



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

**DANIELE SOARES IBIAPINA**

**PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE  
FORMA DE AGREGADOS CARACTERIZADOS COM O USO DO  
PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS  
BRASILEIROS**

**FORTALEZA**

**2018**

DANIELE SOARES IBIAPINA

PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE  
FORMA DE AGREGADOS CARACTERIZADOS COM O USO DO PROCESSAMENTO  
DIGITAL DE IMAGENS PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS BRASILEIROS

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

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

Coorientadora: Prof. Dra. Sílvia Maria de Freitas

FORTALEZA

2018

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)

---

- I21p Ibiapina, Daniele Soares.  
Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do Processamento Digital de Imagens para a seleção de materiais brasileiros / Daniele Soares Ibiapina. – 2018.  
176 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.

Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

Coorientação: Profa. Dra. Sílvia Maria de Freitas.

1. Processamento Digital de Imagens . 2. Propriedades de Forma de Agregados. 3.  
Esqueleto Mineral de Misturas Asfálticas. 4. Estatística. I. Título.

CDD 388

---

DANIELE SOARES IBIAPINA

PROPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE  
FORMA DE AGREGADOS CARACTERIZADOS COM O USO DO PROCESSAMENTO  
DIGITAL DE IMAGENS PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS BRASILEIROS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 18/06/2018.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Professora Sílvia Maria de Freitas, D.Sc. (Coorientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Professora Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc. (Examinadora Externa)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

---

Professor José de Araújo Nogueira Neto, D.Sc. (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Goiás (UFG)

---

Professor Jose Carlos de Araújo, D.Sc. (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Professor Manoel Mendonça de Castro Neto, Ph.D. (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar esta Tese de Doutorado à minha mãe, Airan Leite Barbosa Soares (*in memoriam*), que dedicou parte de sua curta vida para educar seus quatro filhos, com amor e dedicação exclusiva. Graduou-se em pedagogia, aos 50 anos de idade e, com ela aprendemos a importância do estudo, do aprendizado, do conhecimento e da cultura. Minha mãe nos ensinou a valorizar e a respeitar o PROFESSOR, tanto que três de seus quatro filhos se tornaram professores e nos ensinou, também, que não há idade para se reinventar.

Ao meu pai, Marco Antonio e aos meus irmãos, Jorge, Gustavo e Bruno pelo apoio, ao longo desses anos dedicados ao ensino, ao estudo e à pesquisa.

Ao meu irmão, Jorge Soares, meu amigo, meu colega de faculdade, de profissão e meu professor, no doutorado, um agradecimento especial, por ser o grande responsável pela minha decisão de tentar uma vaga para ingressar no PETRAN e por seu incansável incentivo para que eu me reconstruísse como professora, como pesquisadora e como mulher.

Aos meus filhos, meus três amores, Letícia, José e Sofia, que por compreenderem a importância da educação na formação pessoal do ser humano, foram tão pacientes comigo neste processo que é realizar um doutorado. Saibam meus filhos, que se a felicidade na sua multidimensionalidade é composta de emoções positivas, relações, realizações e significados, vocês me fazem muito feliz! Tornam-me uma pessoa melhor e, sem sequer perceberem, fazem tudo ter sentido. Vocês três compõem o que há de mais belo nas entrelinhas desta tese. Muito obrigado, de coração!

Às minhas amigas de infância, filhas das amigas da minha mãe, amizade que perdura por gerações, pelos momentos de descontração e alegria.

Aos meus companheiros e colegas do PETRAN, do LMP, do DET e do DENA, pela colaboração, pela ajuda, pela solidariedade durante o árduo processo de tornar-se doutora.

À minha querida orientadora, Professora Verônica, pela sua sabedoria e tolerância ao longo desses anos; por guiar esse percurso com maestria, inteligência e paciência.

À professora Sílvia, minha coorientadora, por sua dedicação a essa pesquisa.

Aos Professores Laura Motta, José Nogueira Neto, José Carlos de Araújo e Manoel de Castro Neto, pelas suas participações, como membros da Banca Examinadora de Defesa de Doutorado.

Ao LMP e à COPPE, por terem cedido seus equipamentos e seus dados para a realização desta pesquisa.

Sou muito grata a todos que direta, ou indiretamente, participaram desta pesquisa. Esse doutorado é fruto do companheirismo de muitos. Assim como a dança, que tanto fez parte da minha vida, o doutorado também é arte e, o defendo no exato dia que completo 50 anos de vida. Na ciência e na arte há sempre muito mais por fazer. Entre as lições aprendidas nesses anos, concluo este breve registro da minha gratidão: a ciência nos ilumina, as relações são o nosso maior tesouro e, na academia da dança e do conhecimento, tudo fica mais belo com muito esforço e com muito AMOR.

## RESUMO

O Processamento Digital de Imagens (PDI) está estabelecido como ferramenta para a caracterização das propriedades de forma de agregados (forma, angularidade e textura superficial). Entre as principais técnicas de PDI, utilizadas na área de Infraestrutura de Transportes, está o uso do *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2). Esta pesquisa teve como objetivo principal propor um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados, caracterizados com o uso do AIMS2, o que contribui para a adequada seleção de materiais brasileiros, ainda na etapa de projeto, para a produção de misturas asfálticas mais resistentes aos principais danos que afetam os pavimentos. Para tanto, foi organizado um banco de dados de agregados analisados com o uso do AIMS2, composto por vinte agregados, com mineralogias distintas, oriundos de diferentes localidades, abrangendo oito estados brasileiros. Por meio de métodos estatísticos, os valores limites das classes do sistema de classificação proposto foram calculados a partir do banco de dados organizado. Posteriormente, a qualidade das medidas das propriedades de forma de agregados, geradas com o uso do AIMS2 foi avaliada, através de análises estatísticas de repetibilidade e de reprodutibilidade. Foi proposto um método de análise, com base na combinação de duas abordagens, a da estatística descritiva e a da estatística inferencial. Utilizou-se um agregado de origem fonolítica coletado em uma pedreira da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), produzido por diferentes processos de britagem e analisado em dois equipamentos distintos. Por fim, o impacto da mudança das propriedades de forma de agregados, devido ao desgaste com o uso do Micro Deval (MD), na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas foi avaliado. Um agregado gnáissico, coletado na RMF, foi utilizado na composição das misturas asfálticas e, suas propriedades de forma foram analisadas no AIMS2, antes e depois do desgaste no MD. O esqueleto mineral das misturas asfálticas foi analisado, em termos de intertravamento de agregados, com o uso do *software Image Processing and Analysis System 2* (iPas2). Os resultados mostraram que: um agregado pode ser classificado de maneira diferente, dependendo da classificação adotada; o AIMS2 atendeu aos critérios estabelecidos de repetibilidade e de reprodutibilidade com base no método proposto; para avaliar o impacto na formação do esqueleto mineral das misturas asfálticas, quando o indicador for o intertravamento de agregados, as mudanças nas propriedades de forma não devem ser avaliadas isoladamente e sim em conjunto com as mudanças na granulometria e nos parâmetros de dosagem das misturas asfálticas. O sistema de classificação de propriedades de forma proposto é uma ferramenta com potencial para categorizar agregados brasileiros. Por

fim, contribuiu-se para a avaliação e a seleção de agregados, ainda na fase de projeto, a depender das propriedades requeridas para a aplicação das misturas asfálticas produzidas.

**Palavras-chave:** Processamento Digital de Imagens (PDI). Propriedades de Forma de Agregados. Esqueleto Mineral de Misturas Asfálticas. Estatística.

## ABSTRACT

Digital Processing of Images (DPI) is established as a tool for the characterization of aggregate shape properties (shape, angularity and surface texture). Among the main techniques of DPI used in the area of transport infrastructure is the use of the Aggregate Imaging Measurement System 2 (AIMS2). This research aims to propose a classification system of the aggregate properties characterized using AIMS2, contributing to the selection of Brazilian materials during the design process for the production of Hot Mixture Asphalt (HMA) more resistant to major pavement distresses. A database analyzed with AIMS2 was organized with twenty distinct aggregates with mineralogy from different locations, covering eight Brazilian States. Through statistical methods, the limit values of the classification system proposed were calculated from the database. Subsequently, the quality of the measurements of the aggregate shape properties generated using AIMS2 was evaluated through statistical analysis of repeatability and reproducibility. A method was proposed in this research, based on the combination of two approaches, descriptive statistics and inferential statistics. It was used a fonolitic aggregate from a quarry in the Metropolitan Region of Fortaleza (MRF) produced by different crushing processes and analyzed in two equipments. Finally, the impact of the change of the aggregate shape properties through wear at the Micro Deval (MD) in the formation of the mineral skeleton of HMAs was evaluated through the PDI. An aggregate of gneiss origin collected in the MRF was used in the composition of the HMAs. Its shape properties were analyzed in the AIMS2, before and after of the wear on the MD. The mineral skeletons of the HMAs were analyzed in terms of aggregate interlocking with the use of the Image Processing and Analysis System 2 (iPas2) software. The results showed that: an aggregate may be classified differently, depending on the classification adopted; AIMS2 has met the criteria established for repeatability and reproducibility based on the proposed methodology; to assess the impact on the mineral skeleton of HMAs, when the criterion is aggregate interlock, changes in shape properties should not be evaluated alone but along with changes in the particle sizes and in the mix design parameters. The proposed classification system is a tool with great potential to categorize Brazilian aggregates. Finally, there is a contribution to evaluating and selecting aggregates, still in the mix design process, depending on the properties required for the application of the mixtures produced.

**Keywords:** Digital Image Processing. Agregate Shape Properties. Mineral Skeleton of Hot Asphalt Mixtures. Statistics.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	12
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i> .....	12
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i> .....	13
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do Documento</b> .....	13
<b>2</b>	<b>ELABORAÇÃO DE UM SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS CARACTERIZADOS COM O USO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS A PARTIR DE MATERIAIS ORIUNDOS DO BRASIL ..</b>	15
<b>2.1</b>	<b>Introdução</b> .....	15
<b>2.2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b> .....	16
<i>2.2.1</i>	<i>Propriedades de forma de agregados</i> .....	16
<i>2.2.2</i>	<i>Processamento Digital de Imagem (PDI)</i> .....	19
<i>2.2.2.1</i>	<i>Aggregate Imaging Measurement System 2 (AIMS2)</i> .....	21
<b>2.3</b>	<b>Materiais e Método</b> .....	23
<i>2.3.1</i>	<i>Materiais</i> .....	23
<i>2.3.2</i>	<i>Método</i> .....	25
<b>2.4</b>	<b>Resultados e Discussões</b> .....	30
<b>2.5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	40
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE DAS MEDIDAS DE PROPRIEDADES DE FORMA OBTIDAS A PARTIR DO USO DO AIMS2</b> .....	41
<b>3.1</b>	<b>Introdução</b> .....	41
<b>3.2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b> .....	42
<b>3.3</b>	<b>Materiais e Método</b> .....	44
<i>3.3.1</i>	<i>Materiais</i> .....	44
<i>3.3.2</i>	<i>Método</i> .....	45
<i>3.3.2.1</i>	<i>Método proposto por Bathina (2005)</i> .....	47
<i>3.3.2.2</i>	<i>Método proposto nesta pesquisa</i> .....	48
<b>3.4</b>	<b>Resultados e Discussões</b> .....	50
<i>3.4.1</i>	<i>Resultados obtidos com o método proposto por Bathina (2005)</i> .....	50
<i>3.4.2</i>	<i>Resultados obtidos com o método proposto nesta pesquisa</i> .....	51

3.4.2.1	<i>Repetibilidade entre medidas de propriedades de forma</i> .....	52
3.4.2.2	<i>Reprodutibilidade entre operadores</i> .....	67
3.4.2.3	<i>Reprodutibilidade entre laboratórios</i> .....	75
3.4.2.3.1	Curvas de distribuição acumulada das propriedades de forma dos laboratórios	76
<b>3.5</b>	<b>Considerações Finais</b> .....	81
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MUDANÇA DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS NA FORMAÇÃO DO ESQUELETO MINERAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS</b> .....	83
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b> .....	83
<b>4.2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b> .....	84
<b>4.3</b>	<b>Materiais e Método</b> .....	89
<b>4.3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	89
<b>4.3.2</b>	<b>Método</b> .....	90
4.3.2.1	<i>Desgaste com o uso do Micro Deval (MD)</i> .....	91
4.3.2.2	<i>Produção das misturas asfálticas</i> .....	92
4.3.2.3	<i>Parâmetros do esqueleto mineral</i> .....	93
4.3.2.4	<i>Análise do esqueleto mineral com o uso do Image Processing and Analysis System 2 (iPas2)</i> .....	95
<b>4.4</b>	<b>Resultados e Discussões</b> .....	98
<b>4.4.1</b>	<b>Agregados</b> .....	98
<b>4.4.2</b>	<b>Misturas Asfálticas</b> .....	104
<b>4.5</b>	<b>Considerações Finais</b> .....	109
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	111
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	114
	<b>APÊNDICE A: ESBOÇO DE NORMA BRASILEIRA PARA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS COM O USO DO PDI</b> .....	125
	<b>ANEXO A: MODELO DE RELATÓRIO NORMATIVO</b> .....	132
	<b>APÊNDICE B: CÓDIGO R DO MÉTODO DE CLUSTER UTILIZADO NA ELABORAÇÃO DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO PROPOSTO NESTA PESQUISA PARA A ANGULARIDADE</b> .....	136
	<b>APÊNDICE C: PROTOCOLO DE UTILIZAÇÃO DO AIMS2</b> .....	138
	<b>APÊNDICE D: MEDIDAS DESCRITIVAS PARA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE</b> .....	140

<b>APÊNDICE E: CÓDIGO R DA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE PARA A ANGULARIDADE .....</b>	<b>146</b>
<b>APÊNDICE F: CÓDIGO R DA ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE PARA A ANGULARIDADE ENTRE DIFERENTES OPERADORES .....</b>	<b>161</b>
<b>APÊNDICE G: CÓDIGO R DA ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE PARA A ANGULARIDADE ENTRE DIFERENTES LABORATÓRIOS ...</b>	<b>165</b>
<b>APÊNDICE H: CÓDIGO R DO TESTE DE IGUALDADE DAS CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DAS PROPRIEDADES DE FORMA ENTRE DIFERENTES LABORATÓRIOS .....</b>	<b>168</b>
<b>APÊNDICE I: RESULTADOS DOS TESTES DE HIPÓTESE APLICADOS PARA COMPARAR AS MEDIDAS DE PROPRIEDADES DE FORMA GERADAS COM O USO DO AIMS2 .....</b>	<b>170</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA), mais de 90% das rodovias nacionais pavimentadas utilizam revestimento do tipo asfáltico como parte da estrutura dos denominados pavimentos flexíveis. Os componentes das misturas asfálticas (agregados, ligante asfáltico e vazios) formam uma microestrutura complexa da qual os agregados correspondem a cerca de 90%, em volume, e constituem o esqueleto mineral, o qual depende das propriedades de forma (forma, angularidade e textura superficial), dos tamanhos e das proporções de suas partículas. A formação do esqueleto mineral depende, dentre outros fatores, do intertravamento de seus agregados constituintes e exerce uma função importante no desempenho da mistura asfáltica (BAHIA, 2013).

O Processamento Digital de Imagens (PDI) está estabelecido como ferramenta para a caracterização das propriedades de forma de agregados por usar métodos diretos e eficientes (MASAD *et al.*, 2001). Entre as principais técnicas de PDI utilizadas na área de Infraestrutura de Transportes, está o uso do *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2). Esse equipamento fornece a distribuição completa das características de forma para uma amostra de agregado e não somente os valores médios, o que permite a classificação de agregados com diferentes propriedades de forma (AL ROUSAN, 2004). Esse método de PDI se destaca dos demais, por ser capaz de fornecer propriedades de forma a partir de análises de imagens 2D ou 3D das partículas de agregados (AL ROUSAN, 2004; AL ROUSAN *et al.*, 2005; TAYLOR *et al.*, 2006; MASAD *et al.*, 2007a). Os procedimentos para caracterização das propriedades de forma com o uso do AIMS2 estão normatizados, nos Estados Unidos, pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) (AASHTO TP81, 2016) e existe um esboço de norma técnica brasileira em andamento (Apêndice A).

A utilização do PDI para caracterizar o esqueleto mineral formado e a estrutura interna das misturas asfálticas está estabelecida na comunidade científica (MASAD *et al.*, 1998; MASAD; BUTTON; PAPAGIANNAKIS, 2000; SHASHIDHAR *et al.*, 2000; TASHMAN; WANG; THYAGARAJAN, 2007). Coenen, Kutay e Bahia (2011) desenvolveram um *software*, o *Image Processing and Analysis System* (iPas), capaz de avaliar a estrutura interna de misturas asfálticas, utilizando parâmetros (número de zonas de contatos, orientação e segregação dos agregados), analisados a partir do uso de imagens 2D. Na 2ª versão desse *software* (iPas2) foram introduzidos novos parâmetros (extensão e orientação

das zonas de contato) que foram anexados à metodologia para melhorar a compreensão da estrutura interna desses compósitos (SEFIDMAZGI, 2011).

Diante da importância das propriedades de forma de agregados, constituintes do esqueleto mineral, no comportamento das misturas asfálticas, esta pesquisa pretende contribuir para a seleção de agregados, ainda no âmbito de projeto, através de avaliações realizadas em suas propriedades de forma, analisadas com o uso do AIMS2. Calcularam-se novos valores limites, por meio de métodos estatísticos, para propor um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados, a partir de um banco de dados composto por materiais brasileiros. Realizaram-se análises estatísticas de repetibilidade e de reprodutibilidade das medidas de propriedades de forma resultantes de dois equipamentos AIMS2. Avaliou-se a influência da mudança das propriedades de forma de agregados nos parâmetros de contato, orientação e segregação do esqueleto mineral de misturas asfálticas compostas por esses. As propriedades de forma foram alteradas com o uso do equipamento Micro Deval (MD) e os parâmetros descritores do esqueleto mineral foram analisados com o uso do *software* iPas2, antes e depois do uso do MD para provocar a abrasão nos agregados. Com os resultados obtidos, esperou-se colaborar para uma melhor seleção de agregados, baseada nas suas propriedades de forma, ainda na etapa de projeto de misturas asfálticas, que contribuam para o desempenho e o prolongamento da vida útil dos pavimentos e, conseqüentemente, para a segurança do usuário e redução do investimento em execução, manutenção e recuperação de rodovias.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

O objetivo geral desta pesquisa é propor um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados, caracterizados com o uso do AIMS2, o que contribui na seleção de materiais brasileiros, ainda na etapa de projeto, para a produção de misturas asfálticas mais resistentes aos principais danos que afetam os pavimentos.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- 1) Organizar um banco de dados de agregados analisados com o uso do AIMS2, composto por vinte agregados, com mineralogias distintas, oriundos de diferentes localidades, abrangendo oito estados brasileiros;
- 2) Calcular, por meio de métodos estatísticos, os valores limites das classes para a elaboração de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados, baseado nos resultados gerados pelo AIMS2, a partir do banco de dados organizado nesta pesquisa;
- 3) Propor um esboço de norma brasileira para caracterização de agregados com o uso do PDI;
- 4) Elaborar um protocolo de utilização do AIMS2, escrito de forma didática e em português, para seus operadores, no Brasil;
- 5) Avaliar, através de análises estatísticas de repetibilidade e de reprodutibilidade, a qualidade das medidas das propriedades de forma de agregados obtidas com o uso do AIMS2;
- 6) Avaliar o impacto da mudança das propriedades de forma de agregados, gerada através do desgaste dos mesmos com o uso do MD, na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas analisado com o uso do PDI.

### **1.2 Estrutura do Documento**

O presente documento de tese encontra-se organizado em cinco capítulos distintos, conforme descrito a seguir:

*Capítulo 1:* O presente capítulo apresenta a Introdução, que contextualiza esta pesquisa a respeito das propriedades de forma de agregados, do uso do PDI para caracterizá-las e da relação dessas com os parâmetros descritores do esqueleto mineral de misturas asfálticas; apresenta, também, o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa e a estrutura deste documento de tese.

*Capítulo 2:* Este capítulo está escrito no formato de artigo e apresenta um banco de dados organizado, composto por agregados nacionais, analisados com o uso do AIMS2; apresenta, também, um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados elaborado a partir desse banco de dados. Vale ressaltar a

importância de se estabelecer uma metodologia, no âmbito nacional, para a classificação de agregados, baseada nas propriedades de forma destes materiais e poder selecioná-los, ainda na fase de projeto, a depender das propriedades requeridas para a sua aplicação.

*Capítulo 3:* Este capítulo está escrito no formato de artigo e apresenta um protocolo de utilização do AIMS2; apresenta, também, dois métodos para testar, estatisticamente, a repetibilidade e a reprodutibilidade das medidas das propriedades de forma obtidas com o uso do AIMS2. Diante da importância de haver um esboço de norma brasileira para caracterização de agregados com o uso do PDI, os dois equipamentos, em funcionamento, existentes no país foram utilizados para a realização dos testes aplicados nesta pesquisa.

*Capítulo 4:* Este capítulo está escrito no formato de artigo e apresenta uma avaliação do impacto da mudança das propriedades de forma de agregados na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas compostas pelos mesmos. Para isso, foram analisados, através das técnicas de PDI, agregados antes e depois do desgaste provocado com o uso do MD e os esqueletos minerais formados nas misturas asfálticas compostas por esses agregados.

*Capítulo 5:* Este capítulo apresenta as conclusões gerais após a avaliação das propriedades de forma e a proposta de um sistema de classificação elaborado a partir de agregados nacionais, analisados com o uso do AIMS2; após as análises estatísticas realizadas para testar a qualidade das medidas, geradas pelos dois equipamentos AIMS2, em funcionamento no Brasil e após a avaliação da relação entre as propriedades de forma e o esqueleto mineral de misturas asfálticas compostas por esses agregados. Este capítulo contém, também, algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

## **2 ELABORAÇÃO DE UM SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS CARACTERIZADOS COM O USO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS A PARTIR DE MATERIAIS ORIUNDOS DO BRASIL**

### **2.1 Introdução**

Os agregados influenciam diretamente o comportamento da mistura asfáltica na estrutura do pavimento. Além dessa função estrutural, também são responsáveis por conferir textura superficial ao revestimento asfáltico, propriedade que está diretamente ligada à aderência pneu-pavimento, provendo segurança ao rolamento dos veículos. As propriedades de forma dos agregados (angularidade, forma e textura superficial) exercem influência nas interações mútuas dos mesmos e nas interações destes com os outros constituintes da mistura asfáltica (ligante asfáltico e vazios). Conseqüentemente, influenciam na durabilidade, na trabalhabilidade, na resistência ao cisalhamento, na resistência à deformação permanente, ou seja, no desempenho mecânico dos compósitos que compõem as camadas do pavimento (AL ROUSAN, 2004).

O uso do Processamento Digital de Imagem (PDI), em especial o uso do *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2), no Brasil e no mundo, foi bastante difundindo ao longo da última década. Pesquisadores caracterizaram as propriedades de forma de agregados para fins de comparação entre diferentes processos de britagem (DIÓGENES, 2015), propuseram a classificação dos agregados em termos de forma (AL ROUSAN, 2004; MAHMOUD *et al.*, 2010b) e implantaram métodos para avaliação do potencial desses materiais à resistência à quebra, à abrasão e ao polimento (MOAVENI *et al.*, 2014; MAHMOUD; ORTIZ, 2014).

Bessa (2012) e Araujo, Bessa e Castelo Branco (2014) avaliaram os resultados das análises de agregados coletados na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), realizadas no AIMS2 e constataram semelhanças com relação aos valores médios de suas propriedades de forma, ou seja, os agregados foram posicionados, constantemente, nas mesmas faixas da classificação proposta por Al Rousan (2004). Essa constatação levou a questionamentos relacionados ao fato de que os agregados brasileiros poderiam ter características diferentes daquelas encontradas para os agregados americanos, os quais compuseram o banco de dados para a elaboração da classificação proposta por Al Rousan (2004). Diante disso, esta pesquisa

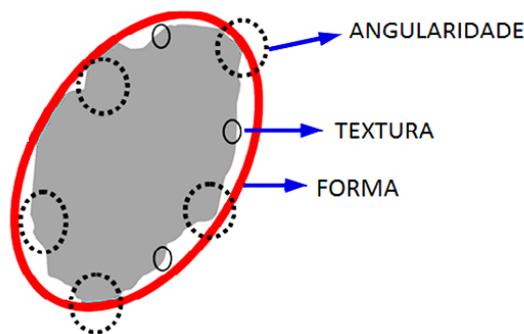
teve como objetivo elaborar um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados, a partir de um banco de dados composto por materiais brasileiros. Espera-se que, no futuro, essa classificação possa ser utilizada para estabelecer critérios objetivos de seleção de agregados, no âmbito de projeto de misturas asfálticas, a fim de otimizar o comportamento mecânico dos revestimentos.

## 2.2 Revisão Bibliográfica

### 2.2.1 Propriedades de forma de agregados

A morfologia das partículas de agregados pode ser representada por três propriedades independentes: forma, angularidade e textura superficial (BARRETT, 1980; MASAD *et al.*, 2001; SUKHWANI; LITTLE; MASAD, 2006). Masad *et al.* (2001) as denominaram de propriedades de forma dos agregados. Segundo Masad (2005), a forma de um agregado está relacionada às suas dimensões, a angularidade relaciona-se aos cantos existentes e a textura superficial, às irregularidades da sua superfície (Figura 2.1).

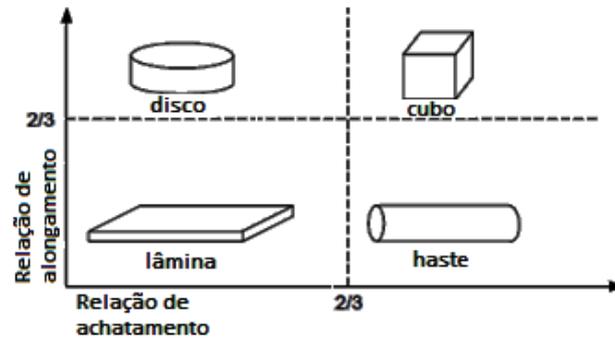
Figura 2.1 – Propriedades de forma de uma partícula de agregado



Fonte: Adaptado de Masad (2005).

Segundo Al Rousan (2004), a forma é a proporção entre as dimensões das partículas dos agregados e pode ser representada pela lamelaridade, que relaciona essas dimensões. A relação de achatamento é a razão entre a menor dimensão e a dimensão intermediária; a relação de alongamento é a razão entre a dimensão intermediária e a maior dimensão. Chen, Lin e Chang (2005) estabeleceram quatro formatos distintos de classificação de agregados, com relação à forma, denominados de: disco, cubo, lâmina e haste (Figura 2.2).

Figura 2.2 – Classificação dos agregados com relação à forma



Fonte: Adaptado de Chen, Lin e Chang (2005).

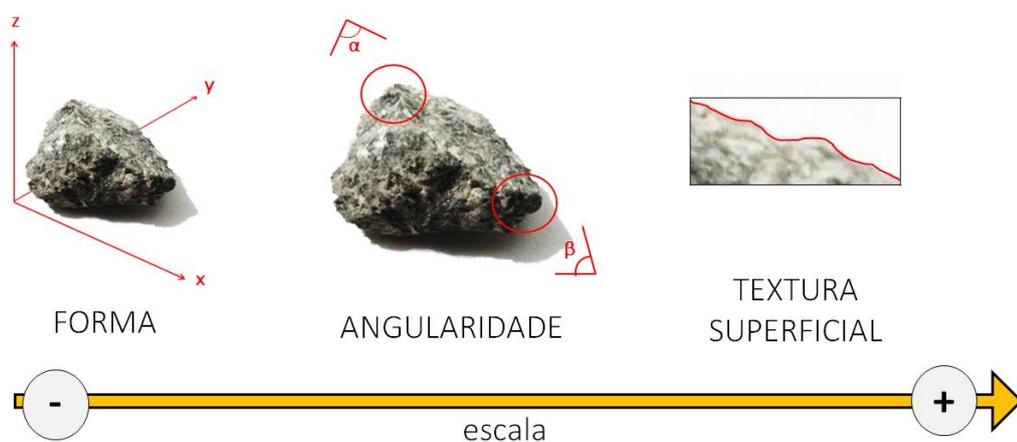
Os ensaios tradicionais utilizados para caracterizar as propriedades de forma dos agregados, no Brasil, são normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pela *Superior Performing Asphalt Pavements* (Superpave). O ensaio de índice de forma descrito pela norma brasileira DNER-ME 086/94, que determina a forma de um agregado graúdo, é realizado passando o material por crivos redondos e redutores, de aberturas específicas a depender do tamanho do agregado. A NBR 7809 (2006), normatizada pela ABNT, descreve um método de ensaio de determinação do índice de forma com a utilização de um paquímetro para medir as dimensões das partículas. Na especificação Superpave, as partículas achatadas e alongadas, do inglês *Flat and Elongated* (F&E), são caracterizadas seguindo a norma ASTM D 4791 (2010). Essa norma preconiza que a forma da partícula de um agregado é representada através da relação entre a sua maior e menor dimensão. Essas medidas são obtidas com o uso de um paquímetro. O resultado desse ensaio determina o percentual de partículas cuja razão, entre a maior e a menor dimensão, é maior do que 5, ou seja 5:1. A especificação Superpave limita o valor deste percentual em 10% do total de partículas. Segundo Buchanan (2000), as partículas do tipo F&E tendem a quebrar durante o processo construtivo e sob as forças de tensão devido ao volume de tráfego. Esse autor e, posteriormente, Gouveia e Fernandes Jr. (2006) sugeriram que a razão 3:1 seria mais adequada do que a razão 5:1. Prowell, Zhang e Brown (2005) também contestam a razão 5:1, especificada pela Superpave e afirmam que não existe uma forte correlação entre a percentagem de partículas F&E e o desempenho das misturas asfálticas para relações, entre maior e menor dimensão, superiores a razão 3:1. Pesquisadores têm relatado que o procedimento da norma ASTM D 4791 (2010) pode gerar resultados

variáveis e dependentes do operador (PROWELL; ZHANG; BROWN, 2005; MASAD *et al.*, 2007b).

Dentre as propriedades de forma (Figura 2.3), a angularidade do agregado é definida como a medida da agudeza dos cantos de uma partícula, ou seja, uma partícula arredondada possui baixa angularidade e uma partícula não arredondada, possui alta angularidade. Masad *et al.* (2003) afirmaram que a angularidade e a textura superficial dos agregados são determinantes para gerar o atrito na interface entre o pneu e o pavimento. Partículas mais angulares apresentam um melhor intertravamento entre elas, aumentando a resistência das misturas asfálticas ao acúmulo de deformações permanentes (KANDHAL; PARKER, 1998; GOUVEIA; FERNANDES JR., 2006; WHITE; HADDOCK; RISMANJOTO, 2006).

As normas ASTM D 5821 (2013) e AASTHO T304 (2008) são adotadas pela metodologia Superpave para a caracterização da angularidade das partículas de agregados graúdos e miúdos, respectivamente. As medidas da angularidade são obtidas, indiretamente, a partir das correlações entre as propriedades de forma e de textura superficial dos agregados. White, Haddock e Rismanjoto (2006) relataram que esses ensaios não quantificam, exclusivamente, o efeito da angularidade e sim uma combinação dos efeitos das propriedades supracitadas.

Figura 2.3 – Forma, angularidade e textura superficial das partículas de agregados



Fonte: Diógenes (2015).

A textura superficial dos agregados não é medida diretamente pelos métodos tradicionais e sim de forma indireta, em conjunto com outras características, como a

angularidade e a forma (MASAD *et al.*, 2007a). A textura superficial está relacionada às irregularidades na superfície da partícula de agregado, ou seja, à rugosidade da mesma, porém em escala tão pequena que não afeta significativamente sua forma (AL ROUSAN, 2004). A textura superficial é uma propriedade importante das partículas de agregados, pois esta influencia na trabalhabilidade, na adesividade, na resistência ao atrito e ao cisalhamento das misturas asfálticas. Apesar de não ser uma das propriedades de consenso estabelecida pela metodologia Superpave, a textura superficial tem sido bastante pesquisada, pois exerce influência significativa no desempenho de misturas asfálticas, com relação às propriedades de atrito e, conseqüentemente, à resistência à derrapagem que o revestimento oferece aos usuários. Resultados de diversas pesquisas têm demonstrado que misturas asfálticas contendo agregados com menor perda de rugosidade, após passarem por testes de abrasão, apresentam maior resistência ao escorregamento, favorecendo a segurança rodoviária (ROBERTS *et al.*, 1996; MAHMOUD, 2005; MASAD; LUCE; MAHMOUD, 2006; MASAD; KASSEM; CHOWDHURY, 2009; MATTOS, 2009; BESSA; CASTELO BRANCO; SOARES, 2012; RODRIGUES, 2013; ARAUJO; BESSA; CASTELO BRANCO, 2014; RODRIGUES; SOARES; BARROSO, 2014).

### **2.2.2 Processamento Digital de Imagem (PDI)**

Os procedimentos experimentais utilizados para a caracterização das propriedades de forma de agregados são, em sua maioria, demorados, empíricos e subjetivos com relação à interpretação dos resultados. Masad *et al.* (2001) pesquisaram os critérios de classificação oriundos dos resultados destes ensaios e, na busca por metodologias diretas e eficientes para a caracterização da forma, da angularidade e da textura superficial de agregados, optaram pelo PDI. Masad *et al.* (2005) realizaram um estudo contendo a revisão de vários métodos de PDI utilizados para análise das propriedades de forma de agregados. Esses métodos utilizam conceitos e teorias matemáticas para definir a geometria das partículas analisadas. Dentre eles é possível citar: transformada de Hough para calcular raios de partículas (WILSON; KLOTZ, 1996); morfologia fractal para avaliar a angularidade de agregados miúdos (MASAD; BUTTON; PAPAGIANNAKIS, 2000); decomposição *Wavelet* para imagens em escala de cinza para análise da textura superficial, utilização de imagens binárias para caracterização da forma (CHANDAN *et al.*, 2004); transformada de Fourier, aplicada aos perfis das partículas, para determinar a angularidade das mesmas (BOWMAN; SOGA; DRUMMOND, 2000). Há

métodos criados mais recentemente, como por exemplo: curvatura multiescala para análise de forma e de angularidade (GOUVEIA; RODRIGUES; COSTA, 2010); método de entropia para a determinação do grau de alteração de agregados de origem basáltica (GOUVEIA *et al.*, 2011; GOUVEIA *et al.*, 2013).

Bessa, Castelo Branco e Soares (2012) utilizaram o PDI, com dois *softwares*: *Image Tool* e *iPas*, para caracterizar agregados graníticos, Resíduo de Construção e Demolição (RCD) e escória de aciaria e também a estrutura interna de misturas asfálticas produzidas com 100% de agregados graníticos; com 50% de agregados graníticos e 50% RCD e com 50% de agregados graníticos e 50% de escória de aciaria. Os autores concluíram que o ensaio tradicional com o uso do paquímetro dimensional estilizado (ASTM D 4791, 2010) para determinar a quantidade de partículas alongadas e planas é mais trabalhoso e demorado, porém os resultados são mais realísticos uma vez que o PDI utilizado não captura a profundidade das partículas, somente duas de suas dimensões. Por outro lado, os resultados de angularidade das partículas obtidos com o uso do PDI seguiram a mesma tendência dos resultados encontrados com o uso da metodologia Superpave (ASTM D 5821, 2013), utilizada para realizar essa comparação.

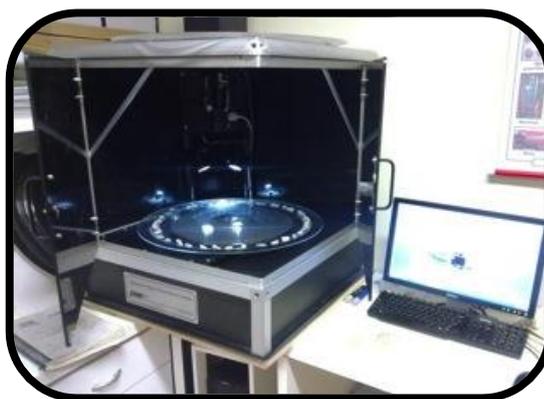
Wnek *et al.* (2013) avaliaram as propriedades de forma de agregados, utilizados para lastros de ferrovias, com o objetivo de analisar a influência destas propriedades no desempenho da camada de lastro, utilizando o *University of Illinois Aggregate Image Analyser* (UI-AIA). Os autores avaliaram os agregados em relação à resistência ao cisalhamento, à degradação e à durabilidade e concluíram que lastros compostos por agregados mais angulares tendem a ser mais resistentes ao cisalhamento, porém estes possuem menor durabilidade e que agregados mais longos e planos quebram com mais facilidade. Anochie-Boateng, Komba e Mvlase (2013) utilizaram o PDI, com um *scanner* de varredura 3D a laser, pra avaliar a forma de agregados provenientes de diferentes fontes mineralógicas, localizadas na África do Sul e compararam os resultados com aqueles obtidos a partir de métodos manuais de quantificação das propriedades de forma de agregados. Os autores investigaram agregados utilizados em pavimentos rodoviários e em ferrovias e concluíram que essa metodologia é rápida e precisa e, por não ter influência da subjetividade relacionada ao fator humano, presente nos métodos convencionais, o PDI fornece resultados mais confiáveis.

### 2.2.2.1 Aggregate Imaging Measurement System2 (AIMS2)

O AIMS2 (Figura 2.4) é um sistema de PDI, com mecanismo de aquisição de imagens e *software*, que foi desenvolvido para analisar parâmetros de forma (lamelaridade e esfericidade), de angularidade e de textura superficial de agregados graúdos (retidos na peneira 4,75 mm), além de angularidade e de forma de agregados miúdos (passantes na peneira 4,75 mm) (FLETCHER *et al.*, 2003). Masad *et al.* (2007b) elencaram algumas vantagens do sistema AIMS2, em relação a outros PDIs avaliados pelos autores e destacaram as seguintes:

- a) Captura imagens e analisa a forma de uma vasta gama de tamanhos e tipos de agregados (graúdos e miúdos), com ajuste de resolução das imagens para minimizar a influência do tamanho das partículas nos resultados;
- b) Determina medidas de diversas propriedades, tais como forma, angularidade e textura superficial, para diferentes tamanhos de agregados;
- c) Permite análises bidimensionais e tridimensionais, de acordo com o tamanho das partículas;
- d) Utiliza técnicas de análise de imagem que são baseadas em conceitos científicos sólidos;
- e) Fornece resultados de características geométricas em distribuições cumulativas, além dos valores médios;
- f) Tem operação rápida, automatizada por computador, precisa e prática;
- g) Pode ser utilizado também em laboratórios móveis, no campo.

Figura 2.4 – Equipamento AIMS2



Fonte: Araujo (2016).

Segundo Gates *et al.* (2011), o AIMS2 está estabelecido na comunidade científica e técnica de pavimentação asfáltica dos Estados Unidos, como ferramenta utilizada para a caracterização das propriedades de forma de agregados graúdos e miúdos. O sistema AIMS2 é composto por uma câmera com *zoom*, com dois tipos diferentes de iluminação e apresenta dois módulos de utilização, de acordo com o tamanho do agregado a ser caracterizado. O primeiro módulo destina-se à análise de agregados miúdos e utiliza apenas imagens em preto e branco, capturadas usando uma luz de fundo que gera contraste entre o agregado e a bandeja e acentua o contorno do material. O segundo módulo destina-se aos agregados graúdos. Nesse módulo, que se baseia na análise de uma imagem 3D das partículas, possibilitando a avaliação da lamelaridade e do alongamento, são capturadas imagens tanto em preto e branco como em escala de cinza e um mecanismo para capturar imagens em diferentes resoluções, ajustadas de acordo com o tamanho das partículas analisadas. O sistema possui um conjunto de bandejas que comportam agregados de dimensões entre 0,075 mm (peneira #200) e 25 mm (peneira 1") (PINE INSTRUMENT, 2013). O AIMS2 avalia a textura superficial de partículas e pode ser utilizado, por exemplo, para caracterizar agregados antes e depois dos testes de resistência ao polimento e à degradação, como os ensaios realizados com o uso do Micro Deval e do abrasão Los Angeles (ALVES, 2014).

Al Rousan (2004) afirma que o AIMS2 possui a vantagem de que seus resultados recebem tratamento estatístico, baseados na distribuição das características de forma para uma amostra de agregado, além de medidas de tendência central (médias), e fornece os dados para a metodologia de classificação de propriedades de forma de agregados, elaborada pelo citado autor. Al Rousan (2004) fez comparações entre vários PDIs para propor a metodologia do sistema de classificação das propriedades de forma, analisadas com o uso do AIMS2 e concluiu que o sistema proposto se destacava dos demais, visto ser capaz de caracterizar propriedades de forma, de angularidade e de textura superficial de agregados a partir de análises de imagens bidimensionais das partículas de agregados. Com o objetivo de validar a metodologia proposta por Al Rousan (2004) para o AIMS2, Bathina (2005) realizou as análises estatísticas de repetibilidade e de reprodutibilidade, utilizando os dados desse autor e constatou a boa qualidade das medidas resultantes do AIMS2.

Mahmoud *et al.* (2010b) realizaram uma customização da classificação das propriedades de forma de agregados estabelecida por Al Rousan (2004), para o AIMS2. Os autores utilizaram 200 amostras de agregados de diferentes mineralogias, encontrados no estado de Illinois, nos Estados Unidos, totalizando 11.200 partículas e realizaram as análises

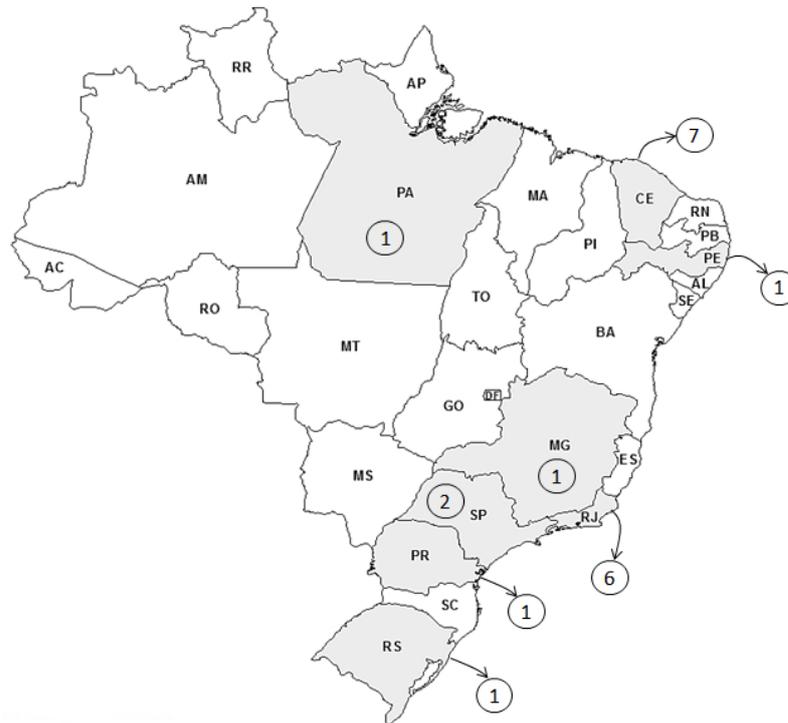
estatísticas através de dois métodos: *clusters* e quartis, para determinar os novos valores limites da classificação das propriedades de angularidade e de textura superficial dos agregados analisados no AIMS2. Os autores concluíram que as partículas das amostras após a realização do ensaio no Micro Deval possuíam valores limites menores, se comparados às amostras antes da realização do ensaio no Micro Deval, para ambas as propriedades: angularidade e textura superficial. Isso pode ser explicado pelo fato da abrasão e do polimento reduzirem essas propriedades dos agregados. Os autores concluíram, também, que o método dos quartis classificava as propriedades de forma dos agregados analisados de modo mais realista, se comparados aos resultados encontrados no campo. Esse estudo foi motivado pela constatação de que muitos agregados estavam sendo categorizados em classes que não correspondiam ao seu real desempenho quando os mesmos foram utilizados em pavimentos asfálticos, previamente monitorados, analisados segundo a classificação proposta por Al Rousan (2004).

## **2.3 Materiais e Método**

### **2.3.1 Materiais**

Para esta pesquisa, foi formado um banco de dados de agregados analisados no AIMS2, composto por 20 agregados oriundos de diferentes localidades, abrangendo 8 estados brasileiros (Figura 2.5), e de diferentes tipos de rocha (Tabela 2.1). Os números nos círculos da Figura 2.5 correspondem à quantidade de agregados oriundos de cada estado. De cada material, foram utilizados os resultados de três frações graúdas (12,5; 9,5 e 4,75 mm) e de três frações miúdas (2,36; 1,18 e 0,3 mm), totalizando 12.887 partículas avaliadas nesta pesquisa.

Figura 2.5 – Quantidade e localização dos agregados constituintes do banco de dados oriundos de diversos estados brasileiros



Fonte: Adaptado pela autora (2018).

Tabela 2.1 – Local, tipo e fração dos agregados constituintes do banco de dados utilizado nesta pesquisa

Agregado	Local de origem	Tipo	Fração do agregado (mm)					
			12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,3
1	Santarém, PA	Seixo Rolado	x	x	x	x	x	x
2	Nova Iguaçu, RJ	Granito-gnaïsse	x	x	x	x	x	x
3	São Carlos, SP	Basalto	x	x	x	x	x	x
4	Salgueiro, PE	Granito	x	x	x	x	x	x
5	Jambeiro, SP	Gnaïsse	x	x	x	x	x	x
6	Itaitinga, CE	Monzogranito / tectonizado	x	x	x	x	x	x
7	Caucaia, CE	Biotita-monzogranito / tectonizado	x	x	x	x	x	x
8	Maracanaú, CE	Biotita gnaïsse	x	x	x	x	x	x
9	Itaitinga, CE	Monzogranito / tectonizado	x	x	x	x	x	x
10	Caucaia, CE	Biotita-granito / tectonizado	-	-	-	x	x	x
11	Maracanaú, CE	Areia de campo	-	-	-	x	x	x
12	Maracanaú, CE	Areia de rio	-	-	-	x	x	x
13	Santo Antônio da Patrulha, RS	Basalto	x	x	x	x	x	x
14	Queimados, RJ	Granito-gnaïsse	x	x	x	x	x	x
15	Nova Iguaçu, RJ	Sienitotraquito	x	x	x	-	-	-
16	Itaguaí, RJ	Granito-gnaïsse	x	x	x	x	x	x
17	Nova Iguaçu, RJ	Granito-gnaïsse cúbica	x	x	x	x	x	x
18	Nova Iguaçu, RJ	Granito-gnaïsse lamelar	x	x	x	x	x	x
19	Ervália, MG	Gnaïsse	x	x	x	x	x	x
20	Maringá, PR	Resíduo de Construção e Demolição	-	-	-	x	x	x

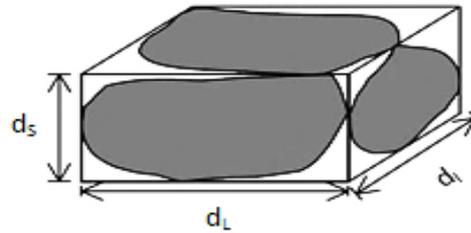
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

### 2.3.2 Método

As propriedades de forma das partículas de agregados são descritas através de 4 parâmetros geométricos calculados pela metodologia AIMS2. A esfericidade (Figura 2.6) é o parâmetro de forma utilizado para partículas graúdas ( $\geq 4,75$  mm) e representa uma relação entre as três dimensões do agregado. O valor dessa propriedade varia de 0,0 a 1,0, sendo maior quanto mais cúbica for a partícula, e é calculado pela Equação 2.1. A textura superficial, também aplicada apenas a agregados graúdos, mede a rugosidade da superfície da partícula por meio de *Wavelets*, o qual quantifica as variações existentes nos níveis de pixels de imagens em escala de cinza. Seu valor pode variar de 0 a 1.000 e é calculado pela Equação 2.2. A angularidade (Figura 2.7), parâmetro usado para agregados graúdos e miúdos ( $< 4,75$  mm), mede as alterações de direção existentes ao longo do contorno da partícula por meio do

método do gradiente, podendo variar de 0 a 10.000 (Equação 2.3). Quanto mais arredondada é uma partícula, menor é o valor de angularidade. Por fim, a forma 2D, parâmetro de forma utilizado apenas para agregados miúdos, indica o quão alongada é a partícula, variando de 0 a 20 (Equação 2.4).

Figura 2.6 – Três dimensões de uma partícula para o cálculo da esfericidade



Fonte: Masad *et al.* (2005).

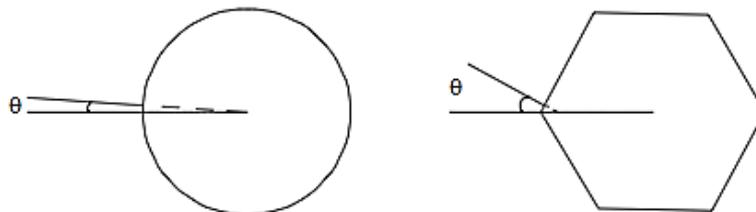
$$Esfericidade = \sqrt[3]{\frac{d_s d_i}{d_L^2}} \quad (2.1)$$

Onde:  $d_s$  = menor dimensão;  $d_i$  = dimensão intermediária e  $d_L$  = maior dimensão da partícula.

$$Textura\ Superficial_n = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x, y))^2 \quad (2.2)$$

Onde:  $n$  = nível de decomposição da imagem;  $N$  = número de coeficientes em uma imagem detalhada;  $D$  = função de decomposição;  $i$  = direção da textura (1, 2 ou 3);  $j$  = índice *Wavelet* e  $x, y$  = localização dos coeficientes no domínio transformado.

Figura 2.7 – Ângulos de orientação dos pontos do contorno da partícula para cálculo da angularidade



Fonte: Adaptado de Masad *et al.* (2005).

$$Angularidade = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (2.3)$$

Onde:  $\theta$  = ângulo de orientação dos pontos do contorno;  $n$  = número total de pontos e  $i$  =  $i$ -ésimo ponto do contorno da partícula.

$$Forma\ 2D = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[ \frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (2.4)$$

Onde:  $R_{\theta}$  = raio da partícula no ângulo  $0^{\circ}$  e  $\Delta\theta$  = variação de incremento no ângulo.

Para elaborar a metodologia da classificação das propriedades de forma de agregados para o AIMS2, Al Rousan (2004) utilizou um banco de dados composto por 13 agregados graúdos e 5 agregados miúdos, provenientes de diferentes estados americanos. O autor utilizou o método hierárquico de análise de *cluster*. Esse método tem como principal característica um algoritmo em que são fornecidos vários agrupamentos possíveis, onde um *cluster* (grupo) pode ser mesclado a outro em determinado passo do algoritmo. Não há exigência de um número inicial de *clusters*, entretanto o método hierárquico é considerado inflexível uma vez que não se pode trocar um dado de grupo. Al Rousan (2004) adotou a distância euclidiana como medida de proximidade entre as partículas dentro dos *clusters*. O método de Ward foi aplicado para agrupar as partículas de agregados, a partir das distribuições de propriedades de forma e gerar os valores limites da classificação proposta por Al Rousan (2004) (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Valores limites da classificação das propriedades de forma de agregados proposta por Al Rousan (2004)

Propriedade	Valores limites				
Forma 2D	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Angularidade	< 2.100	2.100 – 4.000	4.000 – 5.400	> 5.400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Esfericidade	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado / Alongado	Baixa Esfericidade	Esfericidade Moderada	Alta Esfericidade	-
Textura superficial	< 165	165 – 275	275 – 350	350 – 460	> 460
	Polido	Macio	Baixa Rugosidade	Rugosidade moderada	Alta Rugosidade

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Mahmoud *et al.* (2010b) customizaram a classificação das propriedades de forma proposta por Al Rousan (2004) por meio de métodos estatísticos, para determinar novos valores limites. Os autores reavaliaram somente os valores limites das propriedades de angularidade e de textura superficial, utilizando agregados de diferentes mineralogias, encontrados no estado de Illinois, nos Estados Unidos.

Mahmoud *et al.* (2010b) utilizaram o método não hierárquico de análise de *cluster* (K-médias). Esse método tem como principal característica a definição de um número específico de *cluster* e é considerado um método flexível, uma vez que os dados podem ser deslocados de grupo durante a execução do algoritmo. Os autores utilizaram, também, o método dos quartis. Na estatística descritiva, um quartil é qualquer um dos três valores que divide o conjunto ordenado de dados em quatro partes iguais e assim cada parte representa 1/4 da amostra. O primeiro quartil denominado de quartil inferior corresponde aos 25% dos valores mais baixos da amostra ordenada; o segundo quartil, ou mediana, corresponde ao valor até o qual se encontra 50% da amostra ordenada; o terceiro quartil denominado de quartil superior corresponde ao valor a partir do qual se encontram 25% dos valores mais elevados da amostra ordenada. Os autores adotaram os resultados gerados pelo método dos quartis (Tabela 2.3), pelo fato de o *cluster* (K-médias) categorizar na classe de “alta angularidade” e de “alta textura” apenas partículas com valores extremamente altos dessas propriedades.

Tabela 2.3 – Valores limites da classificação das propriedades de forma de agregados proposta por Mahmoud *et al.* (2010b)

Propriedade	1° Quartil	2° Quartil	3° Quartil
Angularidade	<2.420	2.420 – 3.418	>3.418
Textura superficial	<65	65 – 162	>162

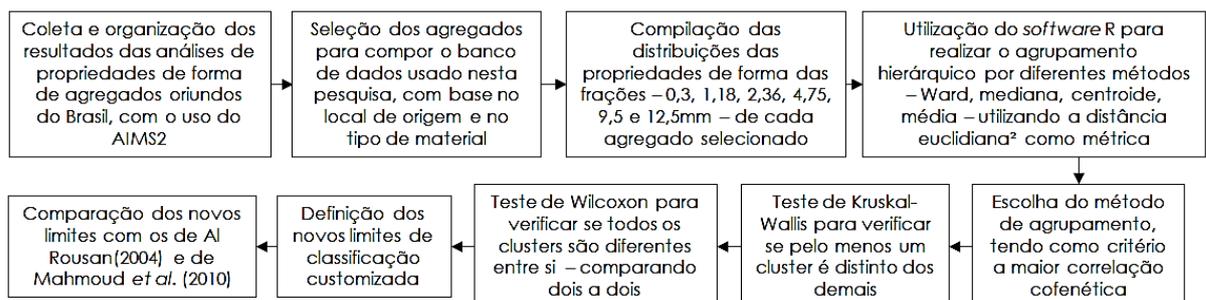
Fonte: Mahmoud *et al.* (2010).

A classificação proposta nesta pesquisa foi realizada com o uso do *software* R (R CORE TEAM, 2015), a partir das distribuições de propriedades de forma dos agregados constituintes do banco de dados organizado. Foram utilizados como dados de entrada os resultados de cada partícula analisada (para cada agregado, cada fração e cada propriedade, em um total de 12.887 partículas). Para gerar os valores limites, aplicaram-se métodos hierárquicos de *cluster* (Ward, mediana, centroide e média) em cada propriedade, separadamente (o Apêndice B contém o código R desenvolvido para a angularidade, que é o

mesmo para as demais propriedades). Adotou-se a distância euclidiana ao quadrado como medida de proximidade entre as partículas dentro dos *clusters*. Utilizou-se o maior valor da correlação cofenética (SOKAL; ROHLF, 1962) como critério de escolha do método mais adequado para cada propriedade de forma. A correlação cofenética mede o grau de ajuste entre a matriz de dissimilaridade (matriz das medidas de similaridade, ou seja, distância euclidiana ao quadrado) e a matriz resultante da simplificação devido ao método de agrupamento. Optou-se por utilizar a mesma nomenclatura para as classes e os mesmos números de *clusters* utilizados por Al Rousan (2004), ou seja, quatro classes para as propriedades de angularidade, de esfericidade e de forma 2D e cinco classes para a de textura superficial, por ser esta a propriedade de forma com maior dispersão (BESSA, 2012; ARAUJO; BESSA; CASTELO BRANCO, 2014; DIÓGENES, 2015; ARAUJO, 2016).

Após a seleção do método de agrupamento para cada propriedade, verificou-se a homogeneidade entre *clusters* pelo teste de Bartlett e a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, que são condições necessárias para se aplicar o teste Análise de Variâncias (ANOVA), que é um teste paramétrico. Caso esses pré-requisitos não fossem satisfeitos, seriam aplicados os testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para avaliar se havia diferença entre, pelo menos, um *cluster* e o teste de Wilcoxon para verificar a diferença entre os *clusters*, dois a dois. O nível de significância utilizado em todos os testes foi de 0,05. Após o término das análises estatísticas, foram definidos os valores limites da classificação proposta nesta pesquisa. Por fim, compararam-se os limites supracitados com aqueles das classificações propostas por Al Rousan (2004) e por Mahmoud *et al.* (2010b). As atividades realizadas para atingir os objetivos desta pesquisa foram estruturadas de acordo com o fluxograma da Figura 2.8.

Figura 2.8 – Fluxograma do método utilizado nesta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

## 2.4 Resultados e Discussões

O banco de dados foi composto por agregados de mineralogias distintas, oriundos de diferentes fontes do Brasil (Tabela 2.1). As amostras constituintes do banco de dados foram rotuladas antes de serem classificadas. A Tabela 2.4 apresenta as medidas de tendência central e de dispersão das propriedades de forma, por fração, desses agregados. Observou-se que a textura superficial foi a propriedade que apresentou os maiores coeficientes de variação (acima de 55%).

Tabela 2.4 – Medidas descritivas das propriedades de forma por fração

Propriedade	Medida	Fração (mm)						Todas as frações
		0,30	1,18	2,36	4,75	9,50	12,50	
	n	3.872	3.201	3.061	1.008	915	830	12.887
Forma 2D	Média	7,84	8,20	8,00	-	-	-	8,00
	DP	2,07	2,05	2,02	-	-	-	2,05
	CV (%)	26,4	25,0	25,2	-	-	-	25,6
Angularidade	Média	3.933	3.992	3.700	3.002	2.821	2.735	3.663
	DP	1.266	1.042	1.017	786	754	678	1.142
	CV (%)	32,2	26,1	27,5	26,2	26,7	24,8	31,2
Esfericidade	Média	-	-	-	0,67	0,68	0,70	0,68
	DP	-	-	-	0,11	0,11	0,10	0,11
	CV (%)	-	-	-	16,6	15,8	14,2	15,7
Textura superficial	Média	-	-	-	301	374	382	350
	DP	-	-	-	224	238	221	231
	CV (%)	-	-	-	74,4	63,6	57,8	66,0

Nota: DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação; n = quantidade de partículas.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Utilizou-se o *software* R para realizar o agrupamento hierárquico por quatro diferentes métodos de *cluster*: Ward, média, centroide e mediana. Esses métodos foram aplicados a cada propriedade separadamente e, como critério de escolha, foi utilizado o maior valor de correlação cofenética (Tabela 2.5). Para a angularidade, a esfericidade e a forma 2D, o método de *cluster* adotado foi o da média, enquanto para a textura superficial adotou-se o de Ward.

Tabela 2.5 – Correlação cofenética dos métodos de agrupamento para cada propriedade

Método de agrupamento	Propriedade			
	Angularidade	Esfericidade	Textura superficial	Forma 2D
Ward	0,574	0,511	0,742	0,460
Média	0,624	0,601	0,655	0,654
Centroide	0,614	0,577	0,637	0,652
Mediana	0,572	0,565	0,664	0,646

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Uma vez escolhido o método de agrupamento para cada propriedade, verificou-se que os dados não satisfizeram a homogeneidade de variância entre *clusters* pelo teste de Bartlett, nem a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, portanto, não foi possível aplicar a ANOVA. Assim, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis e verificou-se que pelo menos um *cluster* era distinto dos demais (Tabela 2.6). Em seguida, aplicou-se o teste de Wilcoxon e verificou-se que havia desigualdade entre os *clusters*, dois a dois (Tabela 2.7).

Tabela 2.6 – Resultados do teste de Kruskal-Wallis

Propriedade	Qui-quadrado	Graus de liberdade	Valor P
Forma 2D	2.610,2	3	$< 2,20 \times 10^{-16}$
Angularidade	8.616,2	3	$< 2,20 \times 10^{-16}$
Esfericidade	2.228,3	3	$< 2,20 \times 10^{-16}$
Textura superficial	2.311,6	4	$< 2,20 \times 10^{-16}$

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tabela 2.7 – Resultados do teste de Wilcoxon

<i>Clusters</i>	Estatística	Propriedade			
		Forma 2D	Angularidade	Esfericidade	Textura superficial
1 - 2	W	273.810	826.750	491.700	849.570
	Valor P	$< 6,06 \times 10^{-14}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$
2 - 3	W	8.013.500	35.568.000	1.207.500	227.670
	Valor P	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$
3 - 4	W	45.656	202.370	103.210	78.970
	Valor P	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	$< 2,2 \times 10^{-16}$
4 - 5	W	-	-	-	40.280
	Valor P	-	-	-	$< 2,2 \times 10^{-16}$

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A Tabela 2.8 apresenta a análise estatística descritiva dos *clusters*. Observou-se que, de forma geral, os clusters de maiores médias mostraram menores dispersões que os clusters de médias mais baixas, para todas as propriedades. Ou seja, as partículas que foram categorizadas nas classes de médias mais altas encontram-se mais próximas entre si (com maior homogeneidade de resultados) na escala de cada propriedade, enquanto aquelas que estão nas classes mais baixas possuem valores mais distantes entre si, provocando maiores dispersões. Após o término das análises estatísticas, os valores limites da classificação proposta nessa pesquisa foram definidos (Tabela 2.9).

Tabela 2.8 – Medidas descritivas das propriedades de forma por *cluster*

Propriedade	Medida	Cluster				
		1	2	3	4	5
Angularidade	Média	892,74	3.052,88	4.954,73	7.574,03	-
	DP	270,81	616,06	685,49	388,31	-
	CV (%)	30,33	20,18	13,84	5,13	-
	n	96	8.612	4.130	49	-
	Frequência (%)	0,74	66,83	32,05	0,38	-
Esfericidade	Média	0,50	0,65	0,79	0,89	-
	DP	0,04	0,05	0,03	0,03	-
	CV (%)	7,65	7,93	4,14	2,84	-
	n	316	1.556	776	133	-
	Frequência (%)	11,36	55,95	27,90	4,78	-
Textura superficial	Média	153,54	340,17	510,91	704,96	896,72
	DP	63,79	49,36	43,87	64,69	46,84
	CV (%)	41,55	14,51	8,59	9,18	5,22
	n	1.112	764	298	265	152
	Frequência (%)	42,92	29,49	11,50	10,23	5,87
Forma 2D	Média	3,43	7,57	12,12	16,44	-
	DP	0,51	1,50	1,09	0,92	-
	CV (%)	14,79	19,79	8,96	5,61	-
	n	31	9.127	878	52	-
	Frequência (%)	0,31	90,47	8,70	0,52	-

Nota: DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação; n = quantidade de partículas.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tabela 2.9 – Limites da classificação proposta nesta pesquisa

Propriedade	Valores limites				
	< 4,0	4,0 – 11,0	11,0 – 15,5	> 15,5	-
Forma 2D	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Angularidade	< 1.260	1.260 – 4.080	4.080 – 7.180	> 7.180	-
	< 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	> 0,9	-
Esfericidade	Achatado/Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
	< 260	260 - 440	440 - 600	600 - 825	> 825
Textura superficial	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

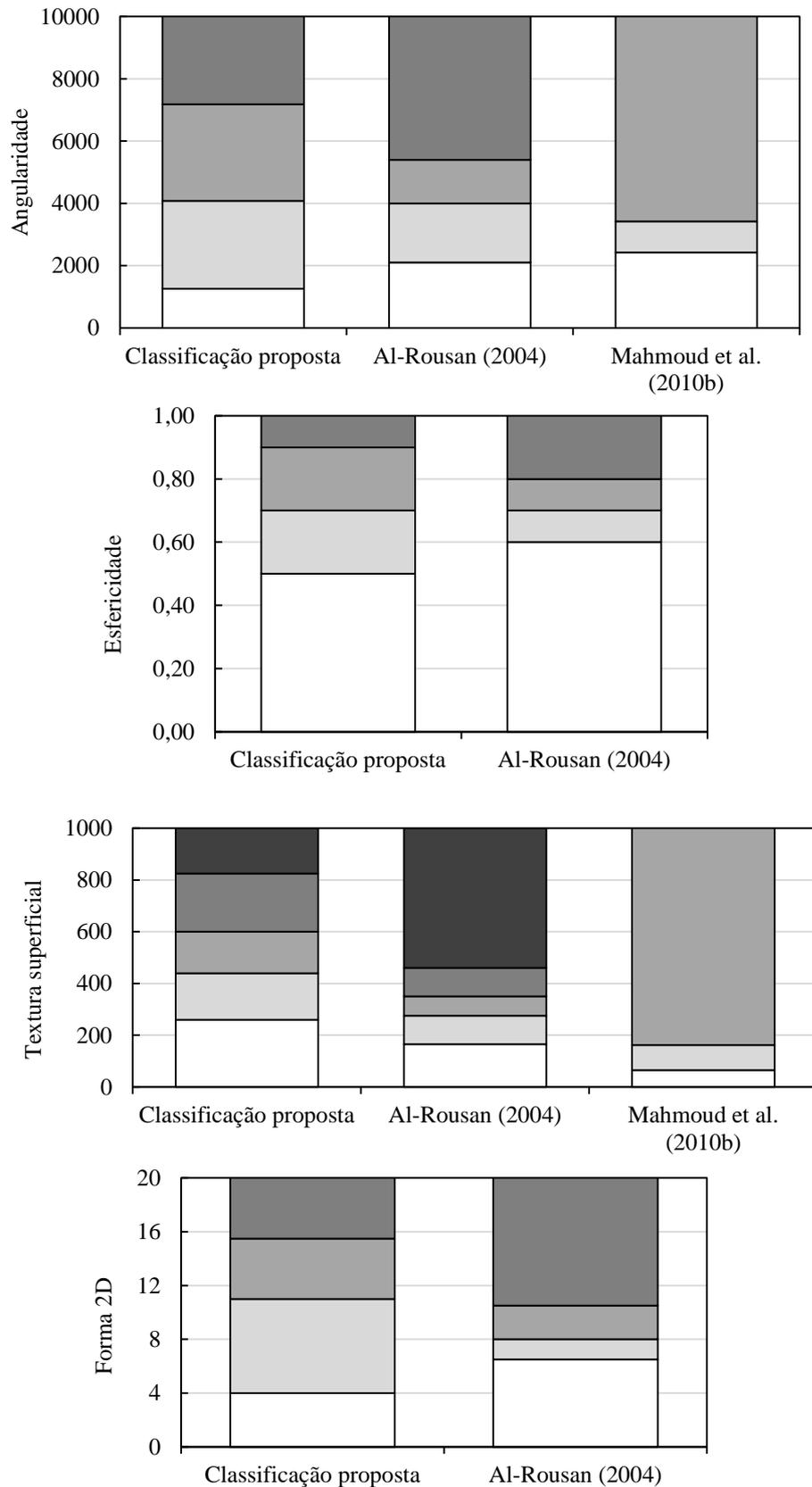
Por fim, compararam-se os limites supracitados com aqueles das classificações propostas por Al Rousan (2004) e por Mahmoud *et al.* (2010b) (Figura 2.9). A comparação com a classificação proposta por Mahmoud *et al.* (2010b) ficou comprometida, uma vez que os autores utilizaram somente três classes (baixa, média e alta) enquanto a proposta nesta pesquisa, baseou-se na mesma quantidade de classes da classificação proposta por Al Rousan (2004) (quatro classes para as propriedades de angularidade, de esfericidade e de forma 2D e cinco classes para a de textura superficial). A classificação proposta apresentou classes

extremas com amplitudes menores que aquelas das demais classificações, o que pode estar relacionado à dispersão das distribuições de propriedades e à heterogeneidade entre agregados. Consequentemente, as classes intermediárias apresentaram amplitudes maiores. As diferenças de limites entre as classificações eram esperadas, pois as propriedades de forma são inerentes aos materiais, os quais podem ser distintos em termos de mineralogia, de processo de beneficiamento, entre outros.

Com relação aos valores limites de angularidade, observou-se que os valores extremos da classificação de Mahmoud *et al.* (2010b) (2.420 e 3.418), de Al Rousan (2004) (2.100 e 5.400) e desta pesquisa (1.260 e 7.180) diferem notavelmente. Concluiu-se que, dependendo da classificação adotada, um determinado agregado pode ser classificado distintamente. Por exemplo, um agregado que possui o valor médio de angularidade igual a 1.300 pode ser classificado como: “baixa angularidade”, segundo Mahmoud *et al.* (2010b); “arredondado”, segundo Al Rousan (2004) e “subarredondado”, segundo a classificação proposta nesta pesquisa, ou seja, três classes diferentes, a depender do sistema de classificação adotado.

Observou-se que os valores extremos de textura superficial da classificação de Mahmoud *et al.* (2010b) (65 e 162) são menores que aqueles propostos por Al Rousan (2004) (165 e 460), que são menores que os propostos nesta pesquisa (260 e 825). Isso implica em, por exemplo, classificar um agregado como “de alta textura”, segundo Mahmoud *et al.* (2010b) e “polido” (classe mais baixa de textura) segundo as classificações propostas por Al Rousan (2004) e nesta pesquisa, ou seja, duas classes diferentes, a depender da classificação adotada.

Figura 2.9 – Comparação entre os sistemas de classificação de propriedades de forma



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

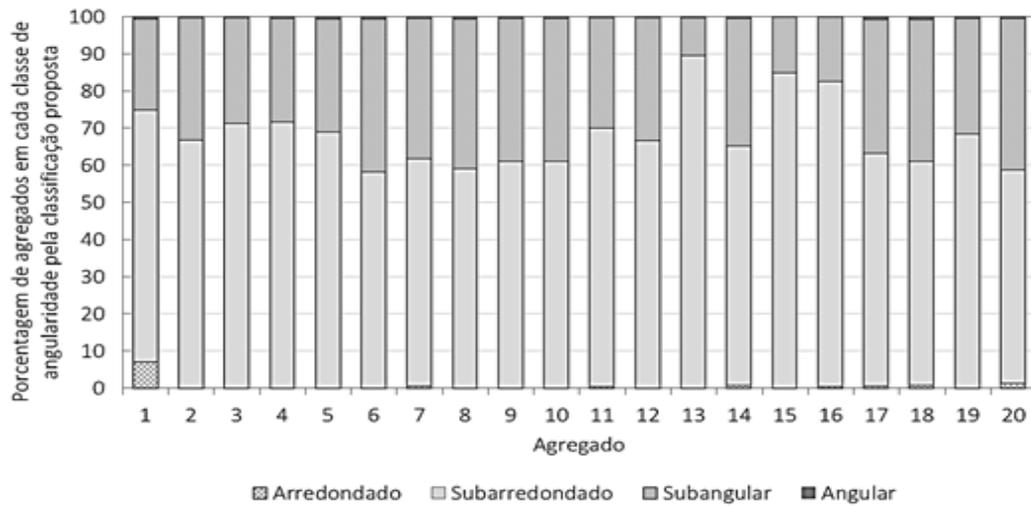
O parâmetro usualmente utilizado como critério para classificar um agregado, com relação às suas propriedades de forma, é a média de seus valores. Entretanto, a média pode não representar bem as características do material analisado, devido à dispersão das suas distribuições. Outro parâmetro que pode ser utilizado é o maior percentual de partículas dentro um mesmo grupo, que também pode não representar bem as características do material analisado, pelo mesmo motivo citado anteriormente.

Calculou-se o percentual de partículas de agregados, pertencente a cada grupo das classificações de Al Rousan (2004) e da proposta nesta pesquisa, para as quatro propriedades de forma (Figuras de 2.10 a 2.17). Para exemplificar o exposto no parágrafo anterior, observou-se o percentual de partículas do agregado 8, um gnaisse proveniente de Maracanaú, CE (Tabela 2.1). Com relação à textura superficial, caso a classificação proposta nesta pesquisa seja utilizada (Figura 2.12), a maior porcentagem de partículas (29%) desse agregado encontra-se na classe “rugosidade moderada”. Utilizando a mesma classificação e a média dos valores de textura (556) como parâmetro, esse agregado é classificado como de “baixa rugosidade” (Tabela 2.9). Caso se utilize a classificação proposta por Al Rousan (2004) (Figura 2.13), tendo como parâmetro tanto a média dos valores quanto a maior porcentagem de partículas (61%), esse agregado é classificado como de “alta rugosidade”.

As classes extremas da Figura 2.10 apresentaram porcentagens muito baixas devido à existência, nos materiais presentes no banco de dados, de poucas partículas com valores de angularidade muito distantes dos valores das partículas pertencentes aos *clusters* intermediários. Ou seja, apesar da quantidade dessas partículas ser muito pequena, seus valores de angularidade são tão distantes dos demais, que houve a necessidade da criação de *clusters* apenas para elas.

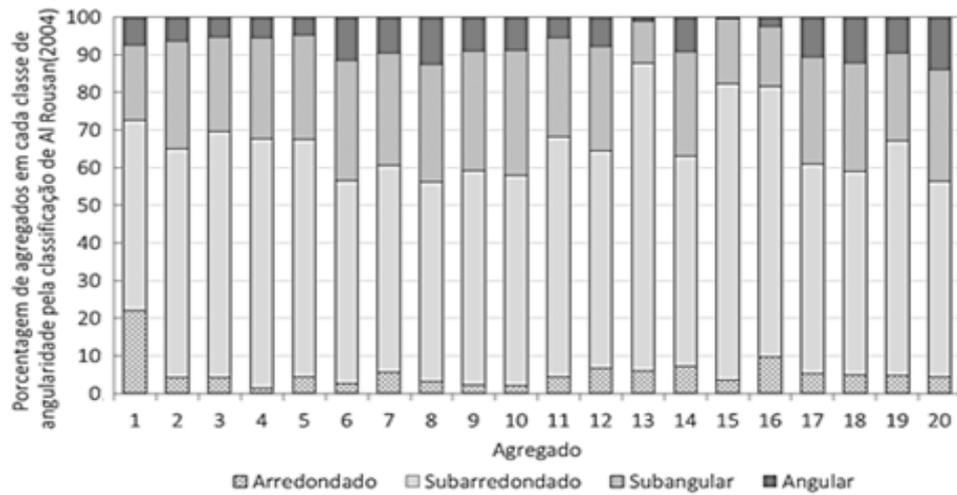
A relevância da classificação proposta por Al Rousan (2004) e, por conseguinte, da classificação proposta nesta pesquisa, é permitir detectar mudanças de classe ao longo da distribuição de propriedades de forma dadas pelo AIMS2. Com isso, pode-se desenvolver especificações baseadas nessas distribuições e não simplesmente na média dos resultados de suas propriedades de forma, que, como foi constatado, pode não as representar adequadamente.

Figura 2.10 – Distribuição das partículas de cada agregado que compõe o banco de dados nos grupos de angularidade pela classificação proposta nesta pesquisa



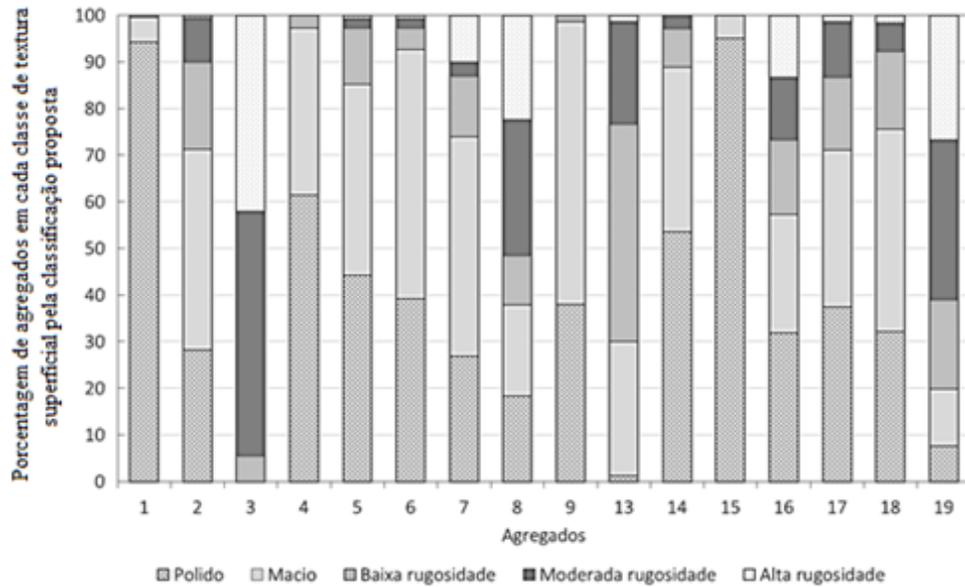
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 2.11 – Distribuição das partículas de cada agregado que compõe o banco de dados nos grupos de angularidade pela classificação proposta por Al Rousan (2004)



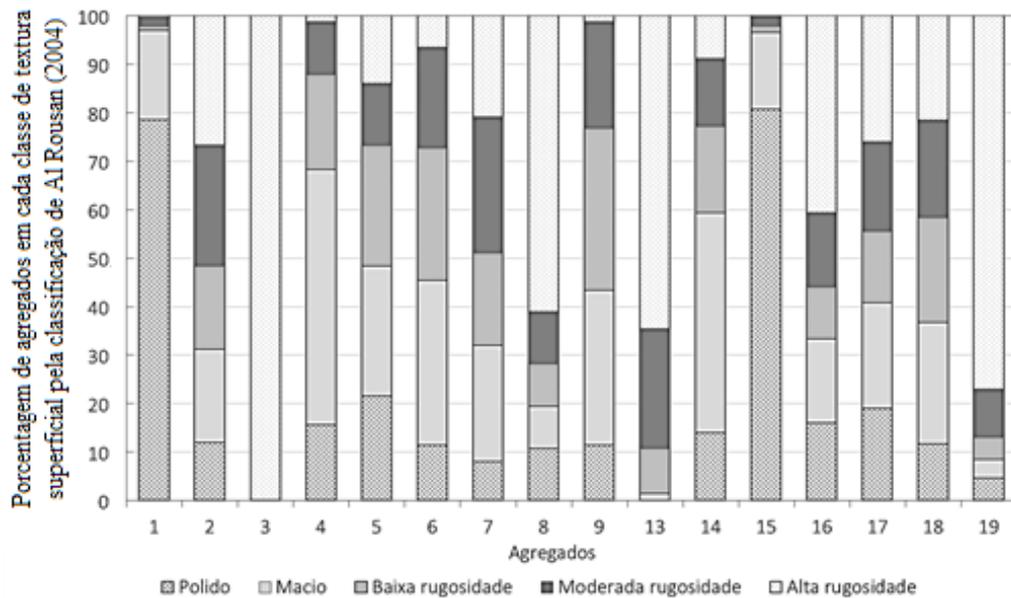
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 2.12 – Distribuição das partículas de cada agregado que compõe o banco de dados nos grupos de textura superficial pela classificação proposta nesta pesquisa



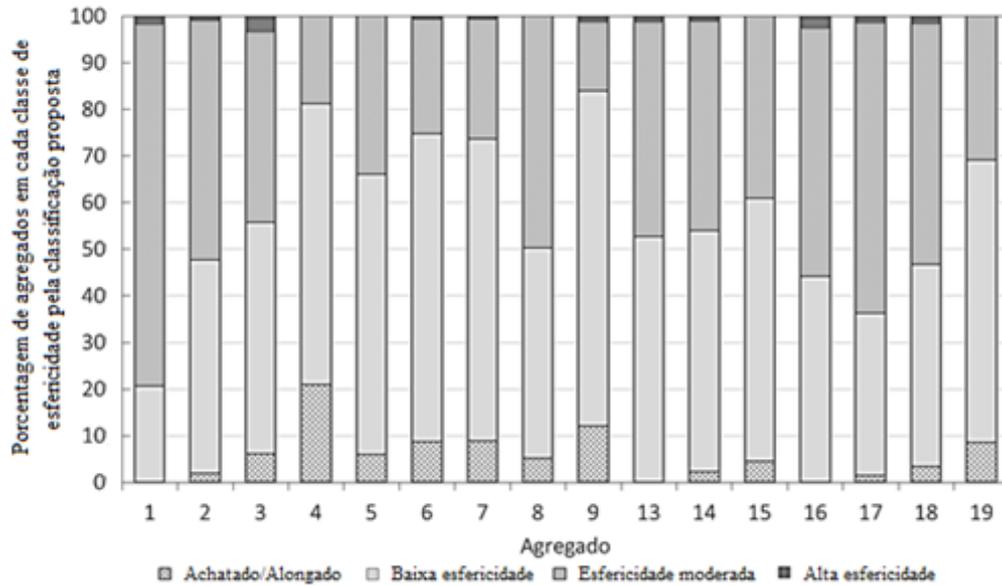
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 2.13 – Distribuição das partículas de cada agregado que compõe o banco de dados nos grupos de textura superficial pela classificação proposta por Al Rousan (2004)



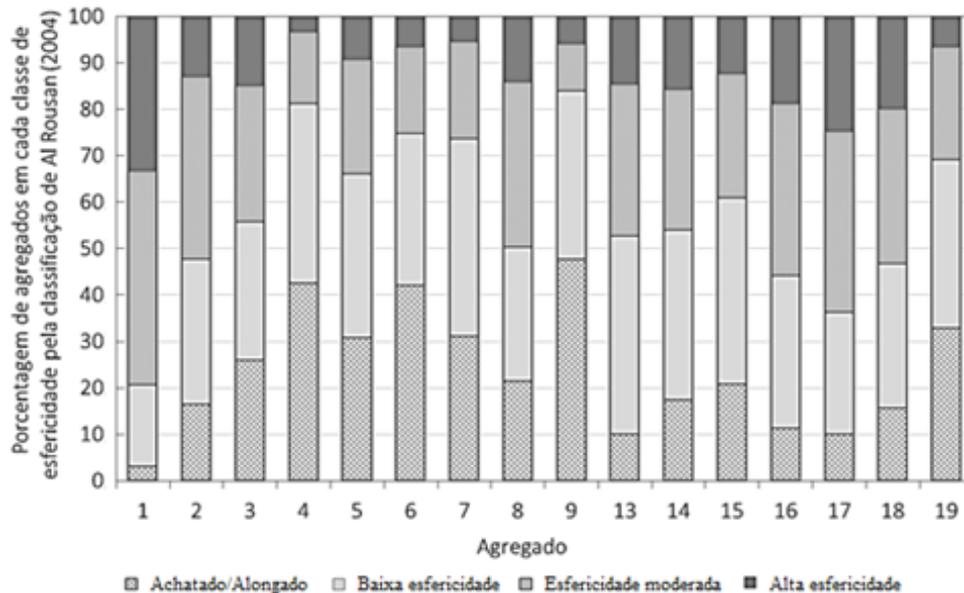
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 2.14 – Distribuição das partículas de cada agregado que compõe o banco de dados nos grupos de esfericidade pela classificação proposta nesta pesquisa



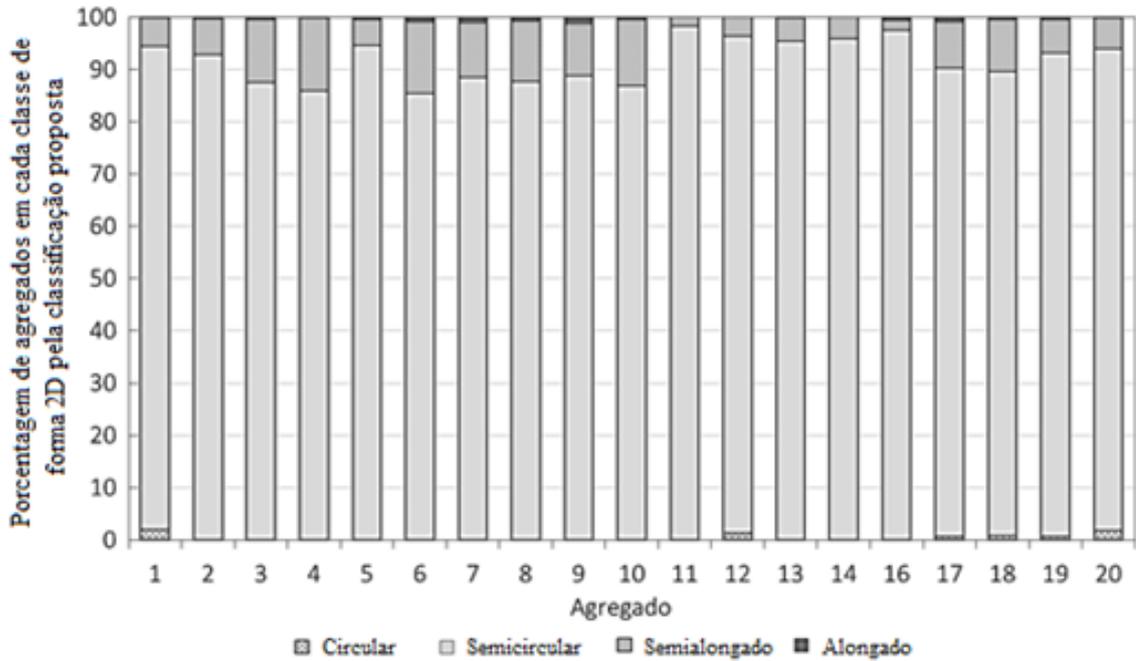
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 2.15 – Distribuição das partículas de cada agregado que compõe o banco de dados nos grupos de esfericidade pela classificação proposta por Al Rousan (2004)



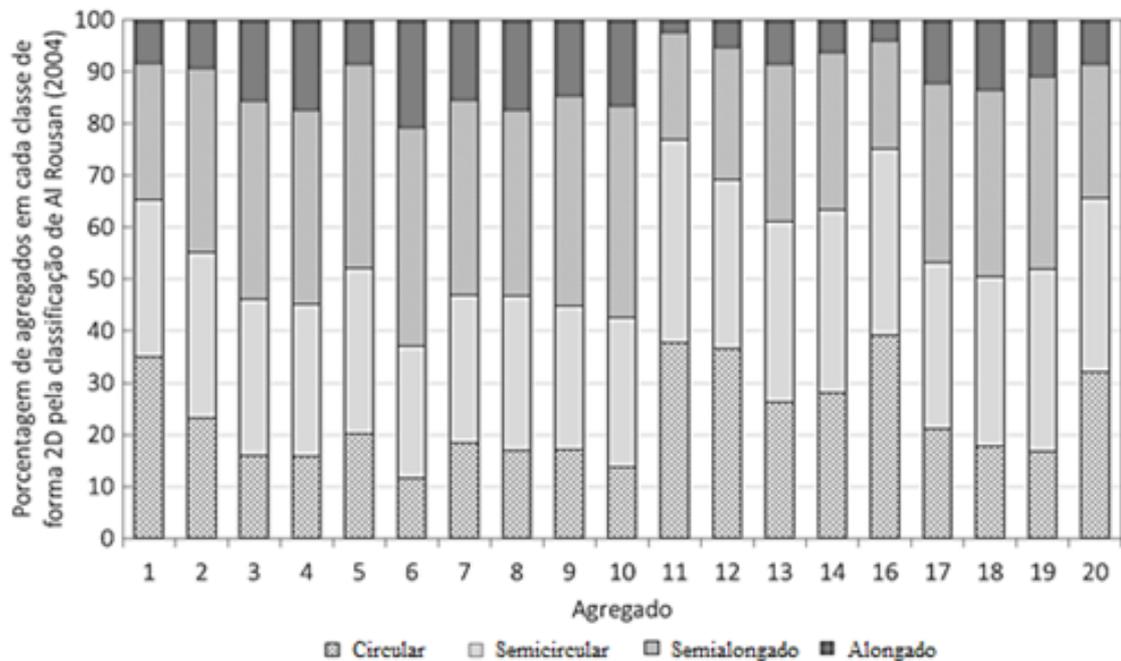
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 2.16 – Distribuição das partículas de cada agregado que compõe o banco de dados nos grupos de forma 2D pela classificação proposta nesta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 2.17 – Distribuição das partículas de cada agregado que compõe o banco de dados nos grupos de forma 2D pela classificação proposta por Al-Rousan (2004)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

## 2.5 Considerações Finais

Os agregados minerais constituem cerca de 90% do volume das misturas asfálticas. O comportamento destas, com relação aos principais defeitos encontrados nos pavimentos (deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico), está diretamente ligado às características de seu esqueleto mineral e, por conseguinte, às características de seus agregados constituintes. O AIMS2 está estabelecido como uma das principais técnicas de PDI para a caracterização das propriedades de forma de agregados utilizadas na área de Infraestrutura de Transportes, por usar métodos diretos e eficientes. Diante da importância de se avaliar essas características, as contribuições mais relevantes desta pesquisa estão elencadas a seguir:

- 1) Organização de um banco de dados de agregados analisados com o uso do AIMS2, composto por vinte agregados, com mineralogias distintas, oriundos de diferentes localidades, abrangendo oito estados brasileiros;
- 2) Elaboração de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados baseado nos resultados gerados pelo AIMS2, a partir do banco de dados organizado;
- 3) Esboço de uma norma brasileira para caracterização de agregados com o uso do PDI.

### 3 ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE DAS MEDIDAS DE PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS GERADAS PELO AIMS2

#### 3.1 Introdução

Os métodos tradicionais para a caracterização das propriedades de forma de agregados, apesar de serem simples e especificados por normas técnicas, possuem a desvantagem de não conter relação direta com o esqueleto mineral formado ou com os parâmetros de desempenho das misturas asfálticas. De acordo com Masad *et al.* (2003); Masad *et al.* (2007a); Mahmoud, Kutay e Bahia (2010a), os métodos de ensaio estabelecidos pela especificação *Superior Performing Asphalt Pavements* (Superpave) são demorados, possuem resultados dependentes do operador e geram interpretações subjetivas, por vezes baseadas em caracterização indireta das propriedades.

O *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2) está entre as principais técnicas de Processamento Digital de Imagem (PDI) utilizadas na área de Infraestrutura de Transportes. O AIMS2 é capaz de caracterizar as propriedades de forma a partir de análises de imagens 2D das partículas de agregados (AL ROUSAN, 2004; AL ROUSAN *et al.*, 2005; CASTELO BRANCO *et al.*, 2006; TAYLOR *et al.*, 2006; MASAD *et al.*, 2007b). Esse equipamento apresenta a vantagem de fornecer as curvas de distribuição dessas propriedades para uma amostra de agregado e não somente seus valores médios, o que permitiu a elaboração de um sistema de classificação de propriedades de forma de agregados (AL ROUSAN, 2004) e um outro sistema de classificação proposto nesta pesquisa (Capítulo 2).

Para a obtenção de resultados compatíveis entre diferentes laboratórios, programas de comparações interlaboratoriais podem ser estabelecidos (LOPES, 2010). No âmbito dos ensaios de laboratório, precisão é o termo utilizado para descrever a variação entre ensaios repetitivos (FORTES *et al.*, 2004). A precisão tem como base as medidas de dispersão (desvio padrão e/ou coeficiente de variação) de uma série de repetições de uma mesma análise e pode ser dividida em: repetibilidade e reprodutibilidade. Repetibilidade refere-se ao grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas, de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições. Reprodutibilidade refere-se às medições de uma mesma grandeza, em que as medições individuais são efetuadas variando-se uma ou mais das seguintes condições: método, operador, equipamento, instrumento de medida, local, condições de utilização e tempo (BARTHEM; BERTULANI, 2009).

Bathina (2005) avaliou, estatisticamente, a qualidade das medidas de propriedades de forma geradas por um equipamento AIMS2, através das análises de repetibilidade e de reprodutibilidade. A autora propôs um método, baseado na norma americana ASTM C 802 (1996) e constatou a repetibilidade das medidas e a reprodutibilidade entre diferentes operadores do AIMS2, utilizado para a realização dos testes.

Há um esboço de norma técnica para a caracterização de agregados com o uso do PDI, em desenvolvimento no Brasil (Apêndice A). Diante disso e do fato de não haver, ainda no Brasil, um programa interlaboratorial para esse tipo de ensaio, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a qualidade das medidas obtidas com o uso de dois equipamentos AIMS2, existentes no país. Para fins de comparação, dois métodos distintos foram utilizados: o método proposto por Bathina (2005) e um método de análise de repetibilidade e de reprodutibilidade, das medidas de propriedades de forma de agregados, proposto nesta pesquisa.

### **3.2 Revisão Bibliográfica**

Há várias pesquisas realizadas no Brasil, com o uso do AIMS2, para análise das propriedades de forma de agregados ao longo dos últimos anos. Pesquisadores constataram a importância dessa ferramenta para as mais diversas aplicações (Tabela 3.1). Essas pesquisas foram conduzidas com o uso de um dos dois equipamentos AIMS2, em funcionamento, existentes no Brasil: o AIMS2 do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), da Universidade Federal do Ceará (UFC) ou o AIMS2 do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Tabela 3.1 – Estudos realizados no Brasil com a utilização do AIMS2

Referência	Aplicação
Bessa (2012)	Caracterização de agregados, de esqueleto mineral e de misturas asfálticas
Onofre (2012)	Caracterização de agregados para a avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos
Oliveira (2013)	Caracterização de agregados para a avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e em campo
Alves (2014)	Avaliação da resistência à degradação mecânica de agregados
Costa (2015)	Caracterização de areias de britagem oriundas de pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e avaliação da sua aplicação no concreto
Diógenes (2015)	Caracterização das propriedades de forma de agregados para fins de comparação entre diferentes processos de britagem
Aragão, Pazos e Motta (2016)	Avaliação dos efeitos de propriedades de forma de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas
Araujo (2016)	Avaliação da textura de misturas asfálticas para uso em revestimentos aeroportuários
Bastos (2016)	Caracterização de agregados para a avaliação do efeito da deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico
Cavalcanti (2016)	Avaliar o efeito da degradação de agregados em parâmetros de forma e de textura utilizando o Micro Deval e o abrasão Los Angeles com auxílio do PDI
Diógenes (2016)	Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário
Ibiapina (2016)	Avaliação da relação entre propriedades de forma dos agregados, parâmetros do esqueleto mineral e o comportamento mecânico de misturas asfálticas
Leandro (2016)	Caracterização das propriedades de forma de agregados para a avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação
Lima (2016)	Estudo da deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos
Ibiapina <i>et al.</i> (2017)	Avaliação da relação entre angularidade de agregados e parâmetros do esqueleto mineral de misturas asfálticas

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Um programa interlaboratorial consiste na organização, realização e avaliação de ensaios em produtos ou materiais idênticos ou similares, por laboratórios diferentes, sob condições pré-determinadas (ABNT ISO/IEC GUIA 43, 1999). Esse tipo de programa pode ser realizado com o objetivo de verificar a consistência dos resultados dos ensaios de um laboratório, a partir de um indicador de qualidade e da competência na realização dos ensaios (LOPES, 2010). O fato de um laboratório poder comparar o seu desempenho com outros

laboratórios com características semelhantes contribui para a implantação de ações preventivas visando a melhoria dos seus procedimentos (INMETRO, 2009).

De acordo com a ASTM E 691 (2009), os parâmetros considerados para os ensaios de laboratório são: (i) materiais – deve haver um mínimo de dois materiais e suas amostras devem ser homogeneizadas; (ii) laboratórios – deve haver um mínimo de cinco laboratórios participantes; (iii) operadores – deve haver um mínimo de dois operadores por laboratório (ensaios com um único operador são aceitáveis); (iv) amostras – deve haver no mínimo duas amostras de cada material analisadas por operador, em cada laboratório; (v) equipamento – este efeito não deve ser incluído na análise estatística.

Com o objetivo de validar a metodologia proposta por Al Rousan (2004) para o AIMS2, Bathina (2005) realizou as análises de repetibilidade e de reprodutibilidade, utilizando dados oriundos do citado autor, ou seja, treze agregados graúdos e cinco agregados miúdos, de mineralogias distintas e de diferentes localidades americanas. Foram utilizadas duas frações de agregados: retidos na 9,5 mm (graúda) e retidos na 1,18 mm (miúda) para as análises e um único equipamento AIMS2, do *Texas Transportation Institute* (TTI). Bathina (2005) avaliou a variação das medidas das propriedades de forma de agregados geradas pelo AIMS (1ª versão do AIMS2) baseada na norma ASTM C 802 (1996).

Um programa interlaboratorial não tem o objetivo de aprovar ou reprovar determinado laboratório com relação à realização de um ensaio específico, mas sim proporcionar a possibilidade de aprender com seus resultados. O fato de um laboratório apresentar desempenho satisfatório ou insatisfatório no ensaio, não significa dizer que o mesmo é bom ou ruim. Os resultados devem ser avaliados e as lições aprendidas para que os erros possam ser minimizados (OLIVIERI, 2004).

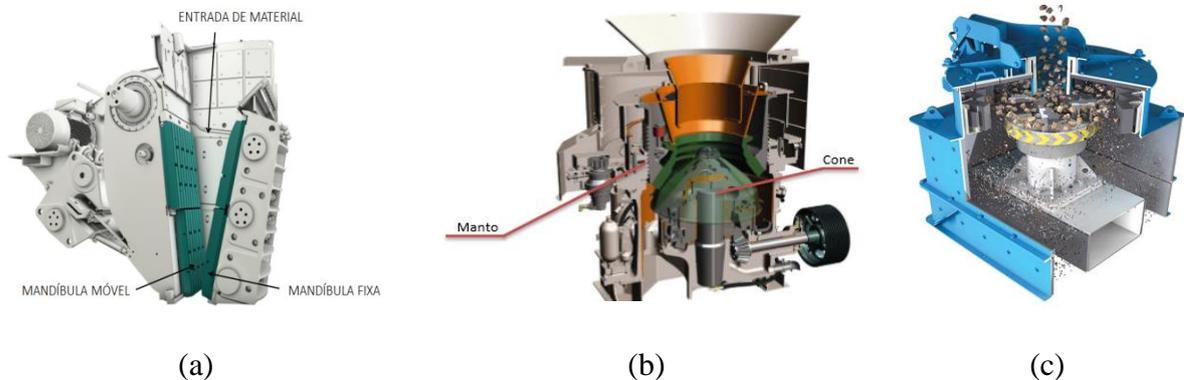
### **3.3 Materiais e Método**

#### **3.3.1 *Materials***

Os agregados utilizados para realizar as análises estatísticas de repetibilidade e de reprodutibilidade das medidas das propriedades de forma resultantes do AIMS2 possuem origem fonolítica e foram coletados em uma pedreira da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), no estado do Ceará, Brasil. Esses agregados foram diferenciados por meio de estágios distintos de processo de britagem. Assim, os agregados processados em três estágios, no

britador de mandíbulas (Figura 3.1a), no britador cônico (Figura 3.1b) e no de impacto vertical (Figura 3.1c) foram denominados de material 1. Os agregados processados em um estágio, no britador de mandíbulas, foram denominados de material 2.

Figura 3.1 – Britadores: a) de mandíbulas; b) cônico e c) de impacto vertical

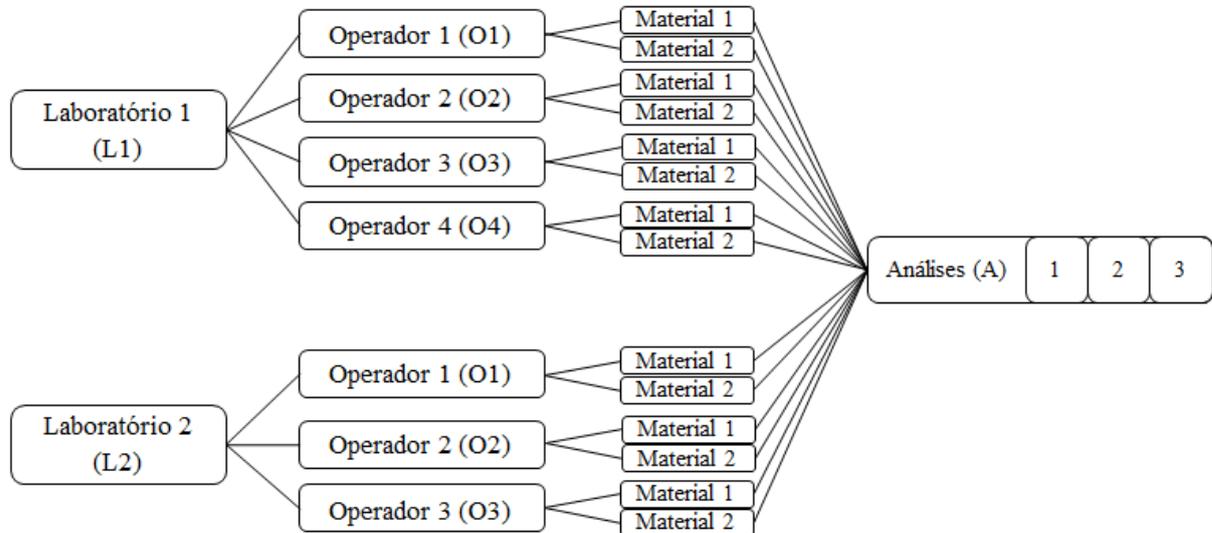


Fonte: a) e b) Metso (2015); c) Marcotte (2016).

### 3.3.2 Método

Como método, na fase experimental, utilizaram-se dois equipamentos para conduzir as análises de repetibilidade e de reprodutibilidade: o AIMS2 do LMP, da UFC (denominado de Laboratório 1 (L1)) e o AIMS2 da COPPE, da UFRJ (denominado de Laboratório 2 (L2)). Um protocolo de utilização do equipamento foi elaborado (Apêndice C) e encaminhado para cada Operador (O) que realizou os testes. Ao todo, sete operadores realizaram três Análises (A) de cada material (denominados de material 1 e de material 2), sendo quatro operadores do L1 (analisaram a mesma amostra) e três operadores do L2 (analisaram os mesmos materiais). Foram utilizadas duas frações: 12,5 mm (gráúdo) e 1,18 mm (miúdo) de cada material. A Figura 3.2 apresenta um fluxograma do método experimental utilizado para que, posteriormente, as análises para testar a repetibilidade das medidas das propriedades de forma e a reprodutibilidade do AIMS2 pudessem ser realizadas.

Figura 3.2 – Fluxograma do método experimental utilizado para realizar as análises de repetibilidade e de reprodutibilidade das medidas das propriedades de forma geradas a partir do uso do AIMS2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

As análises de repetibilidade e de reprodutibilidade das medidas das propriedades de forma geradas pelo AIMS2 estão descritas a seguir:

- a) Análise de repetibilidade entre medidas: é aquela em que a variável cujo impacto está sendo avaliado é a variação ocorrida entre as medidas (três análises) realizadas por um mesmo operador, nas mesmas condições;
- b) Análise de reprodutibilidade entre operadores: é aquela em que a variável cujo impacto está sendo avaliado é a variação ocorrida entre as medidas realizadas por operadores distintos (quatro operadores no L1 e três operadores no L2);
- c) Análise da reprodutibilidade entre equipamentos: é aquela em que a variável cujo impacto está sendo avaliado é a variação ocorrida entre as medidas realizadas por operadores distintos, entre dois equipamentos distintos (AIMS2 do L1 e AIMS2 do L2).

Na abordagem utilizada nas três análises descritas acima, houve reposição de material, ou seja, as partículas de agregados avaliadas foram retornadas ao recipiente que continha a amostra, após cada análise realizada no AIMS2. Para realizar a próxima análise, novas partículas foram selecionadas, aleatoriamente (sendo um total de três análises realizadas por operador). Assim, houve influência da variabilidade da amostra, uma vez que as partículas retiradas do recipiente para serem analisadas não foram exatamente as mesmas.

Após a fase experimental, dois métodos distintos foram utilizados para testar, estatisticamente, a repetibilidade entre medidas das propriedades de forma geradas pelo AIMS2, a reprodutibilidade entre diferentes operadores e a reprodutibilidade entre diferentes equipamentos. O primeiro método utilizado foi proposto por Bathina (2005) e o segundo método foi proposto nesta pesquisa, com base na combinação de duas abordagens: a da estatística descritiva e a da estatística inferencial. Os dois métodos estão descritos a seguir.

### *3.3.2.1 Método proposto por Bathina (2005)*

Bathina (2005) avaliou a variação das medidas das propriedades de forma de agregados, geradas a partir do uso do AIMS2 e utilizou a média dos Coeficientes de Variação (CV) de cada propriedade de forma, de cada fração dos agregados avaliados, como parâmetro de análise das variações nas medidas e, posteriormente, utilizou o valor máximo dessa média como indicador da repetibilidade das medidas e da reprodutibilidade do AIMS2. Os valores de referência dos CVs de repetibilidade e de reprodutibilidade propostos por Bathina (2005), com base na norma ASTM C 802 (1996), estão apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3.

Na análise de repetibilidade, Bathina (2005) utilizou a seguinte abordagem: o operador utilizou amostras de agregado de um recipiente e realizou três análises, com reposição, de modo que as partículas analisadas em cada medida não foram exatamente as mesmas. A citada autora utilizou a média das três análises (e não a distribuição das mesmas) e a média das variâncias das três análises como base para o cálculo do CV de repetibilidade. Comparados os valores de CVs de todas as propriedades de forma, nas duas frações analisadas (9,5 e 1,18 mm), o maior valor encontrado foi o da textura superficial (13,90%), diante disso a autora concluiu que houve repetibilidade entre as medidas geradas a partir do uso do AIMS2 (Tabelas 3.2 e 3.3).

Na análise de reprodutibilidade, três operadores participaram do experimento. Bathina (2005) utilizou a média das variâncias e a variância das médias das três análises realizadas por cada operador, como base de cálculo do CV de reprodutibilidade. Comparados os valores de CVs de todas as propriedades de forma, nas duas frações analisadas (9,5 e 1,18 mm), o maior valor encontrado foi o da textura superficial (16,30%), diante disso a autora concluiu que houve reprodutibilidade entre as medidas geradas a partir do uso do AIMS2 (Tabelas 3.2 e 3.3).

Tabela 3.2 – Valores de referência dos CVs de repetibilidade e de reprodutibilidade de Bathina (2005) para as frações graúdas (9,5 mm)

Propriedade	Repetibilidade entre análises	Reprodutibilidade entre operadores
	Média dos CVs (%)	Média dos CVs (%)
Esfericidade	2,00	2,60
Angularidade	8,40	10,60
Textura superficial	<b>13,90</b>	<b>16,30</b>

Fonte: Adaptado de Bathina (2005).

Tabela 3.3 – Valores de referência dos CVs de repetibilidade e de reprodutibilidade de Bathina (2005) para as frações miúdas (1,18 mm)

Propriedade	Repetibilidade entre análises	Reprodutibilidade entre operadores
	Média dos CVs (%)	Média dos CVs (%)
Forma 2D	3,20	7,10
Angularidade	4,60	3,20

Fonte: Adaptado de Bathina (2005).

### 3.3.2.2 Método proposto nesta pesquisa

No método proposto nesta pesquisa, a variação entre as medidas das propriedades de forma de agregados, geradas a partir do uso do AIMS2, foi avaliada com base na combinação de duas abordagens distintas: a da estatística descritiva e a da estatística inferencial. Na abordagem descritiva, as medidas de tendência central (média) e de dispersão (coeficiente de variação) foram utilizadas como parâmetros indicadores das variações entre cada análise (individual) das medidas de cada propriedade de forma, de cada fração e de cada material realizada por um operador; entre as três análises realizadas (em conjunto) por cada um dos sete operadores e entre as análises realizadas por todos os operadores de cada um dos dois laboratórios avaliados. As medidas descritivas calculadas e utilizadas nas análises estão apresentadas no Apêndice D.

Na abordagem inferencial, o critério utilizado para analisar a repetibilidade e a reprodutibilidade foi o da igualdade das médias das medidas de cada propriedade de forma, de cada fração e de cada material, avaliada com a aplicação dos testes de hipótese. Primeiramente, verificou-se a homogeneidade das amostras com o uso do teste de Bartlett e a normalidade dos resíduos com o uso do teste de Shapiro-Wilk, que são condições necessárias para se aplicar o teste paramétrico de análise de variâncias ANOVA. O objetivo de ter

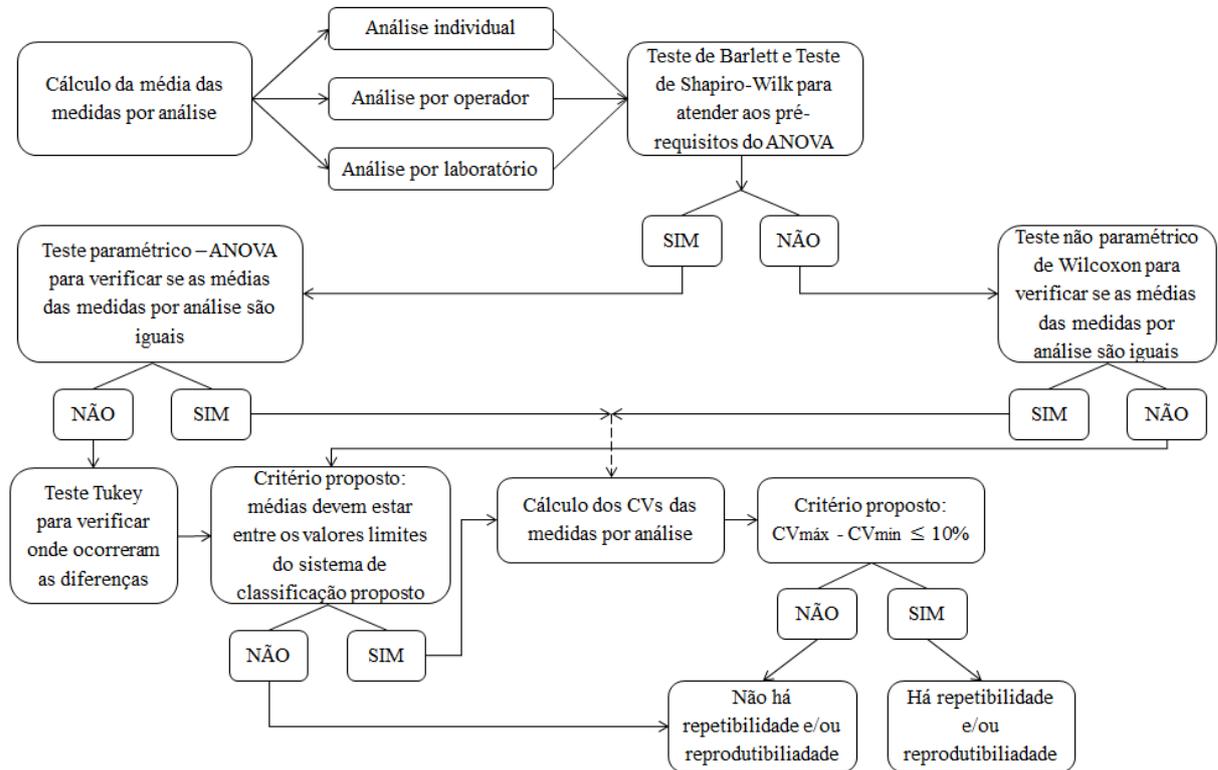
aplicado o ANOVA foi verificar se, pelo menos, uma análise (individual) era diferente das outras duas análises. Nas análises em que foram identificadas diferenças, o teste Tukey foi aplicado com o objetivo de verificar onde ocorreram essas diferenças, comparando as análises duas a duas. Para as análises que não atenderam aos pré-requisitos supracitados para a aplicação do ANOVA, aplicou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon, com o objetivo de verificar a diferença entre análises, duas a duas.

O nível de significância utilizado em todos os testes foi de 0,05. Os códigos dos testes aplicados, para analisar a repetibilidade entre medidas; a reprodutibilidade entre diferentes operadores e a reprodutibilidade entre diferentes laboratórios, foram elaborados com o uso do *software R* (*R CORE TEAM, 2015*) e estão apresentados nos Apêndices E, F e G, respectivamente. Ressalta-se que, esses Apêndices apresentam os códigos elaborados para a propriedade de angularidade e que os códigos análogos foram utilizados para a esfericidade, a textura superficial e a forma 2D.

A partir dos resultados dos testes de hipótese (os resultados de todos os testes de hipótese aplicados na abordagem inferencial estão apresentados no Apêndice I) retornou-se à abordagem descritiva. Propôs-se que, caso os resultados dos testes constatassem que as médias das medidas não seriam estatisticamente iguais, um segundo critério de verificação de igualdade seria adotado. O critério proposto foi aquele em que essas médias seriam consideradas iguais, caso seus valores se encontrassem entre os valores limites que estabelecem as classes do sistema de classificação de propriedades de forma de agregados proposto nesta pesquisa (Capítulo 2). Caso esse critério tenha sido atendido, os CVs seriam os parâmetros indicadores da variação entre as medidas.

Tendo os CVs como parâmetros indicadores da variação entre as medidas, o critério proposto para indicar a repetibilidade e a reprodutibilidade foi a consistência dos CVs, ou seja, a tendência à homogeneidade dos valores de CVs. Propôs-se a verificação dos valores de CV mínimo e de CV máximo das medidas de cada propriedade de forma, de cada fração e de cada material. Adotou-se o valor máximo de 10% para essa diferença e, por conseguinte, a constatação de que houve repetibilidade e/ou reprodutibilidade das medidas quando o método proposto foi utilizado. Vale ressaltar que o valor do parâmetro CV para todas as propriedades de forma não foi avaliado nesta pesquisa e sim a diferença entre CVs das análises individuais. A Figura 3.3 apresenta um fluxograma do método proposto para testar a repetibilidade das medidas e a reprodutibilidade do AIMS2.

Figura 3.3 – Fluxograma do método proposto para realizar as análises de repetibilidade e de reprodutibilidade das medidas das propriedades de forma geradas a partir do uso do AIMS2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

### 3.4 Resultados e Discussões

#### 3.4.1 Resultados obtidos com o método proposto por Bathina (2005)

Os resultados obtidos foram gerados a partir do uso de dois equipamentos: o AIMS2 do L1 e o AIMS2 do L2. O método utilizado foi proposto por Bathina (2005), no qual os CVs de repetibilidade e de reprodutibilidade foram utilizados como parâmetros para avaliar a variação das medidas geradas pelos equipamentos. As Tabelas 3.4 e 3.5 apresentam os valores dos CVs correspondentes à repetibilidade do L1 e à repetibilidade do L2 e os valores dos CVs correspondentes à reprodutibilidade entre operadores de cada laboratório.

Diante dos resultados obtidos, observou-se que houve uniformidade entre os CVs de cada propriedade, em cada fração, para os dois materiais analisados e constatou-se que: houve repetibilidade entre as medidas geradas a partir do uso do AIMS2 do L1, com um CV de 3,32%; houve repetibilidade entre as medidas geradas a partir do uso do AIMS2 do L2, com um CV de 3,49%; houve reprodutibilidade entre as medidas geradas pelos operadores do

AIMS2 do L1, com um CV de 7,32% e houve reprodutibilidade entre as medidas geradas pelos operadores do AIMS2 do L2, com um CV de 3,47%. Observou-se que os valores máximos obtidos para os CVs foram inferiores aos valores de referência de Bathina (2005), apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3. Portanto, concluiu-se que os equipamentos analisados atenderam aos critérios de qualidade das medidas avaliadas quando o referido método foi utilizado.

Tabela 3.4 – Resultados dos CVs de repetibilidade e de reprodutibilidade para as frações graúdas (12,5 mm)

Propriedade	Material	CV repetibilidade entre medidas (%)		CV reprodutibilidade entre operadores (%)	
		L1	L2	L1	L2
Esfericidade	1	1,71	1,92	1,72	1,78
	2	2,49	2,88	2,56	2,58
	Média dos CVs (%)	2,10	2,40	2,14	2,18
Angularidade	1	2,48	3,33	3,12	3,30
	2	2,77	3,65	2,47	3,04
	Média dos CVs (%)	2,63	<b>3,49</b>	2,80	3,17
Textura superficial	1	2,41	4,24	2,53	4,00
	2	4,22	2,44	5,80	2,93
	Média dos CVs (%)	<b>3,32</b>	3,34	4,17	<b>3,47</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tabela 3.5 – Resultados dos CVs de repetibilidade e de reprodutibilidade para as frações miúdas (1,18 mm)

Propriedade	Material	CV repetibilidade entre medidas (%)		CV reprodutibilidade entre operadores (%)	
		L1	L2	L1	L2
Forma 2D	1	2,46	1,74	5,83	1,89
	2	3,96	2,41	4,42	2,36
	Média dos CVs (%)	3,21	2,08	5,13	2,13
Angularidade	1	3,14	0,98	9,89	1,51
	2	1,68	1,38	4,75	2,47
	Média dos CVs (%)	2,41	1,18	<b>7,32</b>	1,99

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

### 3.4.2 Resultados obtidos com o método proposto nesta pesquisa

No método proposto, a qualidade das medidas das propriedades de forma de agregados, geradas a partir do uso do AIMS2, foi avaliada com base na combinação de duas abordagens distintas: a da estatística descritiva e a da estatística inferencial. Vale ressaltar que as letras (a, b) nas Tabelas a seguir indicam a igualdade das médias, ou seja, letras iguais significam médias estatisticamente iguais. Para médias estatisticamente diferentes foi aplicado

o critério proposto, no qual as médias foram consideradas iguais diante do fato de que seus valores se encontraram entre os valores limites que estabelecem as classes do sistema de classificação de propriedades de forma de agregados proposto no Capítulo 2 (Tabela 2.9).

#### *3.4.2.1 Repetibilidade entre medidas de propriedades de forma*

Os resultados de repetibilidade entre medidas de propriedades de forma estão apresentados nas Tabelas 3.6 a 3.13 e nas Figuras 3.4 a 3.23. Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de angularidade do L1 estão apresentados na Tabela 3.6. Observou-se que o valor da média (3.826) da análise 1 do operador 1 foi estatisticamente diferente das demais análises realizadas pelo mesmo operador. Para essa média diferente foi aplicado o critério proposto e observado que as médias das três análises se encontraram na mesma classe de angularidade (subarredondado). Portanto, as três médias foram consideradas iguais.

Observou-se, também, que as médias das medidas por análise (individual), do operador 2, do L1, do material 1, da fração 1,18 mm, apesar de serem estatisticamente iguais, apresentaram valores maiores do que as demais médias. As médias das análises 2 (4.154) e 3 (4.255), do citado operador, se encontraram na classe “subangular”, do sistema de classificação proposto, ao passo que todas as outras médias se encontraram na classe “subarredondado”.

As diferenças supracitadas podem ser provenientes da segregação das partículas no recipiente. O operador pode não ter misturado o material antes de selecionar, aleatoriamente, as partículas para análise ou pode não ter selecionado partículas de diferentes locais do recipiente. Deve-se ressaltar a importância da homogeneização da amostra, principalmente para os agregados miúdos ( $< 4,75$  mm), pois essa amostra contém mais partículas do que a quantidade selecionada para ser analisada (150 partículas), ao contrário dos grãos ( $\geq 4,75$  mm) que, geralmente, possuem a quantidade necessária (50 partículas).

Tabela 3.6 – Resultados das médias das medidas de angularidade por análise do L1

Laboratório (L)	Material	Fração (mm)	Operador (O)	Média das medidas por análise		
				1	2	3
1	1	1,18	1	<b>3.826a</b>	3.466b	3.467b
			2	<b>4.065a</b>	<b>4.154a</b>	<b>4.255a</b>
			3	3.372a	3.399a	3.397a
			4	3.469a	3.453a	3.470a
		12,5	1	3.169a	3.064a	3.125a
			2	3.217a	3.124a	3.053a
			3	3.001a	2.994a	2.972a
			4	3.071a	3.087a	2.880a
	2	1,18	1	3.434a	3.577a	3.476a
			2	3.806a	3.912a	3.876a
			3	3.582a	3.522a	3.537a
			4	3.584a	3.669a	3.521a
		12,5	1	3.444a	3.482a	3.370a
			2	3.501a	3.479a	3.366a
			3	3.318a	3.411a	3.472a
			4	3.535a	3.331a	3.252a

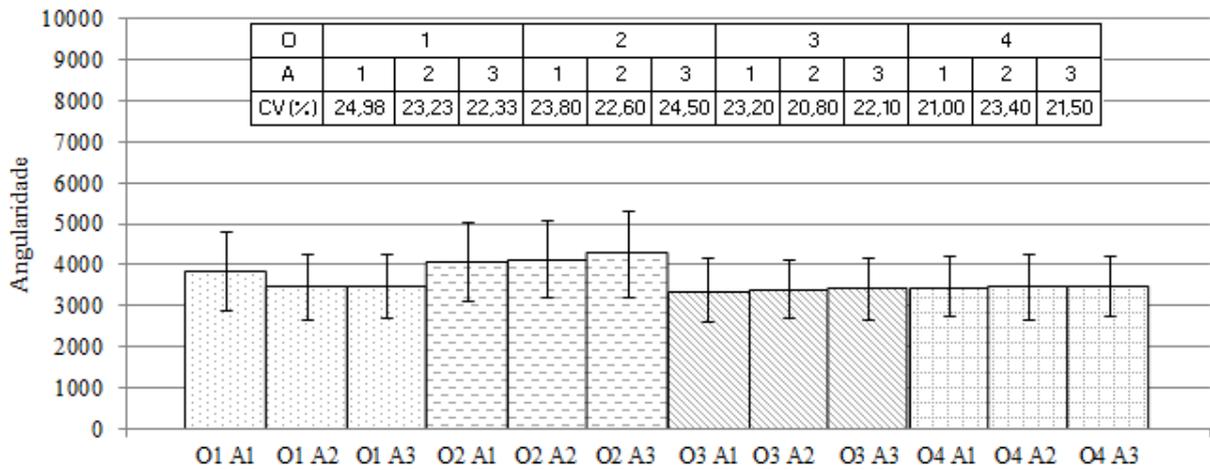
Nota: Letras (a,b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

As Figuras 3.4 a 3.7 apresentam os resultados das médias e dos CVs de angularidade do L1. Ressalta-se que a ordem de grandeza dos CVs encontrados para as diferentes propriedades de forma não foi a mesma e que esse fato pode estar relacionado às particularidades de cada propriedade do material. Essas diferenças entre os valores de CVs de propriedades de forma distintas, não foram avaliadas nesta pesquisa. Avaliou-se a homogeneidade dos CVs para a mesma propriedade de forma.

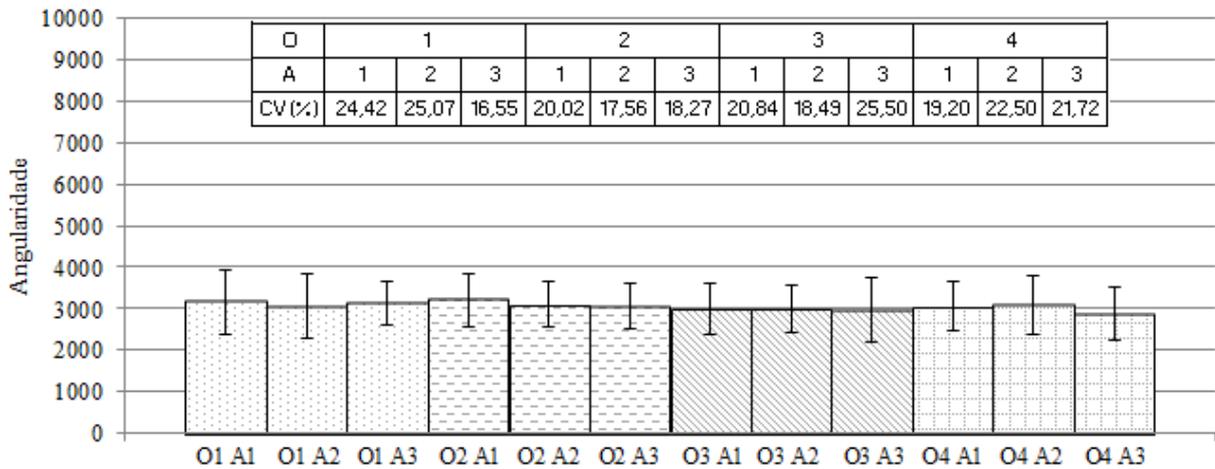
Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\max} - CV_{\min} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se repetibilidade entre as medidas de angularidade do L1. No gráfico da Figura 3.4, constatou-se, como relatado anteriormente, a diferença das médias das medidas por análise (individual), do operador 2, do L1, do material 1, da fração 1,18 mm, quando comparadas com as médias das demais medidas por análise.

Figura 3.4 – Resultados das médias e dos CVs de angularidade do L1 do material 1 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



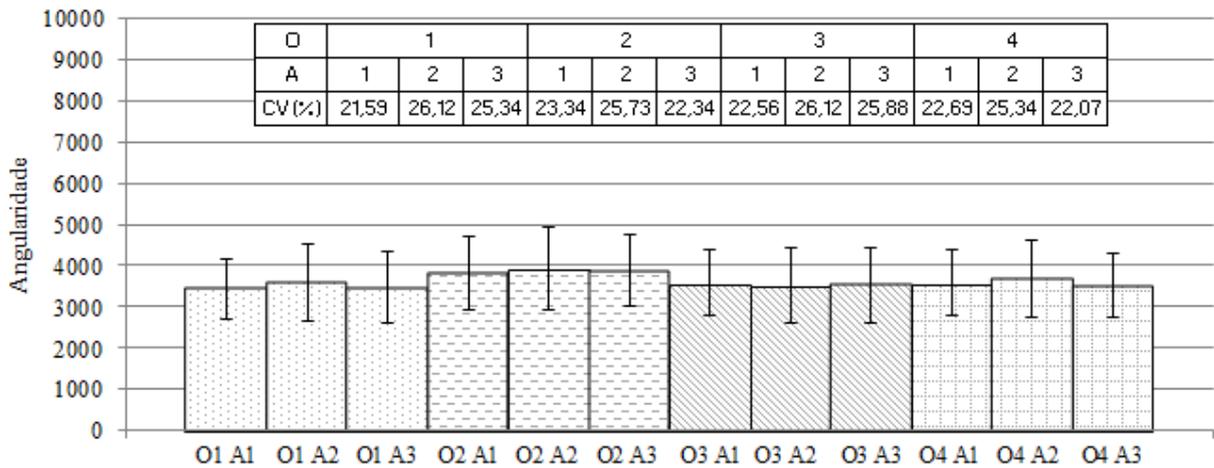
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.5 – Resultados das médias e dos CVs de angularidade do L1 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



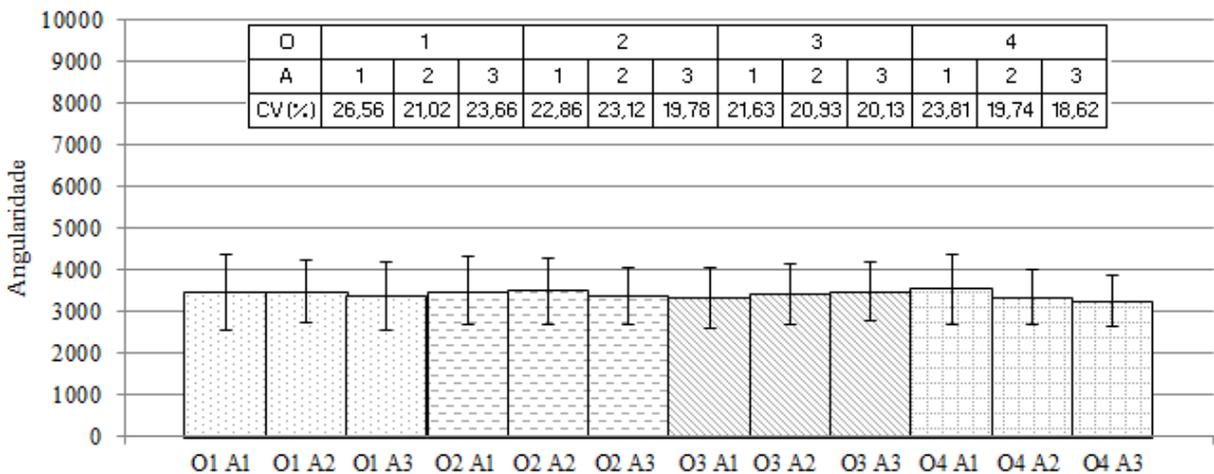
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.6 – Resultados das médias e dos CVs de angularidade do L1 do material 2 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.7 – Resultados das médias e dos CVs de angularidade do L1 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de angularidade do L2 estão apresentados na Tabela 3.7. Observou-se que o valor da média (3.179) da análise 1 do operador 3 foi estatisticamente diferente das demais análises realizadas pelo mesmo operador. Para essa média diferente foi aplicado o critério proposto e observado que as médias das três análises se encontraram na mesma classe de angularidade (subarredondado). Portanto, as três médias foram consideradas iguais.

Tabela 3.7 – Resultados das médias das medidas de angularidade por análise do L2

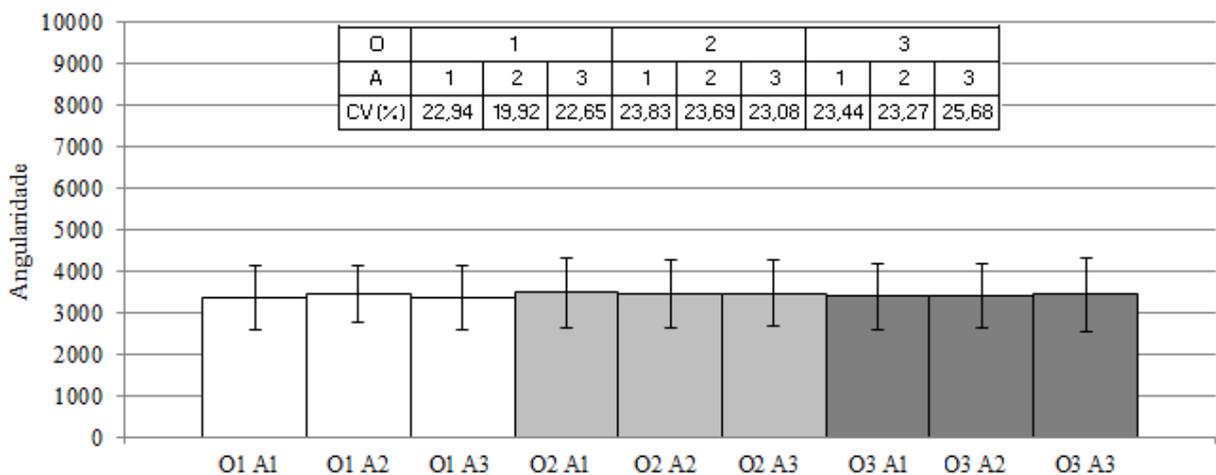
Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador	Média das medidas por análise		
				1	2	3
2	1	1,18	1	3.343a	3.439a	3.349a
			2	3.470a	3.451a	3.468a
			3	3.391a	3.399a	3.426a
		12,5	1	2.878a	2.959a	3.162a
			2	3.050a	3.143a	3.136a
			3	<b>3.179a</b>	3.038b	3.029b
	2	1,18	1	3.571a	3.625a	3.512a
			2	3.501a	3.576a	3.473a
			3	3.713a	3.645a	3.656a
	12,5	1	3.456a	3.435a	3.379a	
		2	3.566a	3.421a	3.393a	
		3	3.681a	3.362a	3.333a	

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

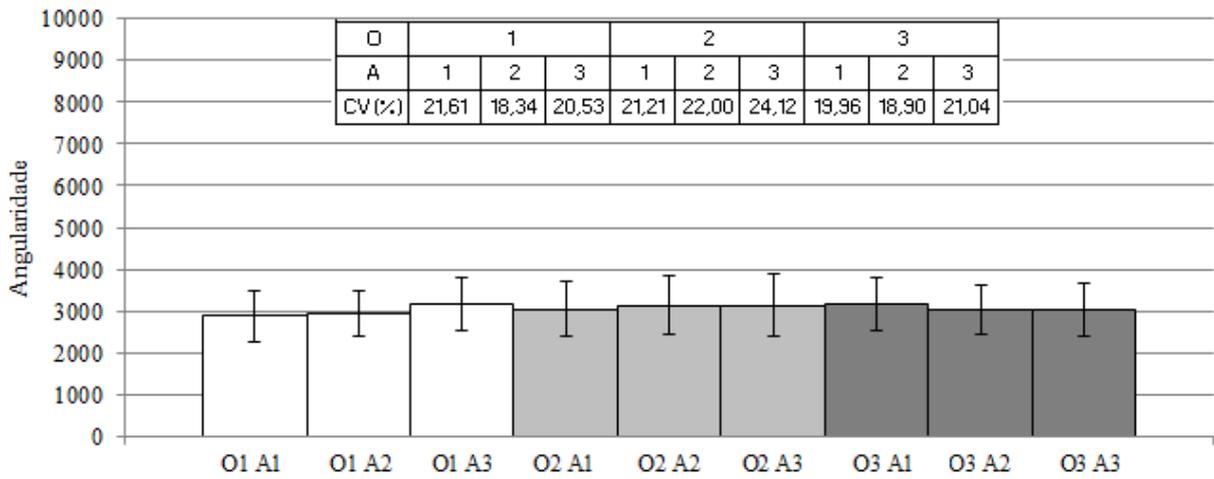
As Figuras 3.8 a 3.11 apresentam os resultados das médias e dos CVs de angularidade do L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\text{máx}} - CV_{\text{mín}} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se repetibilidade entre as medidas de angularidade do L2.

Figura 3.8 – Resultados das médias e dos CVs de angularidade do L2 do material 1 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



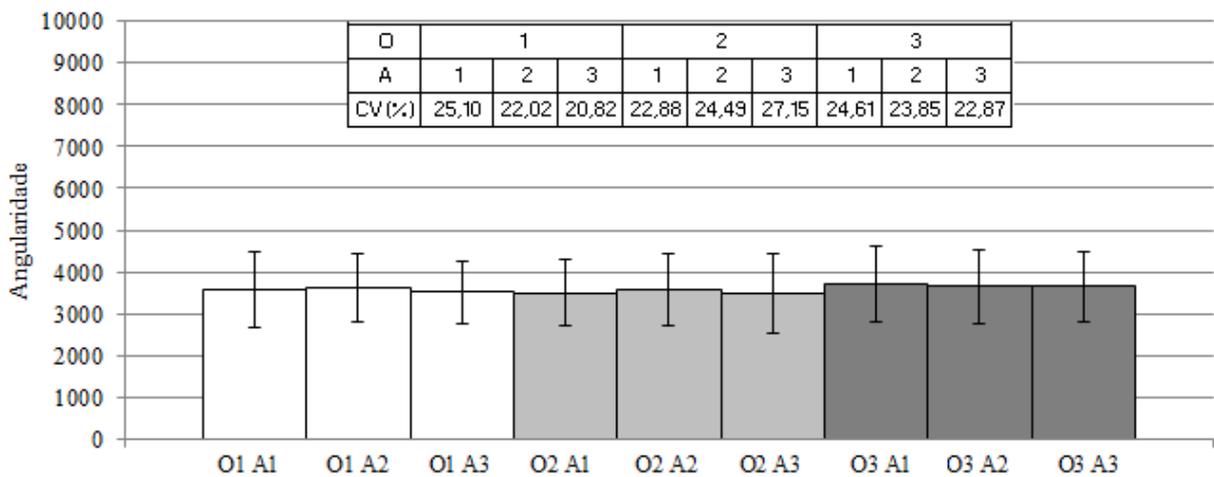
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.9 – Resultados das médias e dos CVs de angularidade do L2 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



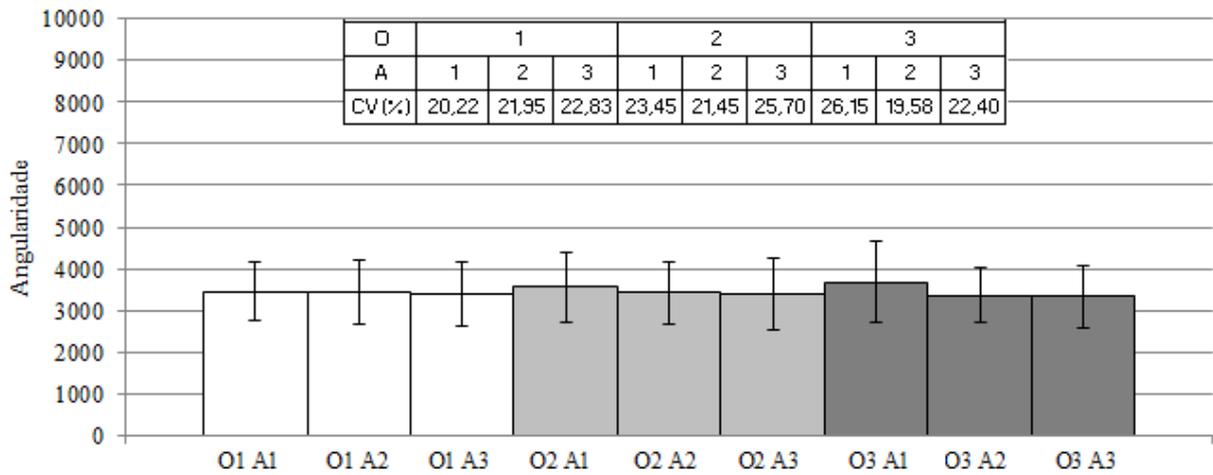
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.10 – Resultados das médias e dos CVs de angularidade do L2 do material 2 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.11 – Resultados das médias e dos CVs de angularidade do L2 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de esfericidade do L1 estão apresentados na Tabela 3.8. Observou-se que os valores das médias foram estatisticamente iguais para as três análises realizadas pelo mesmo operador.

Tabela 3.8 – Resultados das médias das medidas de esfericidade por análise do L1

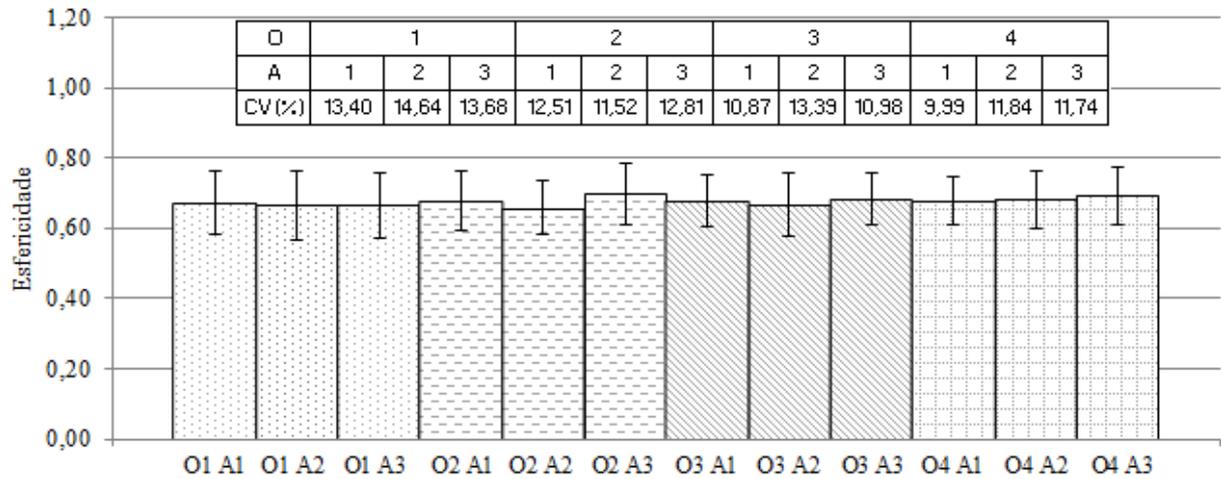
Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador	Média das medidas por análise		
				1	2	3
1	1	12,5	1	0,67a	0,67a	0,67a
			2	0,68a	0,66a	0,70a
			3	0,68a	0,67a	0,68a
			4	0,68a	0,68a	0,69a
			1	0,61a	0,59a	0,60a
			2	0,59a	0,61a	0,64a
	2	3	0,62a	0,63a	0,60a	
		4	0,60a	0,60a	0,61a	

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

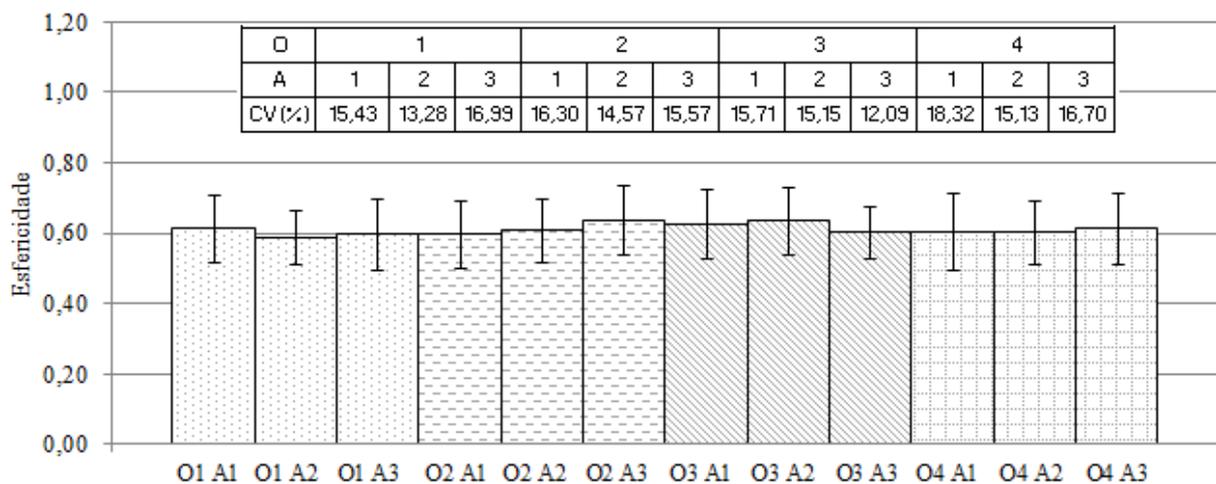
As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam os resultados das médias e dos CVs de esfericidade do L1. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{máx} - CV_{mín} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se repetibilidade entre as medidas de esfericidade do L1.

Figura 3.12 – Resultados das médias e dos CVs de esfericidade do L1 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.13 – Resultados das médias e dos CVs de esfericidade do L1 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de esfericidade do L2 estão apresentados na Tabela 3.9. Observou-se que os valores das médias foram estatisticamente iguais para as três análises realizadas pelo mesmo operador.

Tabela 3.9 – Resultados das médias das medidas de esfericidade por análise do L2

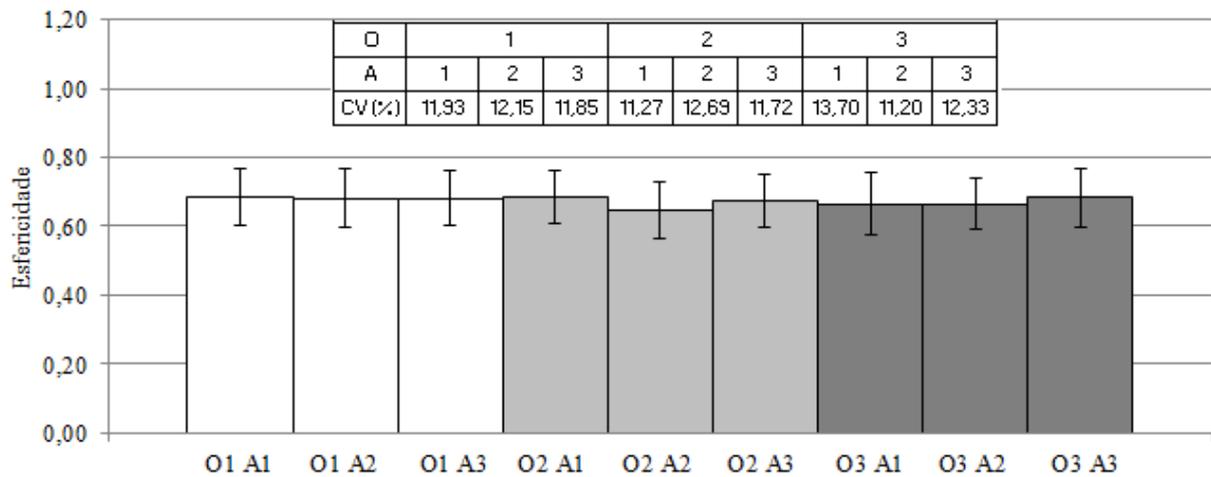
Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador	Média das medidas por análise		
				1	2	3
2	1	12,5	1	0,68a	0,68a	0,68a
			2	0,69a	0,65a	0,67a
			3	0,66a	0,67a	0,68a
	2		1	0,60a	0,61a	0,64a
			2	0,59a	0,63a	0,62a
			3	0,59a	0,61a	0,61a

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

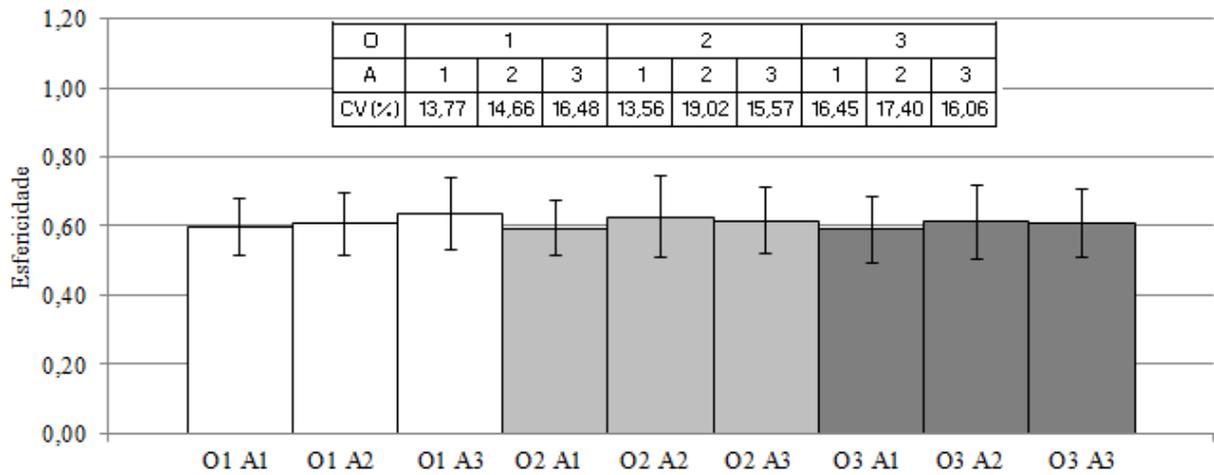
As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam os resultados das médias e dos CVs de esfericidade do L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\text{máx}} - CV_{\text{mín}} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se repetibilidade entre as medidas de esfericidade do L2.

Figura 3.14 – Resultados das médias e dos CVs de esfericidade do L2 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.15 – Resultados das médias e dos CVs de esfericidade do L2 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de forma 2D do L1 estão apresentados na Tabela 3.10. Observou-se que os valores das médias da análise 1 do operador 3 (7,53), da análise 1 do operador 1 (7,92), da análise 1 do operador 2 (9,05) e da análise 1 do operador 4 (8,26) foram estatisticamente diferente das demais análises realizadas pelos referidos operadores. Para as médias diferentes foi aplicado o critério proposto e observado que as médias das três análises de cada operador se encontraram na mesma classe de forma 2D (semicircular). Portanto, as médias das medidas das três análises realizadas por cada operador foram consideradas iguais.

Tabela 3.10 – Resultados das médias das medidas de forma 2D por análise do L1

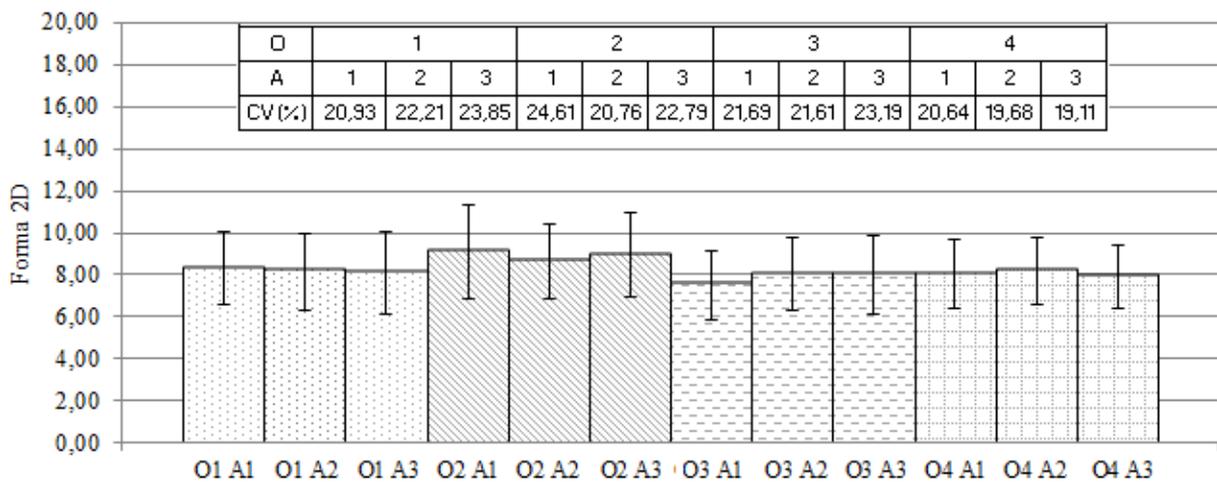
Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador	Média das medidas por análise		
				1	2	3
1	1	1,18	1	8,29a	8,15a	8,10a
			2	9,06a	8,65a	8,95a
			3	<b>7,53a</b>	8,05b	8,00b
			4	8,03a	8,20a	7,88a
	1		<b>7,92a</b>	8,48b	8,35b	
	2		<b>9,05a</b>	8,68b	8,50b	
	3		8,16a	8,30a	8,74a	
	4		<b>8,26a</b>	9,12b	8,92b	

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

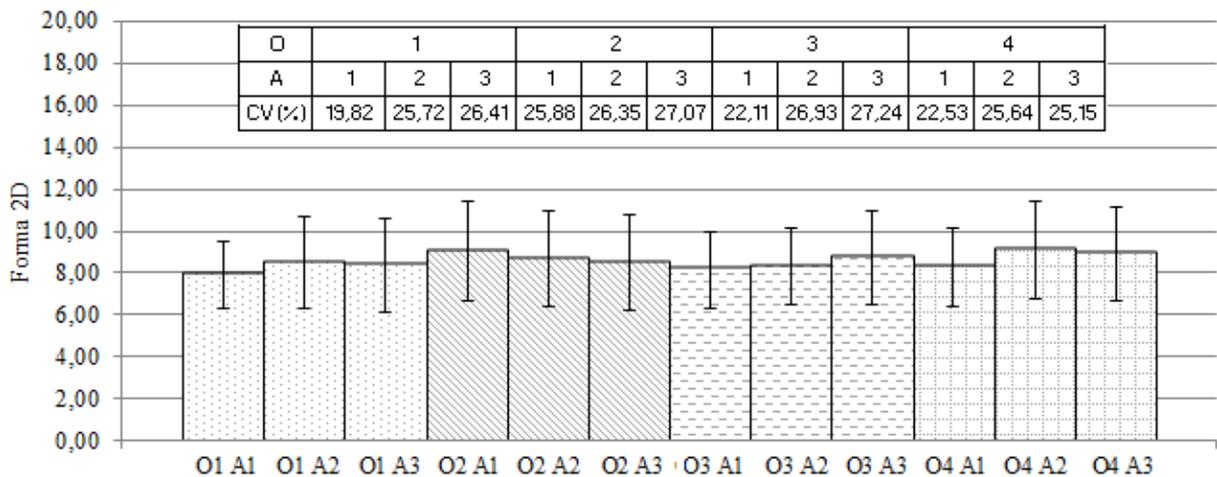
As Figuras 3.16 e 3.17 apresentam os resultados das médias e dos CVs de forma 2D do L1. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\max} - CV_{\min} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se repetibilidade entre as medidas de forma 2D do L1.

Figura 3.16 – Resultados das médias e dos CVs de forma 2D do L1 do material 1 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.17 – Resultados das médias e dos CVs de forma 2D do L1 do material 2 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de forma 2D do L2 estão apresentados na Tabela 3.11. Observou-se que os valores das médias foram estatisticamente iguais para as três análises realizadas pelo mesmo operador.

Tabela 3.11 – Resultados das médias das medidas de forma 2D por análise do L2

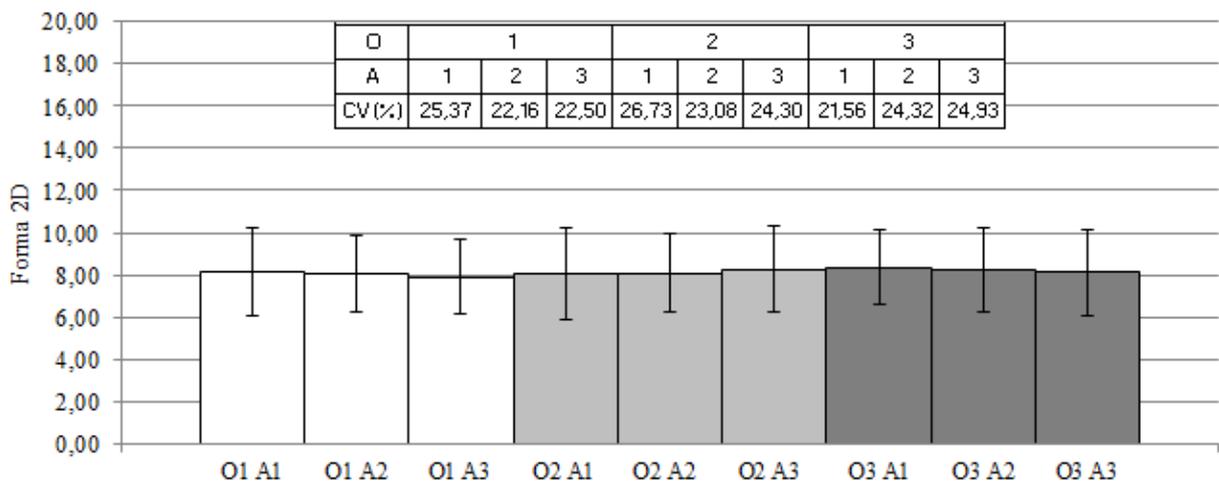
Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador	Média das medidas por análise		
				1	2	3
2	1	1,18	1	8,16a	8,05a	7,92a
			2	8,08a	8,08a	8,28a
			3	8,37a	8,21a	8,14a
	1		8,25a	8,69a	8,86a	
	2		8,72a	8,63a	8,57a	
	3		8,71a	8,83a	8,86a	

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

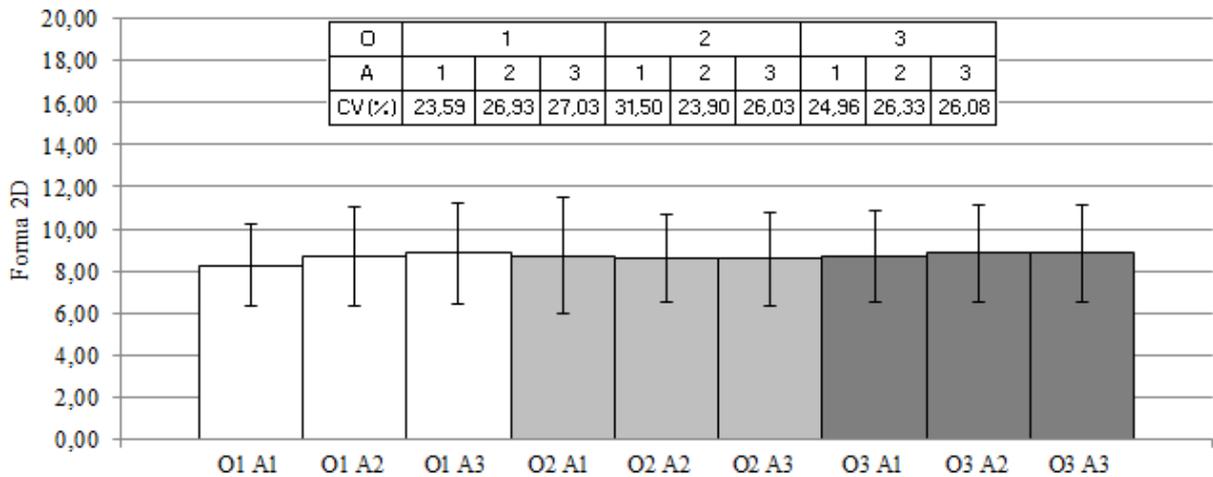
As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam os resultados das médias e dos CVs de forma 2D do L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\max} - CV_{\min} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se repetibilidade entre as medidas de forma 2D do L2.

Figura 3.18 – Resultados das médias e dos CVs de forma 2D do L2 do material 1 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.19 – Resultados das médias e dos CVs de forma 2D do L2 do material 2 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de textura superficial do L1 estão apresentados na Tabela 3.12. Observou-se que os valores das médias foram estatisticamente iguais para as três análises realizadas pelo mesmo operador.

Tabela 3.12 – Resultados das médias das medidas de textura superficial por análise do L1

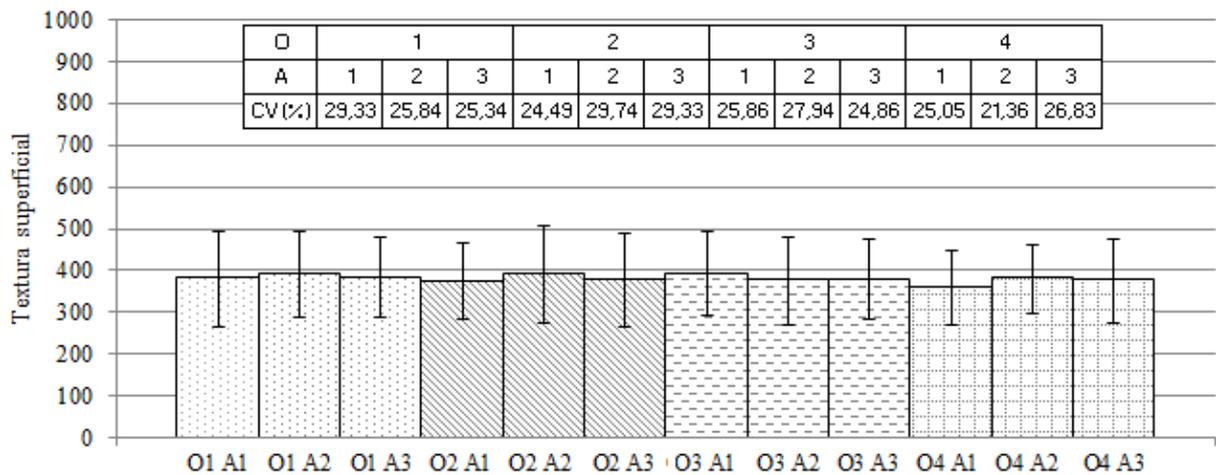
Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador	Média das medidas por análise		
				1	2	3
1	1	12,5	1	380a	391a	384a
			2	374a	390a	378a
			3	392a	376a	379a
			4	357a	380a	376a
	2		1	324a	325a	352a
			2	341a	335a	317a
			3	335a	356a	319a
			4	370a	355a	370a

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

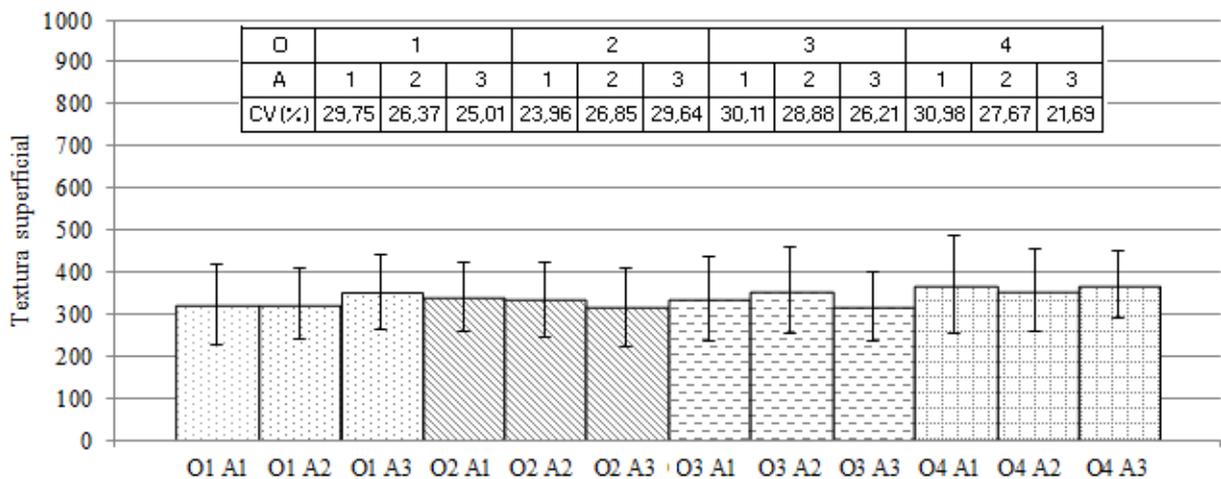
As Figuras 3.20 e 3.21 apresentam os resultados das médias e dos CVs de textura superficial do L1. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\text{máx}} - CV_{\text{mín}} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se repetibilidade entre as medidas de textura superficial do L1.

Figura 3.20 – Resultados das médias e dos CVs de textura superficial do L1 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.21 – Resultados das médias e dos CVs de textura superficial do L1 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de textura superficial do L2 estão apresentados na Tabela 3.13. Observou-se que os valores das médias foram estatisticamente iguais para as três análises realizadas pelo mesmo operador.

Tabela 3.13 – Resultados das médias das medidas de textura superficial por análise do L2

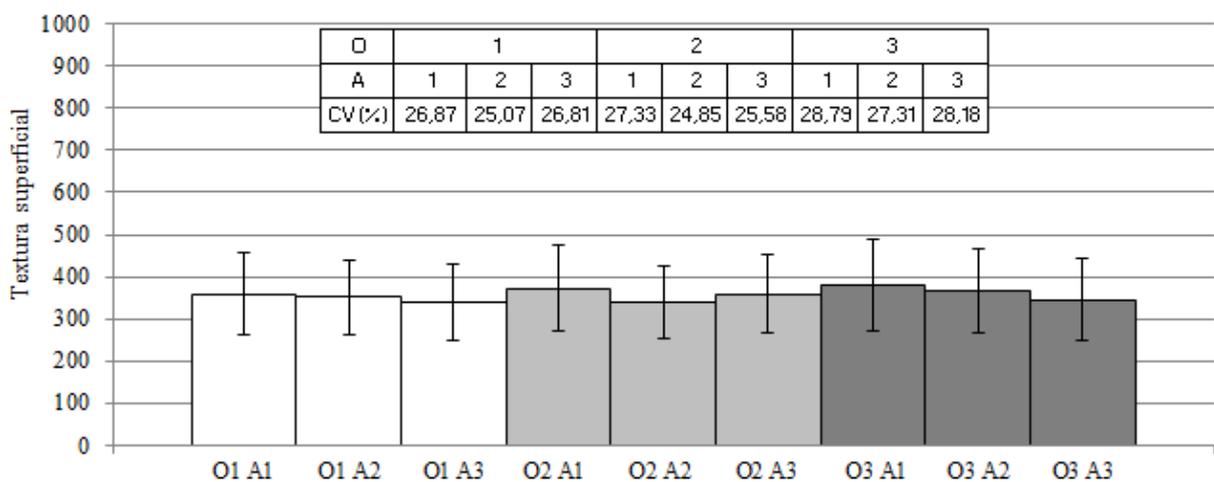
Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador	Média das medidas por análise		
				1	2	3
1	1	12,5	1	360a	351a	340a
			2	373a	340a	359a
			3	381a	367a	346a
	1		310a	323a	323a	
	2		321a	334a	331a	
	3		325a	315a	307a	

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

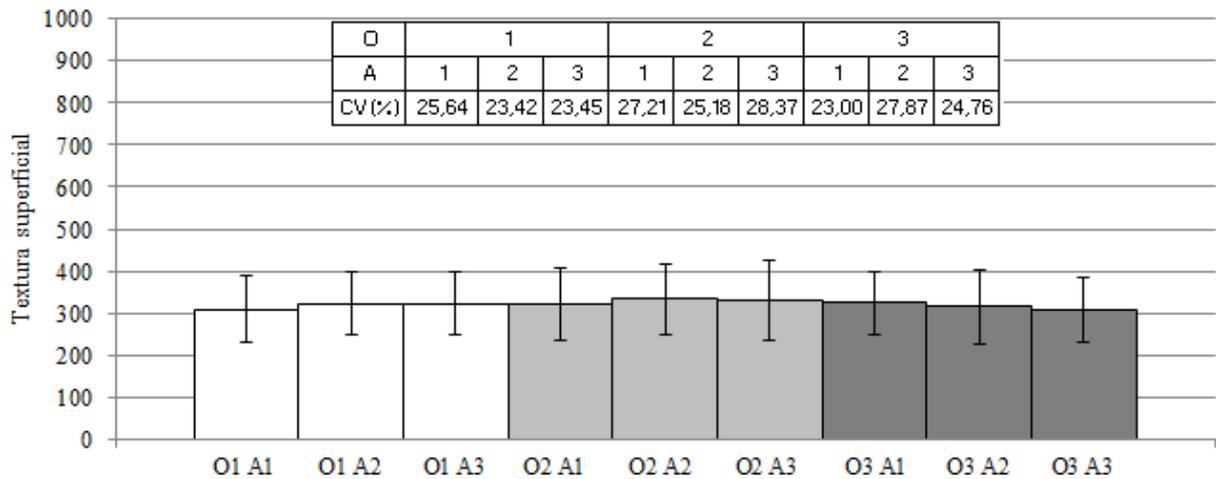
As Figuras 3.22 e 3.23 apresentam os resultados das médias e dos CVs de textura superficial do L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\text{máx}} - CV_{\text{min}} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se repetibilidade entre as medidas de textura superficial do L2.

Figura 3.22 – Resultados das médias e dos CVs de textura superficial do L2 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.23 – Resultados das médias e dos CVs de textura superficial do L2 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O) e por Análise (A)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

#### 3.4.2.2 Reprodutibilidade entre operadores

Os resultados de reprodutibilidade entre os operadores estão apresentados nas Tabelas 3.14 a 3.17 e nas Figuras 3.24 a 3.28. Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de angularidade entre operadores do L1 e L2 estão apresentados na Tabela 3.14. Observou-se que os valores das médias das análises do operador 1 (3.588) e das análises do operador 2 no L1 (4.158) do material 1 da fração 1,18 mm foram diferentes entre si e diferentes das análises dos operadores 3 e 4; os valores das médias das análises do operador 2 (3.865) do material 2 da fração 1,18 mm foi diferente das demais análises e por fim, os valores das médias das análises do operador 3 (3.671) do material 2 da fração 1,18 mm foi diferente das demais análises. Para essas médias diferentes foi aplicado o critério proposto e observado que as médias das análises dos operadores se encontraram na mesma classe de angularidade (subarredondado), à exceção do valor da média das análises do operador 2 do L1 do material 1 da fração 1,18 mm (subangular). Contudo, diante do fato de esse valor (4.158) estar próximo ao valor do limite superior da classe de angularidade subarredondado (4.080), as médias foram consideradas iguais. Observou-se que, a exceção supracitada já havia sido mencionada anteriormente, pelo fato de que as análises individuais desse operador obtiveram médias diferentes das demais médias das medidas por análise (Tabela 3.6 e Figura 3.4).

Como explicado anteriormente, as diferenças encontradas entre medidas e, agora, entre operadores podem ser atribuídas a variações no procedimento de seleção das partículas, e não à falta de repetibilidade entre medidas e de reprodutibilidade entre operadores. Diante disso, destaca-se a importância do protocolo de utilização do AIMS2 (Apêndice C) elaborado com o objetivo de padronizar o procedimento a ser realizado pelos operadores, para garantir que as amostras se tornem homogêneas e representativas do material analisado.

Tabela 3.14 – Resultados das médias das medidas de angularidade por operadores do L1 e L2

Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador			
			1	2	3	4
1	1	1,18	<b>3.588a</b>	<b>4.158b</b>	3.390c	3.464c
		12,5	3.119a	3.132a	2.989a	3.013a
	2	1,18	3.496a	<b>3.865b</b>	3.547a	3.592a
		12,5	3.432a	3.449a	3.400a	3.373a
2	1	1,18	3.377a	3.463a	3.405a	-
		12,5	3.000a	3.110a	3.082a	-
	2	1,18	3.569a	3.517a	<b>3.671b</b>	-
		12,5	3.423a	3.460a	3.459a	-

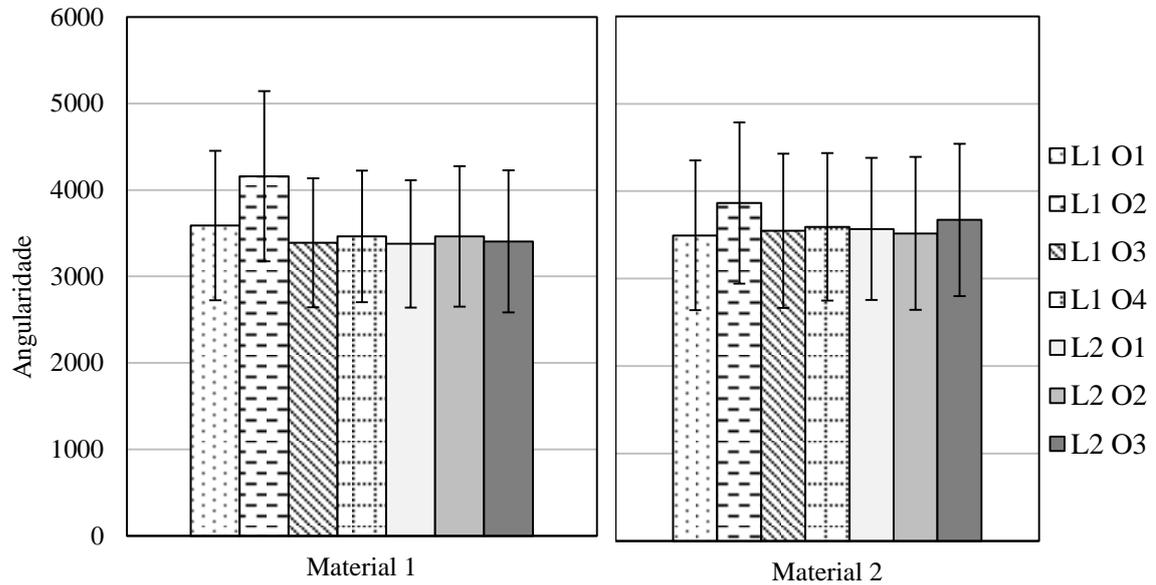
Nota: Letras (a, b, c) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

As Figuras 3.24 e 3.25 apresentam os resultados das médias e dos CVs de angularidade entre operadores do L1 e L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\text{máx}} - CV_{\text{mín}} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se reprodutibilidade nas medidas de angularidade entre operadores do L1 e L2.

Figura 3.24 – Resultados dos CVs de angularidade do L1 e L2 do material 1 e 2 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O)

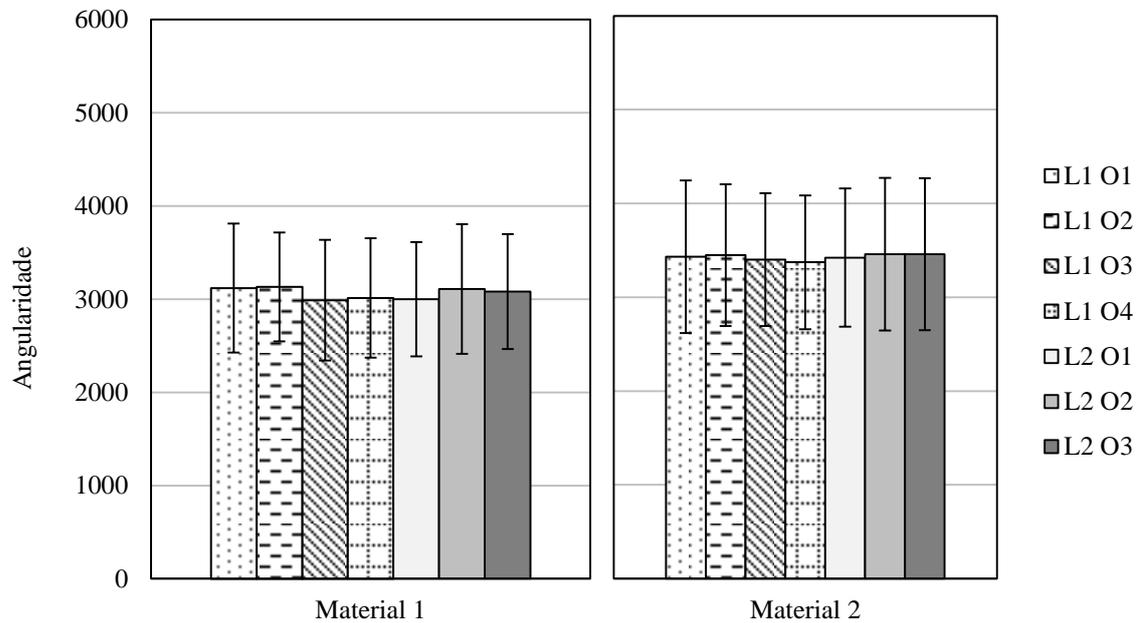
CVs (%) Angularidade - Fração 1,18 mm													
Material 1							Material 2						
L1				L2			L1				L2		
O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3	O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3
24,10	23,69	22,01	21,96	21,82	23,48	24,11	24,49	23,83	24,84	23,48	22,72	24,86	23,76



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.25 – Resultados dos CVs de angularidade do L1 e L2 do material 1 e 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O)

CVs (%) Angularidade - Fração 12,5 mm													
Material 1							Material 2						
L1				L2			L1				L2		
O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3	O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3
22,23	18,68	21,64	21,27	20,47	22,39	19,98	23,72	21,95	20,83	21,17	21,55	23,53	23,41



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de esfericidade entre operadores do L1 e L2 estão apresentados na Tabela 3.15. Observou-se que os valores das médias das análises do operador 1 (0,67) do material 1 foram diferentes das análises dos operadores 2, 3 e 4; os valores das médias das análises do operador 3 (0,62) do material 2 foram diferentes das análises dos operadores 1, 2 e 4. Para essas médias diferentes, foi aplicado o critério proposto e observado que as médias das análises dos operadores se encontraram na mesma classe de esfericidade (baixa esfericidade). Portanto, as médias foram consideradas iguais.

Tabela 3.15 – Resultados das médias das medidas de esfericidade por operadores do L1 e L2

Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador			
			1	2	3	4
1	1	12,5	<b>0,67a</b>	0,68b	0,68b	0,68b
	2		0,60a	0,61a	<b>0,62b</b>	0,60a
2	1		0,68a	0,67a	0,67a	-
	2		0,61a	0,61a	0,60a	-

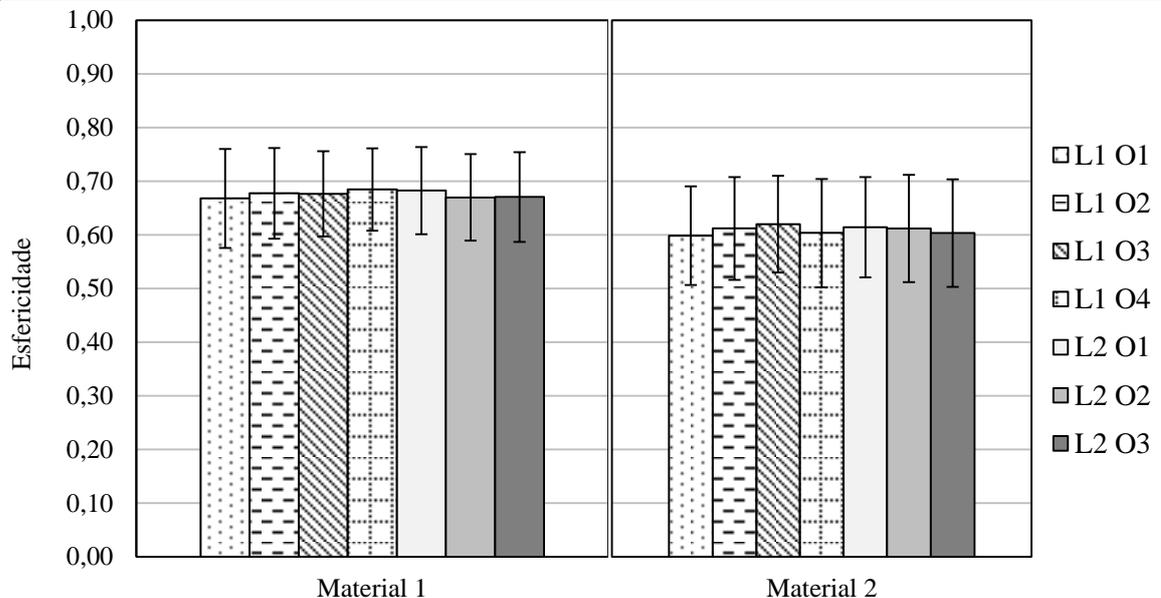
Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A Figura 3.26 apresenta os resultados das médias e dos CVs de esfericidade entre operadores do L1 e L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\text{máx}} - CV_{\text{min}} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se reprodutibilidade nas medidas de esfericidade entre operadores do L1 e L2.

Figura 3.26 – Resultados dos CVs de esfericidade do L1 e L2 do material 1 e 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O)

CVs (%) Esfericidade - Fração 12,5 mm													
Material 1							Material 2						
L1				L2			L1				L2		
O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3	O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3
13,83	12,46	11,74	11,20	11,90	12,03	12,43	15,32	15,65	14,55	16,68	15,21	16,34	16,63



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de forma 2D entre operadores do L1 e L2 estão apresentados na Tabela 3.16. Observou-se que os valores das médias das análises do operador 2 (8,89) e das análises do operador 3 no L1 (7,86) do material 1 foram diferentes entre si e diferentes das análises dos operadores 1 e 4; os valores das médias das análises do operador 2 (8,74) e das análises do operador 3 no L1 (8,40) do material 2 foram diferentes entre si e diferentes das análises dos operadores 1 e 4. Para essas médias diferentes, foi aplicado o critério proposto e observado que as médias das análises dos operadores se encontraram na mesma classe de forma 2D (semicircular). Portanto, as médias foram consideradas iguais.

Tabela 3.16 – Resultados das médias das medidas de forma 2D por operadores do L1 e L2

Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador			
			1	2	3	4
1	1	1,18	8,18a	<b>8,89b</b>	<b>7,86c</b>	8,04a
	2		8,25a	<b>8,74b</b>	<b>8,40b</b>	8,77a
2	1		8,04a	8,15a	8,24a	-
	2		8,60a	8,64a	8,80a	-

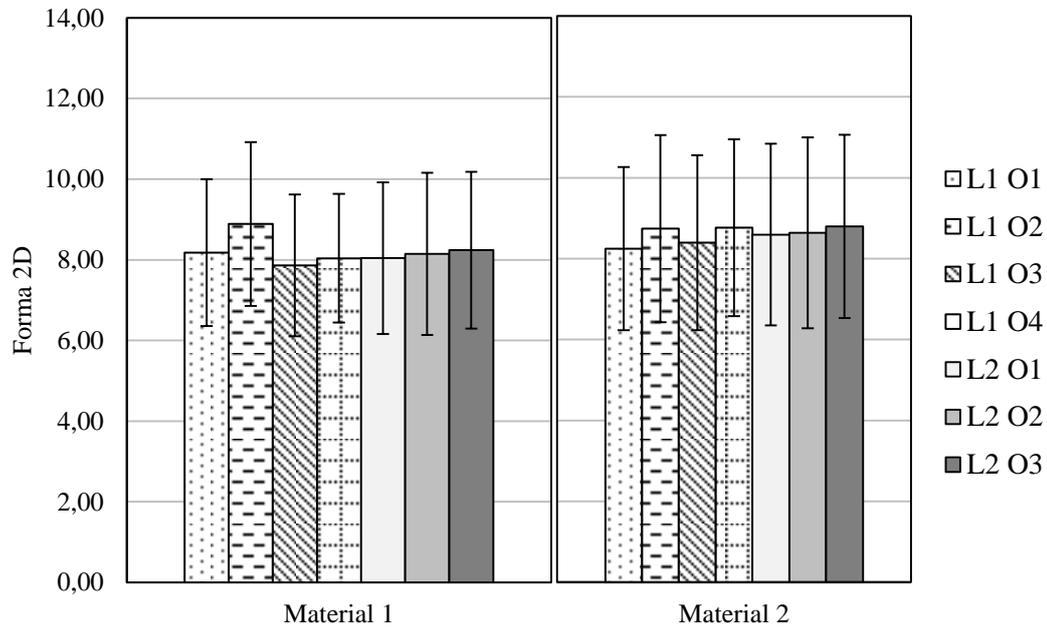
Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A Figura 3.27 apresenta os resultados das médias e dos CVs de forma 2D entre operadores do L1 e L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\text{máx}} - CV_{\text{min}} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se reprodutibilidade nas medidas de forma 2D entre operadores do L1 e L2.

Figura 3.27 – Resultados dos CVs de forma 2D do L1 e L2 do material 1 e 2 das frações miúdas (1,18 mm) por Operador (O)

CVs (%) Forma 2D - Fração 1,18 mm													
Material 1							Material 2						
L1				L2			L1				L2		
O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3	O1	O2	O3	O4	O1	O2	O3
22,30	22,87	22,35	19,85	23,39	24,72	23,59	24,45	26,49	25,75	24,92	26,11	27,32	25,76



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de textura superficial entre operadores do L1 e L2 estão apresentados na Tabela 3.17. Observou-se que os valores das médias das análises do operador 4 (365) do material 2 foi diferente das análises dos operadores 1, 2 e 3. Para essa média diferente foi aplicado o critério proposto e observado que as médias das análises dos operadores se encontraram na mesma classe de textura superficial (macio). Portanto, as médias foram consideradas iguais.

Tabela 3.17 – Resultados das médias das medidas de textura superficial por operadores do L1 e L2

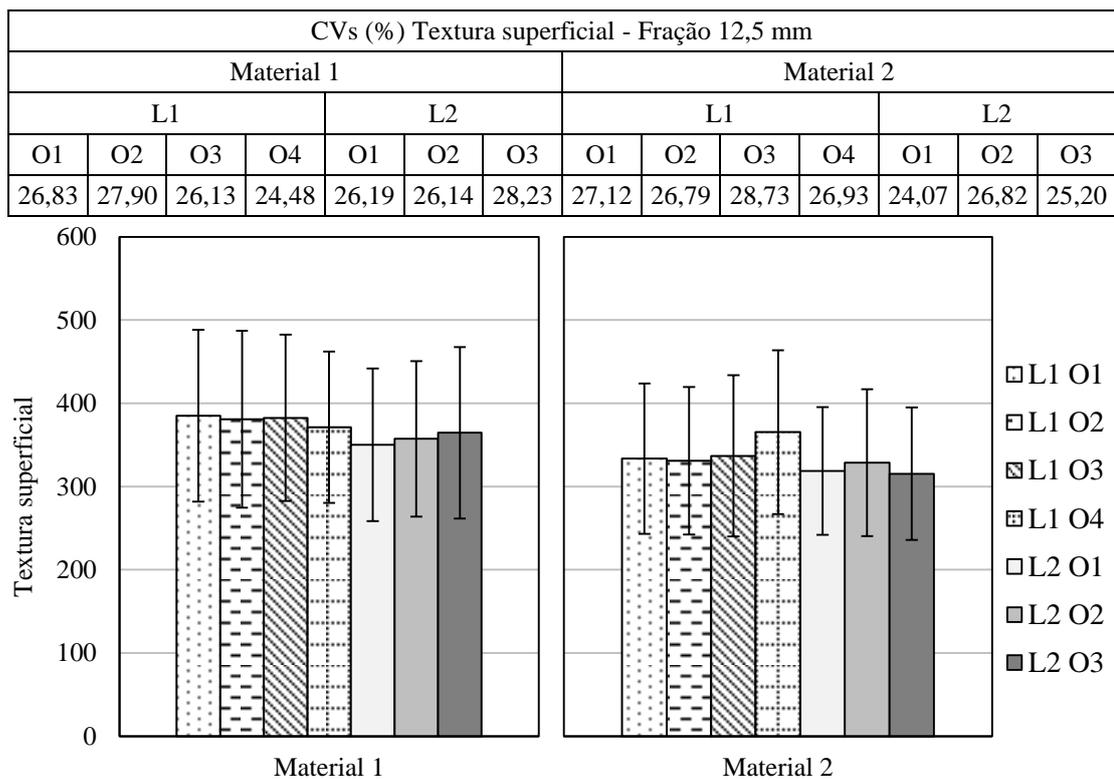
Laboratório	Material	Fração (mm)	Operador			
			1	2	3	4
1	1	12,5	385a	381a	382a	371a
	2		334a	331a	337a	<b>365b</b>
2	1		350a	357a	365a	-
	2		319a	329a	315a	-

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A Figura 3.28 apresenta os resultados das médias e dos CVs de textura superficial entre operadores do L1 e L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\max} - CV_{\min} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se reprodutibilidade nas medidas de textura superficial entre operadores do L1 e L2.

Figura 3.28 – Resultados dos CVs de textura superficial do L1 e L2 do material 1 e 2 das frações graúdas (12,5 mm) por Operador (O)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

### 3.4.2.3 Reprodutibilidade entre laboratórios

Os resultados de reprodutibilidade entre laboratórios estão apresentados nas Tabelas 3.18 e 3.19. Os resultados dos testes de hipótese aplicados para verificar a igualdade das médias das medidas de propriedades de forma entre laboratórios estão apresentados na Tabela 3.18. Observou-se que o valor da média das análises das medidas de angularidade do L2 (3.415) difere do valor da média das análises das medidas de angularidade do L1 (3.649) do material 1 da fração 1,18 mm; o valor da média das análises das medidas de textura superficial do L2 (357) difere do valor da média das análises das medidas de textura superficial do L1 (380) do material 1 da fração 12,5 mm e por fim, o valor da média das análises das medidas de textura superficial do L2 (321) difere do valor da média das análises das medidas de textura superficial do L1 (342) do material 2 da fração 12,5 mm. Para essas médias diferentes foi aplicado o critério proposto e observado que as médias das análises dos laboratórios se encontraram na mesma classe do sistema de classificação de propriedades de forma proposto nesta pesquisa. Para a angularidade, a classe “subarredondado” e para a textura superficial a classe “macio”. Portanto, as médias foram consideradas iguais.

Uma possível explicação para as diferenças supracitadas, pode ser a necessidade de calibração dos dois equipamentos avaliados. O AIMS2 do L1 foi adquirido há nove anos, o AIMS2 do L2 foi adquirido há cinco anos. Essa calibração pode ser realizada seguindo as especificações apresentadas no seu manual.

Tabela 3.18 – Resultados das médias das medidas de propriedades de forma por laboratórios

Propriedade	Material	Fração (mm)	Laboratório	
			1	2
Angularidade	1	1,18	<b>3.649a</b>	<b>3.415b</b>
		12,5	3.063a	3.064a
	2	1,18	3.625a	3.586a
		12,5	3.413a	3.447a
Esfericidade	1	12,5	0,68a	0,67a
	2		0,61a	0,61a
Forma 2D	1	1,18	8,24a	8,14a
	2		8,54a	8,68a
Textura superficial	1	12,5	<b>380a</b>	<b>357b</b>
	2		<b>342a</b>	<b>321b</b>

Nota: Letras (a, b) iguais significam médias estatisticamente iguais.

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

A Tabela 3.19 apresenta os resultados dos CVs das propriedades de forma do L1 e L2. Diante dos resultados de que todos os CVs foram homogêneos ( $CV_{\max} - CV_{\min} \leq 10\%$ ), o critério proposto foi atendido. Portanto, constatou-se reprodutibilidade entre os dois laboratórios avaliados.

Tabela 3.19 – Resultados dos CVs das propriedades de forma entre os L1 e L2

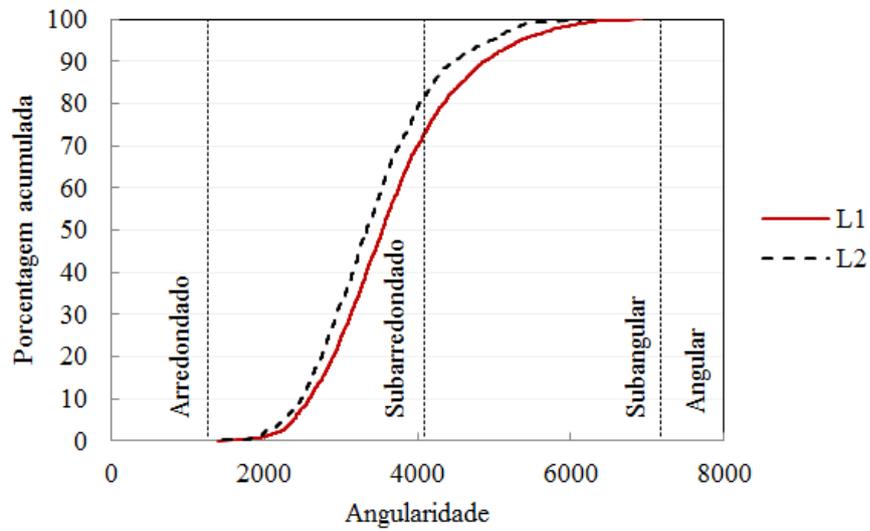
CVs (%) Propriedades de forma					
Propriedade	Fração (mm)	Material 1		Material 2	
		L1	L2	L1	L2
Angularidade	1,18	24,55	23,18	24,46	23,83
	12,50	21,03	21,00	21,92	22,81
Esfericidade	12,50	12,33	12,13	15,58	16,05
Forma 2D	1,18	22,44	23,91	25,55	26,40
Textura superficial	12,50	26,36	26,89	27,64	25,43

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

#### 3.4.2.3.1 Curvas de distribuição acumulada das propriedades de forma dos laboratórios

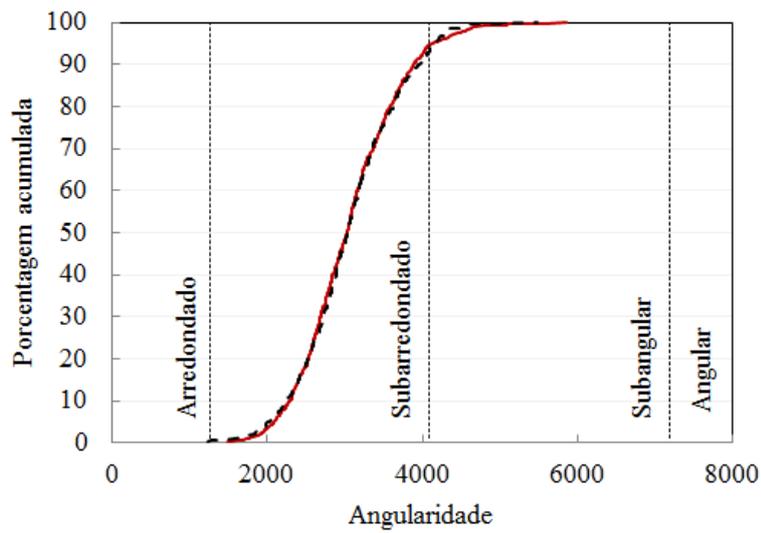
As Figuras 3.29 a 3.38 apresentam as curvas de distribuição acumulada das propriedades de forma geradas a partir do uso do AIMS2, separadas por fração (1,18 mm e 12,5 mm), por material (material 1 e 2) para os dois laboratórios avaliados nesta pesquisa (L1 e L2). O teste não paramétrico Kolmogorov-Smirnov foi aplicado para verificar a igualdade das curvas entre laboratórios (o código desse teste está apresentado no Apêndice G). Os resultados do teste (Apêndice I) mostraram que as curvas de distribuição dos dois laboratórios são estatisticamente iguais ( $P > 0,05$ ), à exceção das curvas de angularidade, da fração 1,18 mm, do material 1 (Figura 3.29). Essa constatação corrobora a observação de que, as análises realizadas em L1 e L2, do material 1, da fração 1,18 mm, não atenderam ao critério de igualdade das médias das medidas utilizado na abordagem inferencial (Tabela 3.18). Outra exceção foi a das curvas de textura superficial, para os dois materiais analisados (Figuras 3.37 e 3.38). Essa constatação corrobora a observação de que as análises realizadas em L1 e L2, do material 1 e 2, da fração 12,5 mm, não atenderam ao critério de igualdade das médias das medidas utilizado na abordagem inferencial (Tabela 3.18). Apesar de as curvas supracitadas serem estatisticamente diferentes, assumiu-se que houve repetibilidade entre as medidas de propriedades de forma geradas a partir do uso do AIMS2 e que houve reprodutibilidade entre diferentes operadores e entre os dois laboratórios avaliados, com base no método proposto.

Figura 3.29 – Curvas de distribuição acumulada de angularidade do L1 e L2 do material 1 das frações miúdas (1,18 mm)



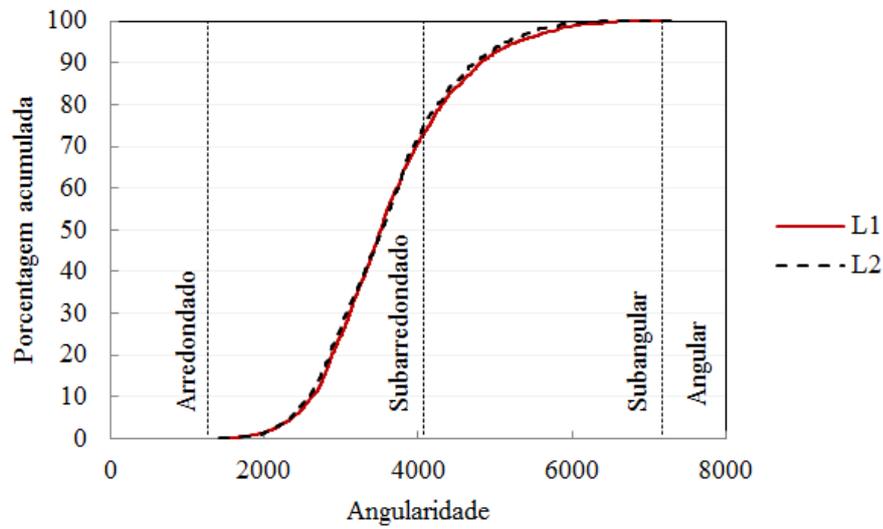
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.30 – Curvas de distribuição acumulada de angularidade do L1 e L2 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm)



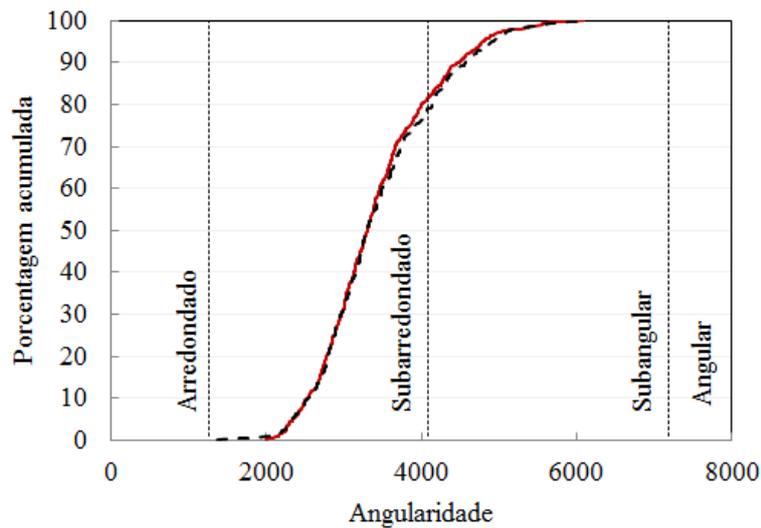
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.31 – Curvas de distribuição acumulada de angularidade do L1 e L2 do material 2 das frações miúdas (1,18 mm)



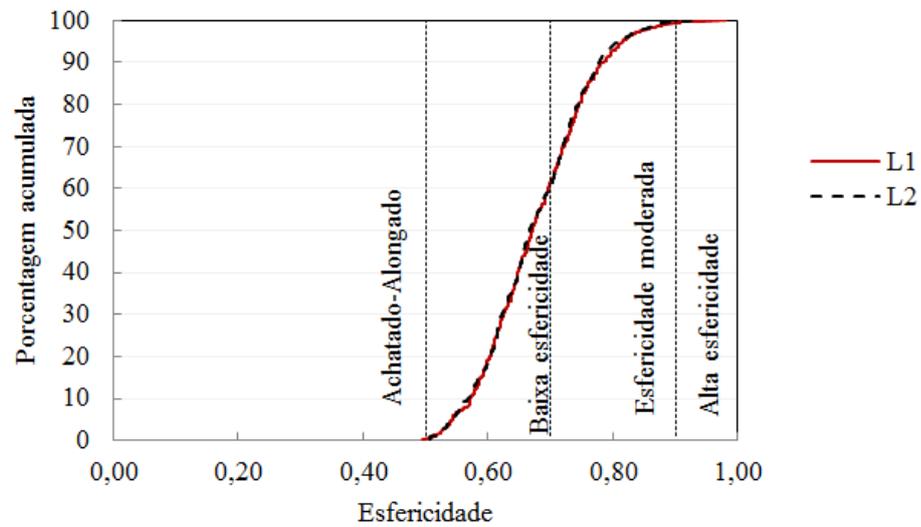
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.32 – Curvas de distribuição acumulada de angularidade do L1 e L2 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm)



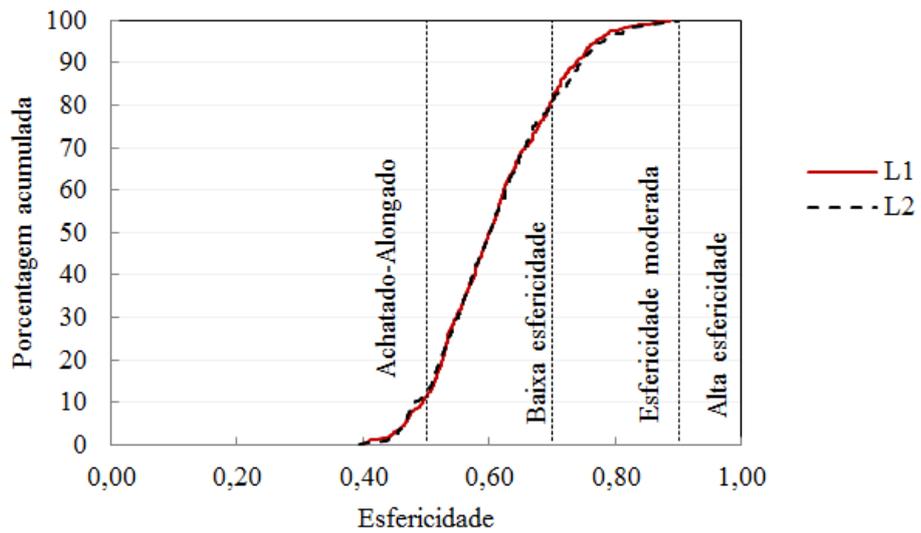
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.33 – Curvas de distribuição acumulada de esfericidade do L1 e L2 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm)



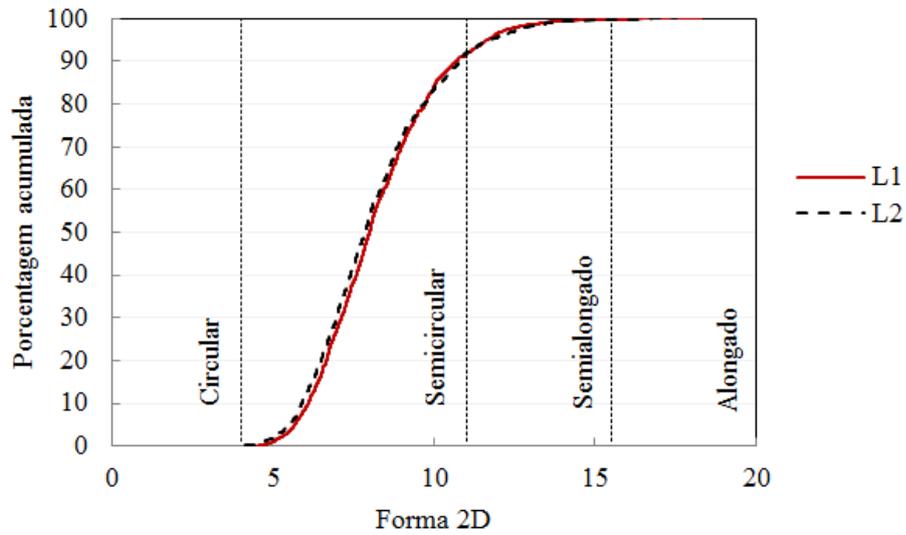
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.34 – Curvas de distribuição acumulada de esfericidade do L1 e L2 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm)



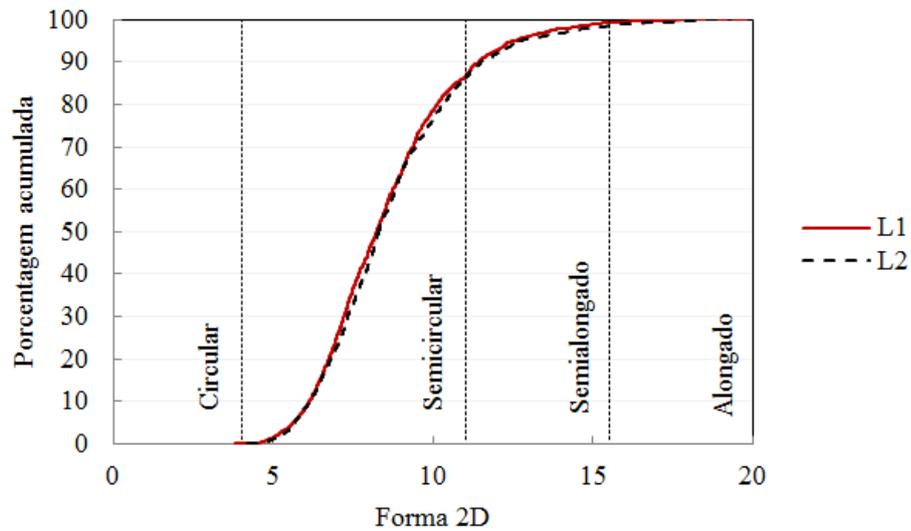
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.35 – Curvas de distribuição acumulada de forma 2D do L1 e L2 do material 1 das frações miúdas (1,18 mm)



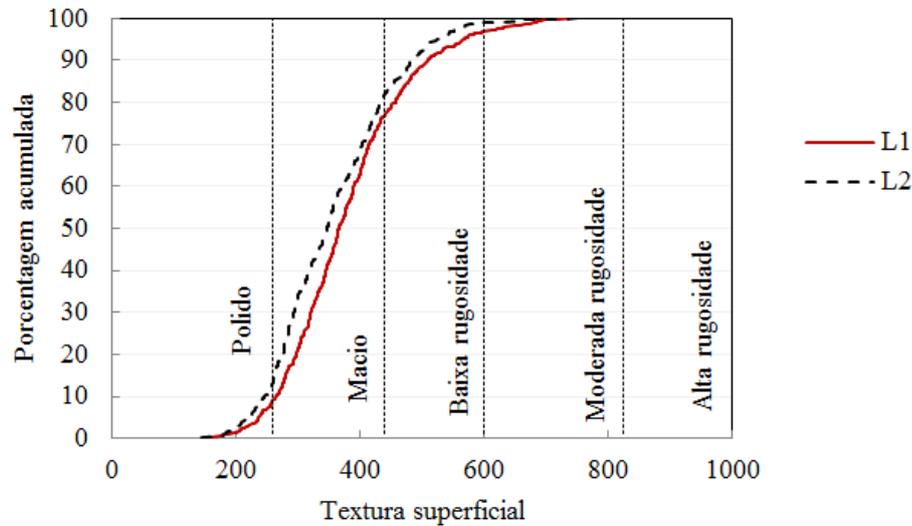
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.36 – Curvas de distribuição acumulada de forma 2D do L1 e L2 do material 2 das frações miúdas (1,18 mm)



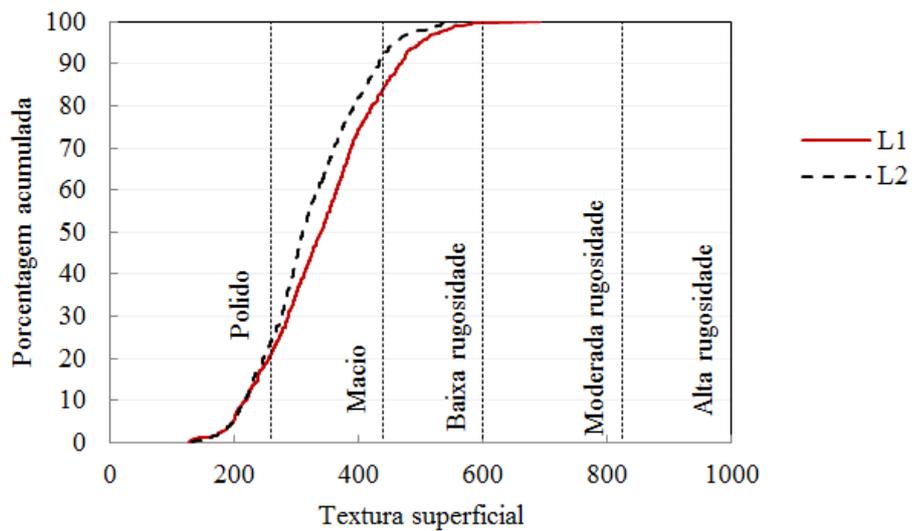
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.37 – Curvas de distribuição acumulada de textura superficial do L1 e L2 do material 1 das frações graúdas (12,5 mm)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 3.38 – Curvas de distribuição acumulada de textura superficial do L1 e L2 do material 2 das frações graúdas (12,5 mm)



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

### 3.5 Considerações Finais

Diante do fato de haver um esboço de norma técnica para a caracterização de agregados com o uso do PDI, em desenvolvimento no Brasil (Apêndice A), e do fato de não haver, ainda no Brasil, um programa interlaboratorial para esse tipo de ensaio, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a qualidade das medidas obtidas com o uso de dois equipamentos

AIMS2, existentes no país. Para fins de comparação, dois métodos distintos foram utilizados: o método proposto por Bathina (2005) e um método de análise de repetibilidade e de reprodutibilidade das medidas de propriedades de forma de agregados proposto nesta pesquisa.

Ressalta-se que, no método proposto foram utilizadas as distribuições das propriedades de forma, geradas pelas análises realizadas no AIMS2 e não somente suas médias, como no método proposto por Bathina (2005). Essa é uma vantagem, pois, por vezes, há dispersões dentro dos materiais, devido às suas características próprias e a representatividade da amostra pode ser comprometida. Outra vantagem do método proposto é a utilização da abordagem inferencial, na qual há um parâmetro objetivo para análise dos resultados (nível de significância e Valor-P dos testes de hipótese).

Os resultados obtidos, nesta pesquisa, com o uso do método de Bathina (2005) alcançaram valores de CVs abaixo de seus valores de referência. Portanto, constatou-se a repetibilidade e/ou reprodutibilidade em todas as medidas analisadas pelos dois equipamentos avaliados. Diante dos resultados obtidos, com base no método proposto, constatou-se que há repetibilidade entre as medidas de propriedades de forma geradas a partir do uso do AIMS2 e que há reprodutibilidade entre diferentes operadores e entre os dois laboratórios avaliados. Por fim, as contribuições mais relevantes desta pesquisa estão elencadas a seguir:

- 1) Elaboração de um protocolo de utilização do equipamento AIMS2, escrito de forma didática para seus operadores, no Brasil;
- 2) Constatação de que um material analisado no AIMS2 do L1 apresenta as mesmas propriedades de forma, quando analisado no AIMS2 do L2, pois foi constatada a repetibilidade entre medidas e a reprodutibilidade entre operadores e a reprodutibilidade entre laboratórios.

## 4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA MUDANÇA DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS NA FORMAÇÃO DO ESQUELETO MINERAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS

### 4.1 Introdução

Os componentes das misturas asfálticas (agregados, ligante asfáltico e vazios), em conjunto, formam uma microestrutura complexa na qual os agregados correspondem a quase 90% de seu volume. A granulometria e os tipos de agregados (MASAD *et al.*, 1999b; SEFIDMAZGI; TASHMAM; BAHIA, 2012), o método e as variáveis usadas na compactação (MASAD *et al.*, 1998; ZHANG *et al.*, 1998; HUNTER; AIREY; COLLOP, 2004; MASAD; KASSEM; CHOWDHURY, 2009) e o tipo e o teor de ligante asfáltico (TEYMOURPOUR; BAHIA, 2014; MOON *et al.*, 2015) que constituem as misturas asfálticas afetam a estrutura interna e a distribuição das tensões nesses materiais.

A utilização do Processamento Digital de Imagem (PDI) se estabeleceu como ferramenta para análise das propriedades de forma de agregados e da estrutura interna de misturas asfálticas. O *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2) é um sistema de PDI, com mecanismo de aquisição de imagens e *software*, desenvolvido para analisar as propriedades de forma de agregados e as propriedades de superfície de misturas asfálticas compostas por eles. O sistema tem uma metodologia própria para classificação desses materiais (AL ROUSAN, 2004; TAYLOR *et al.*, 2006; MASAD *et al.*, 2007b).

O esqueleto mineral exerce uma função importante no desempenho da mistura asfáltica, uma vez que a resistência ao cisalhamento (relacionada à deformação permanente) depende do intertravamento de seus agregados constituintes (BAHIA, 2013). O *software Image Processing and Analysis System* (iPas) é capaz de avaliar a estrutura interna de misturas asfálticas, utilizando parâmetros (número de zonas de contatos, orientação e segregação dos agregados, por exemplo) analisados a partir do uso de imagens 2D (COENEN; KUTAY; BAHIA, 2011). Na sua 2ª versão (iPas2) foram introduzidos novos parâmetros (extensão e orientação das zonas de contato), que foram anexados à metodologia para melhorar a compreensão da estrutura interna (SEFIDMAZGI, 2011).

Diante da importância da seleção dos agregados para a formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas, nesta pesquisa pretendeu-se colaborar na proposição de uma melhor seleção desses materiais, ainda no âmbito do projeto dessas misturas. Foi avaliada a

influência da mudança das propriedades de forma de agregados nos parâmetros de contato, orientação e segregação do esqueleto mineral de misturas asfálticas. Para isso, foram analisados, por meio das técnicas de PDI, agregados antes e depois do uso do equipamento Micro Deval (MD), bem como os esqueletos minerais formados nas misturas asfálticas compostas por esses agregados.

## 4.2 Revisão Bibliográfica

As misturas asfálticas são formadas por uma complexa microestrutura ou estrutura interna composta de agregados, de ligante asfáltico e de vazios. Essa estrutura interna desempenha um papel importante na resistência do pavimento, com relação aos seus principais defeitos (deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico) (MONISMITH, 1991; ZHANG *et al.*, 1998; VINSON; JANOO; HAAS, 1999; BERNUCCI *et al.*, 2010) e é influenciada por alguns fatores, incluindo a granulometria, a distribuição e a forma dos agregados, o teor de ligante asfáltico e a energia de compactação. Diferentes métodos de compactação podem produzir misturas asfálticas com propriedades distintas, com relação às suas estruturas internas, como por exemplo: distribuição de vazios, variação na orientação dos agregados, número e extensão das zonas de contato entre as partículas de agregados e, a partir dessas, gerar diferenças nas suas propriedades mecânicas, volumétricas e funcionais (CONSUEGRA *et al.*, 1989; MASAD *et al.*, 1998). Misturas asfálticas com alto nível de aleatoriedade na orientação das suas partículas de agregados são chamadas de anisotrópicas e têm suas propriedades mecânicas muito dependentes dessa orientação (KEYMANESH; ZIARI; KAMRANKHO, 2016).

A quantificação de parâmetros do esqueleto mineral das misturas asfálticas pode ser feita utilizando métodos destrutivos ou não destrutivos para capturar a estrutura interna desses materiais. Nos métodos destrutivos, os corpos de prova são cortados na direção horizontal ou vertical, numa espessura tal que o *scanner* utilizado consiga rastrear a superfície da amostra. Nos métodos não destrutivos, a estrutura interna é capturada utilizando o processo de Raio-X ou a tomografia computadorizada, esses métodos são eficientes, porém dispendiosos (MASAD *et al.*, 1999b; TASHMAN *et al.*, 2002). Posteriormente, a imagem é processada para a análise da estrutura interna da mistura asfáltica. De acordo com Sefidmazgi (2011), embora a estrutura interna das misturas asfálticas possa ser visualizada utilizando a

tomografia computadorizada, quando as imagens são obtidas, essas são processadas através do PDI para que a microestrutura seja analisada.

Yue, Bekking e Morin (1995) foram os primeiros autores a definir e a quantificar parâmetros representativos do esqueleto mineral de misturas asfálticas, como por exemplo: eixos da partícula de agregado; perímetro; área; centróide; diâmetro de Feret ou diâmetro de calibre, que é o diâmetro da partícula de agregado medido em um plano específico, como por exemplo, o plano que contém as duas menores dimensões das partículas; eixo maior de orientação; índice de forma e achatamento. De acordo com esses autores, o maior e o menor eixo das partículas de agregados são os principais índices representativos do esqueleto mineral das misturas asfálticas.

Masad *et al.* (1998) propuseram um procedimento de quantificação de propriedades do esqueleto mineral das misturas asfálticas através de parâmetros geométricos (vetor magnitude e ângulo de inclinação) para determinar a orientação e a segregação dos agregados, como indicadores da anisotropia da estrutura interna das misturas asfálticas. Os citados autores fizeram três cortes verticais em amostras extraídas de campo e moldadas em laboratório, com a mesma espessura. As imagens foram capturadas por uma câmera digital. Os autores conseguiram determinar a orientação dos agregados e calcularam o vetor magnitude, para, enfim, descrever a anisotropia da distribuição de agregados.

Masad *et al.* (1999a) identificaram uma tendência de uniformidade na orientação dos agregados quando o esforço de compactação das misturas asfálticas foi aumentado, em até 100 giros. Tashman *et al.* (2004) propuseram um modelo visco plástico para prever o desempenho de misturas asfálticas, com relação à deformação permanente. Os autores usaram, no modelo, o vetor magnitude como parâmetro geométrico para descrever a anisotropia da distribuição de agregados; utilizaram imagens bidimensionais para analisar a estrutura interna dessas misturas e concluíram que a anisotropia foi causada pela distribuição não uniforme de seus agregados constituintes e que essa aleatoriedade, na orientação dos agregados, impactou significativamente as propriedades mecânicas das misturas asfálticas analisadas.

Masad *et al.* (1999a) afirmaram que os diferentes métodos e esforços de compactação são responsáveis pelo arranjo dos agregados. A formação do esqueleto mineral resulta da forma com que esses agregados são distribuídos na mistura (orientação) e da presença de zonas de contato entre as partículas (VASCONCELOS; EVANGELISTA JR.; SOARES, 2005). A distribuição e a orientação dos agregados graúdos constituintes de

misturas asfálticas com a mesma dosagem, porém compactadas por métodos diferentes, impactam nas propriedades mecânicas das mesmas (YUE; BEKKING; MORIN, 1995 *apud* MASAD; KASSEM; CHOWDHURY, 2009). Vasconcelos, Evangelista Jr. e Soares (2005) afirmaram que, para analisar e realizar a previsão do desempenho de uma determinada mistura asfáltica, é necessário que as amostras em laboratório sejam fabricadas de forma a simular a compactação que ocorre em campo. Essa simulação está relacionada com a estrutura interna gerada para o material, ou seja, é indispensável considerar a natureza heterogênea do mesmo.

Masad *et al.* (1999b) utilizaram a tomografia computadorizada, como método não destrutivo de aquisição de imagens para analisar a microestrutura de misturas asfálticas. Nesse método a imagem é produzida numa escala de cinza, onde os vazios possuem uma intensidade de níveis de cinza de 0 a 255, baseada na densidade desta fase. A partir da geração desta imagem, utilizando filtros, a distribuição de vazios e as partículas de agregados, propriamente ditas, foram capturadas em diferentes escalas com relação aos níveis de cinza (densidade). Esses autores conseguiram melhorias nas imagens para caracterizar o contato entre os agregados e denominaram esse processo de erosão.

Tashman *et al.* (2001) introduziram um sistema de captura, processamento e análise de imagens de misturas asfálticas baseado na distribuição dos vazios, na orientação, na segregação e no contato entre agregados. A microestrutura das misturas asfálticas foi analisada utilizando dois métodos: tomografia computadorizada e corte de amostras de misturas asfálticas, seguindo a metodologia proposta por Masad *et al.* (1999a). Nesse estudo, o ângulo médio (média dos ângulos de inclinação de cada partícula) foi introduzido como índice descritor da orientação das partículas. O conceito de zonas de contatos entre os agregados e a orientação desses contatos também foram utilizados para caracterizar as partículas. A linha de contato das seções foi considerada linear e a possibilidade de medir a normal para a determinação da orientação do contato foi estabelecida.

Zelew e Papagiannakis (2009) introduziram uma metodologia para processamento e análise de imagens referentes à microestrutura de misturas asfálticas. As imagens foram capturadas com o uso da tomografia computadorizada. Esse método é dividido em três estágios: processamento das imagens através de melhorias no contraste e na remoção de ruídos; volume de vazios, mastic e agregados, baseado no *thresholding* (limite de cada fase) e segmentação das bordas. Após a realização desses três estágios de PDI, a microestrutura da mistura asfáltica pode ser modelada. Zelew e Papagiannakis (2011)

utilizaram o método da transformada discreta de *Wavelet* para medir a segregação de agregados nas imagens obtidas durante a realização do estudo citado dos mesmos autores.

Sistemas automáticos para caracterização de agregados e de misturas asfálticas, que utilizam parâmetros geométricos nas análises, foram desenvolvidos, como por exemplo: Blob3D que analisa quantitativamente as características de misturas asfálticas através da análise de imagens tomográficas com Raios-X (KETCHAM; SHASHIDHAR, 2001); *Image Tool* desenvolvido pela *University of Texas Health Science Center in San Antonio* (UTHSCSA) onde a análise dos parâmetros relacionados à orientação das partículas de agregados é realizada em quatro etapas: digitalização dos parâmetros; realce das bordas; correção das imperfeições e rotulação das regiões, permitindo a subdivisão de uma imagem em suas partes constituintes, para que essas possam ser identificadas e tratadas separadamente (SOUZA; EVANGELISTA JR.; SOARES, 2006). O *software Image Processing and Analysis System* (iPas) foi desenvolvido por Coenen (2011) e atualizado (iPas2) por Sefidmazgi (2011) com o objetivo de avaliar as correlações dos agregados, que compõem uma mistura asfáltica, com a orientação e a segregação de suas partículas e as zonas de contato existentes entre as mesmas, utilizando a estereologia como base conceitual.

Coenen, Kutay e Bahia (2011) utilizaram o *software* iPas, para caracterizar agregados e a estrutura interna de misturas asfálticas, a partir da análise digital de imagens 2D. Segundo Sefidmazgi (2011), o iPas é limitado com relação à identificação das interações entre agregados. Diante disso, esse autor desenvolveu uma nova versão, o iPas2, onde novos índices (número e extensão de zonas de contato e orientação das partículas de agregados) foram anexados à metodologia para melhorar a compreensão da microestrutura. Sefidmazgi (2011) afirma que o número de contatos entre os agregados, o comprimento do contato por área e a orientação destes contatos, obtidos a partir de imagens paralelas ao sentido de aplicação da carga (cortes verticais), são os parâmetros que ditam a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. Os resultados obtidos mostraram que, o número, a extensão e a orientação dos contatos foram capazes de descrever as diferenças na estrutura interna de diferentes misturas (SEFIDMAZGI; TASHMAN; BAHIA, 2012). O iPas2 é usado como suporte para a previsão do comportamento de misturas asfálticas em termos de deformação permanente (SEFIDMAZGI; TASHMAN; BAHIA, 2012), de estabilidade e fluência Marshall (KEYMANESH; ZIARI; KAMRANKHO, 2016), além de verificar como diferentes métodos de compactação impactam na estrutura interna das misturas asfálticas (RIBAS, 2016).

Diversos pesquisadores correlacionaram o comportamento de misturas asfálticas com as propriedades de forma de seus agregados constituintes. Agregados graúdos lamelares geram misturas asfálticas com baixa estabilidade Marshall, enquanto que agregados britados com elevada esfericidade aumentam a fluência dessas misturas (ARASAN *et al.*, 2011). Há uma alta correlação ( $R^2 = 0,84$ ) entre a angularidade e a textura superficial de agregados graúdos com a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, observada através dos resultados do ensaio de carga uniaxial repetida (*Flow Number*). Quanto mais rugoso e mais angular, mais resistência à deformação permanente o agregado tende a fornecer à mistura asfáltica (PAZOS; SACRAMENTO; MOTTA, 2015). Em relação a agregados miúdos, existe uma correlação exponencial entre as propriedades de forma, angularidade e textura, desses materiais e o Afundamento de Trilha de Roda (ATR) de misturas asfálticas avaliadas em simulador de tráfego (MASAD *et al.*, 2001). Agregados de fontes mineralógicas distintas, porém com propriedades de forma similares, constituem misturas asfálticas com comportamento mecânico similar, em termos de rigidez, deformação permanente e vida de fadiga (BESSA; CASTELO BRANCO; SOARES, 2014).

A abrasão pode ser definida como a perda de angularidade dos agregados e a quebra pode ser definida como a fratura dos mesmos (MAHMOUD, 2005). Essas propriedades impactam diretamente na microtextura da mistura asfáltica, que está diretamente relacionada à resistência de seus agregados ao polimento e à degradação. A angularidade e a textura superficial de agregados, desgastados em testes de abrasão Los Angeles ou com o uso do MD, são utilizadas como indicadores da resistência dos agregados à abrasão e ao polimento, respectivamente. Em geral, quando há perda da textura superficial e da angularidade dos agregados após os testes realizados, há também perda da resistência à deformação permanente das misturas compostas pelos mesmos (MAHMOUD, 2005; MASAD; LUCE; MAHMOUD, 2006; MAHMOUD *et al.*, 2010b; BESSA; CASTELO BRANCO; SOARES, 2012).

A granulometria, a distribuição e a forma dos agregados, o teor de ligante e os parâmetros de compactação de uma mistura asfáltica influenciam a formação da sua estrutura interna. A estrutura interna exerce um papel importante no desempenho da mistura asfáltica, com relação à sua resistência à deformação permanente, à fadiga e ao trincamento térmico (ZHANG *et al.*, 1998). Os diferentes métodos e esforços de compactação são responsáveis pelo arranjo dos agregados. A formação do esqueleto mineral é resultante da forma com que

seus agregados constituintes são distribuídos na mistura (orientação) e da presença de zonas de contato entre suas partículas (VASCONCELOS; EVANGELISTA JR.; SOARES, 2005).

Quando comparada a estrutura interna de misturas asfálticas produzidas, com a combinação de diferentes variáveis de compactação em laboratório (ângulo de giro, pressão e altura das amostras) com aquela de amostras extraídas de campo, o uso da compactação a 1,5°, com pressão de 600 kPa em amostras de 75 mm de altura, gerou parâmetros de estrutura interna mais próximos do observado em campo (TASHMAN *et al.*, 2001). O aumento no número de giros durante a compactação tende a deixar a orientação de agregados mais uniforme (MASAD *et al.*, 1999a). Os tipos de compactação vibratória e giratória tendem a segregar mais as partículas de agregados em comparação com a compactação por meio do uso da mesa compactadora (HUNTER; AIREY; COLLOP, 2004).

### **4.3 Materiais e Método**

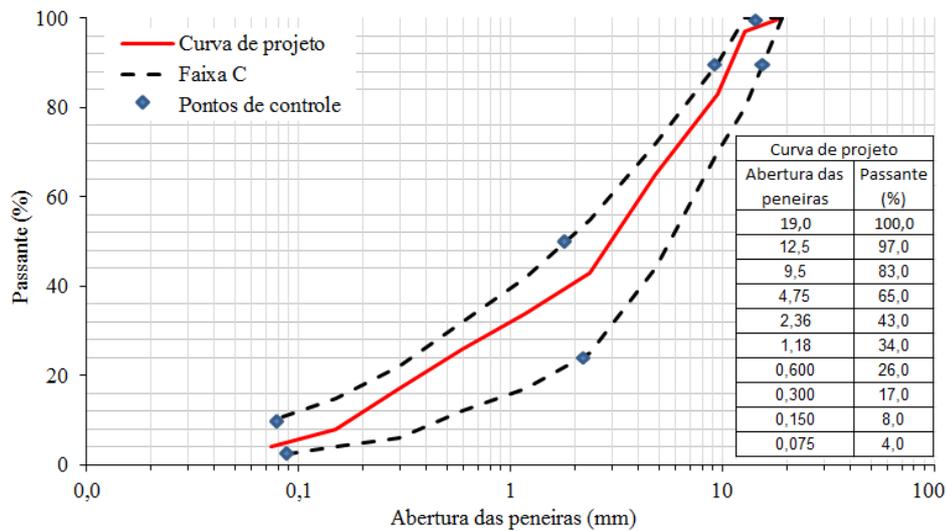
#### **4.3.1 Materiais**

Os agregados, gnáissicos, foram coletados em uma pedreira da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), no estado do Ceará, Brasil. Esses materiais foram analisados em termos de suas propriedades de forma e foram incorporados às misturas asfálticas avaliadas em relação à sua estrutura interna. Maiores informações a respeito desses agregados podem ser encontradas em Ibiapina (2016). A partir da análise granulométrica, o material foi classificado quanto ao Tamanho Máximo Nominal (TMN) em brita de 1", brita de 3/4" e pó de pedra.

O ligante asfáltico utilizado foi cedido pela Lubnor (Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste), refinaria da Petrobras situada em Fortaleza, Ceará. Esse material é do tipo Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) caracterizado por penetração como CAP 50/70, de acordo com as especificações brasileiras regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) (2005).

As misturas asfálticas foram produzidas segundo a metodologia Superpave. Para a determinação da massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) utilizou-se o método Rice (ASTM D 2041M, 2011) e da massa específica aparente da mistura asfáltica compactada ( $G_{mb}$ ) utilizou-se a ASTM D 2726 (2000). A curva granulométrica utilizada na produção das misturas asfálticas se enquadra na Faixa C do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e foi escolhida por ser a mais utilizada na RMF (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Curva granulométrica de projeto adotada

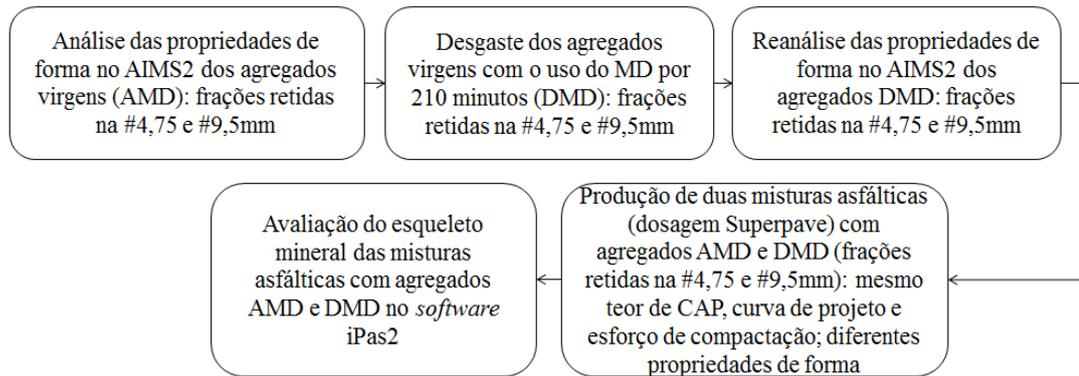


Fonte: Elaborado pela autora (2018).

#### 4.3.2 Método

O método utilizado para modificar as propriedades de forma, com o uso do MD e avaliar o resultado dessas mudanças, com o uso do AIMS2, em conjunto, foi baseado em Mahmoud e Ortiz (2014). Os autores utilizaram 11 agregados, do estado de Illinois, nos Estados Unidos, com diferentes mineralogias e, para atingir a angularidade e a textura superficial terminais desses agregados, o desgaste no MD perdurou até 210 minutos. Portanto, o método consistiu em desgastar as amostras de agregados durante esse tempo e analisar as suas propriedades de forma, Antes do MD (AMD) e Depois do MD (DMD). As mudanças nas propriedades de forma foram calculadas em termos de porcentagem de perda das mesmas. Os ensaios no MD não são normatizados no Brasil, porém há duas designações americanas específicas para agregados graúdos e para miúdos (ASTM D 6928, 2006 e ASTM D 7428, 2008), respectivamente. As atividades realizadas nesta pesquisa foram estruturadas no fluxograma da Figura 4.2.

Figura 4.2 – Fluxograma do método utilizado para avaliar o impacto da mudança das propriedades de forma na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas.

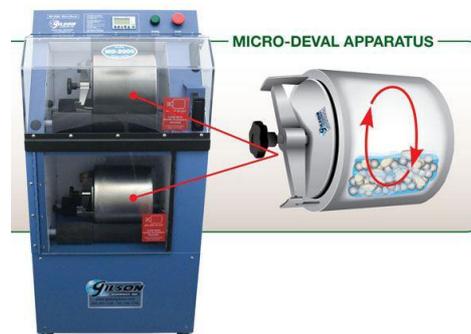


Fonte: Elaborado pela autora (2018).

#### 4.3.2.1 Desgaste com o uso do Micro-Deval (MD)

O Micro Deval (Figura 4.3) é um equipamento que foi desenvolvido na França, na década de 1960, com o objetivo de avaliar a resistência à abrasão de agregados graúdos e de agregados miúdos (CROUCH; DUNN, 2005). Esse equipamento consiste de dois tambores cilíndricos rotativos, de 178 mm de altura e 197 mm de diâmetro, onde os agregados são imersos em água, com uma carga abrasiva composta por 5 kg de esferas de aço de #9,5 mm de diâmetro, em cada tambor.

Figura 4.3 – Equipamento Micro Deval



Fonte: Gilson Company, Inc. (2017).

O método de utilização do MD, com o objetivo de modificar as propriedades de forma, foi adaptado da ASTM D 6928 (2006) e realizado através do desgaste das frações de agregados retidos nas peneiras de #9,5 mm e #4,75 mm, baseado nas seguintes premissas:

- 1) As peneiras #9,5 mm e #4,75 mm apresentavam as maiores porcentagens de agregados retidos da curva granulométrica utilizada nesta pesquisa (14,0% retidos na #9,5 mm e 18,0% retidos na #4,75 mm);
- 2) A textura superficial e a esfericidade são avaliadas, no AIMS2, somente para agregados graúdos (retidos na #4,75 mm);
- 3) As frações retidas entre as peneiras #9,5 mm e #2,36 mm são as que mais influenciam a macrotextura da mistura asfáltica, que depende também da granulometria e das proporções dos agregados utilizados (RODRIGUES, 2013).

A adaptação da ASTM D 6928 (2006) consistiu em colocar uma amostra de agregado, na quantidade de 750 g (peso inicial), para cada tambor do MD juntamente com 5 kg de esferas de aço e 2 litros de água. Os agregados foram imersos em água durante um período de 1 hora antes do início do desgaste, de 210 minutos, no MD. Posteriormente, foram retiradas as esferas de aço e o agregado foi passado na peneira #1,18 mm, sob água corrente, para a retirada dos finos formados com o desgaste. Por fim, o material retido na peneira #1,18 mm foi colocado na estufa para secagem e pesado novamente (peso final) para a determinação da massa perdida (Equação 4.1), para cada fração de agregado. Após o desgaste, o material foi armazenado para posterior análise das propriedades de forma, com o uso do AIMS2 (DMD) e futura comparação com as propriedades de forma do agregado virgem (AMD).

$$\text{Massa Perdida (\%)} = \frac{P_{AMD} - P_{DMD}}{P_{AMD}} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde:  $P_{AMD}$  = Peso Antes do Micro Deval;  $P_{DMD}$  = Peso Depois do Micro Deval.

#### 4.3.2.2 Produção das misturas asfálticas

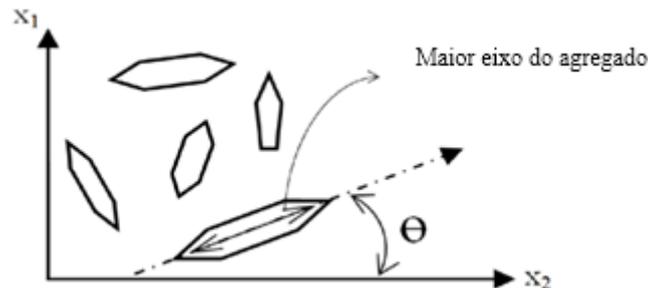
Para esta pesquisa, foram produzidas duas misturas asfálticas. A Mistura Asfáltica 1 (MA1) foi dosada segundo a metodologia Superpave, com curva granulométrica de projeto enquadrada na Faixa C do DNIT, e o teor de projeto de CAP encontrado, com 100 giros no compactador giratório. A Mistura Asfáltica 2 (MA2) foi replicada com 100 giros, ou seja, não foi encontrado o teor de projeto de CAP para essa mistura, o mesmo foi mantido fixo e a MA2 foi diferenciada da MA1 através de seus agregados constituintes, cujas partículas retidas nas peneiras #9,50 mm e #4,75 mm foram submetidas ao MD durante 210 minutos. Os Volumes de Vazios (Vv) das duas misturas foram calculados e comparados posteriormente.

#### 4.3.2.3 Parâmetros do esqueleto mineral

##### 1) Orientação dos agregados

Os parâmetros que descrevem a orientação das partículas de agregados, na estrutura interna de uma mistura asfáltica, dentre outros, são o ângulo horizontal de orientação ( $\theta^K$ ) e o vetor magnitude de orientação ( $\Delta$ ) (Equação 4.2). O ângulo horizontal de orientação de um agregado é a medida angular existente entre o maior eixo de uma partícula e o plano horizontal. O maior eixo é definido pela maior distância entre dois pontos do contorno da partícula (MASAD *et al.*, 1999b; TASHMAN *et al.*, 2001; BESSA; CASTELO BRANCO; SOARES, 2009; LOPES *et al.*, 2010). A Figura 4.4 mostra o  $\theta^K$  de um agregado em uma seção transversal (vertical). Nesse caso, um ângulo horizontal médio de orientação (ângulo igual ao valor da média dos ângulos horizontais de orientação de todas as partículas) próximo de zero indica que há uma tendência da orientação dos agregados para o plano horizontal (TASHMAN *et al.*, 2001; HAMZAH; VON; ABDULLAH, 2013).

Figura 4.4 – Ângulo horizontal de orientação do agregado



Fonte: Adaptado de Tashman *et al.* (2001).

O vetor magnitude é calculado com os valores do ângulo horizontal de orientação de cada partícula de agregado (Equação 4.2), o que possibilita a quantificação da distribuição direcional que descreve a orientação preferencial das partículas de agregados. O vetor magnitude varia entre zero (ou 0%) e 1 (ou 100%). O valor igual a zero indica que os agregados estão tendendo a uma distribuição aleatória (anisotrópica) e o valor igual a 1 indica que os agregados estão orientados em uma mesma direção (isotrópica) (TASHMAN *et al.*, 2001; MASAD; KASSEM; CHOWDHURY, 2009; SEFIDMAZGI, 2011).

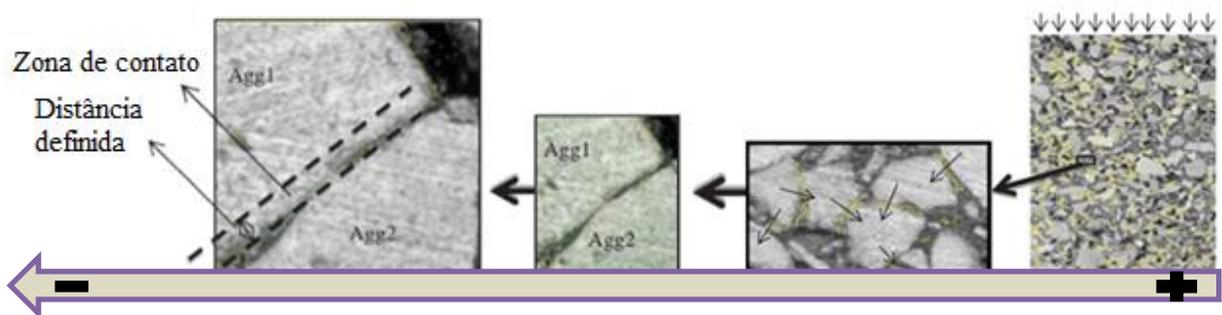
$$\Delta = \left(\frac{100}{N}\right) x \sqrt{(\sum \text{sen}2\theta_k)^2 + (\sum \text{cos}2\theta_k)^2} \quad (4.2)$$

Onde:  $\Delta$  é o vetor magnitude, em %;  $\theta^K$  é o ângulo com a horizontal de um agregado isolado e N é o número de agregados analisados na imagem.

## 2) Zona e extensão de contato dos agregados

A zona de contato entre dois agregados é definida como a distância máxima que separa um agregado do outro (Figura 4.5). Sousa *et al.* (1991) mostraram que, devido à eficiência na produção de misturas asfálticas com maior número de zonas de contato entre as partículas, amostras produzidas no compactador por amassamento são mais influenciadas pelos agregados e possuem maior resistência à deformação permanente se comparadas as amostras produzidas em laboratório, no compactador giratório e na mesa compactadora. Segundo Sefidmazgi (2011), a eficácia da zona de contato entre agregados adjacentes depende da extensão e da orientação do contato; quanto maior for essa extensão, maior deverá ser o atrito e o intertravamento entre os agregados. De acordo com Sefidmazgi e Bahia (2014), o número e a extensão das zonas de contato entre agregados em uma mistura asfáltica representa a conectividade do esqueleto mineral. Portanto, quanto maior for o número e a extensão das zonas de contato, melhor será a distribuição de tensões no material.

Figura 4.5 – Zonas de contato



Fonte: Adaptado de Sefidmazgi, Tashman e Bahia (2012).

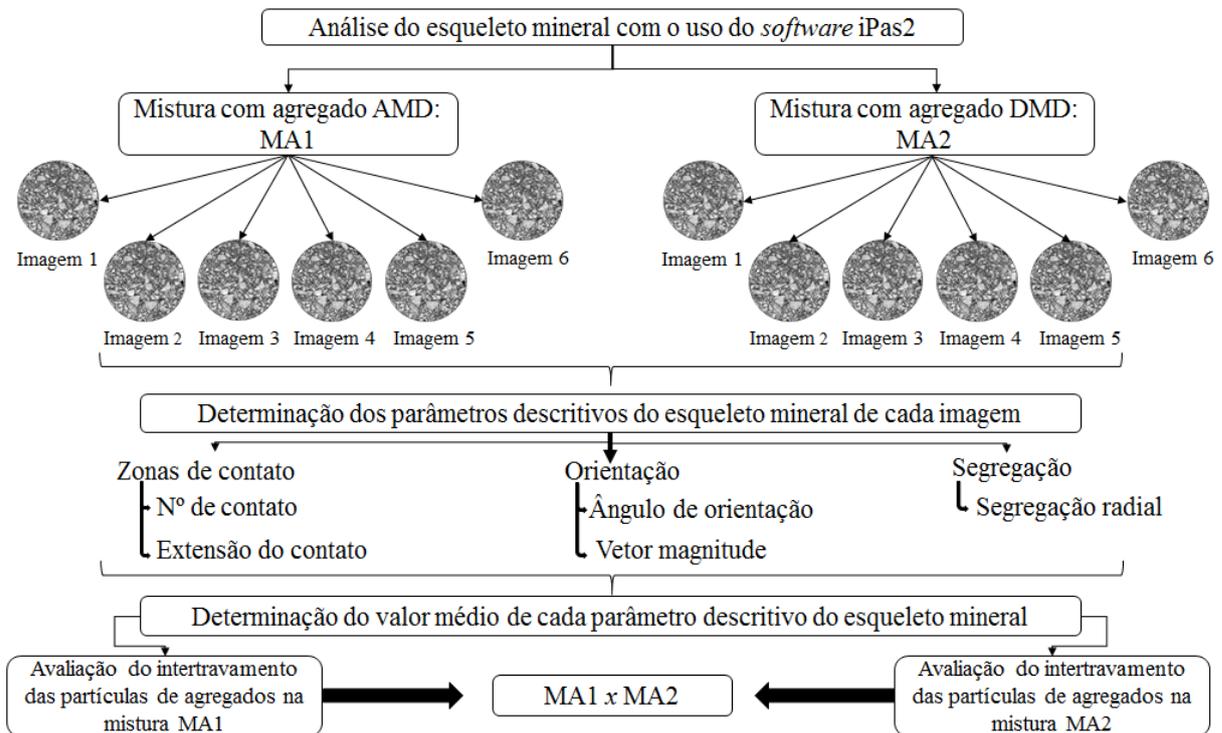
### 3) Segregação

De acordo com Stroup-Gardiner e Brown (2000), segregação pode ser definida como a falta de homogeneidade entre os constituintes de uma mistura asfáltica (ligante asfáltico, agregados graúdos e miúdos), o que pode acelerar a propagação de defeitos no pavimento. Masad *et al.* (1999a) verificaram que amostras extraídas de campo são menos homogêneas, por apresentarem agregados mais segregados, se comparadas àquelas produzidas em laboratório e, portanto, tenderiam a ter desempenho mecânico inferior. Segundo Hunter, Airey e Collop (2004), uma mistura asfáltica ideal seria aquela com granulometria contínua e distribuição uniforme de seus agregados, porém os processos de compactação tornam inevitável a segregação das partículas, devido à dificuldade em depositar uniformemente a mistura asfáltica quente nos moldes.

#### *4.3.2.4 Análise do esqueleto mineral com o uso do Image Processing and Analysis System 2 (iPas2)*

Existem duas abordagens para a análise da estrutura interna das misturas asfálticas: o esqueleto mineral e a distribuição e quantificação dos vazios (SEFIDMAZGI, 2011). A abordagem utilizada neste estudo foca no esqueleto mineral, pois o iPas2 tem limitações para investigar os vazios, tanto com relação ao sistema de aquisição de imagens quanto com relação ao *software* utilizado para caracterizar a estrutura interna da mistura asfáltica. Para avaliar o esqueleto mineral das MA1 e MA2 (Figura 4.6), foram analisados os seguintes parâmetros, estabelecidos pelo *software* iPas2: número e extensão de zonas contato, orientação e segregação radial dos agregados.

Figura 4.6 – Fluxograma do método utilizado para análise do esqueleto mineral das misturas asfálticas com o uso do *software* iPas2

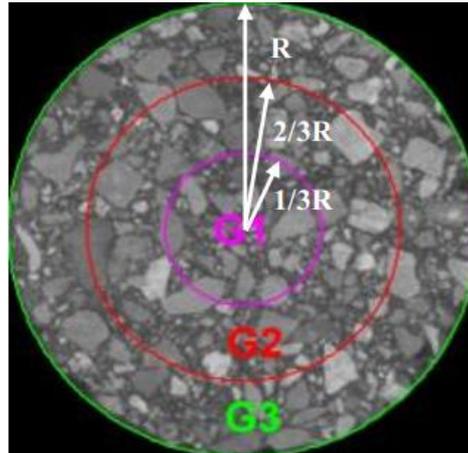


Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Há ocorrência de uma zona de contato entre duas partículas de agregado quando elas estão a uma distância máxima entre si, a ser definida pelo usuário. Neste estudo utilizou-se o valor de 0,50 mm (BESSA; CASTELO BRANCO; SOARES, 2012). O *software* estabelece como padrão, para o menor tamanho de agregado o valor de: quatro vezes a distância definida entre esses, ou seja, neste estudo o *software* só analisou partículas iguais ou maiores do que 2,00 mm de diâmetro. Houve uma limitação dessa técnica uma vez que a curva granulométrica de projeto utilizada apresentava 65% de agregados miúdos. O parâmetro obtido pelo iPas2 e, utilizado nesta pesquisa para quantificar a orientação média dos agregados foi o vetor magnitude.

A segregação radial é representada por histogramas de frequência de agregados separados por tamanho, por grupos de segregação (Figura 4.7). Esses grupos, estabelecidos pelo *software* iPas2, são descritos da seguinte forma: Grupo 1 (G1), relativo ao círculo mais interno, de raio igual a um terço do Raio (R) da superfície do Corpo de Prova (CP); Grupo 2 (G2), relativo ao anel intermediário, de raio igual a dois terços do R e Grupo 3 (G3), relativo ao anel da borda externa, de raio igual à R.

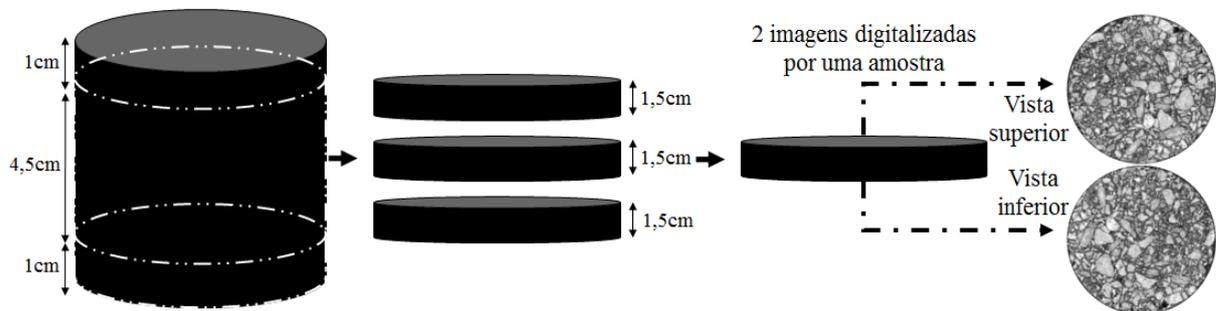
Figura 4.7 – Grupos de segregação radial



Fonte: Adaptado de Bahia (2013).

O seccionamento das amostras foi realizado, atendendo ao mínimo de 3 cortes (6 imagens) por amostra (MASAD *et al.*, 2001), como pode ser visto na Figura 4.8. Cada CP tinha 6,5 cm de altura e foi serrado em 4 seções horizontais; as bordas foram descartadas (1,0 cm de cada extremidade); 3 amostras, de 1,5 cm de espessura e 100 cm<sup>2</sup> de área, cada, foram utilizadas nesta pesquisa e geraram 6 imagens que foram escaneadas e digitalizadas com o uso do *scanner* HP (Modelo HP-deskjet F4280), que gerou imagens em alta definição com resolução de *pixels* de 600 dpi.

Figura 4.8 – Seccionamento de um CP e 2 imagens digitalizadas das 6 imagens analisadas no iPas2



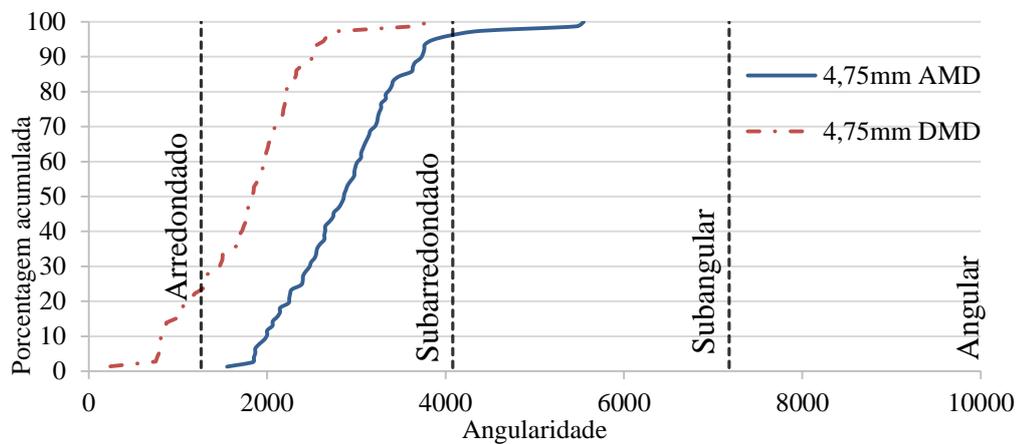
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

## 4.4 Resultados e Discussões

### 4.4.1 Agregados

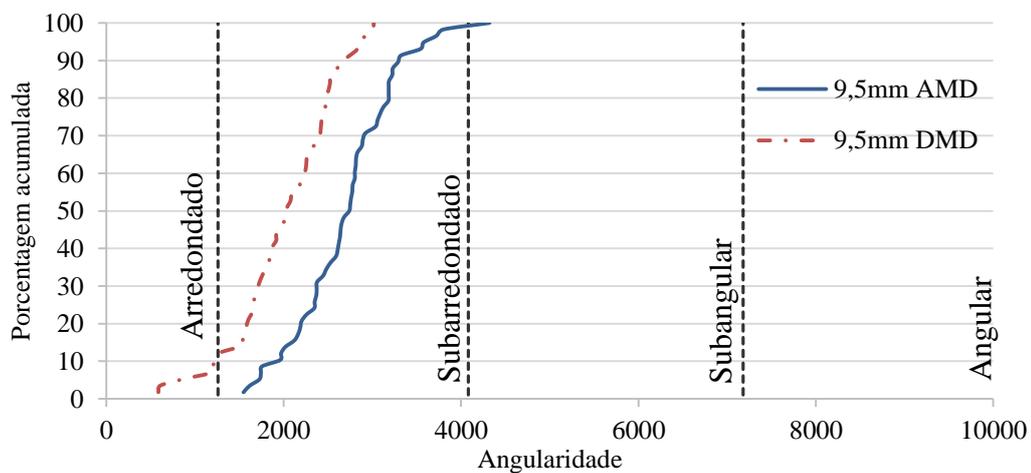
As propriedades de forma dos agregados foram analisadas, no AIMS2, por frações (#4,75 e #9,5 mm), AMD e DMD. Observou-se que as curvas de distribuição das propriedades de forma, para as duas frações avaliadas, resultaram em comportamentos semelhantes: redução das propriedades de forma com o aumento do intervalo de tempo de desgaste no MD, porém não na mesma proporção (Figuras de 4.9 a 4.14).

Figura 4.9 – Curvas de distribuição da angularidade da fração #4,75 mm AMD e DMD geradas pelo AIMS2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 4.10 – Curvas de distribuição da angularidade da fração #9,5 mm AMD e DMD geradas pelo AIMS2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 4.11 – Curvas de distribuição da textura superficial da fração #4,75 mm AMD e DMD geradas pelo AIMS2

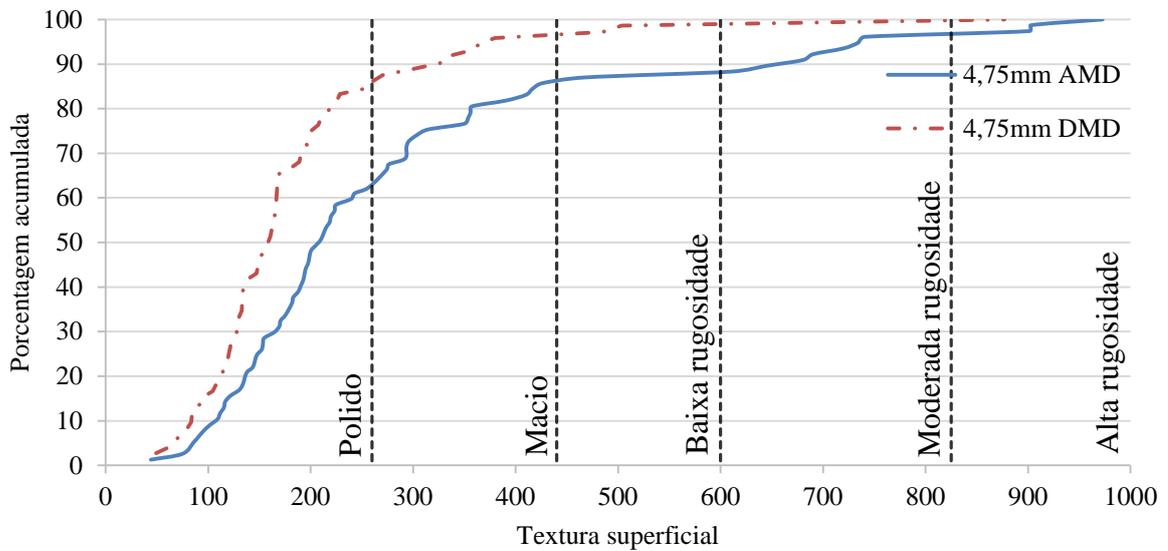


Figura 4.12 – Curvas de distribuição da textura superficial da fração #9,5 mm AMD e DMD geradas pelo AIMS2

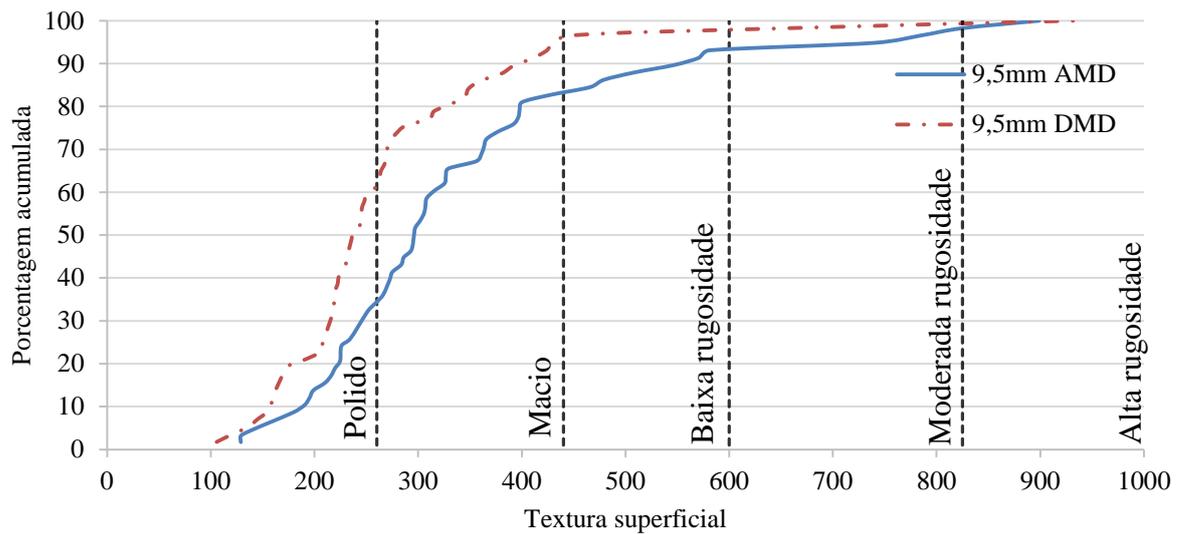
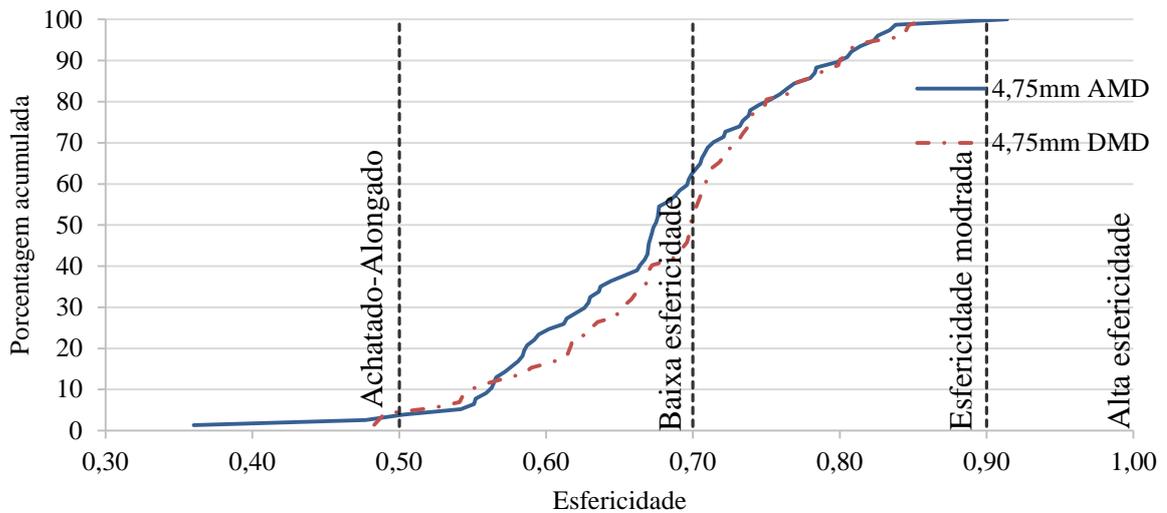
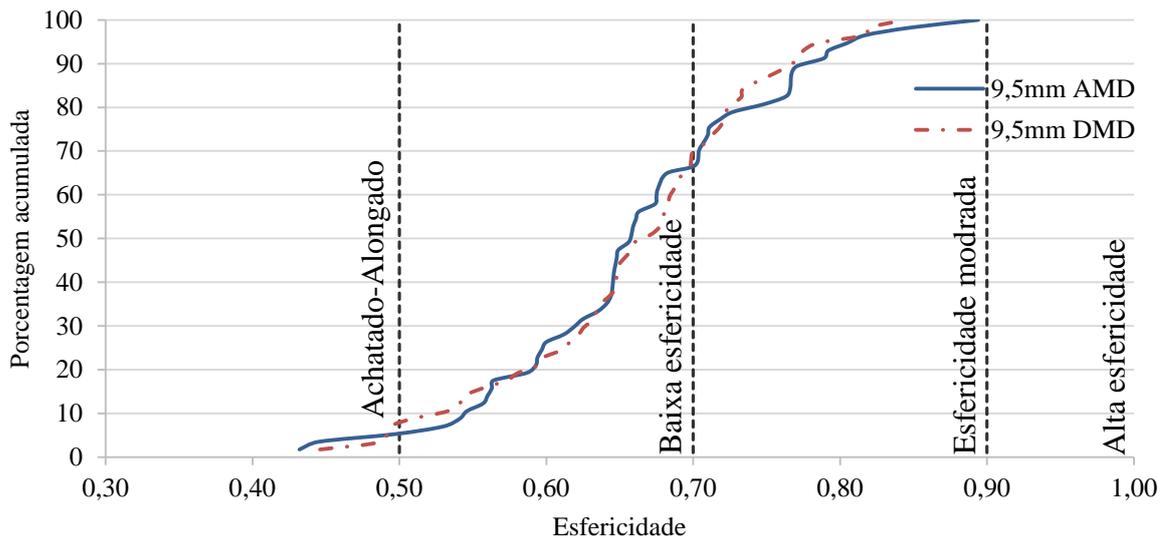


Figura 4.13 – Curvas de distribuição da esfericidade da fração #4,75 mm AMD e DMD geradas pelo AIMS2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 4.14 – Curvas de distribuição da esfericidade da fração #9,5 mm AMD e DMD geradas pelo AIMS2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

O deslocamento das curvas de distribuição da angularidade e da textura superficial para a esquerda indicou que o uso do MD tornou os materiais mais arredondados e polidos, respectivamente, o que era esperado devido ao nível de severidade ao qual os agregados foram submetidos dentro do equipamento. As curvas de distribuição da esfericidade quase não se deslocaram. As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam as médias dos valores

das propriedades de forma; as suas perdas relativas, em porcentagem e a classificação do agregado, segundo o sistema de classificação de propriedades de forma proposto nesta pesquisa (Capítulo 2), para cada fração analisada, nas duas condições avaliadas: AMD e DMD.

Tabela 4.1 – Resultados das propriedades de forma para partículas retidas na #4,75 mm

Propriedade	Fração #4,75 mm					
	Valores médios			Classificação proposta nesta pesquisa		
	AMD	DMD	Perda relativa (%)	AMD	DMD	Mudança de classe
Angularidade	2.893	1.780	38,49	Subarredondado	Subarredondado	Não
Textura superficial	284	185	34,96	Macio	Polido	Sim
Esfericidade	0,67	0,67	0,89	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Não

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Tabela 4.2 – Resultados das propriedades de forma para partículas retidas na #9,5 mm

Propriedade	Fração #9,5 mm					
	Valores médios			Classificação proposta nesta pesquisa		
	AMD	DMD	Perda relativa (%)	AMD	DMD	Mudança de classe
Angularidade	2.700	2.035	24,61	Subarredondado	Subarredondado	Não
Textura superficial	341	267	21,83	Macio	Macio	Não
Esfericidade	0,66	0,64	3,93	Baixa esfericidade	Baixa esfericidade	Não

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados mostraram que houve redução nas propriedades de forma, DMD, para as duas frações analisadas, mas não houve mudança de classe de angularidade e de esfericidade, baseada na classificação proposta nesta pesquisa. Porém, com relação à textura superficial, houve mudança de classe, na fração #4,75 mm. Os agregados, AMD foram categorizados como “macios” e DMD foram categorizados como “polidos”.

Com relação à porcentagem de massa perdida, a perda DMD foi maior para a fração #4,75 mm (23,7%) do que para a fração #9,5 mm (11,9%) (Tabela 4.3). Os resultados indicaram que os agregados menores quebraram com mais facilidade. Possivelmente, devido ao tamanho relativo das partículas (4,75 mm) diante das esferas (9,5 mm) do MD. A redução nos valores das propriedades de angularidade e de textura superficial também foi maior para os agregados miúdos, porém a esfericidade apresentou comportamento oposto (Tabelas 4.1 e 4.2). Constatou-se que houve quebra das partículas, porém essa quebra não impactou o valor

da esfericidade, à ponto de causar uma mudança de classe do agregado, com base no sistema de classificação adotado.

Tabela 4.3 – Massa perdida do material avaliado DMD (separado por frações)

Frações (mm)	Massa perdida (%)
	210 minutos
#4,75	23,7
#9,5	11,9

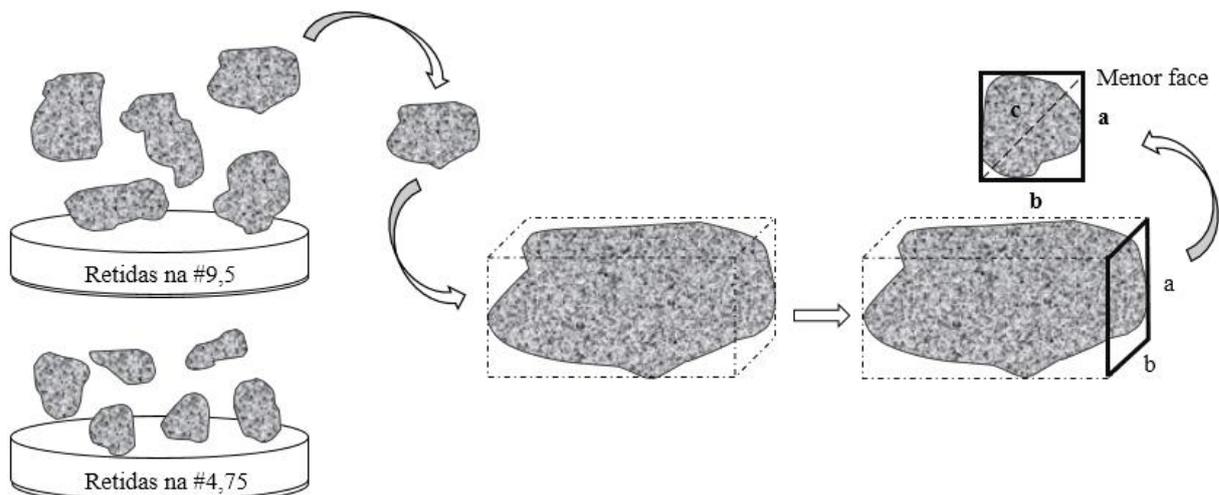
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Para tentar explicar o fato de que a perda de esfericidade não ocorreu na mesma ordem de grandeza da perda de angularidade e de textura superficial, uma investigação sobre a redução do tamanho das partículas, passantes na fração #12,5 e retidas na fração #9,5 mm e passantes na fração #9,5 e retidas na fração #4,75 mm, foi realizada. Uma vez que a esfericidade é calculada, no AIMS2, com base nas dimensões de um paralelogramo, os diâmetros das partículas foram utilizados como descritores dos seus tamanhos (Equação 4.3) e o diâmetro médio das partículas foi calculado AMD e DMD (Tabelas 4.4 e 4.5). A Figura 4.15 apresenta uma ilustração do diâmetro utilizado como indicador do tamanho de cada partícula retida nas duas frações analisadas.

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4.3)$$

Onde:  $c$  é o diâmetro;  $a$  é a menor dimensão e  $b$  é a dimensão intermediária da partícula de agregado.

Figura 4.15 – Ilustração do diâmetro utilizado como indicador do tamanho de cada partícula retida nas duas frações analisadas



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

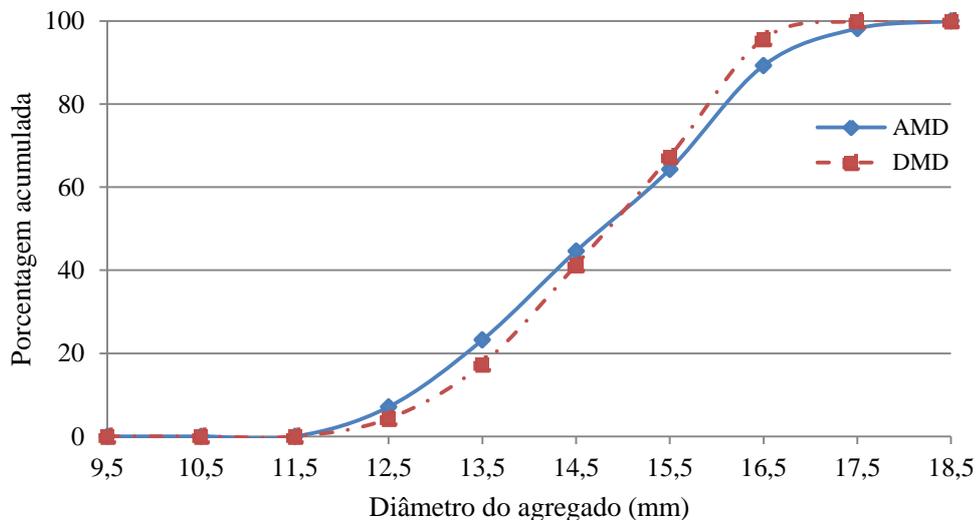
Tabela 4.4 – Resultados dos tamanhos dos diâmetros das partículas retidas na #9,5 mm

Estado	Média (mm)	Desvio Padrão
AMD	15,77	1,55
DMD	15,70	1,27

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados mostraram que houve redução no tamanho das partículas retidas na #9,5 mm com diâmetros médios menores em 0,5% DMD do que aquelas medidas AMD (Tabela 4.4). A curva granulométrica das partículas retidas na fração #9,5 mm AMD e DMD praticamente não sofreu alteração (Figura 4.16).

Figura 4.16 – Curvas granulométricas das partículas na fração #9,5 mm AMD e DMD



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

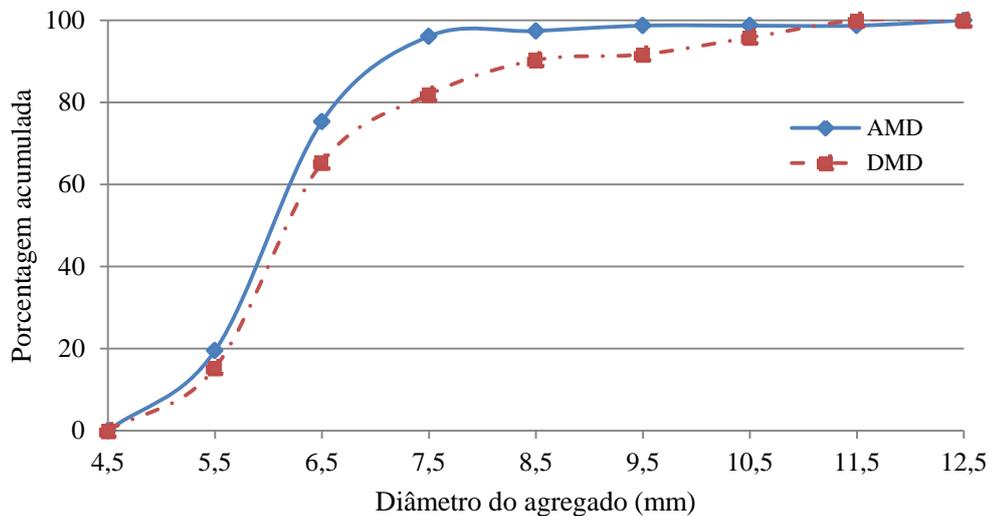
Com relação à média do tamanho dos diâmetros das partículas retidas na #4,75 mm, não foi constatada perda e sim um aumento (6,8%) dos diâmetros médios das partículas retidas DMD, se comparados aos valores medidos AMD (Tabela 4.5). A curva granulométrica das partículas retidas na fração #4,75 mm, AMD e DMD, sofreu uma pequena alteração (Figura 4.17). Os resultados mostraram que a granulometria das partículas sofreu menos impacto do que as propriedades de forma após o desgaste dos agregados com o uso do MD. Essa constatação pode explicar o menor impacto sofrido pela esfericidade, se comparado ao impacto sofrido pela angularidade e pela textura superficial, DMD, uma vez que a esfericidade é calculada em função das dimensões das partículas.

Tabela 4.5 – Resultados dos tamanhos dos diâmetros das partículas retidas na #4,75 mm

Estado	Média (mm)	Desvio Padrão
AMD	7,13	0,97
DMD	7,62	1,48

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 4.17 – Curvas granulométricas das partículas na fração #4,75 mm AMD e DMD



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

#### 4.4.2 Misturas Asfálticas

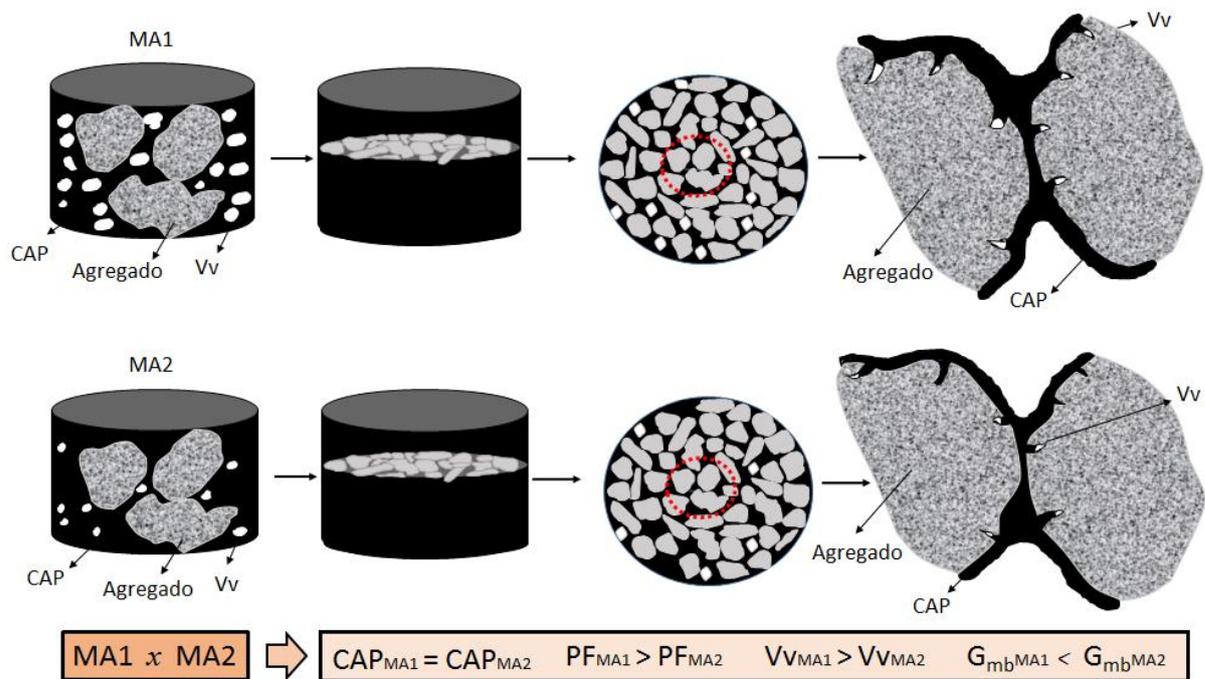
Para esta pesquisa, foram produzidas duas misturas asfálticas: MA1 e MA2. A MA1 foi dosada segundo a metodologia Superpave, com curva granulométrica de projeto enquadrada na Faixa C do DNIT, e o teor de projeto encontrado foi de 4,5% de CAP com 100 giros no compactador giratório. A MA2 foi replicada, mantendo fixo o teor de CAP e a mesma foi diferenciada da MA1 através de seus agregados constituintes, cujas partículas retidas nas peneiras de #9,50 e #4,75 mm foram submetidas ao MD durante 210 minutos. A MA1 atingiu 4,2% de Vv e a MA2 atingiu 1,3% de Vv (Tabela 4.6). Diante do fato da MA2 não ter sido dosada e sim replicada, com agregados DMD, a mesma deve requerer menos CAP e, a queda no seu Vv pode ter sido uma das consequências, em termos de estrutura interna, da redução das propriedades de forma dos seus agregados constituintes (Tabelas 4.1 e 4.2), pois o CAP em excesso pode ter preenchido os vazios da MA2 (Figura 4.18).

Tabela 4.6 – Parâmetros de dosagem da MA1 e MA2

MA	Teor de CAP (%)	Vv (%)	G <sub>mm</sub>	G <sub>mb</sub>	Tipo de agregado
MA1	4,5	4,2	2,475	2,371	AMD
MA2	4,5	1,3	2,449	2,419	DMD

Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 4.18 – Ilustração explicativa da estrutura interna da MA1 e MA2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

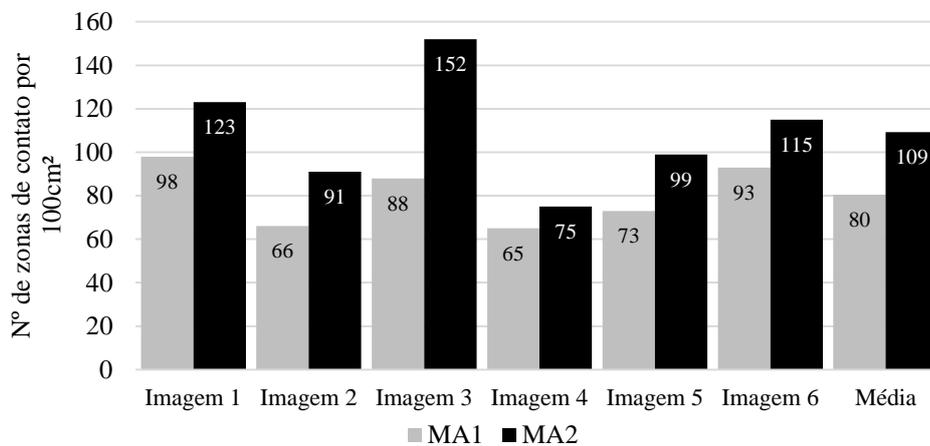
O seccionamento dos CPs representativos das duas misturas asfálticas produzidas foi realizado, baseado na metodologia proposta por Masad *et al.* (2001). Os parâmetros de zonas de contato, de orientação e de segregação de agregados, estabelecidos pelo iPas2, foram utilizados como descritores do esqueleto mineral, para análise e comparação dessas misturas. Os resultados dos parâmetros e de suas Médias (M) estão apresentados a seguir.

### 1. Zonas de contato

Os resultados mostraram que o número de zonas de contato, por 100 cm<sup>2</sup> de área, das faces do CP representativo da MA2 aumentou 36,25%, em relação ao número de zonas de contato, por 100 cm<sup>2</sup> de área, das faces do CP representativo da MA1 (Figura 4.19 e Tabela 4.7). Com relação à extensão média das zonas de contato, houve um aumento de 8,40%, ao

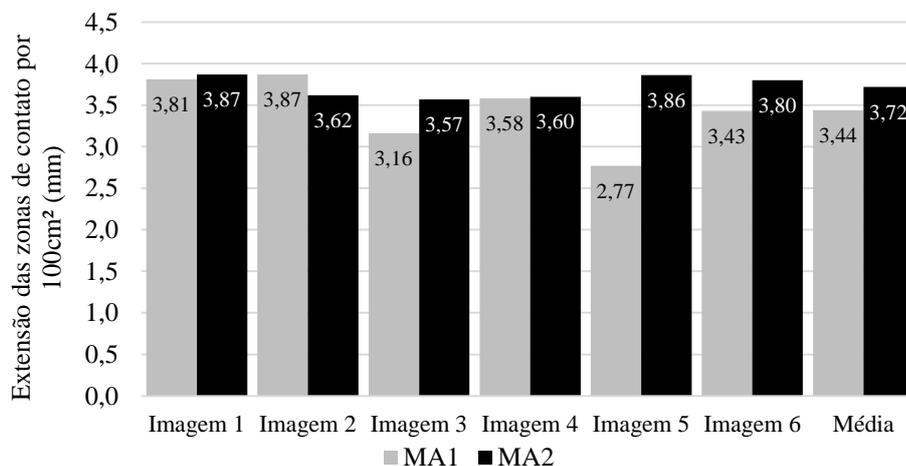
compararem-se as MA1 e MA2 (Figura 4.20 e Tabela 4.8). Esses parâmetros foram utilizados como descritores do intertravamento entre partículas de agregados. Normalmente, afirma-se na literatura especializada (como citado na Revisão Bibliográfica) que partículas mais angulares, mais rugosas e mais esféricas aumentam o intertravamento entre elas (contrariando o que foi observado nesta pesquisa). Assumindo que o método utilizado para descrever o intertravamento foi adequado, esse resultado não foi o esperado, pois a MA2 tem agregados menos angulares, menos rugosos e menos esféricos do que a MA1, o que diminuiria o intertravamento entre os mesmos.

Figura 4.19 – Número de zonas de contato por 100 cm<sup>2</sup> para cada imagem analisada da MA1 e MA2 geradas pelo iPas2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 4.20 – Extensão das zonas de contato por 100 cm<sup>2</sup> para cada imagem analisada da MA1 e MA2 geradas pelo iPas2



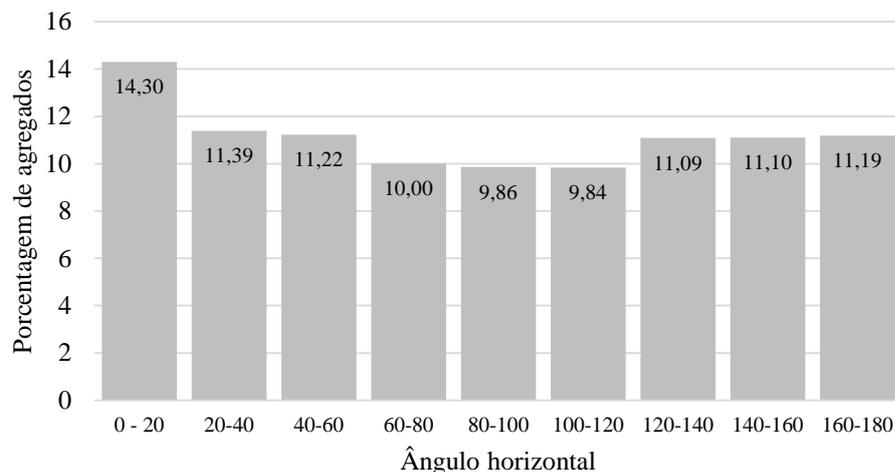
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Os resultados encontrados corroboraram aqueles encontrados em Ibiapina *et al.* (2017). Os citados autores utilizaram um agregado de origem fonolítica e uma metodologia diferente para o desgaste de agregados no MD, em que 3 frações foram alteradas (#9,5; #4,75 e #2,36 mm). Uma das hipóteses levantada para os resultados de Ibiapina *et al.* (2017) foi o fato de que o desgaste do material com o uso do MD modificou, concomitantemente, outras propriedades e de que uma maior investigação, em termos de forma poderia indicar que os agregados desgastados tiveram suas propriedades de esfericidade ou lamelaridade melhoradas, por exemplo, uma vez que os autores só avaliaram a angularidade dos agregados. Para testar essa hipótese, nesta pesquisa, todas as propriedades de forma foram avaliadas e os resultados mostraram que houve redução nas mesmas. Porém, não na mesma ordem de grandeza, pois a redução na esfericidade foi menor do que a redução na angularidade e na textura superficial das partículas analisadas. Para tentar explicar as diferenças nas citadas reduções, a granulometria das partículas, retidas nas frações #9,5 e #4,75 mm, foi avaliada AMD e DMD. Os resultados mostraram que a granulometria, praticamente, não foi alterada DMD (Figuras 4.16 a 4.17).

## 2. Orientação

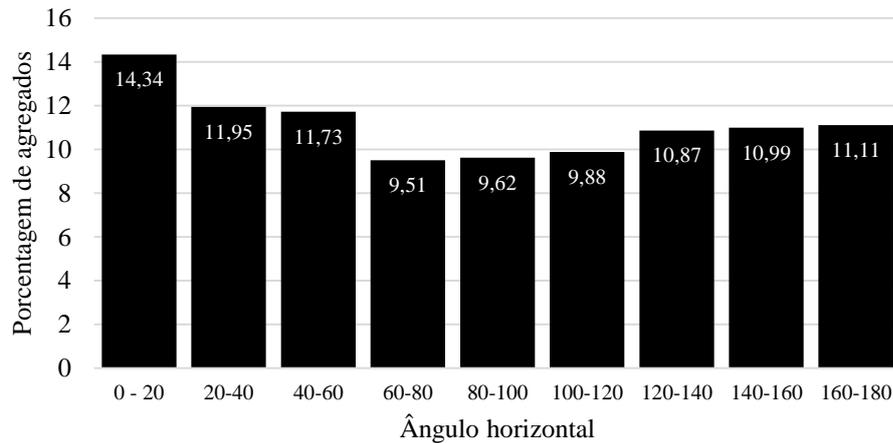
Os resultados mostraram que não houve diferenças significativas entre os valores do ângulo horizontal médio de orientação da distribuição de agregados na MA1 e na MA2 (Figura 4.21 e 4.22). Seus valores não foram próximos de zero, o que indica que não houve uma tendência da orientação dos agregados para o plano horizontal.

Figura 4.21 – Ângulo horizontal médio de orientação dos agregados na MA1



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

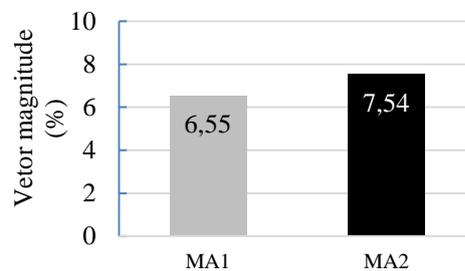
Figura 4.22 – Ângulo horizontal médio de orientação dos agregados na MA2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

O vetor magnitude foi calculado com os valores do ângulo horizontal de orientação de cada partícula de agregado (Equação 4.2). Possibilitou-se assim, quantificar a distribuição direcional que descreve a orientação preferencial das partículas de agregados. Os valores absolutos dos vetores magnitude das duas misturas foram próximos de zero, o que indicou que as partículas estavam tendendo a uma distribuição aleatória, ou seja, anisotrópica. Os resultados das análises no iPas2 mostraram que a variação entre os valores dos vetores magnitude da MA1 e MA2 foi da ordem de 1%. Portanto, concluiu-se que não houve variação significativa (Figura 4.23).

Figura 4.23 – Valores dos vetores magnitude da MA1 e MA2



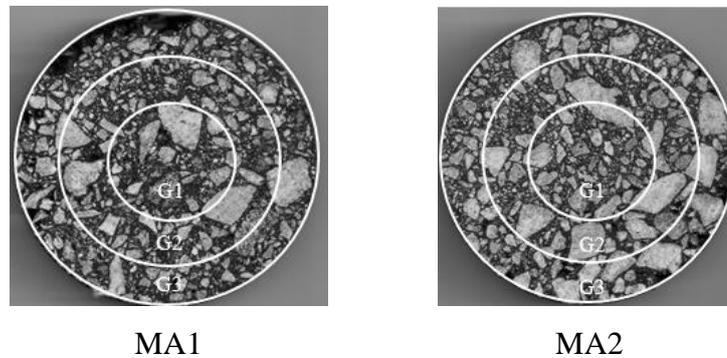
Fonte: Elaborado pela autora (2018).

### 3. Segregação

A segregação radial é descrita por grupos de segregação (Figura 4.23) e representada por histogramas de frequência de agregados separados por tamanho (Figura 4.24). As médias dos valores dos parâmetros de segregação radial de agregados apresentaram

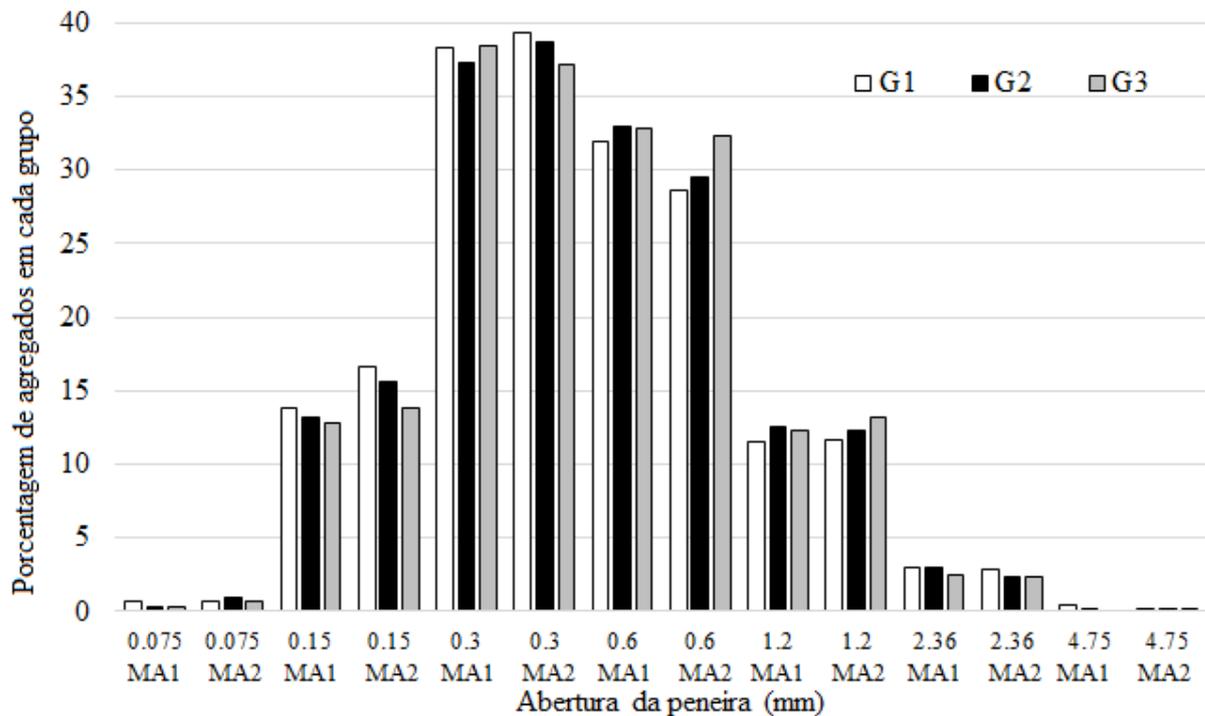
um comportamento semelhante, nas duas misturas asfálticas analisadas (MA1 e MA2) e indicaram que a redução nas propriedades de forma não impactou a segregação radial das partículas de agregados, com base nas análises realizadas com o uso do iPas2.

Figura 4.23 – Análise da imagem da MA1 e MA2 com os grupos de segregação radial geradas com o uso do iPas2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

Figura 4.24 – Histogramas representativos da segregação radial média para a MA1 e MA2



Fonte: Elaborado pela autora (2018).

#### 4.5 Considerações Finais

O comportamento das misturas asfálticas, com relação aos principais defeitos encontrados nos pavimentos (deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento

térmico), está diretamente ligado às características de seu esqueleto mineral, por conseguinte às características de seus agregados constituintes. Nesta pesquisa, avaliou-se o impacto das mudanças nas propriedades de forma de agregados, provocadas com o uso do MD, nos parâmetros descritores do esqueleto mineral de misturas asfálticas compostas pelos mesmos. As propriedades de forma foram analisadas no AIMS2, AMD e DMD. A estrutura interna das misturas asfálticas foi analisada com o uso do *software* iPas2.

Os resultados mostraram que, as propriedades de forma sofreram redução, após o desgaste dos agregados com o uso do MD, porém a esfericidade sofreu menos redução do que a angularidade e a textura superficial (Tabelas 4.1 e 4.2). Os resultados também mostraram que a granulometria das frações de agregados avaliadas praticamente não sofreu alterações DMD (Figuras 4.16 e 4.17).

As análises com o uso do *software* iPas2, dos esqueletos minerais das duas misturas asfálticas produzidas (MA1 e MA2) mostraram que os parâmetros de número e de extensão das zonas de contato entre agregados, aumentaram DMD (Figuras 4.19 e 4.20). As análises mostraram, também, que não houve alterações significativas nos parâmetros de orientação (Figuras 4.21 a 4.23) e de segregação radial dos agregados (Figuras 4.23 e 4.24).

O teor de projeto de CAP, a energia de compactação e a curva granulométrica de projeto foram constantes, para as duas misturas avaliadas. As propriedades de forma e o Vv da MA2 sofreram redução, se comparados aos da MA1. Uma hipótese que pode explicar o aumento do intertravamento na MA2, baseado no aumento dos parâmetros descritores de número e de extensão das zonas de contato entre agregados, é o fato de que, o impacto da redução nas propriedades de forma, alteradas pelo desgaste dos agregados com o uso do MD, não foi suficiente para sobrepor o impacto das mudanças na sua volumetria. A MA2 foi replicada e não dosada, portanto o seu Vv pode ter sido preenchido com o CAP, que havia em excesso nessa mistura.

A contribuição mais relevante desta pesquisa foi a constatação de que, as mudanças das propriedades de forma, provocadas com o uso do MD, na formação do esqueleto mineral das misturas asfálticas não devem ser avaliadas isoladamente. Quando o indicador dessas mudanças for o intertravamento de agregados, as mudanças na granulometria e nos parâmetros de dosagem das misturas asfálticas também devem ser avaliadas.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa teve como objetivo geral a proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados, caracterizados com o uso do PDI para a seleção de materiais brasileiros, ainda na etapa de projeto, para a produção de misturas asfálticas mais resistentes aos principais danos que afetam os pavimentos. Para tanto, os seguintes objetivos específicos foram alcançados: organizar um banco de dados, com base nas informações de origem e tipo de rocha, de vinte agregados oriundos de oito estados brasileiros; calcular, através de métodos estatísticos, os valores limites das classes para elaborar um sistema de classificação de propriedades de forma, a partir do banco de dados organizado; propor um esboço de norma brasileira para caracterização de agregados com o uso do PDI; elaborar um protocolo de utilização do AIMS2, escrito de forma didática e em português, para seus operadores, no Brasil; avaliar através de análises estatísticas de repetibilidade e de reprodutibilidade, a qualidade das medidas das propriedades de forma de agregados obtidas com o uso do AIMS2; avaliar, através do PDI, o impacto da mudança das propriedades de forma de agregados, gerada através do desgaste dos mesmos com o uso do MD, na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas.

Para gerar os valores limites do sistema de classificação proposto, foram testados quatro métodos hierárquicos de *cluster* e adotado o de maior valor de correlação cofenética, para cada propriedade de forma. Optou-se por utilizar a mesma nomenclatura para as classes e os mesmos números de *clusters* utilizados na pesquisa desenvolvida por Al Rousan (2004), ou seja, quatro classes para as propriedades de angularidade, de esfericidade e de forma 2D e cinco classes para a de textura superficial. Após as análises estatísticas comprovarem as diferenças entre os *clusters*, foram definidos os valores limites que delimitaram cada classe.

Compararam-se as três classificações de propriedades de forma: Al Rousan (2004), Mahmoud *et al.* (2010b) e a proposta na presente pesquisa. A classificação proposta apresentou classes extremas com amplitudes menores do que aquelas obtidas para as demais classificações internacionais, o que pode estar relacionado às altas dispersões das distribuições de propriedades e à alta heterogeneidade entre os agregados nacionais investigados. Observou-se que um agregado pode ser classificado de maneiras diferentes a depender da classificação adotada. Essa constatação pode evitar, por exemplo, a penalização de agregados que seriam descartados em uma seleção, ainda no âmbito de projeto, dependendo das propriedades requeridas para sua aplicação.

A avaliação da qualidade das medidas das propriedades de forma, obtidas com o uso do AIMS2, foi realizada a partir de um método existente (Bathina, 2005) e um método proposto nesta pesquisa, para testar estatisticamente, a repetibilidade e a reprodutibilidade das mesmas. No método proposto, utilizaram-se duas abordagens: uma abordagem descritiva e uma abordagem inferencial. Na abordagem descritiva, as medidas de tendência central (média) e de dispersão (coeficiente de variação) foram utilizadas como parâmetros de análise das variações das medidas; na abordagem inferencial, testes de hipótese foram aplicados para verificar a igualdade das médias das análises. Diante do esboço de norma brasileira para caracterização de agregados com o uso do PDI, os dois equipamentos, em funcionamento, existentes no país foram utilizados para a realização dos testes. Elaborou-se um protocolo de utilização do AIMS2, em português.

A avaliação do impacto da mudança das propriedades de forma de agregados na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas foi realizada utilizando-se o número e a extensão das zonas de contato, a orientação e a segregação radial das partículas de agregados como parâmetros descritores do esqueleto mineral. Duas frações (9,5 e 4,75 mm) de agregados de uma mesma mineralogia (gnaisse) foram analisadas Antes e Depois do processo de desgaste por meio do uso do equipamento MD (AMD e DMD, respectivamente). Esses agregados foram incorporados na produção de duas misturas asfálticas (MA1 e MA2, respectivamente). Os parâmetros descritores do esqueleto mineral foram analisados para as duas misturas asfálticas produzidas, com o uso do *software* iPas2, em termos de intertravamento de agregados.

Os resultados mostraram que houve um aumento do intertravamento dos agregados, baseado nos parâmetros de número e extensão de zonas de contato, na MA2 quando comparada a MA1. Os valores das propriedades de forma e do  $V_v$  da MA2 diminuíram. O teor de projeto de CAP, a energia de compactação e a curva granulométrica de projeto foram constantes, para as duas misturas avaliadas. Uma hipótese levantada para explicar o aumento do intertravamento dos agregados na MA2 foi a de que, a redução nas propriedades de forma, causada pelo desgaste dos agregados com o uso do MD, não foi suficiente para sobrepor as mudanças na volumetria dessa mistura. A MA2 foi replicada e não dosada, portanto seu  $V_v$  pode ter sido preenchido com o CAP, que havia em excesso nessa mistura.

Não houve conclusão de que existe uma classificação melhor que as outras. Entretanto, a classificação proposta nesta pesquisa pode ser mais adequada para os agregados

oriundos do Brasil, uma vez que estes compuseram o banco de dados utilizado como base para sua elaboração. Concluiu-se que os equipamentos analisados atenderam aos critérios de qualidade das medidas avaliadas pelos dois métodos testados. Constatou-se que: houve repetibilidade entre as medidas de propriedades de forma geradas com o uso do AIMS2, nos dois equipamentos testados; houve reprodutibilidade entre diferentes operadores e houve reprodutibilidade entre os dois equipamentos avaliados. Constatou-se que, as mudanças das propriedades de forma, provocadas com o uso do MD, na formação do esqueleto mineral das misturas asfálticas não devem ser avaliadas isoladamente. Quando o indicador dessas mudanças for o intertravamento de agregados, a granulometria e os parâmetros de dosagem das misturas asfálticas também devem ser levados em consideração.

Para trabalhos futuros de pesquisa, seguem algumas sugestões:

1. Incorporar e avaliar agregados provenientes de outros estados do Brasil, para enriquecer o banco de dados organizado e calibrar os valores limites do sistema de classificação proposto;
2. Utilizar a classificação proposta para avaliar a influência do processo de britagem nas propriedades de forma de agregados;
3. Utilizar a classificação proposta para comparar os resultados de propriedades de forma dos agregados com os resultados do comportamento mecânico de misturas asfálticas e definir valores limites que descartariam agregados para projetos de misturas asfálticas e para outras aplicações na Engenharia Civil;
4. Analisar agregados de diferentes mineralogias, para calibrar o método proposto para testar, estatisticamente, a repetibilidade e a reprodutibilidade das medidas geradas com o uso do AIMS2;
5. Avaliar o impacto das propriedades de forma na dosagem de diferentes misturas asfálticas, em termos de  $V_v$ ;
6. Avaliar a influência da mudança de outras frações de agregados desgastados com o uso do MD;
7. Correlacionar as propriedades de forma com o esqueleto mineral utilizando outras ferramentas como, por exemplo, a tomografia computadorizada.

## REFERÊNCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T304**: Uncompacted Void Content of Fine Aggregate. As Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading. Washington, D. C., 2008.

\_\_\_\_\_. **AASHTO TP81**: Standard Method of Test for Determining Aggregate Shape Properties by Means of Digital Image Analysis. Washington, D. C., 2016.

ABNT ISO/IEC GUIA 43-1 – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Ensaio de Proficiência por Comparações Interlaboratoriais**. Brasil, 1999.

ABNT NBR 7809 Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7809. **Definições: Determinação do Índice de Forma do Agregado**. Rio de Janeiro, RJ. 2006.

AL ROUSAN, T. M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Texas A&M University, College Station, Texas, 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/szfK0B>>. Acesso em: 8 ago. 2013.

AL ROUSAN, T. M. *et al.* New Methodology for Shape Classification of Aggregates. **Journal of Transportation Research Board**, v.193, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/103141/193-02>>. Acesso: 10 nov. 2013.

ALVES, V. A. H. S. **Avaliação da Resistência à Degradação Mecânica de Agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por Técnicas Digitais de Imagens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Regulamento Técnico para Realização dos Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento e Elaboração do Relatório Demonstrativo das Despesas Realizadas**. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

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. Disponível em: <<https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204>>. Acesso em: 11 set. 2013

ARASAN, S. *et al.* Correlation Between Shape of Aggregate and Mechanical Properties of Asphalt Concrete. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, n. 2, p. 239-262, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2011.9695245>>. Acesso em: 7 ago. 2014

ARAGÃO, F. *et al.* Effects of Morphological Characteristics of Aggregate Particles on the Mechanical Behavior of Bituminous Paving Mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 444-453, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.013>>. Acesso em: 5 out. 2013.

ARAUJO, V. M. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens. *In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES*, 28, 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANPET, 2014. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4842>>. Acesso em: 6 out. 2013.

ARAUJO, V. M. C. **Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas para Uso em Revestimentos Aeroportuários a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C 802**: Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods for Construction Materials. EUA. 1996.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2726**: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. EUA. 2000.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6928**: Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro Deval Apparatus. EUA. 2006

\_\_\_\_\_. **ASTM D 7428**: Standard Test Method for Resistance of Fine Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro Deval Apparatus. EUA. 2008.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 691**: Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method. EUA. 2009.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 4791**: Standard Test Method for Flat Particle, Elongated Particle, or Flat and Elongated Particle in Coarse Aggregate. EUA. 2010.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 2041M**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. EUA. 2011.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 5821**: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. EUA. 2013.

BAHIA, H. U. **Asphalt Mixture Visualization - iPas2 Software and Characterization of Aggregate Skeleton** (Apresentação), 2013. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REOLOGIA, Aracaju, SE, 2013.

BARRETT, P. J. **The Shape of Rock Particles, a Critical Review**. *Sedimentology*, v.27, p. 291–303, 1980.

BARTHEN, R.; BERTULANI, C. **Vocabulário de Metrologia Legal**. Projeto Ensino de Física a Distância - Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro (IF/UFRJ). 2009. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/teaching/metrol/metro.html>>. Acesso em: 7 ago. 2015.

BASTOS, J. B. S. **Considerações Sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/23173>>. Acesso em: 9 nov. 2014.

BATHINA, M. **Quality Analysis of the Aggregate Imaging System (AIMS)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Texas A&M University, College Station, Texas, 2005. 119f. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1969.1/2416>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA. 504p, 2010.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Caracterização de Agregados Convencionais e Alternativos Utilizando Técnicas de Processamento Digital de Imagens. *In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 27, 2009. Vitória. Anais...* Vitória: ANPET, 2009.

BESSA, I. S. **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2012. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4842>>. Acesso em: 19 out. 2017.

BESSA I. S.; CASTELO BRANCO V. T. F.; SOARES, J. B. Evaluation of Different Digital Image Processing Software for Aggregates and Hot Mix Asphalt Characterizations **Construction and Building Materials**. v. 37, p. 370–378., 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.051>>. Acesso em: 21 set. 2016.

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Evaluation of Polishing and Degradation Resistance of Natural Aggregates and Steel Slag Using the Aggregate Imaging Measurement System. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1-21, 2014. Disponível em: <<http://doi.org/10.1080/14680629.2014.883323>>. Acesso em: 14 mai. 2015.

BOWMAN, E. T.; SOGA, K.; DRUMMOND, T. W. Particle Shape Characterisation Using Fourier Analysis. **Relatório Técnico, Cambridge University Engineering Department – CUED/D-Soils/TR315**, 2000. Disponível em: <[http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech\\_new](http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new)>. Acesso em: 12 fev. 2013.

BUCHANAN, M. S. **Evaluation of the Effect of Flat and Elongated Particles on the Performance of Hot Mix Asphalt Mixtures**. Report 00-03, National Center for Asphalt Technology (NCAT). Auburn, EUA, 2000.

CASTELO BRANCO, V. T. F. *et al.* Caracterização de forma, angularidade e textura de agregado de brita granítica e escórias de aciaria usando o Aggregate Imaging System (AIMS). *In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 20, 2006, Brasília. Anais...* Brasília: ANPET, 2006.

CAVALCANTI, H. P. **Avaliação da Degradação de Propriedades de Forma de Agregados Utilizando o Processamento Digital de Imagens**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2016.

CHANDAN, C. *et al.* Application of Imaging Techniques to Geometry Analysis of Aggregate Particles. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 18(1), p. 75-82, 2004. DOI: [dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:1\(75\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:1(75)).

CHEN, J-S.; LIN, K. Y; CHANG, M. K. Influence of Coarse Aggregate Shape on the Strength of Asphalt Concrete Mixtures. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 6, p. 1062-1075, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.11175/easts.6.1062>>. Acesso em: 4 ago. 2014.

COENEN, A. **Image Analysis of Aggregate Structure Parameters as Performance Indicators of Rutting Resistance**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - University of Wisconsin, Madison. Madison, WI, EUA. 2011.

COENEN, A.; KUTAY, M. E; BAHIA, H. U. Aggregate Structure Characterization of Asphalt Mixtures Using 2-Dimensional Image Analysis, **International Journal of Road Materials and Pavement Design**. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.711923>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

CONSUEGRA, A. *et al.* Comparative Evaluation of Laboratory Compaction Devices Based on Their Ability to Produce Mixtures with Engineering Properties Similar to Those Produced in the Field. **Transportation Research Record 1228**, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 80-87., 1989.

COSTA, H. N. **Caracterização de Areias de Britagem de Pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza e Avaliação da sua Aplicação no Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/15541>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

CROUCH, L.; DUNN, T. R. **Identification of Aggregates for Tennessee Bituminous Surface Courses**, Phase IV and Amendment 1. Cookeville, TN, EUA, 2005.

DNER-ME 086 Agregado – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio. **Determinação do Índice de Forma**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1994.

DIÓGENES, D. F. **Avaliação das Propriedades de Forma de Agregados Utilizados em Lastro Ferroviário a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/21468>>. Acesso em: 16 mar. 2015.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação da Influência da Britagem nas Propriedades de Forma de Agregados por Meio do Processamento Digital de Imagens**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2015.

FLETCHER, T. *et al.* Aggregate Imaging System for Characterizing the Shape of Fine and Coarse Aggregates. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1832, p. 67-77, 2003.

FORTES, R. M.; ZUPPOLINI NETO, A.; ASSALI, M. P.; BARBOSA JÚNIOR, A. S. Avaliação de Cinco Anos de Programa Interlaboratorial de Misturas Asfálticas Desenvolvido no Brasil. **35ª Reunião Anual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

GATES, L.; MASAD, E.; PYLE, R.; BUSHEE, D. Aggregate Imaging Measurement System 2 (AIMS2). **Report FHWA-HIF-11-030**. 2011.

GILSON COMPANY INC. **Micro-Deval Apparatus**. 2017. Disponível em: <<https://www.globalgilson.com/micro-deval-apparatus>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JR., J. L. Considerações a Respeito das Propriedades de Consenso do Superpave para Agregados de Misturas Asfálticas. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 20, 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: ANPET, v. 2, p. 1069-1080, 2006.

GOUVEIA, L. T.; RODRIGUES, F. A.; COSTA, L.F. Multiscale Curvature Analysis Asphaltic Aggregate Particles. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 24, p. 506-513, 2010.

GOUVEIA, L. T. *et al.* Entropy-Based Approach to Analyze and Classify Mineral Aggregates. **Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE**, v. 25, p. 75-84, 2011.

GOUVEIA, L. T. *et al.* Supervised Classification of Basaltic Aggregate Particles Based on Texture Properties. **Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE**, v. 27, p. 177-182, 2013.

HAMZAH, M. O.; VON, W. C.; ABDULLAH, N. H. Effects of Compactor Types on Aggregate Orientation of Asphalt Mixtures. **International Journal of Engineering**, v. 26, p. 677-684, 2013.

HUNTER, A. E.; AIREY, G. D.; COLLOP, A. C. Aggregate Orientation and Segregation in Laboratory-Compacted Asphalt Samples. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1891, p. 8-15, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.3141/1891-02>>. Acesso em: 8 set. 2017.

IBIAPINA, D. S. **Avaliação da Relação entre Propriedades de Forma dos Agregados, Parâmetros do Esqueleto Mineral e o Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas**. Minuta de Qualificação (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2016.

IBIAPINA, D. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; RODRIGUES, C. B.; BESSA, I. S. Avaliação da Relação entre Angularidade de Agregados e Parâmetros do Esqueleto Mineral de Misturas Asfálticas. *In*: CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO DEL ASFALTO, 19, 2017, Medellin. **Anais...** Medellin: CILA, poster 317, 2017.

INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Conheça o Inmetro**. 2009. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/inmetro/oque.asp>>. Acesso em: 1 ago. 2017.

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

KETCHAM, R. A.; SHASHIDHAR, N. Quantitative Analysis of 3D Images of Asphalt Concrete. **Transportation Research Board – CD-rom**. 2001.

KEYMANESH, M. R.; ZIARI, H.; KAMRANKHO, A. N. D. Correlation between Aggregate-to-Aggregate Contact and Mechanical Properties of HMA Mixture. **Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal**, v. 3, n. 3, 2016. DOI:10.5121/civej.2016.3303.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Corpos de Prova de Misturas Asfálticas a Quente Resultantes de Diferentes Métodos de Compactação**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-24062016-113652>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

LIMA, C. D. A. **Estudo da Deformação Permanente de Duas Britas Graduadas para uso em Camadas de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

LOPES, M. M. **Programa Interlaboratorial de Agregados e Misturas Asfálticas da REDE ASFALTO N/NE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de transportes) - Departamento de Engenharia de Transportes – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/123456789/1813>>. Acesso em: 21 out. 2015.

LOPES, M. M.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Efeito do Tipo de Compactação nos Parâmetros Volumétricos e no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. *In*: ENCONTRO DE ASFALTO – INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS, 20, 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2010.

MAHMOUD, E. M. **Development of Experimental Methods for the Evaluation of Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Texas A&M University, College Station, Texas, EUA, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1969.1/4959>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

MAHMOUD, E. M.; KUTAY, E.; BAHIA, H. Digital Image Analysis System: Standard Method for Determining Aggregate Structure in Asphalt Mixes by Means of Planar Imaging – **Draft Procedure**. 2010a. Disponível em: <<http://uwmarc.org/rilem-taskgroup2.html>>. Acesso em: 25 set. 2016.

MAHMOUD, E. M.; GATES, L.; MASAD, E. A.; ERDOGAN, S.; GARBOCZI, E. Comprehensive Evaluation of AIMS Texture, Angularity, and Dimension Measurements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 4, p. 369-379, 2010b. Disponível em: <[doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000033#sthash.i9Fd603A.dpuf](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000033#sthash.i9Fd603A.dpuf)>. Acesso em: 14 jul. 2014.

- MAHMOUD, E. M.; ORTIZ, E. Implementation of AIMS in Measuring Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage. **Research Report n° FHWA-ICT-14-014**. Illinois Center for Transportation. 2014. Disponivel em: <<http://tti.tamu.edu/documents/5-1707-03-1.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2015.
- MARCOTTE, E. VSI Crushers Maximize First-pass Yields. **Pit & Quarry**. 2016. Disponivel em: <<http://www.pitandquarry.com/vsi-crushers-maximize-first-pass-yields-lower-operating-costs/>>. Acesso em: 8 nov. 2017.
- MASAD, E. A. *et al.* Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete. **Geotechnical Special Publication, American Society of Civil Engineering**, v. 85, 69-80, 1998.
- MASAD, E. A. *et al.* Effect of Compaction Procedure on the Aggregate Structure in Asphalt Concrete. **Transportation Research Record 1681**, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 1999a. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3141/1681-21>>. Acesso em: 22 fev. 2017.
- MASAD, E. A. *et al.* Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 13, p. 88-95, 1999b. Disponivel em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801)>. Acesso em: 19 fev. 2014.
- MASAD, E. A.; BUTTON, J. W.; PAPAGIANNAKIS, T. Fine Aggregate Angularity: Automated Image Analysis Approach. **Transportation Research Record**, v.1721, p.66-72, 2000.
- MASAD, E. A. *et al.* Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance. *In: Transportation Research Record 1757*. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 148-156, 2001. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.3141/1757-17>>. Acesso em: 21 jul. 2015.
- MASAD, E. A. *et al.* Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance. **Research Report ICAR 203-1**. 2003. Disponivel em: <<http://hdl.handle.net/2152/35367>>. Acesso em: 13 jun. 2016.
- MASAD, E. A. Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. Project P Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. **Report n° FHWA/TX-05/5-1707-01-1**. 2005. Disponivel em: <<http://tti.tamu.edu/documents/5-1707-01-1.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2014.
- MASAD, E. A. *et al.* Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity. **National Cooperative Highway Research Program, NCHRP**. 2005.
- MASAD, E. A.; LUCE, A.; MAHMOUD, E. **Implementation of AIMS in Measuring Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion and Breakage**. Texas Transportation Institute, Texas A&M University. College Station, Texas, EUA, 2006. Disponivel em: <<http://tti.tamu.edu/documents/5-1707-03-1.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

MASAD, E. A. *et al.* Analysis of Aggregate Shape Characteristics and its Relationship to Hot Mix Asphalt Performance. **Road Materials and Pavement Design**, v. 8, p. 317-350, 2007a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2007.9690077>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

MASAD, E. A. *et al.* A Unified Method for the Analysis of Controlled-Strain and Controlled-Stress Fatigue Testing. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 9, p. 233-246, 2007b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/10298430701551219>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

MASAD, E. A.; KASSEM, E.; CHOWDHURY, A. Application of Imaging Technology to Improve the Laboratory and Field Compaction of HMA, **Report No FHWA/TX-09/0-5261-1**, Texas Transportation Institute – Texas A&M University, 2009. Disponível em: <<http://tti.tamu.edu/documents/0-5261-1.pdf>>. Acesso em: 8 ago. 2015.

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da Aderência Pneu-Pavimento e Tendências de Desempenho para a Rodovia BR-290/RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2009. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/30215/000778679>>. Acesso em: 14 out. 2016.

METSO. **Aggregates – Crushers**. 2015. Disponível em: <<http://www.metso.com/products/jaw-crushers/jaw-crusher-nordberg-c>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

MOAVENI, M. *et al.* Use of Advanced Aggregate Imaging Systems to Evaluate Aggregate Resistance to Breakage, Abrasion, and Polishing. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, n. 2401, p. 1-10. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3141/2401-01>>. Acesso em: 10 out. 2013.

MONISMITH, C. L. Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete, **SHRP-A/lr-91-104**, National Research Council, Washington, D. C., 1991. Disponível em: <[onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1354/1354](http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1354/1354)>. Acesso em: 9 jan. 2015.

MOON, K. H. *et al.* Analyzing Aggregate Size Distribution of Asphalt Mixtures Using Simple 2D Digital Image Processing Techniques. **Arab J SciEng**, v. 40, p. 1309-1326, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13369-015-1594-0>>. Acesso em: 24 mar. 2014.

OLIVEIRA, J. A. **Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2013. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11163>>. Acesso em: 13 jan. 2014.

OLIVIERI, J. C. **Programa Interlaboratorial: Proposta de Modelo para Interpretação de Resultados de Análises Químicas**. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Comissão de Pós - Graduação em Qualidade. Campinas, SP, 2004.

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.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. 2012. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11166>>. Acesso em: 12 mai. 2016.

PAZOS, A. G.; SACRAMENTO, F. T.; MOTTA, L. M. G. Efeitos de Propriedades Morfológicas de Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. **44a. Reunião Annual de Pavimentação, RAPv**, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <[www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal\\_39](http://www.sinicesp.com.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_39)>. Acesso em: 15 ago. 2014.

PINE INSTRUMENT. **Aggregate Image Measurement System (AIMS)**. 2013. Disponível em: <<http://www.pineinst.com/test/products/afa2.html>>. Acesso em: 18 set. 2013.

PROWELL, B. D., ZHANG, J., BROWN, E. R. Aggregate Properties and the Performance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt. **Report NCHRP-539, National Cooperative Highway Research Program**. National Research Council. Washington, D. C., EUA, 2005.

R CORE TEAM R: **A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing**, Viena, Austria. 2015. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>. Acesso em: 22 jul. 2017.

RIBAS, C. Y. **Avaliação da Influência do Método de Compactação na Macroestrutura de Misturas Asfálticas Densas Utilizando o Processamento Digital de Imagens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/169905>>. Acesso em: 23 jun. 2017.

ROBERTS, L. F. *et al.* **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture, Design and Construction**, 2ª Edição, EUA, 1996.

RODRIGUES, A. C. **Avaliação da Influência da Granulometria na Aderência Pneu-Pavimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2013. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11176>>. Acesso em: 8 mai. 2015.

RODRIGUES, A. C.; SOARES, J. B.; BARROSO, S. H. A. Avaliação da Influência da Granulometria de Misturas Asfálticas na Aderência Pneu-Pavimento. *In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES*, 28, 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANPET, 2014.

SEFIDMAZGI, N. R. **Defining Effective Aggregate Skeleton in Asphalt Mixture Using Digital Imaging**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - University of Wisconsin. Madison, EUA, 2011. Disponível em: <<http://digital.library.wisc.edu/1793/56400>>. Acesso em: 11 set. 2015.

SEFIDMAZGI, N. R.; TASHMAN, L.; BAHIA, H. Internal Structure Characterization of Asphalt Mixtures for Rutting Performance Using Imaging Analysis. **Road Materials and Pavement Design**, v. 1, n. S1, p. 21-37, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657045>>. Acesso em: 17 fev. 2016.

- SEFIDMAZGI, N. R.; BAHIA, H. Effect of Compaction Conditions on Aggregate Packing Using 2D Image Analysis and Relation to Performance of HMA. **Materials and Structures**, 1313-1324, 2014. DOI 10.1617/s11527-014-0275-x.
- SHASHIDHAR, N.; ZHONG, X.; SHENOY, A. V.; BASTIAN JR., E. J. Investigating the Role of Aggregate Structure in Asphalt Pavement, International Center for Aggregates Research. **8th Annual Symposium: Aggregates – Asphalt Concrete, Bases and Fines**. 2000.
- SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **The Comparison of Dendrograms by Objective Methods**. *Taxon*, 11:33-40, 1962.
- SOUSA, J. B. *et al.* Evaluation of Laboratory Procedures for Compacting Asphalt – Aggregate Mixtures. **Report No. SHRP-A-UWP=91-523**, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D. C., 1991.
- SOUZA, L. T. S.; EVANGELISTA JR., F.; SOARES, J. B. Processamento Digital de Imagens Aplicado a Análise Micromecânica de Misturas Asfálticas. *In: ENCONTRO DE ASFALTO. INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS*, 18, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 2006.
- STROUP-GARDINER, M.; BROWN, E. R. Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements. **NCHRP Report 441**, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D. C., 2000.
- SUKHWANI, R., LITTLE, D. N., MASAD, E. Sensitivity of HMA Performance to Aggregate Shape Measured Using Conventional and Image Analysis Methods. **TTI Report 0-1707-5**. Texas Transportation Institute, College Station, Texas, EUA, 2006.
- TASHMAN, L. *et al.* Internal Structure Analysis of Asphalt Mixes to Improve the Simulation of Superpave Gyratory to Field Conditions. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 70, 605-655, 2001.
- TASHMAN, L. *et al.* X-Ray Tomography to Characterize Air Void Distribution in Superpave Gyratory Compacted Specimens. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 3 (1); p. 19-28, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10298430290029902a>>. Acesso em: 30 jul. 2015.
- TASHMAN, L.; MASAD, E.; LITTLE, D.; HUSSEIN, Z. A Microstructure-Based Viscoplastic Model for Asphalt Concrete. **International Journal of Plasticity**. 2004.
- TASHMAN, L.; WANG, L. B.; THYAGARAJAN, S. Microstructure Characterization for Modeling HMA Behavior Using Imaging Technology. **Journal of Road Materials and Pavement Design**, v.8, n.2, p. 207-238, 2007.
- TAYLOR, M. A. *et al.* Some Properties of Irregular Particles in 3D. **Powder Technology**, 162, 1-15, 2006. 10.1016/j.powtec.2005.10.013.

TEYMOURPOUR, P.; BAHIA, H. U. Effects of Binder Modification on Aggregate Structure and Thermovolumetric Properties of Asphalt Mixtures. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, n. 2445, p. 21-28, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3141/2445-03>>. Acesso em: 25 abr. 2014.

VASCONCELOS, K. L.; EVANGELISTA JR., F.; SOARES, J. B. Análise da Estrutura Interna de Misturas Asfálticas. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 17, 2005, Recife. **Anais...** Recife: ANPET, 2005.

VINSON, T. S.; JANOO, V. C.; HAAS, R. C. G. Summary Report Low Temperature and Thermal Fatigue Cracking. **SHRP-A/IR-90-001**. National Research Council. Washington, D. C., 1999.

YUE, Z. Q.; BEKKING, W.; MORIN, I. Application of Digital Image Processing to Quantitatively Study of Asphalt Concrete Microstructure. **Transportation Research Record 1492**. National Research Council. Washington, D. C., p. 53-60, 1995.

WHITE, T. D.; HADDOCK, J. E.; RISMANJOTO, E. Aggregate Tests for Hot-Mix Asphalt Mixtures Used in Pavements. **NCHRP Report 557. Transportation Research Board**. Washington, D. C., 2006.

WILSON, J. D., KLOTZ, L. D. Quantitative Analysis of Aggregate Based on Hough Transform. **Transportation Research Record**, n. 1530, p. 111-115. Washington, D.C., 1996.

WNEK, M. A. *et al.* Investigation of Aggregate Properties Influencing Railroad Ballast Performance. **Transportation Research Board**. Washington, D. C., 2013.

ZHANG, L. *et al.* Characterization of HMA Internal Structure Using Image Analysis. **The Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals**, p. 1968-1975, 1998.

ZELELEW, H. M.; PAPAGIANNAKIS, A. T. Digital Image Processing Techniques for Capturing and Characterizing the Microstructure of Asphalt Concretes. **Transportation Research Board 88th Annual Meeting**. Washington, D. C., 2009.

ZELELEW, H. M., PAPAGIANNAKIS, A. T. Wavelet-Based Characterization of Aggregate Segregation in Asphalt Concrete X-Ray Computed Tomography Images. **International Journal of Pavement Engineering**. 2011.

## **APÊNDICE A – ESBOÇO DE NORMA BRASILEIRA PARA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS COM O USO DO PDI**

### **Resumo**

Este documento estabelece o método para caracterizar as propriedades de forma de agregados por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI). Define a aparelhagem necessária e condições operacionais para obtenção dos resultados.

### **Abstract**

This document presents the method for determining the aggregate shape properties by means of Digital Image Processing. It defines the necessary equipment and operating conditions to obtain the results.

### **Prefácio**

A forma, a angularidade e a textura superficial de partículas têm mostrado afetar o comportamento de materiais utilizados na pavimentação, como misturas asfálticas, concreto de cimento Portland e camadas granulares. O presente esboço de norma foi preparado para servir de documento base, visando estabelecer os procedimentos para a realização de ensaio para caracterização das propriedades de forma de agregados por meio do Processamento Digital de Imagens. Este documento está formatado de acordo com a Norma DNIT 001/2009-PRO.

### **Objetivo**

Este método prescreve o modo pelo qual se determinam os parâmetros de forma, de angularidade e de textura superficial de agregados, por meio do Processamento Digital de Imagens.

### **Referência normativa**

O documento a seguir foi utilizado na formatação desta Norma: DNIT 001/2009-PRO: Elaboração e apresentação de normas do DNIT – Procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

## Definições

- a) Tamanho da fração: valor da abertura da peneira na qual as partículas ficam retidas após passar pela peneira imediatamente superior;
- b) Partículas miúdas: material passante na peneira de 4,75 mm (#4). Tamanho das frações de partículas miúdas: 2,36 mm (#8); 1,18 mm (#16); 0,60 mm (#30); 0,30 mm (#50); 0,15 mm (#100) e 0,075 mm (#200);
- c) Partículas graúdas: material retido na peneira de 4,75 mm (#4). Tamanho das frações de partículas graúdas: 25 mm (1"); 19 mm (3/4"); 12,5 mm (1/2"); 9,5 mm (3/8") e 4,75 mm (#4);
- d) Angularidade: Aplica-se a partículas miúdas e graúdas. Refere-se aos ângulos das arestas existentes nas imagens 2D das partículas. A Angularidade quantifica as mudanças de direção ao longo do contorno da partícula. Seu valor pode variar de 0 a 10.000, sendo maior para partículas mais angulares;

$$\text{Ang} = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (1)$$

Onde:

Ang é o valor de Angularidade da partícula;

$\theta$  é o ângulo de orientação dos pontos do contorno  $Y$  é o valor do deslocamento, expresso em mm;

$n$  é o número total de pontos;

$i$  é o  $i$ -ésimo ponto do contorno da partícula.

- e) Textura superficial: Aplica-se apenas a partículas graúdas. Descreve elementos de rugosidade presente na superfície do agregado menores que, aproximadamente, 0,5 mm. É calculada pelo método das *Wavelets* e seu valor pode variar de 0 a 1.000, sendo maior para superfícies mais rugosas;

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

Onde:

TS é o valor de Textura Superficial da partícula;

n é o nível de decomposição da imagem;

N é o número de coeficientes em uma imagem detalhada;

D é a função de decomposição;

i é a direção da textura (1, 2 ou 3);

j é o índice wavelet;

x e y definem a localização dos coeficientes no domínio transformado.

- f) Esfericidade: Aplica-se apenas a partículas graúdas. Quantifica o quão próximas entre si são as três dimensões da partícula. Seu valor pode variar de 0 a 1, sendo máximo para uma partícula com três dimensões iguais (como um cubo ou uma esfera, por exemplo);

$$\text{Esf} = \sqrt[3]{\frac{d_s d_l}{d_l^2}} \quad (3)$$

Onde:

Esf é o valor de Esfericidade da partícula;

$d_s$  é a menor dimensão da partícula;

$d_l$  é a dimensão intermediária da partícula;

$d_L$  é a maior dimensão da partícula.

- g) Forma 2D: Aplica-se apenas a partículas miúdas. Descreve a forma de partículas a partir de imagens 2D. A forma 2D pode variar de 0 a 20, sendo maior para partículas mais alongadas e apresentando valor zero para um círculo perfeito;

$$\text{Forma 2D} = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[ \frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (4)$$

- h) Partículas lamelares ou alongadas: Aplica-se apenas a partículas graúdas. São aquelas partículas cuja razão de lamelalidade ou cuja razão de alongamento é menor que um valor especificado (1:2, 1:3, 1:5, por exemplo);

$$\text{RL} = \frac{d_{Me}}{d_l} \quad (5)$$

$$RA = \frac{d_I}{d_{Ma}} \quad (6)$$

Onde:

RL é a Razão de Lamelaridade;

RA é a Razão de Alongamento;

d<sub>I</sub> é a dimensão intermediária da partícula;

d<sub>Me</sub> é a menor dimensão da partícula;

d<sub>Ma</sub> é a maior dimensão da partícula.

- i) Partículas lamelares e alongadas: Aplica-se apenas a partículas graúdas. São aquelas partículas cuja razão de lamelaridade e alongamento é maior que um valor especificado (2, 3, 5, por exemplo);

$$RLA = \frac{d_{Me}}{d_{Ma}} \quad (7)$$

Onde:

RLA é a Razão de Lamelaridade e Alongamento;

d<sub>Ma</sub> é a maior dimensão da partícula;

d<sub>Me</sub> é a menor dimensão da partícula.

### **Aparelhagem**

- a) Sistema Digital de Aquisição e Análise de Imagens: Equipamento controlado por computador para capturar imagens digitais com ampliação variável e *software* para análise de imagens, que deve incluir código para calcular Angularidade, Forma 2D, Esfericidade, Razões de lamelaridade e alongamento e Textura Superficial;
- b) Câmera e sistema óptico com capacidade de resolução suficiente para todos os tamanhos de partículas analisadas;
- c) Sistema para posicionar as partículas para a captura de imagens, o qual funciona por meio de uma câmera móvel, uma bandeja de suporte móvel ou uma combinação dos dois;
- d) Sistema para autofocar a imagem;
- e) Sistema para determinação de medidas tridimensionais x, y, z de partículas, em milímetros;

- f) Sistema para detectar e remover da análise, partículas que apresentam contato entre si;
- g) Sistema de suporte para as partículas, como bandeja(s) ou outro elemento de superfície plana, apropriado ou adaptável para cada fração (0,075 mm a 25,0 mm), podendo apresentar uma leve reentrância para facilitar o posicionamento das partículas;
- h) Sistema de iluminação variável para retroiluminação e/ou iluminação superior do material.
- i) Balança com capacidade de pelo menos 20 kg, sensível a 1 g;
- j) Estufa capaz de manter a faixa térmica de trabalho entre 105° C e 110° C;
- k) Repartidor de amostras;
- l) Peneiras de malhas quadradas com caixilhos metálicos e aberturas nominais, em milímetros, de: 32,0; 25,0; 19,0; 12,5; 9,5; 4,75; 2,36; 1,18; 0,60; 0,30; 0,15 e 0,075.

### **Amostra**

- a) Redução de amostra e fracionamento: O agregado coletado é quarteado utilizando repartidor de amostra ou manualmente e, em seguida, fracionado por meio da série de peneiras indicada no item 4.5, até que a quantidade de partículas em cada fração seja suficiente para a análise, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade mínima de partículas por fração

Tamanho	Massa aproximada (recomendação)	Quantidade mínima de partículas
25,0 mm (1")	5 kg	50
19,0 mm (3/4")	2 kg	50
12,5 mm (1/2")	2 kg	50
9,5 mm (3/8")	2 kg	50
4,75 mm (# 4)	2 kg	50
2,36 mm (# 8)	200 g	150
1,18 mm (# 16)	200 g	150
0,6 mm (# 30)	200 g	150
0,3 mm (# 50)	200 g	150
0,15 mm (# 100)	200 g	150
0,075 mm (# 200)	200 g	150

- b) Lavagem e secagem: Lavar cada fração obtida da amostra, utilizando como suporte as peneiras correspondentes, até que se perceba, visualmente, que a água sai limpa após atravessar as partículas. Realizar a secagem de todas as frações em estufa, com temperatura entre 105° C e 110° C, até que se observe constância de massa. As diferentes frações devem ser mantidas separadas em recipiente limpo e fechado.

### **Ensaio**

- a) Caso necessário, calibrar o sistema AIMS2 seguindo as especificações apresentadas no seu manual;
- b) Cada fração da amostra deve ser analisada separadamente. De cada fração da amostra preparada, selecionar as partículas que serão analisadas aleatoriamente, e distribuí-las no suporte, deixando que sua orientação seja definida também de forma aleatória. Entre partículas graúdas, o espaçamento deve ser de pelo menos 1,0 mm entre elas. Para frações miúdas, realizar o espalhamento de forma a minimizar o contato entre partículas. Seguir a quantidade mínima de partículas estabelecida na Tabela 1;
- c) Fornecer ao sistema o tamanho das partículas da fração a ser analisada e iniciar o processo de aquisição e análise das imagens, geralmente automatizado. Se a quantidade necessária de partículas não for alcançada na primeira sequência de capturas, substituir todas as partículas do suporte por outras, da mesma amostra, e repetir o processo, até que se complete a quantidade determinada.

NOTA: A maior parte das frações miúdas é analisada utilizando retroiluminação, mas para alguns materiais translúcidos pode ser necessário utilizar um fundo escuro e iluminação superior para alcançar o contraste adequado das imagens. Recomenda-se, em geral, utilizar fundo escuro para partículas de 0,30 mm (# 50) e menores.

### **Resultados**

- a) Cálculo do valor de Angularidade para cada partícula graúda e miúda;
- b) Cálculo da Angularidade média e seu desvio padrão para cada fração (utilizar pelo menos uma casa decimal);
- c) Cálculo do valor de Textura Superficial para cada partícula graúda;
- d) Cálculo da Textura Superficial média e seu desvio padrão para cada fração graúda (utilizar pelo menos uma casa decimal);
- e) Cálculo do valor de Esfericidade para cada partícula graúda;

- f) Cálculo da Esfericidade média e seu desvio padrão para cada fração graúda (utilizar pelo menos duas casas decimais);
- g) Cálculo do valor da Forma 2D para cada partícula miúda;
- h) Cálculo da Forma 2D média e seu desvio padrão para cada fração miúda (utilizar pelo menos uma casa decimal);
- i) Cálculo do percentual de partículas lamelares e alongadas, de acordo com os limites para a Razão de Lamelaridade e Alongamento (utilizar pelo menos uma casa decimal):
- % de partículas cuja  $RLA \leq 1:1$
  - % de partículas cuja  $RLA \leq 1:2$
  - % de partículas cuja  $RLA \leq 1:3$
  - % de partículas cuja  $RLA \leq 1:4$
  - % de partículas cuja  $RLA \leq 1:5$
- j) Cálculo do percentual de partículas lamelares ou alongadas, de acordo com os seguintes limites para a Razão de Lamelaridade e para a Razão de Alongamento (utilizar pelo menos uma casa decimal):
- % de partículas cuja  $RL$  ou  $RA \leq 1:1$ ;
  - % de partículas cuja  $RL$  ou  $RA \leq 1:2$ ;
  - % de partículas cuja  $RL$  ou  $RA \leq 1:3$ ;
  - % de partículas cuja  $RL$  ou  $RA \leq 1:4$ ;
  - % de partículas cuja  $RL$  ou  $RA \leq 1:5$ .

O Anexo A apresenta um exemplo de formato de relatório normativo e contém as seguintes informações:

- Identificação do material: tipo, origem, tamanho das frações analisadas, outras informações disponíveis sobre o material;
- Data da análise;
- Procedimento utilizado;
- Nome do operador;
- Número de partículas analisadas;
- Média e desvio padrão das propriedades por fração;
- Gráficos com a distribuição das propriedades por fração.

## ANEXO A – MODELO DE RELATÓRIO NORMATIVO

Data:	20/04/2017
Projeto:	Britador_impacto
Operador:	Operador A
Pasta de trabalho:	Britador_impacto_Stockpile.xlsm
Descrição:	Agregado de origem fonolítica (Eusébio, Ceará)

Analizado	Tamanho
	25,0 mm (1")
x	19,0 mm (3/4")
x	12,5 mm (1/2")
x	9,5 mm (3/8")
x	4,75 mm (# 4)
x	2,36 mm (# 8)
x	1,18 mm (# 16)
x	0,6 mm (# 30)
x	0,3 mm (# 50)
x	0,15 mm (# 100)
x	0,075 mm (# 200)

Esfericidade			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
19,0 mm (3/4")	75	0,72	0,08
12,5 mm (1/2")	74	0,68	0,08
9,5 mm (3/8")	75	0,69	0,08
4,75 mm (# 4)	71	0,67	0,08

Angularidade			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
19,0 mm (3/4")	75	3.051,0	553,2
12,5 mm (1/2")	75	2.990,0	597,8
9,5 mm (3/8")	75	3.347,8	629,1
4,75 mm (# 4)	75	3.316,8	776,6
2,36 mm (# 8)	200	3.442,9	797,9
1,18 mm (# 16)	200	3.464,2	749,3
0,6 mm (# 30)	201	3.542,9	787,4
0,3 mm (# 50)	202	3.165,5	901,2
0,15 mm (# 100)	200	2.740,7	817,0
0,075 mm (# 200)	201	2.321,6	1.022,6

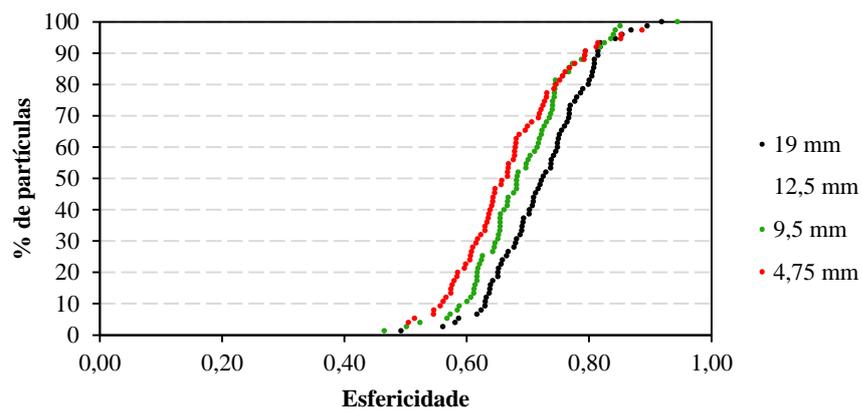
Textura superficial			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
19,0 mm (3/4")	75	433,7	122,6
12,5 mm (1/2")	75	382,2	102,6
9,5 mm (3/8")	75	362,5	106,6
4,75 mm (# 4)	73	282,5	87,5

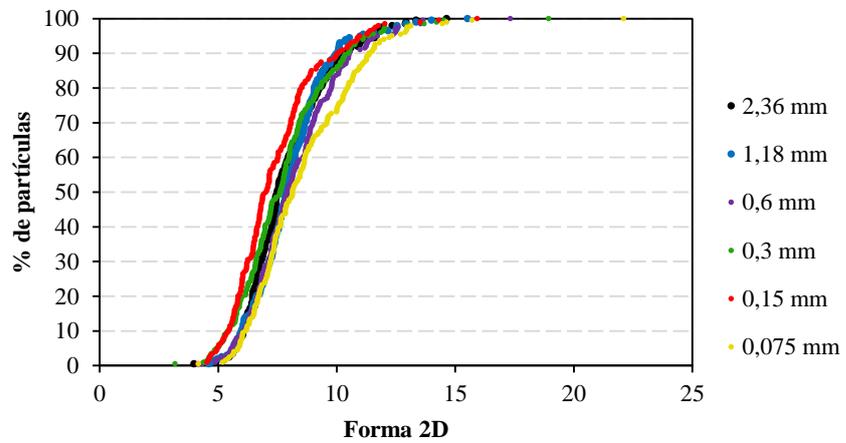
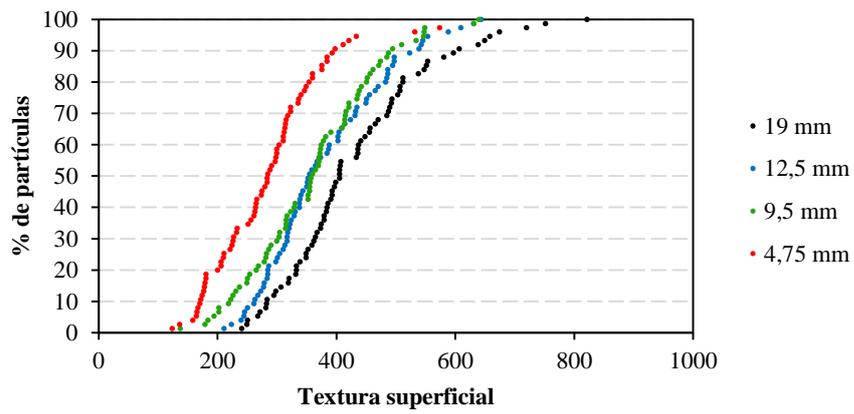
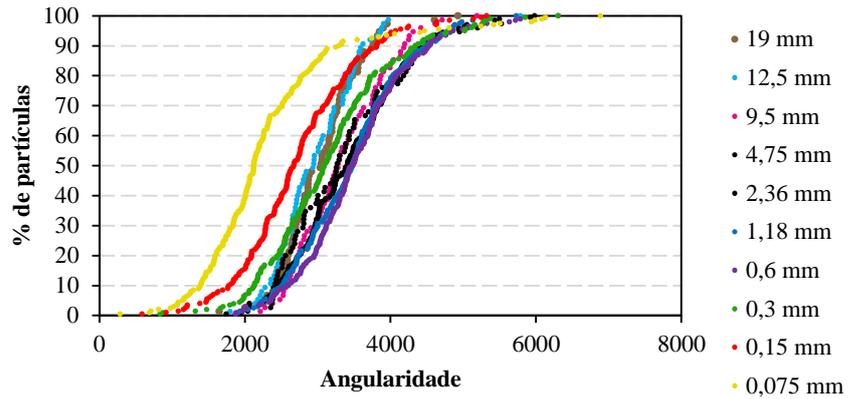
<b>Forma 2D</b>			
Tamanho	Número de partículas	Média	Desvio Padrão
2,36 mm (# 8)	200	7,9	1,8
1,18 mm (# 16)	199	8,0	1,7
0,6 mm (# 30)	201	8,3	2,0
0,3 mm (# 50)	202	7,8	2,1
0,15 mm (# 100)	200	7,4	1,9
0,075 mm (# 200)	200	8,4	2,1

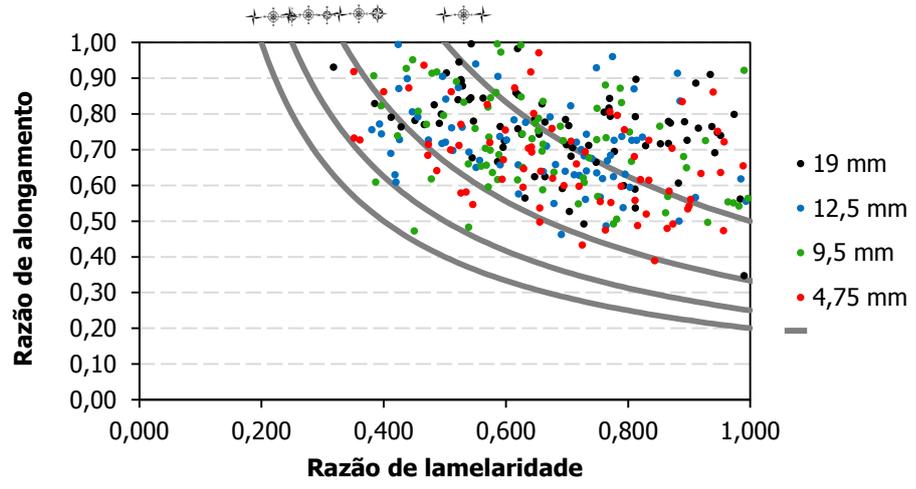
<b>% Partículas lamelares e alongadas</b>						
Tamanho	Número de	RLA $\leq$ 1:1	RLA $\leq$ 1:2	RLA $\leq$ 1:3	RLA $\leq$ 1:4	RLA $\leq$ 1:5
19,0 mm (3/4")	75	100,0%	53,3%	5,3%	0,0%	0,0%
12,5 mm (1/2")	74	100,0%	67,6%	10,8%	0,0%	0,0%
9,5 mm (3/8")	75	100,0%	64,0%	8,0%	2,7%	0,0%
4,75 mm (# 4)	71	100,0%	66,2%	15,5%	0,0%	0,0%

<b>% Partículas lamelares e alongadas</b>						
Tamanho	Número de	RLA $\leq$ 1:1	RLA $\leq$ 1:2	RLA $\leq$ 1:3	RLA $\leq$ 1:4	RLA $\leq$ 1:5
19,0 mm (3/4")	75	100,0%	53,3%	5,3%	0,0%	0,0%
12,5 mm (1/2")	74	100,0%	67,6%	10,8%	0,0%	0,0%
9,5 mm (3/8")	75	100,0%	64,0%	8,0%	2,7%	0,0%
4,75 mm (# 4)	71	100,0%	66,2%	15,5%	0,0%	0,0%

<b>% Partículas lamelares ou alongadas</b>						
Tamanho	Número de	RL ou RA $>$ 1	RL ou RA $>$	RL ou RA $>$	RL ou RA $>$ 4	RL ou RA $>$
19,0 mm (3/4")	75	100,0%	14,7%	1,3%	0,0%	0,0%
12,5 mm (1/2")	74	100,0%	23,0%	0,0%	0,0%	0,0%
9,5 mm (3/8")	75	100,0%	21,3%	0,0%	0,0%	0,0%
4,75 mm (# 4)	71	100,0%	23,9%	0,0%	0,0%	0,0%







**APÊNDICE B – CÓDIGO R DO MÉTODO DE *CLUSTER* UTILIZADO NA  
ELABORAÇÃO DO SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO PROPOSTO NESTA  
PESQUISA PARA A ANGULARIDADE**

```

rm(list=ls(all=TRUE))
require(laercio) ### pacote para comparar as médias via teste Tukey
dados_ang=read.csv("Clusters - Banco de dados selecionados - angularidade NOVO.csv",
header=TRUE, sep=";", dec=".")
head(dados_ang)
attach(dados_ang)
mean(Tamanho)
mean(Angularidade)
summary(Angularidade)
boxplot(Angularidade~Tamanho, ylab="Angularidade", xlab="Tamanho")
tapply(Angularidade,Tamanho, mean)
tapply(Angularidade,Tamanho, sd)
100*tapply(Angularidade,Tamanho, sd)/tapply(Angularidade,Tamanho, mean)

# WARD
saida.ward=hclust(dist(dados_ang[,3])^2, method = "ward.D")
cor(dist(dados_ang[,3])^2, cophenetic(saida.ward))

# AVERAGE
saida.ave=hclust(dist(dados_ang[,3])^2, method = "ave")
cor(dist(dados_ang[,3])^2, cophenetic(saida.ave))
grupo.ave=factor(cutree(saida.ave, k=4)) ### identifica o cluster de cada elemento
kruskal.test(Angularidade~grupo.ave, data=dados_ang)
y1=subset(cbind(dados_ang$Angularidade,grupo.ave), grupo.ave==1)
y2=subset(cbind(dados_ang$Angularidade,grupo.ave), grupo.ave==2)
y3=subset(cbind(dados_ang$Angularidade,grupo.ave), grupo.ave==3)
y4=subset(cbind(dados_ang$Angularidade,grupo.ave), grupo.ave==4)
wilcox.test(y1,y2)
wilcox.test(y1,y3)

```

```
wilcox.test(y1,y4)
wilcox.test(y2,y3)
wilcox.test(y2,y4)
wilcox.test(y3,y4)
tapply(dados_ang$Angularidade,grupo.ave, mean)
tapply(dados_ang$Angularidade,grupo.ave, sd)
100*tapply(dados_ang$Angularidade,grupo.ave,
sd)/tapply(dados_ang$Angularidade,grupo.ave, mean)
tapply(Angularidade,grupo.ave, min)
tapply(Angularidade,grupo.ave, max)
table(grupo.ave)

# CENTROID
saida.cen=hclust(dist(dados_ang[,3])^2, method = "cen")
cor(dist(dados_ang[,3])^2, cophenetic(saida.cen))

# MEDIAN
saida.med=hclust(dist(dados_ang[,3])^2, method = "med")
cor(dist(dados_ang[,3])^2, cophenetic(saida.med))
```

## APÊNDICE C – PROTOCOLO DE UTILIZAÇÃO DO AIMS2

### Testes – Reprodutibilidade / Repetibilidade – PDI

2 laboratórios;

1 equipamento por laboratório;

4 operadores por laboratório (ou a quantidade que for possível);

2 materiais (2 frações de cada: 1,18 mm e 12,5 mm);

50 partículas analisadas de cada fração graúda (12,5 mm);

150 partículas analisadas de cada fração miúda (1,18 mm);

3 análises por fração.

- Selecionar operadores, de preferência, que já tenham prática com o uso do equipamento. Quatro operadores (se não houver disponibilidade, a quantidade que for possível). Cada operador deve seguir as instruções descritas abaixo:

### Material 1 – Fração 12,5 mm

- Revolver o saco para misturar as partículas (eliminar possível segregação de partículas planas);
- Distribuir partículas (no mínimo 50 partículas) na bandeja adequada para 12,5 mm, garantindo que elas fiquem estáveis (não se movam com o giro da bandeja) e que não apresentem contato entre si;
- Selecionar pasta adequada na interface do computador (criar uma pasta para cada análise de cada fração de cada material);
- Escolher fração e número de partículas (12,5 mm e 50, respectivamente);
- Iniciar a análise. Caso o equipamento não capture a quantidade de partículas necessárias (no mínimo 50 partículas), seguir as instruções do sistema (retirar todas as partículas, colocar outras partículas e continuar a análise);
- Após o término da análise, retirar todas as partículas da bandeja, retorná-las ao saco, misturá-las novamente;
- Repetir todo o processo para a realização da 2ª análise;
- Repetir todo o processo para a realização da 3ª análise.

**Material 2 – Fração 12,5 mm**

- Repetir o mesmo procedimento realizado para o material 1.

**Material 1 – Fração 1,18 mm**

- Revolver o saco para misturar as partículas (eliminar possível segregação de partículas planas);
- Distribuir partículas (no mínimo 150 partículas) na bandeja adequada para agregados miúdos (bandeja de 19 mm). Tentar minimizar o contato entre partículas;
- Selecionar pasta adequada na interface do computador (criar uma pasta para cada análise de cada fração de cada material);
- Escolher fração e número de partículas (1,18 mm e 150, respectivamente);
- Iniciar a análise. Caso o equipamento não capture a quantidade de partículas necessárias (no mínimo 150 partículas), seguir as instruções do sistema (retirar todas as partículas, colocar outras partículas e continuar a análise);
- Após o término da análise, retirar todas as partículas da bandeja, retorná-las ao saco, misturá-las novamente;
- Repetir todo o processo para a realização da 2ª análise;
- Repetir todo o processo para a realização da 3ª análise.

**Material 2 – Fração 1,18 mm**

- Mesmo procedimento realizado para o material 1.

**APÊNDICE D – MEDIDAS DESCRITIVAS PARA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE (CONTINUA)**

Propriedade	Fração	Material	Laboratório	Operador	Análise	Média análise	DP análise	CV análise (%)	n análise	Média op	DP op	CV op (%)	Média lab	DP lab	CV lab (%)
Angularidade	1.18	1	1	1	1	3826	956	25.0	153						
Ang	1.18	1	1	1	2	3466	805	23.2	150						
Ang	1.18	1	1	1	3	3467	774	22.3	150	3588	865	24.10			
Ang	1.18	1	1	2	1	4065	969	23.8	150						
Ang	1.18	1	1	2	2	4154	937	22.6	150						
Ang	1.18	1	1	2	3	4255	1043	24.5	151	4158	985	23.69			
Ang	1.18	1	1	3	1	3372	781	23.2	151						
Ang	1.18	1	1	3	2	3399	708	20.8	152						
Ang	1.18	1	1	3	3	3397	752	22.1	150	3390	746	22.01			
Ang	1.18	1	1	4	1	3469	729	21.0	151						
Ang	1.18	1	1	4	2	3453	808	23.4	153						
Ang	1.18	1	1	4	3	3470	747	21.5	151	3464	761	21.96	3649	896	25
Ang	1.18	1	2	1	1	3343	767	22.9	151						
Ang	1.18	1	2	1	2	3439	685	19.9	154						
Ang	1.18	1	2	1	3	3349	759	22.7	150	3377	737	21.82			
Ang	1.18	1	2	2	1	3470	827	23.8	151						
Ang	1.18	1	2	2	2	3451	818	23.7	150						
Ang	1.18	1	2	2	3	3468	800	23.1	152	3463	813	23.48			
Ang	1.18	1	2	3	1	3391	795	23.4	151						
Ang	1.18	1	2	3	2	3399	791	23.3	151						
Ang	1.18	1	2	3	3	3426	880	25.7	150	3405	821	24.11	3415	791	23
Ang	1.18	2	1	1	1	3434	741	21.6	151						
Ang	1.18	2	1	1	2	3577	934	26.1	151						
Ang	1.18	2	1	1	3	3476	881	25.3	150	3496	856	24.49			
Ang	1.18	2	1	2	1	3806	888	23.3	151						
Ang	1.18	2	1	2	2	3912	1007	25.7	150						
Ang	1.18	2	1	2	3	3876	866	22.3	151	3865	921	23.83			
Ang	1.18	2	1	3	1	3582	808	22.6	151						
Ang	1.18	2	1	3	2	3522	920	26.1	150						
Ang	1.18	2	1	3	3	3537	915	25.9	152	3547	881	24.84			
Ang	1.18	2	1	4	1	3584	813	22.7	150						
Ang	1.18	2	1	4	2	3669	930	25.3	151						
Ang	1.18	2	1	4	3	3521	777	22.1	150	3592	843	23.48	3625	887	24
Ang	1.18	2	2	1	1	3571	896	25.1	153						
Ang	1.18	2	2	1	2	3625	798	22.0	152						

**APÊNDICE D – MEDIDAS DESCRITIVAS PARA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE  
(CONTINUAÇÃO)**

Propriedade	Fração	Material	Laboratório	Operador	Análise	Média análise	DP análise	CV análise (%)	n análise	Média op	DP op	CV op (%)	Média lab	DP lab	CV lab (%)
Ang	1.18	2	2	1	3	3512	731	20.8	153	3569	811	22.72			
Ang	1.18	2	2	2	1	3501	801	22.9	150						
Ang	1.18	2	2	2	2	3576	876	24.5	150						
Ang	1.18	2	2	2	3	3473	943	27.1	150	3517	874	24.86			
Ang	1.18	2	2	3	1	3713	914	24.6	150						
Ang	1.18	2	2	3	2	3645	869	23.9	151						
Ang	1.18	2	2	3	3	3656	836	22.9	150	3671	872	23.76	3586	855	24
Ang	12.5	1	1	1	1	3169	774	24.4	50						
Ang	12.5	1	1	1	2	3064	768	25.1	50						
Ang	12.5	1	1	1	3	3125	517	16.5	50	3119	693	22.23			
Ang	12.5	1	1	2	1	3217	644	20.0	50						
Ang	12.5	1	1	2	2	3124	549	17.6	50						
Ang	12.5	1	1	2	3	3053	558	18.3	50	3132	585	18.68			
Ang	12.5	1	1	3	1	3001	625	20.8	50						
Ang	12.5	1	1	3	2	2994	554	18.5	50						
Ang	12.5	1	1	3	3	2972	758	25.5	50	2989	647	21.64			
Ang	12.5	1	1	4	1	3071	590	19.2	50						
Ang	12.5	1	1	4	2	3087	695	22.5	50						
Ang	12.5	1	1	4	3	2880	625	21.7	50	3013	641	21.27	3063	644	21
Ang	12.5	1	2	1	1	2878	622	21.6	50						
Ang	12.5	1	2	1	2	2959	543	18.3	50						
Ang	12.5	1	2	1	3	3162	649	20.5	50	3000	614	20.47			
Ang	12.5	1	2	2	1	3050	647	21.2	50						
Ang	12.5	1	2	2	2	3143	692	22.0	50						
Ang	12.5	1	2	2	3	3136	756	24.1	50	3110	696	22.39			
Ang	12.5	1	2	3	1	3179	634	20.0	50						
Ang	12.5	1	2	3	2	3038	574	18.9	50						
Ang	12.5	1	2	3	3	3029	637	21.0	50	3082	616	19.98	3064	643	21
Ang	12.5	2	1	1	1	3444	915	26.6	50						
Ang	12.5	2	1	1	2	3482	732	21.0	50						
Ang	12.5	2	1	1	3	3370	797	23.7	50	3432	814	23.72			
Ang	12.5	2	1	2	1	3501	800	22.9	50						
Ang	12.5	2	1	2	2	3479	805	23.1	50						
Ang	12.5	2	1	2	3	3366	666	19.8	50	3449	757	21.95			
Ang	12.5	2	1	3	1	3318	718	21.6	50						
Ang	12.5	2	1	3	2	3411	714	20.9	50						
Ang	12.5	2	1	3	3	3472	699	20.1	50	3400	708	20.83			

**APÊNDICE D – MEDIDAS DESCRITIVAS PARA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE  
(CONTINUAÇÃO)**

Propriedade	Fração	Material	Laboratório	Operador	Análise	Média análise	DP análise	CV análise (%)	n análise	Média op	DP op	CV op (%)	Média lab	DP lab	CV lab (%)
Ang	12.5	2	1	4	1	3535	842	23.8	50						
Ang	12.5	2	1	4	2	3331	658	19.7	50						
Ang	12.5	2	1	4	3	3252	606	18.6	50	3373	714	21.17	3413	748	22
Ang	12.5	2	2	1	1	3456	699	20.2	50						
Ang	12.5	2	2	1	2	3435	754	22.0	50						
Ang	12.5	2	2	1	3	3379	772	22.8	50	3423	738	21.55			
Ang	12.5	2	2	2	1	3566	836	23.4	50						
Ang	12.5	2	2	2	2	3421	734	21.4	50						
Ang	12.5	2	2	2	3	3393	872	25.7	50	3460	814	23.53			
Ang	12.5	2	2	3	1	3681	963	26.2	50						
Ang	12.5	2	2	3	2	3362	658	19.6	50						
Ang	12.5	2	2	3	3	3333	747	22.4	50	3459	810	23.41	3447	786	23
Esf	12.5	1	1	1	1	0.67	0.09	13.4	49						
Esf	12.5	1	1	1	2	0.67	0.10	14.6	50						
Esf	12.5	1	1	1	3	0.67	0.09	13.7	50	0.67	0.092	13.83			
Esf	12.5	1	1	2	1	0.68	0.08	12.5	50						
Esf	12.5	1	1	2	2	0.66	0.08	11.5	50						
Esf	12.5	1	1	2	3	0.70	0.09	12.8	49	0.68	0.084	12.46			
Esf	12.5	1	1	3	1	0.68	0.07	10.9	50						
Esf	12.5	1	1	3	2	0.67	0.09	13.4	50						
Esf	12.5	1	1	3	3	0.68	0.07	11.0	50	0.68	0.079	11.74			
Esf	12.5	1	1	4	1	0.68	0.07	10.0	50						
Esf	12.5	1	1	4	2	0.68	0.08	11.8	49						
Esf	12.5	1	1	4	3	0.69	0.08	11.7	50	0.68	0.077	11.20	0.68	0.083	12
Esf	12.5	1	2	1	1	0.68	0.08	11.9	50						
Esf	12.5	1	2	1	2	0.68	0.08	12.2	50						
Esf	12.5	1	2	1	3	0.68	0.08	11.8	49	0.68	0.081	11.90			
Esf	12.5	1	2	2	1	0.69	0.08	11.3	50						
Esf	12.5	1	2	2	2	0.65	0.08	12.7	50						
Esf	12.5	1	2	2	3	0.67	0.08	11.7	50	0.67	0.081	12.03			
Esf	12.5	1	2	3	1	0.66	0.09	13.7	50						
Esf	12.5	1	2	3	2	0.67	0.07	11.2	50						
Esf	12.5	1	2	3	3	0.68	0.08	12.3	50	0.67	0.083	12.44	0.67	0.082	12
Esf	12.5	2	1	1	1	0.61	0.09	15.4	50						
Esf	12.5	2	1	1	2	0.59	0.08	13.3	50						
Esf	12.5	2	1	1	3	0.60	0.10	17.0	50	0.60	0.092	15.32			
Esf	12.5	2	1	2	1	0.59	0.10	16.3	50						

**APÊNDICE D – MEDIDAS DESCRITIVAS PARA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE  
(CONTINUAÇÃO)**

Propriedade	Fração	Material	Laboratório	Operador	Análise	Média análise	DP análise	CV análise (%)	n análise	Média op	DP op	CV op (%)	Média lab	DP lab	CV lab (%)
Esf	12.5	2	1	2	2	0.61	0.09	14.6	50						
Esf	12.5	2	1	2	3	0.64	0.10	15.6	50	0.61	0.096	15.65			
Esf	12.5	2	1	3	1	0.62	0.10	15.7	49						
Esf	12.5	2	1	3	2	0.63	0.10	15.2	50						
Esf	12.5	2	1	3	3	0.60	0.07	12.1	50	0.62	0.090	14.55			
Esf	12.5	2	1	4	1	0.60	0.11	18.3	50						
Esf	12.5	2	1	4	2	0.60	0.09	15.1	50						
Esf	12.5	2	1	4	3	0.61	0.10	16.7	50	0.60	0.101	16.68	0.61	0.095	16
Esf	12.5	2	2	1	1	0.60	0.08	13.8	50						
Esf	12.5	2	2	1	2	0.61	0.09	14.7	50						
Esf	12.5	2	2	1	3	0.64	0.10	16.5	50	0.61	0.093	15.21			
Esf	12.5	2	2	2	1	0.59	0.08	13.6	50						
Esf	12.5	2	2	2	2	0.63	0.12	19.0	50						
Esf	12.5	2	2	2	3	0.62	0.10	15.6	50	0.61	0.100	16.34			
Esf	12.5	2	2	3	1	0.59	0.10	16.5	50						
Esf	12.5	2	2	3	2	0.61	0.11	17.4	50						
Esf	12.5	2	2	3	3	0.61	0.10	16.1	50	0.60	0.100	16.63	0.61	0.098	16
F2D	1.18	1	1	1	1	8.29	1.73	20.9	153						
F2D	1.18	1	1	1	2	8.15	1.81	22.2	150						
F2D	1.18	1	1	1	3	8.10	1.93	23.8	149	8.18	1.82	22.30			
F2D	1.18	1	1	2	1	9.06	2.23	24.6	150						
F2D	1.18	1	1	2	2	8.65	1.80	20.8	150						
F2D	1.18	1	1	2	3	8.95	2.04	22.8	151	8.89	2.03	22.87			
F2D	1.18	1	1	3	1	7.53	1.63	21.7	151						
F2D	1.18	1	1	3	2	8.05	1.74	21.6	152						
F2D	1.18	1	1	3	3	8.00	1.86	23.2	150	7.86	1.76	22.35			
F2D	1.18	1	1	4	1	8.03	1.66	20.6	149						
F2D	1.18	1	1	4	2	8.20	1.61	19.7	152						
F2D	1.18	1	1	4	3	7.88	1.51	19.1	151	8.04	1.60	19.85	8	1.85	22
F2D	1.18	1	2	1	1	8.16	2.07	25.4	151						
F2D	1.18	1	2	1	2	8.05	1.78	22.2	154						
F2D	1.18	1	2	1	3	7.92	1.78	22.5	150	8.04	1.88	23.39			
F2D	1.18	1	2	2	1	8.08	2.16	26.7	151						
F2D	1.18	1	2	2	2	8.08	1.86	23.1	150						
F2D	1.18	1	2	2	3	8.28	2.01	24.3	152	8.15	2.01	24.72			
F2D	1.18	1	2	3	1	8.37	1.81	21.6	151						
F2D	1.18	1	2	3	2	8.21	2.00	24.3	151						

**APÊNDICE D – MEDIDAS DESCRITIVAS PARA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE  
(CONTINUAÇÃO)**

Propriedade	Fração	Material	Laboratório	Operador	Análise	Média análise	DP análise	CV análise (%)	n análise	Média op	DP op	CV op (%)	Média lab	DP lab	CV lab (%)
F2D	1.18	1	2	3	3	8.14	2.03	24.9	150	8.24	1.94	23.59	8	1.95	24
F2D	1.18	2	1	1	1	7.92	1.57	19.8	151						
F2D	1.18	2	1	1	2	8.48	2.18	25.7	151						
F2D	1.18	2	1	1	3	8.35	2.21	26.4	150	8.25	2.02	24.45			
F2D	1.18	2	1	2	1	9.05	2.34	25.9	149						
F2D	1.18	2	1	2	2	8.68	2.29	26.3	149						
F2D	1.18	2	1	2	3	8.50	2.30	27.1	151	8.74	2.32	26.49			
F2D	1.18	2	1	3	1	8.16	1.80	22.1	151						
F2D	1.18	2	1	3	2	8.30	2.24	26.9	150						
F2D	1.18	2	1	3	3	8.74	2.38	27.2	152	8.40	2.16	25.75			
F2D	1.18	2	1	4	1	8.26	1.86	22.5	149						
F2D	1.18	2	1	4	2	9.12	2.34	25.6	151						
F2D	1.18	2	1	4	3	8.92	2.24	25.1	150	8.77	2.19	24.92	9	2.18	26
F2D	1.18	2	2	1	1	8.25	1.95	23.6	153						
F2D	1.18	2	2	1	2	8.69	2.34	26.9	152						
F2D	1.18	2	2	1	3	8.86	2.39	27.0	153	8.60	2.24	26.11			
F2D	1.18	2	2	2	1	8.72	2.75	31.5	150						
F2D	1.18	2	2	2	2	8.63	2.06	23.9	149						
F2D	1.18	2	2	2	3	8.57	2.23	26.0	150	8.64	2.36	27.32			
F2D	1.18	2	2	3	1	8.71	2.17	25.0	150						
F2D	1.18	2	2	3	2	8.83	2.33	26.3	151						
F2D	1.18	2	2	3	3	8.86	2.31	26.1	149	8.80	2.27	25.76	9	2.29	26
Tex	12.5	1	1	1	1	380	113	29.7	50						
Tex	12.5	1	1	1	2	391	101	25.8	50						
Tex	12.5	1	1	1	3	384	97	25.3	50	385	103	26.83			
Tex	12.5	1	1	2	1	374	91	24.5	50						
Tex	12.5	1	1	2	2	390	116	29.7	50						
Tex	12.5	1	1	2	3	378	111	29.3	50	381	106	27.90			
Tex	12.5	1	1	3	1	392	101	25.9	50						
Tex	12.5	1	1	3	2	376	105	27.9	50						
Tex	12.5	1	1	3	3	379	94	24.9	50	382	100	26.13			
Tex	12.5	1	1	4	1	357	89	25.0	50						
Tex	12.5	1	1	4	2	380	81	21.4	50						
Tex	12.5	1	1	4	3	376	101	26.8	50	371	91	24.48	380	100	26
Tex	12.5	1	2	1	1	360	97	26.9	50						
Tex	12.5	1	2	1	2	351	88	25.1	50						
Tex	12.5	1	2	1	3	340	91	26.8	50	350	92	26.19			

**APÊNDICE D – MEDIDAS DESCRITIVAS PARA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE E DE REPRODUTIBILIDADE  
(CONCLUSÃO)**

Propriedade	Fração	Material	Laboratório	Operador	Análise	Média análise	DP análise	CV análise (%)	n análise	Média op	DP op	CV op (%)	Média lab	DP lab	CV lab (%)
Tex	12.5	1	2	2	1	373	102	27.3	50						
Tex	12.5	1	2	2	2	340	84	24.8	50						
Tex	12.5	1	2	2	3	359	92	25.6	50	357	93	26.14			
Tex	12.5	1	2	3	1	381	110	28.8	50						
Tex	12.5	1	2	3	2	367	100	27.3	50						
Tex	12.5	1	2	3	3	346	97	28.2	50	365	103	28.23	357	96	27
Tex	12.5	2	1	1	1	324	96	29.8	50						
Tex	12.5	2	1	1	2	325	86	26.4	50						
Tex	12.5	2	1	1	3	352	88	25.0	50	334	90	27.12			
Tex	12.5	2	1	2	1	341	82	24.0	50						
Tex	12.5	2	1	2	2	335	90	26.9	50						
Tex	12.5	2	1	2	3	317	94	29.6	50	331	89	26.79			
Tex	12.5	2	1	3	1	335	101	30.1	50						
Tex	12.5	2	1	3	2	356	103	28.9	50						
Tex	12.5	2	1	3	3	319	84	26.2	50	337	97	28.73			
Tex	12.5	2	1	4	1	370	115	31.0	50						
Tex	12.5	2	1	4	2	355	98	27.7	50						
Tex	12.5	2	1	4	3	370	80	21.7	50	365	98	26.93	342	94	28
Tex	12.5	2	2	1	1	310	79	25.6	50						
Tex	12.5	2	2	1	2	323	76	23.4	50						
Tex	12.5	2	2	1	3	323	76	23.5	50	319	77	24.07			
Tex	12.5	2	2	2	1	321	87	27.2	50						
Tex	12.5	2	2	2	2	334	84	25.2	50						
Tex	12.5	2	2	2	3	331	94	28.4	50	329	88	26.82			
Tex	12.5	2	2	3	1	325	75	23.0	50						
Tex	12.5	2	2	3	2	315	88	27.9	50						
Tex	12.5	2	2	3	3	307	76	24.8	50	315	79	25.20	321	82	25

**Esf = Esfericidade**

**Ang = angularidade**

**F2D = Forma 2D**

**Tex = Textura superficial**

## APÊNDICE E – CÓDIGO R DA ANÁLISE DE REPETIBILIDADE PARA A ANGULARIDADE

```

rm(list=ls(all=TRUE))
require(laercio) ### pacote para comparar as médias via teste
Tukeydados=read.csv("Planilha_modelo_com_dados.csv", header=TRUE, sep=";", dec=",")
head(dados)
attach(dados)
dim(dados)
Materialf=factor(Material)
Fraçãof=factor(Fração)
Laboratóriof=factor(Laboratório)
Operadorf=factor(Operador)
Medidaf=factor(Medida)
yAng=subset(dados, Propriedade=="Ang"); dim(yAng)
yEsf=subset(dados, Propriedade=="Esf"); dim(yEsf)
yF2D=subset(dados, Propriedade=="F2D"); dim(yF2D)
yTex=subset(dados, Propriedade=="Tex"); dim(yTex)
tapply(Valor,list(Materialf,Fraçãof), mean, data=yAng)
require(lattice)
bwplot(Valor~Laboratório*Operador|Material, ylab="Valor", data=yAng)

##### ANGULARIDADE #####
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=1, Mat=1, Fraç=1.18 ###
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" &
Material=="1" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
Tukey(saida,"factor(Medida)",conf.level=0.95) ##### procedimento do laercio
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1"
& Material=="1" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")

```

```
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18" & Medida=="2")
```

```
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18" & Medida=="3")
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=1, Mat=1, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
ANOVA(saida)
```

```
Shapiro.test(residuals(saida))
```

```
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="12.5" & Medida=="1")
```

```
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="12.5" & Medida=="2")
```

```
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="12.5" & Medida=="3")
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=1, Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18"))
```

```
ANOVA(saida)
```

```
Shapiro.test(residuals(saida))
```

```

Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1"
& Material=="2" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=1, Mat=2, Fraç=12.5 ####
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" &
Material=="2" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1"
& Material=="2" & Fração=="12.5"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=2, Mat=1, Fraç=1.18 ####
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" &
Material=="1" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)

```

```

Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2"
& Material=="1" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=2, Mat=1, Fraç=12.5 ####
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" &
Material=="1" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2"
& Material=="1" & Fração=="12.5"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="12.5" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="12.5" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="12.5" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=2, Mat=2, Fraç=1.18 ####
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" &
Material=="2" & Fração=="1.18"))

```

```

ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2"
& Material=="2" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=2, Mat=2, Fraç=12.5 ####

saida=aoV(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" &
Material=="2" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2"
& Material=="2" & Fração=="12.5"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=3, Mat=1, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" &
Material=="1" & Fração=="1.18"))
```

```
ANOVA(saida)
```

```
Shapiro.test(residuals(saida))
```

```
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3"
& Material=="1" & Fração=="1.18"))
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
```

```
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
```

```
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=3, Mat=1, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" &
Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
ANOVA(saida)
```

```
Tukey(saida,"factor(Medida)",conf.level=0.95) #### procedimento do laercio
```

```
Shapiro.test(residuals(saida))
```

```
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3"
& Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=3, Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" &
Material=="2" & Fração=="1.18"))
```

```
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3"
& Material=="2" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=3, Mat=2, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aoV(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" &
Material=="2" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3"
& Material=="2" & Fração=="12.5"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=4, Mat=1, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" &
Material=="1" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4"
& Material=="1" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=4, Mat=1, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" &
Material=="1" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Tukey(saida,"factor(Medida)",conf.level=0.95) #### procedimento do laercio
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4"
& Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=4, Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" &
Material=="2" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
```

```

Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4"
& Material=="2" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

```

### ANGULARIDADE - Lab=1, Op=4, Mat=2, Fraç=12.5 ####

```

```

saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" &
Material=="2" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4"
& Material=="2" & Fração=="12.5"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=1, Mat=1, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" &
Material=="1" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1"
& Material=="1" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=1, Mat=1, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" &
Material=="1" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Tukey(saida,"factor(Medida)",conf.level=0.95) ##### procedimento do laercio
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1"
& Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=1, Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" &
Material=="2" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
```

```

Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1"
& Material=="2" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

```

### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=1, Mat=2, Fraç=12.5 ####

```

```

saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" &
Material=="2" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1"
& Material=="2" & Fração=="12.5"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=2, Mat=1, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" &
Material=="1" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2"
& Material=="1" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=2, Mat=1, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" &
Material=="1" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Tukey(saida,"factor(Medida)",conf.level=0.95) ##### procedimento do laercio
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2"
& Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=2, Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" &
Material=="2" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
```

```

Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2"
& Material=="2" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

```

### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=2, Mat=2, Fraç=12.5 ####

```

```

saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" &
Material=="2" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2"
& Material=="2" & Fração=="12.5"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=3, Mat=1, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" &
Material=="1" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3"
& Material=="1" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=3, Mat=1, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" &
Material=="1" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Tukey(saida,"factor(Medida)",conf.level=0.95) ##### procedimento do laercio
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3"
& Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=3, Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" &
Material=="2" & Fração=="1.18"))
ANOVA(saida)
```

```

Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3"
& Material=="2" & Fração=="1.18"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18" &
Medida=="3")
Wilcox.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcox.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcox.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

```

### ANGULARIDADE - Lab=2, Op=3, Mat=2, Fraç=12.5 #####

```

```

saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" &
Material=="2" & Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Shapiro.test(residuals(saida))
Bartlett.test(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3"
& Material=="2" & Fração=="12.5"))
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="1")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="2")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5" &
Medida=="3")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)

```

**APÊNDICE F – CÓDIGO R DA ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE PARA A  
ANGULARIDADE ENTRE DIFERENTES OPERADORES**

```

rm(list=ls(all=TRUE))
require(laercio) ### pacote para comparar as médias via teste Tukey
dados=read.csv("Planilha_modelo_com_dados.csv", header=TRUE, sep=";", dec=",")
head(dados)
attach(dados)
dim(dados)
Materialf=factor(Material)
Fraçãof=factor(Fração)
Laboratóriof=factor(Laboratório)
Operadorf=factor(Operador)
Medidaf=factor(Medida)
yAng=subset(dados, Propriedade=="Ang"); dim(yAng)
yEsf=subset(dados, Propriedade=="Esf"); dim(yEsf)
yF2D=subset(dados, Propriedade=="F2D"); dim(yF2D)
yTex=subset(dados, Propriedade=="Tex"); dim(yTex)

##### ANGULARIDADE #####
### ANGULARIDADE - Lab=1, Mat=1, Fraç=1.18 ###

y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18")
y4=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="1" & Fração=="1.18")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y4$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y4$Valor)
Wilcoxon.test(y3$Valor,y4$Valor)

```

### ANGULARIDADE - Lab=1, Mat=1, Fraç=12.5 ####

```

y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="12.5")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="12.5")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="12.5")
y4=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="1" & Fração=="12.5")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y4$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y4$Valor)
Wilcoxon.test(y3$Valor,y4$Valor)

```

### ANGULARIDADE - Lab=1, Mat=2, Fraç=1.18 ####

```

y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18")
y4=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="2" & Fração=="1.18")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y4$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y4$Valor)
Wilcoxon.test(y3$Valor,y4$Valor)

```

### ANGULARIDADE - Lab=1, Mat=2, Fraç=12.5 ####

```

y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5")
y2=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5")
y3=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5")
y4=subset(yAng, Laboratório=="1" & Operador=="4" & Material=="2" & Fração=="12.5")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)

```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y4$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y4$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y3$Valor,y4$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Mat=1, Fraç=1.18 ####
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18")
```

```
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18")
```

```
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18")
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Mat=1, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Material=="1" & Fração=="12.5"))
```

```
ANOVA(saida)
```

```
Tukey(saida,"factor(Medida)",conf.level=0.95) #### procedimento do laercio
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18")
```

```
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18")
```

```
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18")
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Mat=2, Fraç=12.5 ###
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5")
```

```
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5")
```

```
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5")
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

## APÊNDICE G – CÓDIGO R DA ANÁLISE DE REPRODUTIBILIDADE PARA A ANGULARIDADE ENTRE DIFERENTES LABORATÓRIOS

```

rm(list=ls(all=TRUE))
require(laercio) ### pacote para comparar as médias via teste Tukey
dados=read.csv("Planilha_modelo_com_dados.csv", header=TRUE, sep=";", dec=",")
head(dados)
attach(dados)
dim(dados)
Materialf=factor(Material)
Fraçãof=factor(Fração)
Laboratóriof=factor(Laboratório)
Operadorf=factor(Operador)
Medidaf=factor(Medida)
yAng=subset(dados, Propriedade=="Ang"); dim(yAng)
yEsf=subset(dados, Propriedade=="Esf"); dim(yEsf)
yF2D=subset(dados, Propriedade=="F2D"); dim(yF2D)
yTex=subset(dados, Propriedade=="Tex"); dim(yTex)

##### ANGULARIDADE #####

### ANGULARIDADE - Mat=1, Fraç=1.18 ###

y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)

### ANGULARIDADE - Mat=1, Fraç=12.5 ###

y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Material=="1" & Fração=="12.5")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Material=="1" & Fração=="12.5")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)

```

```
### ANGULARIDADE - Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Mat=2, Fraç=12.5 ####
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Mat=1, Fraç=1.18 ####
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="1" & Fração=="1.18")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="1" & Fração=="1.18")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="1" & Fração=="1.18")
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Mat=1, Fraç=12.5 ####
```

```
saida=aov(Valor~factor(Medida), data=subset(yAng, Laboratório=="2" & Material=="1" &
Fração=="12.5"))
ANOVA(saida)
Tukey(saida,"factor(Medida)",conf.level=0.95) #### procedimento do laercio
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Mat=2, Fraç=1.18 ####
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="1.18")
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="1.18")
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="1.18")
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

```
### ANGULARIDADE - Lab=2, Mat=2, Fraç=12.5 ####
```

```
y1=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="1" & Material=="2" & Fração=="12.5")
```

```
y2=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="2" & Material=="2" & Fração=="12.5")
```

```
y3=subset(yAng, Laboratório=="2" & Operador=="3" & Material=="2" & Fração=="12.5")
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y2$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y1$Valor,y3$Valor)
```

```
Wilcoxon.test(y2$Valor,y3$Valor)
```

**APÊNDICE H – CÓDIGO R DO TESTE DE IGUALDADE DAS CURVAS DE  
DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DAS PROPRIEDADES DE FORMA ENTRE  
DIFERENTES LABORATÓRIOS**

```
rm(list=ls(all=TRUE))
require(MASS)
dados=data.frame(read.csv("Graficos faixas Danielle-R.csv", header=TRUE, dec=".",
sep=";"))
head(dados)
attach(dados)
names(dados)
### Comparando as curvas entre Laboratórios

## Angularidade - 1.18.mat.1

plot(ecdf(Ang..1.18.mat.1.Lab.1), ylim=c(0,1))
plot(ecdf(Ang..1.18.mat.1.Lab.2), add = TRUE, col=2)
ks.test(Ang..1.18.mat.1.Lab.1, Ang..1.18.mat.1.Lab.2)

## Angularidade - 1.18.mat.2

plot(ecdf(Ang..1.18.mat.2.Lab.1), ylim=c(0,1))
plot(ecdf(Ang..1.18.mat.2.Lab.2), add = TRUE, col=2)
ks.test(Ang..1.18.mat.2.Lab.1, Ang..1.18.mat.2.Lab.2)

## Ang.12.5.mat.1

plot(ecdf(Ang.12.5.mat.1.Lab.1), ylim=c(0,1))
plot(ecdf(Ang.12.5.mat.1.Lab.2), add = TRUE, col=2)
ks.test(Ang.12.5.mat.1.Lab.1, Ang.12.5.mat.1.Lab.2)

## Ang.12.5.mat.2

plot(ecdf(Ang.12.5.mat.2.Lab.1), ylim=c(0,1))
plot(ecdf(Ang.12.5.mat.2.Lab.2), add = TRUE, col=2)
ks.test(Ang.12.5.mat.2.Lab.1, Ang.12.5.mat.2.Lab.2)

## Esf.mat.1

plot(ecdf(Esf.mat.1.Lab.1), ylim=c(0,1))
plot(ecdf(Esf.mat.1.Lab.2), add = TRUE, col=2)
```

```
ks.test(Esf.mat.1.Lab.1, Esf.mat.1.Lab.2)
```

```
## Esf.mat.2
```

```
plot(ecdf(Esf.mat.2.Lab.1), ylim=c(0,1))  
plot(ecdf(Esf.mat.2.Lab.2), add = TRUE, col=2)  
ks.test(Esf.mat.2.Lab.1, Esf.mat.2.Lab.2)
```

```
## Tex.mat.1
```

```
plot(ecdf(Tex.mat.1.Lab.1), ylim=c(0,1))  
plot(ecdf(Tex.mat.1.Lab.2), add = TRUE, col=2)  
ks.test(Tex.mat.1.Lab.1, Tex.mat.1.Lab.2)
```

```
## Tex.mat.2
```

```
plot(ecdf(Tex.mat.2.Lab.1), ylim=c(0,1))  
plot(ecdf(Tex.mat.2.Lab.2), add = TRUE, col=2)  
ks.test(Tex.mat.2.Lab.1, Tex.mat.2.Lab.2)
```

```
## F2D.mat.1
```

```
plot(ecdf(F2D.mat.1.Lab.1), ylim=c(0,1))  
plot(ecdf(F2D.mat.1.Lab.2), add = TRUE, col=2)  
ks.test(F2D.mat.1.Lab.1, F2D.mat.1.Lab.2)
```

```
## F2D.mat.1
```

```
plot(ecdf(F2D.mat.2.Lab.1), ylim=c(0,1))  
plot(ecdf(F2D.mat.2.Lab.2), add = TRUE, col=2)  
ks.test(F2D.mat.2.Lab.1, F2D.mat.2.Lab.2)
```

**APÊNDICE I – RESULTADOS DOS TESTES DE HIPÓTESE APLICADOS PARA  
COMPARAR AS MEDIDAS DE PROPRIEDADES DE FORMA GERADAS COM O  
USO DO AIMS2**

Tabela 1 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar as médias das medidas das três análises de angularidade realizadas por cada operador

L	O	Material	Fração (mm)	ANOVA			Wilcoxon – Valor P		
				Pr	Valor F	Análise diferente (Tukey)	1 - 2	1 - 3	2 - 3
1	1	1	1,18	-	-	-	<0,00	<0,00	0,80
1	1	1	12,50	-	-	-	0,41	0,91	0,34
1	1	2	1,18	-	-	-	0,50	0,91	0,49
1	1	2	12,50	-	-	-	0,50	0,77	0,29
1	2	1	1,18	-	-	-	0,24	0,15	0,72
1	2	1	12,50	-	-	-	0,42	0,19	0,69
1	2	2	1,18	-	-	-	0,48	0,51	0,95
1	2	2	12,50	-	-	-	0,97	0,56	0,56
1	3	1	1,18	-	-	-	0,48	0,70	0,74
1	3	1	12,50	9,74E-01	<b>0,03</b>	Nenhuma	-	-	-
1	3	2	1,18	-	-	-	0,28	0,34	0,79
1	3	2	12,50	-	-	-	0,44	0,28	0,70
1	4	1	1,18	-	-	-	0,51	0,97	0,49
1	4	1	12,50	1,98E-01	1,64	Nenhuma	-	-	-
1	4	2	1,18	-	-	-	0,47	0,47	0,17
1	4	2	12,50	-	-	-	0,27	0,09	0,42
2	1	1	1,18	-	-	-	0,11	0,80	0,15
2	1	1	12,50	5,70E-02	2,92	Nenhuma	-	-	-
2	1	2	1,18	-	-	-	0,49	0,94	0,51
2	1	2	12,50	-	-	-	0,54	0,43	0,80
2	2	1	1,18	-	-	-	0,84	0,94	0,84
2	2	1	12,50	7,59E-01	0,28	Nenhuma	-	-	-
2	2	2	1,18	-	-	-	0,62	0,47	0,22
2	2	2	12,50	-	-	-	0,45	0,27	0,56
2	3	1	1,18	-	-	-	0,53	0,67	0,88
2	3	1	12,50	3,95E-01	0,94	Nenhuma	-	-	-
2	3	2	1,18	-	-	-	0,72	0,76	0,95
2	3	2	12,50	-	-	-	0,13	0,30	0,86

Tabela 2 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar as médias das medidas das três análises de esfericidade realizadas por cada operador

L	O	Material	Fração (mm)	ANOVA			Wilcoxon – Valor P		
				Pr	Valor F	Análise diferente (Tukey)	1 - 2	1 - 3	2 - 3
1	1	1	12,5	-	-	-	0,40	0,57	0,90
1	1	2	12,5	4,30E-01	8,48E-01	Nenhuma	-	-	-
1	2	1	12,5	6,94E-02	2,72E+00	Nenhuma	-	-	-
1	2	2	12,5	-	-	-	0,55	0,05	0,13
1	3	1	12,5	-	-	-	0,28	0,76	0,12
1	3	2	12,5	1,57E-01	1,88E+00	Nenhuma	-	-	-
1	4	1	12,5	-	-	-	0,81	0,29	0,44
1	4	2	12,5	8,69E-01	1,41E-01	Nenhuma	-	-	-
2	1	1	12,5	9,68E-01	3,22E-02	Nenhuma	-	-	-
2	1	2	12,5	1,01E-01	2,33E+00	Nenhuma	-	-	-
2	2	1	12,5	-	-	-	<b>0,02</b>	0,43	0,13
2	2	2	12,5	-	-	-	0,27	0,28	0,79
2	3	1	12,5	4,28E-01	8,53E-01	Nenhuma	-	-	-
2	3	2	12,5	-	-	-	0,37	0,37	0,84

Tabela 3 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar as médias das medidas das três análises de forma 2D realizadas por cada operador

L	O	Material	Fração (mm)	ANOVA			Wilcoxon – Valor P		
				Pr	Valor F	Análise diferente (Tukey)	1 - 2	1 - 3	2 - 3
1	1	1	1,18	-	-	-	0,35	0,22	0,73
1	1	2	1,18	-	-	-	<b>0,03</b>	0,16	0,42
1	2	1	1,18	-	-	-	0,25	0,99	0,21
1	2	2	1,18	-	-	-	0,15	<b>0,02</b>	0,41
1	3	1	1,18	-	-	-	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	0,65
1	3	2	1,18	-	-	-	0,76	0,05	0,11
1	4	1	1,18	-	-	-	0,29	0,53	0,06
1	4	2	1,18	-	-	-	<b>&lt;0,01</b>	<b>0,02</b>	0,53
2	1	1	1,18	-	-	-	0,99	0,54	0,57
2	1	2	1,18	-	-	-	0,15	0,06	0,60
2	2	1	1,18	-	-	-	0,68	0,30	0,48
2	2	2	1,18	-	-	-	0,54	0,94	0,59
2	3	1	1,18	-	-	-	0,27	0,14	0,81
2	3	2	1,18	-	-	-	0,70	0,68	0,97

Tabela 4 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar as médias das medidas das três análises de textura superficial realizadas por cada operador

L	O	Material	Fração (mm)	ANOVA			Wilcoxon – Valor P		
				Pr	Valor F	Análise diferente (Tukey)	1 - 2	1 - 3	2 - 3
1	1	1	12,5	-	-	-	0,57	0,73	0,77
1	1	2	12,5	0,2174	1,5419	Nenhuma	-	-	-
1	2	1	12,5	-	-	-	0,56	0,88	0,56
1	2	2	12,5	-	-	-	0,64	0,12	0,35
1	3	1	12,5	-	-	-	0,23	0,37	0,56
1	3	2	12,5	0,1575	1,8715	Nenhuma	-	-	-
1	4	1	12,5	-	-	-	0,09	0,41	0,60
1	4	2	12,5	-	-	-	0,36	0,80	0,35
2	1	1	12,5	-	-	-	0,81	0,28	0,49
2	1	2	12,5	0,6133	0,4905	Nenhuma	-	-	-
2	2	1	12,5	-	-	-	0,09	0,61	0,19
2	2	2	12,5	0,7407	0,3008	Nenhuma	-	-	-
2	3	1	12,5	-	-	-	0,76	0,15	0,25
2	3	2	12,5	-	-	-	0,46	0,27	0,58

Tabela 5 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar a média das medidas das três análises de angularidade realizadas por operadores distintos

L	Material	Fração (mm)	ANOVA			Wilcoxon entre operadores – Valor P					
			Pr	Valor F	Operador diferente (Tukey)	1 - 2	1 - 3	1 - 4	2 - 3	2 - 4	3 - 4
1	1	1,18	-	-	-	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	0,21
1	1	12,50	-	-	-	0,57	0,20	0,24	0,05	0,07	0,87
1	2	1,18	-	-	-	<0,01	0,37	0,06	<0,01	<0,01	0,35
1	2	12,50	-	-	-	0,50	0,74	0,78	0,57	0,31	0,57
2	1	1,18	-	-	-	0,09	0,83	-	0,17	-	-
2	1	12,50	0,57	0,57	Nenhuma	-	-	-	-	-	-
2	2	1,18	-	-	-	0,42	0,10	-	0,02	-	-
2	2	12,50	-	-	-	0,56	0,74	-	0,85	-	-

Tabela 6 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar a média das medidas das três análises de esfericidade realizadas por operadores distintos

L	Material	Fração (mm)	ANOVA			Wilcoxon entre operadores – Valor P					
			Pr	Valor F	Operador diferente (Tukey)	1 - 2	1 - 3	1 - 4	2 - 3	2 - 4	3 - 4
1	1	12,5	-	-	-	0,29	0,29	<b>0,04</b>	0,94	0,24	0,20
1	2	12,5	-	-	-	0,25	<b>0,03</b>	0,80	0,39	0,43	0,09
2	1	12,5	-	-	-	0,17	0,21	-	0,90	-	-
2	2	12,5	-	-	-	0,55	0,05	-	0,13	-	-

Tabela 7 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar a média das medidas das três análises de forma 2D realizadas por operadores distintos

L	Material	Fração (mm)	ANOVA			Wilcoxon entre operadores – Valor P					
			Pr	Valor F	Operador diferente (Tukey)	1 - 2	1 - 3	1 - 4	2 - 3	2 - 4	3 - 4
1	1	1,18	-	-	-	< <b>0,01</b>	< <b>0,01</b>	0,52	< <b>0,01</b>	< <b>0,01</b>	0,03
1	2	1,18	-	-	-	< <b>0,01</b>	< <b>0,01</b>	0,53	0,66	< <b>0,01</b>	< <b>0,01</b>
2	1	1,18	-	-	-	0,50	0,11	-	0,39	-	-
2	2	1,18	-	-	-	0,93	0,14	-	0,16	-	-

Tabela 8 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar a média das medidas das três análises de textura superficial realizadas por operadores distintos

L	Material	Fração (mm)	ANOVA			Wilcoxon entre operadores – Valor P					
			Pr	Valor F	Operador diferente (Tukey)	1 - 2	1 - 3	1 - 4	2 - 3	2 - 4	3 - 4
1	1	12,50	-	-	-	0,75	0,86	0,31	0,89	0,51	0,43
1	2	12,50	-	-	-	0,60	0,99	0,00	0,67	0,00	<b>0,01</b>
2	1	12,50	-	-	-	0,33	0,20	-	0,71	-	-
2	2	12,50	-	-	-	0,38	0,64	-	0,17	-	-

Tabela 9 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar a média das medidas das três análises de angularidade realizadas por operadores distintos dos dois laboratórios avaliados

Material	Fração (mm)	Teste Paramétrico	ANOVA		Wilcoxon entre Labs – Valor P
			Pr	Valor F	1 - 2
1	1,18	não	-	-	<0,01
1	12,50	não	-	-	0,68
2	1,18	não	-	-	0,41
2	12,50	não	-	-	0,52

Tabela 10 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar a média das medidas das três análises de forma 2D realizadas por operadores distintos dos dois laboratórios avaliados

Material	Fração (mm)	ANOVA		Wilcoxon entre Labs – Valor P
		Pr	Valor F	1 - 2
1	1,18	-	-	0,05
2	1,18	-	-	0,14

Tabela 11 – Resultados dos Testes de Barlett, Shapiro-Wilk, ANOVA, Tukey e Wilcoxon aplicados para comparar a média das medidas das três análises de textura superficial realizadas por operadores distintos dos dois laboratórios avaliados

Material	Fração (mm)	ANOVA		Wilcoxon entre Labs – Valor P
		Pr	Valor F	1 - 2
1	12,50	-	-	<0,01
2	12,50	-	-	<0,01

Tabela 12 – Resultados do Teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado para verificar a igualdade das curvas de distribuição acumulada das propriedades de forma, por fração e por material dos dois laboratórios avaliados

Propriedade	Fração (mm)	Material	Valor-P	Conclusão
Angularidade	1,18	1	2,038E-08	As curvas são diferentes
Angularidade	1,18	2	0,6492	As curvas são iguais
Angularidade	12,5	1	0,9204	As curvas são iguais
Angularidade	12,5	2	0,7915	As curvas são iguais
Esfericidade	12,5	1	0,9935	As curvas são iguais
Esfericidade	12,5	2	0,9549	As curvas são iguais
Textura superficial	12,5	1	0,0004512	As curvas são diferentes
Textura superficial	12,5	1	0,0005218	As curvas são diferentes
Forma 2D	1,18	1	0,09137	As curvas são iguais
Forma 2D	1,18	2	0,1534	As curvas são iguais