipamento adotado a velocidade de deslizamento;

S = velocidade de deslizamento do equipamento.

Muitos estudos internacionais e nacionais têm avaliado a textura de misturas asfálticas. Aps (2006) avaliou a textura e o atrito de diferentes tipos de revestimentos através de ensaios de mancha de areia e de pêndulo britânico. Através dos resultados reportados por essa autora, foram calculados os seguintes parâmetros: medida de atrito a 60km/h (F_{60}) e constante de referência da velocidade (S_p) validando esses ensaios no que diz respeito à obtenção do IFI em si e estabelecendo critérios e faixas de classificação em função dos parâmetros encontrados.

Silva (2008) analisou as condições funcionais da antiga pista do Aeroporto Internacional de Brasília utilizando, entre outros parâmetros, os resultados dos ensaios de mancha de areia, de pêndulo britânico, de drenabilidade e da medição contínua de atrito com uso do *Mu-Meter*. Este autor realizou análises em pontos da pista que tinham a maior probabilidade de serem solicitados durante o pouso das aeronaves. Foram analisados 65 pontos antes e após o processo de desemborrachamento. O desemborrachamento refere-se à remoção da borracha presente nas pistas aeroportuárias devido ao atrito pneu-pavimento que surge durante os pousos e as decolagens das aeronaves. O processo de retirada da borracha presente na pista pode ser realizado através do jateamento de água sob pressão com chuveiro rotativo. Os resultados do ensaio de mancha de areia indicaram que as condições de macrotextura aumentaram em torno de 74% após o desemborrachamento, enquanto os resultados do pêndulo britânico indicaram que a microtextura aumentou 71%. Já o ensaio de atrito (*Mu-Meter*) os resultados foram 8,8% superiores após o desemborrachamento. Contudo, esse resultado pode ter sido ainda maior visto que a disponibilidade do *Mu-Meter* não permitiu que o ensaio fosse realizado em um curto período em relação ao desemborrachamento, tendo o processo de desemborrachamento ocorrido em setembro de 2007, as medições antes do desemborrachamento foram realizadas janeiro de 2007 e as medições realizadas após o desemborrachamento ocorreram em janeiro de 2008. Além disso, este constatou que apesar do *grooving*, técnica já consolidada que consiste em executar ranhuras transversais na superfície do revestimento com o intuito de melhorar a drenagem superficial assim como as condições de aderência pneu-pavimento, ter papel importante na aderência pneu-pavimento, por si só não garante uma aderência adequada para pistas de pouso e decolagem devido ao emborrachamento.

Pereira (2010) avaliou as condições de aderência em pontos das rodovias BR 101 e 230 e, a partir de misturas asfálticas convencionais dosadas em laboratório utilizado o mesmo agregado e ligante da mistura aplicada em campo, realizou ensaios de pêndulo britânico, de mancha de areia e de drenabilidade, além de ter obtido o valor do IFI para cada caso. Esta autora observou que existem dificuldades na correlação entre os resultados obtidos em campo e aqueles obtidos em laboratório, principalmente devido ao período de exposição ao tráfego das misturas de campo. Além disso, foi constatado que a maioria dos trechos analisados precisava de alguma intervenção devido a baixos valores de macrotextura e/ou microtextura. Com os resultados obtidos em laboratório, a mesma concluiu que havia casos em que a mistura asfáltica não atingia requisitos mínimos de atrito e de textura antes mesmo de sofrer

os desgastes que ocorrem durante sua vida útil, sendo necessária a exigência desses parâmetros no momento de sua concepção.

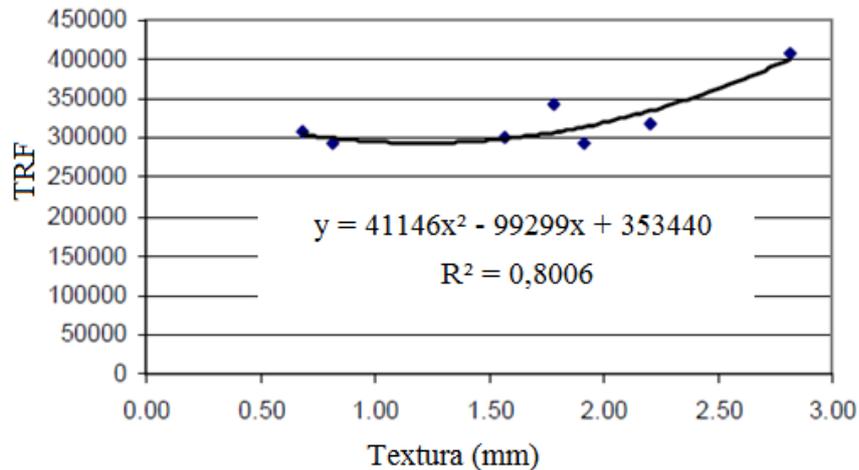
Pidewerbesky e Gransberg (2006) avaliaram a textura superficial de sete revestimentos do tipo tratamento superficial utilizados na Nova Zelândia. Para realizar a análise, os autores utilizaram o ensaio de mancha de areia, posteriormente transformado em Textura obtida de acordo com a Equação 3, e uma técnica de PDI baseada em um parâmetro que utiliza a quantidade de informação (intensidade relativa de luminosidade entre *pixels* adjacentes) em cada imagem obtida através de uma câmara digital, onde imagens com maior quantidade de informações representam aquelas com maior contraste e, conseqüentemente, maior textura. O *software* utilizado foi o *Image Processing Toolbox* do MATLAB, onde foi utilizada uma técnica numérica denominada Transformada Rápida de Fourier (TRF) técnica de transformação aplicada em cada *pixel* da imagem, levando em conta os níveis de cinza das regiões de cinza de cada *pixel*, com o intuito de obter a quantidade de informação contida em cada imagem. Para obter melhores correlações entre o ensaio de mancha de areia e a técnica de PDI adotada, os autores separaram os tipos de tratamentos superficiais antes da realização das análises. Além disso, as análises de PDI eram feitas em quantidades variáveis para cada imagem avaliada, podendo uma mesma imagem ser avaliada em até 25 regiões diferentes. Os autores obtiveram coeficientes de determinação de até 0,80, quando a quantidade de regiões analisadas por imagem foi de 25, e concluíram que o método tem potencial para substituir o ensaio de mancha de areia, visto que este último apresenta uma baixa reprodutibilidade. A Figura 3 mostra parte dos resultados obtidos para 25 análises por imagem.

$$\text{Textura} = \frac{57,3mm}{d^2} \quad (3)$$

Onde:

d = Diâmetro obtido no ensaio de mancha de areia

Figura 3: Relação entre TRF e Textura



Fonte: Adaptado de Pidewerbesky e Gransberg (2006)

Wang *et al.* (2011) desenvolveram um equipamento com o intuito de avaliar a macrotextura de misturas asfálticas em campo. O equipamento é composto principalmente por: (i) laser de alta precisão, aparelho responsável por realizar as medições dos parâmetros de profundidade, de textura e do perfil do pavimento, (ii) codificador rotativo óptico-elétrico, componente que controla a frequência para avaliação de textura além de mapear os pontos onde a macrotextura foi medida. Os autores realizaram ensaios para obtenção da textura em campo e em laboratório em diferentes tipos de misturas asfálticas utilizando o equipamento desenvolvido no citado estudo. Os mesmos correlacionaram os resultados com aqueles obtidos através da realização de ensaios convencionais, como o de mancha de areia, e obtiveram uma boa correlação, com valor de coeficiente de determinação (R^2) da ordem de 0,96.

Hadiwardoyo *et al.* (2013) avaliaram o impacto da temperatura no atrito de misturas asfálticas. Para isso, os autores modificaram o CAP com percentuais de 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de *Buton Natural Asphalt* (BNA), para em seguida dosar cinco misturas asfálticas, uma para cada CAP modificado por BNA. O BNA é um material oriundo da Indonésia. Esse material betuminoso encontra-se misturado com rochas e é obtido através do refinamento das mesmas. Esse composto aumenta o teor de betume presente no CAP. Para cada mistura asfáltica foram moldadas seis placas de 300×300×50mm, tendo sido cada placa dividida em 15 seções. As seções foram ensaiadas através do ensaio de pêndulo britânico e obtido o *British Pendulum Number* (BPN) em diferentes temperaturas (30°C, 35°C, 40°C, 45°C, 50°C e 55°C). Para cada CAP modificado foi calculado o índice de susceptibilidade térmica e com os

valores de BPN os autores utilizaram a Equação (4) para obter resultados de coeficiente de atrito, gerando um modelo que permite prever os valores de atrito de misturas asfálticas baseado na temperatura do pavimento e nos resultados do índice de susceptibilidade térmica do CAP. A Equação (5) mostra o modelo obtido.

$$C = 0,862BPN - 9,69 \quad (4)$$

$$C = 1,452 (t - 70,73)PI^2 - 0,286 (t - 153,5656) - 0,594(t - 131,5656) \quad (5)$$

Onde:

C = Coeficiente de atrito

t = Temperatura (°C)

PI = Índice de susceptibilidade térmica

Rodrigues (2013) investigou a microtextura e macrotextura superficial de dez trechos localizados no estado do Ceará. Este autor utilizou os ensaios pêndulo britânico e mancha de areia para avaliar a textura superficial de campo. Além disso, as misturas de campo foram reproduzidas em laboratório e compactadas utilizando um cilindro de concreto com aproximadamente 55kg, permitindo assim produzir amostras de tamanhos maiores onde era possível realizar os mesmos ensaios de textura aplicado em campo. Com os resultados o autor obteve um modelo (Equação 6) que permite obter o resultado do ensaio de Mancha de Areia através da granulometria da mistura.

$$HS = -3,20974 (\%ret\ n^{\circ}40)^{-0,04013} + (\%ret\ n^{\circ}10)^{0,13199} + (\%ret\ n^{\circ}4)^{-0,02805} + (\%ret.\ 3/8)^{0,05849} \quad (6)$$

Onde:

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

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

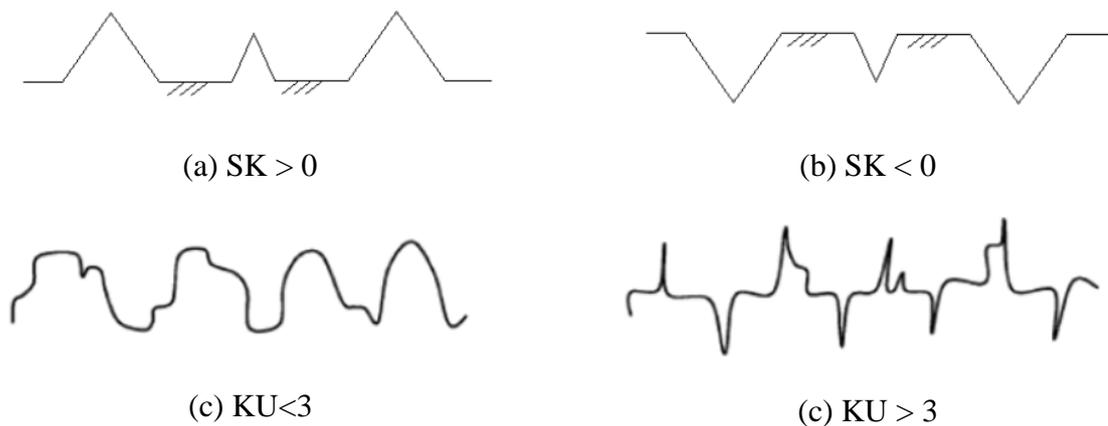
%ret.n°10: porcentagem de material retido na peneira n°10;

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

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

Kuchiishi *et al.* (2014) analisaram a textura superficial de treze diferentes revestimentos asfálticos através dos ensaios de mancha de areia, de drenabilidade e do *Pavement Texture Analyzer* (PTA). Dentre outros, o PTA, equipamento que utiliza o PDI, analisa parâmetros relacionados a assimetria da distribuição dos picos do relevo superficial do agregado (SK) e ao grau de achatamento dos picos (KU). A Figura 4 mostra como os parâmetros SK e KU se comportam de acordo com as propriedades superficiais das misturas asfálticas. Esses autores concluíram que a utilização do SK e do KU são relevantes para a caracterização de textura de misturas asfálticas, visto que podem explicar características não mostradas nos ensaios convencionais.

Figura 4: Comportamento dos parâmetros SK e KU



Fonte: Adaptado de Kuchiishi *et al.* (2014)

2.2. Processamento Digital de Imagens (PDI)

Na área de pavimentação, o PDI vem sendo utilizado como uma nova opção para a obtenção de propriedades de forma de agregados minerais, como complementação da análise tradicional comumente realizada em laboratório. Além disso, o PDI também pode ser utilizado em misturas asfálticas de campo e/ou laboratório para análises de textura e estrutura interna, por exemplo. Ensaios convencionais, para análise de propriedades de forma ou para textura de misturas asfálticas, utilizam equipamentos simples, porém demandam bastante tempo devido ao fato de que alguns ensaios exigem a avaliação quantitativa manual para cada amostra de uma parcela considerada representativa. Além disso, os ensaios realizados em laboratório determinam índices globais baseados em médias, não levando em consideração a distribuição cumulativa de propriedades (MASAD, 2004).

As técnicas mais modernas de PDI utilizam câmeras ou *scanners* para capturar as imagens, além de computadores, onde são instalados *software* que realizam o tratamento dos dados em bases estatísticas. A literatura técnica que trata de PDI vem crescendo e ganhando mais atenção nos últimos anos. Bessa *et al.* (2011) avaliaram as propriedades de forma de agregados provenientes de três pedreiras distintas (diferentes origens mineralógicas) localizadas no estado do Ceará, através do AIMS, e concluíram, a partir das análises dos resultados, que a obtenção das propriedades de forma de agregados pode, no futuro, ajudar no controle de qualidade de produção dos agregados quando se trata de materiais para pavimentação asfáltica.

Bessa (2012) investigou, através do uso do AIMS, agregados provenientes de diferentes fontes mineralógicas em relação a suas características de forma, de angularidade e de textura. Este autor concluiu que estes agregados possuíam propriedades semelhantes, provavelmente devido à similaridade entre os processos de britagem utilizados na produção dos mesmos.

Wnek *et al.* (2012) avaliaram propriedades de forma, de angularidade e de textura de agregados para uso em lastros ferroviários utilizando técnicas de PDI através do uso do equipamento *University of Illinois Aggregate Image Analyzer (UIAIA)*. Neste estudo, os autores concluíram que lastros compostos por agregados mais angulares tendem a gerar estruturas com resistência ao cisalhamento superior. Os citados autores também verificaram que agregados mais longos e planos quebram mais facilmente quando utilizados nesse tipo de estrutura.

Anochie-Boateng *et al.* (2013) utilizaram uma técnica de PDI através do uso de um *scanner* de varredura 3D a *laser* para avaliar a forma de agregados provenientes de diferentes fontes mineralógicas localizadas na África do Sul. Os resultados foram comparados com aqueles obtidos através do uso de métodos manuais. Os autores relataram que o método investigado (com o uso do PDI) pode fornecer resultados mais confiáveis em relação aos métodos tradicionais manuais, por não ter considerável influência da subjetividade relacionada ao fator humano presente nos métodos convencionais.

Araujo *et al.* (2013) avaliaram a influência do processo de fresagem nas propriedades de forma de agregados minerais, tendo realizado a análise dos mesmos antes e após a extração do ligante asfáltico envelhecido. Esses autores concluíram, quanto às propriedades de forma das partículas, que a velocidade da máquina fresadora pouco interferiu nos parâmetros

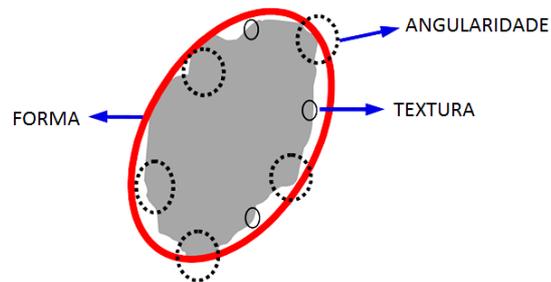
analisados, mesmo quando o material fresado foi comparado ao material retirado através da escarificação, processo pelo qual é possível preservar melhoras propriedades de forma dos agregados. Já a presença do ligante asfáltico interferiu consideravelmente nas características de textura superficial do material fresado, cujos valores foram inferiores a 50% para os agregados avaliados após a extração do CAP se comparados aqueles valores encontrados para os agregados avaliados antes da extração do CAP. Isso ocorreu devido à presença de partículas mais finas aderidas a partículas graúdas antes da extração do ligante asfáltico.

Diógenes (2015) avaliou o processo de britagem de três pedreiras localizadas na região metropolitana de Fortaleza com o intuito de verificar como este procedimento pode interferir nas propriedades de forma dos agregados. Os agregados foram analisados através do método tradicional de índice de forma e através do PDI utilizando o AIMS. Os resultados obtidos no ensaio de índice de forma apresentaram boa correlação com os resultados de esfericidade obtidos com o uso do AIMS ($R^2 = 0,85$). Os resultados mostraram ainda que a partir do uso de britadores cônicos, agregados gerados com um menor número de estágios, ou seja com reduções de tamanho de agregados maiores, resultam em partículas mais alongadas e achatadas. Além disso, foi possível constatar que agregados produzidos em britadores de mandíbula possuem angularidade 7,5% maior se comparados aos agregados obtidos em britadores cônicos.

2.3. Propriedades de Forma de Agregados

As propriedades de forma de agregados utilizados em misturas asfálticas podem estar relacionadas aos principais defeitos encontrados em pavimentos. Basicamente, existem três características independentes de formas: a forma propriamente dita, a angularidade e a textura superficial. De acordo com Al Rousan (2004), a forma é a proporção entre as dimensões, a angularidade representa o quão agudas são as quinas dos agregados, enquanto que a textura superficial descreve as irregularidades da superfície de uma partícula (Figura 5). Masad *et al.* (2003) afirmaram que as propriedades de angularidade e de textura dos agregados são determinantes para gerar o atrito existente na interface entre o pneu e o pavimento.

Figura 5: Propriedades de forma de uma partícula de agregado



Fonte: adaptado de Masad (2005)

A forma do agregado pode ser quantificada pela lamelaridade, que envolve as razões entre as dimensões de suas partículas. Agregados achatados ou alongados em misturas asfálticas estão mais sujeitos a quebras durante o processo de compactação, podendo, por exemplo, alterar significativamente a composição granulométrica da mistura asfáltica. Além disso, agregados planos tendem a repousar no pavimento reduzindo o intertravamento dos agregados e a resistência do pavimento à derrapagem. Outra propriedade relacionada à forma é a esfericidade, que quantifica o grau de arredondamento das partículas de agregados. No geral, espera-se que as partículas de agregados que compõem misturas asfálticas possuam a forma mais cúbica possível. A forma 2D está relacionada ao formato bidimensional das partículas a um círculo. A angularidade está relacionada com o grau de arredondamento das quinas de um agregado. Agregados com cantos arredondados apresentam baixos valores de angularidade, enquanto que altos valores para este parâmetro representam agregados com cantos mais agudos. Por fim, a textura superficial está relacionada às irregularidades na superfície de uma partícula de agregado, em escala tão pequena, que esta é incapaz de afetar significativamente a forma do agregado (AL ROUSAN, 2004). O agregado mais rugoso propicia um maior atrito entre suas partículas, podendo tornar a mistura asfáltica menos propícia a sofrer Deformação Permanente (DP).

As propriedades de forma dos agregados impactam diretamente as propriedades de textura de uma mistura asfáltica. A microtextura dos revestimentos asfálticos está diretamente relacionada à resistência dos agregados ao polimento. Outro fator a ser considerado é a resistência dos agregados à degradação, ou seja, a abrasão e a quebra dos mesmos. A abrasão

pode ser definida como a perda de angularidade dos agregados, enquanto que a quebra é definida como a fratura dos agregados (MAHMOUD, 2005).

Alguns autores têm avaliado a influência da forma de agregados em relação às propriedades volumétricas e mecânicas de misturas asfálticas. Furlan *et al.* (2004) investigaram a influência das características dos agregados na sensibilidade de misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA) a resistência ao dano por umidade induzida. Estes autores avaliaram dois tipos de agregados com propriedades de forma distintas. Para avaliar o dano por umidade induzida nas misturas asfálticas, foi utilizado o ensaio de Determinação do Efeito da Umidade em Misturas Asfálticas (ASTM D 4867, 1988), que utiliza a variação do ensaio de resistência à tração para estimativa deste dano. Com os resultados obtidos, foi possível concluir que a angularidade dos agregados não influenciou na sensibilidade à umidade das misturas asfálticas compostas pelos mesmos.

Nascimento (2008) avaliou propriedades volumétricas de misturas asfálticas de mesma composição granulométrica, sendo uma composta por agregados mais lamelares e outra por agregados mais cúbicos. Este autor verificou que a mistura asfáltica composta por agregados mais lamelares apresentou o parâmetro volumétrico Vazios do Agregado Mineral (VAM) cerca de 10% mais elevado, tornando necessário um maior teor CAP na mistura asfáltica para obtenção do Volume de Vazios (Vv) de projeto, tornando a mistura asfáltica inadequada.

Masad *et al.* (2011) analisaram o impacto das propriedades de forma nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. Estes autores utilizaram agregados provenientes de treze fontes distintas e observaram que o aumento no percentual de partículas planas elevou a resistência das misturas asfálticas a DP. Os autores concluíram que o fato de partículas mais lamelares tenderem a repousar no sentido horizontal no pavimento gera um maior número de contatos entre os agregados no sentido vertical, ocasionando assim um acréscimo na resistência a DP do material. Contudo, os autores ressaltam que agregados lamelares têm a desvantagem de tenderem a quebrar durante o processo de compactação.

Onofre (2012) verificou a influência da textura superficial de agregados na resistência a DP de misturas asfálticas através dos resultados do ensaio uniaxial de carga repetida. Este autor utilizou dois tipos de agregados: (i) granítico e (ii) basáltico. Os dois agregados foram analisados no AIMS, apresentando características de esfericidade, forma 2D e angularidade semelhantes. Contudo, as características de textura superficial destes agregados apresentaram diferenças, 75% das partículas do agregado granítico apresentaram textura superficial média e

25% apresentaram textura superficial baixa, enquanto o agregado basáltico apresentou 100% das partículas classificadas como de alta textura superficial. Os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida apresentou resultados de deformação acumulada para a mistura asfáltica contendo agregado basáltico cinco vezes inferior se comparados aos resultados obtidos para a mistura asfáltica composta por agregados graníticos. O resultado do parâmetro de *Flow Number* (FN) da mistura asfáltica composta por agregados basálticos foi aproximadamente dezessete vezes superior quando comparado aos resultados obtidos para a mistura asfáltica composta por agregados graníticos.

Pazos (2015) avaliou a influência de propriedades de forma de agregados de diferentes fontes no comportamento mecânico de seis misturas asfálticas compostas por esses materiais. Para isso, foram utilizados três agregados com características distintas: (i) seixo rolado, (ii) brita cúbica e (iii) brita cúbica lamelar. As propriedades de forma destes agregados foi realizada utilizando metodologias tradicionais e o PDI, através do uso do *Aggregate Imaging System 2* (AIMS 2). Este autor verificou que a textura superficial dos agregados deve ser considerada em especificações técnicas, visto que esta propriedade mostrou forte correlação ($R^2 = 0,84$) com os resultados de FN das misturas asfálticas avaliadas. Além disso, a angularidade do agregado graúdo, avaliada através do AIMS, apresentou R^2 de 0,84 quando esta foi correlacionada com o FN, enquanto a esfericidade apresentou uma baixa correlação ($R^2 = 0,30$) com este mesmo parâmetro (FN).

2.4. Relação entre Estrutura Interna e Compactação de Misturas Asfálticas

Além das propriedades de forma dos agregados e da resistência ao polimento dos mesmos, a compactação da mistura asfáltica também é um fator que está diretamente ligado às propriedades mecânicas, volumétricas e funcionais do revestimento. A compactação tem como objetivo aumentar a densidade da mistura asfáltica de tal forma que seja possível alcançar parâmetros determinados em projeto, garantido ao usuário um revestimento seguro e confortável. A compactação é importante para o desempenho dos pavimentos devido a três fatores: (i) aumento do contato dos agregados promovendo maior intertravamento do esqueleto mineral resultando em uma mistura asfáltica com maior estabilidade; (ii) diminuição do V_v , aumentando a impermeabilidade do revestimento e, conseqüentemente, reduzindo a penetração de água e de ar, garantindo uma maior resistência ao envelhecimento

por oxidação e maior proteção a base; (iii) redução da pós-compactação devido ao tráfego, evitando o surgimento da DP (*Asphalt Institute*, 1989).

A compactação está diretamente ligada a formação do esqueleto mineral e aos parâmetros volumétricos da mistura asfáltica. No esqueleto mineral, a compactação pode influenciar nas características da estrutura interna da mistura asfáltica, dentre as quais podemos citar (i) a quantidade de pontos de contato entre os agregados, (ii) o comprimento destes contatos, (iii) a orientação dos mesmos e (iv) a distribuição do Vv. Este parâmetro (Vv) está diretamente ligado a macrotextura de misturas asfálticas. O revestimento asfáltico com maior Vv tende a possuir uma maior espaçamento entre os agregados e, conseqüentemente, macrotextura superior.

Os métodos de compactação de misturas asfálticas mais utilizados em laboratório são: Compactador Marshall (CM), CGS e a Mesa Compactadora (MC). Em campo a compactação se dá, geralmente, em três fases: (i) durante o espalhamento da mistura asfáltica pela vibroacabadora devido a vibração da mesma, (ii) pela utilização de rolos pneumáticos e (iii) rolos tandem (Figura 6), sendo a potência de vibração da vibroacabadora, a energia de compactação (quantidade de passadas dos rolos) e a ordem de entradas dos rolos alguns dos fatores que influenciam o GC, a estrutura interna e as propriedades de textura da camada de revestimento do pavimento. No Brasil, normalmente, inicialmente usa-se o rolo pneumático dotado de um sistema que permite calibrar a pressão dos pneus. A pressão inicial dos pneus costuma ser 80psi chegando a 120psi no final da compactação. Após o uso do rolo pneumático, o rolo tandem passa a realizar a compactação, tendo este a função de acomodar melhor os agregados através do processo de vibração, além de retirar possíveis defeitos deixados pelos pneus do rolo pneumático.

Figura 6: (a) Vibroacabadora, (b) Rolos Pneumático e Tandem



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor (2016)

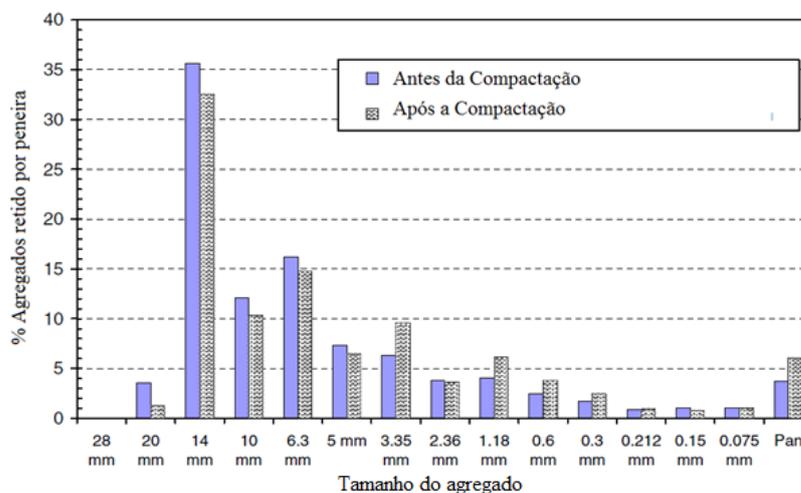
Estudos presentes na literatura tendem a investigar os impactos sofridos pelas misturas asfálticas de acordo o método de compactação, as condições de compactação e a estrutura interna das misturas asfálticas. Masad *et al.* (1999) avaliaram a estrutura interna de CP extraídos em campo e misturas asfálticas coletadas em campo e compactadas no CGS. Estes autores utilizaram tomografia computadorizada juntamente com o *software Image Tool* para a realização do estudo. As análises foram realizadas em Corpos de Provas (CP) obtidos com a energia de compactação variando de 8 a 174 giros. Estes autores analisaram a orientação dos agregados e o percentual e a distribuição do Vv nos CP. Para avaliar a orientação dos agregados foi utilizado o Vetor Magnitude (Δ). Este parâmetro utiliza a média das inclinações do maior eixo dos agregados com a horizontal. O Δ varia de 0 a 100%, sendo que quanto mais próximo de 100% for este valor mais alinhados entre si estão os agregados. Os citados autores verificaram que o Δ foi equivalente a 38% quando o número de giros foi igual a 100, com o aumento ou a diminuição do número de giros o Δ tende a diminuir. Quanto a distribuição do Vv, foi possível verificar que, para as energias de compactação adotadas, com exceção daquela equivalente a 8 giros, os CP tendem a ter maior Vv na região próximo as faces superior e inferior das amostras. Quanto aos CP extraídos em campo, o Vv chegou a cerca de 17% na face superior, enquanto que na face inferior o Vv ficou em torno de 2%.

Nascimento *et al.* (2006) investigaram a distribuição do Vv em amostras de misturas asfálticas. Estes autores escolheram uma mistura asfáltica utilizada em campo avaliada a partir da extração de seis CPs. Além disso, foram moldados outros seis CPs dessa mesma mistura asfáltica, tendo sido três compactados através do método Superpave e outros três

compactados através do método Marshall. Os CPs extraídos de campo apresentaram Vv de aproximadamente 14% na face inferior, sendo que, a medida que a altura do CP foi aumentada o Vv diminuiu, gerando Vv em torno de 10% na face superior. Quanto aos CPs compactados no CM, foi possível verificar que a distribuição do Vv se apresentou bastante assimétrica, com uma tendência a densificação superior na parte que fica exposta aos primeiros 75 golpes. A distribuição do Vv dos CP moldados no CGS apresentaram uma distribuição simétrica em relação a altura, tendo o Vv do centro do CP apresentando um valor constante em torno de 1%.

Airey *et al.* (2008) analisaram a degradação dos agregados constituintes de duas misturas asfálticas durante a compactação das mesmas em laboratório. O método de compactação adotado foi o Marshall que, por realizar a compactação através do impacto, causa maior degradação dos agregados. Os autores utilizaram dois parâmetros: (i) a diferença percentual de agregados retidos em cada peneira antes e após a compactação do CP e (ii) a diferença percentual de agregados retidos em cada peneira em relação ao total. Para uma das misturas asfálticas foram utilizadas duas energias de compactação, 50 e 100 golpes. Para a segunda mistura asfáltica os autores utilizaram apenas 100 golpes. Os autores concluíram que o aumento na energia de compactação não provocou aumento na degradação dos agregados. Além disso, foi possível observar que a mistura asfáltica com maior quantidade de agregados miúdos sofreu maior degradação, para algumas peneiras esta foi 100% superior. A Figura 7 apresenta o percentual de agregados retido por peneira antes e após a compactação.

Figura 7: Percentual de agregados retido por peneira antes e após a compactação



Fonte: Adaptado de Airey *et al.* (2008)

Dubois *et al.* (2010) avaliaram a distribuição do Vv para três misturas asfálticas. Estes autores utilizaram dois tipos de compactadores: CGS e CM, tendo utilizado oito moldes para o CGS e dois para a CM. Para analisar a homogeneidade do Vv foi utilizando o *Vertical Gamma-Densitometer Bench*. Estes autores concluíram que as bordas dos CP moldados através dos dois métodos eram heterogêneos com relação a distribuição do Vv no sentido diametral das amostras. Os autores ressaltaram ainda que, para obter amostras com Vv mais homogêneos, é necessário produzir CP maiores e posteriormente serrá-los para evitar os efeitos de borda.

Ribas (2016) avaliou o impacto do método de compactação em misturas asfálticas. Para tanto foram compactadas misturas asfálticas com diferentes ângulos de inclinação do eixo de rotação do equipamento CGS (0,75°; 1°; 1,25; 1,5° e 1,75°) tendo em vista que este é o parâmetro que mais influencia a organização do esqueleto mineral. Também foram analisadas misturas asfálticas produzidas no CM e na MC. Foram extraídos ainda CP compactados em campo por rolos pneumáticos e tandem. A análise, das diferentes formas de compactação, foi realizada por meio do Processamento Digital de Imagens com o uso do software (iPas2). O iPas2 permite avaliar através de imagens da estrutura interna de misturas asfálticas, a quantidade de agregados que apresentam contato entre si, os comprimentos destes contatos e a direção dos mesmos. O resultados mostraram que os agregados se mostraram dispostos aleatoriamente quanto a orientação no sentido horizontal para os quatro métodos de compactação avaliados. Além disso, foi possível perceber que as misturas asfálticas compactadas com o CM e o CGS apresentaram número de contato entre as partículas similares ao encontrado nas misturas de campo, enquanto a mistura asfáltica compactada na MC apresentou quantidade de contato entre as partículas aproximadamente 80% superior quanto comparado aos outros métodos de compactação.

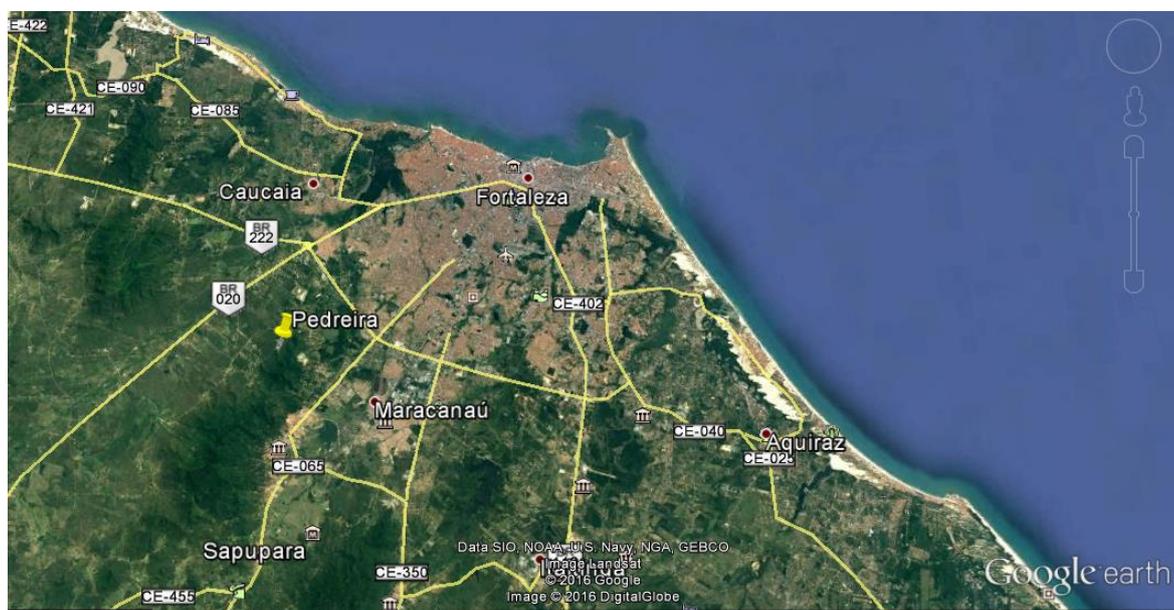
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais, os equipamentos e os métodos utilizados com o intuito de alcançar os objetivos propostos neste trabalho.

3.1. Materiais

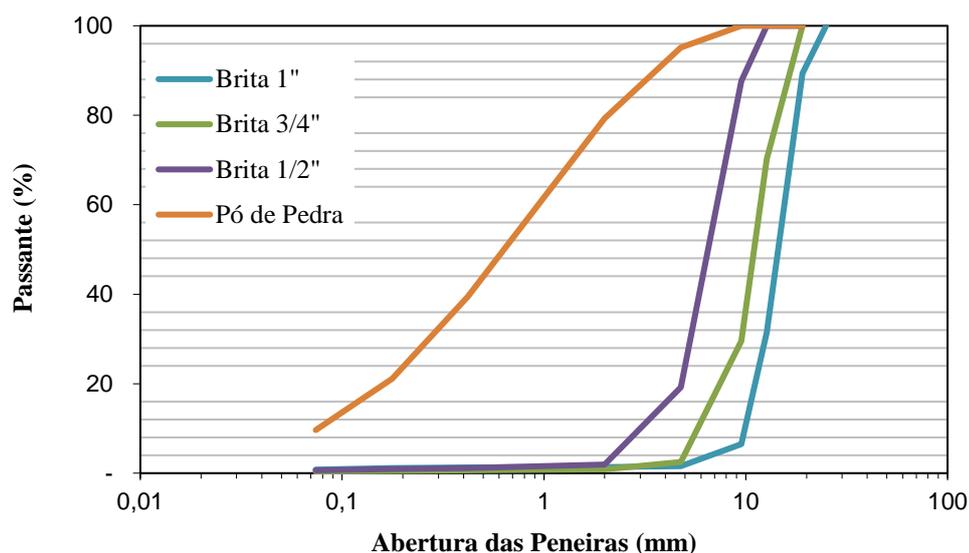
Na presente pesquisa, foi utilizado um CAP classificado por penetração como CAP 50/70, produzido na Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste – Lubnor (Petrobras), Ceará. Os agregados minerais utilizados são de origem granítica, coletados na pedra localizada em Maranguape/CE, conforme mostra a Figura 8. As frações utilizadas na composição das misturas asfálticas foram as britas de 1”, de 3/4”, de 1/2” como agregados graúdos e o pó de pedra como agregado miúdo. Os agregados foram submetidos aos diversos tipos de ensaio de caracterização segundo as normas do DNIT: granulometria (DNER-ME 83/98), abrasão Los Angeles (DNER-ME 35/98), densidade dos agregados miúdo e graúdo (DNER-ME 81/98 e DNER-ME 84/95, respectivamente), adesividade (DNER-ME 79/94) e equivalente de areia (DNER ME 054/97). A Figura 9 apresenta a granulometria dos agregados utilizados nas misturas asfálticas e a Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados nos agregados.

Figura 8: Localização da Pedreira



Fonte: Google Earth (2016)

Figura 9: Granulometria dos agregados utilizados na pesquisa



Fonte: Próprio autor (2016)

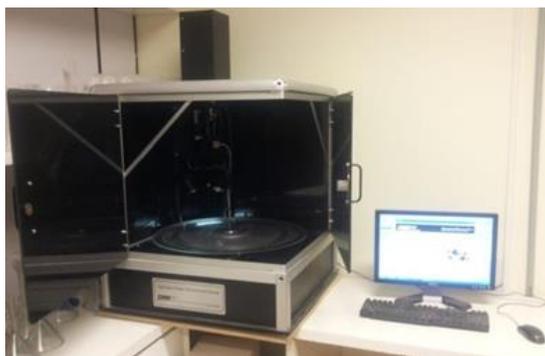
Tabela 4: Caracterização básica dos agregados utilizados neste estudo.

Propriedade	Brita			
	1"	3/4"	1/2"	Pó de Pedra
Abrasão Los Angeles (%)	40	39	37	
Adesividade	Insatisfatória			-
Densidade real	2,69	2,68	2,69	
Densidade aparente	2,63	2,61	2,62	2,67
Índice de Forma	0,87	0,89	0,87	
Equivalente de Areia (%)		-		73

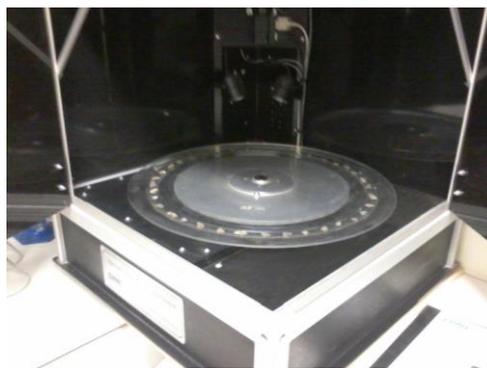
3.2. Análise das Propriedades de Forma dos Agregados

As análises das propriedades de forma dos agregados foram realizadas utilizando o AIMS através do PDI. A Figura 10 apresenta o equipamento.

Figura10: *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)*



(a) Visão Geral



(b) Visão Interna

Fonte: Próprio autor (2016)

Para as análises dos agregados realizadas no AIMS, o equipamento separa agregados graúdos e miúdos, sendo os agregados graúdos aquelas frações retidas na peneira de abertura 4,75mm, e os agregados miúdos as frações passantes na peneira de abertura 4,75mm. Para os agregados graúdos, o AIMS realiza a análise de parâmetros de forma tridimensional, de angularidade, de textura e de lamelaridade, sendo as partículas dispostas na bandeja indicada para cada tamanho: 25,4mm, 19,0mm, 12,5mm, 9,5mm ou 4,75mm. Ao iniciar o ensaio, a bandeja gira dentro do equipamento e a imagem de cada partícula é capturada. Em seguida, a bandeja gira novamente para que a altura de cada partícula seja obtida. Após a realização desses procedimentos, mais uma digitalização é realizada para que a textura de cada partícula seja adquirida.

Para os agregados miúdos, o AIMS analisa as frações 2,36mm, 1,18mm, 0,6mm, 0,3mm, 0,15mm e 0,075mm, fornecendo parâmetros de forma bidimensional e de angularidade. As partículas são colocadas na bandeja para os agregados de 19mm e, em seguida, o equipamento realiza uma única digitalização para obtenção dos parâmetros de forma bidimensional e de angularidade.

Os cinco parâmetros de propriedades de forma de agregados analisados pelo AIMS são expressos através de índices. O parâmetro de forma 2D, que varia de 0 a 20, quantifica a forma dos agregados miúdos. Partículas com valores próximos de 0 são circulares. Para os agregados graúdos, o parâmetro de esfericidade varia de 0 a 1 e retrata a tridimensionalidade de suas partículas, que possuem valores próximos de 1 quando possuem forma mais próxima de um cubo. Em termos de angularidade, aplicada tanto para agregados graúdos como para miúdos, os valores vão de 0 a 10.000. Quanto maior for o valor dessa propriedade, mais

angular será a partícula de agregado. A textura superficial é calculada para agregados graúdos e varia de 0 a 1.000. Um agregado totalmente polido apresenta, para esse parâmetro, valor igual a 0. O AIMS avalia ainda a lamelaridade através da proporção das dimensões das partículas. Os resultados dos parâmetros das propriedades de forma dos agregados estudados permitiram a classificação dos materiais, de acordo com a Tabela 5, contudo, por ser uma classificação baseada em agregados americanos, talvez a classificação não seja adequada para o cenário brasileiro. Atualmente, vem sendo desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC um trabalho cujo o objetivo é criar uma classificação mais adequada aos agregados brasileiros.

Tabela 5: Classificação das propriedades de forma dos agregados.

Propriedade	Valores/Classificação				
Forma 2D (miúdo)	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	
Esfericidade (graúdo)	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado/Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
Angularidade (graúdo e miúdo)	< 2.100	2.100 – 4.000	4.000 – 5.400	> 5.400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Textura Superficial (graúdo)	< 165	165 – 275	275 – 350	350 – 460	> 460
	Polido	Liso	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

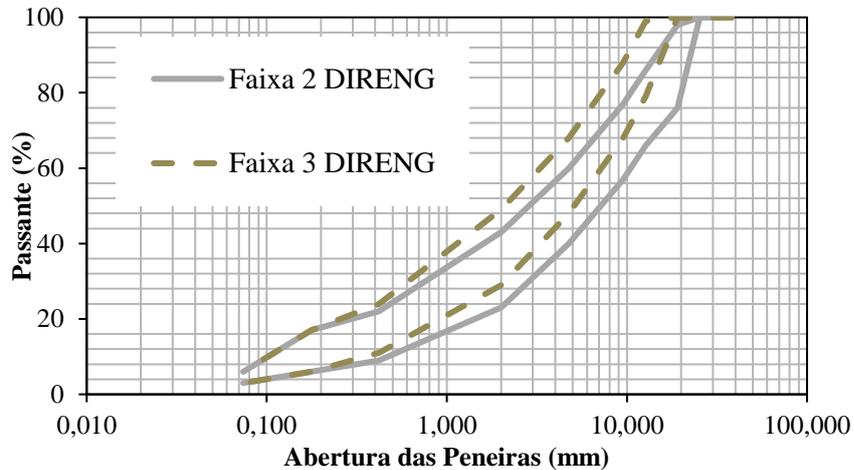
Fonte: Adaptado de Al Rousan (2004)

3.3. Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa foram dosadas seguindo a metodologia Marshall e os parâmetros adotados pela Especificação Geral DIRENG 04.05.610 - CBUQ. Para o presente estudo, foram avaliadas duas misturas asfálticas utilizadas em revestimentos aeroportuários, contudo foram variadas as faixas granulométricas, as formas de compactação e o GC: (i) Concreto Asfáltico (CA) enquadrado na faixa 2 da DIRENG (CA1), (ii) Concreto Asfáltico (CA) enquadrado na faixa 3 da DIRENG (CA2). A mistura asfáltica CA1 foi executada em campo e em laboratório, enquanto a CA2 foi executada apenas em campo. A Figura 11 mostra as faixas granulométricas utilizadas neste estudo. A Tabela 6 apresenta os

parâmetros exigidos para misturas asfálticas enquadradas nas duas faixas granulométricas avaliadas neste estudo. A Figura 12 apresenta um fluxograma das misturas asfálticas avaliadas, assim como os ensaios realizados em cada mistura, na matriz experimental da presente pesquisa, assim como os ensaios de textura e atrito aos quais foram submetidas cada mistura.

Figura 11: Faixas granulométricas das misturas asfálticas avaliadas neste estudo

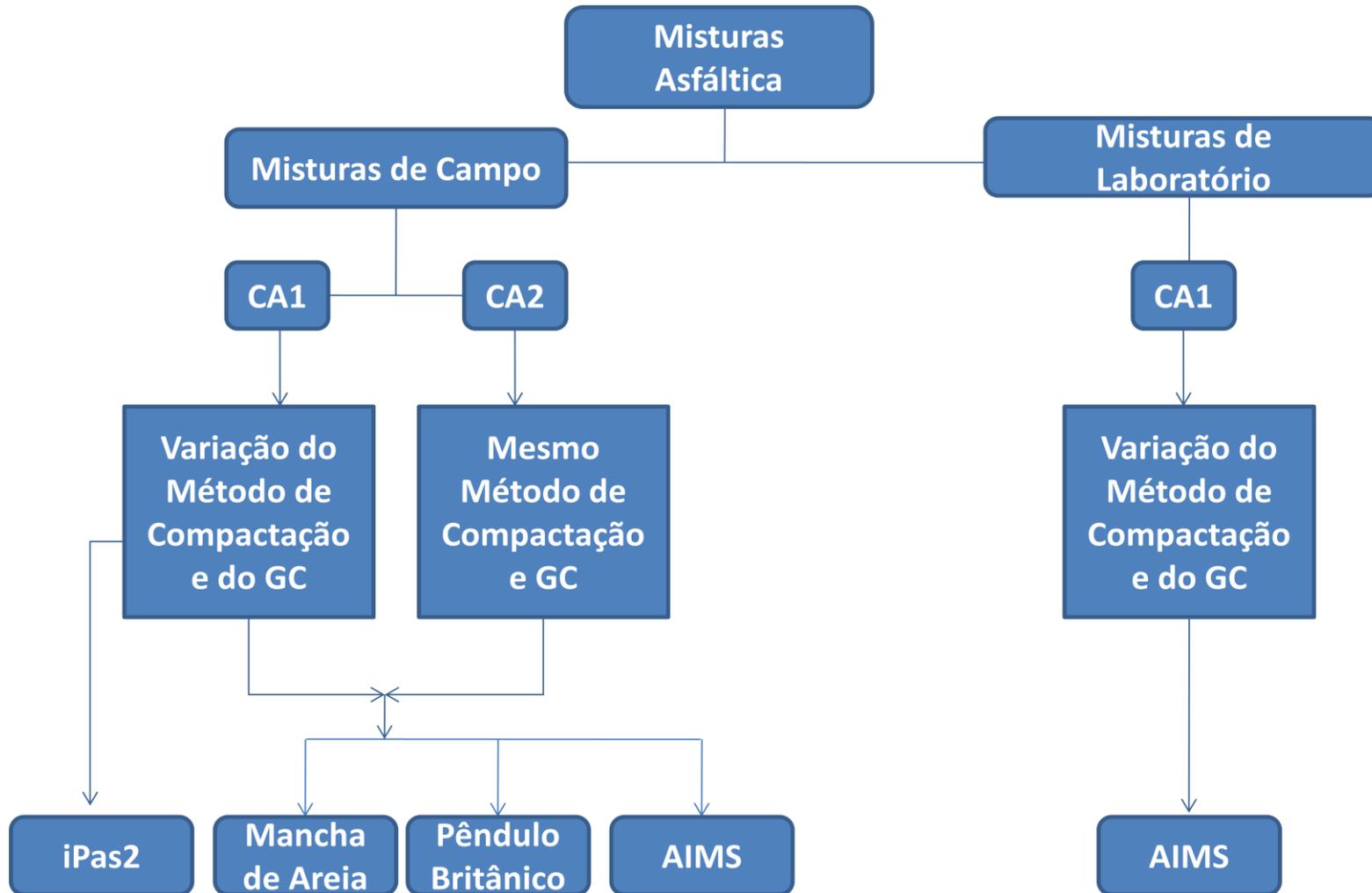


Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 6: Parâmetros da Especificação Geral DIRENG 04.05.610 - CBUQ

Parâmetro/Faixa	Faixa 2	Faixa 3
Teor de CAP (%)	4,5 - 7,0	5,0 - 7,5
Espessura Mínima (cm)	4,0	3,0
Estabilidade (N)	9.500 - 16.000	
Fluência Máxima (0,25mm)	10 - 14	
Volume de vazios (%)	2,8 - 4,2	
Relação Betume-Vazios (%)	70 - 80	

Figura 12: Fluxograma de ensaios das misturas asfálticas avaliadas.

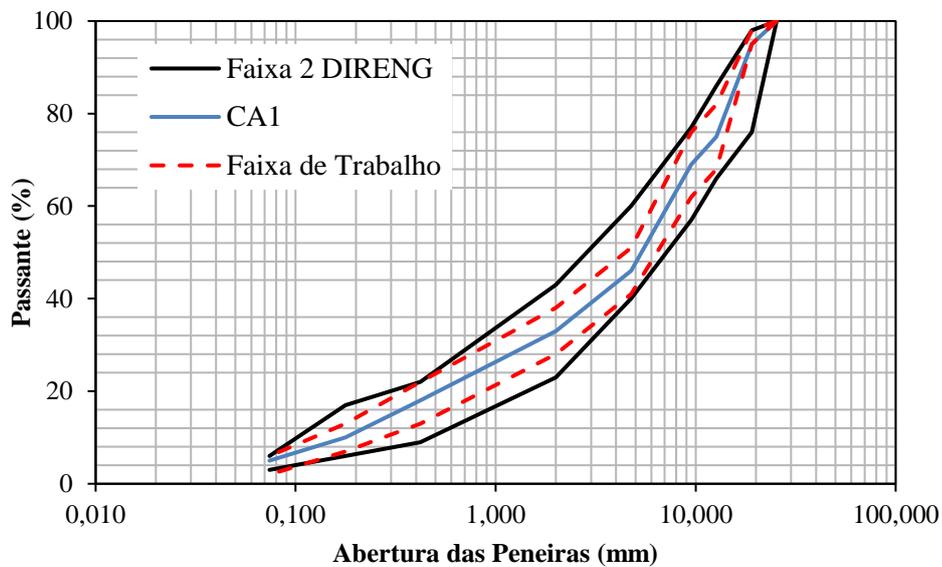


Fonte:Próprio autor (2016)

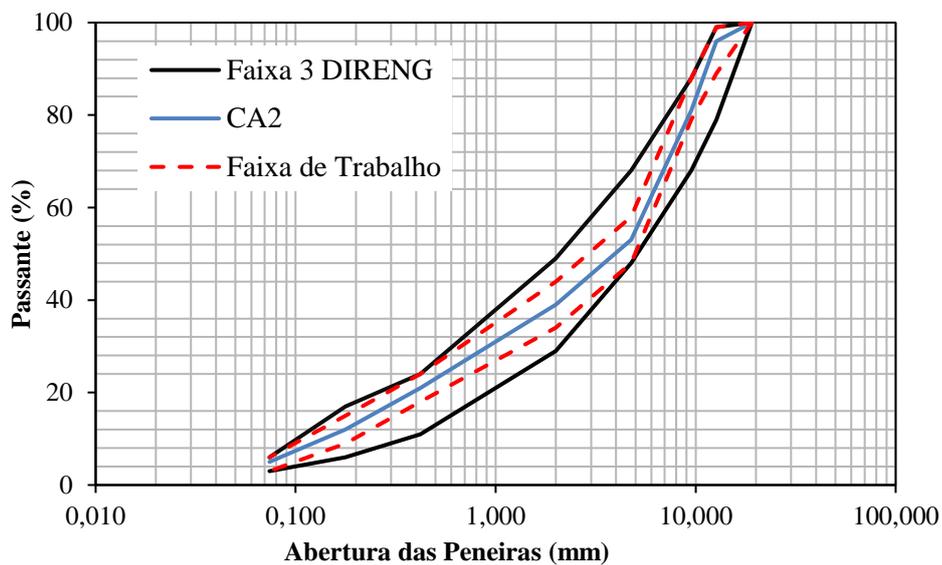
As curvas granulométricas utilizadas foram obtidas com o intuito de manter uma curva granulométrica média entre os limites superiores e inferiores garantindo assim uma faixa de trabalho mais ampla. De acordo com Hall *et al.* (2009), a porcentagem de material passante na peneira de 3/8" e retido na peneira de abertura de 2,36mm influencia na macrotextura de uma mistura asfáltica. O aumento na quantidade de material retido entre essas peneiras reduz a macrotextura da mistura asfáltica. A curva granulométrica do CA1 apresentou 33% de material retido entre estas duas citadas peneiras, enquanto o CA2 apresentou 43% desta fração.

Para a realização da dosagem das misturas asfálticas, foi adotada a metodologia Marshall, visto que as misturas asfálticas foram aplicadas em situação real de campo, sendo esta metodologia a que atende as normas brasileiras. Para realizar a mistura, o CAP foi aquecido a 150°C, temperatura a qual a usina foi calibrada para realizar o bombeamento do ligante, e os agregados a 165°C e, em seguida, os materiais foram misturados. Após a mistura dos materiais, a mistura asfáltica foi compactada através do CM com 75 golpes por face. A Figura 13 e a Tabela 7 mostram, respectivamente, as curvas granulométricas para as duas misturas asfálticas avaliadas e os parâmetros de dosagem obtidos para as três misturas avaliadas.

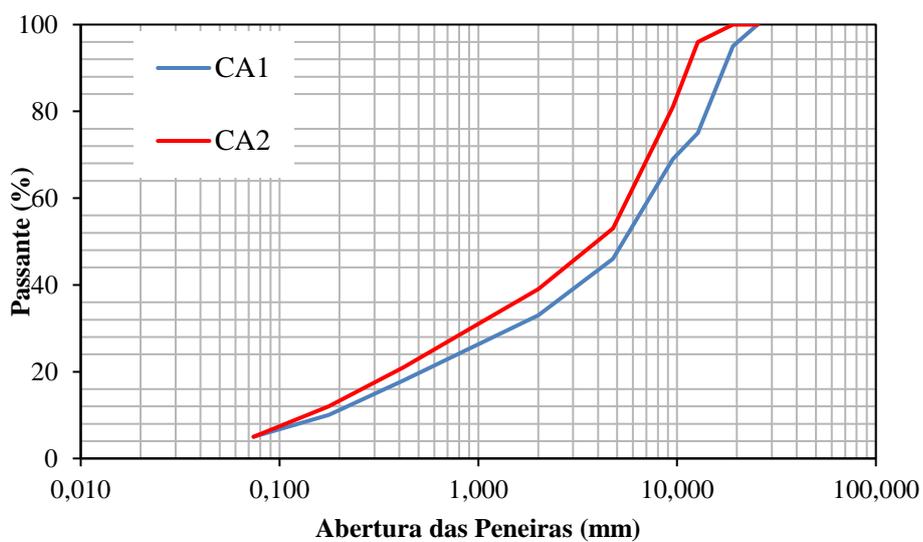
Figura 13: Curvas granulométricas das duas misturas asfálticas avaliadas: (a) Faixa 2 DIRENG, (b) Faixa 3 DIRENG, (c) Curvas das Misturas CA1 e CA2.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 7: Parâmetros de dosagem das Misturas Asfálticas I e II.

Mistura Asfáltica	Teor de CAP (%)	Vv (%)	RBV (%)	Estabilidade (N)
CA1	4,7	3,6	75,4	13.456
CA2	5,5	3,8	77,3	13.025

3.4. Compactação das Misturas Asfálticas

A pista de teste compreende um trecho de 20 × 40m e foi construída em setembro 2012. As camadas granulares foram compostas da seguinte maneira: (i) regularização do subleito, (ii) sub-base e (iii) base. A Tabela 8 mostra a composição e o CBR das camadas granulares. Para execução dos revestimentos asfálticos com as misturas avaliadas neste trabalho foi necessário realizar a fresagem do revestimento existente para em seguida aplicar os novos revestimentos.

Tabela 8: Composição das camadas granulares utilizadas no trecho experimental

Camada	Composição	CBR (%)	Espessura (cm)
Base	Solo-brita (50-50)	152	15
Sub-base	Solo	47	15
Regularização do Subleito	Solo Natural	6	15

As misturas asfálticas utilizadas em campo foram usinadas em uma usina de produção contínua ou *drum-mixer*, com tambor secador contra-fluxo e capacidade de produção nominal de 80t/h de massa asfáltica. O procedimento de usinagem foi o mesmo para as duas misturas avaliadas, sendo a temperatura do CAP 150°C durante a usinagem e a mistura final atingido 170°C devido a maior temperatura imposta aos agregados durante a usinagem. A Figura 14 mostra a usina utilizada para a produção da massa.

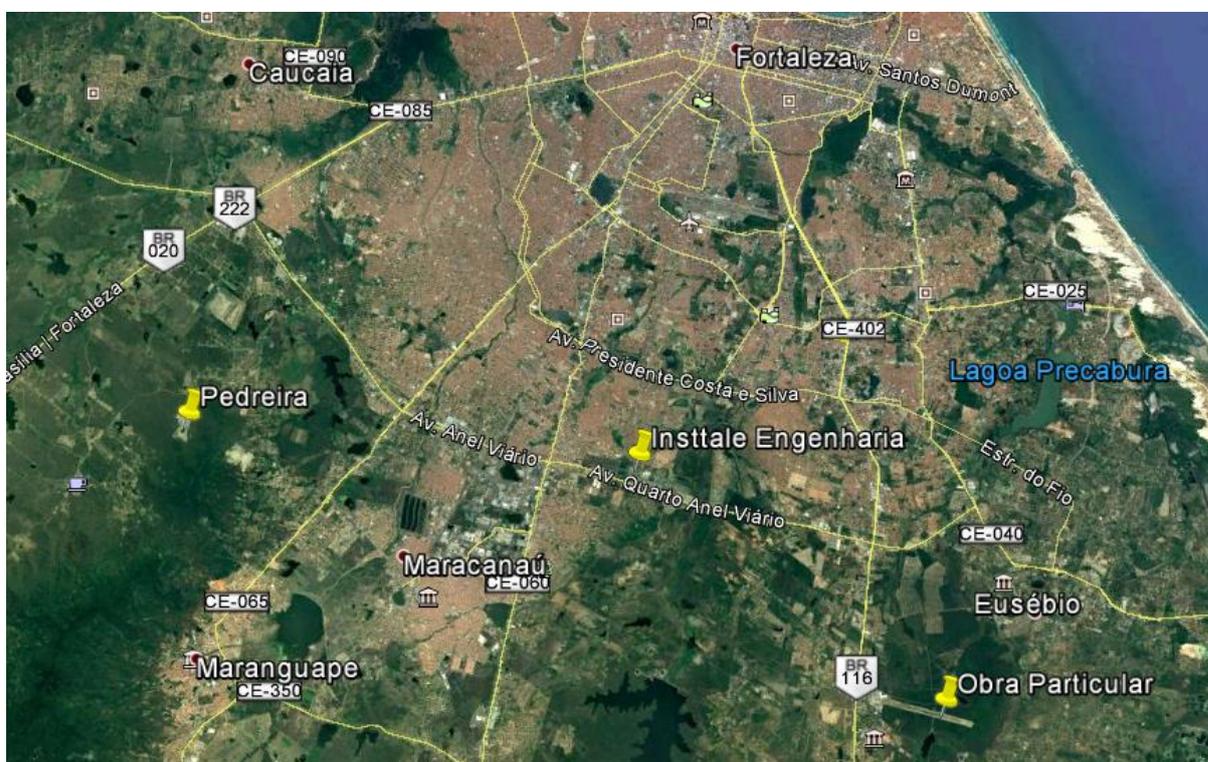
Figura 14: Usina asfáltica de produção contínua



Fonte: Próprio autor (2016)

As misturas foram executadas em duas etapas, o CA2 foi executado em setembro de 2015 em uma obra de um aeródromo particular localizada na cidade do Eusébio e o CA1 em outubro de 2016 no pátio da Insttale Engenharia Ltda. A Figura 15 mostra a localização de aplicação do CA1 e do CA2.

Figura 15: Localização das misturas asfálticas aplicadas em campo



Fonte: Google Earth (2016)

Durante a compactação, a temperatura da massa asfáltica era de 160°C. A compactação foi realizada com a vibroacabadora e os rolos de pneus e tandem. A vibroacabadora utilizada foi a de modelo Leeboy 8510. A mesma é dotada de resistência elétrica na mesa que fica posicionada para realizar o aquecimento da mesa, equipamento responsável por realizar o corte na espessura desejada. A mesa realiza a vibração iniciando a compactação da mistura asfáltica. Os rolos de compactação utilizados foram um de pneus modelo Dynapac CP221 e um rolo duplo tandem modelo Hamm HD75. A Figura 16 mostra os equipamentos utilizados nos trechos experimentais executados na Insttale Engenharia Ltda. e na obra de um aeródromo particular.

Figura 16: Execução dos trechos experimentais da Insttale Engenharia Ltda, utilizando (a) compactação com a vibroacabadora, o rolo de pneus e (b) o rolo duplo tandem.



Fonte: Próprio autor (2016)

A mistura CA1 foi executada em oito partes de aproximadamente $20,0 \times 3,0 \times 0,05$ m disposta de acordo com a Figura 17. A mistura CA2 foi executada em trecho de $520,0 \times 32,0 \times 0,05$ m. Em todos os trechos a passagem dos rolos foi monitorada tendo sido extraído CP para verificação do GC, com exceção do trecho VIII que, devido ao baixo GC, não foi possível realizar a extração sem quebrar o CP. As passadas dos rolos e os GC de cada trecho estão descritos na Tabela 9. O intuito do uso dos diferentes procedimentos de compactação é gerar misturas asfálticas com a mesma granulometria mas com diferentes GC, verificando a influência de cada processo na textura das misturas asfálticas avaliadas. A quantidade de passadas foi determinada de acordo com a experiência do engenheiro responsável pela obra e dos operadores, sendo que esse número pode variar bastante dependendo da temperatura, do tipo de mistura asfáltica, dos tipos de rolos utilizados e, até mesmo, da velocidade de operação dos rolos.

Figura 17: Disposição dos revestimentos asfálticos de campo



(a) Trechos CA1



(b) Trecho CA2

Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 9: Quantidade de passadas de rolos por trecho

Mistura Asfáltica	Localização	Trecho	Número de Passadas		GC(%)
			Rolo de Pneus	Rolo Tandem	
CA1	Insttale	I	8	4	97,3
		II	8	-	96,1
		III	4	2	95,1
		IV	4	-	96,0
		V	-	4	95,0
		VI	-	2	92,4
		VII	-	2*	90,0
		VIII	-	1*	-
CA2	Eusébio	-	8	4	96,8

* Sem vibração do rolo tandem durante as passadas

A mistura CA1 foi coletada após a usinagem e levada para laboratório para que fossem moldados CP com o uso do CM e do CGS. No laboratório foram produzidas CP da mistura CA1 com GC próximos a 94,0% e a 97,0%. Para atingir estes GC, a mistura asfáltica foi compactada através do CM, a 160°C, com 15 e 30 golpes por face. Para o CGS, a temperatura de compactação adotada também foi de 160°C, e os números de giros adotados foram de 10 e 30.

3.5. Ensaios Convencionais para a Determinação da Textura de Misturas Asfálticas

A caracterização básica de textura de misturas asfálticas, utilizada nesta pesquisa, compreendeu a realização dos seguintes ensaios:

- Mancha de Areia (ASTM E965-01);
- Pêndulo Britânico (ASTM E 303-98).

3.5.1. Ensaio de Mancha de Areia

O ensaio de Mancha de Areia é bastante utilizado para obter a macrotextura do revestimento. Descrito pela norma ASTM E965 (2001), o ensaio determina a média de profundidade da altura da mancha de areia na camada de revestimento asfáltico do pavimento.

Para a realização do ensaio de mancha de areia, inicialmente a superfície do revestimento precisa estar seca e ser limpa com o auxílio de um escovão. Em seguida, os vazios da textura superficial do pavimento são preenchidos com um volume conhecido de $2.500\text{mm}^3 \pm 150\text{mm}^3$ de areia seca e limpa, composta por grãos arredondados que passam na

peneira de abertura de 0,3mm e ficam retidos na peneira de abertura de 0,15mm. A areia é espalhada suavemente sobre a superfície do revestimento com a utilização de um disco através de movimentos circulares. Assim, a superfície do revestimento asfáltico passa a ter uma área circular preenchida por uma areia de volume conhecido. Com o volume de areia conhecido, mede-se o diâmetro da mancha. Através da Equação 7, calcula-se a altura média (H_m) da mancha de areia. A macrotextura das misturas asfálticas é classificada através do valor de H_m , de acordo com a Tabela 10. A Figura 18 apresenta a sequência de realização do ensaio de mancha de areia.

$$H_m = \frac{V \cdot 4}{D^2 \cdot \pi} \quad (7)$$

Onde:

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

$D =$ Diâmetro médio da mancha de areia.

Tabela 10: Classificação da macrotextura de misturas asfálticas de acordo com o resultado do ensaio de mancha de areia (Aps, 2006).

Profundidade Média	Textura Superficial
$H_m < 0,20 \text{ mm}$	Muito Fina
$0,20 \text{ mm} < H_m < 0,40 \text{ mm}$	Fina
$0,40 \text{ mm} < H_m < 0,60 \text{ mm}$	Medianamente Fina
$0,60 \text{ mm} < H_m < 0,80 \text{ mm}$	Média
$0,80 \text{ mm} < H_m < 1,00 \text{ mm}$	Medianamente Grossa
$1,00 \text{ mm} < H_m < 1,20 \text{ mm}$	Grossa
$H_m > 1,20 \text{ mm}$	Muito Grossa

Figura 18: Sequência de realização do ensaio de mancha de areia



(a) Aparelhagem utilizada



(b) Limpeza da superfície



(c) Formação da circunferência



(d) Medição do diâmetro

Fonte: Próprio autor (2016)

3.5.2. Ensaio de Pêndulo Britânico

O ensaio de pêndulo britânico é descrito pela norma ASTM E 303 (1998). O ensaio é utilizado para avaliar parâmetros de resistência à derrapagem e consiste em um pêndulo padronizado com base de borracha que é lançado de uma altura específica sobre o revestimento molhado. A borracha desliza sobre o revestimento e volta a subir até uma nova altura inferior a altura inicial. O resultado é expresso através do BPN. A Figura 19 mostra o pêndulo britânico. As misturas asfálticas podem ser classificadas quanto à resistência a derrapagem através dos valores do BPN. A Tabela 11 apresenta a classificação da microtextura de acordo com os resultados desse ensaio (Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2006).

Figura 19: Pêndulo Britânico



Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 11: Classificação da microtextura de misturas asfálticas de acordo com o ensaio de pêndulo britânico (Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, 2006).

Resistência a Derrapagem	Classes
$BPN < 25$	Perigosa
$25 < BPN < 31$	Muito Lisa
$32 < BPN < 39$	Lisa
$40 < BPN < 46$	Insuficientemente Rugosa
$47 < BPN < 54$	Medianamente Rugosa
$55 < BPN < 75$	Rugosa
$BPN > 75$	Muito Rugosa

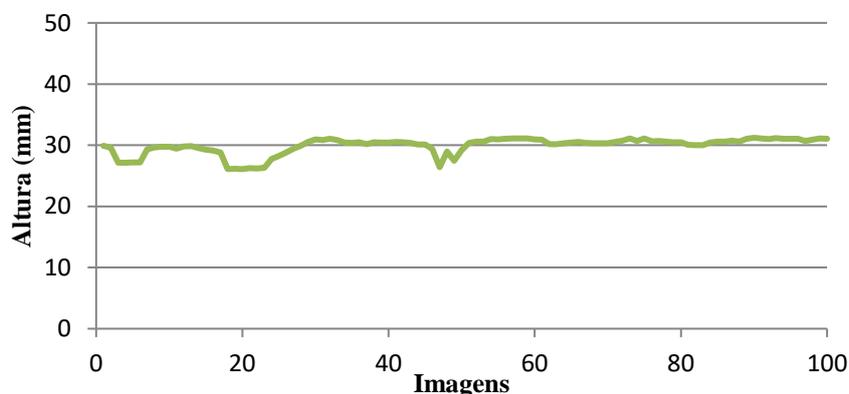
3.6. Ensaio para Determinação de Textura de Misturas Asfálticas Utilizando o PDI

O AIMS realiza a análise da macrotextura de misturas asfálticas através de várias leituras de distâncias entre a câmera e a amostra, que nesse caso é um CP de mistura asfáltica moldado em laboratório ou extraído de campo. Além disso, o AIMS realiza a análise da microtextura do CP através da análise dos *pixels* de imagens capturadas do CP. Para isso, o equipamento faz cinco varreduras de imagens para cada CP, onde, em cada varredura, o AIMS captura imagens em diferentes magnitudes de *zoom*.

A primeira varredura de imagens que o AIMS realiza é com a utilização do *zoom* máximo. Nesta varredura, o equipamento executa a análise de macrotextura. Com o CP

localizado a esquerda do microscópio do equipamento, a bandeja rotaciona lentamente, e várias medidas de altura são realizadas ao longo do eixo analisado. Para medir as várias alturas, o AIMS realiza, inicialmente, a medida de altura do primeiro foco do microscópio sobre a bandeja iluminada, sendo esta a altura zero ou de referência do eixo vertical. Em seguida, para capturar as demais imagens, o microscópio é elevado até receber um sinal de alta frequência indicando que uma imagem de alta resolução em escala de cinza foi detectada. As diferenças de altura entre a localização do microscópio na altura zero e as alturas das demais imagens do CP fornecem um perfil de profundidade da superfície da mistura asfáltica (REZAEI *et al.*, 2011). A Figura 20 mostra um gráfico contendo um exemplo de perfil da superfície de uma mistura asfáltica moldada em laboratório.

Figura 20: Perfil de superfície de um CP fornecida pelo AIMS



Fonte: Próprio autor (2016)

Nas três varreduras seguintes, o AIMS utiliza os mesmos *zooms* usados para avaliar a textura superficial dos agregados retidos nas peneiras de abertura 4,75mm, 9,5mm e 19mm. Cada *zoom* utilizado captura uma imagem com um campo cada vez maior, conseqüentemente, menos imagens são adquiridas para cada varredura no eixo do CP analisado. A última varredura é realizada com o menor *zoom*, fornecendo apenas três imagens em escala maior quando comparada as varreduras realizadas com o uso de outros *zooms*. Para avaliar a microtextura do CP, o AIMS utiliza a mesma metodologia usada para obter a textura superficial dos agregados. De acordo com Masad (2004), a textura superficial dos agregados é analisada através do método das *wavelets*, que utiliza a média e o desvio padrão dos valores

de *pixels* das imagens analisadas para fornecer o parâmetro de textura. A microtextura do eixo do CP analisado é dada pela Equação 8.

$$\text{Textura Superficial} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2 \quad (8)$$

Onde:

D = função de decomposição;

n = nível de decomposição da imagem;

N = número total de coeficientes em uma imagem detalhada;

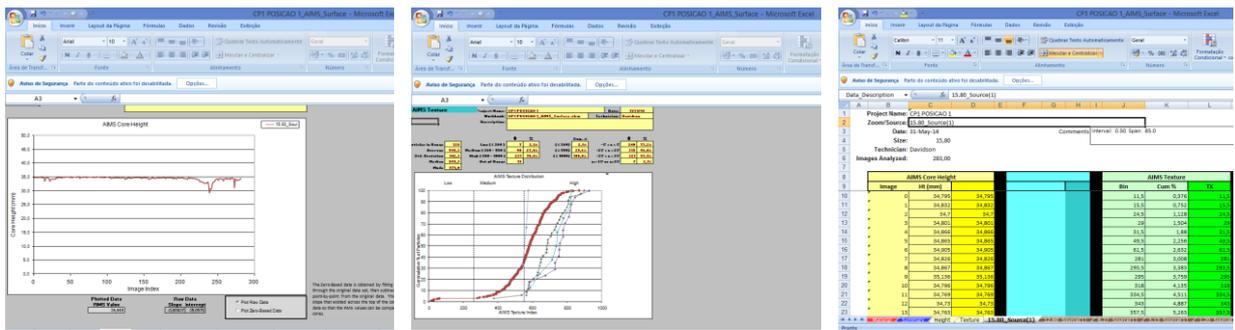
i = direção da textura;

j = índice *wavelet*;

x,y = localização dos coeficientes no domínio transformado.

Após a realização das cinco varreduras, o AIMS apresenta todos os resultados em uma planilha do MS Excel. A Figura 21 mostra um exemplo de planilha de resultados. Neste trabalho, os CPs analisados pelo AIMS foram obtidos através da extração de CP dos oito trechos com revestimento composto pela mistura CA1 e do trecho com o revestimento composto pela mistura asfáltica CA2. Para cada trecho contendo o CA1 foi extraído um CP, enquanto para o trecho revestido com o CA2 foram extraídos três CPs. Além da análise dos CPs extraídos em campo, foram analisados ainda quatro CPs da mistura CA1 obtidos em laboratório, com GC variáveis, sendo dois CPs compactados através do CM e dois compactados através do CGS, totalizando assim quinze CPs analisados através do PDI. A Figura 22 apresenta os CPs avaliados nos AIMS. Cada CP foi serrado, pois o equipamento não consegue realizar medições de altura acima de 40mm, tendo sido analisado apenas os topos de cada CP. Os CPs foram avaliados em quatro eixos diferentes, dispostos a 45° um do outro, como mostra a Figura 23.

Figura 21: Planilhas de resultados de macrotextura e microtextura obtidos através do AIMS



(a) Planilha de macrotextura (b) Planilha de microtextura (c) Valores obtidos na primeira varredura

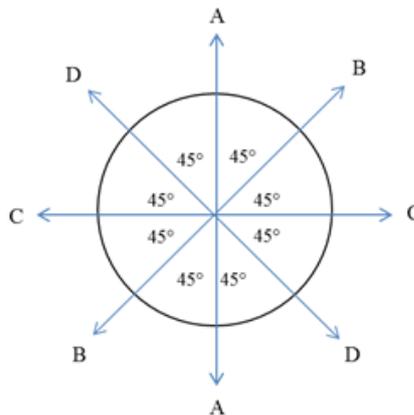
Fonte: Próprio autor (2016)

Figura 22: CPs avaliados no AIMS



Fonte: Próprio autor (2016)

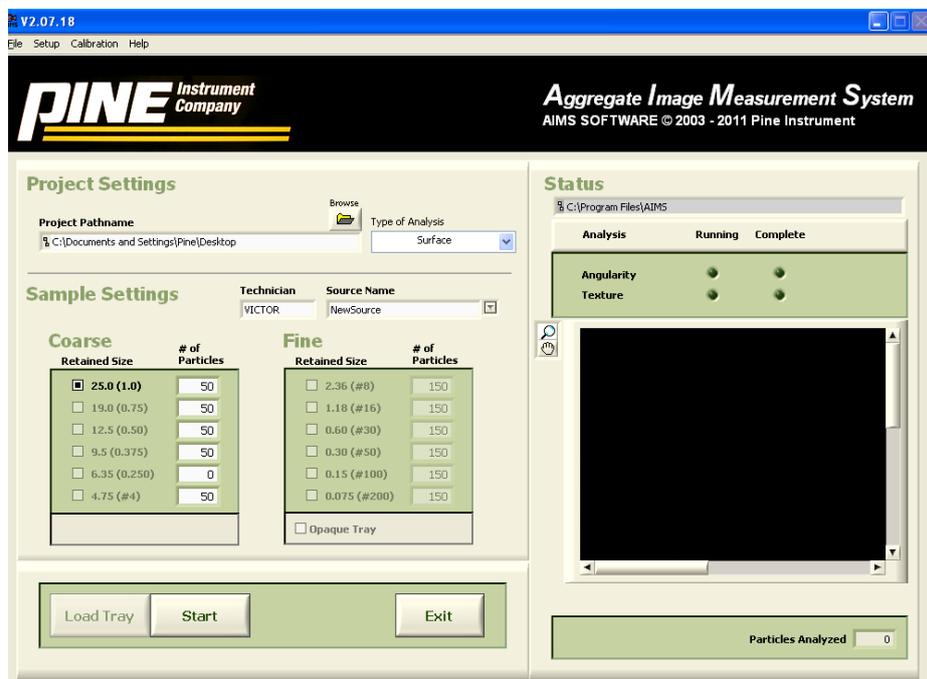
Figura 23: Eixos dos CP analisados no AIMS quanto a macrotextura e a microtextura



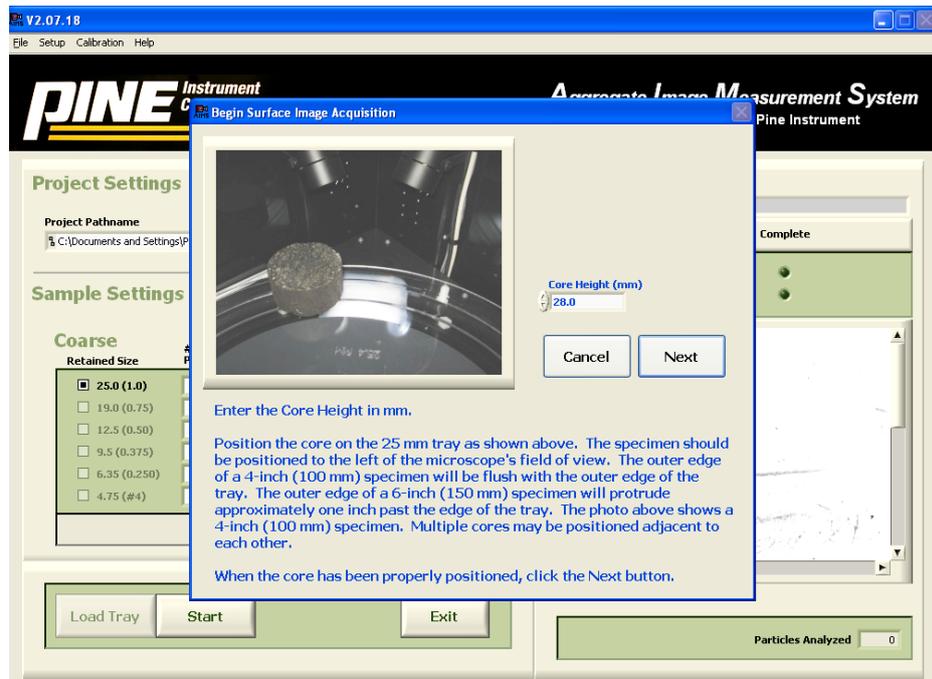
Fonte: Próprio autor (2016)

A análise de macrotextura realizada no AIMS permite variar a distância entre cada medição de altura e o comprimento que será analisado pelo equipamento. Esses parâmetros definem a quantidade de alturas medidas e, conseqüentemente, a quantidade de imagens adquiridas e o tempo de execução do ensaio. Neste trabalho, optou-se por utilizar as distâncias de 0,30, 0,45 e 0,60mm entre cada leitura realizada pelo equipamento, para as misturas de campo, com o intuito de avaliar o impacto deste parâmetro nas análises de macrotextura do AIMS. Para as misturas de laboratório, a análise foi realizada utilizando apenas a distância de 0,30mm. Além disso, para todos os CPs avaliados, o comprimento analisado em cada eixo foi de 8,5cm, pois caso seja avaliado um diâmetro maior é possível que o equipamento realize medições de macrotextura e microtextura fora do CP. O tempo de análise requerido pelo AIMS, para cada eixo de um CP e cada distância adotada, foi de 45 minutos, totalizando cerca de nove horas de ensaio por CP. A Figura 24 apresenta a interface do *software* para as análises de textura no AIMS.

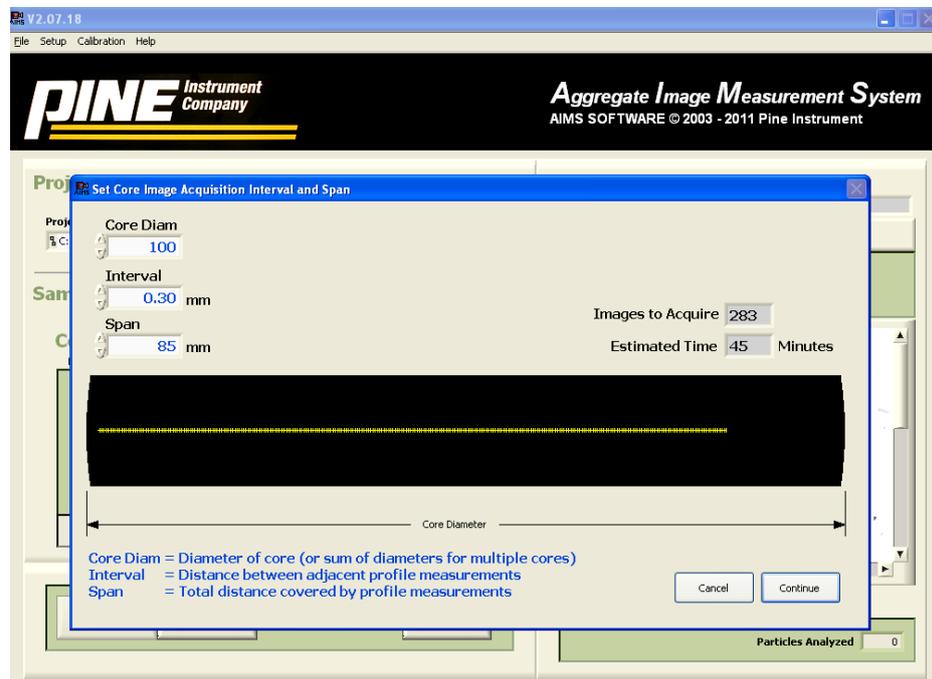
Figura 24: Interface do *software* para as análises de textura no AIMS



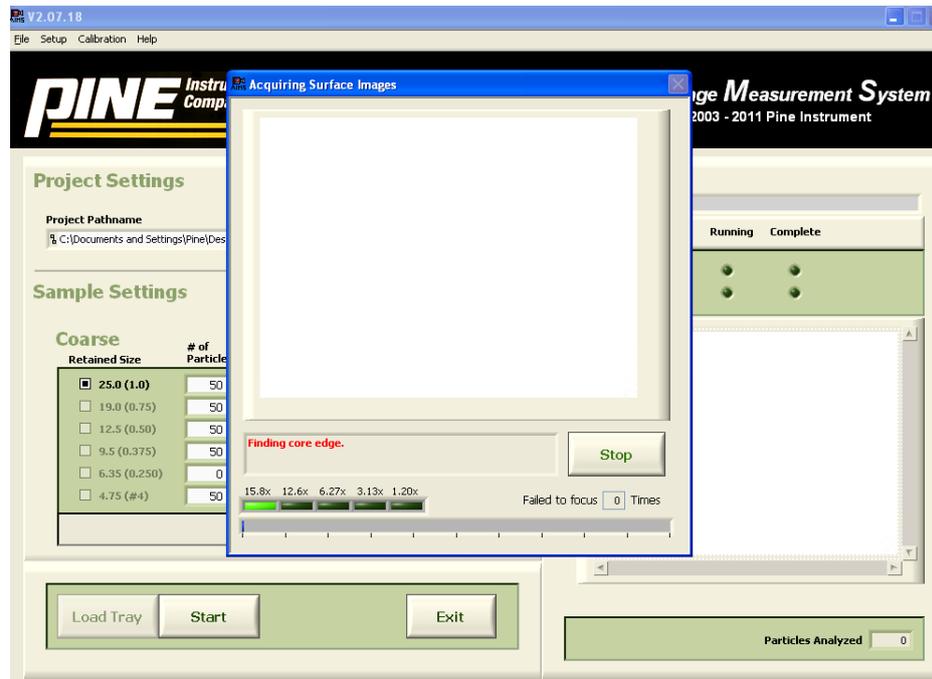
(a) Tela inicial do AIMS



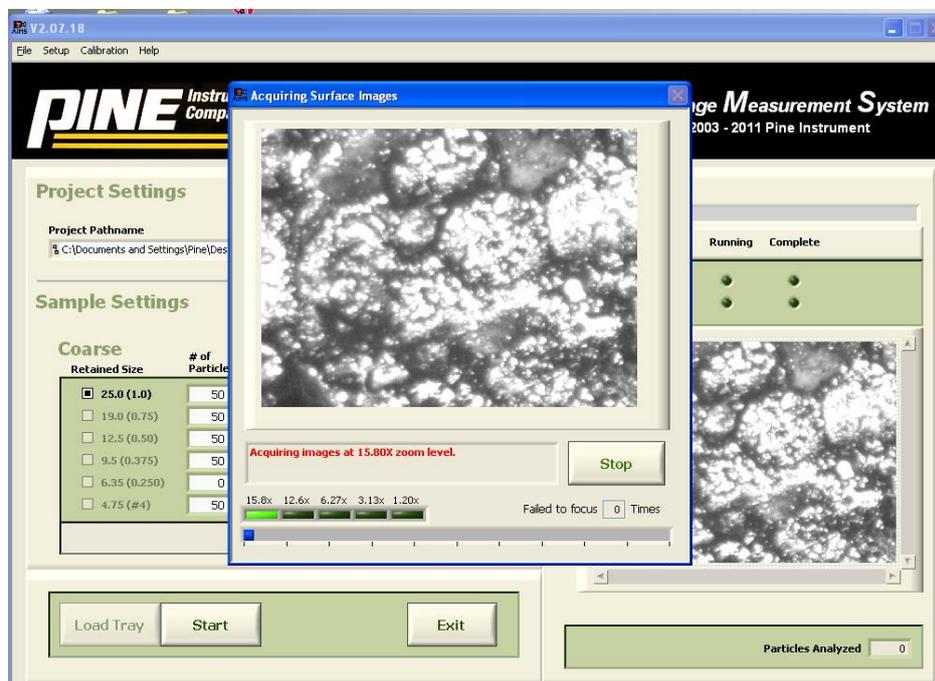
(b) Fornecimento da altura do CP



(c) Determinação dos parâmetros de análise



(d) Início do ensaio



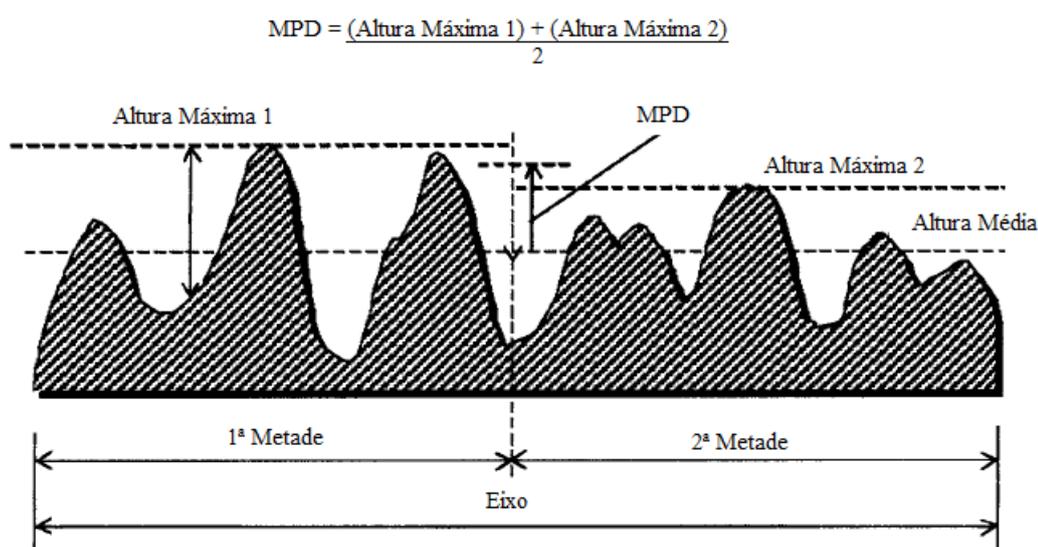
(e) Imagem capturada

Fonte: Próprio autor (2016)

3.7. Avaliação dos Resultados de Macrotextura Obtidos Através do AIMS

Os resultados de macrotextura para as misturas asfálticas obtidos através do uso do AIMS precisam ser tratados para que seja possível obter os parâmetros desejados. De acordo com o ASTM E 1845 (2009), o ensaio de mancha de areia gera o parâmetro *Mean Texture Depth* (MTD). Este parâmetro fornece a profundidade média da macrotextura do revestimento, sendo caracterizado por uma medida volumétrica. Contudo, o parâmetro que pode ser obtido através da análise do AIMS é o *Mean Profile Depth* (MPD). Para calcular o MPD, encontra-se a média das alturas máximas para a metade de cada eixo analisado para a mistura asfáltica, através de uma análise bidimensional realizada em cada eixo do CP. A Figura 25 mostra um esquema de como é calculado o MPD.

Figura 25: Esquema de cálculo do *Mean Profile Depth*



Fonte: adaptado da ASTM E 1845 (2009)

Para cada eixo analisado, foi plotado um gráfico e determinada uma linha de tendência através de regressão linear. O intuito dessa regressão é eliminar erros nas leituras das alturas de cada ponto devido a qualquer inclinação do CP analisado. A partir desta regressão linear, é possível encontrar a altura de qualquer ponto analisado em relação ao nível do CP, o que permite o cálculo do MPD.

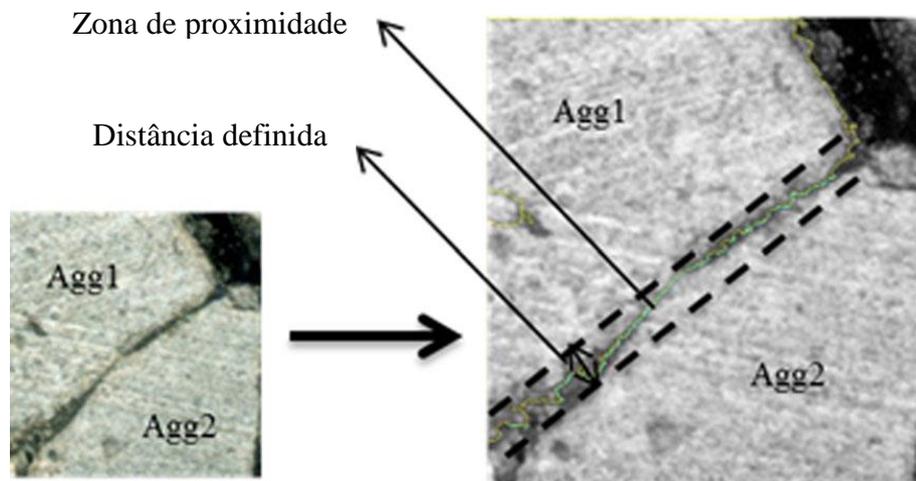
Neste trabalho, o MPD foi calculado quatro vezes para cada CP analisado, sendo o MPD do CP a média dos quatro valores encontrados, sendo o valor do MPD o utilizado para comparar o resultados de análise de macrotextura do AIMS com os resultados obtidos através do ensaio de mancha de areia (HS). De acordo com a ASTM E 1845 (2009), a partir do MPD é possível obter uma estimativa do MTD (Equação 9), onde o valor do intercepto (0,2) é devido a limitação dos perfilômetros normalmente utilizados, que possuem um precisão mínima de 0,2mm.

$$MTD_{est} = 0,2 + 0,8 MPD \quad (9)$$

3.8. Avaliação da Estrutura Interna das Misturas Asfálticas

A avaliação da estrutura interna das misturas asfálticas foi realizada através do PDI utilizando o software iPas2. O iPas2 é um *software* que permite obter parâmetros como (i) número de pontos de contato entre agregados, (ii) comprimento dos contatos e (iii) orientação dos agregados de misturas asfálticas através de análise de imagens em 2D. O número de pontos de contatos entre os agregados é contabilizado pelo iPas2 quando, em uma zona de proximidade, obtida através de uma distância determinada pelo operador, é possível verificar *pixels*, menor unidade de uma imagem digital, de dois agregados diferentes. A Figura 26 mostra um exemplo de zona de proximidade.

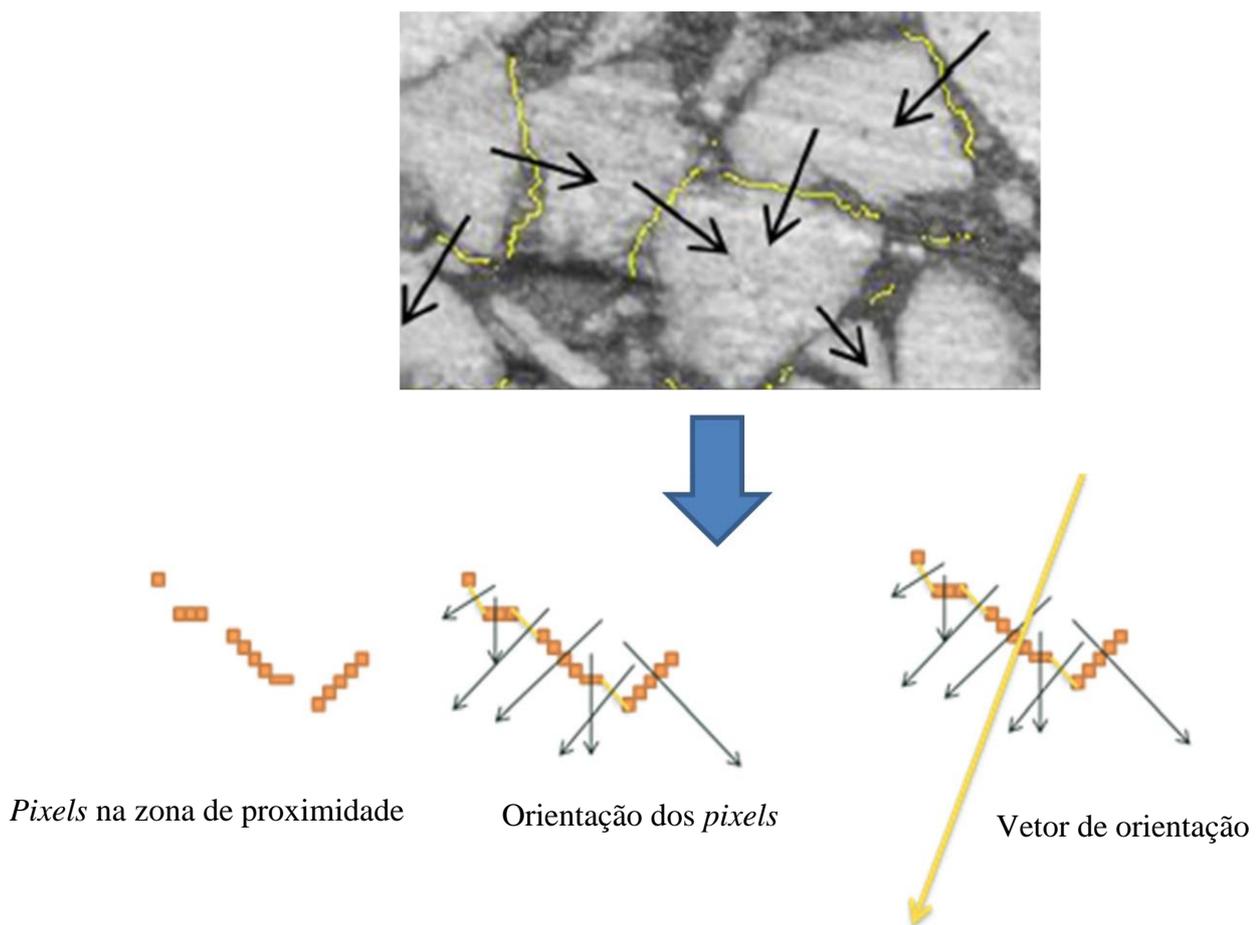
Figura 26: Contato verificado através do iPas2



Fonte: Adaptado de Sefidmazgi e Bahia (2014)

Para o número de contatos e comprimento de contatos, neste trabalho, todos os valores obtidos foram normalizados para uma área de 100cm², calculados através da área de cada imagem analisada. Em seguida, o iPas2 realiza o cálculo da orientação do contato obtida através de um ângulo em relação a horizontal. O *software* conecta os *pixels* nas zonas de proximidade utilizando linhas retas e calcula o vetor de orientação da zona de proximidade em relação a horizontal, como pode ser observado na Figura 27.

Figura 27: Esquema de cálculo de orientação na zona de proximidade.



Fonte: Adaptado de Sefidmazgi e Bahia (2014)

Este parâmetro (zona de proximidade) é utilizado para calcular a média absoluta dos ângulos de orientação (AAA_c) e o vetor magnitude (Δ_c), parâmetro este que quantifica a anisotropia da orientação das zonas de proximidade. O valor do vetor magnitude pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1 mais alinhadas em uma mesma direção estão as zonas de proximidade. A Equação 10 mostra como é obtido o Δ_c .

$$\Delta_c = \frac{1}{M} \left[\left(\sum_{i=1}^M \cos 2\theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^M \sin 2\theta_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

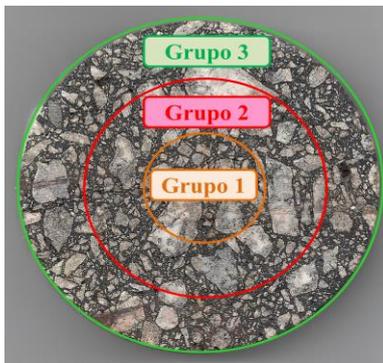
Onde:

θ = orientação da zona de aproximação;

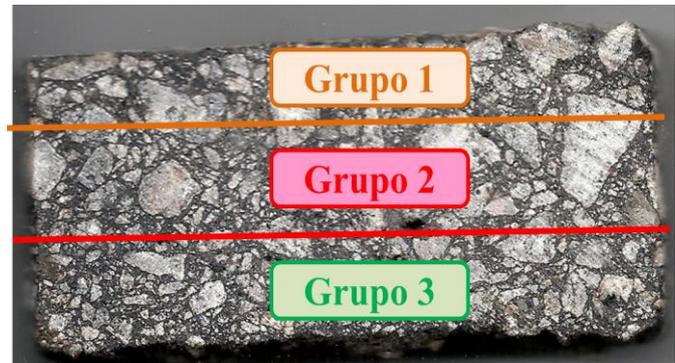
M = número de contatos.

Além dos parâmetros citados acima, o iPas2 também fornece outros dois parâmetros: orientação dos agregados, cujo parâmetro utilizado é chamado de vetor magnitude dos agregados (Δ), obtido também através da Equação 10, e segregação radial e vertical, onde o equipamento quantifica a quantidade de agregados por peneira em regiões diferentes, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28: Regiões de segregação radial e vertical



(a) Segregação Radial



(b) Segregação Vertical

Fonte: Próprio autor (2016)

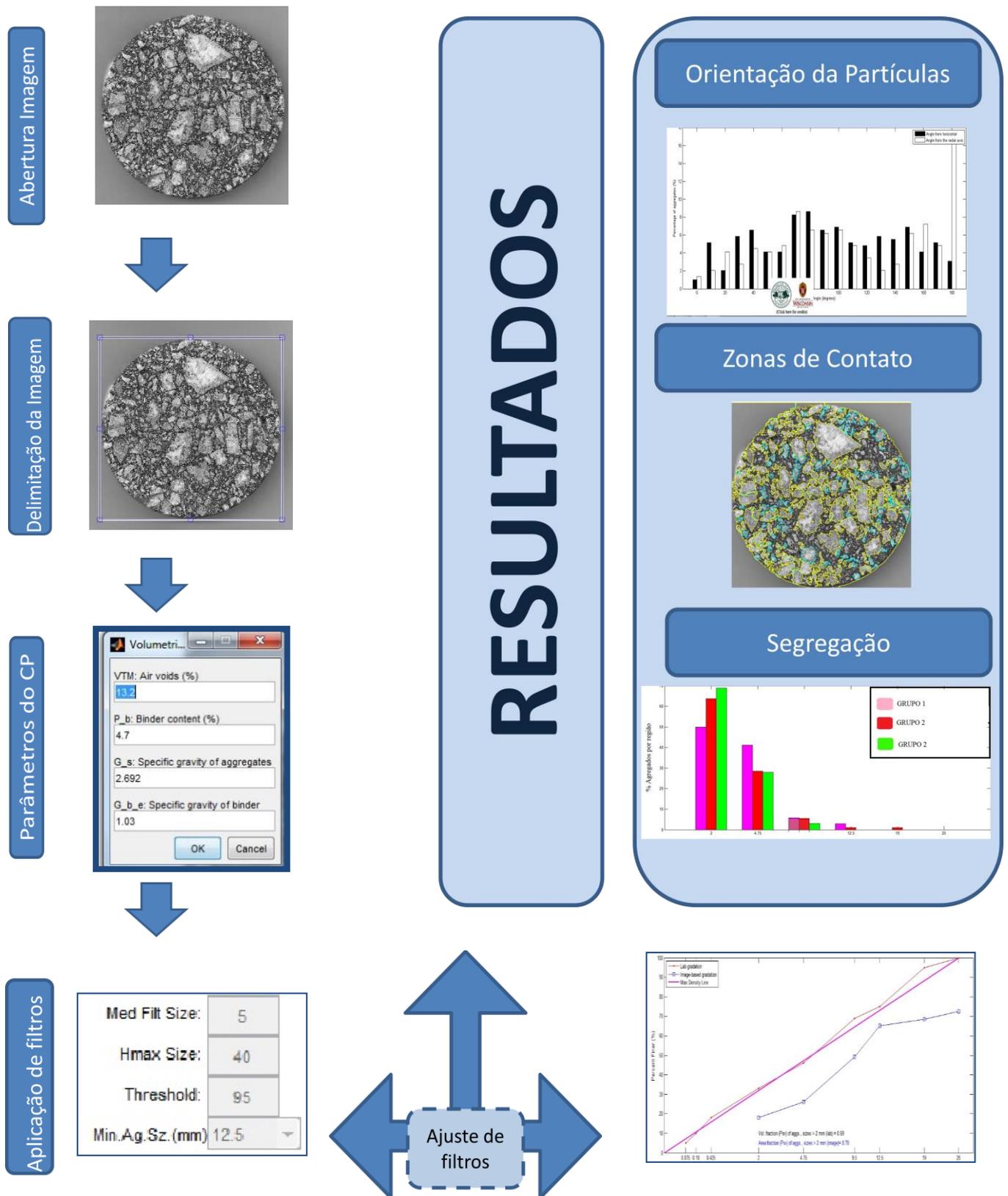
Para realização do ensaio é necessário importar a imagem de cada CP obtida através de um *scanner* para o iPas2. Em seguida, é definida a resolução da imagem, permitindo que o programa interprete as dimensões do objeto. Após definição da resolução, o programa solicita que seja delimitada a área de análise da imagem. Definida a área de análise, deve ser inserido no programa os seguintes parâmetros do CP: (i) percentual de volume de vazios, (ii) teor de ligante, (iii) massa específica dos agregados e do ligante e (iv) a curva granulométrica de laboratório. Estes parâmetros são fundamentais para os ajustes de filtros da

imagem, visto que descoberta a intensidade dos filtros para coloração do mástique, parte a qual os finos estão misturados ao ligante, será possível que o programa defina os agregados a serem avaliados e realize a análise da imagem.

Após a escolha dos filtros a serem aplicados, o *software* solicita que o usuário defina o menor tamanho de agregado a ser analisado, sendo todos os agregados maiores interpretados como partículas e agregados menores como parte integrante do mástique. Em seguida, a imagem sofre o processo de detecção de bordas, que permite a definição das formas dos agregados na imagem, e o processo de transformação em preto e branco (binarização), que permite a distinção entre os agregados e o mástique na imagem. A Figura 29 mostra o fluxograma do ensaio realizado pelo iPas2.

Finalizado o processo, o iPas2 fornece todos os resultados de contagem de contatos agregado-agregado, o comprimento dos contatos e a orientação dos agregados e dos contatos gerando arquivo de bloco de notas que pode ser exportado para o MS Excel. Com relação a segregação radial, avaliada nas seções circulares, o programa fornece um gráfico de frequências para cada região da imagem. A Figura 30 mostra os resultados gerados pelo iPas2.

Figura 29: Fluxograma de ensaio do iPas2

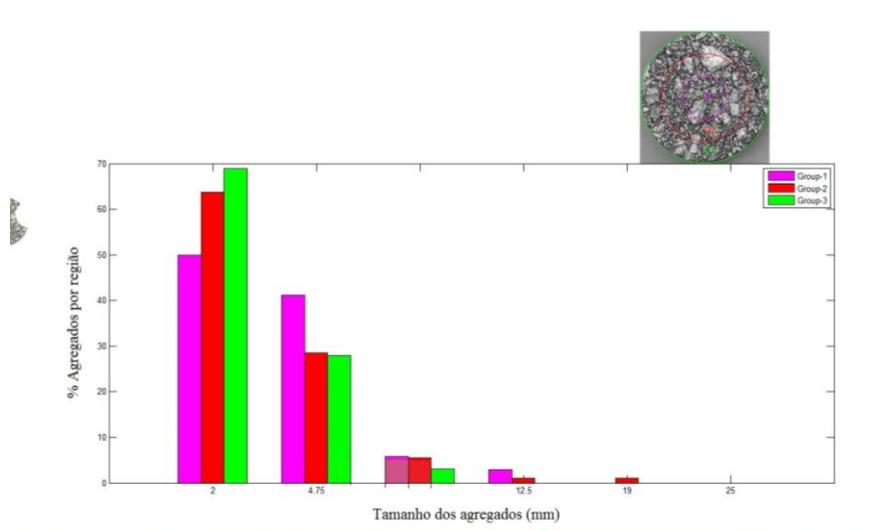


Fonte: Próprio autor (2016)

Figura 30: Resultados fornecidos pelo iPas2

Contact Zone nº	Ag-1 ID	Ag-2 ID, Eq. Diameter Ag-1 (mm)	Diameter Ag-2 (mm)	Ag-1 x	Ag-1 y	Ag-2 x	Ag-2 y	Ag-1 orientation	Ag-2 orientation	contact length	contact orientation
1	1	4 29.29	3.62	11.39	14.05	3.03	44.42	55.07	36.55	7.11	76.80
2	1	7 29.29	5.54	11.39	14.05	6.50	40.17	55.07	42.22	2.71	13.48
3	1	16 29.29	5.77	11.39	14.05	10.99	29.16	55.07	105.60	4.52	87.48
4	1	47 29.29	3.41	11.39	14.05	23.01	10.40	55.07	36.27	8.79	53.94
5	1	65 29.29	2.30	11.39	14.05	26.08	10.04	55.07	141.32	1.03	95.47
6	1	77 29.29	2.51	11.39	14.05	28.63	7.00	55.07	24.54	5.82	45.18
7	1	91 29.29	3.16	11.39	14.05	32.90	5.88	55.07	175.17	5.56	67.34
8	3	8 28.87	3.12	11.89	90.33	5.16	69.55	129.60	119.25	6.07	106.29
9	3	9 28.87	2.29	11.89	90.33	5.31	64.30	129.60	48.66	0.90	78.66
10	3	14 28.87	3.14	11.89	90.33	8.15	72.52	129.60	3.34	2.33	59.77
11	3	19 28.87	4.67	11.89	90.33	13.73	81.02	129.60	161.90	2.71	84.25
12	3	27 28.87	2.77	11.89	90.33	15.22	85.53	129.60	120.71	4.01	90.82
13	3	67 28.87	7.83	11.89	90.33	30.40	93.42	129.60	9.68	2.84	108.80
14	3	102 28.87	7.05	11.89	90.33	37.89	96.59	129.60	94.74	1.16	121.37
15	4	6 3.62	2.12	3.03	44.42	3.23	47.47	36.55	97.15	0.90	48.79
16	4	7 3.62	5.54	3.03	44.42	6.50	40.17	36.55	42.22	3.23	94.03
17	4	12 3.62	7.50	3.03	44.42	10.71	46.68	36.55	28.76	1.55	83.09
18	5	10 8.36	3.79	9.40	52.94	6.68	48.09	12.10	66.60	1.55	84.46
19	5	11 8.36	2.15	9.40	52.94	6.54	57.84	12.10	12.34	1.16	99.04
20	5	12 8.36	7.50	9.40	52.94	10.71	46.68	12.10	28.76	9.43	71.52
21	7	12 5.54	7.50	6.50	40.17	10.71	46.68	42.22	28.76	1.16	78.55
22	7	17 5.54	3.04	6.50	40.17	11.00	40.22	42.22	166.47	1.55	33.60

(a) Resultados de zonas de contato e orientação dos agregados



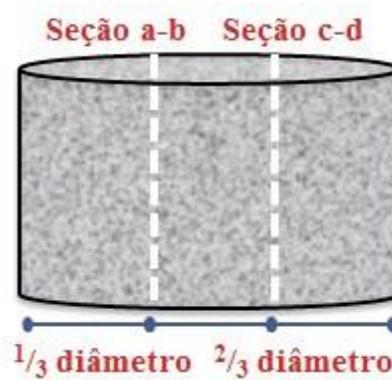
(b) Gráfico de frequência de partículas por região

Fonte: Próprio autor (2016)

De acordo com Sefidmazgi e Bahia (2014), seis imagens são necessárias para uma boa representatividade da amostra, visto que os resultados obtidos na análise de seis imagens, para o citado estudo, geraram um erro inferior a 5% se comparado a análise realizada utilizando quarenta imagens.

No presente estudo, os CPs foram avaliados no sentido vertical, conforme mostra a Figura 31. Contudo, devido as espessuras das amostras e ao baixo GC, os CPs foram serrados em três partes, gerando apenas quatro imagens por CP. Para análise no iPas2, foi necessário extrair um CP de cada trecho contendo a mistura CA1.

Figura 31: Serragem dos CPs avaliados no iPas2



Fonte: Ribas (2016)

4. RESULTADOS

4.1. Análise dos Agregados Através do Uso do PDI (AIMS)

4.1.1. Propriedades de Forma

Os agregados coletados em campo foram analisados quanto as propriedades de forma através do AIMS. A Tabela 12 apresenta um resumo dos resultados obtidos com o AIMS, com os parâmetros estatísticos média, desvio padrão e Coeficiente de Variação (CV). Esses parâmetros estatísticos estão relacionados ao total de agregados analisados de acordo com o Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos mesmos, não considerando a distribuição destes peneira a peneira. Na Tabela 13 é apresentada a classificação dos agregados em relação a cada uma das propriedades fornecidas pelo AIMS, levando em conta as médias dos resultados encontrados para cada material.

Tabela 12: Resultados das propriedades de forma dos agregados investigados

Propriedade	Parâmetro	Tamanho do agregado			
		1"	3/4"	1/2"	Pó de Pedra
Forma 2D	Média	-	-	8,10	8,29
	Desvio padrão	-	-	2,10	2,01
	CV(%)	-	-	25,93	24,25
Esfericidade	Média	0,69	0,68	0,69	0,62
	Desvio padrão	0,11	0,10	0,09	0,09
	CV(%)	15,75	14,31	12,92	15,11
Angularidade	Média	2.768,90	2.883,70	3.279,30	3.739,80
	Desvio padrão	656,20	634,20	787,00	1.151,50
	CV(%)	23,70	21,99	24,00	30,79
Textura Superficial	Média	287,80	197,30	215,20	185,50
	Desvio padrão	153,38	113,90	136,10	111,00
	CV(%)	53,29	57,73	63,24	59,84

Tabela 13: Classificação dos agregados investigados

Propriedade	Tamanho do agregado			
	1"	3/4"	1/2"	Pó de Pedra
Forma 2D	-	-	Semialongado	Semialongado
Esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade
Angularidade	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado	Subarredondado
Textura Superficial	Baixa rugosidade	Liso	Liso	Liso

De acordo com os resultados encontrados é possível verificar que, independente do TMN dos agregados analisados, os valores obtidos para cada uma das propriedades de forma

analisadas são próximos, sendo todos classificados pela média da mesma forma, com exceção da textura superficial da brita de 1". De acordo com Bessa (2012), um dos fatores que pode contribuir para um valor de CV elevado é o fato de que a média obtida para cada TMN avaliado leva em consideração os valores encontrados peneira a peneira, sendo que esses valores podem ser bem diferentes entre si.

Os resultados encontrados para os parâmetros de angularidade e de textura superficial foram os que tiveram maiores valores de CV. De acordo com Bessa (2012), os altos valores de CV encontrados para o parâmetro de angularidade podem ser explicados pelo fato desta ser a única característica que é avaliada para agregados graúdos e miúdos, podendo as frações possuírem características bastante distintas.

É possível observar ainda que a angularidade tendeu a aumentar a medida que o TMN diminuiu. Provavelmente, isso ocorreu devido ao fato das partículas menores passarem por uma maior quantidade de etapas de britagem, gerando assim agregados com faces mais fraturadas, sendo isto válido quando o método de britagem é o mesmo.

Em termos de lamelaridade, os agregados foram caracterizados no que diz respeito à razão entre sua maior dimensão (comprimento) e à sua menor dimensão (espessura). De acordo com a metodologia Superpave, o percentual de partículas para o uso em misturas asfálticas com razão de lamelaridade acima de 5:1 não deve exceder 10%, além disso, a análise AIMS fornece o percentual de partículas de lamelaridade para a razão de 3:1. Os resultados citados encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14: Resultados de lamelaridade

TMN	Razão média entre comprimento e espessura	Quantidade acima de 5:1 (%)	Quantidade acima de 3:1 (%)
1"	2,3	0,0	17,5
3/4"	2,4	2,0	20,7
1/2"	2,4	0,0	16,0

É possível observar que os agregados graúdos apresentaram valores de lamelaridade próximos. Quanto à porcentagem de agregados lamelares presentes nas amostras, nota-se novamente que os agregados graúdos apresentaram percentuais de partículas com a razão 5:1 e 3:1 similares, sendo que na razão de lamelaridade de 5:1 nenhum dos agregados avaliados

teve valores acima de 10%, mostrando que todos os agregados analisados estão de acordo com o critério de lamelaridade determinado pela metodologia Superpave.

4.2. Resultados de Textura das Misturas Asfálticas Avaliadas

4.2.1. Resultados obtidos em campo

Após a execução dos revestimentos em campo foram realizados os ensaio de mancha de areia e pêndulo britânico. Os resultados de textura, assim como o GC e o método de compactação utilizado podem ser vistos na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados dos ensaios de mancha de areia e pêndulo britânico.

Mistura Asfáltica	Trecho	Número de Passadas		GC (%)	HS (mm)	Classificação Macrotextura	BPN	Classificação Microtextura
		Rolo de Pneus	Rolo Tandem					
CA1	I	8	4	97,3	0,42	Medianamente Fina	71	Rugosa
	II	8	-	96,1	1,24	Muito Grossa	65	Rugosa
	III	4	2	95,1	0,41	Medianamente Fina	75	Rugosa
	IV	4	-	96,0	1,34	Muito Grossa	68	Rugosa
	V	-	4	95,0	0,42	Medianamente Fina	74	Rugosa
	VI	-	2	92,4	0,60	Medianamente Fina	75	Rugosa
	VII	-	2*	90,0	0,60	Medianamente Fina	75	Rugosa
	VIII	-	1*	-	0,55	Medianamente Fina	79	Muito Rugosa
CA2	E105	8	4	97,3	0,35	Fina	70	Rugosa
	E115	8	4	97,0	0,37	Fina	73	Rugosa
	E125	8	4	97,4	0,39	Fina	70	Rugosa

*Sem vibração do rolo tandem durante as passadas

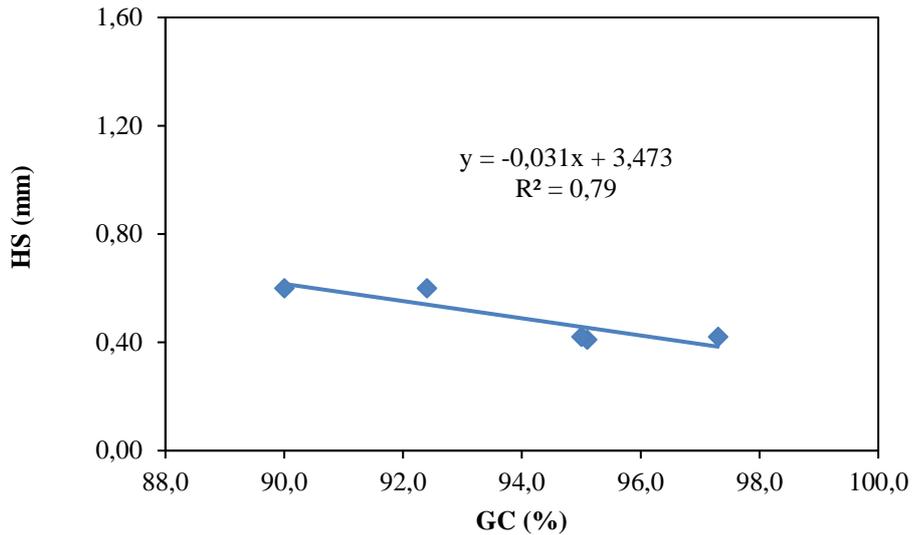
De acordo com o resultados de mancha de areia, é possível verificar que maior parte da misturas asfálticas avaliadas em relação a textura superficial são classificadas como Medianamente Finas, com exceção dos trechos II e IV da mistura CA1 que devem ser classificadas como Muito Grossas e a Mistura CA2 que foi classificada como Fina. Além disso, os trechos II e IV foram os únicos trechos que seguiram a recomendação da norma IAC 4302 (2001) que sugere um HS mínimo de 1,0mm para revestimentos asfálticos novos. Já a Resolução ANAC 236 (2012) afirma ainda que o HS de uma pista de pouso e decolagem não deverá ser inferior a 0,60mm, sob pena de multa, sendo que os trechos I, III, V e VIII revestidos com a mistura CA1 e com a mistura CA2 não atenderam a esse requisito.

Outro fator que é possível verificar em relação aos resultados de mancha de areia e o método de compactação dos trechos I, II, III e IV é que a compactação através do rolo tandem gera uma queda em torno de 70% na macrotextura. Isto ocorre porque o rolo tandem aplica uma carga contínua e linearmente uniforme em toda extensão dos cilindros sobre o revestimento, diminuindo possíveis irregularidades deixadas pelo rolo de pneus, além de acomodar as partículas e deixando assim o revestimento com menor rugosidade. Em relação a granulometria, é possível perceber que a mistura CA1, trecho I, apresentou valor de macrotextura cerca de 13% superior aos valores de macrotextura encontrados para as amostras da mistura CA2. Visto que o método de compactação e o GC destas citadas misturas são os mesmos, percebe-se a granulometria traz impacto na macrotextura, tendendo a aumentá-la a medida que diminui o percentual de agregados retidos entre as peneiras 9,5mm e 2,36mm.

Outro fator interessante quanto ao método de compactação é quanto ao impacto da vibração durante a compactação com o uso do rolo tandem. De acordo com os resultados dos trechos VI e VII é possível observar que apesar de um GC maior ter sido obtido com o uso da vibração, os resultados de mancha de areia e de pêndulo britânico foram os mesmos, mostrando que, para as misturas asfálticas avaliadas, a vibração com o uso do rolo tandem, no início da compactação, não gera alteração nas propriedades de textura.

Quanto ao GC, comparando metodologia de compactação semelhantes com diferentes energias de compactação, os trechos I e III apresentaram valores de HS próximos apesar da diferença 2,2% no GC dos dois trechos. Porém, quando os resultados de macrotextura dos trechos V e VI são comparados é possível perceber um aumento de 43% no valor de HS com a redução do GC de 95% para 92,4%. Quando avaliamos os valores de HS para os trechos I, III, V, VI, VII da mistura CA1, sendo estes os trechos onde foi utilizado o rolo tandem, é possível verificar que há uma tendência de aumento dos resultados de macrotextura a medida que diminui o GC. A Figura 32 mostra o gráfico com a correlação entre GC e HS.

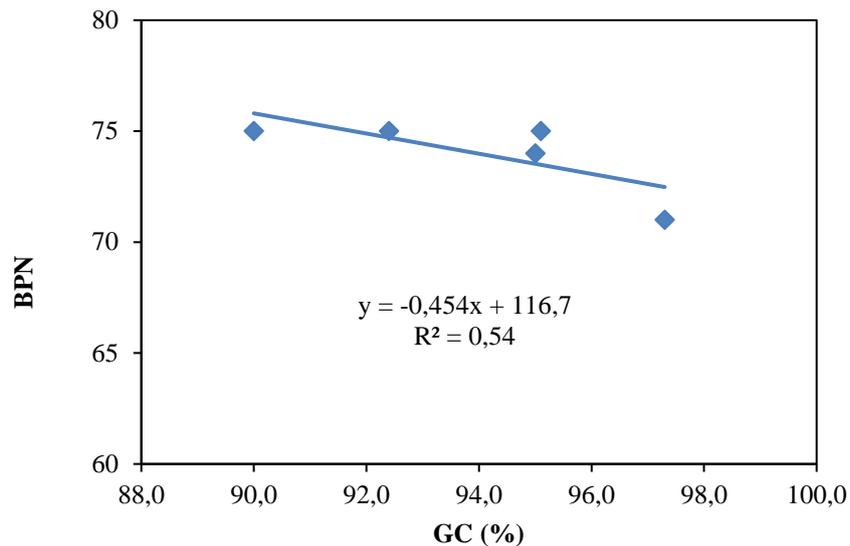
Figura 32: Gráfico de correlação entre GC e HS para misturas compactadas com rolo tandem



Fonte: Próprio autor (2016)

Em relação aos valores de BPN, o trecho VIII foi classificado como Muito Rugoso, enquanto os outros trechos foram classificados como Rugosos. Ao avaliar os trechos I, II, III e IV quanto ao BPN, nota-se que há uma tendência de aumento de 10% da microtextura com a utilização do rolo tandem. Isso ocorre devido a macrotextura dos trechos II e IV ser tão acentuada que durante a realização do ensaio de pêndulo britânico a área de contato entre o pêndulo e o revestimento asfáltico é menor quando comparada a área de contato nos trechos I e III. Além disso, a rugosidade acentuada provoca o surgimento da película de água mais espessa, gerando uma maior dificuldade para romper essa película. Quando avaliada a microtextura em relação ao GC para os trechos I, III, V, VI e VII, assim como foi feito para os valores de HS, pode-se verificar que há uma tendência de aumento no BPN a medida que cai o GC, assim como ocorreu para o HS. A Figura 33 mostra o gráfico com a correlação entre GC e BPN

Figura 33: Gráfico de correlação entre GC e BPN para misturas compactadas com rolo tandem



Fonte: Próprio autor (2016)

O aumento dos valores de HS e BPN a medida que diminui o GC mostra necessidade de avaliar os parâmetros volumétricos das misturas asfálticas de modo a atingir melhores propriedades mecânicas e de macrotextura e microtextura para que o aeródromo tenha uma longa vida útil, garantindo a segurança dos usuários. Pode-se observar que há uma melhor correlação entre GC e HS em relação a correlação GC e BPN. Isto ocorre devido ao fato de a macrotextura estar mais ligada a granulometria e as propriedades volumétricas da mistura asfálticas, enquanto a microtextura está mais ligada a textura do agregado. Em locais onde há a escassez de agregados, não permitindo a escolha de materiais mais adequados para atingir a macrotextura e microtextura do revestimento asfáltico aeroportuário, a diminuição do GC, respeitando as propriedades mecânicas, surge como opção para garantir a segurança dos usuários. Assim, verifica-se a análise ainda em laboratório, do GC de compactação em face das propriedades mecânicas da mistura asfáltica, pode determinar a amplitude de GC onde é possível obter propriedades mecânicas satisfatórias e melhores propriedades de textura.

4.2.2. Resultados obtidos em laboratório

Realizadas as extrações dos CP em campo, foram realizados os ensaios de textura com o uso do AIMS variando o parâmetro de distância entre cada leitura do equipamento. A Tabela 16 mostra os resultados de macrotextura para os CPs analisados.

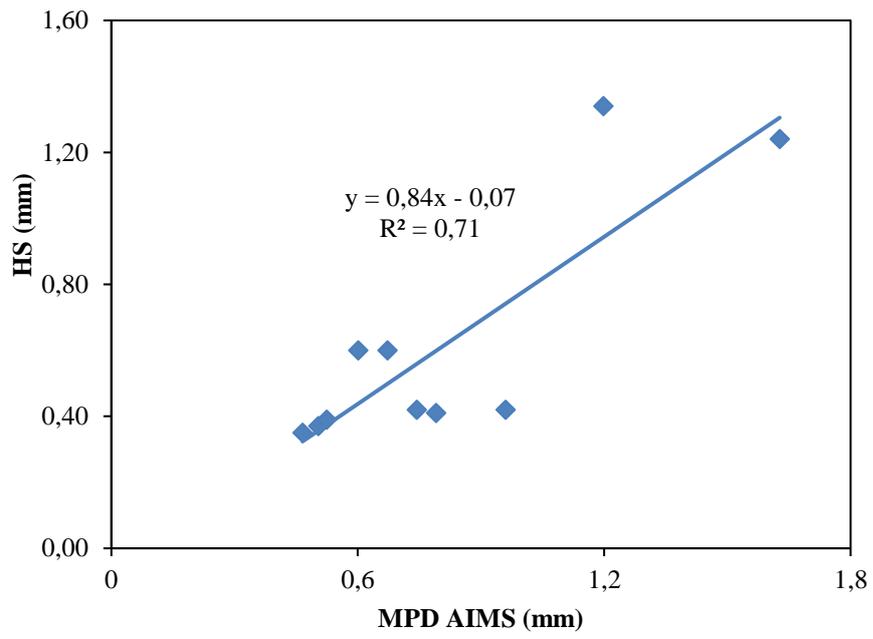
Tabela 16: Resultados de macrotextura obtidos com o uso do AIMS

Mistura Asfáltica	Trecho	GC (%)	HS (mm)	Macrotextura AIMS (MPD)		
				Distância (mm)		
				0,30	0,45	0,60
CA1	I	97,3	0,42	0,96	0,86	0,86
	II	96,1	1,24	1,63	1,58	1,59
	III	95,1	0,41	0,79	0,72	0,57
	IV	96,0	1,34	1,20	0,96	0,96
	V	95,0	0,42	0,74	0,63	0,67
	VI	92,4	0,60	0,60	0,57	0,58
	VII	90,0	0,60	0,67	0,60	0,57
CA2	E105	97,3	0,35	0,47	0,48	0,47
	E115	97,0	0,37	0,50	0,48	0,47
	E125	97,4	0,39	0,52	0,50	0,47

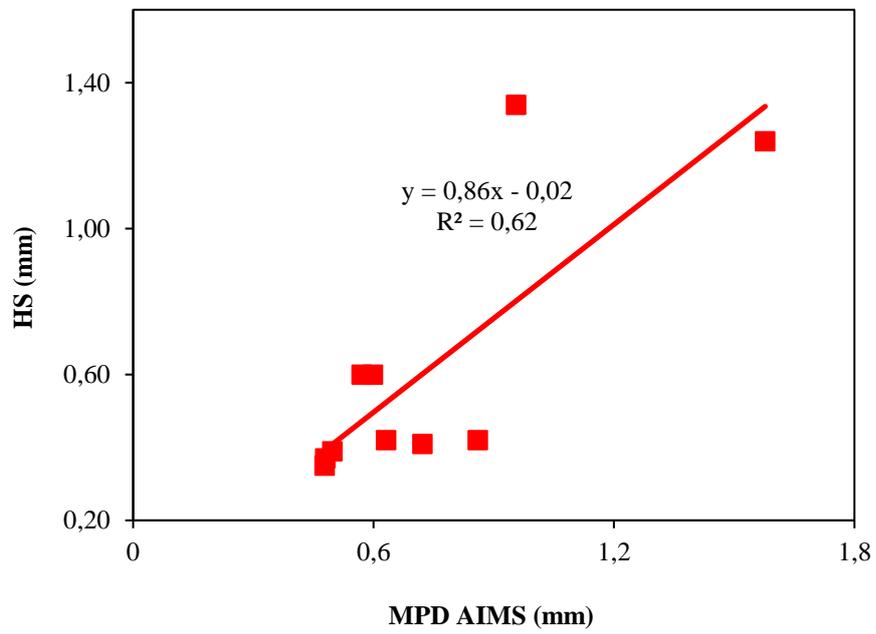
Com os resultados obtidos com o uso do AIMS, é possível verificar que os valores de MPD obtidos quando a distância adotada foi de 0,30mm tendem a ser maiores se comparados aqueles obtidos quando a distância adotada é de 0,45mm ou de 0,60mm. Contudo, é possível observar que os resultados de macrotextura obtidos com o uso do AIMS, para qualquer distância adotada, são sensíveis as alterações nos resultados de mancha de areia.

Para verificar a correlação entre os resultados de MPD e HS, foram elaborados gráficos de dispersão, para cada distância avaliada, com linha de tendência linear, gerando uma equação do tipo $a.x + b$ e o coeficiente de determinação R^2 . A Figura 34 mostra o gráfico com a correlação entre os valores de HS e de MPD para cada distância avaliada. A Tabela 17 apresenta os valores da correlação de cada gráfico.

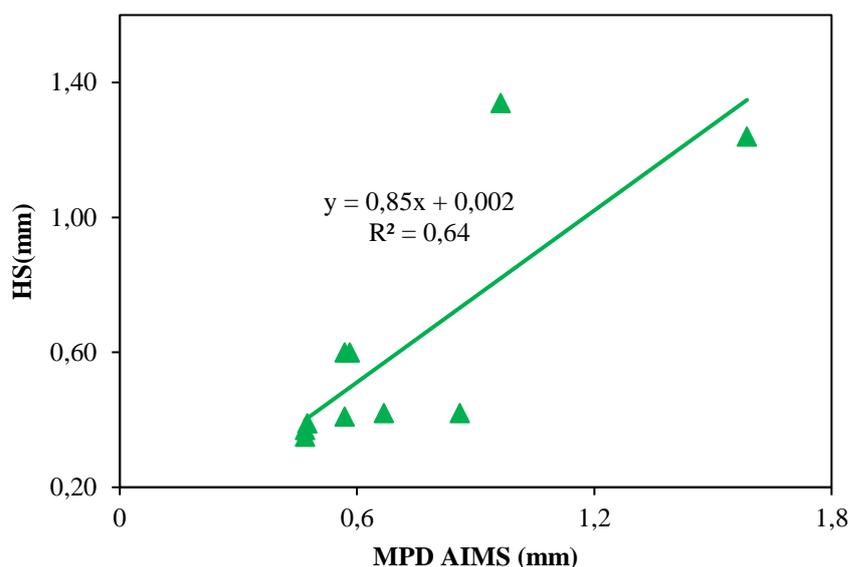
Figura 34: Gráficos de correlação entre HS e MPD



(a) Distância 0,30mm



(b) Distância 0,45mm



(c) Distância 0,60mm

Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 17: Resumo das equações de correlação entre MPD e HS(mm) para cada distância adotada e equação da ASTM E 1845 (2009)

Referência	Inclinação (a)	Intercepto (b)	R ²
0,30mm	0,84	-0,07	0,71
0,45mm	0,86	-0,02	0,62
0,60mm	0,85	0,02	0,64
ASTM E 1845	0,80	0,20	-

De acordo com os gráficos apresentados é possível verificar que todos valores de Inclinação (a) obtidos nas regressões lineares foram próximos, inclusive para a Equação 9, mostrando que a sensibilidade do ensaio realizado no AIMS é compatível com outros ensaios onde o resultado é apresentado através do MPD. Os valores dos interceptos (b) obtidos nas regressões realizadas com o resultados de MPD do AIMS foram menores se comparados ao valor mostrado na Equação 9, mostrando que, para os resultados obtidos neste trabalho, quando o MPD tender a zero, o mesmo ocorrerá para os resultados de mancha de areia. Um fator que pode explicar a diferença encontrada nos valores de interceptos das correlações encontradas entre os valores obtidos pelo AIMS e o valor obtido através da ASTM E 1845 (2009) é a metodologia de ensaio, visto que, normalmente, os equipamentos que obtém MPD medem este parâmetro através de leituras realizadas com laser através de perfilômetros que

possuem uma precisão mínima de 0,2mm, enquanto o AIMS utiliza um método óptico com precisão de 0,001mm.

O coeficiente de determinação (R^2) foi o parâmetro escolhido para verificar a correlação entre os valores de MPD obtidos no AIMS e os valores de HS obtidos em campo. As correlações foram avaliadas de acordo com a classificação subjetiva *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (TRB, 2002). A Tabela 18 apresenta a classificação do NCHRP (TRB, 2002).

Tabela 18: Classificação subjetiva da correlação dos parâmetros avaliados (TRB, 2002)

Classificação	R^2
Excelente	>0,90
Boa	0,70 - 0,89
Razoável	0,40 - 0,69
Fraca	0,20 - 0,39
Muito fraca	<0,19

Para os CPs analisados, dentre a variação de distância entre as leituras do AIMS, a distância de 0,30mm foi aquela que gerou o melhor coeficiente de determinação (0,71), sendo classificada como uma boa correlação. Já as análises realizadas com distâncias de 0,45mm e 0,60mm, geraram valores de R^2 de 0,62 e 0,64, respectivamente, sendo essas correlações classificadas como razoáveis.

Além dos resultados de macrotextura, foram obtidos também os resultados de microtextura através do pêndulo britânico e do AIMS. A Tabela 19 apresenta os resultados de microtextura para cada mistura asfáltica avaliada.

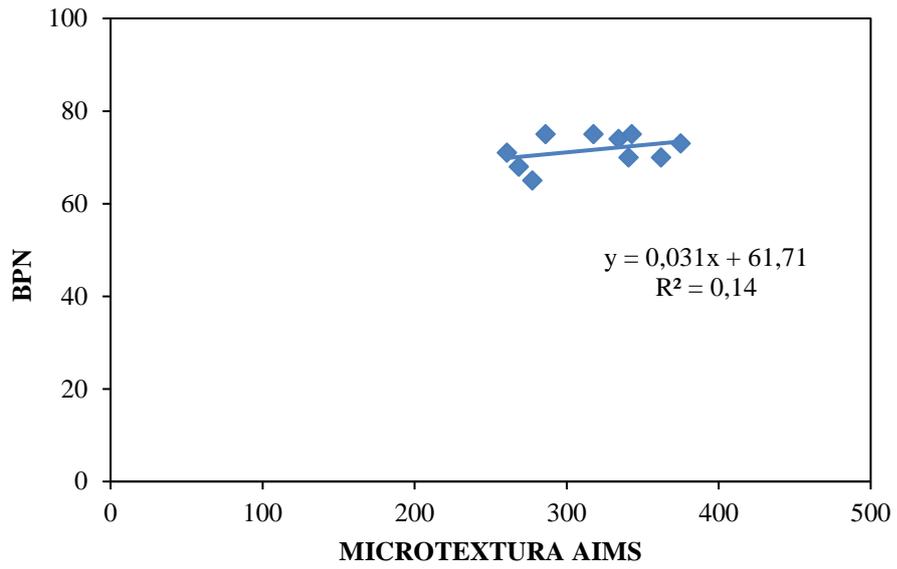
Tabela 19: Resultados de microtextura obtidos com o uso do AIMS

Mistura Asfáltica	Trecho	GC (%)	BPN	Microtextura AIMS		
				Distância (mm)		
				0,30	0,45	0,60
CA1	I	97,3	71	260,6	234,3	235,5
	II	96,1	65	277,4	277,8	277,4
	III	95,1	75	286,2	286,7	285,8
	IV	96,0	68	268,5	266,7	263,6
	V	95,0	74	334,3	335,2	335,6
	VI	92,4	75	317,7	319,8	321,9
	VII	90,0	75	342,9	346,0	346,3
CA2	E105	97,3	70	340,8	346,6	345,1
	E115	97,0	73	374,9	373,1	374,3
	E125	97,4	70	362,2	357,7	360,7

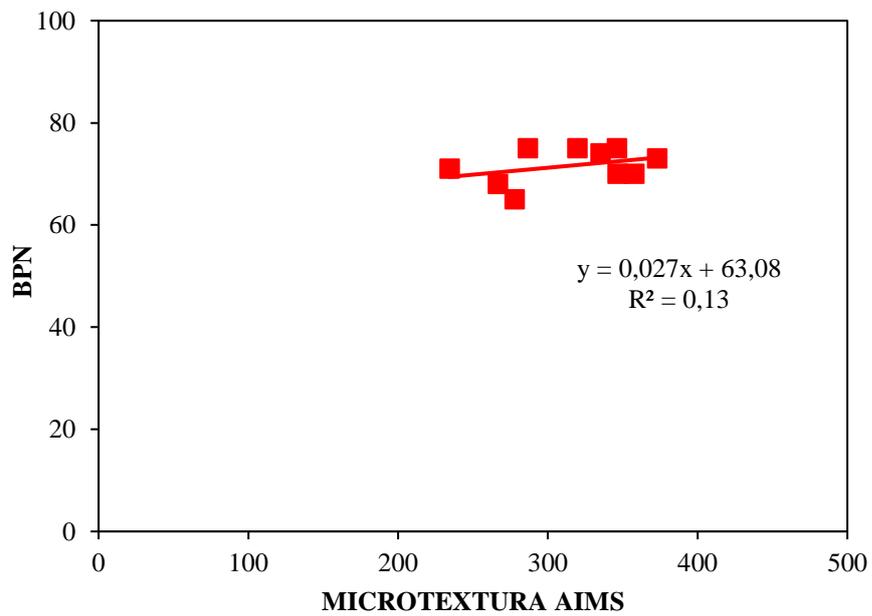
Os resultados de microtextura obtidos através do uso do AIMS não sofreram grandes variações quando o parâmetro de distância das leituras foi alterado. Isto decorre do fato da análise de microtextura realizada com o uso do AIMS ser realizada através de imagens coletadas nas três últimas varreduras, enquanto a distância é um parâmetro utilizado apenas na primeira varredura.

Contudo os resultados de microtextura obtidos com o uso do AIMS para os CPs analisados neste trabalho não apresentaram boa correlação quando comparados aos valores de BPN. Para todas as distância avaliadas, as correlações entre BPN e Microtextura obtidas com o AIMS são classificadas como muito fracas. A Figura 35 mostra o gráfico com correlação entre os valores de BPN e Microtextura AIMS para cada distância avaliada. A Tabela 20 apresenta os valores destas correlações.

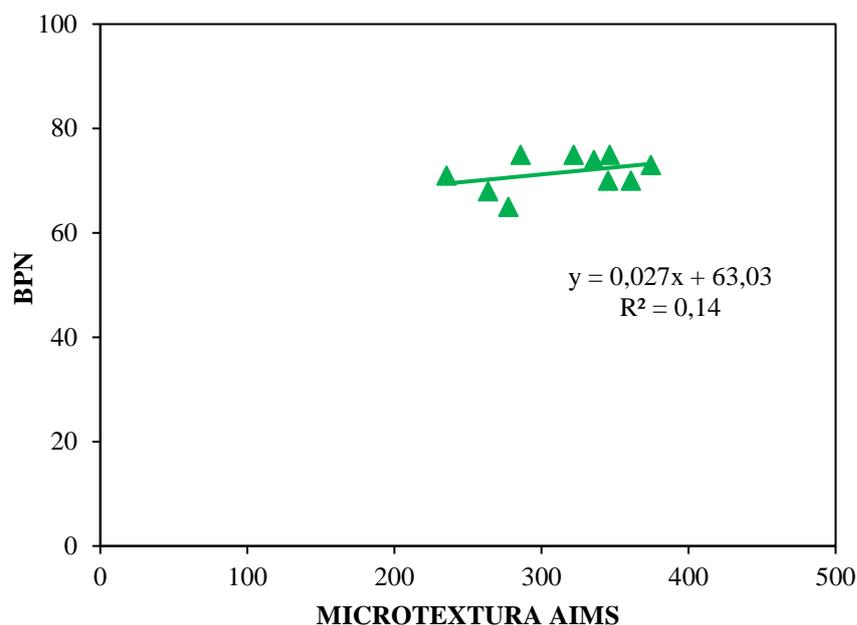
Figura 35: Gráficos de correlação entre BPN e Microtextura AIMS



(a) Distância 0,30mm



(b) Distância 0,45mm



(c) Distância 0,60mm

Fonte: Próprio autor (2016)

Tabela 20: Resumo das equações de correlação entre BPN e Microtextura AIMS para cada distância adotada

Distância	Inclinação (a)	Intercepto (b)	R ²
0,30mm	0,031	61,71	0,14
0,45mm	0,027	63,08	0,13
0,60mm	0,027	63,03	0,14

Com o intuito de avaliar a correlação das propriedades de angularidade e textura superficial dos agregados com a macrotextura e a microtextura da mistura asfáltica, respectivamente, utilizou-se os parâmetros de angularidade e de textura superficial obtidos para cada fração do agregado utilizado nas misturas asfálticas e, através de uma média ponderada, obteve-se a angularidade e a textura superficial da matriz pétreo de cada mistura asfáltica. A Tabela 21 apresenta os valores de angularidade e de textura superficial para o CA1 e o CA2.

Tabela 21: Angularidade e textura superficial da matriz pétreo do CA1 e CA2

Mistura Asfáltica	Angularidade da Matriz Pétreo	Textura Superficial da Matriz Pétreo
CA1	3.340,2	252,8
CA2	3.449,7	209,2

Os valores mostram que para a mistura CA2 o valor de angularidade da matriz pétreo foi 3,3% superior ao da mistura CA1. Quando comparamos os valores de HS ou MPD do trecho I da mistura CA1 com os trechos da mistura CA2, podemos observar que há uma diminuição na macrotextura quando os valores de angularidade da matriz pétreo aumentam, porém a proximidade destes valores não permite afirmar esta tendência, levando a crer que a granulometria teve um impacto maior nos resultados de macrotextura, conforme encontrado por Araujo (2014).

Para a textura superficial da matriz pétreo o valor encontrado para a mistura CA1 foi 20,8% superior ao encontrado para CA2, contudo, quando avaliamos os valores de BPN do trecho I da mistura CA1 com os trechos da mistura CA2, podemos observar que a microtextura praticamente se manteve inalterada, mostrando que a textura superficial da matriz pétreo dos agregados foram bem próximas, sendo que a diferença entre estes valores não impactou na microtextura das misturas asfálticas avaliadas nesse estudo.

Além dos resultados já mostrados, a mistura CA1 também foi compactada em laboratório e avaliada no AIMS quanto ao valor de MPD e microtextura. A Tabela 22 mostra os resultados obtidos para os CPs compactados em laboratório.

Tabela 22: Resultados de macrotextura e microtextura do AIMS para o CPs compactados em laboratório.

Mistura Asfáltica	Método de Compactação	GC (%)	Análise AIMS			
			MPD		Microtextura	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
CA1	CGS	94,1	0,69	0,16	632,3	35,3
		97,0	0,72	0,07	621,1	16,3
	CM	94,4	1,31	0,09	656,0	35,9
		96,9	0,74	0,05	615,5	11,8

Os CPs compactados através do CGS, apesar de possuírem diferentes valores de GC, apresentaram valores de MPD próximos, mostrando que para esse método de compactação a variação do GC de 94,1% para 97,0% não impacta consideravelmente nos resultados de textura. Já para os CPs compactados através do CM, o MPD do CP com 94,4% de GC foi superior quando comparado ao CP com 96,7% de GC, mostrando que, para os CPs avaliados neste estudo e com a utilização deste método de compactação, o GC influencia nos resultados de macrotextura. Os valores de microtextura foram próximos, para todos os CPs moldados em laboratório.

Quando os valores obtidos em laboratório foram comparados aqueles obtidos a partir das amostras de campo, é possível perceber que os CPs compactados pelo CGS geraram valores de MPD próximos aqueles obtidos para os trechos que foram compactados apenas com o uso do rolo tandem, principalmente o trecho V, onde o GC obtido foi 95,0%, enquanto o MPD foi 0,74. Já para os CPs compactados com o uso do CM, quando o GC foi inferior, a macrotextura foi próxima aos valores encontrados para os trechos onde não foi usado o rolo tandem (trechos II e IV), porém, com o acréscimo do GC os resultados também se aproximaram daqueles obtidos para os trechos onde houve compactação com o uso do rolo tandem. Os resultados mostraram ainda que a utilização do rolo tandem em campo aproximou a textura superficial dos CPs de campo a textura superficial dos CPs produzidos pelos métodos de compactação de laboratório.

4.3. Caracterização da Estrutura Interna das Misturas Asfálticas Avaliadas

Para os sete trechos revestidos com a mistura CA1 foi realizada uma extração de CP e a análise da estrutura interna destes foi obtida através do *software* iPas2. A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos para cada trecho, por imagem avaliada. A Tabela 24 apresenta as médias e os valores de Coeficiente de Variação (CV) dos resultados descritos na Tabela 23.

Tabela 23: Resultados de caracterização da estrutura interna das misturas asfálticas

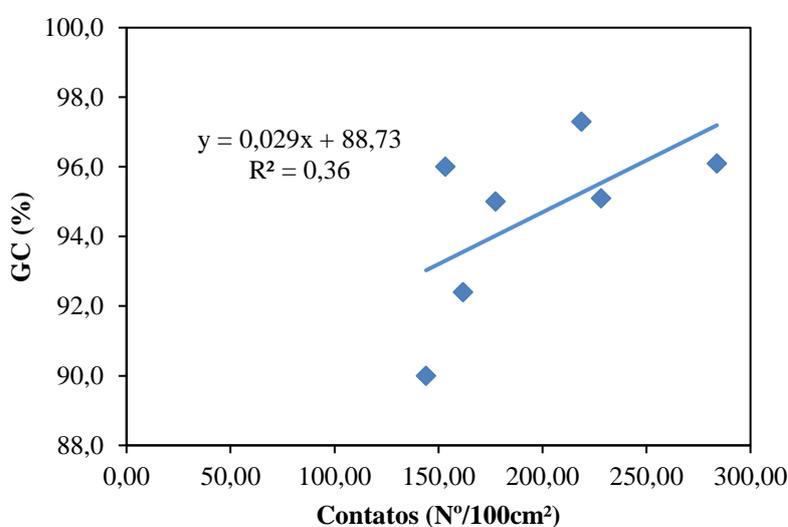
Trecho	GC (%)	Contatos (Nº/100cm ²)	Comprimento dos Contatos (mm/100cm ²)	Orientação Agregados (Δ)	Orientação Contatos (Δ_c)
I	97,3	98,6	279,07	0,08	0,18
		218,0	530,38	0,06	0,08
		179,3	344,65	0,03	0,16
		379,2	603,00	0,07	0,09
II	96,1	210,5	445,43	0,06	0,06
		227,3	419,66	0,02	0,17
		276,5	702,32	0,01	0,06
		421,1	598,00	0,04	0,05
III	95,1	304,3	433,90	0,02	0,12
		217,7	566,93	0,05	0,05
		180,4	460,80	0,01	0,18
		210,2	598,51	0,02	0,11
IV	96,0	126,7	366,22	0,01	0,07
		140,4	405,30	0,05	0,09
		188,4	433,28	0,03	0,16
		157,7	423,00	0,04	0,09
V	95,0	210,4	559,83	0,03	0,19
		117,7	276,62	0,05	0,20
		210,5	569,71	0,03	0,08
		171,2	425,34	0,06	0,10
VI	92,4	140,4	389,98	0,09	0,05
		123,8	246,76	0,02	0,09
		178,1	435,20	0,03	0,12
		205,0	453,39	0,04	0,05
VII	90,0	61,7	72,44	0,05	0,10
		166,3	371,97	0,04	0,12
		142,5	331,65	0,02	0,13
		205,6	609,41	0,04	0,13

Tabela 24: Médias e CV dos resultados de caracterização da estrutura interna das misturas asfálticas

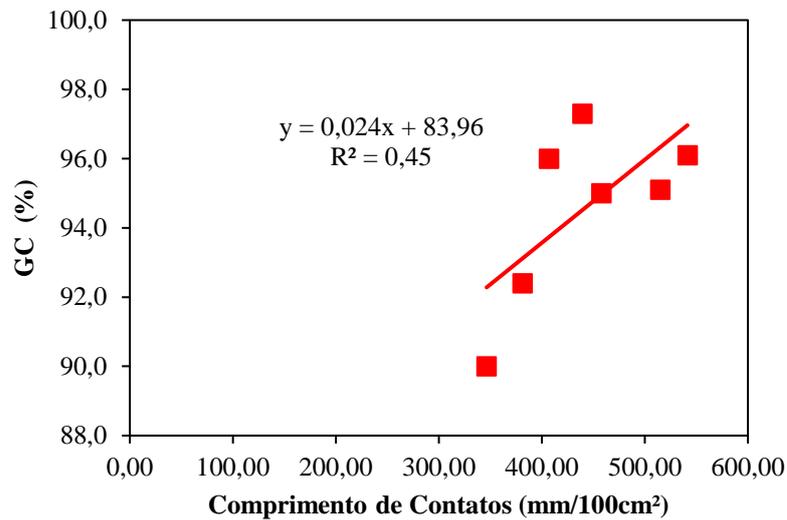
Trecho	GC (%)	Contatos (Nº/100cm ²)		Comprimento dos Contatos (mm/100cm ²)		Orientação dos Agregados (Δ)		Orientação dos Contatos (Δc)	
		Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)	Média	CV (%)
I	97,3	218,76	54	439,37	35	0,06	36	0,13	39
II	96,1	283,83	34	541,35	25	0,03	68	0,09	67
III	95,1	228,14	23	515,04	16	0,03	69	0,12	46
IV	96,0	153,28	17	406,95	7	0,03	53	0,10	39
V	95,0	177,45	25	457,88	30	0,04	35	0,14	43
VI	92,4	161,80	23	381,33	25	0,05	69	0,08	44
VII	90,0	144,04	42	346,37	63	0,04	24	0,12	8

Os resultados obtidos no iPas2 mostram que existe uma tendência de aumento do número e do comprimento de contatos a medida que o GC é aumentado, mostrando a importância do processo de compactação no intertravamento do esqueleto mineral da mistura asfáltica. A Figura 36 mostra os gráficos e as correlações obtidas entre GC e os contatos entre os agregados da mistura asfáltica. Os gráficos mostram que a correlação obtida entre o comprimento dos contatos e o GC ($R^2 = 0,45$) foi melhor do que a correlação encontrada entre o número de contatos e o GC ($R^2 = 0,36$).

Figura 36:(a) Gráfico de número de contatos *versus* GC; (b) Gráfico de comprimento de contatos *versus* GC



(a)

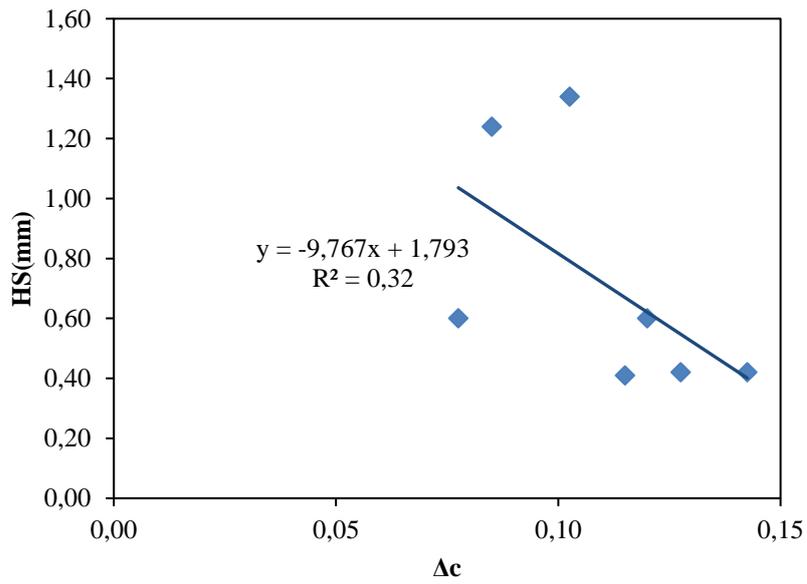


(b)

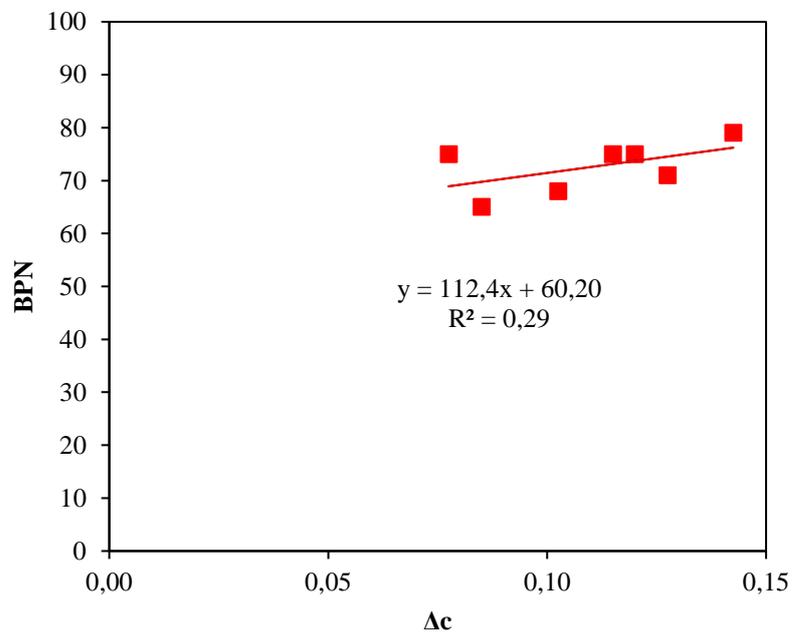
Fonte: Próprio autor (2016)

Os valores de vetor magnitude de orientação dos agregados foram baixos, mostrando o caráter aleatório da direção das partículas. Além disso, os valores médios próximos e os altos valores de CV não permitem avaliar o impacto do GC ou do método de compactação na orientação dos agregados na mistura asfáltica avaliada. Em relação aos valores de vetor magnitude de orientação dos contatos, apesar também dos altos valores de CV encontrados, os valores médios indicam que a não utilização do rolo tandem gera um aumento na aleatoriedade do direcionamento dos contatos entre as partículas. O Δc quando comparado aos outros valores obtidos através dos dados fornecidos pelo iPas2, foi o parâmetro que gerou melhor correlação com os resultados de textura obtidos em campo (HS e BPN). A Figura 37 apresenta as correlações entre os resultados de textura e Δc .

Figura 37: (a) Gráfico de Δc versus HS (b) Gráfico de Δc versus BPN



(a)



(b)

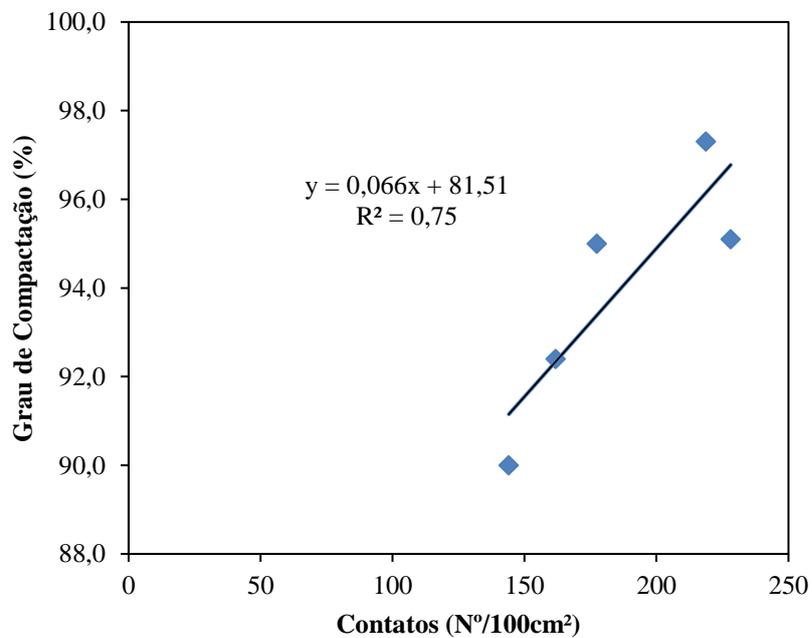
Fonte: Próprio autor (2016)

Apesar da baixa correlação para os valores de HS e BPN em relação ao Δc , é possível perceber que há uma tendência de aumento na macrotextura a medida que aleatoriedade da

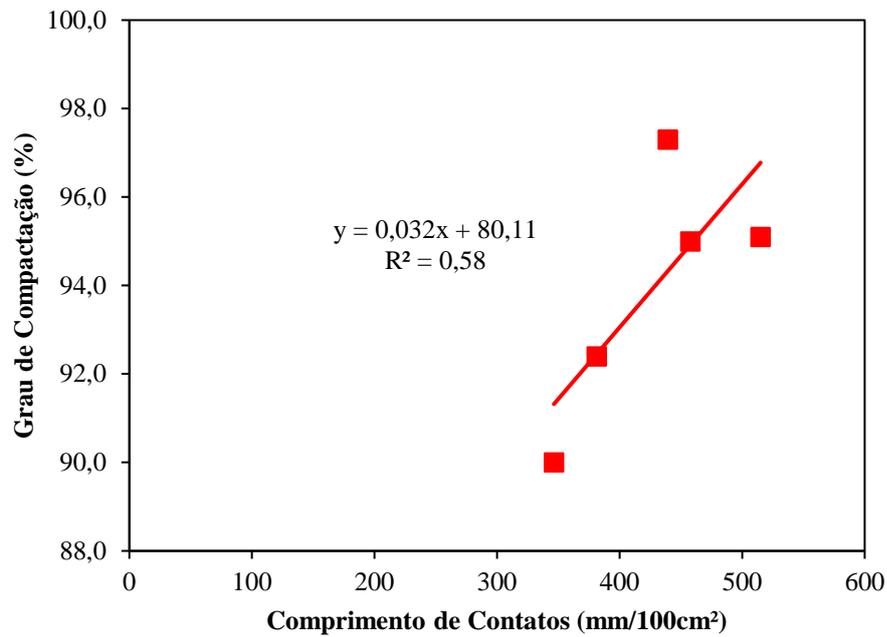
direção dos contatos aumenta. Para microtextura acontece o oposto, a medida que a aleatoriedade na direção dos contatos diminui a microtextura aumenta.

Quando a análise dos dados é realizada apenas para os trechos I, III, V, VI e VII, trechos onde o rolo tandem foi usado, percebe-se que as correlações encontradas são melhores quando comparadas às obtidas nas Figuras 36 e 37. A Figura 38 apresenta os gráficos e as correlações obtidas entre GC e os contatos entre os agregados das misturas asfálticas I, III, V, VI e VII.

Figura 38: (a) Gráfico de número de contatos *versus* GC; (b) Gráfico de comprimento de contatos *versus* GC



(a)



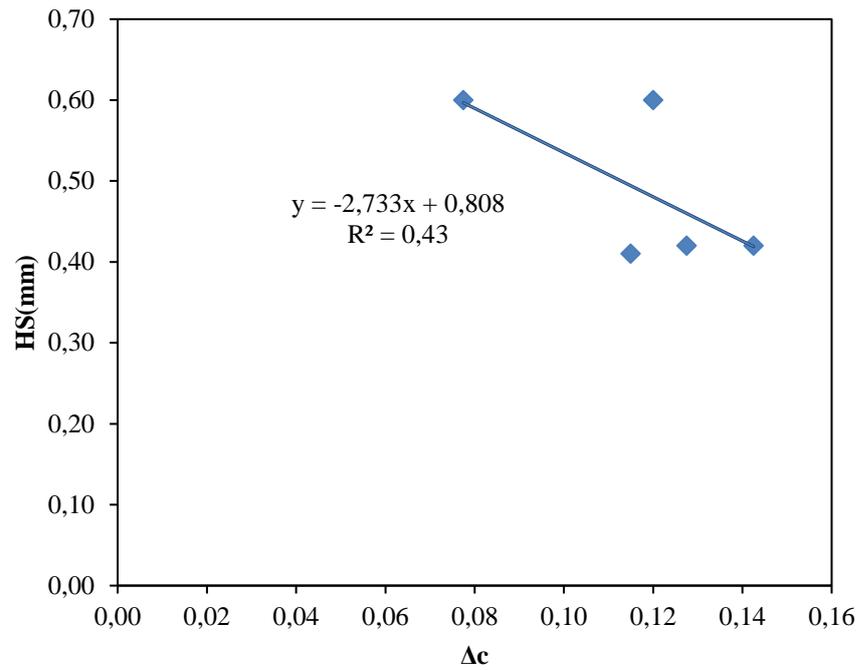
(b)

Fonte: Próprio autor (2016)

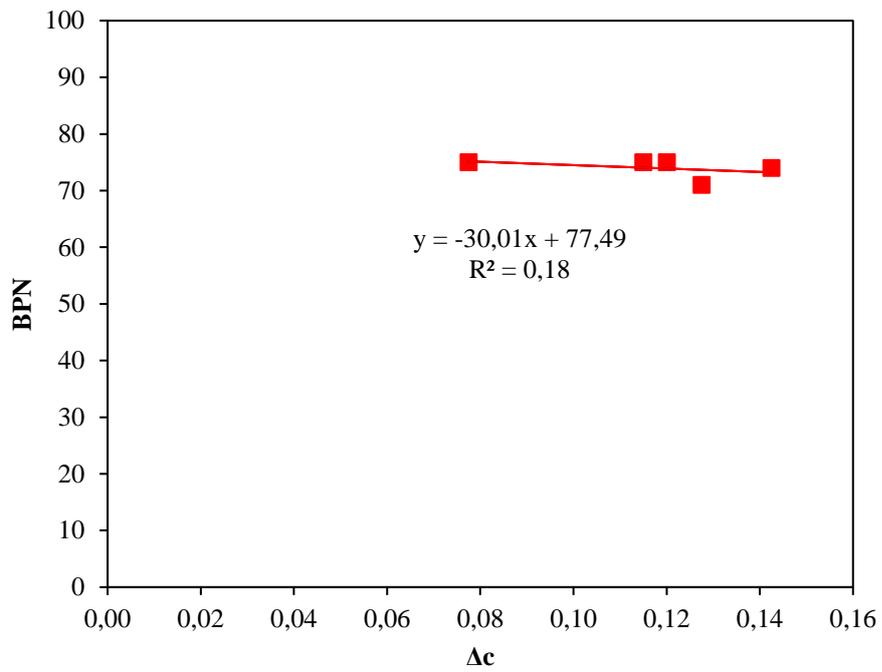
Os gráficos, ao contrário do obtido anteriormente, mostram que a correlação obtida entre o número de contatos e o GC ($R^2 = 0,75$) foi melhor do que a correlação encontrada entre o comprimento dos contatos e o GC ($R^2 = 0,58$). Provavelmente, isto ocorreu pelo fato de o método de compactação dessas misturas serem mais próximos entre si, tendo sido utilizado nestes casos o rolo tandem, mostrando a influência que este equipamento tem no intertravamento e acomodação dos agregados da mistura asfáltica.

O mesmo foi realizado para Δc . Este teve os seus valores obtidos através dos dados fornecidos pelo iPas2 comparados aos resultados de HS e BPN. A Figura 39 apresenta as correlações entre os resultados de textura e Δc .

Figura 39: (a) Gráfico de número de contatos *versus* GC (b) Gráfico de comprimento de contatos *versus* GC



(a)



(b)

Como encontrado anteriormente, nota-se que a medida que aumenta a macrotextura a aleatoriedade da direção dos contatos aumenta, enquanto que para microtextura, diferente do encontrado anteriormente, a medida que a aleatoriedade na direção dos contatos aumenta a microtextura também aumenta. Neste caso, pode-se observar que a correlação entre HS e Δc foi superior ($R^2 = 0,43$) do que quando analisou-se para todos os trechos juntos, contudo a correlação entre BPN e Δc foi inferior ($R^2 = 0,18$). Por se tratar de posicionamento de contatos é esperado que esta correlação seja mais satisfatória para os valores de macrotextura, macrotextura está mais relacionada com a granulometria, enquanto a microtextura esta mais relacionada a textura superficial do agregado, não sendo o Δc um bom parâmetro para microtextura.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para análise de textura de misturas asfálticas aplicadas em pavimentos aeroportuários, através do uso de PDI (AIMS), com aplicação em trechos de campo. Nesta análise, foi avaliada a correlação entre os resultados de textura obtidos através de PDI e de ensaios convencionais, além de avaliar como os parâmetros de propriedades de forma dos agregados, compactação e estrutura interna se relacionam com textura de misturas asfálticas.

Em relação a granulometria, para as misturas asfálticas avaliadas neste estudo, o resultados mostraram que as misturas CA1 e CA2, que apresentaram 33% e 43% de material retido entre as peneiras de 9,5mm e de 2,36mm, respectivamente, geraram diferenças significativas nos resultados dos ensaios de macrotextura (mancha de areia e AIMS). Os valores de HS para CA1 e CA2 foram 0,42mm e 0,37mm, respectivamente, enquanto que os valores de MPD, considerando o distanciamento de 0,30mm, foram de 0,96mm e 0,50mm. Assim, é possível observar que os dois ensaios apontaram para um tendência de aumento de macrotextura a partir da redução da quantidade de material retido entre as peneiras 9,5mm e 2,36mm.

Quanto as propriedades de forma do agregados, esperava-se que o aumento da angularidade dos agregados gerasse aumento na macrotextura das misturas asfálticas, contudo com os valores de angularidade e HS obtidos ocorreu o inverso, levando a crer que o granulometria é preponderante na macrotextura. Em relação a textura superficial dos agregados, espera-se que o aumento da mesma acarrete em uma maior microtextura da mistura asfáltica, porém os resultados de textura superficial da matriz pétreo diferiram em 20,8%, não gerando impacto nos valores de BPN obtidos. Araujo (2014) avaliou o impacto da textura superficial da matriz pétreo de duas misturas asfálticas, a qual uma delas era composta por agregados antes do ensaio de Abrasão Los Angeles e a outra por agregados após o Abrasão Los Angeles, a diferença de textura superficial da matriz pétreo das duas misturas foi de 18% e não gerou impacto nos resultados de microtextura obtidos.

Para os métodos de compactação de campo avaliados, os resultados obtidos em campo mostraram ainda que o uso do rolo tandem, após o uso do rolo de pneus, provocou uma queda (70%) nos valores de macrotextura, ocasionado pela carga contínua e linearmente uniforme em toda a extensão dos cilindros. Contudo, não há como descartar a utilização do rolo tandem, visto que este é importante com relação aos seguintes aspectos: (i) para que a mistura

atinga GC exigido para revestimentos aeroportuários, (ii) para que sejam retirados possíveis defeitos deixados pela vibroacabadora ou pelo rolo de pneus e (iii) para melhor acomodação dos agregados no pavimento, visto que partículas muito expostas podem ser pontos de fragilidade e a causa da desagregação do revestimento, diminuindo, assim, a vida útil do mesmo. Portanto, deve-se encontrar uma quantidade de passadas ideal para cada rolo de tal forma que a mistura atinja o GC exigido, assim como os parâmetros de textura. Quanto a vibração do rolo tandem, os trechos VI e VII mostram que houve um aumento no GC com a vibração do rolo, porém os HS e BPN se mantiveram valores de HS e BPN, apontando que a vibração do rolo tandem não impacta das propriedades de textura da mistura asfáltica. Ainda sobre a compactação, quando avaliadas as misturas que foram compactadas com o rolo tandem (trechos I, III, V, VI e VII), foi obtida uma boa correlação ($R^2 = 0,79$) entre HS e GC, demonstrando assim o aumento da macrotextura com a queda do GC. Para os valores de BPN a correlação ($R^2 = 0,54$) foi considerada razoável, sendo esta correlação inferior a citada anteriormente, mostrando assim que a macrotextura está mais ligada a granulometria e as propriedades volumétricas da mistura asfáltica. Estes resultados mostram que, em casos onde há a escassez de agregados e/ou dificuldade para atingir os parâmetros de macrotextura e microtextura de revestimentos asfálticos aeroportuários, a diminuição do GC surge como alternativa, desde que a mistura atenda aos parâmetros mecânicos exigidos, sendo esta a determinante para a amplitude de GC da mistura asfáltica.

Quanto aos CPs moldados em laboratório os resultados de MPD mostraram que para as amostras compactadas com o uso do CGS, o GC não causou impacto na macrotextura, além disso os valores de MPD obtidos para os CPs de laboratório compactados no CGS foram próximos aos MPDs encontrado em campo quando houve a utilização do rolo tandem. Já para os CPs moldados com o CM foi possível observar que valores de MPD de 1,31 e de 0,74, com valores de GC de 96,9% e 94,4%, respectivamente, levam a crer que para o CM o GC traz grande impacto na macrotextura. Além disso, para valores mais baixos de GC, os resultados obtidos para as amostras compactadas com o uso do CM se aproximaram da macrotextura de campo quando apenas rolos de pneus foram utilizados.

Para os resultados de macrotextura e microtextura obtidos através do AIMS após a análise da mistura CA1 executada em campo, nota-se que há uma tendência de aumento no MPD a medida que o espaçamento de leitura do equipamento diminui. Isto ocorre devido a leitura a cada 0,30mm ter mais pontos que as de 0,45mm e 0,60mm e, aumentando assim a probabilidade de obter pontos mais altos, contudo deve-se tomar cuidado com os *outliers* que

também tendem a surgir com a diminuição do espaçamento das leituras. Os valores de microtextura obtidos através do uso do AIMS não sofreram grandes variações quando o parâmetro de distância das leituras foi alterado devido ao fato da análise de microtextura realizada com o uso do AIMS ser realizada através de imagens coletadas nas três últimas varreduras, enquanto a distância é um parâmetro utilizado apenas na primeira varredura. Ao comparar com os resultados obtidos através de ensaios tradicionais (mancha de areia e pêndulo britânico), foi possível observar que para macrotextura, principalmente quando o espaçamento de leitura adotado no AIMS foi 0,30mm, existe uma boa correlação ($R^2 = 0,71$) entre os valores de MPD e de HS. Além disso, os parâmetros de inclinação das equações das regressões lineares obtidas nas correlações, para qualquer espaçamento adotado no AIMS, foram próximos entre si, assim como também foram próximos da inclinação apontada na norma ASTM E 1845 (2009), mostrando que a macrotextura obtida com o AIMS apresenta sensibilidade próxima aquela obtida através de outros ensaios que fornecem o MPD como resultado. Já para os valores de intercepto, os valores encontrados com o AIMS foram mais próximos de zero, mostrando a tendência do MTD ser zero quando o MPD obtido através do AIMS for zero. Já para os valores de microtextura, os resultados gerados pelo AIMS não geraram correlação satisfatória com os valores de BPN ($R^2 = 0,14$). Um fator que pode ter contribuído para essa baixa correlação é a proximidade dos valores de BPN, não tendo sido o AIMS sensível o suficiente para diferenciar a microtextura das amostras avaliadas.

Os resultados obtidos no iPas2, como era esperado, mostraram que o intertravamento dos agregados na mistura asfáltica está ligado ao GC da mesma, visto que a quantidade de contatos e o comprimento dos mesmos tendem a crescer a medida que o GC aumenta, chegando a um coeficiente de determinação de 0,75 entre o número de contatos e o GC, quando avaliadas apenas as misturas que foram compactadas com o rolo tandem. Quando comparado aos resultados de macrotextura e microtextura (HS e BPN), o vetor magnitude dos contatos foi o parâmetro que gerou a melhor correlação. Para os resultados de macrotextura a correlação obtida foi $R^2 = 0,32$. Contudo, quando avaliada apenas os trechos I, III, V, VI e VII, trechos os quais houve a presença do rolo tandem, o coeficiente de determinação obtido foi 0,43. Esses valores mostram que o aumento do Δc tende a diminuir o HS, demonstrando que o alinhamento dos contatos tende a provocar o repouso do agregado no pavimento, diminuindo a exposição de quinas (angularidade) na superfície. Já para os valores de microtextura, a correlação encontrada foi $R^2 = 0,29$, tendo esta correlação caído ($R^2 = 0,18$), quando levado em consideração apenas os trechos I, III, V, VI e VII, demonstrando que Δc é

uma propriedade que está ligada a granulometria e compactação da mistura asfáltica, portanto não é um bom parâmetro para microtextura.

Diante do estudo desenvolvido, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Correlacionar os resultados obtidos com o uso do AIMS com os resultados obtidos utilizando outras técnicas de PDI para análise de textura de misturas asfálticas;
- b) Correlacionar os resultado de textura do AIMS com os resultados de ensaios de atrito realizados em aeroportos;
- c) Avaliar outros tipos de revestimentos asfálticos quanto a textura e criar uma classificação de macrotextura e microtextura própria para o AIMS;
- d) Avaliar o aumento de textura com a diminuição do GC em face da perda nas propriedades mecânicas;
- e) Utilizar outros métodos que provoquem perda de angularidade e de textura superficial (quebra e polimento) dos agregados para avaliar a sensibilidade do AIMS quanto a análise de textura do revestimento asfáltico;
- f) Avaliar a estrutura interna de misturas asfálticas através do iPas2 através de cortes horizontais próximos ao topo do CP e correlacionar com a textura da mistura asfáltica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Resolução 236: Requisitos de Aderência Para Pistas de Pouso e Decolagem**. 2012.

AIREY, G. D.; HUNTER, A. E.; COLLOP, A. C. The effect of asphalt mixture gradation and compaction energy on aggregate degradation. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 972-980, 2008.

AL ROUSAN, T. M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. 2004. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, College Station, TX, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2041 (2000): Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Mixtures**. USA, 2000.

_____. **ASTM D2726 (2000): Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures**. USA, 2000.

_____. **ASTM D4867 (1988): Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures**. USA, 1988.

_____. **ASTM D6928 (2010): Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus**. USA, 2010.

_____. **ASTM E303-98 (1998): Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**. USA, 1998.

_____. **ASTM E867-97 (2012): Terminology Relating to Vehicle-Pavement Systems**. USA, 2012.

_____. **ASTM E965-01 (2001): Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. USA, 2001.

_____. **ASTM E274-97 (1997): Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full Scale Tire**. USA, 1997.

_____. **ASTM E 1845-09 (2009): Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth**. USA, 2009.

ANOCHIE-BOATENG, J.K.; KOMBA, J.J.; MVLASE, G.M. Three-dimensional Laser Scanning Technique to Quantify Aggregate and Ballast Shape Properties. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 389-398, 2013.

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

ARAUJO, V. M. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Utilização do Processamento Digital de Imagens para Caracterização de Material Fresado. *In: XXVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, 2013, Belém.*

ARAUJO, V. M. C. **Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens.** 2014. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**, Manual Series, n. 4, 1989.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Avaliação do Processo de Produção de Agregados por Meio da Utilização Processamento Digital de Imagens. *In: XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, 2011, Belo Horizonte.*

BESSA, I. S. **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas.** 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação da Influência da Britagem nas Propriedades de Forma dos Agregados por Meio do Processamento Digital de Imagens.** 2015. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 35 - Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”.** 1998.

_____. **DNER-ME 79 – Agregado – equivalente de areia.** 1994.

_____. **DNER-ME 81 – Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.** 1998.

_____. **DNER-ME 83 – Agregados – análise granulométrica.** 1998.

_____. **DNER-ME 117 – Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente.** 1994.

_____. **DNER-ME 84 – Agregado miúdo – determinação da densidade real.** 1995.

_____. **DNER-ME 383 – Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro.** 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-ES 031 - Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos,** Ministério dos Transportes, 2006.

DUBOIS V.; LA ROCHE, C. D.; BURBAN, O. Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 885-897, 2010.

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

FURLAN, A. P.; GOUVEIAL. T.; FABBRIG. T.P.; FERNANDES JÚNIOR J. L. Influência de Características dos Agregados na Susceptibilidade a Dano por Umidade de Misturas Asfálticas. *In: 17º Encontro de Asfalto – IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás)*, 2004, Rio de Janeiro.

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.

HADIWARDYO, S. P.; SINAGA, E. S.; FIKRI, H. The Influence of Buton Asphalt Additive on Skid Resistance Based on Penetration Index and Temperature. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 5-10, 2013.

ICAO. **Aerodrome Design Manual - Part 2: Taxiways, Aprons and Holding Bays**. 4th Edition. International Civil Aviation Organization. Montreal, 2005.

IAC 4302. **Instrução de Aviação Civil - Requisitos de Resistência a Derrapagem para Pistas de Pouso e Decolagem**, 2001.

KUCHIISHI, A. K.; CALLAI, S. C.; VIEIRA, T.; BERNUCCI, L. L. B. Estudo da Macrot textura do Pavimento a Partir do Uso de Ensaio de Mancha de Areia e Drenabilidade em Conjunto com Análise da Superfície por Estereoscopia. *In: XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET*, 2014, Curitiba.

MAHMOUD, E. M. **Development of Experimental Methods for the Evaluation of Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage**. 2005. Dissertação de Mestrado. Texas A&M University, College Station, TX, 2005.

MASAD, E. A.; M UHUNTHAN, B.; SHASHIDHAR, N.; HARMAN, T. Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 13, n. 2, p. 88-95, 1999.

MASAD, E. A.; LITTLE, D. N.; TASHMAN, L.; SAADEH, S.; AL ROUSAN, T.; SUKHWANI, R. Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance. **Research Report ICAR 203-1**, 2003.

MASAD, E. A. Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications. **Report 5-1707-01-1**, 2004.

MASAD, E. A. X-ray Computed Tomography of Aggregates and Asphalt Mixes. **Materials Evaluation**, p. 775-783, 2004.

MASAD, E.; AL ROUSAN, T.; BATHINA, M.; MCGAHAN, J.; SPIEGELMAN, C. Analysis of aggregate shape characteristics and its relationship to hot mix asphalt performance. **Road Materials and Pavement**, v. 8, n. 2, p. 317-350, 2011.

MELO, M. A. **Avaliação da Configuração Geométrica de Saídas de Pista de do Aeroporto Internacional Pinto Martins: Estudo de Caso**. 2014. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

MENEZES, M. V. P. **Estudo das Características de Superfície de Pavimentos Rodoviários para Análise da Segurança do Tráfego**. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H.; LEITE, L.; CAMPOS E. F. Uso da Tomografia Computadorizada e de Imagens Digitais para o Estudo de Misturas Asfálticas. *In*: 18º Encontro de Asfalto – IBP, 2006, Rio de Janeiro.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. 2008. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Produzidas com Ligantes Asfálticos Modificados por Ácido Polifosfórico e Aditivos Poliméricos, Enfatizando a Resistência à Deformação Permanente**. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2012.

PAZOS, A. G. **Efeitos de Propriedades Morfológicas de Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas**. 2015. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

PIDWERBESKY, B. D.; GRANSBERG, D. D. Road Surface Texture Measurement Using Digital Processing and Information Theory. **Land Transport New Zealand**, 2006.

REZAEI, A.; HOYT, D.; MARTIN, A.E. Simple Laboratory Method for Measuring Pavement Macrotecture. **Transportation Research Record**, p. 146-152, 2011.

RIBAS, C. R. **Avaliação da Influência do Método de Compactação na Macroestrutura de Misturas Asfálticas Densas Utilizando o Processamento Digital de Imagens**. 2016. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2016.

RODRIGUES, A. C. **Avaliação da Influência da Granulometria na Aderência Pneu-Pavimento**. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2013.

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

SEFIDMAZGI, N. R.; BAHIA, H. Effect of Compaction Conditions on Aggregate Packing Using 2-dimensional Image Analysis and Relation to Performance of HMA. **Materials and Structures**, p. 1313-1324, 2014.

SILVA, J. P. S. **Aderência Pneu-Pavimento em Revestimentos Asfálticos Aeroportuários**. 2008. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

WANG, W.; YAN, X.; HUANG, H.; CHU, X.; ABDEL-ATY, M. Design and Verification of a Laser Based Device for Pavement Macrottexture Measurement. **Transportation Research Record**, p. 19-26, 2011.

WNEK, M. A.; TUTUMLUER, E.; MOAVENI, M. Investigation of Aggregates Properties Influencing Railroad Ballast Performance. *In: 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2012.