



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

**IURI SIDNEY BESSA**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS COMO**  
**FERRAMENTA PARA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS E MISTURAS**  
**ASFÁLTICAS**

**FORTALEZA – CE**

**2012**

IURI SIDNEY BESSA

AVALIAÇÃO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS COMO FERRAMENTA  
PARA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS E MISTURAS ASFÁLTICAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

Co-orientador: Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

FORTALEZA – CE

2012

IURI SIDNEY BESSA

AVALIAÇÃO DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS COMO FERRAMENTA  
PARA CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS E MISTURAS ASFÁLTICAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>a</sup>. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D. (Co-orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. José de Araújo Nogueira Neto, D.Sc.  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Liedi Legi Bariani Bernucci, D.Sc.  
Universidade de São Paulo (USP)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Rita e Nicodemos, e ao meu irmão Igor, pela ótima educação, e pelo incentivo e força durante os últimos anos. Por sempre me apoiar nas minhas escolhas e me fazer seguir em frente com os meus sonhos.

Aos meus outros familiares, principalmente à minha madrinha Lysia, à minha tia Luci, à Adriana e à Luísa, por me ajudarem quando precisei, por me acolherem com todo o carinho e por fazerem parte da minha vida há tantos anos. Ao meu padrasto Ricardo, pela humildade e carinho, e por ter trazido tantas alegrias e bons momentos na nossa vida.

À professora Verônica Castelo Branco, por ser uma grande inspiração e a orientadora mais dedicada que eu já conheci. Obrigado por sempre confiar no meu trabalho e me motivar a seguir nesse caminho, por nunca negar ajuda e por tanto trabalho dedicado aos seus alunos.

Ao professor Jorge Soares, grande incentivador, conselheiro e dono de ótimas ideias, também por tanta dedicação depositada, proporcionando oportunidades e experiências de vida inesquecíveis. Aos demais professores do DET, em especial à professora Suelly Barroso, pelas conversas e incentivos, e também pelas ideias enriquecedoras.

Aos meus mais que amigos, companheiros de todas as horas, Camila Alves e Felipe Onofre, pelo incentivo durante toda nossa trajetória acadêmica juntos, nos últimos quase oito anos. Agradeço pela amizade, pelo dia-a-dia dentro e fora da universidade, e pela união de sempre.

A todos os outros amigos pelo carinho e apoio, pela confiança e por todos os momentos que vivemos juntos: Bebel, Bele, Fred, Bruno, Pedro, Paloma, Cecília, Pablo, Rafa, Dani, Luiz, Lívia, Fernando, Lucas e todos os outros. Em especial à Ivna e ao Andrei, mais do que primos, se tornaram grandes amigos e melhores companheiros nos últimos quase quinze anos.

Ao pessoal do LMP/DET da UFC, por sempre me ajudar quando precisei, especialmente ao grupo de misturas e ao bolsista Natan pela enorme ajuda no processo de realização desta pesquisa. Agradeço muito ao Rômulo Jácome, laboratorista, que nunca me deixou na mão, e por tocar em pontos que só sua experiência foi capaz de fornecer. Ao Daniel, por ter feito tudo que eu pedi, de forma tão correta e com tanta vontade de fazer cada vez melhor. À Annie Karine e à Manuela Lopes, pela ajuda incondicional e pela amizade nos últimos anos. Ao pessoal do LTP/PTR da Poli-USP, por ter me tratado tão bem durante o tempo em que estive morando em São Paulo e frequentando o laboratório.

À professora Liedi Bernucci, por ter aceitado participar da minha banca e por abrir as portas na próxima fase da minha vida, confiando no meu trabalho. Ao professor Zeca, por participar da minha banca e por ter realizado as análises geológicas dos materiais avaliados neste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro em forma de bolsa de mestrado. Aos representantes das pedreiras MFT, Pyla e OCS, pelo fornecimento de material e por terem possibilitado as visitas realizadas para a complementação desta pesquisa. À Lubnor, pelo fornecimento do ligante asfáltico. E por fim, à Insttale Engenharia Ltda., pela ajuda quando foi preciso.

## RESUMO

É de conhecimento geral que o desempenho de misturas asfálticas com relação aos principais defeitos do pavimento (deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico) está diretamente ligado às propriedades dos agregados que as constituem. A metodologia tradicional de caracterização de agregados, principalmente em relação à forma, à angularidade e à textura, pode se tornar dispendiosa e não fornecer resultados precisos, pois, além de muitas vezes combinar mais de uma propriedade em apenas um ensaio, estes parâmetros são avaliados a partir de uma média de valores que pode não representar bem os materiais estudados. Sendo assim, já existem, na literatura, diversas técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) que podem ser utilizadas com o intuito de caracterizar agregados de forma mais completa e realista. Uma destas técnicas é por meio do uso do equipamento *Aggregate Image Measurement System* (AIMS), desenvolvido para analisar forma, angularidade e textura superficial de agregados graúdos e miúdos, através de diferentes métodos. Acredita-se que, diferentes pedreiras podem produzir agregados com propriedades distintas entre si devido aos diversos processos de desmonte, de britagem, de controle de qualidade e de armazenamento dos materiais. O objetivo geral do presente trabalho é avaliar o potencial do uso do PDI na análise das propriedades de forma, de angularidade e de textura de agregados provenientes de fontes distintas e na análise da estrutura interna de misturas asfálticas compostas por esses agregados. Foram obtidos e caracterizados agregados provenientes de três pedreiras distintas, todas localizadas no estado do Ceará. Os agregados foram analisados no AIMS separando-se os diversos tamanhos de suas partículas, e os resultados obtidos para o material proveniente de cada pedreira foram comparados entre si. Além disso, misturas asfálticas compostas por esses agregados foram analisadas em relação a sua estrutura interna e em relação a suas propriedades mecânicas. Os principais resultados obtidos levaram à conclusão de que os agregados estudados são semelhantes no que diz respeito a suas propriedades de forma, de angularidade e de textura. Em relação às propriedades mecânicas das misturas compostas por esses agregados, os resultados mostram que estas se comportaram de maneira similar, o que provavelmente se deve às características também similares de seus agregados.

**Palavra-chave:** Propriedades de forma. Agregados. Misturas Asfálticas. Processamento Digital de Imagens.

## ABSTRACT

It is a general consensus that the mechanical performance of asphalt mixtures with respect to the pavements' main distresses (permanent deformation, fatigue cracking and thermal cracking) is directly related to the aggregates' properties used in those mixtures. The traditional methodology of characterizing aggregates, mainly in relation to shape properties, such as form, angularity and texture, can be very time-consuming. It also does not provide precise results, because it combines more than one property in a single test result. Another disadvantage is the fact that these methodologies also provide average values that may not represent well the evaluated materials. There are already in the literature several Digital Image Processing (DIP) techniques that can be used with the purpose of characterizing aggregates in a more complete and realistic way. One of them is the Aggregate Image Measurement System (AIMS), equipment developed to analyze properties, such as: shape, angularity, and superficial texture of coarse and fine aggregates, through different methods. It is believed that different quarries can produce aggregates with very distinct properties, due to the several used rock blasting and crushing processes, quality control activities and material storage methodology. The main objective of this research is to evaluate the potential use of DIP to analyze shape, angularity and texture of aggregates from different sources and to analyze asphalt mixtures internal structure constituted by those aggregates. Aggregates from three different quarries, all located in the State of Ceará, were obtained and characterized. The aggregates were analyzed using AIMS, for different sizes, and the results were compared. Besides that, the asphalt mixtures constituted with these aggregates were analyzed regarding their internal structure and their mechanical characteristics. The main results obtained in this study led to conclude that the aggregates used in this research are very similar in respect to their form, angularity and texture properties. With respect to the mechanical properties of the mixtures constituted by these aggregates, the results show that their behavior is also very similar, which is probably due to the similar characteristics of their aggregates.

**Keywords:** Shape properties. Aggregates for asphalt mixtures. Digital Image Processing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Contato entre agregados (MAHMOUD <i>et al.</i> , 2010) .....	32
Figura 2 - Orientação das partículas de agregado.....	33
Figura 3 - Grupos de segregação (MAHMOUD <i>et al.</i> , 2010).....	35
Figura 4 - <i>Software</i> de imagens: (a) ImageTool e (b) Digital Image Analysis System.....	37
Figura 5 - <i>Aggregate Image Measurement System</i> (AIMS) .....	38
Figura 6 - Imagens da tomografia de Raios-X .....	40
Figura 7 - Localização das pedreiras em relação à Fortaleza: A – centro da capital; B – Pedreira de Itaitinga (MFT); C – Pedreira Pyla; e D – Pedreira OCS.....	42
Figura 8 - Visão geral das pedreiras: (a) Pedreira de Itaitinga (MFT); (b) Pedreira Pyla e (c) Pedreira OCS .....	45
Figura 9 - Ensaio de granulometria: (a) quarteador e (b) conjunto de peneiras .....	46
Figura 10 - Granulometria dos agregados – série de peneiras do DNIT .....	48
Figura 11 - Granulometria dos agregados – série de peneiras da AASHTO.....	48
Figura 12 - Ensaio de adesividade: (a) amostra de agregados; (b) recobrimento dos agregados; (c) agregados recobertos por ligante asfáltico; (d) colocação da água destilada; (e) agregados após 72 horas na água e (f) agregados após o ensaio .....	50
Figura 13 - Ensaio de densidade do agregado miúdo: (a) amostra de agregados miúdos retidos na peneira #200; (b) picnômetro + amostra e (c) picnômetro + amostra + água...	52
Figura 14 - Ensaio de densidade do fíler: (a) frasco + amostra + querosene e (b) frasco no banho de água .....	53
Figura 15 - Ensaio de índice de forma: (a) crivos circulares e (b) crivo redutor.....	54
Figura 16 - Ensaio de equivalente de areia: (a) solução para o ensaio; (b) amostra sendo colocada na proveta e (c) amostras em repouso .....	54
Figura 17 - Equipamento de cromatografia – Iatroskan .....	57
Figura 18 - Curva de viscosidade – CAP 50/70 .....	58
Figura 19 - Agregados utilizados nas misturas: (a) agregado graúdo – M1; (b) agregado miúdo – M1; (c) agregado graúdo – M2 e (d) agregado miúdo – M2.....	59
Figura 20 - Composição granulométrica das misturas .....	62
Figura 21 - Passo a passo da utilização do AIMS: (a) interface do <i>software</i> ; (b) agregados dispostos na bandeja; (c) análise da angularidade e da forma; (d) análise da textura superficial; (e) planilhas-resumo com os resultados e (f) resultados individuais de cada partícula.....	65

Figura 22 - Exemplo de etapas para a utilização dos <i>software</i> de imagens: (a) imagem original da face serrada do CP; (b) imagem em escala de cinza; (c) detecção das bordas dos agregados e (d) resultados gerados .....	70
Figura 23 - Ensaio de <i>creep</i> : (a) aplicação da carga durante o ensaio e (b) comportamento de uma mistura asfáltica no ensaio (ONOFRE <i>et al.</i> , 2011) .....	73
Figura 24 - Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 1 .....	83
Figura 25 - Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 2 .....	84
Figura 26 - Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 3 .....	84
Figura 27 - Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 1 .....	86
Figura 28 - Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 2 .....	86
Figura 29 - Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 .....	87
Figura 30 - Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 1 .....	88
Figura 31 - Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 2 .....	89
Figura 32 - Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 3 .....	89
Figura 33 - Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 1 .....	90
Figura 34 - Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 2 .....	91
Figura 35 - Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 3 .....	91
Figura 36 - Razões entre as dimensões dos agregados – agregado 1 .....	92
Figura 37 - Razões entre as dimensões dos agregados – agregado 2 .....	93
Figura 38 - Razões entre as dimensões dos agregados – agregado 3 .....	93
Figura 39 - Comparação entre lamelaridade e esfericidade .....	95
Figura 40 - Exemplos de agregados antes e depois do ensaio de abrasão: (a) granito – 12,5mm; (b) granito – 9,5mm; (c) fonolito e (d) gnaisse .....	96
Figura 41 - Comparação da textura dos agregados antes e depois da abrasão Los Angeles ....	98
Figura 42 - Comparação da angularidade antes e depois da abrasão Los Angeles .....	99
Figura 43 - Relação entre abrasão e quebra dos agregados .....	101
Figura 44 - Equipamentos para ensaio: (a) pneumático para MR; (b) prensa para RT e (c) UTM para <i>creep</i> dinâmico .....	102
Figura 45 - Vida de fadiga a tensão controlada .....	104
Figura 46 - Curvas obtidas no ensaio de <i>creep</i> dinâmico .....	105
Figura 47 - Segregação de agregados: (a) mistura 1 e (b) mistura 2 .....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados do ensaio de granulometria, em massa retida e porcentagem passante – série de peneiras do DNIT .....	47
Tabela 2 - Resultados do ensaio de granulometria, em massa retida e porcentagem passante – série de peneiras da AASHTO.....	47
Tabela 3 - Resultados da caracterização física dos agregados .....	49
Tabela 4 - Caracterização do ligante asfáltico (CAP 50/70) .....	56
Tabela 5 - Granulometrias dos agregados após os “cortes” (Pedreira 1) .....	61
Tabela 6 - Granulometrias dos agregados após os “cortes” (Pedreira 3) .....	61
Tabela 7 - Composições granulométricas dos agregados nas misturas .....	62
Tabela 8 - Teor de projeto de ligante e parâmetros volumétricos das misturas .....	63
Tabela 9 - Tamanhos de agregados analisados no AIMS.....	65
Tabela 10 - Limites de classificação (AL ROUSAN, 2004) .....	68
Tabela 11 - Médias e desvios-padrão dos resultados obtidos.....	75
Tabela 12 - Classificação dos agregados estudados .....	75
Tabela 13 - Resultados obtidos para o Agregado 1 (granítico) .....	77
Tabela 14 - Resultados obtidos para o Agregado 2 (gnáissico) .....	77
Tabela 15 - Resultados obtidos para o Agregado 3 (fonolítico).....	77
Tabela 16 - Médias dos resultados obtidos para as frações do Agregado 1 (granítico) .....	79
Tabela 17 - Médias dos resultados obtidos para as frações do Agregado 2 (gnáissico).....	80
Tabela 18 - Médias dos resultados obtidos para as frações do Agregado 3 (fonolítico).....	80
Tabela 19 - Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade .....	92
Tabela 20 - Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade – agregado 1 .....	94
Tabela 21 - Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade – agregado 2 .....	94
Tabela 22 - Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade – agregado 3 .....	94
Tabela 23 - Valores médios de textura superficial antes e depois da realização do ensaio de abrasão Los Angeles .....	97
Tabela 24 - Valores médios de angularidade antes e depois da realização do ensaio de abrasão Los Angeles .....	98
Tabela 25 - Perda em massa .....	100
Tabela 26 - Resultados dos ensaios de MR e RT a 25°C .....	102
Tabela 27 - Valores dos parâmetros e do $R^2$ .....	104
Tabela 28 - Resultados do ensaio de <i>creep</i> dinâmico a 60°C .....	105

Tabela 29 - Número de pontos de contatos .....	106
Tabela 30 - Valores de vetor magnitude.....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIMS	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento da Trilha de Roda
AZR	Acima da Zona de Restrição
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CEI	<i>Contact Energy Index</i>
CGS	Compactador Giratório Superpave
CP	Corpo-de-prova
CV	Coefficiente de Variação
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EA	Equivalente de Areia
FN	<i>Flow Number</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
Lubnor	Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste
MED	Método dos Elementos Discretos
MR	Módulo de Resiliência
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
OGAC	<i>Open Graded Asphalt Concrete</i>
OGFC	<i>Open Graded Friction Course</i>
PDI	Processamento Digital de Imagens
RBV	Relação Betume Vazio
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RT	Resistência à Tração
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
SSS	Superfície Saturada Seca

Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTHSCSA	<i>University of Texas Health Science Center in San Antonio</i>
VAM	Vazios no Agregado Mineral
Vv	Volume de vazios
WTAT	<i>Wet Track Abrasion Test</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Problema de pesquisa .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>18</b>
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos específicos .....</i>	18
<b>1.3</b>	<b>Organização da dissertação .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Produção de agregados na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Influência das propriedades dos agregados em misturas asfálticas .....</b>	<b>21</b>
2.2.1	<i>Forma .....</i>	21
2.2.2	<i>Angularidade .....</i>	22
2.2.3	<i>Textura superficial.....</i>	24
<b>2.3</b>	<b>Resistência dos agregados ao polimento e à degradação .....</b>	<b>25</b>
2.3.1	<i>Polimento de agregados .....</i>	25
2.3.2	<i>Degradação de agregados.....</i>	26
2.3.3	<i>Ensaio de resistência ao polimento e à degradação.....</i>	27
<b>2.4</b>	<b>Método Bailey de seleção granulométrica .....</b>	<b>29</b>
<b>2.5</b>	<b>Influência da estrutura interna no desempenho de misturas asfálticas .....</b>	<b>31</b>
2.5.1	<i>Pontos de contato .....</i>	32
2.5.2	<i>Orientação das partículas .....</i>	33
2.5.3	<i>Segregação das partículas.....</i>	34
<b>2.6</b>	<b>Técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) .....</b>	<b>36</b>
2.6.1	<i>Software de imagens.....</i>	36
2.6.2	<i>Técnicas modernas de PDI.....</i>	38
2.6.3	<i>Utilização do PDI na caracterização de agregados e misturas asfálticas .....</i>	40
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>Agregados .....</b>	<b>42</b>
3.1.1	<i>Coleta dos agregados .....</i>	42
3.1.2	<i>Escolha dos agregados para a produção das misturas asfálticas .....</i>	45
3.1.3	<i>Caracterização física dos agregados .....</i>	45
3.1.4	<i>Ensaio de resistência à degradação e ao polimento.....</i>	55
<b>3.2</b>	<b>Ligante asfáltico .....</b>	<b>56</b>

<b>3.3</b>	<b>Misturas asfálticas .....</b>	<b>58</b>
3.3.1	<i>Composições granulométricas .....</i>	60
3.3.2	<i>Parâmetros volumétricos das misturas .....</i>	62
<b>3.4</b>	<b>Processamento Digital de Imagens (PDI) .....</b>	<b>64</b>
3.4.1	<i>Análise de agregados utilizando o AIMS .....</i>	64
3.4.2	<i>Parâmetros analisados no AIMS.....</i>	66
3.4.3	<i>Classificação dos agregados .....</i>	67
3.4.4	<i>Caracterização da estrutura interna de misturas asfálticas .....</i>	68
<b>3.5</b>	<b>Ensaio de caracterização mecânica para misturas asfálticas.....</b>	<b>70</b>
3.5.1	<i>Módulo de Resiliência (MR).....</i>	70
3.5.2	<i>Resistência à Tração (RT) .....</i>	71
3.5.3	<i>Vida de fadiga.....</i>	71
3.5.4	<i>Creep dinâmico.....</i>	72
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização das propriedades de forma, de angularidade e de textura ...</b>	<b>74</b>
4.1.1	<i>Caracterização geral.....</i>	74
4.1.2	<i>Caracterização por Tamanho Máximo Nominal (TMN).....</i>	76
4.1.3	<i>Caracterização dos agregados separados peneira a peneira .....</i>	79
4.1.4	<i>Forma 2D (agregados miúdos) .....</i>	82
4.1.5	<i>Esfericidade (agregados graúdos) .....</i>	85
4.1.6	<i>Angularidade (agregados graúdos e miúdos) .....</i>	87
4.1.7	<i>Textura superficial (agregados graúdos).....</i>	90
4.1.8	<i>Partículas achatadas e alongadas (agregados graúdos).....</i>	92
<b>4.2</b>	<b>Resistência ao polimento e à degradação dos agregados .....</b>	<b>96</b>
<b>4.3</b>	<b>Comportamento mecânico das misturas asfálticas.....</b>	<b>102</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise da estrutura interna das misturas asfálticas .....</b>	<b>106</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>109</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões a respeito das propriedades de forma dos agregados.....</b>	<b>109</b>
<b>5.2</b>	<b>Conclusões a respeito do comportamento mecânico das misturas.....</b>	<b>110</b>
<b>5.3</b>	<b>Sugestões para futuras pesquisas .....</b>	<b>111</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>120</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As principais rodovias do Brasil utilizam na camada de revestimento misturas do tipo Concreto Asfáltico (CA), material classificado como um composto constituído de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), agregados, fíler e vazios. As propriedades físicas dos agregados, como resistência, abrasão e dureza são determinadas pelas características da sua rocha de origem. Entretanto, o processo de produção nas pedreiras pode afetar significativamente a qualidade dos agregados pela eliminação das camadas mais fracas da rocha e pelo efeito da britagem na forma da partícula e na granulometria do agregado (MARQUES, 2001).

De acordo com Marques (2001), o objetivo básico da operação em uma pedreira é o desmonte da rocha sã através de dinamite e, subsequentemente, o uso de uma série de britadores e outras unidades para reduzir o material em um número suficiente de componentes de modo a produzir os materiais de construção utilizáveis no pavimento. Também é desejável, principalmente para aplicação em pavimentação, produzir agregado britado que tenha formato cúbico e não achatado ou alongado. Segundo Roberts *et al.* (1996), as unidades de britagem são escolhidas para atender alguns objetivos, tais como: (i) produzir formas e tamanhos desejados de rochas; (ii) reduzir os tamanhos dos blocos de rocha; (iii) ter capacidade suficiente para manusear as cargas máximas; (iv) satisfazer exigências de britagem sem a necessidade de estágios de britagem adicional e equipamentos auxiliares; (v) operar economicamente com um mínimo de manutenção; (vi) oferecer uma vida de serviço longa; entre outros.

Durante a operação de britagem, é essencial que as propriedades do produto final sejam homogêneas e representativas. Quando a rocha é removida de várias localizações da pedreira, as propriedades físicas dos agregados podem variar substancialmente. O controle de qualidade durante as operações de britagem deve assegurar que as propriedades físicas dos agregados não variem excessivamente. O ideal é que a quantidade de material que alimenta as operações de britagem seja aproximadamente constante. O aumento da vazão de fluxo de material do britador, normalmente, resulta no transbordamento de agregados menores sobre as peneiras. Este excesso resulta em um estoque de material mais fino (MARQUES, 2001).

Os processos de britagem realizados em diferentes pedreiras tendem a produzir agregados com propriedades de forma, de angularidade e de textura distintas. Como já se sabe que essas propriedades possuem um papel fundamental na estabilidade e na capacidade de

suporte de misturas asfálticas, e, conseqüentemente, de pavimentos, os agregados devem ter essas características conhecidas e controladas.

O processo de britagem dos agregados também afeta as propriedades relacionadas à resistência ao polimento e à degradação dos mesmos. As características relacionadas ao polimento desses materiais afetam a microtextura dos pavimentos asfálticos, e, conseqüentemente, as propriedades de atrito superficial dos revestimentos. Além disso, a resistência à degradação, propriedade ligada à abrasão e à quebra dos agregados, também é importante porque influencia no desempenho das misturas asfálticas. A abrasão é definida como a perda da angularidade dos agregados, enquanto que a quebra está ligada à fratura das partículas. Existem alguns tipos de agregados que tendem a ser mais abrasivos e quebradiços durante seus processos de produção e também de compactação (MAHMOUD, 2005).

A caracterização das propriedades físicas dos agregados é fundamental na melhoria do desempenho de pavimentos, no entanto, os atuais métodos de ensaios sugeridos pelo Superpave (*Superior Performance Asphalt Pavements*) são limitados em sua habilidade de quantificar diretamente e objetivamente as características destes materiais (MASAD, 2005). Recentemente, alguns métodos vêm sendo desenvolvidos em instituições de pesquisa, com o objetivo de melhor avaliar essas propriedades. A avaliação de tais métodos no que diz respeito à sua aplicabilidade tem ajudado na determinação de suas vantagens em relação aos ensaios tradicionais.

A metodologia Superpave prevê ensaios de laboratório que fornecem as diversas características de forma dos agregados. Dentre as desvantagens dos métodos que seguem essa metodologia é possível citar: (i) falta de conexão entre as propriedades de agregados graúdos e miúdos, (ii) resultados influenciados por mais de uma propriedade de forma de agregado, (iii) ensaios qualitativos e dispendiosos em relação ao tempo, (iv) medidas indiretas de propriedades de forma (CASTELO BRANCO *et al.*, 2006; SOUZA, 2009).

A análise tradicional em laboratório das características relacionadas à forma dos agregados utiliza equipamentos simples, porém demanda muito tempo, pois alguns ensaios necessitam inclusive da medição quantitativa manual de cada partícula de uma amostra considerada representativa. Além disso, os ensaios em laboratório determinam um índice global baseado em médias ao invés da utilização de distribuição cumulativa de propriedades (MASAD, 2004). Com o avanço da informática, hoje já é possível que imagens sejam processadas e analisadas a ponto de se medir as características dos seus componentes. Esse procedimento serve como ferramenta importante para que a análise manual das características relacionadas à forma dos agregados seja cada vez menos utilizada.

O *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) é um equipamento desenvolvido para analisar as propriedades de forma, de angularidade e de textura de agregados graúdos; e de angularidade e de forma de agregados miúdos. A análise da textura dos agregados miúdos é feita de forma indireta, através dos resultados de angularidade. Sabe-se que, para esses agregados, as duas propriedades citadas anteriormente são diretamente proporcionais e podem ser correlacionadas. Os resultados obtidos são fornecidos em bases estatísticas, e são suficientes para a realização da classificação da forma dos agregados. Essa metodologia fornece algumas vantagens em relação aos métodos tradicionalmente utilizados, pois se baseia na distribuição estatística das características de forma em uma amostra de agregado, ao invés de índices médios. O AIMS utiliza um sistema simples, que consiste em uma câmera e dois diferentes tipos de iluminação para capturar imagens de agregados em diferentes resoluções, das quais as propriedades de forma são avaliadas usando técnicas de análise de imagens.

### **1.1 Problema de pesquisa**

A metodologia Superpave, que desde o ano de 1993 vem sendo utilizada em universidades e departamentos de transporte americanos para a caracterização de materiais asfálticos e seus constituintes, enfatizou a caracterização do CAP, ou ligante asfáltico. Os agregados, no entanto, não receberam a mesma atenção dos pesquisadores que desenvolveram esta metodologia, mesmo sendo estes responsáveis por, aproximadamente, 90 a 95% em peso das misturas asfálticas. Os ensaios existentes, por exemplo, para a caracterização de propriedades como forma, angularidade e textura dos agregados são dispendiosos e, muitas vezes, fornecem resultados não representativos.

Em virtude do que foi mencionado, existe uma falta de critério objetivo para a seleção da melhor combinação entre ligante asfáltico e agregados e a melhor composição granulométrica entre diferentes agregados, com propriedades de forma distintas. Essa falta de critério acaba levando a deterioração das estruturas de pavimentos asfálticos, mesmo que a caracterização destes materiais seja considerada aceitável com relação às normas técnicas vigentes.

Para tentar suprir a necessidade de uma melhor caracterização de agregados, estão sendo desenvolvidas técnicas alternativas para o estudo de suas propriedades. Uma dessas técnicas, o Processamento Digital de Imagens (PDI), vem sendo aprimorada e possui diversas

metodologias, desde o uso de métodos mais tradicionais que utilizam equipamentos simples como computador e *scanner*, até o uso de equipamentos sofisticados como o AIMS e/ou a tomografia computadorizada de Raios-X.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo geral***

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o potencial do uso do Processamento Digital de Imagens (PDI) na análise das características de forma, de angularidade e de textura de agregados provenientes de fontes distintas.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- Propor uma metodologia mais eficiente para a caracterização de agregados no que diz respeito a suas propriedades de forma, de angularidade e de textura;
- Avaliar novas metodologias de caracterização mais precisas de agregados em relação à resistência ao polimento e à resistência à degradação (abrasão e quebra);
- Realizar análise mineralógica em agregados distintos produzidos por diferentes pedreiras do estado do Ceará;
- Verificar a influência de diferentes processos de britagem de agregados nas propriedades destes materiais para uso em serviços de pavimentação;
- Comparar as propriedades dos agregados produzidos em diferentes pedreiras de municípios distintos localizados no estado do Ceará;
- Comparar as características (forma, angularidade e textura superficial) de diferentes tamanhos e frações de agregados produzidos por uma mesma pedreira;
- Verificar a influência das propriedades de forma, de angularidade e de textura dos agregados nos parâmetros volumétricos e mecânicos de diferentes misturas asfálticas;
- Apresentar uma metodologia de análise dos agregados na estrutura interna de misturas asfálticas utilizando o PDI.

### **1.3 Organização da dissertação**

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

Capítulo 1: apresenta as considerações iniciais relacionadas ao trabalho desenvolvido, contextualizando o problema de pesquisa e apresentando os objetivos geral e específicos que deverão ser atingidos ao final da dissertação;

Capítulo 2: traz uma revisão bibliográfica realizada através da busca na literatura por trabalhos que tratam do tema geral da pesquisa, apresentando também informações referentes aos principais conceitos a serem abordados, como: produção de agregados, propriedades de forma, de angularidade e de textura de agregados e sua influência no desempenho de misturas asfálticas, método Bailey de seleção granulométrica, PDI, entre outros;

Capítulo 3: apresenta a caracterização básica dos materiais usados no programa experimental, bem como a metodologia a ser abordada, como os ensaios e os equipamentos utilizados;

Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos para todos os materiais analisados, o que inclui desde a caracterização dos agregados e das misturas asfálticas, até a discussão a respeito das relações existentes entre esses resultados;

Capítulo 5: traz as principais conclusões que puderam ser delimitadas a partir dos resultados desta pesquisa, além de sugestões para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Agregados são materiais granulados com forma e volume indefinidos que possuem propriedades e tamanhos suficientes para atender às obras de engenharia civil, inclusive relacionadas à pavimentação. Podem ser classificados quanto à origem (naturais ou artificiais), quanto à dimensão de seus grãos e quanto à sua massa específica. Alguns autores consideram como agregados artificiais aqueles que necessitam de qualquer tipo de beneficiamento, como é o caso da brita, enquanto outros consideram como artificiais aqueles materiais que são obtidos através de processos industriais, como é o caso da escória de aciaria.

Em relação à dimensão, os agregados são classificados como graúdos e miúdos, mas também costumam receber outras denominações, como fíler, areia, pedrisco, pedregulho e brita. Agregados miúdos são aqueles cujas partículas passam pela peneira com abertura da malha de 4,75mm (#4), enquanto que os agregados graúdos são aqueles cujas partículas ficam retidas nessa citada peneira. Brita, também chamada de pedra britada, é o agregado graúdo originado da quebra (ou britagem) de rochas. Pó de pedra é o material passante pela peneira de abertura de 0,075mm (#200). Chama-se de areia o agregado miúdo obtido através de processos naturais ou não: areia natural é aquela que resulta apenas da ação da natureza, e areia artificial é aquela que necessita de processos de britagem para ser produzida. Outros materiais, como pedregulho, cascalho ou seixo rolado são agregados graúdos utilizados na construção civil ou na pavimentação sem nenhum tratamento prévio, exceto lavagem ou seleção de suas partículas.

### **2.1 Produção de agregados na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF)**

Esta seção traz algumas informações relevantes que constam no relatório intitulado “A Indústria de Agregados para Construção Civil na Região Metropolitana de Fortaleza” de Cavalcanti e Parahyba (2011), produzido pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Mais informações e detalhes podem ser encontrados no documento citado.

A Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) é composta por 15 municípios do estado do Ceará: Fortaleza, Caucaia, Maranguape, Pacatuba, Aquiraz, Maracanaú, Eusébio, Guaiúba, Itaitinga, Chorozinho, Pacajus, Horizonte, São Gonçalo do Amarante, Pindoretama

e Cascavel. Possui atualmente uma população de aproximadamente 3,6 milhões de habitantes, sendo a sexta maior região metropolitana do país.

A produção de agregados na RMF é destinada para a construção de obras de infraestrutura e de serviços básicos como habitações, pavimentos, reservatórios de águas e esgotos. O maior mercado consumidor de agregados na RMF é a construção civil, que utiliza brita e areia em suas obras. A indústria de brita nesta região é composta por mineradoras de pequeno e médio porte, e a de areia possui empresas de pequeno e micro porte. A produção de agregados na RMF utiliza, basicamente, rochas graníticas e vulcânicas, e o uso desses materiais se dá em concretos para construções, lastros de ferrovias, bases e revestimentos para pavimentos asfálticos.

Os municípios de Caucaia, Itaitinga, Maracanaú e Eusébio são alguns que possuem áreas com rochas a serem exploradas pela mineração. No município do Eusébio, localiza-se uma área com rochas vulcânicas de origem fonolítica, enquanto que em todos os outros locais, a matéria prima é composta por rochas de origem granítica. Os municípios de Itaitinga e de Caucaia são aqueles com a maior concentração de pedreiras na RMF, sendo seis localizadas no primeiro e três localizadas no segundo. As principais utilizações de agregados britados na RMF são na fabricação de concreto, na pavimentação de vias, no lastro de ferrovias, em barramentos, em enrocamentos, em filtros e em outros serviços similares.

## **2.2 Influência das propriedades dos agregados em misturas asfálticas**

### **2.2.1 Forma**

Uma grande porcentagem de agregados planos e alongados na mistura asfáltica pode provocar quebra dos mesmos durante o processo de compactação, o que faz com o que a composição granulométrica da mistura se altere, trazendo, assim, mudanças nas propriedades inicialmente esperadas. Os agregados planos também possuem uma tendência a repousar no pavimento, facilitando a derrapagem e reduzindo o intertravamento. Por outro lado, uma porcentagem muito pequena de agregados planos e alongados na mistura pode aumentar o Volume de vazios ( $V_v$ ) projetado em laboratório. Nascimento (2008) verificou que, em misturas com agregados mais lamelares, os valores encontrados para Vazios no Agregado Mineral (VAM) foram elevados, necessitando, assim, de uma elevada quantidade de ligante asfáltico, a fim de se obter o  $V_v$  desejado.

De acordo com Furlan *et al.* (2004), as propriedades de forma dos agregados influenciam diretamente na resistência ao dano por umidade da mistura asfáltica, afirmando que a forma ideal dos agregados para o uso nestes materiais é a cúbica. Em seus estudos, concluíram que agregados mais lamelares, ao contrário do que se esperava, são mais resistentes ao dano por umidade. Uma possível explicação para isso seria o fato de que os agregados mais lamelares utilizados nesse estudo possuíam um filme de ligante mais espesso, fornecendo uma maior resistência à ruptura da mistura. Dessouky *et al.* (2006) afirmaram que, agregados com forma não-esférica ditam o nível de anisotropia da estrutura, ou seja, orientam o arranjo dos agregados quando são aplicadas as forças de compactação.

### **2.2.2 Angularidade**

A angularidade de um agregado influencia na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, uma vez que, em agregados irregulares ou angulares, existe maior entrosamento e resistência ao deslocamento entre as partículas quando ocorre a compactação. Wedding e Gaynor (1961) avaliaram o efeito de agregados mais angulares em misturas de graduação densa. O uso desses agregados aumentou a estabilidade da mistura em comparação a misturas compostas por agregados menos angulares.

Os resultados apresentados por Foster (1970) indicaram que, ao serem realizados ensaios simulando o carregamento de tráfego em algumas seções de pavimentos, o desempenho das misturas asfálticas contendo agregados graúdos angulares e não-angulares foi praticamente o mesmo, concluindo que a resistência às tensões de tráfego induzidas está mais relacionada à angularidade do agregado miúdo, quando se considera misturas de composição granulométrica densa.

Cross e Purcell (2001) mostraram que, o aumento da angularidade dos agregados miúdos resulta no aumento da resistência à deformação permanente das misturas quando se utiliza areia natural e calcário. Stiadny *et al.* (2001) avaliaram, em 21 misturas, o efeito da angularidade do agregado miúdo utilizando um método laboratorial de simulação de tráfego (*Purdue Laboratory Wheel Track Device*, ou *PURWheel*) e mostraram que existe uma boa correlação entre o desempenho de misturas com os valores obtidos no ensaio de angularidade do agregado miúdo. Sanders e Dukatz (1992) realizaram experimentos em quatro seções experimentais de pavimentos no estado de Indiana, nos Estados Unidos. Em uma das seções, foi constatada a ocorrência de deformação permanente após apenas dois anos de serviço do

pavimento. Estudos revelaram que, essa seção era aquela que possuía uma menor quantidade de agregados graúdos angulares na camada de revestimento, se comparada às outras seções.

Furlan *et al.* (2004) reforçaram a ideia de que agregados com cantos mais agudos ou mais angulares possuem um melhor atrito e intertravamento entre si, o que fornece uma estrutura mais resistente e estável. Porém, estes mesmos agregados angulares podem causar uma perfuração indesejada no filme de ligante, possibilitando assim a entrada de água na mistura favorecendo o dano por umidade induzida.

Souza (2009) afirmou que, agregados arredondados podem ser classificados como tendo baixa angularidade, e agregados não arredondados podem ser classificados como tendo alta angularidade. Agregados angulares proporcionam maior intertravamento e atrito interno entre si, formando uma estrutura granular mais rígida. Com relação a agregados com cantos arredondados, ao invés de se intertravarem, tendem a deslizar uns sobre os outros, resultando em uma estrutura granular mais fraca e, portanto, em misturas menos estáveis (CUNHA *et al.*, 2004).

No que diz respeito à trabalhabilidade da mistura, Roberts *et al.* (1996) consideram que, partículas arredondadas apresentam vantagens quando comparadas a partículas angulares, uma vez que misturas com agregados arredondados requerem um menor esforço durante a compactação para se obter a densidade desejada. Por outro lado, a facilidade na compactação de misturas com agregados arredondados pode ser desvantajosa, uma vez que este processo pode continuar ao longo do tempo devido à ação do tráfego, causando o aumento da densidade, e, assim, possíveis problemas relacionados à resistência a deformação permanente.

Em relação à angularidade de agregados miúdos, Stakston (2002) mostrou que, esse parâmetro, juntamente à granulometria, é um dos fatores determinantes no comportamento mecânico de misturas asfálticas. Stiadny *et al.* (2001) verificaram que, misturas com agregados miúdos com angularidade elevada não estão necessariamente associadas ao melhor desempenho em relação ao Afundamento da Trilha de Roda (ATR) se comparadas aquelas com agregados miúdos de angularidade inferior. Essa ideia é reforçada por Delage (2000) que concluiu em seu trabalho que, valores elevados de angularidade para os agregados miúdos não produzem necessariamente misturas com bom desempenho em relação à resistência à deformação permanente. Além disso, esse autor mostrou que, essa característica (angularidade) é dependente da origem e da granulometria dos agregados, e que as propriedades volumétricas das misturas asfálticas não retratam o efeito da angularidade dos

agregados miúdos no que diz respeito à trabalhabilidade e à resistência à densificação provocada pelo tráfego.

### ***2.2.3 Textura superficial***

Al Rousan (2004) descreveu a textura como sendo a irregularidade da superfície do agregado em uma escala que é pequena demais para afetar a forma geral do mesmo. A forma em que os agregados se juntam é influenciada diretamente pela textura de suas partículas. Uma textura mais rugosa gera mais atrito entre os agregados, tornando a mistura mais resistente à compactação. Sendo assim, para um dado número de giros na compactação, a mistura não irá compactar o suficiente e o  $V_v$  será muito alto. Uma textura mais lisa, em contraste, não gera tanto atrito entre os agregados. Assim, para um dado número de giros, a mistura contendo partículas mais lisas irá compactar mais facilmente, e o  $V_v$  será menor.

De acordo com Sousa *et al.* (1991), a textura superficial dos agregados possui um papel importante quando se trata da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. Em particular, para as camadas de pavimentos mais espessas e para climas mais quentes, faz-se necessário o uso de agregados com superfícies rugosas. Esses autores afirmam ainda que, para pavimentos espessos, agregados rugosos também devem aumentar a rigidez das misturas, o que melhora sua vida de fadiga. Mostraram ainda que, para pavimentos mais esbeltos, o uso de agregados com superfícies lisas, apesar de produzir misturas menos rígidas, é aceitável, pois neste caso a vida de fadiga também aumenta.

Kim *et al.* (2002) mostraram que, agregados com textura superficial mais rugosa promovem uma ligação mais forte entre o ligante asfáltico e os agregados. Esses autores realizaram uma análise da superfície de ruptura de misturas que foram submetidas ao ensaio de fadiga. Essa análise revelou que, a ruptura das misturas que continham agregados mais lisos ocorreu nas ligações entre ligante asfáltico e agregados, enquanto que nas misturas que continham agregados mais rugosos, a ruptura ocorreu na superfície dos agregados, indicando, assim, uma união mais forte entre ligante asfáltico e agregado.

Mahmoud e Bahia (2004) mostraram que, o fator textura superficial dos agregados influencia na resistência ao ATR da mistura. Dessouky *et al.* (2006) verificaram que, misturas constituídas de agregados com textura superficial mais lisa possuem um *Contact Energy Index* (CEI), valor da energia consumida durante a formação de pontos de contato entre os agregados da mistura durante a compactação, mais baixo.

Yeggoni *et al.* (1996) realizaram um estudo no Instituto de Transportes do Texas que mostrou que existe uma correlação entre a superfície dos agregados que compõem uma mistura e o seu comportamento mecânico em relação aos ensaios de *creep* estático e dinâmico. A medida de textura utilizada por estes autores foi a *fractal dimension*, que é capaz de quantificar a forma, a alongação e a textura superficial de objetos através dos níveis de cinza de suas imagens. Os resultados obtidos mostraram que houve uma redução no *Flow Number* (FN) e, conseqüentemente, na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas de mesma granulometria quando se aumentou a porcentagem de agregados graúdos britados, ou seja, aqueles com superfícies mais rugosas. Também mostraram que, a elevadas temperaturas, o aumento na quantidade de agregados britados elevou os valores de Módulo de Resiliência (MR) das misturas. A baixas temperaturas, o efeito do tipo de agregado pouco influenciou nessa propriedade citada. Por fim, o parâmetro de estabilidade Marshall também aumentou com a maior quantidade de agregados britados.

### **2.3 Resistência dos agregados ao polimento e à degradação**

As características de microtextura dos revestimentos asfálticos estão diretamente ligadas à resistência ao polimento dos agregados, afetando, assim, as propriedades relacionadas com o atrito desta camada. Além disso, a resistência à degradação, propriedade que envolve a abrasão e a quebra dos agregados, também é um importante parâmetro a ser considerado no desempenho dos pavimentos. Enquanto que a abrasão pode ser definida como a perda de angularidade, a quebra se refere à fratura dos agregados. Alguns agregados sofrem abrasão e quebra significativas durante as operações de produção dos próprios agregados e compactação das misturas, o que acaba resultando na mudança de características críticas para o projeto destas misturas. Exemplos de mudança são: a variação da composição de agregados da mistura em relação àquela projetada e a perfuração do filme de ligante asfáltico com o surgimento de agregados muito pontiagudos (MAHMOUD, 2005).

#### **2.3.1 Polimento de agregados**

A resistência à derrapagem de um pavimento asfáltico depende diretamente das propriedades de micro e macrotextura de sua superfície. De acordo com Kandhal e Parker

(1998), a microtextura de uma mistura asfáltica depende principalmente das características de forma dos agregados que a constituem, enquanto que a macrotextura é função das propriedades da mistura, dos métodos de compactação e da granulometria da composição de agregados, além da interação dos agregados com o ligante asfáltico.

Os agregados utilizados na pavimentação são submetidos ao desgaste causado pelo atrito do tráfego de veículos, sendo assim necessário que os mesmos resistam a esses esforços. A possibilidade de se realizar a medida do polimento dos agregados se torna importante para a pavimentação, pois, através dessa medida, pode-se garantir uma maior segurança ao tráfego. O polimento afeta as propriedades de microtextura do pavimento e, em consequência, o atrito que existe entre o pneu dos veículos e a superfície da camada de rolamento (PEREIRA, 2010).

A resistência da superfície dos pavimentos asfálticos em relação à derrapagem e ao atrito deve ter um limite mínimo aceitável para os padrões de segurança das vias (BLOEM, 1971). De acordo com Abdul-Malak *et al.* (1996), os agregados graúdos são os maiores responsáveis pelo desenvolvimento de pontos de contato entre os pneus dos veículos e a superfície do pavimento, o que acaba provocando o aparecimento de forças de atrito.

### ***2.3.2 Degradação de agregados***

As características de resistência à degradação dos agregados, que estão diretamente ligadas às propriedades de abrasão e de quebra dos mesmos, podem ser verificadas quando estes são submetidos aos processos de produção e de construção antes do início da vida útil do pavimento. A degradação ocorre, geralmente, durante a construção do pavimento e, como consequência, tende a afetar a composição granulométrica dos agregados, fazendo com que as misturas asfálticas produzidas em campo sejam diferentes daquelas projetadas em laboratório (WU *et al.*, 1998).

Gatchalian *et al.* (2006) afirmam que, o esqueleto mineral de misturas do tipo *Open Graded Friction Course* (OGFC) e *Stone Matrix Asphalt* (SMA) pode impor forças muito elevadas nos pontos de contato entre seus agregados ao ponto de ocorrer fraturas das partículas, comprometendo, assim, o desempenho da mistura. Airey *et al.* (2008) concluíram que, as misturas abertas tendem a ter uma maior degradação de seus agregados quando comparadas com as misturas densas. Além disso, um aumento na energia de compactação

deve ter uma pequena influência na degradação dos agregados, aumentando pouco a quebra dos mesmos. O tipo de mistura e, assim, a granulometria exercem uma influência maior.

### **2.3.3 Ensaios de resistência ao polimento e à degradação**

Existem diversas metodologias disponíveis para avaliar a resistência ao polimento de agregados e a alteração de suas características relacionadas ao atrito. Algumas delas, como o uso do pêndulo britânico, já estão difundidas há muito tempo, enquanto outras vêm sendo desenvolvidas e aprimoradas em alguns países e laboratórios mais recentemente (MAHMOUD, 2005). A metodologia de uso do pêndulo britânico, baseada na norma ASTM E 303-98, consiste no lançamento de um pêndulo padronizado em direção a uma amostra de pavimento molhado, para que possa ser medida a perda de energia da sapata de borracha do pêndulo, devido ao atrito, quando ela desliza sobre a superfície do pavimento. Pereira (2010) realizou esse ensaio em placas de misturas asfálticas produzidas em uma mesa compactadora do tipo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*). A medição através do pêndulo foi feita em dois momentos, sendo uma antes da simulação de tráfego e outra após 10.000 ciclos de simulação. O resultado obtido foi a perda de aproximadamente 15% na textura superficial para as misturas avaliadas.

Várias pesquisas têm mostrado que, a avaliação do polimento através do ensaio com o uso do pêndulo britânico pode não trazer resultados representativos, uma vez que o procedimento realizado por esse ensaio é função de diversos fatores, como a forma de arranjo dos agregados, o número de passadas do pêndulo, o tamanho dos agregados e a curvatura das amostras (MAHMOUD, 2005). Perry *et al.* (2001) utilizaram o pêndulo britânico e, também, concluíram que o mesmo pode não ser um bom indicador da resistência dos agregados à derrapagem, pois o procedimento realizado nesse ensaio depende diretamente do tamanho das partículas estudadas.

Outro ensaio que é utilizado para a medição do polimento de agregados é o chamado *Penn State Reciprocating Polishing Machine Method*, que requer o uso de uma máquina portátil capaz de polir agregados ou misturas asfálticas em laboratório ou em campo. Esse equipamento aplica uma espécie de bloco de borracha sobre a superfície de uma amostra a ser polida, enquanto a amostra também é submetida ao contato com a água e a carga abrasiva (NITTA *et al.*, 1990). Mullen *et al.* (1971) sugeriram um método laboratorial para a avaliação do polimento de agregados, chamado de *Circular Track Wear Method*. O método se

baseia no polimento de amostras de pavimento colocadas em uma pista circular submetida ao polimento através de pneus de pequeno diâmetro, por um período de 16 horas. Em seguida, é utilizado o pêndulo britânico para a avaliação da textura.

Crouch e Dunn (2005) desenvolveram dois métodos de avaliação da resistência ao polimento de agregados em revestimentos asfálticos. O primeiro, chamado de *Tennessee Terminal Textural Condition Method*, utiliza o equipamento de abrasão Los Angeles para polir uma amostra de agregado até que ela chegue a sua condição de textura terminal, que pode ser representada como sendo o estado no qual as partículas de agregado atingem mínima angularidade e rugosidade superficial. Após o polimento, as propriedades de textura e de angularidade dos agregados são então quantificadas em um equipamento que mede a porcentagem de vazios não-compactados em uma amostra de agregados. O segundo método desenvolvido foi um aprimoramento do primeiro, porém utilizando o equipamento *Micro-Deval* para a realização do polimento dos agregados. Esse método apresentou algumas vantagens em relação ao primeiro: (i) menor tamanho de amostra; (ii) redução do tempo de polimento em aproximadamente 75% e (iii) estabelecimento de um ponto específico para o término do ensaio.

Em relação à degradação, o ensaio realizado no equipamento de abrasão Los Angeles (normatizado pelo DNER-ME 35/98) é o mais conhecido e o mais utilizado nos laboratórios ao redor do mundo. Esse ensaio é utilizado para medir a resistência do agregado à abrasão e à dureza (KANDHAL e PARKER, 1998). A amostra de agregado é colocada juntamente com esferas de aço dentro de um tambor, que gira numa frequência específica, promovendo uma interação das partículas de agregados e entre os agregados e as esferas. Esse movimento submete o material a diferentes processos: abrasão, impacto e trituração. Como o ensaio é bastante severo, acaba sendo mais um teste para avaliação da resistência ao impacto ao invés da resistência à abrasão, por isso o ensaio atualmente vem sendo chamado de ensaio Los Angeles de Abrasão e Impacto (ROGERS, 1998).

Rogers (1998) ressalta que, a avaliação realizada através da utilização do ensaio de abrasão Los Angeles quantifica, na realidade, a resistência dos agregados em relação à quebra e não à abrasão. Isso se deve ao fato de que o ensaio resulta em um valor de porcentagem de massa perdida da amostra de agregado, desconsiderando a forma dos mesmos após as rotações do tambor e o contato com as esferas de aço. Sendo assim, um baixo valor do parâmetro Los Angeles, ou seja, pouca perda de massa durante o ensaio, não necessariamente indica agregados resistentes à abrasão, por exemplo.

O segundo ensaio, mais comumente usado para a medição da resistência à abrasão dos agregados, é realizado no equipamento *Micro-Deval* (AASHTO TP 58-00). Desenvolvido originalmente nos anos 60 na França, esse ensaio avalia a durabilidade e a resistência à abrasão dos agregados através do contato entre as partículas de agregados e as pequenas esferas de aço, na presença de água (COOLEY e JAMES, 2003). Diversos autores têm feito comparações entre os resultados dos ensaios realizados no equipamento de abrasão Los Angeles e no *Micro-Deval*. Rogers (1998) afirma que, o contato com a água durante o ensaio no *Micro-Deval* simula melhor as condições em campo se comparado à condição seca do ensaio de abrasão Los Angeles.

Existem outros ensaios para avaliação da resistência à abrasão usados na Europa, como o *Aggregate Abrasion Test* e o *Nordic Ball Mill Test*. O primeiro, realizado em condição seca, utiliza um prato de aço que gira sob os agregados realizando abrasão nos mesmos, já o segundo é apenas uma adaptação do ensaio no *Micro-Deval*, com algumas modificações no que diz respeito à velocidade de rotação, ao tamanho das esferas de aço, a carga abrasiva e a peneira de corte para a determinação da perda de massa (MAHMOUD, 2005). Outro ensaio utilizado está descrito no DNER-ME 399/99 e consiste na determinação da perda de massa do agregado devido ao choque ou ao impacto. O equipamento utilizado chama-se Treton e este possui um cilindro de aço oco e aberto em ambas as extremidades. O processo de impacto é realizado através de um martelo cilíndrico que cai livremente sobre a amostra (BERNUCCI *et al.*, 2007).

## **2.4 Método Bailey de seleção granulométrica**

Quando se discute o papel dos agregados em misturas asfálticas, os engenheiros rodoviários geralmente se referem ao esqueleto mineral formado pelos mesmos. É fato que a maior parte da resistência dos pavimentos sob condições de tráfego pesado pode ser atribuída aos agregados, devido às suas propriedades de dureza, de forma, de textura, além da distribuição granulométrica dos mesmos. A ferramenta mais utilizada para avaliar a granulometria de uma mistura asfáltica é o gráfico da distribuição dos tamanhos dos grãos por peneiras. Além disso, existem algumas regras, como a indicação de que a distribuição granulométrica dos agregados de uma mistura deve evitar a linha de densidade máxima, porém sabe-se que o uso da experiência dos projetistas é a melhor forma de se conhecer o efeito da granulometria nas propriedades das misturas (VAVRIK *et al.*, 2002).

Desenvolvido por Robert Bailey no Departamento de Transportes do estado de Illinois, nos Estados Unidos, o Método Bailey vem sendo usado desde o início dos anos 80 e aprimorado principalmente por VAVRIK e seus colaboradores (VAVRIK *et al.*, 2001 e 2002). O objetivo dos esforços que vêm sendo realizados nesse sentido é tornar o método eficiente para qualquer tipo de mistura asfáltica, com agregados com qualquer Tamanho Máximo Nominal (TMN) (CUNHA, 2004).

O princípio básico do Método Bailey para seleção granulométrica é considerar as características de arranjo dos agregados, além de parâmetros ligados ao VAM, ao Vv e a compactação das misturas. Este método foi desenvolvido com o objetivo principal de se obter, em um projeto de pavimento, um melhor intertravamento entre os agregados de uma mistura asfáltica. Seus princípios podem ser usados para processos de controle de qualidade, apesar de não fornecerem um método de dosagem de mistura de fato (VAVRIK *et al.*, 2002). De acordo com Alshamsi (2006), o Método Bailey é capaz de fornecer uma perspectiva mais racional na avaliação do arranjo e da mistura de agregados. Em sua pesquisa, esse autor dosou misturas asfálticas através desse método e obteve parâmetros volumétricos mais próximos daqueles aceitáveis para as misturas graúdas.

Wald (2003) mostrou que, o Método Bailey resultou apenas em um pequeno nível, quase insignificante do ponto de vista da engenharia, de melhoria no que diz respeito à resistência à deformação permanente, para misturas asfálticas dosadas com agregados típicos do estado do Arkansas (Estados Unidos). No entanto, constatou que, esse método pode ser uma ferramenta importante para alterar sistematicamente as propriedades volumétricas de uma mistura asfáltica quando esta estiver sendo dosada.

Cunha (2004) estudou diferentes misturas asfálticas, sendo algumas com granulometrias selecionadas pelo Método Bailey, e mostrou que as mesmas apresentaram maiores valores de VAM e de Relação Betume Vazio (RBV) em comparação com as misturas produzidas com granulometrias selecionadas pelo método tradicional. Esse resultado é um indicativo de uma melhor resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga por parte das misturas com granulometrias selecionadas através do Método Bailey. No entanto, os resultados dos ensaios de estabilidade Marshall geraram melhores resultados para as misturas com granulometrias selecionadas de forma convencional.

Gouveia (2006) avaliou misturas asfálticas com granulometrias Acima da Zona de Restrição (AZR) e com granulometrias selecionadas através do Método Bailey e mostrou que as primeiras apresentaram valores mais elevados para algumas propriedades, como Resistência à Tração (RT) e MR. Em relação à vida de fadiga, a mistura com granulometria

AZR composta por gábro como agregado teve sua curva de fadiga menos inclinada em comparação à mistura com granulometria selecionada pelo método Bailey, ou seja, esta se mostrou menos susceptível às variações de tensões. Já para as misturas compostas por agregados basálticos, as curvas de fadiga apresentaram, aproximadamente, a mesma inclinação, porém para uma mesma diferença de tensões, a mistura com granulometria Bailey resistiu a um menor número de aplicações de carga.

Souza (2007) apresentou mostraram que misturas asfálticas compostas por seixo rolado tiveram um melhor desempenho em relação à vida de fadiga quando produzidas através da seleção granulométrica recomendada pelo Método Bailey. Bhosale e Mandal (2008) afirmaram que, o uso do Método Bailey para selecionar a composição granulométrica de misturas asfálticas porosas, como a *Open Graded Asphalt Concrete* (OGAC), gera granulometrias mais eficientes do ponto de vista mecânico.

Yu e Shen (2010) investigaram o arranjo de agregados através de uma análise por meio de simulação utilizando o Método dos Elementos Discretos (MED), que relacionou os parâmetros de granulometria de misturas com suas propriedades volumétricas. Com isso, foi desenvolvido um novo método para diferenciar agregados graúdos de agregados miúdos. A peneira de corte entre os dois tamanhos de agregados foi adotada como a mesma sugerida pelo Método Bailey. Lee *et al.* (2010) estudaram amostras de misturas asfálticas com diferentes granulometrias, todas selecionadas pelo Método Bailey, e obtiveram como resultado diferenças insignificantes em relação ao resultado do ensaio de RT.

## **2.5 Influência da estrutura interna no desempenho de misturas asfálticas**

A formação da estrutura interna de um CA desempenha papel importante na resistência do pavimento com relação aos principais defeitos, como deformação permanente, trincamento por fadiga e térmico (MONISMITH, 1991; VINSON *et al.*, 1999; BERNUCCI *et al.*, 2007). Os diferentes métodos e esforços de compactação são responsáveis pelo arranjo dos agregados dentro da estrutura interna de uma mistura asfáltica. A formação do esqueleto mineral resulta da forma com que esses agregados são distribuídos na mistura e da presença dos pontos de contato entre suas partículas (VASCONCELOS *et al.*, 2005).

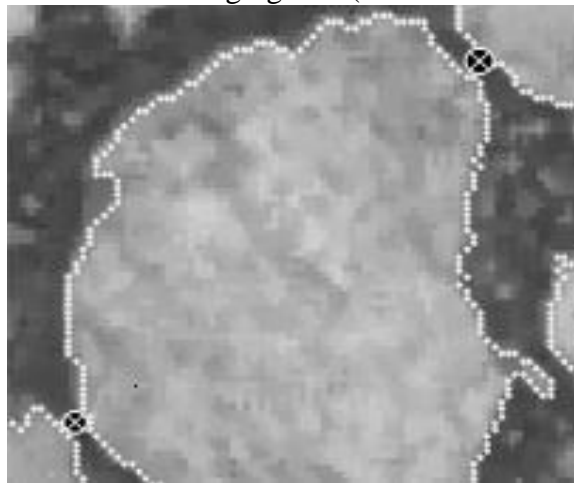
Diferentes métodos de compactação podem produzir misturas asfálticas com propriedades distintas em relação à estrutura interna das mesmas, quais sejam: distribuição de vazios, orientação variável dos agregados e posicionamento dos pontos de contato entre as

partículas. A diferença nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas tidas como iguais, porém compactadas por métodos diferentes, têm sido atribuída principalmente à estrutura interna das mesmas (CONSUEGRA *et al.*, 1989; MASAD *et al.*, 1998). Para realizar uma previsão mais realista do desempenho de uma dada mistura asfáltica (em relação à resistência à deformação permanente, ao trincamento, ou ambos), é necessário considerar a natureza heterogênea da microestrutura desse material.

### 2.5.1 Pontos de contato

Pode-se considerar a ocorrência de um ponto de contato entre dois agregados quando estes estiverem separados um do outro a uma distância máxima a ser definida. A Figura 1 mostra um esquema do contato entre duas partículas. Existe uma relação entre a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas e o número de pontos de contatos existentes entre os agregados. Tashman *et al.* (2001) concluíram que, o número de pontos de contato entre os agregados de uma mistura depende dos parâmetros e dos métodos de compactação. Sousa *et al.* (1991) mostraram que, amostras produzidas no compactador por amassamento possuem uma maior resistência à deformação permanente se comparadas àquelas produzidas por outros métodos. Isso é devido à eficiência na produção de misturas com maior número de pontos de contato entre as partículas.

Figura 1 - Contato entre agregados (MAHMOUD *et al.*, 2010)

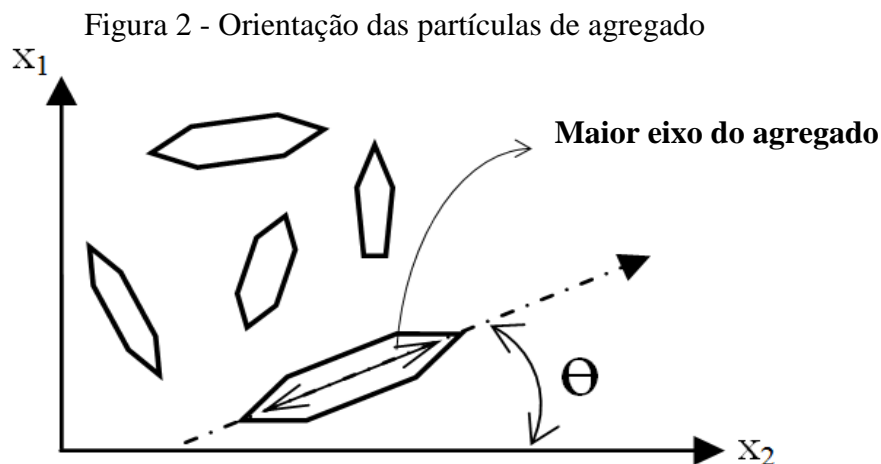


### 2.5.2 Orientação das partículas

A orientação de um agregado é a medida angular existente entre o maior eixo de uma partícula e a horizontal. Esse eixo é definido pela maior distância entre dois pontos do contorno da partícula (MASAD *et al.*, 1999; TASHMAN *et al.*, 2001; BESSA *et al.*, 2009; LOPES *et al.*, 2010). Com os valores de orientação de cada partícula é possível quantificar a distribuição direcional dos agregados, através do parâmetro vetor magnitude ( $\Delta$ ), de acordo com a Equação 1. A Figura 2 mostra um esquema ilustrando a orientação de uma partícula.

$$\Delta = \left(\frac{100}{N}\right) \times \sqrt{\left(\sum \text{sen } 2\theta_k\right)^2 + \left(\sum \text{cos } 2\theta_k\right)^2} \quad (1)$$

Onde:  $\Delta$  = vetor magnitude, em %;  $\theta_k$  = ângulo com a horizontal de um agregado isolado e  $N$  = número de agregados analisados na imagem.



O vetor magnitude descreve a orientação preferencial das partículas de agregados e varia de 0 a 100%. Um valor igual a 0% significa uma distribuição completamente aleatória das partículas, e um valor igual a 100% significa que os agregados estão alinhados exatamente na mesma direção (MASAD *et al.*, 1999; 2009). De acordo com Tashman *et al.* (2004), a anisotropia é causada pela distribuição não-uniforme dos constituintes da microestrutura. Materiais anisotrópicos possuem propriedades mecânicas dependentes da direção de suas partículas. Masad *et al.* (1999) verificaram uma tendência de orientação uniforme dos agregados com o aumento do esforço de compactação das misturas asfálticas até 100 giros. A partir daí, a estrutura de agregados começa a ter uma orientação que pode ser considerada aleatória. Esses autores compararam ainda a estrutura interna de amostras geradas no

Compactador Giratório Superpave (CGS) com aquelas obtidas da extração em campo. Estes autores concluíram que, para atingir o grau de orientação encontrado em misturas asfálticas no campo é necessário um número de giros mais elevado do que o necessário para obter o Vv especificado. O Vv das amostras no campo foi obtido com aproximadamente 25 giros, e o vetor magnitude com 100 giros. Com 100 giros, o Vv encontrado para as amostras investigadas era equivalente a metade do esperado.

Hunter *et al.* (2004) concluíram que, a orientação das partículas deve ser induzida pela presença de condições de contorno de confinamento, e que placas produzidas em mesas compactadoras possuem um ângulo de orientação mais baixo, resultando em misturas asfálticas com menor resistência à deformação permanente em relação àquelas produzidas utilizando-se outros métodos de compactação, como o giratório ou o vibratório. Zhang *et al.* (2008) mostraram que, amostras produzidas pelo CGS possuem agregados com orientação mais uniforme, ou seja, maior vetor magnitude, se comparadas a amostras produzidas pelo compactador do tipo vibratório.

Vasconcelos *et al.* (2005) mostraram que, tamanhos menores de agregados, retidos nas peneiras de N<sup>o</sup>4 e N<sup>o</sup>10, tendem a se distribuir mais uniformemente. Para as misturas avaliadas deste citado estudo, as amostras compactadas utilizando-se a metodologia Marshall apresentaram agregados, em termos de vetor magnitude, distribuídos de forma menos uniforme, entre 3 e 18% para as granulometrias estudadas. Porém esses mesmos autores concluíram que, tanto a compactação Marshall quanto aquela gerada pelo CGS geram misturas com agregados aleatoriamente orientados. Tashman *et al.* (2001) concluíram que, o ângulo de inclinação com a horizontal dos agregados miúdos (menores do que 4,75mm) não é influenciado pela compactação. Os resultados desse estudo mostraram que, a orientação dos agregados graúdos indicava uma anisotropia transversal, uma vez que a compactação não levava a um arranjo uniforme no plano horizontal, porém isso aconteceu nas seções do plano vertical.

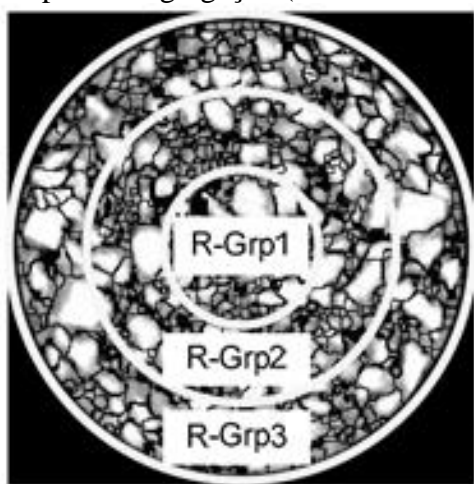
### ***2.5.3 Segregação das partículas***

Em geral, a segregação pode ser definida como a falta de homogeneidade entre os constituintes (ligante asfáltico, agregados graúdos e miúdos) de uma mistura asfáltica em um grau suficiente para acelerar os defeitos do pavimento (STROUP-GARDINER e BROWN, 1998). A Figura 3 mostra uma ilustração de grupos em um corte transversal de um Corpo-de-

Prova (CP), na qual se pode perceber diferentes graus de segregação. Estes três grupos serão estudados nesta pesquisa, porém, vale lembrar que, existem outros tipos de segregação, como aquela ao longo da altura dos CPs.

De forma ideal, uma mistura asfáltica com granulometria contínua deve possuir uma distribuição uniforme de seus agregados. No entanto, os processos de compactação em laboratório tornam inevitável a segregação das partículas, devido à dificuldade em depositar uniformemente a mistura quente nos moldes. Métodos de compactação giratória e vibratória induzem a uma maior ocorrência de segregação se comparados aos métodos de fabricação de placas (HUNTER *et al.*, 2004).

Figura 3 - Grupos de segregação (MAHMOUD *et al.*, 2010)



Masad *et al.* (1999) avaliaram a segregação dos agregados através de dois procedimentos que apresentaram resultados próximos. Estes autores verificaram que, as amostras extraídas do campo possuíam agregados mais segregados, ou seja, eram misturas menos homogêneas se comparadas àquelas produzidas em laboratório. Essa segregação não é desejada, uma vez que misturas com agregados mais segregados tendem a ter pior desempenho. Embora se deva buscar a melhor compactação, é importante ter em mente que a compactação realizada em laboratório deve simular a compactação encontrada em campo. A caracterização mecânica de misturas parte deste pressuposto, qual seja, que propriedades estão sendo obtidas de um material semelhante ao que estará em serviço. Tashman *et al.* (2001) obtiveram a segregação lateral, ou a distribuição radial, dos agregados e concluíram que os agregados graúdos tendem a se localizar na parte mais externa da seção horizontal de um CP, quando estes são compactados no CGS. Este fato não acontece em amostras extraídas do campo, nas quais os agregados se encontram menos segregados. Hunter *et al.* (2004)

concluíram que, a compactação vibratória pode induzir a uma migração das partículas de agregado para as bordas do CP, enquanto que a compactação realizada com o uso da mesa compactadora deve resultar em uma menor segregação.

## **2.6 Técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI)**

Os ensaios tradicionais para a caracterização de agregados em relação às propriedades de forma, de angularidade e de textura apresentam diversas dificuldades, o que acaba levando ao uso crescente e ao aprimoramento de técnicas de PDI. De acordo com Bessa (2010) e Castelo Branco (2006), os ensaios manuais de caracterização são simples, porém demandam muito tempo e trazem resultados muitas vezes imprecisos e irreais. Algumas das outras desvantagens desses métodos são: a falta de conexão entre as propriedades de agregados graúdos e miúdos, a influência de mais de uma propriedade em um ensaio apenas, e a medição indireta das propriedades (AL ROUSAN *et al.*, 2004).

Outra dificuldade é a análise da estrutura interna de amostras de misturas asfálticas, seja por métodos destrutivos ou não, como através de parâmetros relacionados à distribuição das partículas dos agregados e dos vazios nas misturas. Com tudo isso, diferentes métodos de análise de imagens têm sido utilizados ao longo dos últimos anos para tornar mais fácil e obter melhores resultados em relação às diversas propriedades citadas.

Diversas técnicas com relação ao uso do PDI para a caracterização de agregados e de misturas asfálticas já podem ser encontradas na literatura. Algumas dessas técnicas são mais simples e rudimentares, além de utilizarem equipamentos simples e *software* computacionais gratuitos e fáceis de manusear. Entre as técnicas mais avançadas, que utilizam equipamentos mais caros e sofisticados, podem ser citadas o uso do equipamento AIMS e o da tomografia de Raios-X.

### **2.6.1 Software de imagens**

O uso do *ImageTool* (Figura 4a), *software* desenvolvido pelo *University of Texas Health Science Center in San Antonio* (UTHSCSA), envolve uma técnica de PDI composta pela digitalização de uma imagem real e a análise de seus componentes para a obtenção de parâmetros relacionados à forma e à orientação das mesmas. Esta técnica consiste de algumas

etapas até que os dados requeridos sejam extraídos. O *software* é utilizado para a análise de imagens e o processamento de dados, sendo possível alterar a resolução de imagens e converter seu formato. O *Digital Image Analysis System* (Figura 4b), desenvolvido por Mahmoud *et al.* (2010), permite a obtenção de resultados para parâmetros relacionados aos agregados que estão compondo uma mistura asfáltica, como orientação e segregação de suas partículas e pontos de contato existentes entre elas.

Ambos os métodos de PDI citados acima necessitam de um aparato composto por um *scanner* e um computador onde deve estar instalado o *software* a ser utilizado na análise. A preparação da amostra consiste em serrar um CP moldado em laboratório ou extraído de campo e com as propriedades volumétricas requeridas por critérios estabelecidos. As faces do CP são levadas ao *scanner* e, em seguida, digitalizadas em duas dimensões. Após a obtenção das imagens, são realizados procedimentos para o tratamento e para a transformação dessas imagens para que enfim ocorra a análise das partículas de agregados e a posterior obtenção dos resultados desejados.

Figura 4 - *Software* de imagens: (a) *ImageTool* e (b) *Digital Image Analysis System*



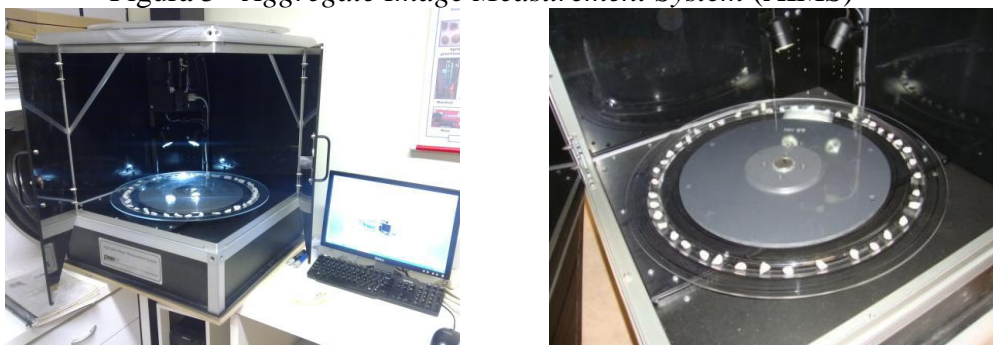
O uso de *software* para o PDI permite o acesso mais fácil a características de forma dos agregados, como perímetro e área, o que possibilita o cálculo de maneira mais precisa de parâmetros como a esfericidade, apresentando uma caracterização mais realista dos agregados (MASAD e BUTTON, 2000). Com a utilização dessas técnicas de PDI, é possível também obter a orientação dos agregados existentes em uma mistura. O arranjo dos agregados, em termos da distribuição espacial, da distribuição direcional e dos pontos de contato, é responsável pela formação do esqueleto mineral. Essas distribuições resultam do proporcionamento e das propriedades dos materiais, além da forma de compactação. A diferença nas propriedades de uma mesma mistura imposta a diferentes métodos de

compactação deve-se principalmente às diferenças na estrutura da mesma, em particular à distribuição e à orientação dos agregados graúdos. A microestrutura das misturas asfálticas vem sendo cada vez mais associada às suas propriedades mecânicas, bem como a resistência aos defeitos comumente encontrados em campo: deformação permanente, fadiga e trincamento térmico (VASCONCELOS *et al.*, 2005; SOUZA, 2009).

### 2.6.2 Técnicas modernas de PDI

O uso de equipamentos mais sofisticados para a realização do PDI pode ser mais oneroso, porém resulta em resultados ainda mais completos, mais detalhados e mais precisos. O AIMS, mostrado na Figura 5, é um equipamento desenvolvido para analisar parâmetros de forma (lamelaridade e esfericidade), de angularidade e de textura superficial de agregados graúdos, além da angularidade e da forma de agregados miúdos. Os resultados obtidos são fornecidos em bases estatísticas, e são suficientes para a realização da classificação da forma dos agregados. Essa metodologia fornece algumas vantagens em relação aos métodos tradicionalmente utilizados, pois se baseia na distribuição das características de forma em uma amostra de agregado, ao invés de índices médios destas mesmas características.

Figura 5 - Aggregate Image Measurement System (AIMS)



O equipamento foi desenvolvido por pesquisadores com o objetivo de capturar imagens e analisar a forma de uma vasta quantidade de tipos e de tamanhos de agregados, incluindo aqueles utilizados em pavimentação asfáltica. O AIMS utiliza um sistema simples, que consiste em uma câmera e dois diferentes tipos de iluminação para capturar imagens de agregados em diferentes resoluções, das quais as propriedades de forma são medidas usando técnicas de análise de imagens. O sistema opera baseado em dois módulos. O primeiro

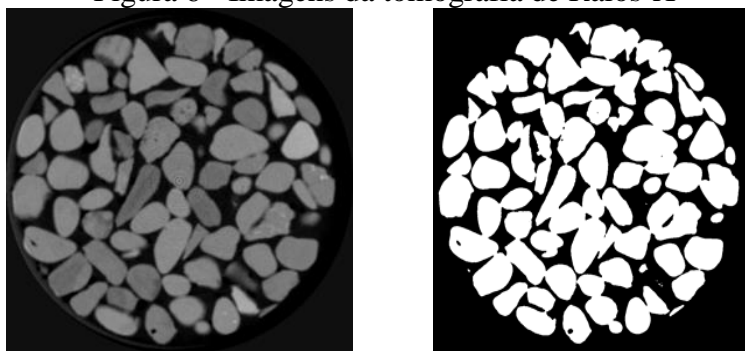
funciona para a análise de agregados miúdos (ou menores do que 4,75mm). Nesse módulo, imagens em preto e branco são capturadas. O segundo módulo funciona para a análise de agregados graúdos (maiores do que 4,75mm). No módulo para agregados graúdos, imagens em tons de cinza, assim como imagens em preto e branco, são capturadas.

Os agregados miúdos são analisados com relação à forma e à angularidade com a utilização de imagens em preto e branco capturadas através da iluminação fornecida em baixo da bandeja onde os agregados são posicionados. Esse tipo de iluminação cria um contraste entre as partículas de agregado e a bandeja, fornecendo, assim, um formato claro da partícula. Como alguns estudos já mostraram que existe uma forte ligação entre a textura e a angularidade dos agregados miúdos, apenas imagens em preto e branco são utilizadas para a análise dos mesmos.

Castelo Branco *et al.* (2006) apresentaram as principais características do AIMS. Entre elas, estão: (i) capacidade de movimentação simultânea e independente em três eixos; (ii) presença de um vídeo microscópico com razão de *zoom* de 16:1; (iii) câmera preto e branco com controle externo; (iv) controle de movimentação manual e automático; (v) sistema de operação dividido em dois módulos, já citados anteriormente; e (vi) *software* de análise escrito em linguagens C e C<sup>++</sup>, operando em plataforma *Windows*. Esses autores mostraram ainda os critérios de classificação dos agregados e apresentaram algumas das vantagens na utilização do equipamento, como: (i) possibilidade de análise dos agregados com relação à sua resistência ao polimento e à abrasão; (ii) monitoramento e controle de qualidade dos processos de produção, refletindo inclusive na britagem; (iii) possibilidade de avaliação da textura superficial e relação com a resistência à derrapagem e (iv) melhor entendimento entre as propriedades de forma de agregados, dosagem e propriedades volumétricas do Concreto Asfáltico (CA).

A tomografia computadorizada de Raios-X, cujas imagens geradas são mostradas na Figura 6, é uma técnica não-destrutiva poderosa que captura as três dimensões dos materiais, e possui a habilidade de fornecer medidas detalhadas das características de agregados. Apesar de ser uma ferramenta útil, seu uso ainda é bastante prematuro na caracterização usual de agregados. Esse método possui uma desvantagem: estudos provaram que as técnicas usadas na separação das partículas de agregados necessitam da manipulação manual das imagens, o que pode acabar influenciando as medidas de angularidade e de textura (MASAD *et al.*, 2005).

Figura 6 - Imagens da tomografia de Raios-X



Masad (2004) utilizou a tomografia para analisar a distribuição dos tamanhos de vazios e possibilitar o desenvolvimento de um modelo estatístico usado para o estudo da influência dos materiais constituintes e da compactação de misturas nessa distribuição. Também utilizou as imagens geradas para medir o grau de arranjo dos agregados, determinando a influência do método e do esforço de compactação na criação dos contatos agregado/agregado. Os resultados mostraram que, os defeitos do pavimento, especialmente as trincas e o aumento dos vazios, localizam-se de acordo com a distribuição inicial desses vazios.

### ***2.6.3 Utilização do PDI na caracterização de agregados e misturas asfálticas***

O uso do PDI em pesquisas internacionais já vem sendo bastante difundido há alguns anos, especialmente nos Estados Unidos. Kim *et al.* (2003) usaram um sistema de *lasers* para a análise de partículas de agregados com o objetivo de propor um método de controle da produção de agregados ao classificar suas propriedades através da quantificação da textura de suas imagens em escalas de cinza. Al Rousan (2004) utilizou o AIMS na caracterização de diversos tipos distintos de agregados para propor uma metodologia de classificação através dos resultados dos diversos parâmetros obtidos através desse equipamento. Pidwerbesky *et al.* (2006) utilizaram técnicas de PDI juntamente da transformada de *Fourier* para a análise da textura superficial de tratamentos superficiais e observaram que esta possui um grande potencial para substituir o teste da mancha de areia pelo uso de uma câmera digital. Xue *et al.* (2010) analisaram 25 partículas de agregados de fontes distintas em relação a suas propriedades de polimento, combinando o uso do equipamento Micro-Deval associado a fotografias tiradas por uma câmera convencional e analisadas em uma rotina desenvolvida no MATLAB. Arasan *et al.* (2010) analisaram

diferentes propriedades de forma de agregados, como lamelaridade, esfericidade e arredondamento, para materiais basálticos, porém de duas fontes distintas: naturais (provenientes de rios) e britados (provenientes de pedreiras), com o objetivo de verificar as diferenças entre ambos. Concluíram que os agregados britados possuem um valor de arredondamento mais elevado.

Masad *et al.* (2002) utilizaram métodos para quantificar a estrutura do  $V_v$ , ao longo da profundidade de CPs de misturas asfálticas, através de sistema de tomografia computadorizada, juntamente de técnicas de análise de imagens. Tashman *et al.* (2004) desenvolveram um modelo viscoelástico para avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas que tinha como dados de entrada, entre outros parâmetros, as propriedades de distribuição dos agregados na mistura. Também utilizaram a tomografia computadorizada de Raios-X para caracterizar a evolução do dano em misturas asfálticas. Erdogan (2005) usou técnicas de tomografia para analisar agregados graúdos e miúdos e a microtomografia de Raios-X para a análise do fíler. Através disso, obtiveram informações para o cálculo do volume e da área superficial de partículas individuais de agregados, bem como das propriedades de forma dos mesmos, com o objetivo de verificar a influência nas propriedades reológicas de ligantes asfálticos.

No Brasil, apesar da falta de equipamentos mais sofisticados para o uso do PDI na maioria dos grupos de pesquisa, o uso de técnicas de imagens tem gerado bons resultados. Evangelista *et al.* (2005) compararam os resultados obtidos através dos ensaios tradicionais de caracterização de forma de agregados e do PDI através de *software* computacionais. Vasconcelos *et al.* (2005) realizaram a caracterização da distribuição e da orientação de partículas de agregados em misturas asfálticas compactadas através de diferentes métodos.

Bessa *et al.* (2009) utilizaram o *ImageTool* para a análise de agregados naturais e alternativos em relação a suas propriedades de forma e de angularidade, além da estrutura interna de misturas asfálticas compostas por eles. Bessa *et al.* (2012) compararam as metodologias de dois diferentes *software* para a análise das propriedades de forma de agregados e do comportamento deles nas estruturas de misturas asfálticas. Bessa *et al.* (2011a; 2011b) analisaram as propriedades de forma, de angularidade e de textura de três agregados provenientes de diferentes pedreiras e fontes mineralógicas, além de quantificarem estes materiais em relação a processos de polimento e de abrasão. Técnicas de tomografia de Raios-X foram utilizadas por Nascimento (2008) com o objetivo de comparar a estrutura interna de misturas asfálticas compactadas em laboratório por métodos distintos e também extraídas do campo, ao quantificar a distribuição interna dos vazios dentro dessas misturas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

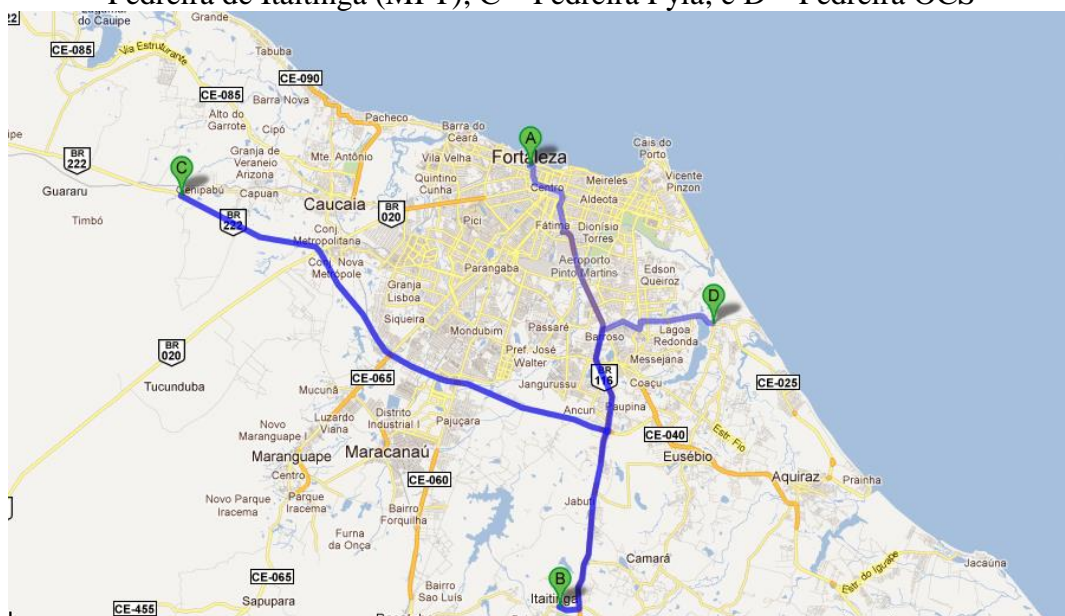
#### 3.1 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram obtidos em três diferentes pedreiras, todas localizadas no estado do Ceará, em municípios da RMF. A escolha dessas pedreiras foi feita com base na informação de que elas explorariam rochas com composições mineralógicas distintas. Ensaio físicos, químicos e mineralógicos foram realizados em amostras das rochas, a fim de se obter mais informações a respeito de suas composições.

##### 3.1.1 Coleta dos agregados

As pedreiras escolhidas para a coleta do material utilizado nesta pesquisa foram: Pedreira de Itaitinga (MFT) LTDA, Pedreira OCS Mineradora e Pedreira Yolita LTDA (Pyla). Essas pedreiras ficam localizadas nos municípios de Itaitinga, Eusébio e Caucaia, a aproximadamente 27, 30 e 19km do centro de Fortaleza, respectivamente (Figura 7).

Figura 7 - Localização das pedreiras em relação à Fortaleza: A – centro da capital; B – Pedreira de Itaitinga (MFT); C – Pedreira Pyla; e D – Pedreira OCS



Primeiramente, foi estabelecido um contato inicial com os representantes das pedreiras escolhidas, para que fosse possível a realização de visitas, nas quais foram coletadas, além do material de pesquisa, informações pertinentes acerca dos processos de produção dos agregados. Informações relacionadas à produção, ao tamanho e aos tipos dos

agregados produzidos e dos britadores utilizados foram também obtidas. A princípio, obteve-se a informação de que tipo de rocha vem sendo desmontada em cada pedreira é: (i) Pedreira 1: granítica; (ii) Pedreira 2: gnáissica e (iii) Pedreira 3: fonolítica. Neste estudo, as pedreiras avaliadas foram codificadas (1, 2 e 3) para manter o sigilo das empresas. Estudos aprofundados em relação à mineralogia dos agregados produzidos em cada pedreira foram realizados com o objetivo de se obter uma confirmação em relação a essas informações.

Com relação à produção mensal dos agregados, as Pedreiras 1 e 3 contabilizam a quantidade de material produzido em metros cúbicos ( $m^3$ ) e geram, em média, entre 25 e 46 mil  $m^3$  de agregado, respectivamente. A Pedreira 2 produz aproximadamente entre 20 e 30 mil toneladas de agregado por mês, o que corresponde a aproximadamente 10 mil  $m^3$  de agregado, quando se considera a densidade real média do material. A maior parte do material produzido pelas três pedreiras costuma ser vendida para empresas do ramo da construção civil (concreteiras). A Pedreira 3, por exemplo, tem apenas 30% dos seus agregados produzidos sendo consumidos no ramo da pavimentação. A Pedreira 2 relatou que produz agregados também para outros fins, como o uso em quebra mares de portos e para a construção de bases de concreto para os equipamentos utilizados na produção de energia eólica.

No que diz respeito aos processos de exploração da rocha, os mesmos ocorrem de maneira bem semelhante para as três pedreiras e são feitos através de explosivos ou dinamites. Na Pedreira 3, em especial, existe um controle em relação à segurança quando são realizadas as explosões na rocha. É feito um aviso prévio a todos os funcionários do dia e horário da realização desse procedimento e existe um técnico de segurança capacitado para instalar todos os explosivos e ativá-los.

Em relação aos processos de britagem utilizados em cada pedreira, algumas informações básicas foram obtidas. A Pedreira 1 utiliza em sua britagem primária um britador de mandíbula, comumente utilizado para a quebra e a redução inicial de grandes pedaços de rochas e de minérios, do tipo C160 (que significa uma abertura para a entrada de material de 160cm de lado). Nesse britador, existem duas mandíbulas, sendo uma fixa e outra móvel. Os britadores secundários (no total, três), também de mandíbula, funcionam com o objetivo de britar as partículas que foram produzidas no britador primário, para que estas possam ser reduzidas a tamanhos menores. Esses britadores secundários possuem uma abertura de 62 por 40cm. Os agregados gerados nessas duas primeiras britagens possuem uma forma mais lamelar. Foi relatado que após esses processos, existe a possibilidade de se utilizar um terceiro britador do tipo girosférico para que os agregados tomem uma forma mais cúbica. Além

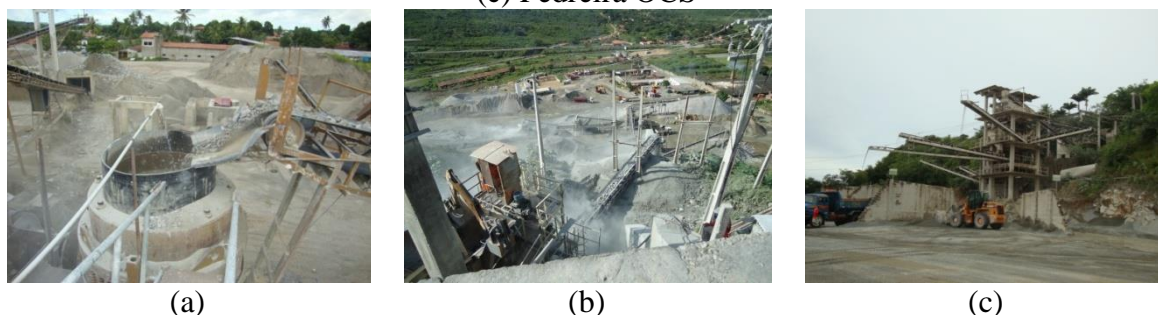
disso, esse britador tem a capacidade de detectar e de retirar possíveis resíduos de ferro provenientes dos britadores e que possam estar presentes no material a ser britado.

A Pedreira 2 utiliza o britador primário do tipo mandíbula C125 (com abertura de 1m por 1,25m) e britadores cônicos de diferentes potências para as demais etapas da britagem. Considera-se que, os agregados gerados neste último britador são mais cúbicos do que lamelares. É importante ressaltar que, entre a estocagem do material no pulmão (local onde se empilham os agregados produzidos após a passagem pelo britador primário) e os processos seguintes da britagem, os equipamentos são capazes de retirar possíveis impurezas presentes no material. Existe, ainda, nesta pedreira um equipamento chamado de rompedor hidráulico, que é capaz de quebrar os pedaços de rochas explodidos cujos tamanhos são grandes demais para caber no britador. Um fato observado é que as malhas utilizadas nesta pedreira específica são feitas de borracha, o que, apesar de custar 10 vezes mais do que as confeccionadas com ferro, facilita o encaixe das mesmas nos equipamentos e promove uma maior duração.

Por fim, a Pedreira 3 possui dois processos de britagem, com a britagem primária constituída de duas etapas. A primeira etapa utiliza um britador de mandíbula do tipo C80 (abertura de 80cm), e a segunda é feita em um britador cônico. A britagem primária gera agregados de até 7” (17,8cm). Os agregados maiores são retirados para o uso em alvenaria e outros fins, enquanto que aqueles com tamanho entre 2 e 4” retornam ao britador. Os agregados menores, de até 2”, seguem para a britagem secundária, que é realizada em outro britador cônico e gera sete tamanhos distintos de material, sendo dois tipos de areia (uma grossa e outra fina) e cinco tamanhos distintos de brita (1”, 3/4”, 1/2”, 3/8” e 3/16”).

Em relação ao controle de qualidade e a forma de armazenamento, a Pedreira 2 realiza o controle da granulometria e da densidade real de seus agregados diariamente, obtendo resultados que pouco variam a cada novo ensaio. A Pedreira 3 controla o seu material através da determinação da granulometria, que é feita duas vezes por semana. Por fim, a Pedreira 1 não faz nenhum tipo de controle dos materiais. A Figura 8 abaixo mostra algumas fotos tiradas nas pedreiras investigadas neste estudo.

Figura 8 - Visão geral das pedreiras: (a) Pedreira de Itaitinga (MFT); (b) Pedreira Pyla e (c) Pedreira OCS



### 3.1.2 Escolha dos agregados para a produção das misturas asfálticas

Nesta pesquisa, foi coletada uma grande quantidade de agregados das diferentes pedreiras em estudo, porém decidiu-se por utilizar apenas alguns desses agregados nas misturas asfálticas a serem confeccionadas. Essa escolha foi feita com base nos resultados obtidos com o uso do AIMS para todos os agregados coletados. Foram definidos dois tipos de mistura, o pior e o melhor cenário do ponto de vista da forma, da angularidade e da textura de seus agregados. Para essa definição, os agregados foram separados por pedreira e também por tamanho, entre grãos e miúdos.

Sendo assim, os agregados escolhidos para constituírem a composição granulométrica das misturas foram: (i) com melhores propriedades: grão proveniente da Pedreira 3 (3/4" e 1/2") e miúdo proveniente da Pedreira 1 (pó de pedra); e (ii) com piores propriedades: grão proveniente da Pedreira 1 (3/4" e 1/2") e miúdo proveniente da Pedreira 3 (areia grossa). Após essa escolha, os materiais foram caracterizados através dos ensaios básicos normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), para conhecê-los melhor e observar se estes passam pelos critérios estabelecidos.

### 3.1.3 Caracterização física dos agregados

Após o recebimento do material coletado, os agregados foram armazenados separadamente de acordo com cada tamanho distinto. A partir disso, cada agregado foi caracterizado em relação aos diversos ensaios básicos normatizados: absorção e densidade de agregado grão (DNER-ME 081/98); abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98); densidade real – agregado miúdo (DNER-ME 084/95); densidade real do fíler (DNER-ME 085/94);

equivalente de areia (DNER-ME 054/97); granulometria (DNER-ME 083/98); índice de forma (DNER-ME 086/94); e adesividade a ligante betuminoso (DNER-ME 078/94) (Tabela 3).

O ensaio de granulometria (Figura 9) foi realizado para determinar a distribuição das partículas dos agregados por tamanho. Cada agregado foi homogeneizado e quarteado, e separado através da série de peneiras do DNIT, bem como através da série de peneiras americana, AASHTO. A diferença entre as duas séries de peneiras encontra-se nas peneiras das frações miúdas, ou seja, abaixo da peneira de 4,75mm (#4). As peneiras utilizadas nessa porção do agregado são todas diferentes para cada uma das séries.

Figura 9 - Ensaio de granulometria: (a) quarteador e (b) conjunto de peneiras



Foram realizados ensaios em duas amostras de cada agregado, e as médias dos resultados, massa retida e porcentagem passante, encontram-se nas Tabelas 1 e 2. As curvas granulométricas dos materiais são apresentadas nas Figuras 10 e 11.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de granulometria, massa retida e porcentagem passante – série de peneiras do DNIT

Peneira (mm)	Pedreira 1						Pedreira 3					
	¾"		½"		Pó de pedra		¾"		½"		Areia grossa	
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
19,0	187,5	97,8	0,0	100	0,0	100	706,0	91,6	0,0	100	0,0	100
12,5	6081,9	25,6	7,5	99,9	0,0	100	5828,9	22,8	661,6	92,7	0,0	100
9,5	1895,2	3,1	1984,2	65,9	0,0	100	1384,9	6,4	1885,1	72,0	0,0	100
4,75	177,2	1,0	3615,9	4,1	11,4	99,4	409,9	1,5	4439,9	23,0	26,3	98,1
2,00	10,3	0,8	123,4	2,0	847,8	58,4	53,0	0,9	1442,8	7,1	386,0	69,6
0,42	15,7	0,7	42,4	1,3	734,7	22,8	48,6	0,3	553,7	1,0	647,6	21,8
0,18	12,7	0,5	21,1	0,9	219,1	12,1	9,2	0,2	37,3	0,6	138,6	11,6
0,075	18,3	0,3	24,6	0,5	144,1	5,2	7,8	0,1	19,3	0,4	78,5	5,8
< 0,075	23,8	-	30,5	-	106,4	-	10,1	-	37,7	-	78,5	-

Tabela 2 - Resultados do ensaio de granulometria, massa retida e porcentagem passante – série de peneiras da AASHTO

Peneira (mm)	Pedreira 1						Pedreira 3					
	¾"		½"		Pó de pedra		¾"		½"		Pó de pedra	
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
19,0	314,6	96,1	0,0	100	0,0	100	706,0	91,6	0,0	100	0,0	100
12,5	5782,9	24,7	7,5	99,9	0,0	100	5828,9	22,8	661,6	92,7	0,0	100
9,5	1639,4	4,4	1984,2	65,9	0,0	100	1384,9	6,4	1885,1	71,9	0,0	100
4,75	223,1	1,6	3615,9	4,1	5,8	99,6	409,9	1,5	4439,9	23,0	31,7	97,7
2,36	16,9	1,4	119,7	2,1	364,2	72,8	47,5	1,0	1282,1	8,9	309,3	74,8
1,18	9,4	1,3	21,9	1,7	305,2	50,3	29,6	0,6	471,5	3,7	398,8	45,3
0,60	11,1	1,2	17,1	1,4	192,0	36,2	19,7	0,4	203,6	1,4	248,7	26,9
0,30	11,7	1,0	14,8	1,2	156,5	24,7	9,1	0,3	56,0	0,8	132,6	17,1
0,15	20,1	0,8	18,2	0,9	132,1	15,0	6,8	0,2	22,7	0,6	89,5	10,4
0,075	25,3	0,5	19,6	0,5	110,0	6,9	6,5	0,1	14,1	0,4	64,9	5,6
< 0,075	38,7	-	31,4	-	93,3	-	9,3	-	37,7	0,0	76,4	-

Figura 10 - Granulometria dos agregados – série de peneiras do DNIT

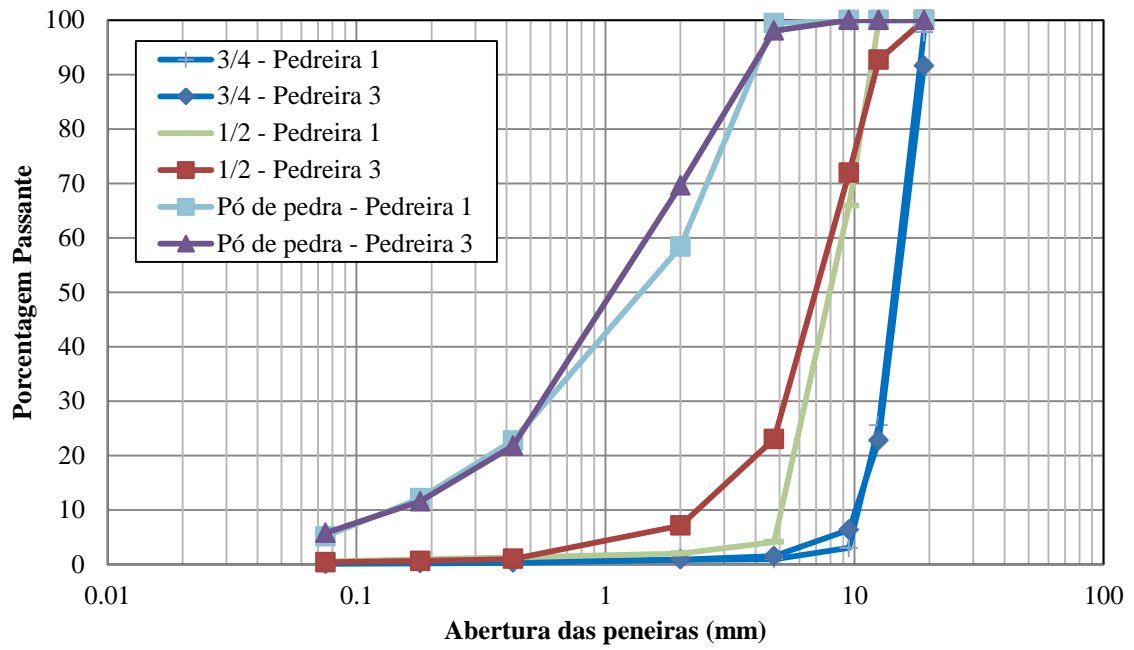


Figura 11 - Granulometria dos agregados – série de peneiras da AASHTO

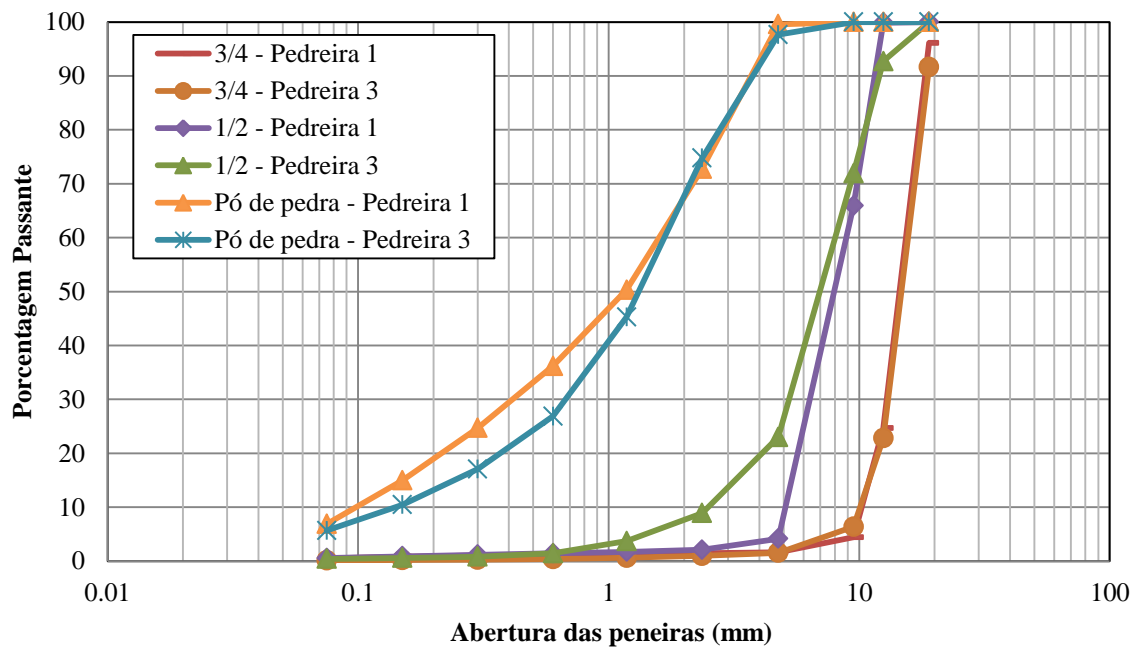


Tabela 3 - Resultados da caracterização física dos agregados

Propriedade	Agregado					
	Pedreira 1 (granítico)			Pedreira 3 (fonolítico)		
	3/4"	1/2"	Pó de pedra	3/4"	1/2"	Areia grossa
Abrasão Los Angeles (%)	44,20	38,41	-	19,80	18,24	-
Absorção (%)	0,99	1,47	-	0,44	0,73	-
Adesividade	Insatisfatória		-	Insatisfatória		-
Densidade real	2,65	2,64	2,64	2,49	2,48	2,47
Densidade aparente	2,58	2,54	-	2,46	2,44	-
Densidade real – filer	-	-	2,61	-	-	2,54
Índice de forma	0,92	0,83	-	0,94	0,86	-
Equivalente de areia (%)	-	-	92,10	-	-	82,78

O ensaio de abrasão Los Angeles consistiu na colocação de uma amostra de agregado graúdo juntamente de esferas de ferro fundido dentro de um tambor, que passa a girar à velocidade de 30 a 33rpm, até que seja completado o número de rotações exigidas pelo ensaio. As esferas, cada uma com massa de aproximadamente 440g, realizam um processo de britagem dos agregados dentro do tambor. No final do ensaio, foi determinada a porcentagem em massa perdida ou degradada, através da diferença entre as massas final e inicial da amostra (Equação 2).

A massa final da amostra a ser considerada é aquela que ficou retida na peneira de 1,7mm (#12). No geral, os órgãos rodoviários costumam limitar que os agregados a serem utilizados em base e revestimentos asfálticos tenham o valor máximo de abrasão de 40% a 55%. Dessa forma, os agregados analisados passaram pelos critérios estabelecidos.

$$A = \frac{m - m'}{m} \times 100 \quad (2)$$

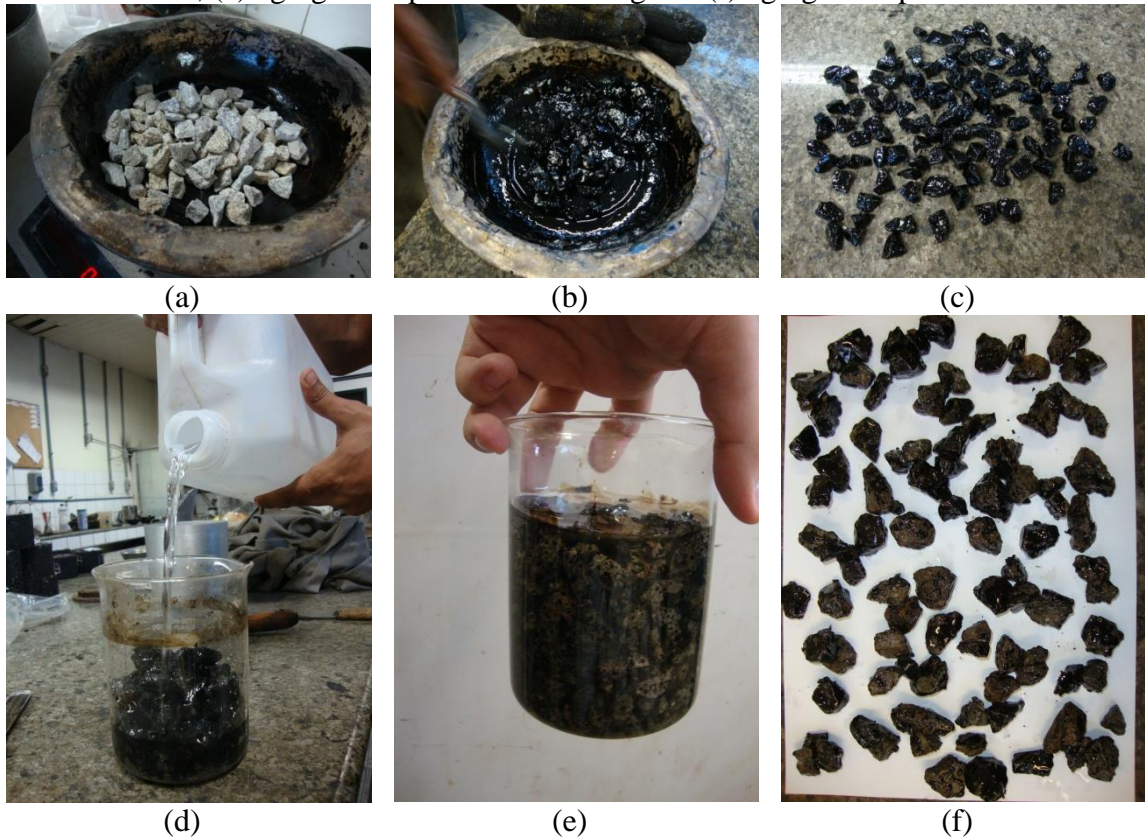
Onde:  $A$  = Abrasão *Los Angeles*;  $m$  = massa total da amostra inicial e  $m'$  = massa da amostra lavada, após o ensaio (retida na peneira de 1,7mm).

A norma desse ensaio traz uma tabela com diferentes graduações, cada uma com uma massa amostral diferente. A graduação escolhida deve ser aquela que estiver mais próxima da granulometria do material estudado. É também possível determinar também o número de rotações necessárias para a realização do ensaio, bem como o número de esferas de aço que devem ser colocadas juntamente dos agregados no tambor. Para os agregados graúdos, em estudo, foi escolhida a graduação B, que exige uma amostra composta por 2,5kg

de material passante na peneira de 19mm e retido na peneira de 12,5mm, além de 2,5kg de material passante na peneira de 12,5mm e retido na peneira de 9,5mm. O número de esferas para a graduação escolhida foi de 11, o que totalizou aproximadamente 4.584g de carga abrasiva.

No ensaio de adesividade (Figura 12), a massa asfáltica solta, ou não-compactada, composta por agregado graúdo e ligante, foi imersa dentro de um frasco de vidro com água, durante 72 horas, em uma estufa a 40°C. O resultado do ensaio, obtido de forma visual, deve ser dado como satisfatório quando, após este tempo, não houver nenhum deslocamento da película de ligante asfáltico. A adesividade é uma propriedade que está diretamente relacionada com o dano por umidade de misturas asfálticas e, quanto insatisfatória, pode indicar um mau desempenho de uma mistura em relação a esse defeito, exigindo o uso de melhoradores de adesividade, como o DOPE. É importante ressaltar que esse ensaio é bastante criticado por ser muito subjetivo, uma vez que sua análise é visual e depende do operador do ensaio.

Figura 12 - Ensaio de adesividade: (a) amostra de agregados; (b) recobrimento dos agregados; (c) agregados recobertos por ligante asfáltico; (d) colocação da água destilada; (e) agregados após 72 horas na água e (f) agregados após o ensaio



O ensaio de densidade do agregado graúdo determina, por meio da massa do agregado seco em estufa, da massa do agregado na condição de Superfície Seca Saturada (SSS) e da leitura na balança que corresponde à massa do agregado submerso em água, a densidade aparente do agregado. Esta é a razão entre a massa e o volume da porção impermeável de um agregado. A Equação 3 mostra o cálculo da densidade aparente. A norma brasileira não prevê o cálculo da densidade real ( $D_r$ ), que pode ser calculada através da fórmula proposta pela norma ASTM C 127-00 (Equação 4).

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (3)$$

Onde:  $D_{ap}$  = densidade aparente;  $M_s$  = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g;  $M_h$  = massa, ao ar, do agregado na condição SSS, em g; e  $L$  = leitura na balança correspondente ao agregado submerso em água, em g.

$$D_r = \frac{M_s}{M_s - L} \quad (4)$$

Onde:  $D_r$  = densidade real;  $M_s$  = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g; e  $L$  = leitura na balança correspondente ao agregado submerso em água, em g.

A absorção do agregado graúdo também é detectada no ensaio de densidade. Depois da realização do ensaio, é calculada a relação entre a massa de água absorvida pelo agregado após um período pré-estabelecido de 24 horas estando o mesmo imerso em água, à temperatura ambiente, e a massa inicial do agregado seco. A Equação 5 traz a fórmula utilizada no cálculo da absorção.

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde:  $a$  = absorção, em %;  $M_s$  = massa, ao ar, do agregado seco em estufa, em g;  $M_h$  = massa, ao ar, do agregado na condição SSS, em g.

Para a determinação da densidade real do agregado miúdo, utilizaram-se dois procedimentos de ensaio: DNER-ME 084/95 e DNER-ME 085/95. O primeiro refere-se ao ensaio para a porção do agregado miúdo que passa pela peneira #4 e é retida na peneira #200,

enquanto que o segundo refere-se ao ensaio para o material passante na peneira #200, ou seja, o fíler natural.

O ensaio para os agregados retidos na peneira #200 e passantes na peneira #4 consistiu na separação de uma amostra de 500g de material (Figura 13). A amostra foi colocada em um picnômetro junto de água destilada. Em seguida, o conjunto picnômetro + amostra + água foi aquecido em uma chama para a retirada completa das possíveis bolhas de ar presentes. A Equação 6 traz o cálculo da densidade real dos agregados miúdos. O resultado final deve ser a média das determinações de duas amostras, em número adimensional.

$$D_{25} = \frac{b - a}{(d - a) - (c - b)} \quad (6)$$

Onde:  $D_{25}$  = densidade real do agregado miúdo, a 25°C;  $a$  = massa do picnômetro vazio e seco, em g;  $b$  = massa do picnômetro mais amostra, g;  $c$  = massa do picnômetro mais amostra mais água, em g e  $d$  = massa do picnômetro cheio d'água, em g.

Figura 13 - Ensaio de densidade do agregado miúdo: (a) amostra de agregados miúdos retidos na peneira #200; (b) picnômetro + amostra e (c) picnômetro + amostra + água



(a)



(b)

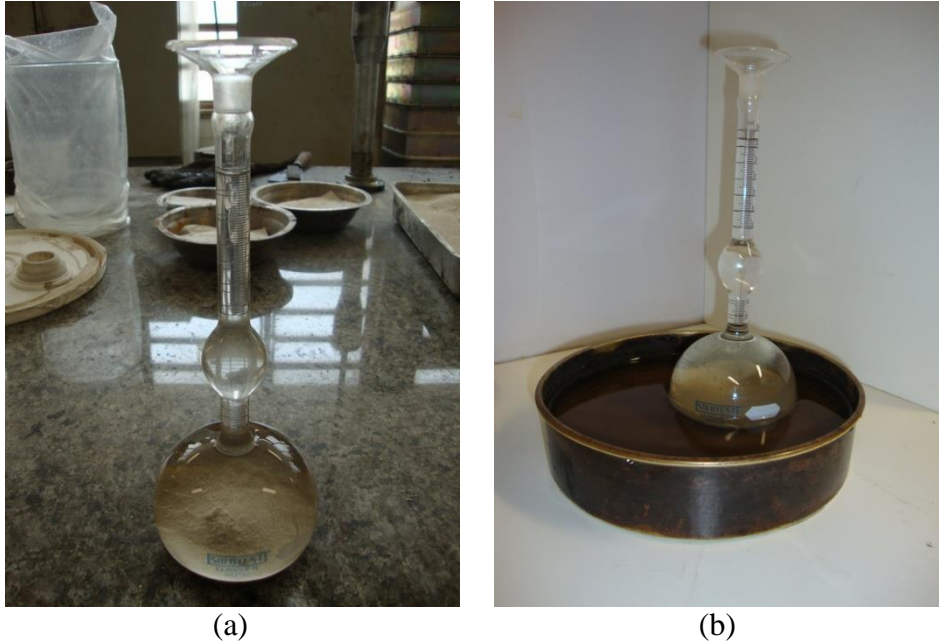


(c)

Para determinar a densidade do fíler, ou do agregado miúdo passante na peneira #200, a norma de ensaio consistiu na utilização do frasco *Le Chatelier* (Figura 14). No frasco, foi colocada uma quantidade de querosene, e em seguida o frasco foi levado a um banho de água para que fosse feita a primeira leitura do nível superior do líquido. Em seguida, foram colocados dentro do frasco 60g do material a ser ensaiado, tendo-se cuidado para que o material não grudasse nas paredes do frasco. O frasco é então agitado suavemente através de um movimento giratório, com o objetivo de se expulsar o ar contido no material. Por fim, o

frasco é novamente colocado no banho de água para que seja feita a leitura final da altura do querosene.

Figura 14 - Ensaio de densidade do fíler: (a) frasco + amostra + querosene e (b) frasco no banho de água



O ensaio de índice de forma é determinado com o uso de crivos redondos e redutores (Figura 15). O resultado é dado em um valor adimensional, que varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, mais cúbico é o agregado; e quanto mais próximo 0, mais lamelar ele é. O limite mínimo adotado para o índice de forma é de 0,5, ou seja, todos os agregados utilizados nesse estudo atenderam aos requisitos exigidos. Existem outros procedimentos de ensaio que determinam a forma dos agregados, como o método do *caliper* e o método do paquímetro. O primeiro analisa, através do uso de um paquímetro especial, a quantidade de agregados com determinadas relações entre suas dimensões (3:1 e 5:1, especialmente), e o segundo calcula a média ponderada, de acordo com cada fração analisada, das relações entre o comprimento e a espessura de cada uma das partículas de agregado medidas.

Figura 15 - Ensaio de índice de forma: (a) crivos circulares e (b) crivo redutor



(a)

(b)

O ensaio de equivalente de areia determina o teor de limpeza do agregado, através da verificação da presença de material plástico. De acordo com a norma de ensaio (Figura 16), essa propriedade significa a relação volumétrica relacionada à razão entre a altura do nível superior de areia e a altura do nível superior de suspensão de argila, numa proveta. O procedimento de ensaio consiste em colocar a amostra de agregados (passantes na peneira #4) em uma proveta que contém uma solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído e deixar esta em repouso por 20 minutos. Em seguida, o conjunto deve ser agitado por 30 segundos. A proveta é completada, em um nível pré-estabelecido, com a solução, e em seguida deixada em repouso por 20 minutos.

Figura 16 - Ensaio de equivalente de areia: (a) solução para o ensaio; (b) amostra sendo colocada na proveta e (c) amostras em repouso



(a)



(b)



(c)

Por fim, determina-se a altura do material suspenso, bem como a altura do agregado depositado, através de sedimentação, no fundo da proveta. A Equação 7 é utilizada para determinar o valor do equivalente de areia. No Brasil, o valor de equivalente de areia deve ser no mínimo de 55% para qualquer volume de tráfego, o que mantém os agregados desta pesquisa dentro dos critérios mínimos exigidos.

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (7)$$

Onde:  $EA$  = Equivalente de Areia;  $h_1$  = altura do material em suspensão, cm; e  $h_2$  = altura do material sedimentado, cm.

### ***3.1.4 Ensaios de resistência à degradação e ao polimento***

Para a obtenção de resultados que indicassem a resistência dos agregados em relação ao polimento e à degradação, foi utilizado, associado ao AIMS, o equipamento de abrasão Los Angeles a fim de se provocar nos materiais a alteração de suas propriedades de angularidade e de textura superficial. Sendo assim, adotou-se uma metodologia que foi constituída de três etapas: (i) avaliação das propriedades de forma iniciais dos agregados através do AIMS; (ii) ensaios de polimento e de abrasão; e (iii) avaliação das propriedades de forma após a realização dos ensaios através do AIMS. Para a determinação das propriedades dos agregados antes e depois dos ensaios, foi utilizado o equipamento AIMS.

O uso do equipamento de abrasão Los Angeles tentou simular o uso de outro equipamento, o Micro-Deval, que possui características e finalidades semelhantes. Através desse equipamento, os agregados sofreram processos de quebra e de abrasão e, também, de polimento. A metodologia adotada nesta pesquisa foi a mesma que consta no DNER-ME 35/98, normalmente utilizada apenas para a determinação da perda de massa por abrasão. O número de rotações do ensaio foi 500, e a quantidade de esferas utilizada foi 11, totalizando aproximadamente 4.584g de carga abrasiva.

Para esta análise, dois tamanhos de agregados foram estudados, para os agregados originários das três pedreiras: (i) agregados passantes na peneira de 19mm e retidos na peneira de 12,5mm e (ii) agregados passantes na peneira de 12,5mm e retidos na peneira de 9,5mm. Sendo assim, os valores das propriedades de angularidade e de textura antes e após os ensaios foram avaliados separadamente para cada tamanho de peneira.

### 3.2 Ligante asfáltico

Para esta pesquisa, foi utilizado um ligante asfáltico 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) e com PG 70-28. O ligante asfáltico é oriundo do campo Fazenda Alegre, localizado no estado do Espírito Santo. O CAP 50/70 foi cedido pela Lubnor (Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste), refinaria da Petrobras situada na cidade de Fortaleza.

Mesmo que proveniente de remessas distintas, o ligante asfáltico utilizado sempre possuía as mesmas características físicas e químicas. A Tabela 4 mostra algumas das propriedades desse material, caracterizado pelo próprio fornecedor.

Tabela 4 - Caracterização do ligante asfáltico (CAP 50/70)

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	D5	50 a 70	64	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D36	46 mín.	47,3	grau C
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	E102	141 mm	177,5	s
Viscosidade Brookfield 135°C-sp21 20rpm	D4402	274 mín.	349	cP
Viscosidade Brookfield 150°C-sp21	D4402	112 mín.	175	cP
Viscosidade Brookfield 177°C sp21	D4402	57 a 285	64	cP
RTFOT – penetração retida	D5	55 mín.	67	%
RTFOT – aumento do ponto de amolecimento	D36	8 máx.	2,7	grau C
RTFOT – ductilidade a 25°C	D113	20 mín.	> 150	cm
RTFOT – variação em % massa	D2872	-0,5 a 0,50	-0,049	%
Ductilidade a 25°C	D113	60 mín.	> 150	cm
Solubilidade no tricloroetileno	D2042	99,5 mín.	100,0	% massa
Ponto de fulgor	D92	235 mín.	> 300	grau C
Índice de suscetibilidade térmica	X018	-1,5 a 0,7	-1,3	N/A
Aquecimento a 177°C	X215	NESP <sup>(1)</sup>	NESP	N/A

<sup>(1)</sup>NESP = Não espuma

Com o objetivo de se conhecer melhor o CAP utilizado, fez-se o ensaio de cromatografia, que determina a proporção de hidrocarbonetos Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos (SARA) presentes na constituição do material. A metodologia adotada foi a cromatografia em camada fina, que é um caso particular da cromatografia líquida, técnica de separação de substâncias baseada na afinidade diferenciada por uma fase sólida estacionária e uma fase líquida móvel.

O equipamento utilizado nesta análise cromatográfica foi o Iatroscan (Figura 17). Uma das vantagens do uso deste equipamento é a utilização de apenas uma gota da amostra de CAP para a realização do ensaio. O CAP, diluído em solvente, é colocado sobre uma placa

de vidro recoberta por uma camada fina de sílica. Após a evaporação do solvente, a placa é colocada em contato com a fase móvel, contida em uma cuba cromatográfica. A cromatografia se dá pelo processo de migração da fase móvel através da fase estacionária por capilaridade. A amostra, interagindo com a fase móvel e com a fase estacionária, é arrastada pelo solvente em uma velocidade que depende da afinidade do soluto pela fase estacionária. Como os solutos possuem interações diferentes com as fases, são formadas diversas manchas, de acordo com o número de componentes da amostra (GAMA, 2008).

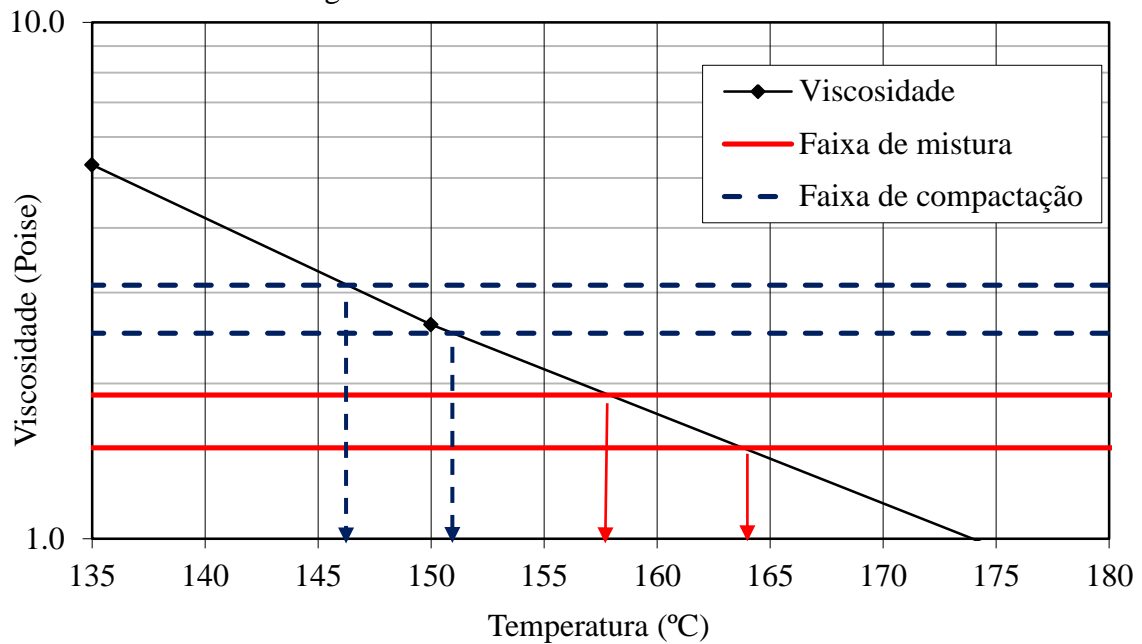
Figura 17 - Equipamento de cromatografia – Iatroscan



Os resultados obtidos com o uso do Iatroscan são representados por gráficos que mostram os tempos de eluição de cada fração da amostra de CAP. O equipamento fornece a área relativa do gráfico para cada componente SARA, indicando a quantidade proporcional de cada um. Cada componente possui suas características específicas e influencia no comportamento do CAP. Para o CAP 50/70 utilizado nesta pesquisa, os teores SARA obtidos foram: 15,4% de saturados; 27,5% de aromáticos; 30,2% de resinas e 27,0% de asfaltenos.

Para a determinação das faixas de temperatura de usinagem e de compactação das misturas, foi feito o ensaio de viscosidade no ligante asfáltico utilizado, através do uso do viscosímetro Brookfield. Essas faixas de temperaturas são encontradas a partir de faixas de viscosidade adequadas para as quais o ligante asfáltico torna a mistura trabalhável (faixa de usinagem) e compactável (faixa de compactação). A Figura 18 mostra a curva de viscosidade, fornecendo as faixas de temperatura de usinagem e de compactação do ligante asfáltico. Percebe-se, através do gráfico, que a faixa de temperatura de usinagem é 157 – 164°C e a faixa de temperatura de compactação é 145 – 150°C.

Figura 18 - Curva de viscosidade – CAP 50/70



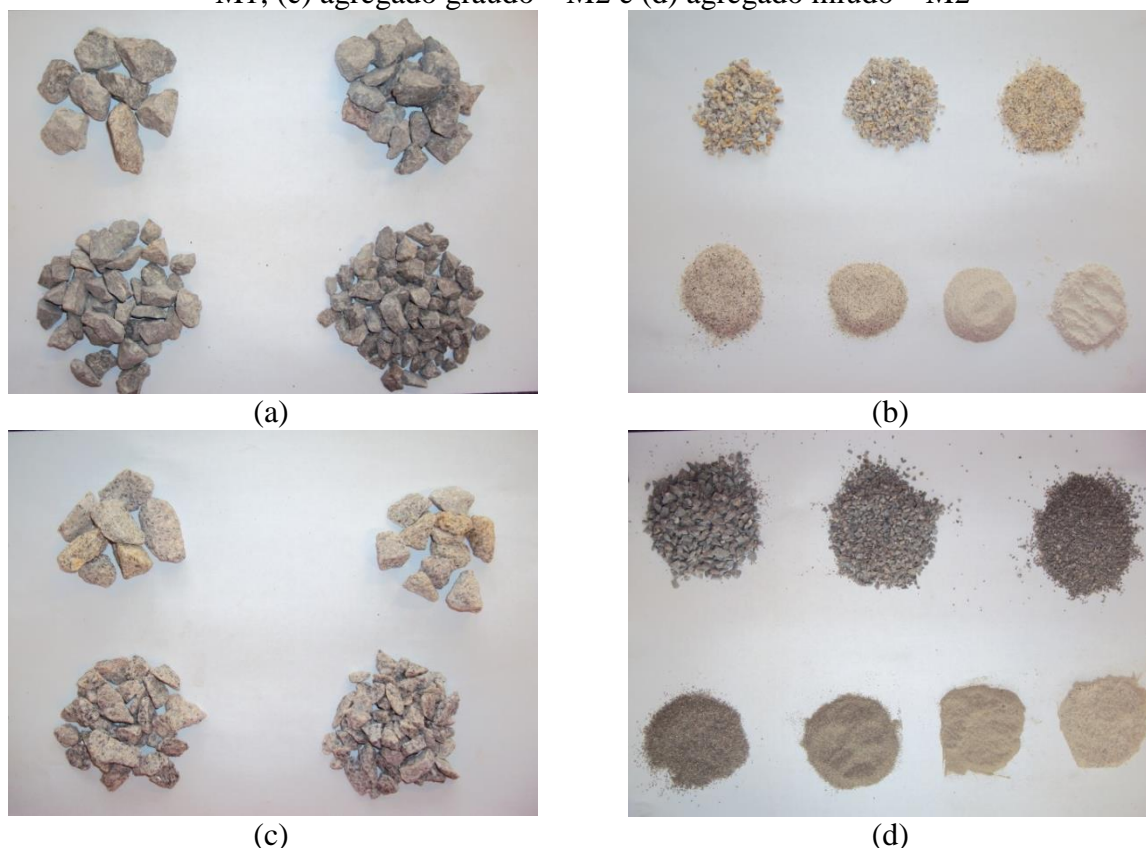
### 3.3 Misturas asfálticas

Para esta pesquisa, foram dosadas duas misturas asfálticas do tipo CA com materiais distintos. O objetivo era obter o melhor cenário (Mistura 1 ou M1) e o pior cenário (Mistura 2 ou M2) no que diz respeito às propriedades de forma dos agregados utilizados, especialmente na previsão do comportamento dessas misturas em relação à resistência à deformação permanente. Através dos resultados obtidos com o AIMS, observou-se que, os valores obtidos para os agregados graúdos e para os agregados miúdos de uma mesma pedra variavam. Assim, os agregados foram separados entre esses dois tamanhos principais, sendo considerados materiais distintos mesmo que provenientes de uma mesma fonte. Para os agregados graúdos, as propriedades consideradas foram a angularidade e a textura superficial, enquanto que para os agregados miúdos considerou-se principalmente a angularidade.

De acordo com os resultados obtidos através do uso do AIMS, os agregados com melhores propriedades, e com os quais se esperava obter as melhores propriedades mecânicas para as misturas asfálticas confeccionadas com eles, foram: o agregado graúdo proveniente da Pedreira 3 e o agregado miúdo proveniente da Pedreira 1. Já aqueles com piores propriedades foram: o agregado graúdo proveniente da Pedreira 1 e o agregado miúdo proveniente da Pedreira 3, coincidentemente o inverso dos agregados sugeridos para o melhor cenário. Os

agregados provenientes da Pedreira 2 foram desconsiderados nesta etapa da pesquisa. A Figura 19 apresenta os agregados utilizados nas misturas asfálticas desta pesquisa, separados por fração retida em cada peneira adotada.

Figura 19 - Agregados utilizados nas misturas: (a) agregado graúdo – M1; (b) agregado miúdo – M1; (c) agregado graúdo – M2 e (d) agregado miúdo – M2



A princípio, havia-se também a ideia de aplicar o Método Bailey de composição granulométrica para as duas misturas asfálticas avaliadas nesse estudo, porém, após diversas tentativas de dosagem que não resultaram em parâmetros aceitáveis, optou-se por utilizar uma composição granulométrica fracionada peneira a peneira, para as duas misturas. Isso fez com que a utilização do método fosse impossibilitada, uma vez que o mesmo exige o uso de um traço “corrido”, ou seja, uma composição granulométrica natural dos agregados, o que é necessário para seguir com o procedimento adotado pela metodologia.

Para esta pesquisa, foi adotada a metodologia de dosagem Superpave, de forma que os CPs atendessem ao critério de  $V_v$  igual  $4 \pm 0,4\%$  para obtenção do teor de projeto de ligante asfáltico. Os CPs foram produzidos com 100 giros no CGS, do tipo Troxler modelo 4140, em um molde cilíndrico de aproximadamente 100mm. O ligante asfáltico foi aquecido à temperatura de  $160^\circ\text{C}$ , e os agregados foram aquecidos a  $175^\circ\text{C}$ . As misturas passaram por um

processo de envelhecimento a curto prazo, em estufa, por duas horas, a uma temperatura de 150°C.

Inicialmente, foram selecionados diferentes teores de CAP para confecção dos CPs (três, no mínimo, para cada teor), e mantendo-se a mesma altura e o número de giros durante a compactação, a média dos Vvs para cada teor foi determinada. O teor de projeto foi aquele que forneceu uma média de Vv mais próxima de 4%, dentro da faixa de tolerância adotada.

### ***3.3.1 Composições granulométricas***

Inicialmente, as composições granulométricas das misturas produzidas seriam baseadas na granulometria natural dos agregados utilizados em cada uma delas, porém os primeiros resultados obtidos com essas misturas não geraram teores de ligante asfáltico adequados (no caso, geraram teores muito distintos entre si, fora da tolerância de  $\pm 0,3\%$ ), então foi resolvido alterar as composições granulométricas das misturas. Optou-se por forçar a composição das duas misturas peneira a peneira, utilizando-se, como base, a média entre os limites inferior e superior da faixa C do DNIT para misturas do tipo CA.

Além disso, foi feita uma adaptação a fim de se garantir que as misturas fossem compostas exatamente como se desejava, ou seja, a M1 sendo composta apenas pelos agregados graúdos provenientes da Pedreira 3 e os agregados miúdos provenientes da Pedreira 1, e a M2 composta apenas pelos agregados graúdos provenientes da Pedreira 1 e os agregados miúdos provenientes da Pedreira 3. Para isso, através da peneira de corte de 4,75mm (#4), que divide agregados graúdos de miúdos, foram eliminados os materiais indesejados em cada mistura. As Tabelas 5 e 6 mostram as granulometrias dos agregados antes e depois dos “cortes”. É importante ressaltar que as peneiras utilizadas na composição das misturas são aquelas da série americana, já que as frações de agregados analisadas no AIMS seguem essa série.

Tabela 5 - Granulometrias dos agregados após os “cortes” (granítico)

Peneira (mm)	3/4” (%)		1/2” (%)		Pó de pedra (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
25,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	96,1	96,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	24,7	23,4	99,9	99,9	100,0	100,0
9,5	4,4	2,8	65,9	64,5	100,0	100,0
4,75	1,6	0,0	4,1	0,0	99,6	100,0
2,36	1,4	0,0	2,1	0,0	72,8	73,1
1,18	1,3	0,0	1,7	0,0	50,3	50,5
0,60	1,2	0,0	1,4	0,0	36,2	36,3
0,30	1,0	0,0	1,2	0,0	24,7	24,8
0,15	0,8	0,0	0,9	0,0	15,0	15,0
0,075	0,5	0,0	0,5	0,0	6,9	6,9

Tabela 6 - Granulometrias dos agregados após os “cortes” (fonolítico)

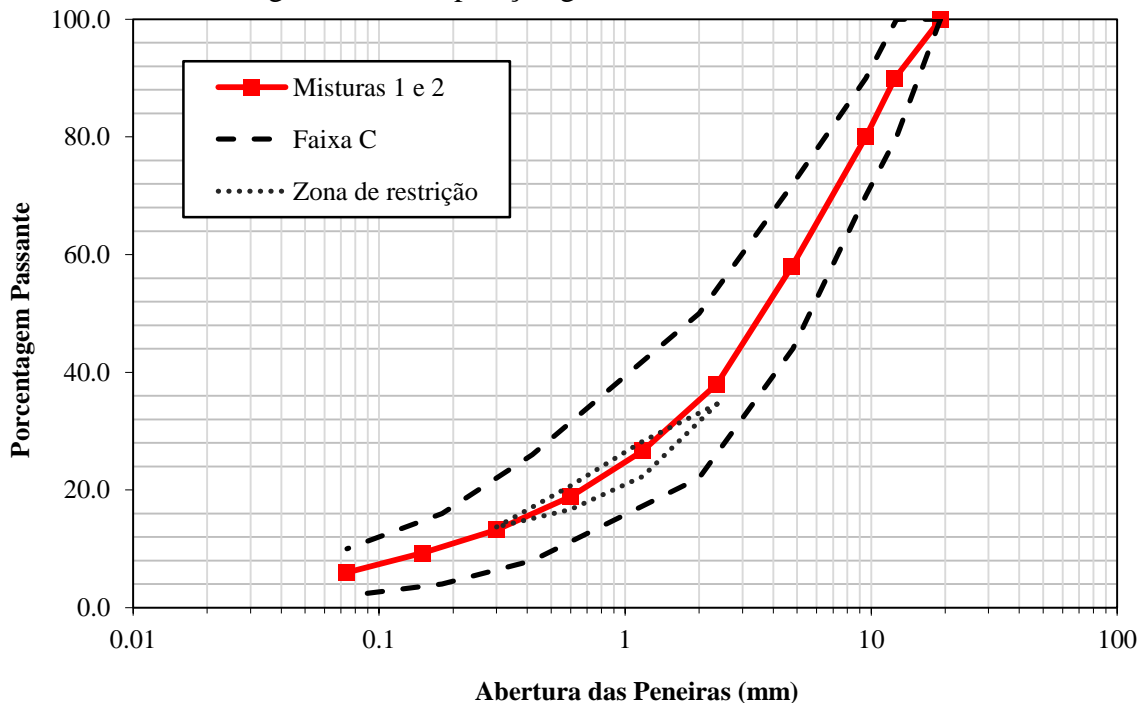
Peneira (mm)	3/4” (%)		1/2” (%)		Pó de pedra (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
25,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	91,6	91,5	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	22,8	21,6	92,7	90,5	100,0	100,0
9,5	6,4	4,9	72,0	63,6	100,0	100,0
4,75	1,5	0,0	23,0	0,0	97,7	100,0
2,36	1,0	0,0	8,9	0,0	74,8	76,6
1,18	0,6	0,0	3,7	0,0	45,3	46,3
0,60	0,4	0,0	1,4	0,0	26,9	27,5
0,30	0,3	0,0	0,8	0,0	17,1	17,5
0,15	0,2	0,0	0,6	0,0	10,4	10,7
0,075	0,1	0,0	0,4	0,0	5,6	5,8

Mesmo se utilizando da série de peneiras americana, foi possível verificar que a curva das misturas encaixou-se na Faixa C do DNIT, pois foi utilizada uma curva granulométrica que passasse exatamente no meio dos limites dessa faixa. A Tabela 7 mostra as porcentagens passantes finais, peneira a peneira, dos agregados das duas misturas. As composições granulométricas das misturas (em porcentagem passante), bem como as faixas-limite do DNIT estão apresentadas na Figura 20 (TMN = 12,5mm). Ambas as misturas possuem a mesma composição granulométrica em porcentagem, uma vez que foi decidido por forçar a composição peneira a peneira.

Tabela 7 - Composições granulométricas dos agregados nas misturas

Peneira	Abertura (mm)	Granulometria (%)	Limite inferior (%)	Limite superior (%)
1"	25,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	90,0	80,0	100,0
3/8"	9,5	80,0	70,0	90,0
Nº 4	4,75	58,0	44,0	72,0
Nº 8	2,36	38,0	-	-
Nº 16	1,18	26,7	-	-
Nº 30	0,60	18,9	-	-
Nº 50	0,30	13,2	-	-
Nº 100	0,15	9,3	-	-
Nº 200	0,075	6,0	2,0	10,0

Figura 20 - Composição granulométrica das misturas



### 3.3.2 Parâmetros volumétricos das misturas

Para a determinação da densidade máxima medida ( $G_{mm}$ ) das misturas asfálticas, foi utilizado o método Rice, descrito na norma ASTM D 2041/2000. O procedimento exige o preparo da mistura asfáltica solta (não-compactada) com as mesmas proporções, em peso, de agregados e de ligante asfáltico, utilizadas para a confecção de CPs. Em seguida, a mistura é colocada em um recipiente cilíndrico metálico, que é preenchido com uma quantidade de água suficiente para cobri-la. O cilindro é levado a uma bomba de vácuo por 15 minutos para

expulsar os vazios existentes na mistura solta. Por fim, o conjunto (recipiente + mistura + água) é pesado imerso em água. O cálculo da  $G_{mm}$  é feito através da Equação 8:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (C - B)} \quad (8)$$

Onde:  $A$  = massa da mistura seca ao ar (g);  $B$  = massa do recipiente metálico imerso em água (g); e  $C$  = massa do conjunto recipiente + mistura, imersos em água (g)

Através da  $G_{mm}$ , os demais parâmetros volumétricos das misturas foram calculados, até que fossem encontrados os teores de projeto que produzissem CPs com Vv que estivessem dentro dos limites apresentados anteriormente ( $4,0 \pm 0,4\%$ ). Para o cálculo da  $G_{mm}$ , foi realizado o ensaio em duas amostras. Apesar de a norma permitir uma variação de até 0,044 nos valores de  $G_{mm}$  obtidos com duas amostras, foi decidido, para esta pesquisa, que os valores individuais não deveriam apresentar uma dispersão maior do que 0,015 entre eles, uma vez que este é um parâmetro cuja variação pode afetar as demais propriedades volumétricas das misturas. Vasconcelos *et al.* (2003) mostraram que, a variação permitida pela norma altera em até 0,3% o teor de ligante asfáltico em uma mistura.

A Tabela 8 mostra os valores (médias) dos parâmetros volumétricos das duas misturas dosadas com seus teores de projeto, também apresentados. Percebe-se que os valores de Vv estão dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT para a camada de rolamento. No caso dos valores de RBV, o limite mínimo exigido, 75%, não foi atingido, porém, sabe-se que, existe uma tendência atual de se utilizar misturas com RBV menores do que aqueles estabelecidos em normas.

Tabela 8 - Teor de projeto de ligante asfáltico e parâmetros volumétricos das misturas

Parâmetro	Mistura 1	Mistura 2
Teor de projeto de ligante asfáltico (%)	4,8	5,1
Densidade máxima medida ( $G_{mm}$ )	2,378	2,346
Densidade aparente do CP ( $G_{mb}$ )	2,281	2,250
Volume de vazios – Vv (%)	4,0	4,1
Vazios com Betume – VCB (%)	10,7	11,2
Vazios do Agregado Mineral – VAM (%)	14,7	15,3
Relação Betume/Vazios – RBV (%)	72,4	73,1

### **3.4 Processamento Digital de Imagens (PDI)**

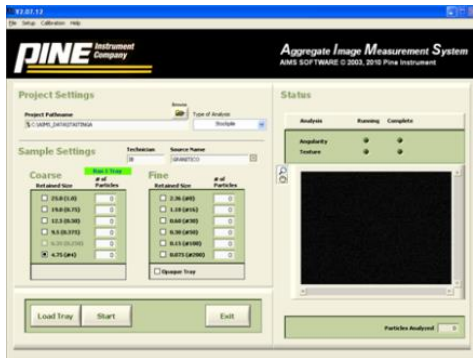
#### **3.4.1 Análise de agregados utilizando o AIMS**

A análise dos agregados graúdos inclui parâmetros de forma tridimensional, de angularidade, de textura e de razões de achatamento e de alongamento (lamelaridade). Os agregados graúdos considerados no sistema de análise do equipamento AIMS são aqueles retidos na peneira de abertura de 4,75mm (#4). As partículas de agregado devem ser posicionadas na bandeja transparente indicada para cada tamanho: 25,4mm, 19,0mm, 12,5mm, 9,5mm ou 4,75mm. Quando o ensaio é iniciado, a bandeja com os agregados começa a girar dentro do equipamento, e a imagem de cada partícula é capturada. Em seguida, a bandeja gira novamente para que a altura dos agregados seja medida, obtendo-se, assim, todas as dimensões, incluindo a profundidade. Uma terceira digitalização é feita para que os níveis de textura sejam obtidos.

Em relação aos agregados miúdos, ou seja, passantes na peneira de abertura de 4,75mm (#4) e retidos na peneira de abertura de 0,075mm (Nº 200), os mesmos devem ser colocados e espalhados na bandeja opaca, que é utilizada para todos os tamanhos de agregados miúdos. Uma amostra de aproximadamente 50g de material, para cada tamanho, deve ser usada e espalhada uniformemente ao longo da bandeja. Nesse caso, apenas uma digitalização é realizada. O equipamento avalia as imagens de forma que as partículas de agregados que estejam em contato não sejam analisadas e não afetem, assim, o resultado.

A utilização do AIMS requer que um passo a passo seja seguido. Primeiramente, cada material deve ser quarteado e em seguida passado pela série de peneiras cujos tamanhos de partículas retidas são analisadas pelo equipamento (Tabela 9). Em seguida, os agregados graúdos devem ser posicionados na bandeja de forma que suas partículas estejam separadas umas das outras. Para os agregados miúdos, a distribuição dos agregados deve ser feita de forma a tentar evitar aglomerações de suas partículas ao longo da bandeja. A melhor forma de espalhar as partículas é utilizar a ponta dos dedos de forma a “polvilhar” o material. Após a preparação da amostra na bandeja, deve-se selecionar no *software* o tipo de análise a ser realizada, bem como o tamanho do agregado a ser ensaiado. As portas do equipamento devem ser fechadas e, enfim, o ensaio é iniciado. Após as digitalizações necessárias, o equipamento retorna a bandeja à sua posição inicial, e então são gerados todos os resultados e os gráficos em planilhas do MS Excel. A Figura 21 mostra um resumo do passo a passo previamente descrito.

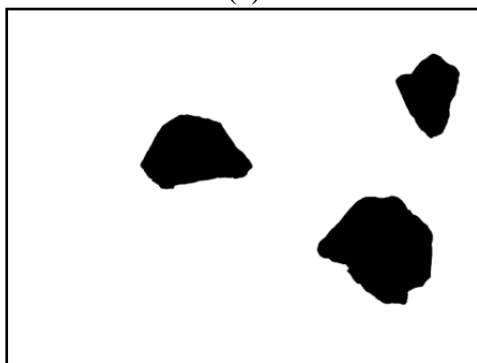
Figura 21 - Passo a passo da utilização do AIMS: (a) interface do *software*; (b) agregados dispostos na bandeja; (c) análise da angularidade e da forma; (d) análise da textura superficial; (e) planilhas-resumo com os resultados e (f) resultados individuais de cada partícula



(a)



(b)



(c)



(d)

Form3D											
Size	Particles	Average	Standard	Lower (L-2S)	(L-1S)	Medium (L-12)	(L-12)	High (L-12-2S)	(L-20)	Out of Range	
in Range			Deviation	#	%	Cum. %	#	%	Cum. %	#	%
4.75 (No. 40)	111	9.1	2.8	0	0.0%	88	88.2%	84.7%	111	100.0%	0
7.5 (No. 20)	159	8.3	2.8	2	1.2%	157	98.8%	95.4%	159	100.0%	0
12.5 (No. 12)	506	8.2	2.7	62	12.2%	444	87.8%	88.2%	506	100.0%	0
19.0 (No. 8)	459	7.8	2.5	74	16.1%	385	83.9%	85.2%	459	100.0%	0
25.0 (No. 6)	495	7.7	2.4	86	17.4%	409	82.6%	85.2%	495	100.0%	0
4.75 (No. 40)	874	8.0	2.4	61	6.9%	813	93.1%	93.2%	874	100.0%	0

(e)

AIMS Aggregates											
Size	Particles	Average	Standard	Lower (L-2S)	(L-1S)	Medium (L-12)	(L-12)	High (L-12-2S)	(L-20)	Out of Range	
in Range			Deviation	#	%	Cum. %	#	%	Cum. %	#	%
4.75 (No. 40)	111	9.1	2.8	0	0.0%	88	88.2%	84.7%	111	100.0%	0
7.5 (No. 20)	159	8.3	2.8	2	1.2%	157	98.8%	95.4%	159	100.0%	0
12.5 (No. 12)	506	8.2	2.7	62	12.2%	444	87.8%	88.2%	506	100.0%	0
19.0 (No. 8)	459	7.8	2.5	74	16.1%	385	83.9%	85.2%	459	100.0%	0
25.0 (No. 6)	495	7.7	2.4	86	17.4%	409	82.6%	85.2%	495	100.0%	0
4.75 (No. 40)	874	8.0	2.4	61	6.9%	813	93.1%	93.2%	874	100.0%	0

(f)

Tabela 9 - Tamanhos de agregados analisados no AIMS

Peneira (ASTM)	Abertura (mm)
1"	25,00
3/4"	19,00
1/2"	12,50
3/8"	9,50
#4	4,75
#8	2,36
#16	1,18
#30	0,60
#50	0,30
#100	0,15
#200	0,075

### 3.4.2 Parâmetros analisados no AIMS

O AIMS é capaz de fornecer cinco diferentes propriedades, sendo três delas apenas para os agregados graúdos, uma apenas para os agregados miúdos e uma para ambos os tamanhos de agregados. A Forma 2D se aplica aos agregados miúdos e quantifica a forma relativa de imagens bidimensionais das partículas de agregado. O seu índice, expresso pela Equação 9, varia de 0 a 20 e quanto mais próximo de zero, mais a partícula de agregado terá a forma de um círculo perfeito. Outro parâmetro relacionado com a forma dos agregados, mas utilizado para os agregados graúdos, é a esfericidade. Esta propriedade descreve a forma tridimensional de uma partícula de agregado, tem uma escala relativa de 0 a 1 e é calculada através da Equação 10. Um valor de esfericidade igual a 1 representa uma partícula de agregado totalmente cúbica, ou com suas três dimensões de mesmo tamanho.

$$\text{Forma 2D} = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[ \frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (9)$$

Onde:  $R_{\theta}$  = raio da partícula no ângulo  $\theta$  e  $\Delta\theta$  = diferença de incremento no ângulo.

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{d_S d_I}{d_L^2}} \quad (10)$$

Onde:  $d_S$  = menor dimensão do agregado;  $d_I$  = dimensão intermediária do agregado e  $d_L$  = maior dimensão do agregado.

As razões de lamelaridade são representadas pelo achatamento e pelo alongamento dos agregados. Existem, na literatura, diversas traduções distintas para essas propriedades, mas para este trabalho, considerou-se que achatamento é a razão entre a menor dimensão (espessura) e a dimensão intermediária (largura) do agregado, e que alongamento é a razão entre a dimensão intermediária e a maior dimensão do agregado (comprimento).

A angularidade é medida através do parâmetro gradiente de angularidade, que é aplicado tanto para os agregados graúdos quanto para os agregados miúdos. Este parâmetro quantifica as mudanças ao longo das bordas das partículas e varia em uma escala de 0 a 10.000. De acordo com esse parâmetro, um círculo perfeito tem um valor de gradiente de angularidade muito baixo, tendendo a zero. A Equação 11 mostra o cálculo da angularidade.

$$\text{Gradiente de Angularidade} = \frac{1}{\frac{n}{3} - 1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (11)$$

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

A textura superficial dos agregados, apresentada pela Equação 12, pode ser definida como as variações nos níveis de *pixels* de uma imagem. Esta descreve a polidez ou rugosidade das superfícies das partículas de agregados, sendo aplicada apenas para os agregados graúdos. De acordo com Castelo Branco *et al.* (2006), a textura é analisada através do método das *wavelets*, que caracteriza a superfície dos materiais através da média e do desvio padrão dos valores de *pixels* das imagens analisadas. Sua escala varia de 0 a 1.000, sendo um agregado polido aquele cujo valor de textura é bem próximo de zero.

$$\text{Textura Superficial} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2 \quad (12)$$

Onde:  $D$  = função de decomposição;  $n$  = nível de decomposição da imagem;  $N$  = número total de coeficientes em uma imagem detalhada;  $i$  = direção da textura;  $j$  = índice *wavelet* e  $x,y$  = localização dos coeficientes no domínio transformado.

### 3.4.3 Classificação dos agregados

Al Rousan (2004) fez ensaios em vários agregados, com composições mineralógicas distintas, características de forma, de angularidade e de textura diferentes e de tamanhos diversos para desenvolver uma metodologia de classificação dos agregados de acordo com seus parâmetros. Este autor avaliou treze tipos de agregados graúdos e cinco tipos de agregados miúdos, realizou três ensaios com o mesmo operador para cada tamanho de agregado e avaliou o desempenho de diferentes operadores realizando um mesmo ensaio, a fim de excluir quaisquer efeitos relativos à reprodutibilidade e à representatividade destes ensaios. O método estatístico dos *clusters*, ou agrupamentos, foi aplicado durante as análises de cada propriedade obtida através do AIMS e para a determinação dos limites de classificação, apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Limites de classificação (AL ROUSAN, 2004)

Propriedade	Valores-limite / Classificação				
Forma 2D	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Esfericidade	< 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado/ Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
Angularidade	< 2100	2100 – 4000	4000 – 5400	> 5400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Textura Superficial	< 165	165 – 275	275 – 350	350 – 460	> 460
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Em relação à lamelaridade das partículas dos agregados, a metodologia Superpave exige que no máximo 10% das mesmas tenham razão de lamelaridade de até 5:1, ou seja, que sua maior dimensão (comprimento) seja no máximo cinco vezes maior do que sua menor dimensão (espessura).

O AIMS não tem ferramentas capazes de fornecer valores de textura superficial para os agregados miúdos, porém um estudo, realizado por Masad *et al.* (2001), provou que existe uma forte correlação entre a angularidade (medida através de imagens em preto e branco) e a textura superficial (medida através de imagens em escalas de cinza) desses citados agregados. Ou seja, quanto maior for a angularidade de um dado agregado miúdo, maior será seu índice de textura. No caso dos agregados graúdos, essa correlação não pode ser feita, existindo, assim, agregados graúdos com altos valores de angularidade, porém baixos valores de textura e vice-versa.

### 3.4.4 Caracterização da estrutura interna de misturas asfálticas

Para a análise das misturas asfálticas com relação à sua estrutura interna, os CPs foram serrados em dois locais: (i) a um terço do topo do CP e (ii) a um terço da base do CP, a fim de aumentar a amostragem dos resultados. Após a serragem, cada face dos CPs foi digitalizada em um *scanner* convencional e, em seguida, foi dado o prosseguimento às etapas do PDI. Dois *software* diferentes foram usados, sendo que os parâmetros estudados neste

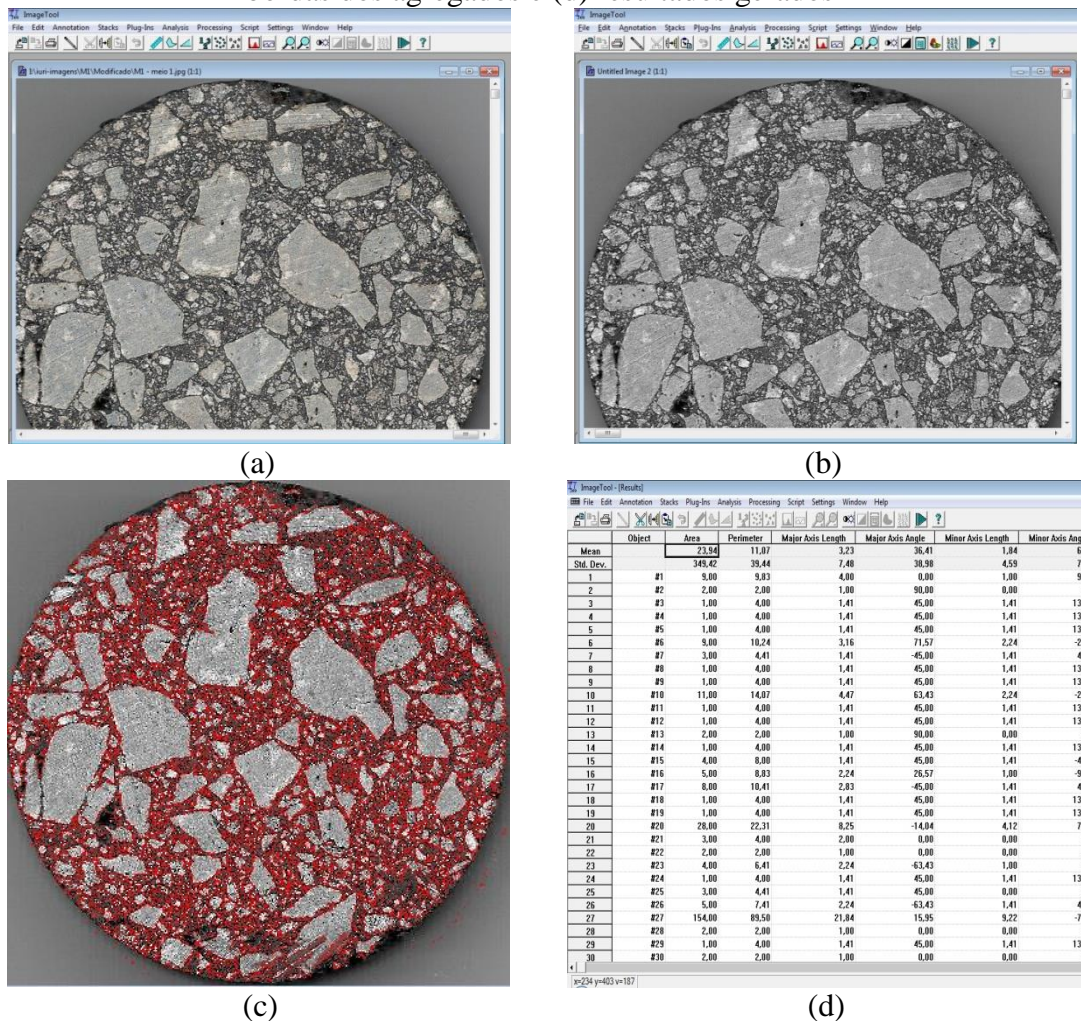
trabalho foram: (i) número de pontos de contato entre as partículas de agregados; (ii) orientação das partículas e (iii) segregação radial das partículas.

No uso do *ImageTool*, a análise dos parâmetros relacionados à orientação das partículas de agregados exigiu primeiramente a realização da etapa de digitalização, ou seja, o processo de transformação da imagem real de um objeto físico em uma imagem digital que possa ser manipulada em um computador. Em seguida, houve a etapa de realce, onde os agregados presentes na imagem ficam melhor distintos uns dos outros, podendo ser separadas através da detecção das bordas de cada uma. A etapa de restauração procura corrigir os defeitos e as imperfeições que possivelmente possam ter aparecido devido ao processo de digitalização da imagem. Finalmente, há a segmentação que é um procedimento de identificação e de rotulação de regiões ou objetos em uma imagem, por meio da detecção das bordas da mesma. Esta técnica permite a subdivisão de uma imagem em suas partes ou objetos constituintes para que estes possam ser identificados e tratados separadamente (SOUZA *et al.*, 2006).

A metodologia de uso do *Digital Image Analysis System* (MAHMOUD *et al.*, 2010) seguiu algumas etapas que constavam no seu procedimento de uso normatizado. A primeira etapa consistiu na identificação do menor tamanho de agregado visível na imagem. Em seguida, houve a etapa de aplicação dos filtros, usados com o objetivo de remover as falhas na imagem e a variação na intensidade dos *pixels* (deixando a imagem com uma escala de cinza uniforme). A partir disso, a imagem sofreu um processo de detecção de bordas, onde foram definidas as formas dos agregados dentro da imagem, e o processo de transformação em preto e branco, diferenciando ainda mais o agregado do ligante asfáltico dentro da imagem. Os resultados para os parâmetros requeridos foram fornecidos automaticamente pelo *software*. No que diz respeito aos pontos de contato, foi obtida uma contagem com o número de vezes em que foi identificado algum contato agregado-agregado na imagem analisada. Quanto à orientação, foram obtidos histogramas de frequências para os ângulos de cada partícula analisada em relação à horizontal. Com relação à segregação, foram obtidas as frequências de agregados encontrados em cada uma das três regiões radiais definidas pelo *software* utilizado, por tamanho de agregado.

Para esta pesquisa, foram avaliadas as faces horizontais de CPs das duas misturas (M1 e M2) a fim de se comparar o comportamento dos agregados na estrutura interna de ambas e tentar obter relações com as propriedades dos diferentes agregados em estudo. A Figura 22 mostra algumas das etapas do uso do *software ImageTool*.

Figura 22 - Exemplo de etapas para a utilização dos *software* de imagens: (a) imagem original da face serrada do CP; (b) imagem em escala de cinza; (c) detecção das bordas dos agregados e (d) resultados gerados



### 3.5 Ensaios de caracterização mecânica para misturas asfálticas

#### 3.5.1 Módulo de Resiliência (MR)

O MR de uma mistura asfáltica é o parâmetro que representa o comportamento elástico desse tipo de material. É de conhecimento geral que a mistura asfáltica não possui um comportamento completamente elástico, porém sabe-se que quando a carga aplicada é extremamente inferior à resistência do material e esta é repetida por muitas vezes, a deformação sofrida é quase toda recuperável, por isso pode ser chamada de elástica.

O ensaio para a determinação do MR (DNER-ME 133/94) de uma mistura asfáltica foi feito em um equipamento de carregamento de sistema pneumático, e a medição das deformações do CP foram feitas através de LVDTs. Por compressão diametral, o MR é

obtido pela aplicação de carga durante 0,1 segundo e repouso de 0,9 segundo. O MR é obtido através da razão entre a tensão de tração e a deformação elástica recuperável, a 25°C. A obtenção do valor de MR é de extrema importância no Brasil, uma vez que através desse parâmetro, é possível fazer uma previsão das tensões e das deformações em uma determinada estrutura, importantes para o dimensionamento de pavimentos. O ensaio exige a utilização de CP moldado em laboratório com diâmetro de aproximadamente  $10 \pm 0,02\text{cm}$ , e o resultado é obtido através da Equação 13.

$$MR = \frac{F}{100 \times \delta_r \times h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (13)$$

Onde:  $F$  = carga vertical aplicada no CP, em N;  $\delta_r$  = deslocamento resiliente, em cm;  $h$  = altura do CP, em cm e  $\mu$  = coeficiente de Poisson.

### 3.5.2 Resistência à Tração (RT)

O ensaio de RT é feito através da aplicação de tração indireta por compressão diametral e foi desenvolvido no Brasil inicialmente com o objetivo de determinar a resistência de CPs de concreto de cimento Portland. O procedimento de ensaio consta na norma DNER-ME 138/94 e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão ao longo de um CP a fim de gerar tensões de tração que são desenvolvidas no diâmetro horizontal ou perpendicular ao eixo de aplicação da carga. O valor de RT é obtido através da Equação 14.

$$RT = \frac{2F}{100 \times \pi \times D \times h} \quad (14)$$

Onde:  $F$  = carga de ruptura, em N;  $D$  = diâmetro do CP, em cm;  $h$  = altura do CP, em cm.

### 3.5.3 Vida de fadiga

De acordo com Vasconcelos (2004), a fadiga de um material é o processo de ruptura estrutural quando são submetidas tensões e deformações repetidas a este material. A carga que é aplicada na amostra é geralmente muito menor do que a carga de ruptura, o que leva o material a trincar e a romper após um número elevado de repetições dessa carga.

Considera-se, então, como vida de fadiga o número total de aplicações necessárias para romper um material. O ensaio de vida de fadiga pode ser feito no mesmo equipamento pneumático no qual se realiza o ensaio de MR, utilizando a mesma condição de temperatura. Existem duas formas de se realizar o ensaio com relação ao modo de carregamento: a tensão ou a deformação controlada.

O objetivo do ensaio de vida de fadiga é simular a passagem de pneus no pavimento asfáltico ao longo do tempo. Para o ensaio a tensão controlada, mais comumente utilizado no Brasil, a vida de fadiga pode ser considerada como sendo o número total de aplicações de golpes de carga (a uma frequência de 0,1s de aplicação e 0,9s de descanso) até que a amostra deforme o suficiente para romper. A Equação 15 expressa a vida de fadiga de um material asfáltico correlacionando variáveis obtidas no ensaio.

$$N = K \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^n \quad (15)$$

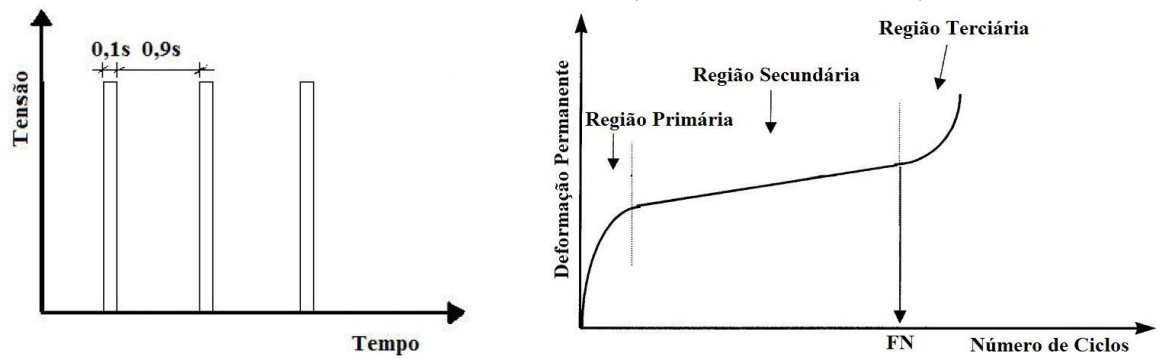
Onde:  $N$  = vida de fadiga (número de repetições);  $\Delta\sigma$  = diferença de tensões de compressão e de tração, MPa;  $K$ ,  $n$  = constantes determinadas no ensaio.

### 3.5.4 Creep dinâmico

O ensaio de *creep* dinâmico, detalhado pelo *Report 465 National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (WITCZAK *et al.*, 2002), consiste em submeter a mistura asfáltica a um carregamento cíclico de compressão com 0,1 segundos de carga e 0,9 segundos de repouso (Figura 23a). O ensaio mede a relação da deformação total com o número de ciclos. As amostras utilizadas no ensaio de *creep* dinâmico são CPs com dimensões aproximadas de 15cm de altura e 10cm de diâmetro, além de um Vv de aproximadamente  $7 \pm 0,5\%$ . O resultado obtido através do ensaio é o FN e este representa o número de ciclos necessários para atingir uma taxa de deformação plástica mínima, a partir da qual o CP atinge a ruptura.

A Figura 23b mostra uma curva típica do comportamento de uma mistura asfáltica com suas três zonas bem delimitadas: zona primária, na qual a densificação da amostra acontece em uma taxa elevada, ou seja, rapidamente; zona secundária, na qual a taxa de deformação é quase constante com o aumento do número de ciclos; e zona terciária, na qual a amostra de mistura asfáltica se encontra rompida.

Figura 23 - Ensaio de *creep*: (a) aplicação da carga durante o ensaio e (b) comportamento de uma mistura asfáltica no ensaio (ONOFRE *et al.*, 2011)



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo traz os resultados referentes à caracterização dos três diferentes agregados em relação a suas propriedades de forma, de angularidade e de textura, obtidas através do AIMS, bem como os resultados referentes à análise da degradação e à abrasão dos agregados, obtidos com o uso do equipamento Los Angeles. A caracterização mecânica das misturas asfálticas confeccionadas com esses agregados também é apresentada a fim de se fazer possíveis correlações existentes entre as propriedades dos agregados e o comportamento mecânico das misturas asfálticas constituídas por eles.

### **4.1 Caracterização das propriedades de forma, de angularidade e de textura**

#### ***4.1.1 Caracterização geral***

A Tabela 11 mostra um resumo dos resultados, representados através dos parâmetros estatísticos média, desvio padrão e Coeficiente de Variação (CV), para cada tipo de agregado analisado. Desconsiderou-se, neste primeiro momento, a distribuição peneira a peneira, ou seja, os parâmetros estatísticos desta seção estão relacionados à distribuição granulométrica completa de cada agregado investigado. A Tabela 12 apresenta a classificação dos agregados em relação a cada propriedade levando em consideração as médias dos resultados de cada uma destas propriedades. Alguns valores de CV encontrados foram elevados, indicando que a média pode não representar adequadamente as características de forma dos agregados quando se leva em consideração todos os tamanhos dos mesmos. É importante deixar claro que foram utilizados pelo menos 50 partículas de agregados graúdos e pelo menos 150 partículas de agregados miúdos, por fração de agregado retida em cada uma das peneiras, valores mínimos exigidos pelo ensaio.

Tabela 11 - Médias e desvios-padrão dos resultados obtidos

Propriedade	Agregado	Parâmetro Estatístico			
		Média	Número de partículas	Desvio Padrão	CV(%)
Forma 2D (miúdo)	1	8,42	3.656	2,23	26,5
	2	8,32	4.512	2,25	27,0
	3	8,36	5.477	2,20	26,3
Esfericidade (graúdo)	1	0,63	399	0,11	17,5
	2	0,67	696	0,10	14,9
	3	0,70	599	0,09	12,9
Angularidade (graúdo e miúdo)	1	3778,21	4.064	1274,58	33,7
	2	3629,12	5.225	1265,92	34,9
	3	3304,54	6.138	948,30	28,7
Textura Superficial (graúdo)	1	284,68	400	107,10	37,6
	2	382,75	516	212,08	55,4
	3	562,10	648	124,42	22,1

Tabela 12 - Classificação dos agregados estudados

Agregado	Propriedade			
	Forma 2D	Esfericidade	Angularidade	Textura Superficial
1 (granítico)	Semialongado	Pouco esférico	Subarredondado	Pouco rugoso
2 (gnáissico)	Semialongado	Pouco esférico	Subarredondado	Moderadamente rugoso
3 (fonolítico)	Semialongado	Pouco esférico	Subarredondado	Muito rugoso

Em relação aos parâmetros de forma e de angularidade, é possível perceber que os três tipos de agregados são classificados da mesma forma com relação a esses três parâmetros. A partir disso, acredita-se que, os processos de produção de agregados foram os fatores mais importantes para determinar tais características. Como os processos de britagem das três pedreiras são muito parecidos, foram gerados agregados com propriedades de forma muito próximas, resultando em uma mesma classificação. Em relação à propriedade de textura superficial, acredita-se que a mesma é mais afetada pelo tipo de rocha dos agregados analisados, uma vez que os valores foram muito distintos para os três agregados em estudo e a classificação dos três foi diferente também. O agregado fonolítico foi aquele que se mostrou mais rugoso, enquanto que o granítico se mostrou o mais liso.

Em relação à forma, é importante ressaltar que as médias obtidas para esse parâmetro foram muito próximas para os três agregados e também estão muito próximas ao limite que divide os grupos de classificação em semialongado e semicircular. Os resultados referentes à textura superficial foram mais dispersos quando se comparam os três materiais estudados. A média dos resultados para o agregado proveniente da Pedreira 1 foi bem

próxima do limite entre os dois grupos de classificação (macio e pouco rugoso), o que pode indicar uma quantidade considerável de partículas com textura macia.

Mesmo com os agregados sendo produzidos por métodos muito parecidos, acredita-se ainda que, esta classificação, feita para agregados norte-americanos, pode não ser adequada aos agregados brasileiros. Em um estudo mais detalhado, o uso da estatística e uma matriz de agregados maior podem ser necessários para a elaboração de uma classificação específica para os agregados em estudo.

A classificação apresentada é relevante para se ter uma ideia geral das propriedades de forma, de angularidade e de textura, porém, por considerar apenas a média dos valores obtidos no AIMS e, ainda, considerar todos os agregados gerados por uma mesma pedreira como se fossem exatamente iguais em relação a tais propriedades, esta forma de classificação pode não ser realista e precisa. Sendo assim, é importante analisar também os agregados separados de acordo com seu TMN, ou seja, de acordo com as diferentes granulometrias produzidas pelas pedreiras.

#### ***4.1.2 Caracterização por Tamanho Máximo Nominal (TMN)***

A caracterização apresentada no item anterior (4.1.1) trouxe médias de resultados para os agregados considerando todos os tamanhos produzidos pelas pedreiras em estudo. No entanto, uma vez que os agregados foram caracterizados separadamente, é importante apresentar os resultados obtidos para cada tamanho coletado nas pedreiras. Neste caso, é também importante ressaltar que as médias são referentes a cada agregado considerando-se toda a sua distribuição granulométrica, ou seja, entram nas médias os valores obtidos para as diversas frações de agregados. As Tabelas de 13 a 15 mostram os resultados.

Tabela 13 - Resultados obtidos para o Agregado 1 (granítico)

Propriedade	Parâmetro	Tamanho do agregado			
		1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra
Forma 2D	Média	8,2	8,5	8,3	8,7
	Desvio padrão	2,1	2,3	2,2	2,4
	CV (%)	25,9	26,4	26,1	27,6
Esfericidade	Média	0,61	0,63	0,65	-
	Desvio padrão	0,11	0,10	0,11	-
	CV (%)	18,03	15,87	16,92	-
Angularidade	Média	3624,2	3959,3	3633,5	3906,2
	Desvio padrão	1229,1	1273,1	1226,0	1369,5
	CV (%)	33,9	32,2	33,7	35,1
Textura Superficial	Média	280,0	294,6	276,8	-
	Desvio padrão	91,2	114,6	115,5	-
	CV (%)	32,6	38,9	41,7	-

Tabela 14 - Resultados obtidos para o Agregado 2 (gnáissico)

Propriedade	Parâmetro	Tamanho do agregado (mm)				Pó de pedra
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	
Forma 2D	Média	8,0	8,2	8,4	8,6	8,4
	Desvio padrão	2,1	2,3	2,4	2,3	2,3
	CV (%)	26,3	28,0	28,6	26,7	27,4
Esfericidade	Média	0,66	0,67	0,68	0,67	-
	Desvio padrão	0,10	0,11	0,11	0,10	-
	CV (%)	15,15	16,42	16,18	14,93	-
Angularidade	Média	3468,0	3542,2	3585,2	3758,4	3845,0
	Desvio padrão	1214,6	1267,1	1238,7	1258,7	1350,5
	CV (%)	35,0	35,8	34,6	33,5	35,1
Textura Superficial	Média	386,0	401,9	385,2	337,9	-
	Desvio padrão	212,3	195,9	200,3	239,8	-
	CV (%)	55,0	48,7	51,9	70,9	-

Tabela 15 - Resultados obtidos para o Agregado 3 (fonolítico)

Propriedade	Parâmetro	Tamanho do agregado (mm)					Areia Grossa	Areia Fina
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	3/16"		
Forma 2D	Média	-	8,7	8,0	8,2	8,2	8,4	8,6
	Desvio padrão	-	2,4	2,1	2,2	2,1	2,3	2,2
	CV (%)	-	27,6	26,3	26,8	25,6	27,4	25,6
Esfericidade	Média	0,71	0,71	0,68	0,67	0,66	-	-
	Desvio padrão	0,09	0,08	0,09	0,09	0,07	-	-
	CV (%)	12,68	11,27	13,24	13,43	10,61	-	-
Angularidade	Média	3048,2	3447,0	3114,5	3193,7	3238,1	3315,2	3565,1
	Desvio padrão	568,2	1099	935,2	943,0	914,6	1002,6	1175,5
	CV (%)	18,6	31,9	30,0	29,5	28,2	30,2	33,0
Textura Superficial	Média	643,6	648,6	469,9	448,2	468,5	459,2	-
	Desvio padrão	120,4	133,6	132,2	105,6	131,0	119,7	-
	CV (%)	18,7	20,6	28,1	23,6	28,0	26,1	-

Os resultados apresentados acima mostram que, independente do TMN dos agregados analisados, os valores médios obtidos para cada uma das propriedades foram muito próximos, e os agregados seriam classificados da mesma forma tanto desta forma quanto

através da sua média geral. Os CVs elevados podem ser explicados pelo fato de que as médias foram obtidas a partir dos resultados das diversas frações de agregados, ou seja, os resultados para as frações separadas peneira a peneira podem ser bastante distintos entre si. Além disso, os valores elevados de CVs podem indicar que a média poderia não ser o melhor parâmetro para caracterizar um agregado em relação a suas diversas propriedades, sendo a sua distribuição de propriedades mais importante.

Os CVs mais elevados para os parâmetros de angularidade e de textura superficial podem ser explicados por dois motivos diferentes. Em relação à angularidade, este é o único parâmetro que é aplicado tanto aos agregados graúdos quanto aos miúdos. Sendo assim, acredita-se que, os valores de angularidade para os dois grupos de tamanhos de agregado podem ser bastante distintos, gerando variações elevadas. No caso da textura superficial, acredita-se que, a aleatoriedade da posição de cada partícula no preparo da amostra a ser analisada no AIMS possa resultar em valores diferentes, ou seja, em uma maior variação. Isso acontece porque as diversas faces de uma brita não possuem padrão bem definido. No caso do agregado 3, essa tendência não ocorreu. Provavelmente o tipo de rocha (fonolítica) possui uma característica mais uniforme em sua textura superficial após os processos de britagem. Também para o agregado 3, os CVs obtidos para o parâmetro de angularidade foram mais baixos do que aqueles encontrados para os demais agregados. Entende-se que, os tamanhos das frações de agregados tiveram menor influência nos resultados para este tipo específico de agregado.

No geral, não houve uma tendência clara em relação aos TMNs dos agregados analisados. No caso, por exemplo, dos agregados 1 e 2, a esfericidade diminuiu com o aumento do TMN; já para o agregado 3, aconteceu o inverso. Para o agregado 3, a textura superficial visivelmente diminuiu com a redução do TMN, fato que não pôde ser observado para os demais agregados, que mantiveram valores muito próximos para esse parâmetro, independente do TMN.

As médias apresentadas nesta seção tratam dos agregados considerando toda sua granulometria, ou seja, os resultados obtidos desconsideram as diferenças nas características das frações separadas. A próxima seção apresentará os resultados obtidos fração por fração, para um conhecimento mais detalhado dos agregados em estudo.

#### 4.1.3 Caracterização dos agregados separados peneira a peneira

Esta seção trata da caracterização das frações de agregados, separadas através das peneiras da série norte-americana que são utilizadas nos procedimentos de análise do AIMS. Todos os agregados da matriz de materiais desta pesquisa foram fracionados e separados por tamanho retido nas malhas de peneiras utilizadas pelo AIMS. Sendo assim, um número muito grande de resultados foi obtido, e os mesmos são apresentados a seguir. É importante ressaltar que alguns agregados não tinham, em sua composição, algumas frações, como por exemplo, o agregado de TMN de 25mm proveniente da Pedreira 1 não possuía agregados miúdos em sua composição.

As Tabelas de 16 a 18 também têm o objetivo de comparar as características das frações de agregados provenientes de uma mesma fonte, porém retiradas de tamanhos distintos, ou seja, obtidas através do peneiramento de materiais com os diversos TMNs produzidos pelas pedreiras. No caso da angularidade, cuja média foi obtida considerando-se tanto os valores encontrados para os agregados graúdos quanto para os agregados miúdos, há uma tendência de aumento do valor dessa propriedade quando se diminui o tamanho do agregado. Já no caso da textura, acontece o contrário, os valores de textura tendem a diminuir com a redução do tamanho dos agregados graúdos investigados.

Tabela 16 - Médias dos resultados obtidos para as frações do Agregado 1 (granítico)

Peneira	Parâmetro	Tamanho do agregado (mm)				Parâmetro estatístico	
		1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra	Média	CV (%)
12,5 mm	Esfericidade	0,59	0,67	-	-	0,63	8,9
	Angularidade	2.930,8	2.977,5	-	-	2.954,2	1,1
	Textura	328,2	355,5	-	-	341,9	5,6
9,5 mm	Esfericidade	0,61	0,64	0,69	-	0,65	6,3
	Angularidade	2.972,8	2.832,4	2.945,1	-	2.916,8	2,5
	Textura	287,1	308,5	334,2	-	309,9	7,6
# 4	Esfericidade	0,64	0,58	0,62	-	0,61	4,9
	Angularidade	3.224,7	3.027,1	3.110,0	-	3.120,6	3,2
	Textura	224,8	219,9	219,3	-	221,3	1,4
# 8	Forma 2D	8,8	9,7	9,0	9,2	9,2	4,2
	Angularidade	4.119,4	4.249,0	4.065,5	4.489,0	4.230,7	4,5
# 16	Forma 2D	8,3	9,0	8,4	9,1	8,7	4,7
	Angularidade	4.271,4	4.443,8	4.207,8	4.494,0	4.354,3	3,1
# 30	Forma 2D	7,6	7,4	8,1	8,5	7,9	6,3
	Angularidade	4.045,5	4.048,5	4.151,5	4.463,0	4.177,1	4,7
# 50	Forma 2D	7,6	8,0	7,6	8,4	7,9	4,8
	Angularidade	3.933,3	4.101,3	3.943,4	4.209,0	4.046,8	3,3
# 100	Forma 2D	7,7	7,6	7,8	7,4	7,6	2,2
	Angularidade	3.101,0	3.226,7	3.388,9	3.025,1	3.185,4	5,0
# 200	Forma 2D	9,0	9,4	8,8	9,7	9,2	4,4
	Angularidade	2.885,7	2.678,7	2.554,1	2.856,3	2.743,7	5,7

Tabela 17 - Médias dos resultados obtidos para as frações do Agregado 2 (gnáissico)

Peneira	Parâmetro	Tamanho do agregado (mm)				Pó de pedra	Parâmetro estatístico	
		1"	3/4"	1/2"	3/8"		Média	CV (%)
19 mm	Esfericidade	0,70	-	-	-	-	-	-
	Angularidade	2.604,9	-	-	-	-	-	-
	Textura	375,7	-	-	-	-	-	-
12,5 mm	Esfericidade	0,60	0,71	0,71	-	-	0,67	9,4
	Angularidade	2.729,2	2.634,8	2.557,3	-	-	2.640,4	3,3
	Textura	409,6	389,3	424,1	-	-	407,7	4,3
9,5 mm	Esfericidade	0,63	0,63	0,70	0,70	-	0,67	6,1
	Angularidade	2.850,7	2.697,8	2.675,8	2.613,8	-	2.709,5	3,7
	Textura	339,8	417,4	382,9	384,4	-	381,1	8,3
# 4	Esfericidade	0,64	0,59	0,61	0,65	-	0,62	4,4
	Angularidade	2.706,2	2.888,9	2.841,2	2.870,2	-	2.826,6	2,9
	Textura	330,2	350,9	350,7	305,0	-	334,2	6,5
# 8	Forma 2D	8,7	9,3	9,0	9,4	8,7	9,0	3,6
	Angularidade	3.953,7	4.055,5	3.842,9	3.989,4	4.419,4	4.052,2	5,4
# 16	Forma 2D	8,0	8,8	8,8	9,1	9,1	8,8	5,1
	Angularidade	4.164,6	4.154,9	4.256,9	4.235,2	4.374,9	4.237,3	2,1
# 30	Forma 2D	7,6	7,7	7,9	8,2	8,6	8,0	5,1
	Angularidade	3.995,7	4.225,7	4.038,3	4.353,9	4.246,9	4.172,1	3,6
# 50	Forma 2D	7,8	7,2	7,6	7,9	7,8	7,7	3,6
	Angularidade	4.201,6	4.114,8	3.982,8	4.179,2	4.222,3	4.140,1	2,3
# 100	Forma 2D	7,4	7,1	7,7	7,5	7,6	7,5	3,1
	Angularidade	3.151,9	2.949,2	3.456,7	3.476,5	3.378,0	3.282,5	6,9
# 200	Forma 2D	8,7	9,2	9,5	9,2	8,6	9,0	4,2
	Angularidade	2.620,0	2.962,6	2.836,9	3.031,3	2.455,7	2.781,3	8,6

Tabela 18 - Médias dos resultados obtidos para as frações do Agregado 3 (fonolítico)

Peneira	Parâmetro	Tamanho do agregado (mm)					Areia Grossa	Areia Fina	Parâmetro estatístico	
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	3/16"			Média	CV (%)
19mm	Esfericidade	0,71	0,75	-	-	-	-	-	0,73	3,9
	Angularidade	3083,4	3041,6	-	-	-	-	-	3062,5	1,0
	Textura	647,1	711,7	-	-	-	-	-	679,4	6,7
12,5mm	Esfericidade	0,66	0,72	0,70	-	-	-	-	0,69	4,4
	Angularidade	3191,5	3267,5	3309,8	-	-	-	-	3256,3	1,8
	Textura	655,8	697,4	520,1	-	-	-	-	624,4	14,8
9,5mm	Esfericidade	-	0,71	0,69	-	-	-	-	0,70	2,0
	Angularidade	-	2993,6	3011,8	-	-	-	-	3002,7	0,4
	Textura	-	638,4	500,4	-	-	-	-	569,4	17,1
# 4	Esfericidade	-	0,66	0,66	0,67	0,66	0,68	-	0,67	1,3
	Angularidade	-	3193,7	3049,7	3217,4	3185,9	3023,3	-	3134,0	2,9
	Textura	-	549,1	389,1	448,2	468,2	459,2	-	462,8	12,4
# 8	Forma 2D	-	8,4	7,8	7,9	7,7	8,9	8,9	8,3	6,6
	Angularidade	-	3783,3	3127,2	3255,3	3190,5	4007,2	4185,6	3591,5	12,8
# 16	Forma 2D	-	8,2	8,2	8,3	8,2	7,9	8,5	8,2	2,4
	Angularidade	-	3345,0	3303,5	3385,0	3320,6	3433,8	3977,6	3460,9	7,4
# 30	Forma 2D	-	8,6	8,2	8,1	8,4	8,4	8,4	8,4	2,1
	Angularidade	-	3739,0	3363,7	3338,8	3421,7	3321,6	3737,7	3487,1	5,7
# 50	Forma 2D	-	8,8	7,4	8,0	8,3	8,0	8,4	8,2	5,8
	Angularidade	-	4102,0	3297,9	3343,6	3213,3	3308,7	3916,9	3530,4	10,7
# 100	Forma 2D	-	8,9	7,8	7,9	7,7	7,8	7,9	8,0	5,6
	Angularidade	-	3776,5	3099,6	2995,0	3080,9	3121,4	3074,6	3191,3	9,1
# 200	Forma 2D	-	9,2	8,9	9,0	8,9	9,4	9,6	9,2	3,1
	Angularidade	-	2482,6	2483,8	2849,3	3225,4	2821,8	2598,6	2743,6	10,4

As tabelas apresentadas mostram que frações retidas em uma mesma peneira possuem, no geral, as mesmas características de forma, de angularidade e de textura, independente do tamanho do agregado dos quais elas foram retiradas. Isso pode ser comprovado pelo baixo CV obtido através dos valores de cada propriedade e calculado para todos os agregados analisados.

É possível também concluir que, no caso dos agregados provenientes das Pedreiras 1 e 2, a angularidade se comporta de maneira diferente quando se compara agregados graúdos com agregados miúdos. A média geral para esses agregados apontou que eles seriam classificados como subarredondados, e essa classificação se mantém para as partículas graúdas, porém os agregados miúdos possuem valores maiores de angularidade, sendo classificados como subangulares, exceto para as partículas mais finas, retidas nas peneiras #100 e #200. No caso do agregado 3, isso não aconteceu, uma vez que os valores de angularidade foram muito próximos para os agregados graúdos e miúdos.

Em relação à textura superficial, os agregados provenientes das Pedreiras 1 e 2 também tiveram resultados distintos quando se comparam as diferentes frações analisadas. O agregado proveniente da Pedreira 1, classificado como pouco rugoso, tem suas partículas retidas na peneira #4 classificadas como macias, enquanto que o agregado 2, classificado com moderada rugosidade, tem suas partículas retidas na #4 classificadas como pouco rugosas. Já para o agregado 3, essa diferença na classificação não ocorreu, embora os valores de textura superficial para as menores frações de agregados tenham diminuído. No caso da forma 2D, os agregados 1 e 2 foram classificados como semialongados, porém suas partículas retidas nas peneiras #30, #50 e #100 foram classificadas como semicirculares.

Para os três agregados em estudo, as propriedades de suas menores partículas, ou seja, daquelas retidas na peneira #200, foram diferentes em relação às demais frações da porção miúda dos agregados. A forma 2D teve valores mais elevados, indicando partículas menos circulares ou mais alongadas, enquanto que a angularidade teve valores mais baixos, indicando partículas com cantos mais arredondados.

Os CVs obtidos da análise em cada fração de forma separada não foram tão baixos como se esperava. Ou seja, dentro de uma mesma porção retida em uma peneira específica, existem agregados com propriedades que podem variar entre si. Por isso, é importante fazer uma análise da distribuição das propriedades dos agregados e não apenas fornecer uma média que tenta representar todas as partículas de uma amostra como se comportando da mesma forma.

A seguir, cada propriedade dos agregados será apresentada separadamente, com um maior detalhamento das mesmas. Até agora, foram apresentadas tabelas com as médias dos resultados obtidos no AIMS, porém o sistema de análise desse equipamento é capaz de fornecer as distribuições das características através dos gráficos de porcentagens acumuladas.

Como a matriz de agregados é muito grande, e mais de 60 gráficos foram gerados, contando-se todos os tamanhos de agregados analisados das três pedreiras e todas as suas propriedades, optou-se por escolher apenas um agregado de cada pedreira para análise, sendo esse agregado aquele que continha, em sua granulometria, todas as frações a serem analisadas no AIMS. Entende-se que, como já foi mostrado anteriormente, independente do TMN do agregado, as características de suas frações são aproximadamente as mesmas. Desta forma, apresentar os resultados apenas de um agregado por pedreira não oferece desvantagens. Os agregados escolhidos para serem utilizados nas misturas asfálticas avaliadas nesse estudo foram: brita de 1" provenientes das Pedreiras 1 e 2, e brita 3/4" proveniente da Pedreira 3.

#### ***4.1.4 Forma 2D (agregados miúdos)***

A forma 2D (Figuras de 24 a 26), aplicada apenas às frações miúdas dos agregados, está relacionada com a proximidade das partículas à forma de um círculo: quanto mais próximo o valor estiver de 0, mais circular será a partícula e quanto mais próximo for o valor de 20, mais alongada será a mesma. Os agregados provenientes das três pedreiras possuem curvas praticamente sobrepostas umas às outras. No entanto, percebe-se que, para os materiais provenientes das Pedreiras 1 e 2, os agregados retidos nas peneiras #30, #50 e #100 tiveram uma maior quantidade de partículas com valores mais baixos de forma 2D, uma vez que as curvas para essas peneiras estão mais deslocadas para a esquerda. Para os agregados das três pedreiras, no geral, as menores partículas, ou seja, aquelas retidas na peneira #200, tiveram suas curvas mais deslocadas pra a direita. Existe então uma tendência de que essas partículas possuam valores mais elevados de forma 2D, ou seja, são partículas mais alongadas se comparadas às demais.

O agregado proveniente da Pedreira 1 foi classificado, no geral, como sendo semialongado, porém é possível perceber através do gráfico que existe uma grande quantidade de partículas com valores de forma 2D menores do que 8 (aproximadamente 60% das partículas retidas nas peneiras #30, #50 e #100 e cerca de 40% para as demais frações). Essas partículas seriam classificadas como semicirculares ou circulares. No caso da Pedreira 3, as

curvas estão mais deslocadas para a direita, e existem poucas partículas (aproximadamente 15%) de agregados com valor de forma 2D abaixo de 6,5, ou seja, sendo classificadas como circulares. Isso não pôde ser observado para os agregados das Pedreiras 1 e 2 (algumas frações possuem 30% ou mais partículas circulares).

Figura 24 - Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 1

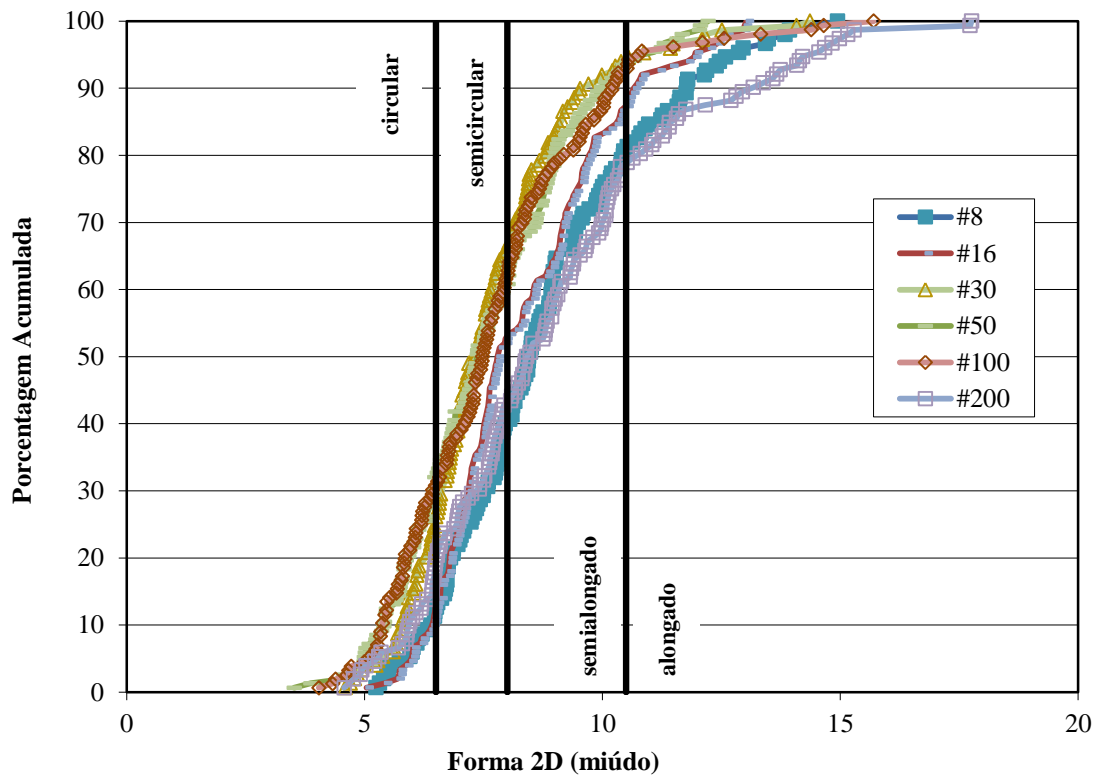


Figura 25 - Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 2

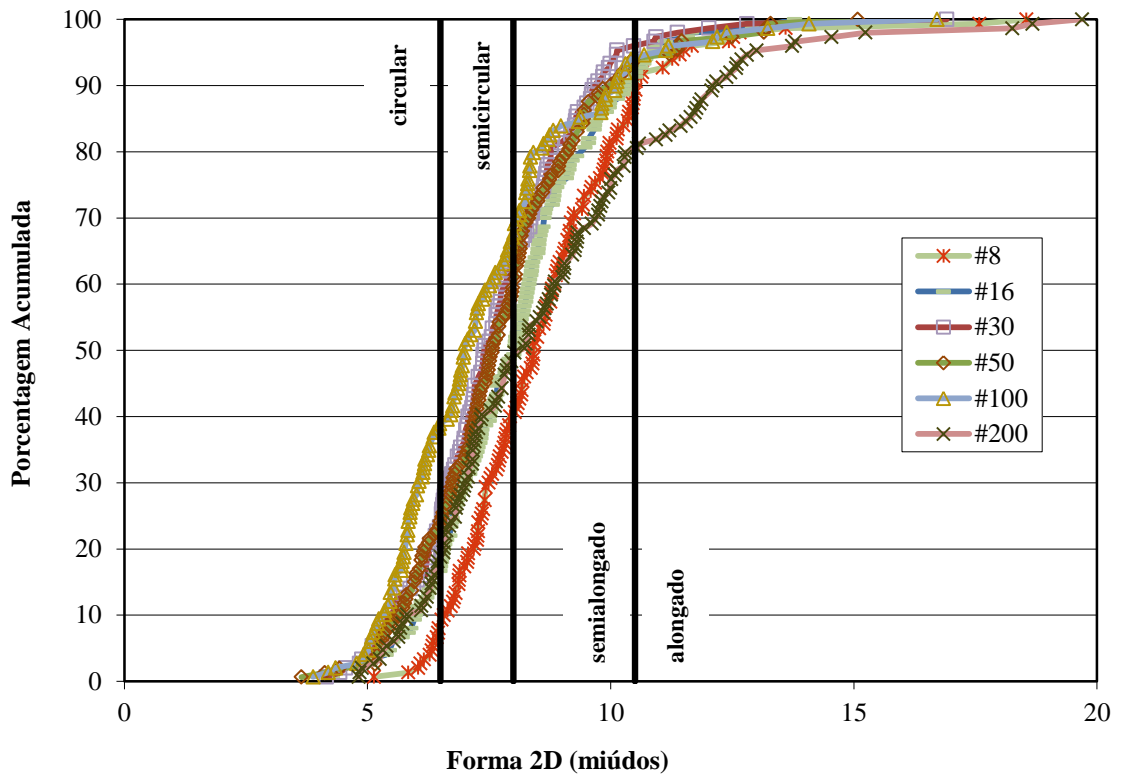
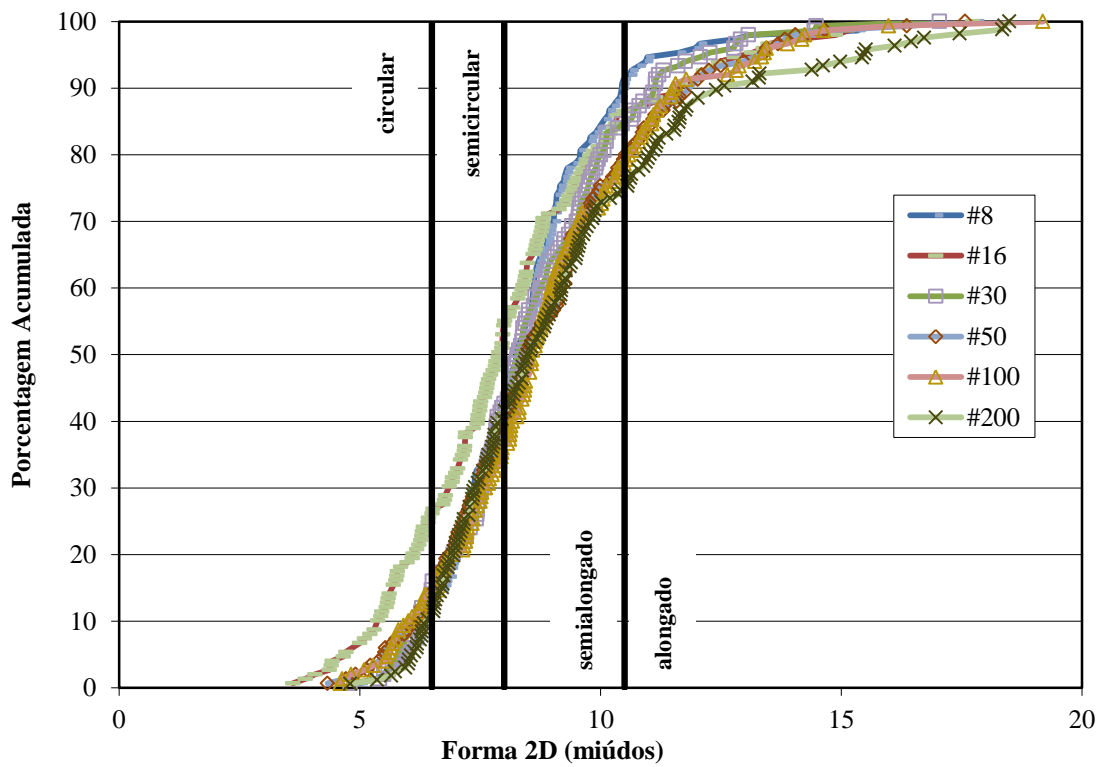


Figura 26 - Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 3



#### ***4.1.5 Esfericidade (agregados graúdos)***

Os agregados graúdos foram analisados através do parâmetro de esfericidade (Figuras de 27 a 29) para verificar se possuíam ou não da forma de uma esfera. Quanto mais próximo de 1,0 for o valor da esfericidade, mais próximo do formato de uma esfera será o agregado. Em relação às médias gerais obtidas para os três tipos de agregados, que os classificaram como pouco esféricos, pode-se perceber que considerando todas as frações de agregados, apenas entre 30 e 40% das partículas estão nesta faixa de classificação (entre 0,6 e 0,7). No caso do agregado 3, por exemplo, mais de 30% das partículas seriam classificadas como moderadamente esféricas, e no caso da fração retida na peneira de 19mm, esse valor sobe para 60%, o que classificaria a maior parte dessas partículas de forma diferente. Para o agregado 1, existem muitas partículas (entre 40 e 60%) com valores baixos de esfericidade, ou seja, uma grande quantidade de partículas deste agregado seria classificada como achatada ou alongada.

Pode-se observar que, as curvas para cada peneira, no geral, não se sobrepõem umas sobre as outras, indicando que cada fração de agregado se comporta de maneira diferente para este parâmetro. No entanto, foi observada uma mesma tendência para os materiais provenientes das Pedreiras 2 e 3 em relação às partículas retidas nas peneiras de 12,5 e 9,5mm, uma vez que ambas as frações têm distribuições de propriedades bem próximas. Também para os agregados provenientes das Pedreiras 2 e 3, pode-se perceber que as maiores partículas, ou seja, aquelas retidas na peneira de 19mm, têm suas curvas de distribuição de propriedade mais deslocadas para a direita, o que mostra que essas frações possuem agregados com maior valor de esfericidade, ou mais esféricos.

Os agregados provenientes das Pedreiras 1 e 2 possuem poucas partículas (menos de 10%), de todas as suas frações, com valores de esfericidade mais elevados (acima de 0,8), ou consideradas como sendo muito esféricas. No caso dos agregados provenientes da Pedreira 3, as frações maiores (19mm e 12,5mm) possuem até 20% de partículas que se encaixam nesse grupo de classificação. Isso já era esperado, uma vez que esse agregado apresentou as maiores médias para o parâmetro de esfericidade, mesmo este sendo classificado da mesma forma que os demais, com baixa esfericidade.

Figura 27 - Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 1

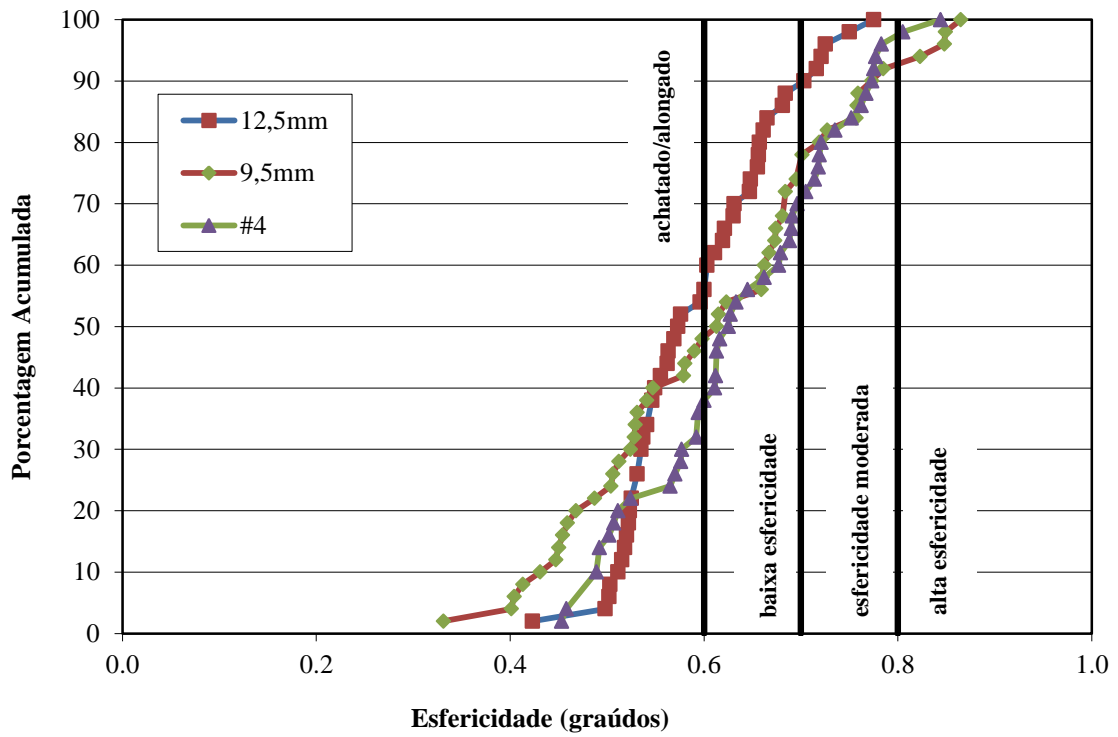


Figura 28 - Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 2

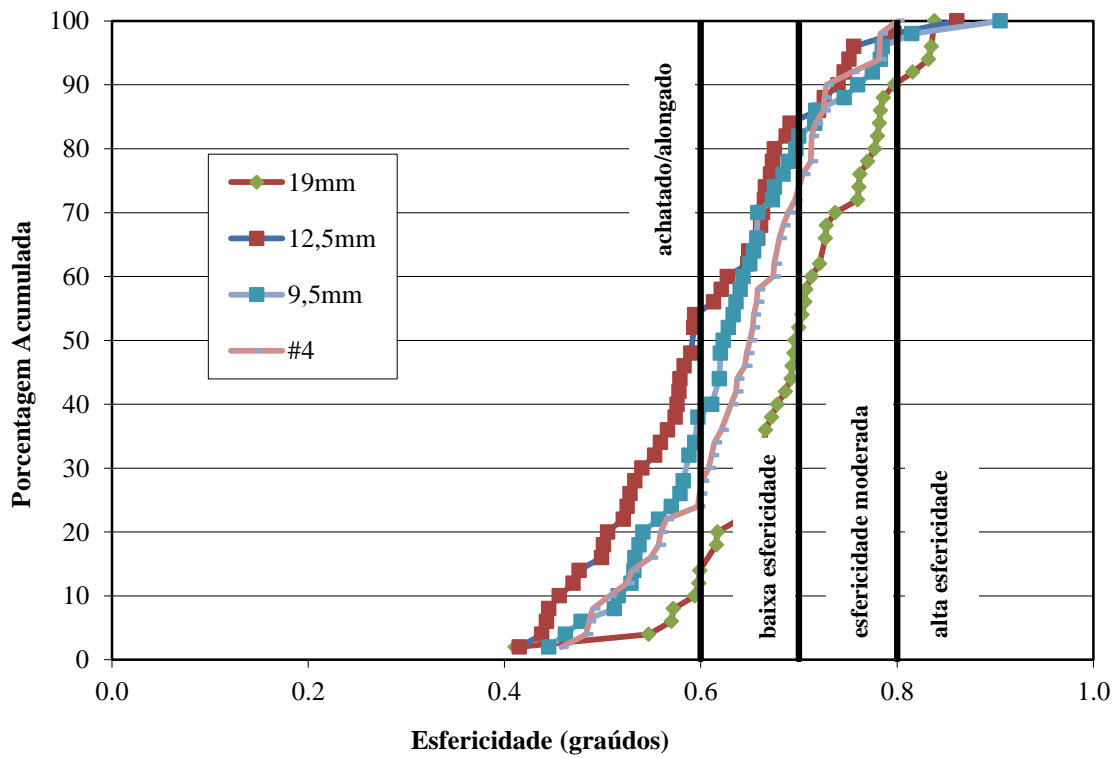
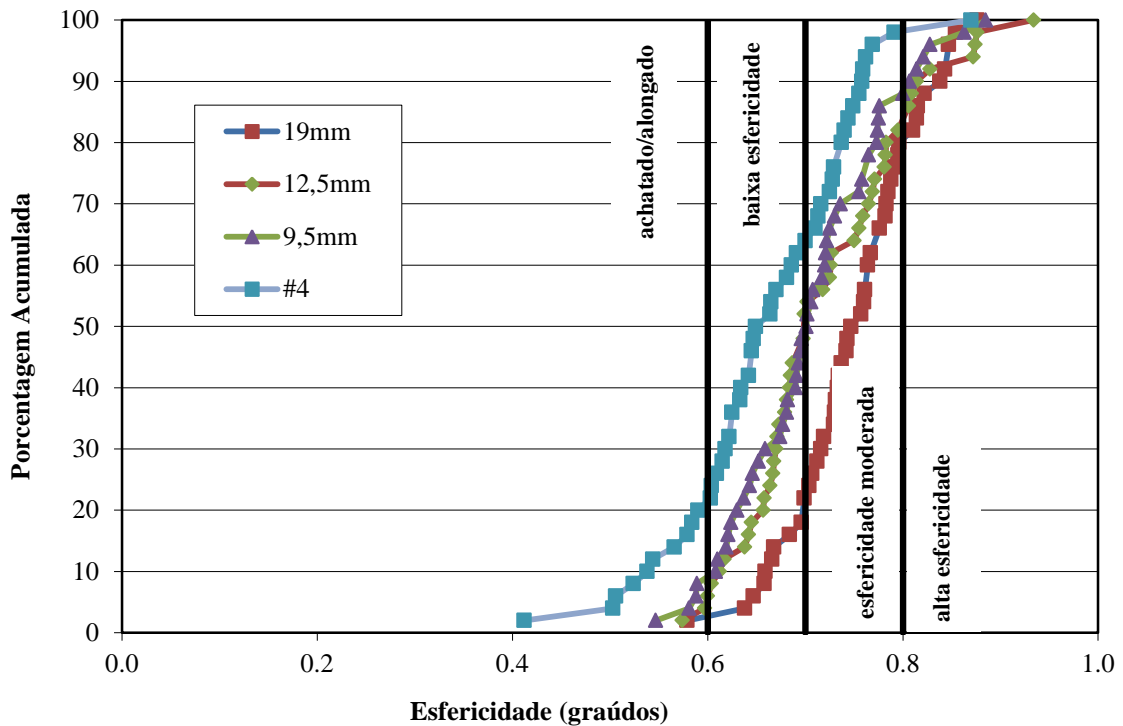


Figura 29 - Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3



#### 4.1.6 Angularidade (agregados graúdos e miúdos)

Para a angularidade (Figuras de 30 a 32), tanto os agregados graúdos como os agregados miúdos foram estudados. Os resultados dos agregados provenientes das Pedreiras 1 e 2 indicam uma diferença nas distribuições cumulativas quando se comparam agregados graúdos com agregados miúdos. As curvas referentes aos agregados graúdos estão mais deslocadas para a esquerda, indicando que esses agregados possuem um valor de angularidade mais baixo se comparados com os agregados miúdos. Isso também acontece com os agregados provenientes da Pedreira 3, porém no caso dos agregados provenientes dessa citada pedreira, as curvas de distribuição das frações graúdas e miúdas se confundem mais.

Os três agregados foram classificados, pelas suas médias, como subarredondados, porém para os três materiais, existe uma grande quantidade de agregados miúdos com angularidade maior do que 4.000, ou seja, classificada como subangulares ou angulares. As menores partículas (retidas na #200) dos três agregados investigados apresentam um comportamento diferente dos outros tamanhos de agregados miúdos, com as curvas referentes a essa peneira localizadas um pouco mais à esquerda em relação às demais curvas dos agregados miúdos. Essa fração de agregados (retidos na peneira #200) possui a curva mais

acentuada entre todas, para todos os três agregados. Isso significa que suas partículas possuem angularidade variada; aproximadamente entre 40 e 50% das partículas possuem angularidade menor do que 2.100, ou seja, são partículas arredondadas. Isso faz com que as menores partículas de agregados (retidas na peneira #200) tenham uma angularidade menor, ao contrário da tendência observada para as demais frações, quando os agregados miúdos eram mais angulares.

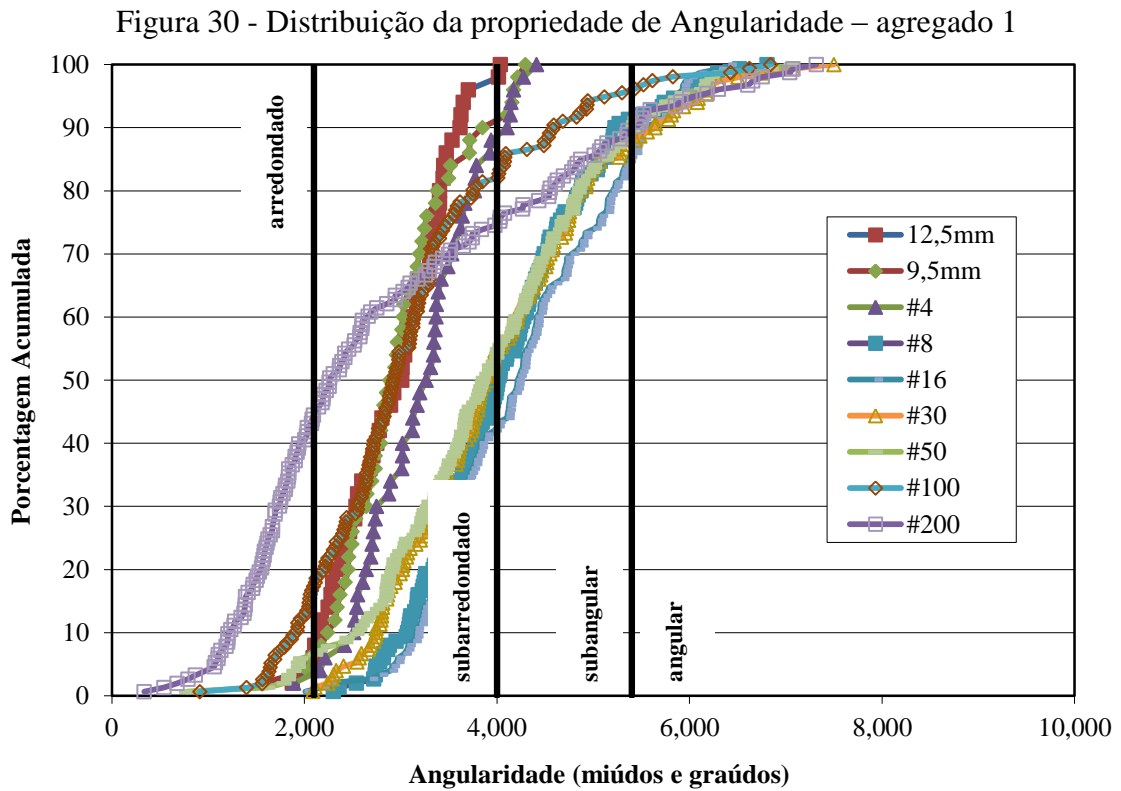


Figura 31 - Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 2

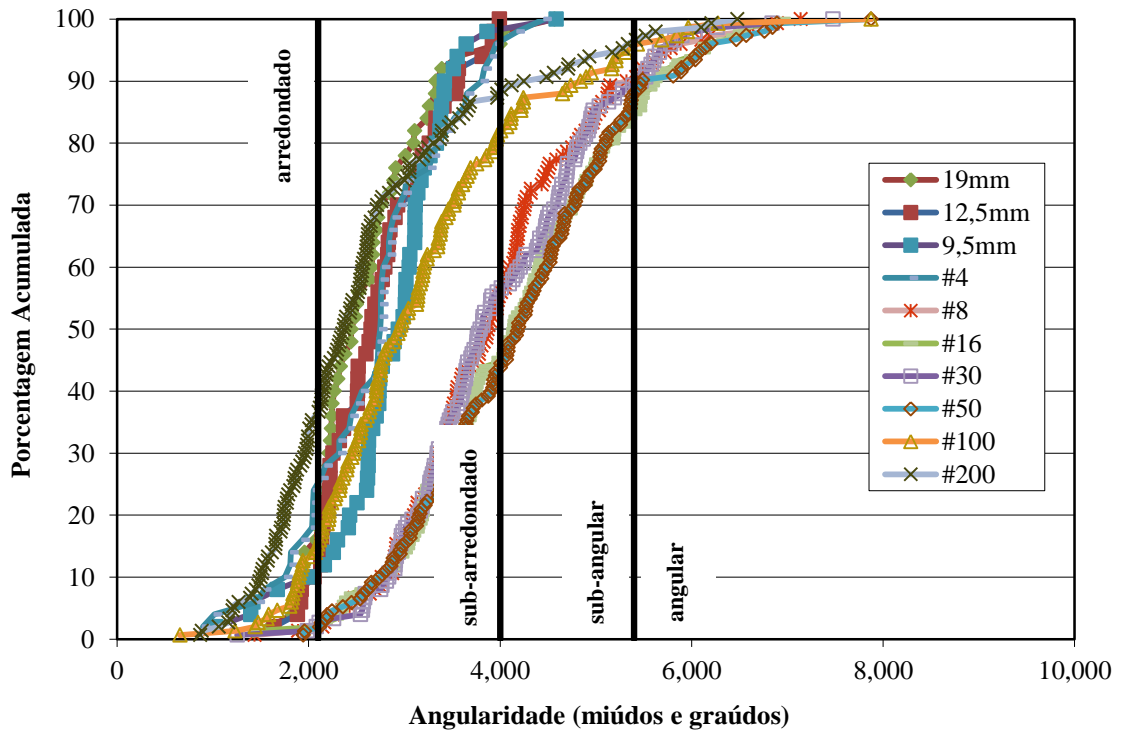
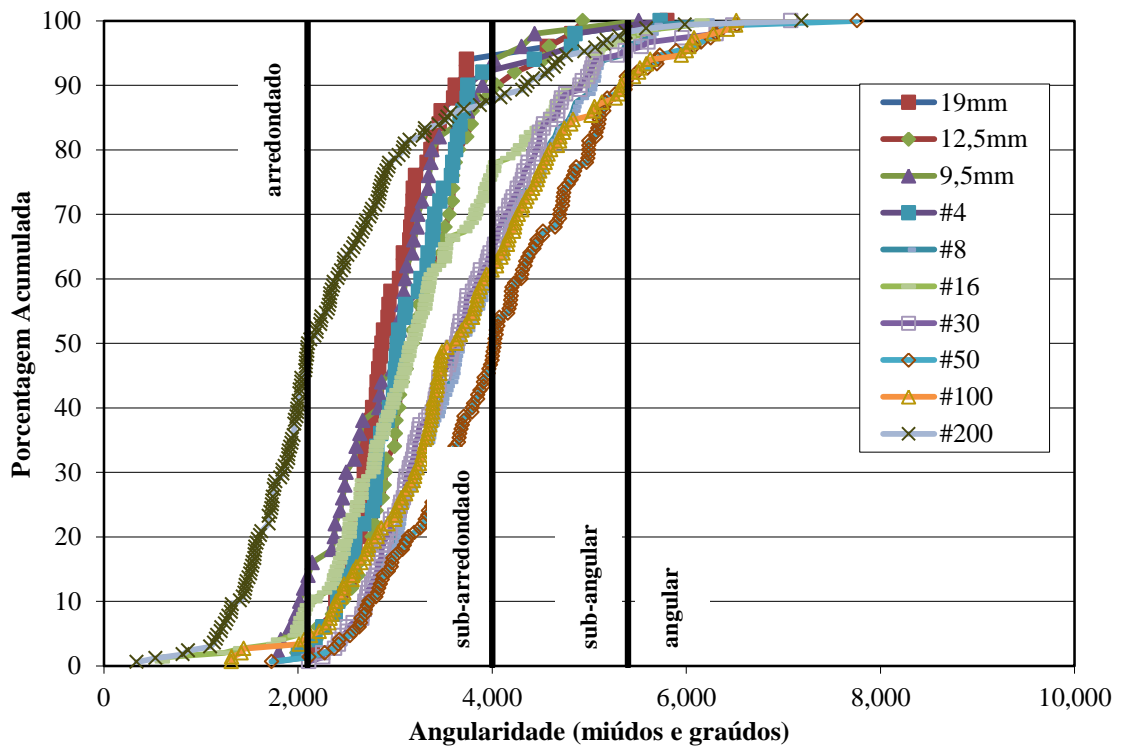


Figura 32 - Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 3



#### 4.1.7 Textura superficial (agregados graúdos)

Foram obtidos gráficos com as distribuições de valores cumulativos para os níveis de textura superficial referentes aos agregados graúdos (Figuras de 33 a 35). Pode-se concluir que, os três agregados se comportam de maneiras diferentes em relação à textura superficial. Isso já era esperado, uma vez que a textura superficial foi a única propriedade na qual os agregados foram classificados de forma distinta.

O agregado proveniente da Pedreira 1 possui 80% de suas partículas retidas na peneira #4 com valores baixos (menores ou próximos a 275) de textura superficial. Aproximadamente, 60% dessas partículas seriam classificadas como macias. A média para todos os tamanhos desse agregado o classificou como pouco rugoso. Os agregados provenientes da Pedreira 2, classificados com rugosidade moderada, possuem mais de 60% de suas partículas com valores de textura superficial inferiores a 350, ou seja, classificadas como pouco rugosas, macias ou polidas. Já o agregado proveniente da Pedreira 3, classificado como muito rugoso, possui quase todas as partículas, de vários tamanhos, com valores que as classificam dessa mesma forma. No geral, as partículas de agregado retidas em peneiras de menores aberturas resultaram em valores de textura superficial mais baixo. Isso pode indicar que, quanto menor for o tamanho dos agregados, mais polida tende a ser sua superfície.

Figura 33 - Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 1

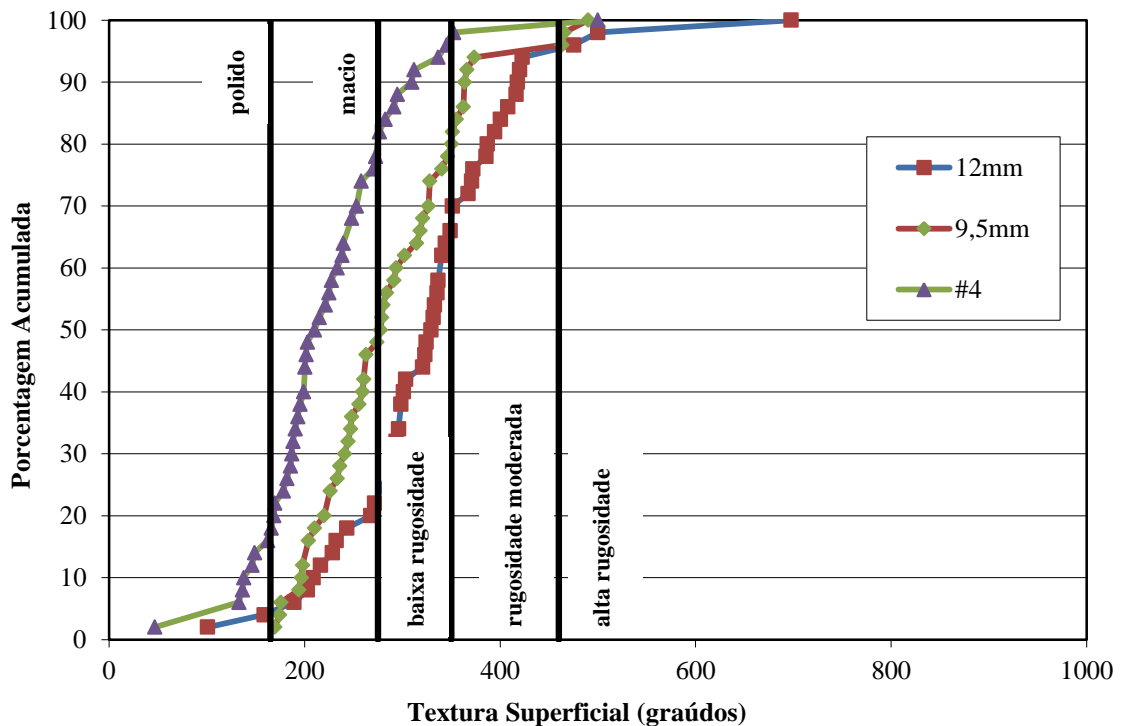


Figura 34 - Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 2

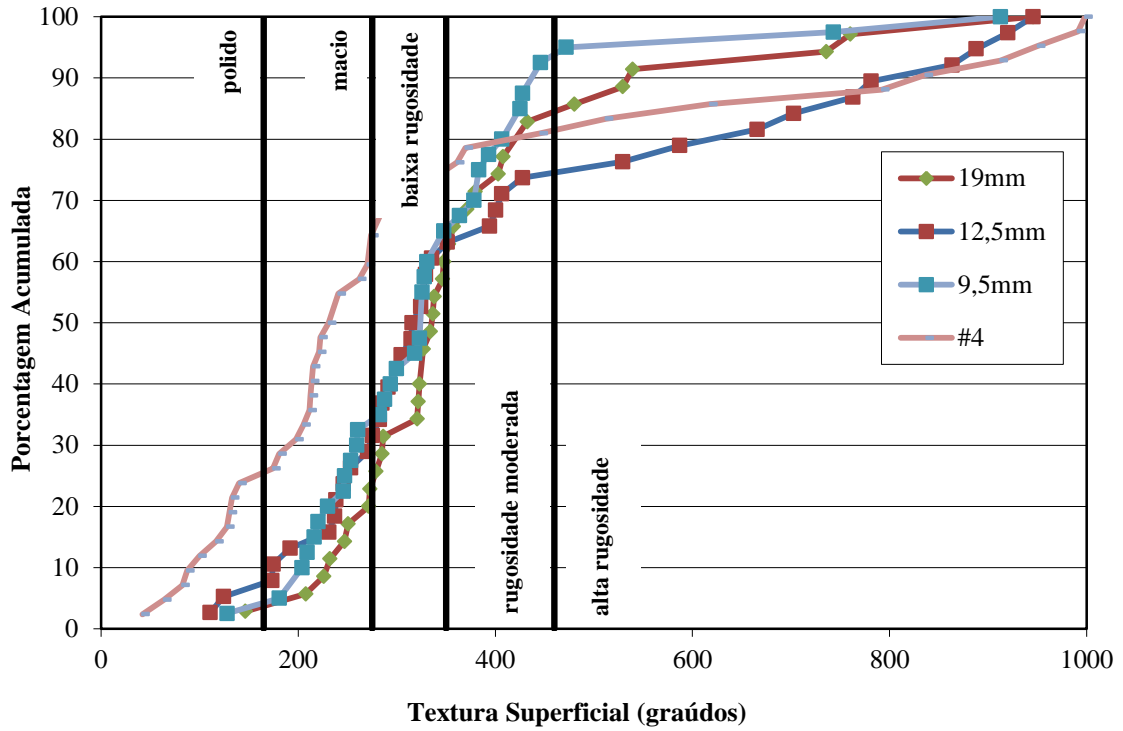
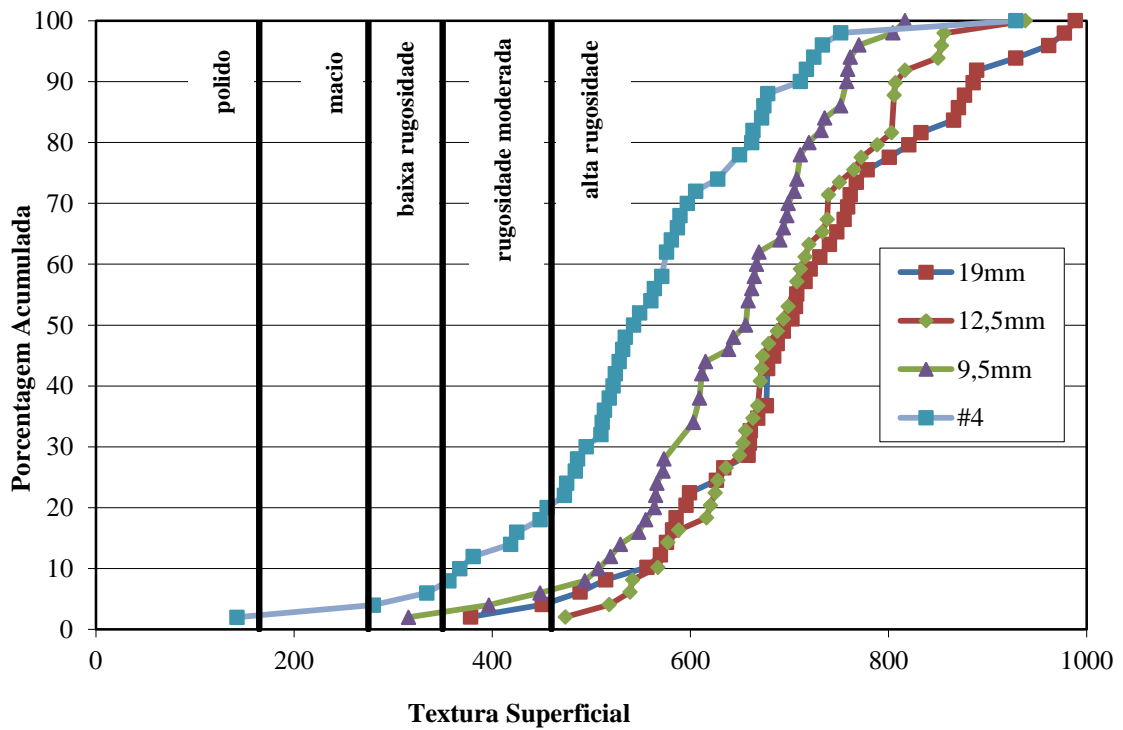


Figura 35 - Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 3



#### 4.1.8 Partículas achatadas e alongadas (agregados graúdos)

A lamelaridade dos agregados graúdos foi analisada através das razões entre suas dimensões. Para um melhor entendimento do comportamento dos agregados em relação a esse parâmetro, foram obtidos também os valores da razão entre a maior e a menor dimensão de cada partícula. A média geral, e outros parâmetros estatísticos, para cada um dos agregados provenientes das três pedreiras encontra-se na Tabela 19. As Figuras de 36 a 38 mostram a distribuição das partículas de agregados em relação às razões de achatamento e de alongamento, bem como as linhas que limitam as razões de lamelaridade (razão entre a menor e a maior dimensão de um agregado).

Tabela 19 - Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade

Pedreira	Parâmetro Estatístico		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)
1	2,88	1,06	36,8
2	2,52	0,91	36,3
3	2,28	0,70	30,4

Figura 36 - Razões entre as dimensões dos agregados – agregado 1

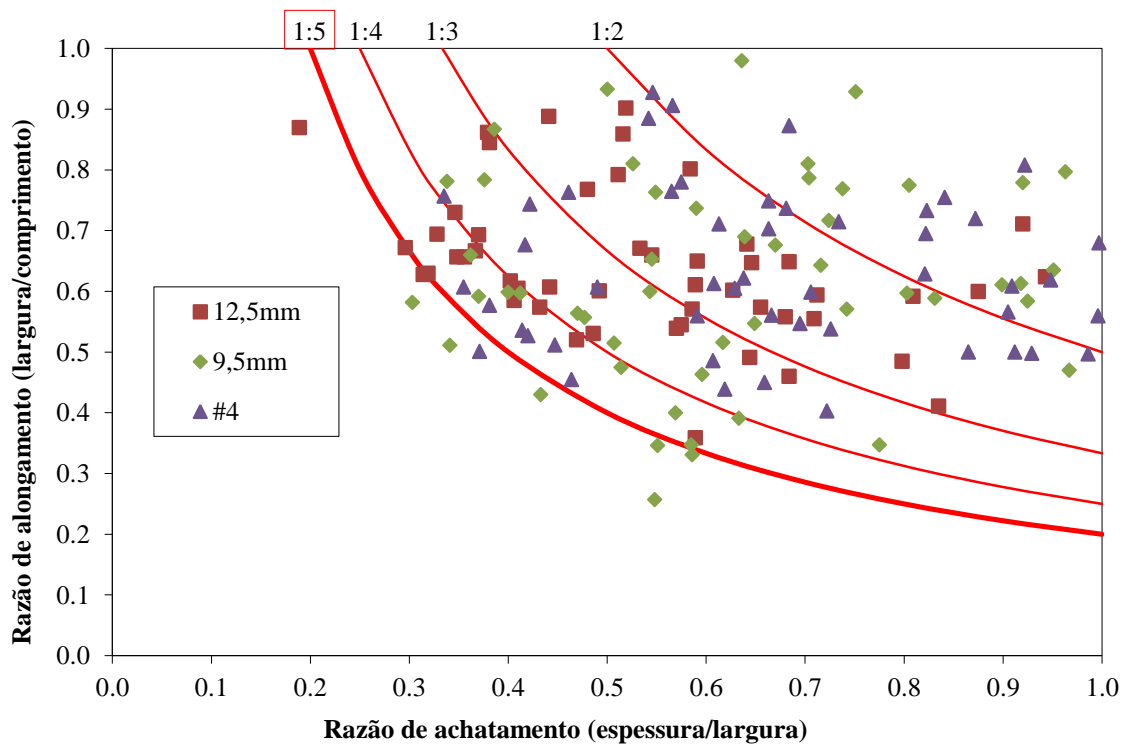


Figura 37 - Razões entre as dimensões dos agregados – agregado 2

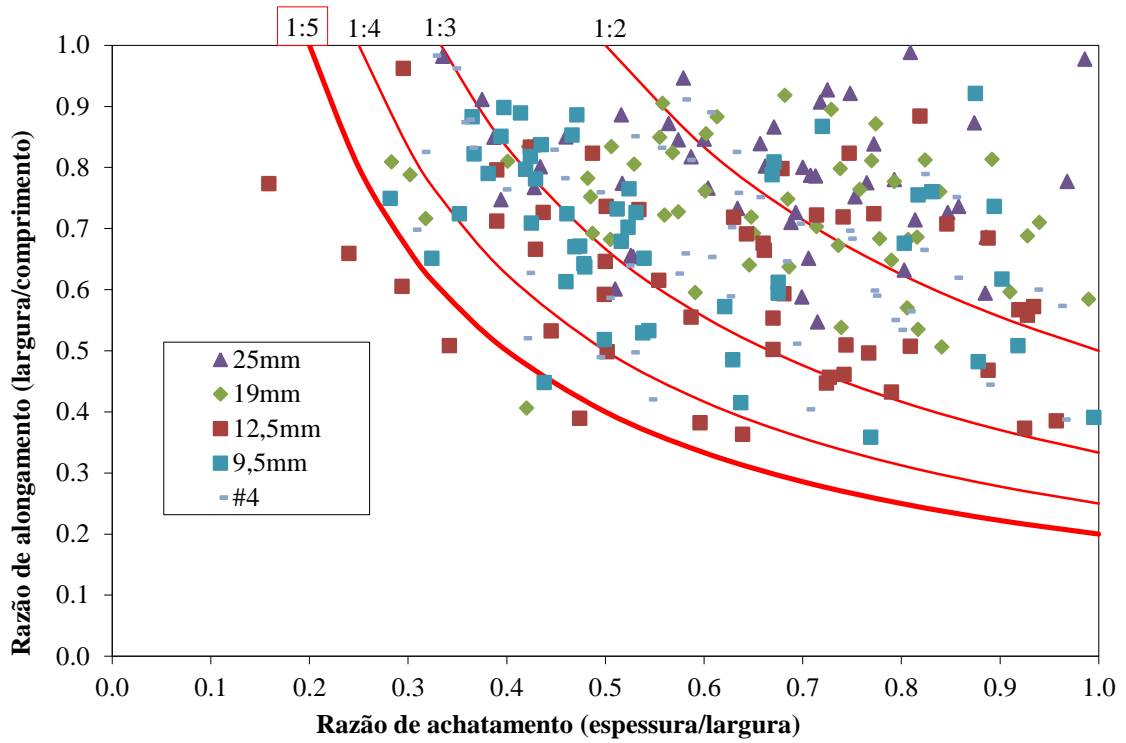
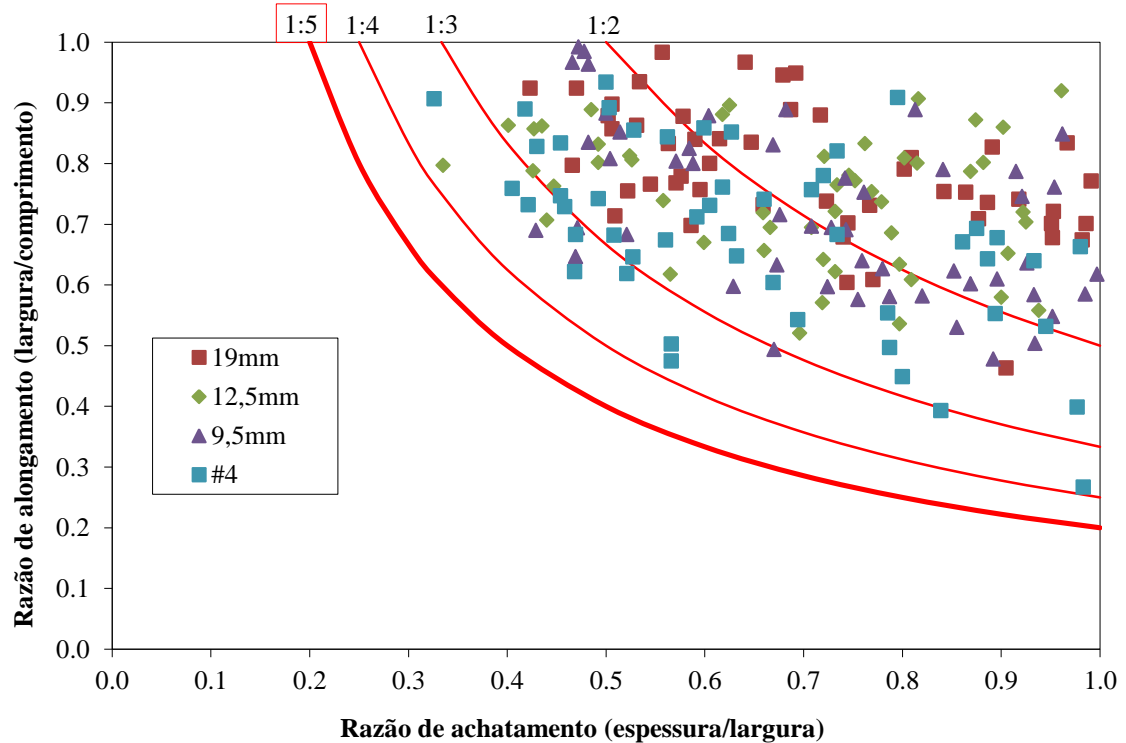


Figura 38 - Razões entre as dimensões dos agregados – agregado 3



Os resultados apresentados mostram que os três agregados possuem, no geral, valores de lamelaridade muito próximos, com o agregado 3 possuindo uma menor lamelaridade entre os três. Os CVs foram obtidos para todos os tamanhos e frações

analisados. Por terem resultado em valores elevados, pode-se dizer que as partículas dos agregados possuem comportamentos variados em relação à sua lamelaridade. Para uma caracterização mais detalhada, são apresentados nas Tabelas de 20 a 22 os valores de lamelaridade para cada fração de agregado analisada, para cada um dos agregados coletados nas três pedreiras.

Tabela 20 - Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade – agregado 1

Tamanho do agregado (mm)	Peneira			Parâmetro estatístico		
	12,5 mm	9,5 mm	# 4	Média	Desvio padrão	CV (%)
1"	3,24	3,11	2,69	3,01	0,29	9,9
3/4"	2,70	2,72	3,12	2,85	0,24	8,3
3/8"	-	2,44	2,97	2,71	0,37	13,9

Tabela 21 - Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade – agregado 2

Tamanho do agregado (mm)	Peneira					Parâmetro estatístico		
	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	# 4	Média	Desvio padrão	CV (%)
1"	2,08	2,30	3,05	2,87	2,67	2,59	0,40	15,5
3/4"	-	1,87	2,05	2,64	3,18	2,44	0,59	24,3
1/2"	-	-	2,25	2,33	2,91	2,50	0,36	14,6
3/8"	-	-	-	2,30	2,71	2,51	0,29	11,7

Tabela 22 - Médias, desvios-padrão e CV para lamelaridade – agregado 3

Tamanho do agregado (mm)	Peneira					Parâmetro estatístico		
	25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	# 4	Média	Desvio padrão	CV (%)
1"	1,94	2,11	2,41	-	-	2,15	0,24	10,9
3/4"	-	1,91	2,09	2,09	2,46	2,14	0,23	10,8
1/2"	-	-	2,38	2,38	2,45	2,40	0,04	1,8
3/8"	-	-	-	-	2,55	2,55	-	-
3/16"	-	-	-	-	2,64	2,64	-	-

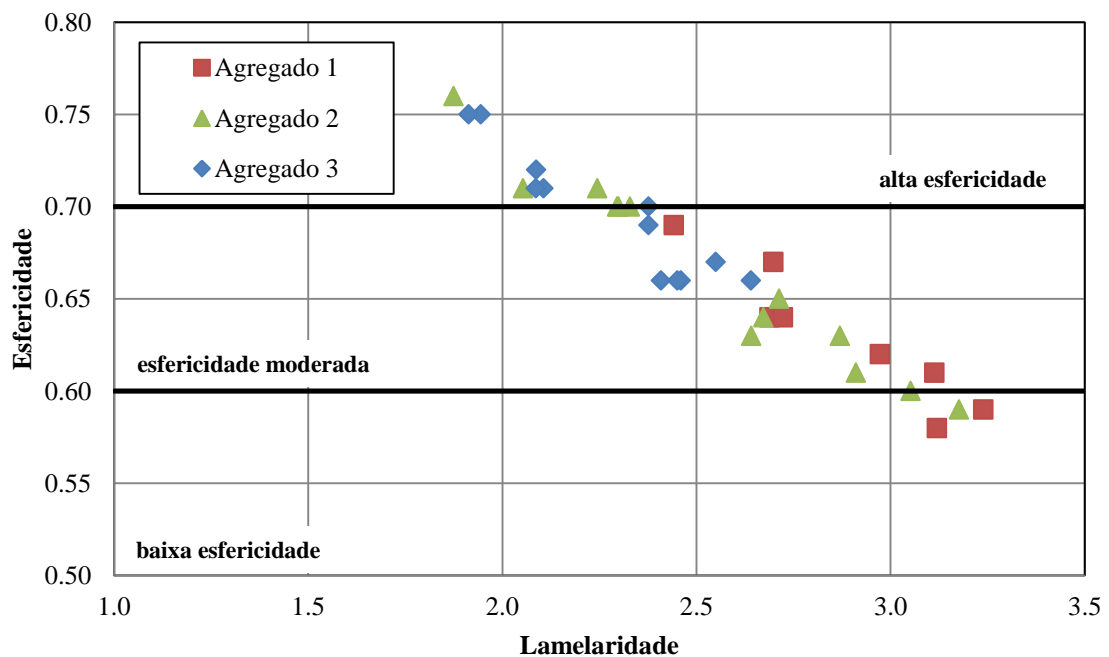
Através dos resultados, pode-se concluir que, para um mesmo agregado, suas frações retidas nas mesmas peneiras, porém extraídas de agregados de TMNs distintos, possuem, em alguns casos, valores de lamelaridade bastante diferentes. Nesse caso, o processo de produção dos agregados provavelmente afetou a forma das partículas no que diz respeito a esse parâmetro. Para um mesmo tamanho de agregado, suas diversas frações retidas também variaram em relação ao valor de lamelaridade, mas essas variações resultaram em CVs baixos, menores do que 20% na maioria dos casos, ou seja, as propriedades de lamelaridade para os agregados diversos são próximas, independente da fração. De uma forma geral, houve um aumento no valor de lamelaridade das partículas com a diminuição do

tamanho de suas frações retidas, o que pode indicar que a redução no tamanho do agregado se dá mais no seu menor eixo (espessura) do que no comprimento, ou maior eixo.

Os valores para os agregados provenientes das três pedreiras seguem a mesma tendência de classificação em relação à esfericidade. Os agregados provenientes das três pedreiras foram classificados como pouco esféricos, possuindo também baixos valores de lamelaridade. Apesar de valores próximos, percebe-se que, a tendência obtida com os valores de esfericidade se repetiu para o parâmetro de lamelaridade, o que era esperado. O agregado 3 foi considerado como sendo o mais próximo de uma esfera (maior esfericidade) e foi o que apresentou também menor valor de lamelaridade.

A comparação entre os parâmetros esfericidade e lamelaridade pode ser feita uma vez que as fórmulas para a obtenção dos mesmos são bastante próximas, porém inversamente proporcionais. A Figura 39 apresenta um gráfico com a relação entre as médias obtidas de cada parâmetro (esfericidade e lamelaridade) para cada fração de agregado analisada. O gráfico mostra que existe uma tendência linear do comportamento dos agregados em relação aos dois parâmetros comparados, com um  $R^2$  igual a 0,94. Para todos os três agregados, no geral, quanto maior a lamelaridade de uma partícula, menor deve ser sua esfericidade, ou sua aproximação ao formato de uma esfera.

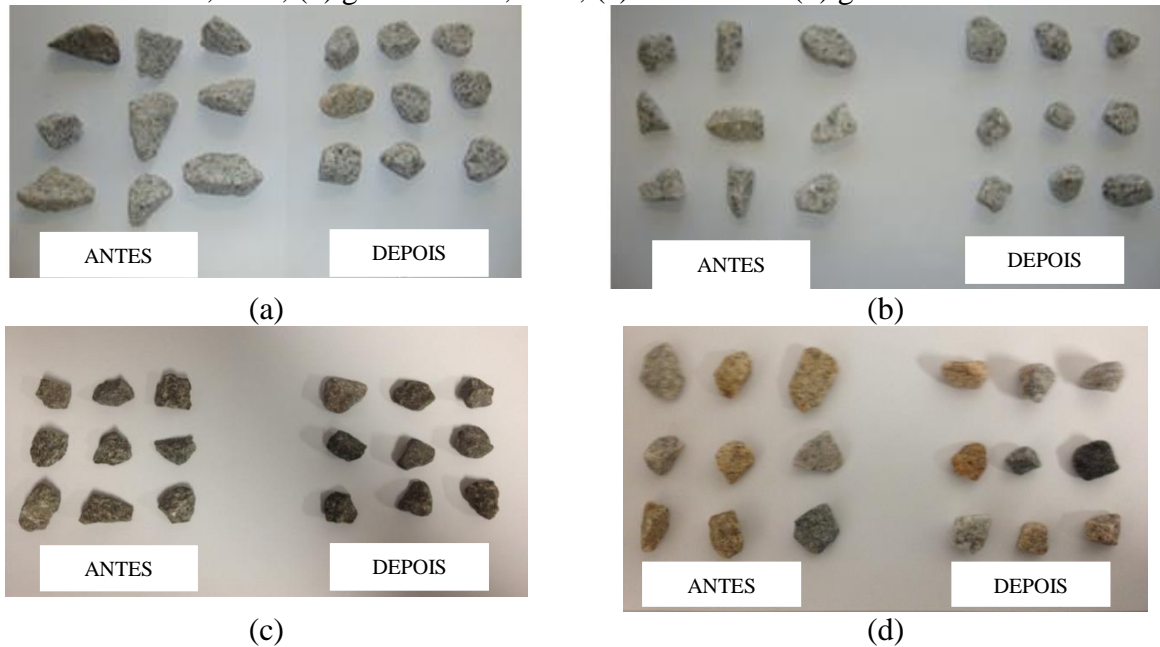
Figura 39 - Comparação entre lamelaridade e esfericidade



## 4.2 Resistência ao polimento e à degradação dos agregados

Nesta pesquisa, foram analisadas, para cada tipo e tamanho de agregado, três amostras antes e três amostras depois que os ensaios de resistência ao polimento e à abrasão foram realizados. Cada amostra analisada no AIMS possuía 50 partículas de agregado, totalizando 150 partículas para a obtenção da média de cada valor observado. A Figura 40 mostra exemplos de agregados antes e depois da realização dos ensaios. Os resultados obtidos são apresentados na sequência em tabelas e gráficos.

Figura 40 - Exemplos de agregados antes e depois do ensaio de abrasão: (a) granítico – 12,5mm; (b) granítico – 9,5mm; (c) fonolítico e (d) gnaissíco



A Tabela 23 traz os valores médios de textura superficial e as classificações antes e depois da realização dos ensaios no equipamento de abrasão Los Angeles, para os dois tamanhos (12,5 e 9,5mm) de agregados retidos e para as três fontes avaliadas.

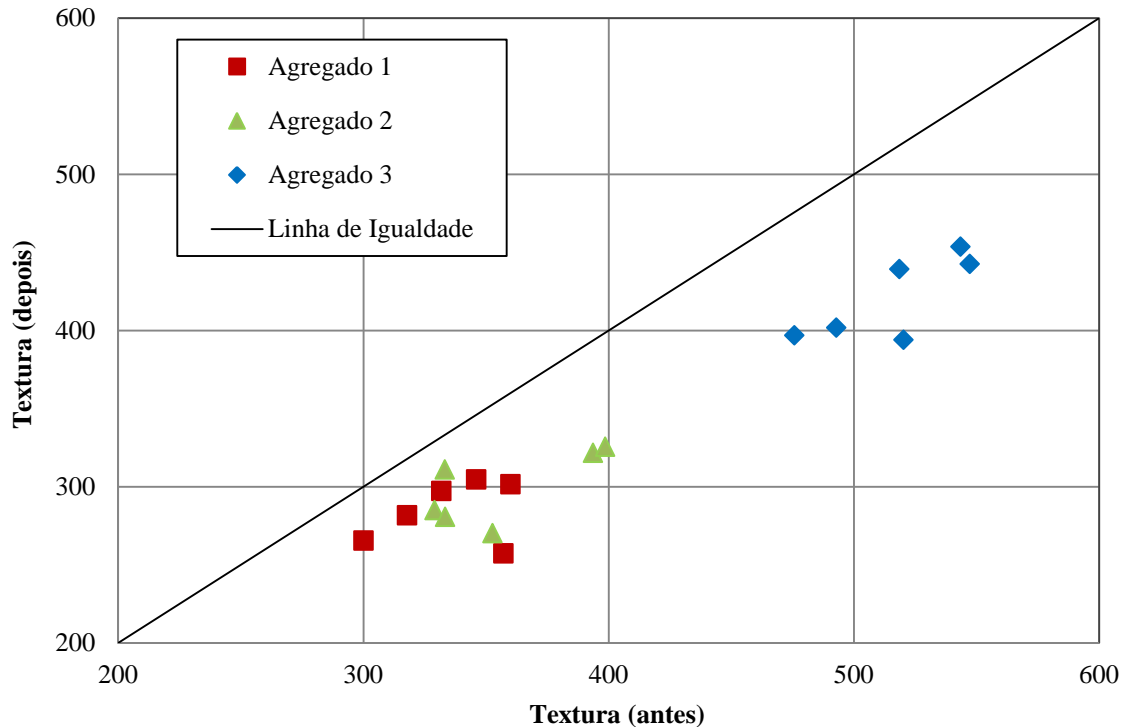
Tabela 23 - Valores médios de textura superficial antes e depois da realização do ensaio de abrasão Los Angeles

Agregado	Peneira (mm)	Antes	Classificação (Antes)	Depois	Classificação (Depois)	Diferença (%)
1	12,5	346,0	Pouco rugoso	301,1	Pouco rugoso	12,9
	9,5	325,1	Pouco rugoso	268,1	Liso	17,0
2	12,5	375,3	Rugosidade moderada	319,3	Pouco rugoso	14,5
	9,5	338,4	Pouco rugoso	278,6	Pouco rugoso	17,6
3	12,5	536,5	Muito rugoso	445,1	Rugosidade moderada	17,0
	9,5	496,4	Muito rugoso	397,5	Rugosidade moderada	19,8

Os resultados sugerem que o agregado proveniente da Pedreira 3 tende a ser aquele com a menor resistência ao polimento, pois a perda média de seus valores de textura superficial foi a maior quando se compara os três agregados, para ambos os tamanhos analisados. Apesar disso, os valores finais de textura para esse agregado foram mais elevados se comparados aos valores encontrados para os demais agregados. Já o agregado proveniente da Pedreira 1 foi aquele que apresentou menor perda em relação a esse parâmetro. Portanto, espera-se que, esse seja o agregado com maior resistência ao polimento. É possível perceber também que, os valores de textura superficial, tanto antes como depois do polimento, foram cerca de 10% mais elevados para as partículas menores de agregados. Os percentuais de perda foram próximos ao se comparar os dois tamanhos analisados, o que pode indicar que agregados graúdos de diferentes tamanhos podem apresentar a mesma resistência ao polimento.

A Figura 41 apresenta um gráfico com pontos que representam os valores de textura superficial encontrada para cada amostra de agregado, antes e depois do processo de polimento. O gráfico traz todos os pontos localizados abaixo da linha de igualdade, mostrando que todos os agregados, com o processo de polimento, tiveram perda em sua textura superficial, o que era esperado. Também é possível perceber que, o agregado proveniente da Pedreira 3 é o mais rugoso e, mesmo após o polimento, continuou com os maiores valores de textura quando comparado aos outros dois materiais.

Figura 41 - Comparação da textura dos agregados antes e depois da abrasão Los Angeles



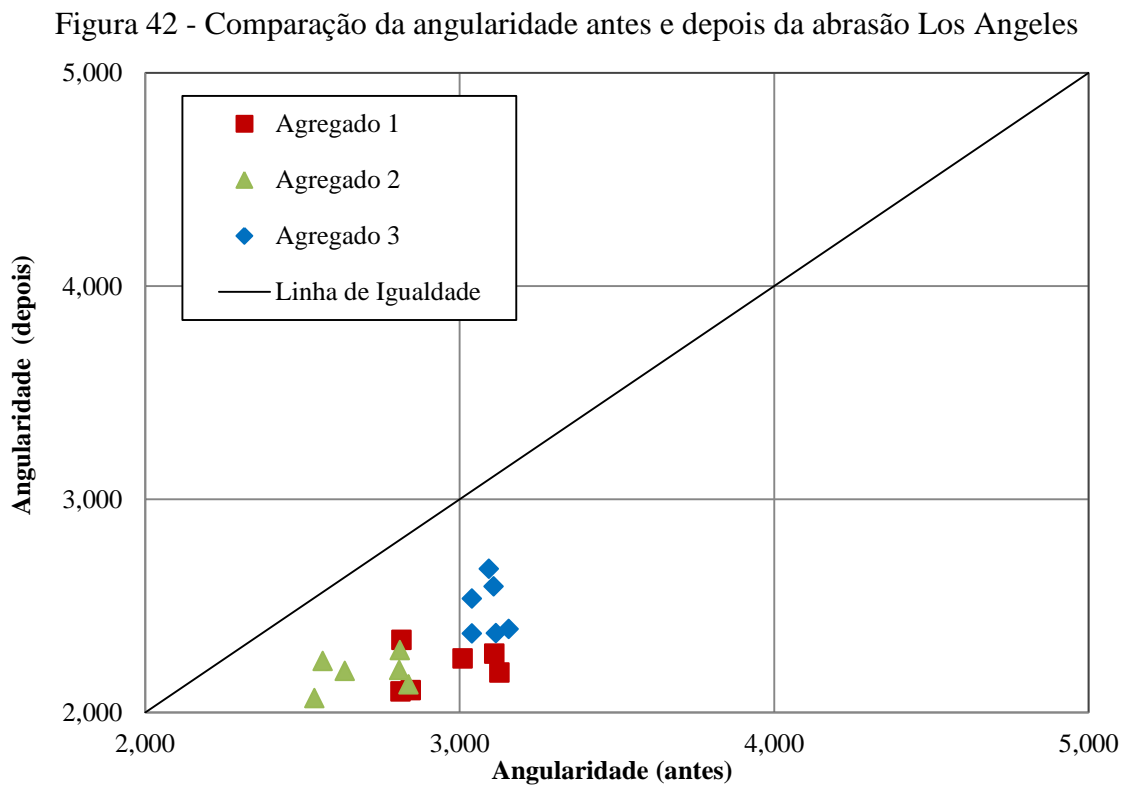
Em relação à angularidade, os agregados sofreram perda dessa propriedade devido aos processos agressivos de degradação ocorridos durante o ensaio no equipamento de abrasão Los Angeles. Além disso, os materiais também tiveram perda da massa retida em cada peneira, o que pode ser explicado pela quebra de suas partículas. Os resultados de valores de angularidade antes e depois do uso do equipamento Los Angeles podem ser visualizados na Tabela 24.

Tabela 24 - Valores médios de angularidade antes e depois da realização do ensaio de abrasão Los Angeles

Agregado	Peneira (mm)	Antes	Classificação (Antes)	Depois	Classificação (Depois)	Diferença (%)
1	12,5	2.824,1	Subarredondado	2.182,0	Subarredondado	22,7
	9,5	3.082,4	Subarredondado	2.239,0	Subarredondado	27,3
2	12,5	2.579,1	Subarredondado	2.168,0	Subarredondado	15,9
	9,5	2.818,3	Subarredondado	2.207,9	Subarredondado	21,6
3	12,5	3.103,2	Subarredondado	2.378,2	Subarredondado	23,3
	9,5	3.080,0	Subarredondado	2.599,9	Subarredondado	15,6

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que, o agregado proveniente da Pedreira 1 é aquele com a menor resistência à abrasão, uma vez que este perdeu aproximadamente um quarto do valor de sua angularidade, para ambos os tamanhos analisados (12,5 e 9,5mm). Não há uma tendência clara no que diz respeito ao comportamento

dos agregados em relação ao tamanho de suas partículas. No caso do agregado proveniente da Pedreira 2, aqueles retidos na peneira de 9,5mm tiveram uma maior perda (6% a mais de perda) em sua angularidade, ou seja, foram menos resistentes à abrasão. O inverso aconteceu para o agregado proveniente da Pedreira 3, uma vez que seus agregados maiores (retidos na peneira de 12,5mm) tiveram uma maior perda (8% a mais de perda) de angularidade. Os valores de angularidade, considerando cada situação separadamente (antes e depois) foram próximos, para os dois tamanhos de agregados, o que indica que as partículas possuem cantos ou arestas com o mesmo nível de arredondamento. A Figura 42 traz um gráfico com os pontos que representam os valores de angularidade individuais de cada amostra antes e depois do processo de abrasão. É possível confirmar o que havia sido mostrado anteriormente, todas as amostras de agregados sofreram perda de angularidade, pois todos os pontos encontram-se abaixo da linha de igualdade.



O uso do equipamento de abrasão Los Angeles pode também indicar outro parâmetro relacionado com a degradação: a quebra dos agregados. Para analisar essa quebra, foram medidas as perdas em massa da quantidade de agregados retidos nas duas peneiras em estudo (12,5 e 9,5mm). A Tabela 25 apresenta os valores, em porcentagem, dessas perdas. É importante ressaltar que, estes resultados não seguem a metodologia do ensaio de Abrasão

Los Angeles. No caso apresentado aqui, foi adotada outra metodologia que calcula a perda em massa apenas dos agregados graúdos de tamanhos citados anteriormente.

Tabela 25 - Perda em massa

Agregado	Peneira (mm)	Antes (kg)	Depois (kg)	Perda (%)
1	12,5	2.501,9	223,9	91,1
	9,5	2.501,1	450,0	82,0
2	12,5	2.505,5	288,6	88,5
	9,5	2.501,4	415,6	83,4
3	12,5	2.500,0	315,6	87,4
	9,5	2.500,0	1.237,4	50,5

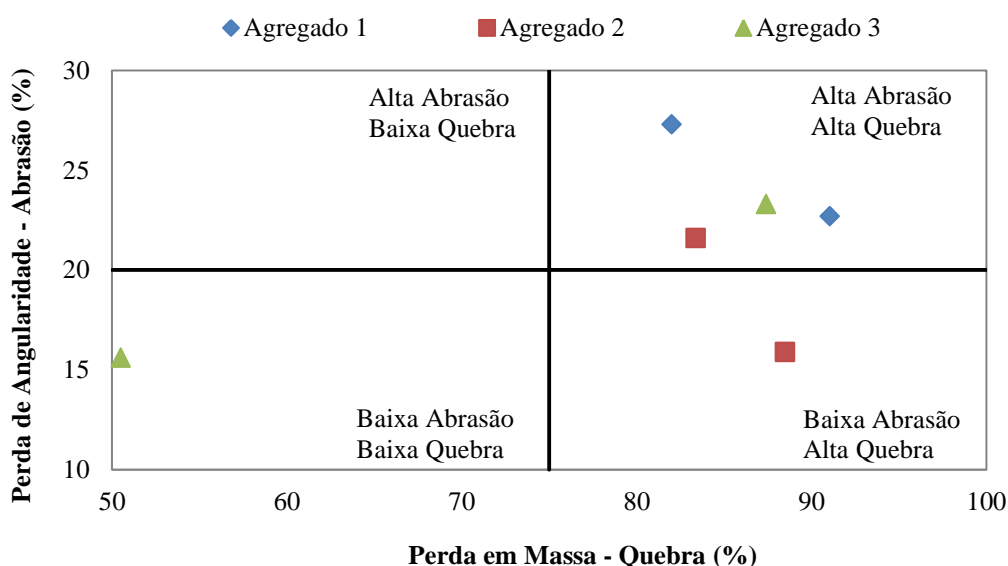
Os valores apresentados podem levar à conclusão de que os agregados menores, ou retidos na peneira de 9,5mm, tiveram uma menor quebra de suas partículas, resultando em uma perda em massa inferior àquela obtida para os agregados maiores, ou retidos na peneira de 12,5mm. No entanto, é importante ressaltar que, ambos os tamanhos de agregados foram ensaiados simultaneamente no equipamento de abrasão Los Angeles, ou seja, parte dos agregados inicialmente retidos na peneira de 12,5mm sofreu uma quebra apenas suficiente para ficarem retidos na peneira de 9,5mm. Logo, a perda em massa de agregados retidos na peneira de 9,5mm deve ter sido, na realidade, maior do que a porcentagem apresentada.

É importante deixar claro que, para o ensaio de abrasão Los Angeles, seguindo os procedimentos normatizados, é levada em consideração a perda em massa dos agregados retidos na peneira de 1,7mm, mesmo que inicialmente sejam colocados agregados mais graúdos no equipamento. A perda dos agregados retidos nas peneiras de 12,5mm e 9,5mm é um indicativo da resistência à quebra dos agregados e, para os materiais estudados, esta seguiu a mesma tendência dos resultados do ensaio normatizado de abrasão Los Angeles. O *ranking* de perda em massa dos agregados foi o mesmo para os diferentes materiais analisados: a Pedreira 1 forneceu os agregados com menor resistência à quebra (e maior valor de abrasão Los Angeles), enquanto que a Pedreira 3 forneceu agregados com maior resistência (e valor muito baixo de abrasão Los Angeles).

A Figura 43 correlaciona a perda no valor de angularidade com a perda em massa dos agregados para os três materiais estudados e os dois tamanhos analisados. O objetivo do gráfico é tentar fazer uma distinção entre as duas propriedades que estão envolvidas com a degradação dos agregados: (i) abrasão e (ii) quebra. É possível concluir que, não há uma tendência definitiva para o comportamento dos três agregados quando se traça uma relação entre a abrasão e a quebra dos mesmos. Os limites das regiões apresentadas foram determinados através da média da perda em massa e da perda de angularidade quando se

considerou todos os agregados e todos os tamanhos analisados. Portanto, os limites são relativos aos agregados estudados neste estudo apenas, tendo sido considerados altos aqueles pontos que ficaram acima da média (a média de perda de massa foi de, aproximadamente, 80% e a média de perda de angularidade foi de, aproximadamente, 20%) e baixos aqueles que ficaram abaixo da média dos parâmetros em questão. É importante ressaltar que, existem dois pontos para cada agregado, devido aos dois tamanhos analisados. Reforça-se que, os limites foram arbitrariamente escolhidos e dizem respeito às características específicas do presente estudo, não havendo uma referência na literatura aos mesmos.

Figura 43 - Relação entre abrasão e quebra dos agregados

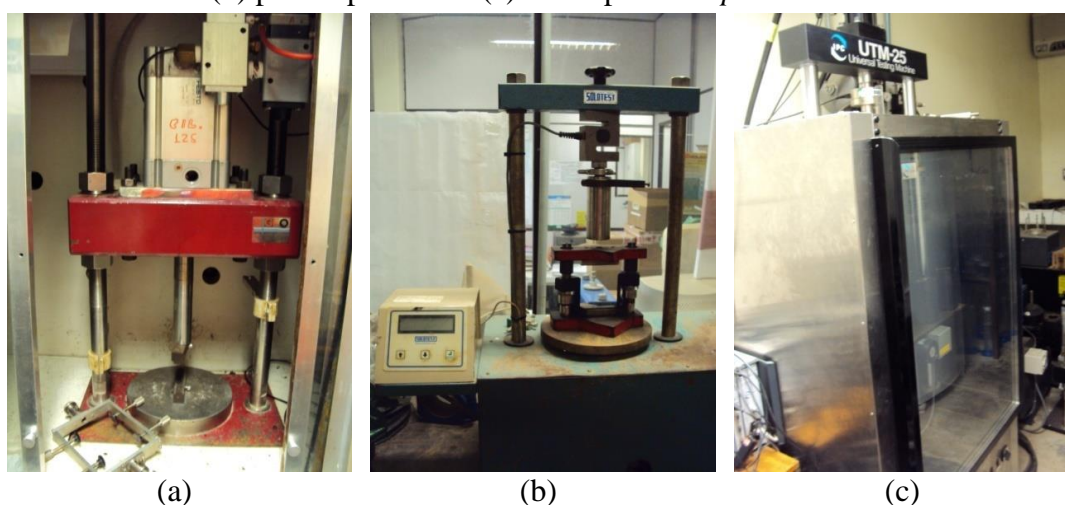


A maior parte dos pontos encontra-se na região de alta abrasão e alta quebra, porém é possível perceber que o agregado proveniente da Pedreira 2 teve, em geral, uma melhor resistência à quebra e à abrasão em relação ao agregado proveniente da Pedreira 1. Além disso, o agregado proveniente da Pedreira 3 teve, para o tamanho de 9,5mm, os menores valores de perda de angularidade (abrasão em agregados) e perda em massa (quebra de agregados), o que pode indicar seu melhor comportamento em relação à resistência à degradação.

### 4.3 Comportamento mecânico das misturas asfálticas

Os ensaios mecânicos realizados nesta pesquisa foram: MR, RT, vida de fadiga e *creep* dinâmico (determinação do *FN*). Os ensaios foram feitos com o objetivo inicial de ter uma previsão do comportamento mecânico das misturas asfálticas, além de comparar os resultados entre as duas misturas e relacioná-los com as propriedades dos agregados que as constituem. A Figura 44 mostra os equipamentos utilizados para os ensaios.

Figura 44 - Equipamentos para ensaio: (a) pneumático para MR e vida de fadiga; (b) prensa para RT e (c) UTM para *creep* dinâmico



Para os ensaios de MR e RT, foram utilizados três CPs, condicionados a 25°C, moldados em laboratório, com  $V_v$  de  $4 \pm 0,4\%$  e com teores de ligante asfáltico de acordo com o teor de projeto obtido anteriormente. As médias obtidas através dos resultados de cada CP, bem como o CV (mesmo sabendo-se da deficiência no número de CPs utilizados por cada mistura) das amostras encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados dos ensaios de MR e RT a 25°C

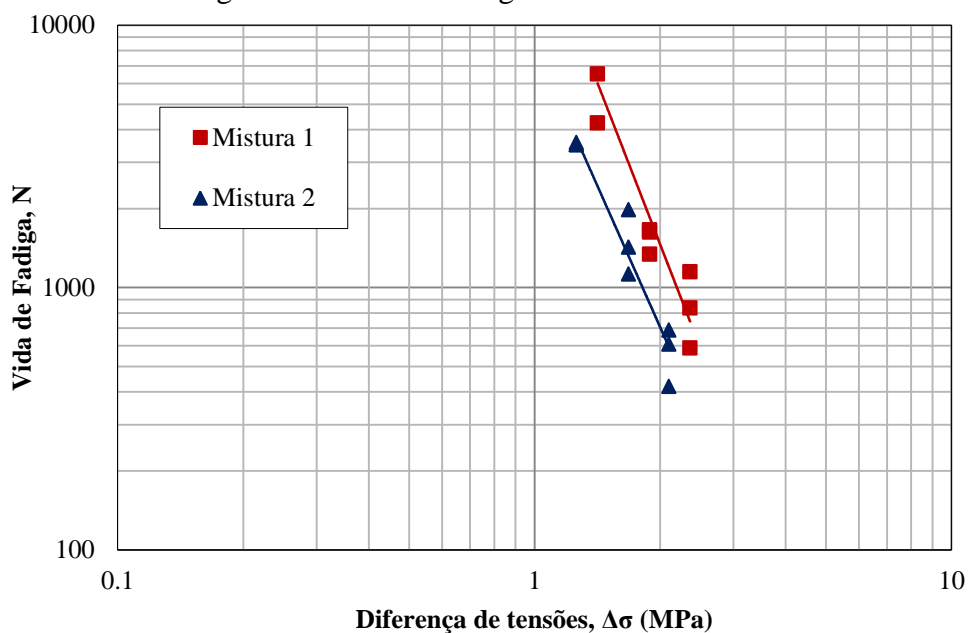
Mistura	MR		RT		MR/RT
	Média (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	CV (%)	
1	4.629	8,28	1,18	12,90	3.922
2	3.790	4,95	1,05	3,88	3.609

Os resultados apresentados mostram que a Mistura 1 (M1) tem um MR aproximadamente 22% maior do que o da Mistura 2 (M2). Em relação ao valor de RT, a M1 teve um resultado 12% mais elevado em relação à M2. Esperava-se que a M1 tivesse mesmo um valor RT um pouco mais elevado, devido às propriedades dos agregados que a compõem, porém é possível perceber que os valores médios de RT para ambas as misturas foram muito próximos. No caso do MR, os valores também não apresentaram uma diferença significativa, porém a M1 possui uma maior rigidez, o que era esperado, devido a uma maior interação entre os agregados e entre agregados e ligante asfáltico e também devido a um menor teor de ligante asfáltico obtido para essa mistura. Os resultados mostram que as duas misturas se comportam de forma semelhante para ambas as propriedades mecânicas, indicando que a pequena diferença nos valores obtidos através dos ensaios de forma e de angularidade de seus agregados pouco impactaram o comportamento mecânico das misturas.

Para ambas as misturas e ambos os ensaios, o CV das amostras foi baixo, ou seja, os valores individuais obtidos para cada CP tiveram pouca variação quando comparados um ao outro, no entanto, a M1 foi a mistura com a maior variação entre seus resultados, tanto para o MR quanto para a RT. Alguns autores afirmam que a relação MR/RT para misturas de CA com CAP 50/70 e que se encaixam na faixa C do DNIT estão, geralmente, na ordem de 3.000 a 3.500. No caso das misturas desta pesquisa, essa relação foi um pouco superior, porém próxima à faixa normalmente considerada.

O ensaio de vida de fadiga foi realizado a tensão controlada, utilizando três níveis de tensão (30, 40 e 50%), em relação ao RT. Para cada nível de tensão, foram ensaiados três CPs por mistura. O comportamento em relação à vida de fadiga das misturas é apresentado na Figura 45. Os parâmetros  $K$  e  $n$ , bem como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que foram obtidos através das linhas de tendência inseridas nos pontos do gráfico são apresentados na Tabela 27.

Figura 45 - Vida de fadiga a tensão controlada

Tabela 27 - Valores dos parâmetros e do  $R^2$ 

Mistura	$K$	$n$	$R^2$
1	24.969	4,09	0,89
2	8.438	3,58	0,94

O gráfico da Figura 45 mostra que as duas misturas possuem inclinações próximas, e isso é comprovado pelos valores de  $n$ , que são muito parecidos. Isso indica que, as duas misturas se comportam da mesma forma quando há variação no nível de tensão. A M1, ou aquela mistura que corresponde ao “melhor” cenário, apresentou uma maior resistência em relação à fadiga se comparada com a M2 (aquela mistura que corresponde ao “pior” cenário), porém as retas estão muito próximas, indicando que a vida de fadiga não é muito diferente para as duas misturas.

É importante deixar claro que, no campo, os níveis de tensão são mais baixos do que aqueles utilizados nos ensaios em laboratório, ou seja, a análise do prolongamento das retas do gráfico de vida de fadiga é muito importante para se obter informações em relação ao comportamento das misturas em relação a esse defeito. A M1, por possuir sua reta mais inclinada em relação M2, continuará tendo uma maior vida de fadiga, mesmo para baixas tensões, ou seja, necessitará de um maior número de aplicações de carga para sofrer a ruptura.

Os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida (ou *creep* dinâmico) são apresentados na Tabela 28, através do FN e da taxa de deformação na zona secundária ( $b$ ) de

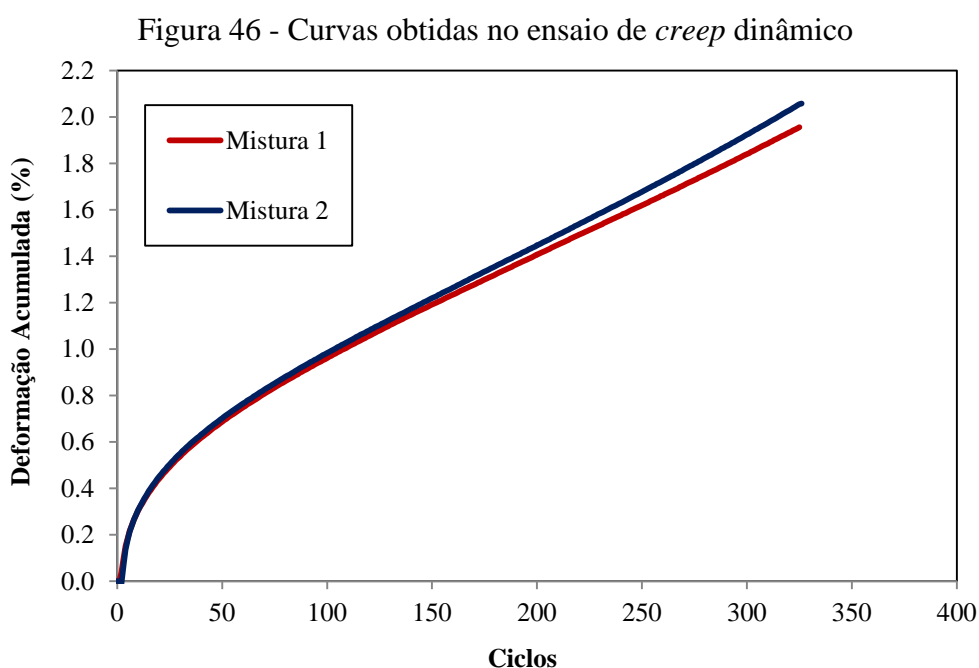
cada uma das misturas. Para cada mistura, foram ensaiados três CPs com  $V_v$  de  $7 \pm 0,5\%$  e, além das médias, são também apresentados os valores de CV das amostras.

Tabela 28 - Resultados do ensaio de *creep* dinâmico a 60°C

Mistura	FN (ciclos)		<i>b</i> (microstrain/ciclo)	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
1	232	27	56,12	18
2	204	24	60,04	30

Os resultados obtidos com os ensaios indicam que, as misturas possuem um comportamento muito próximo em relação à resistência à deformação permanente, uma vez que a média dos valores de FN para ambas as misturas foi também muito próximo, tendo a M1 apresentado um resultado levemente superior (14%), o que não é suficiente para dizer que esta mistura é mais resistente do que a outra. Os dois valores de FN possuem a mesma ordem de grandeza. Em relação ao CV obtido para os valores de FN, os mesmos foram medianos e próximos, indicando uma variação parecida no ensaio de ambas as misturas.

Em relação à taxa de deformação (*b*) na zona secundária, a M2 teve um valor um pouco mais elevado, o que era esperado, uma vez que esta atingiu a ruptura antes da M1. Apesar disso, as taxas de deformação foram similares para as duas misturas, o que pode ser visto no gráfico da Figura 46. A M1 deformou menos na zona secundária, porém, na maior parte da curva, a diferença de deformação foi mínima entre as duas misturas.



#### 4.4 Análise da estrutura interna das misturas asfálticas

Através dos dois diferentes *software* utilizados neste trabalho, foi feita a análise da estrutura interna de amostras das duas misturas em estudo. O *Digital Image Analysis System* forneceu parâmetros de orientação, pontos de contato e segregação dos agregados, enquanto que o *ImageTool* forneceu apenas parâmetros de orientação. Para a obtenção dos dados desejados, foram selecionados e analisados apenas agregados graúdos, de tamanho superior a 4,75mm. Isso foi proposto devido a dois principais motivos: (i) precisão do *software*, que apresenta limitação para detectar precisamente os agregados miúdos e (ii) influência maior dos agregados graúdos no esqueleto mineral das misturas.

Considerou-se a ocorrência de um ponto de contato entre duas partículas de agregados quando a distância entre elas foi menor do que 0,5mm. Esse valor foi escolhido de acordo com o padrão adotado pelo *software Digital Image Analysis System*. Uma distância menor do que essa seria, possivelmente, difícil de ser considerada e detectada pelo *software*. Como a intenção desta pesquisa é comparar os valores obtidos para diferentes amostras, adotou-se o mesmo valor de distância para todas elas. A Tabela 29 mostra o número de pontos de contato entre as partículas para cada uma das misturas.

Tabela 29 - Número de pontos de contatos

Mistura	Pontos de contato	
	Média	CV (%)
1	126	23
2	120	13

A partir dos resultados apresentados, é possível observar que, o número de pontos de contato entre as partículas de agregados foi praticamente o mesmo para as duas misturas analisadas. No entanto, o CV obtido com a média das quatro faces dos CPs da mistura M1 foi superior ao CV correspondente a M2, possivelmente indicando que a primeira mistura possui configurações distintas em relação a esse parâmetro ao longo de sua profundidade.

Em relação à orientação ou à distribuição angular dos agregados, foi calculado o valor de vetor magnitude dos agregados em cada mistura. Os valores, expressos em porcentagem, são propostos para indicar o nível de uniformidade das partículas dentro da mistura. Estes correspondem a uma média de valores obtidos para quatro faces de um CP para cada mistura. Para esse parâmetro foram utilizados os dois *software* de imagens apresentados

anteriormente. A Tabela 30 mostra os resultados, obtidos em ambos os *software*, para os cortes horizontais realizados nos CPs.

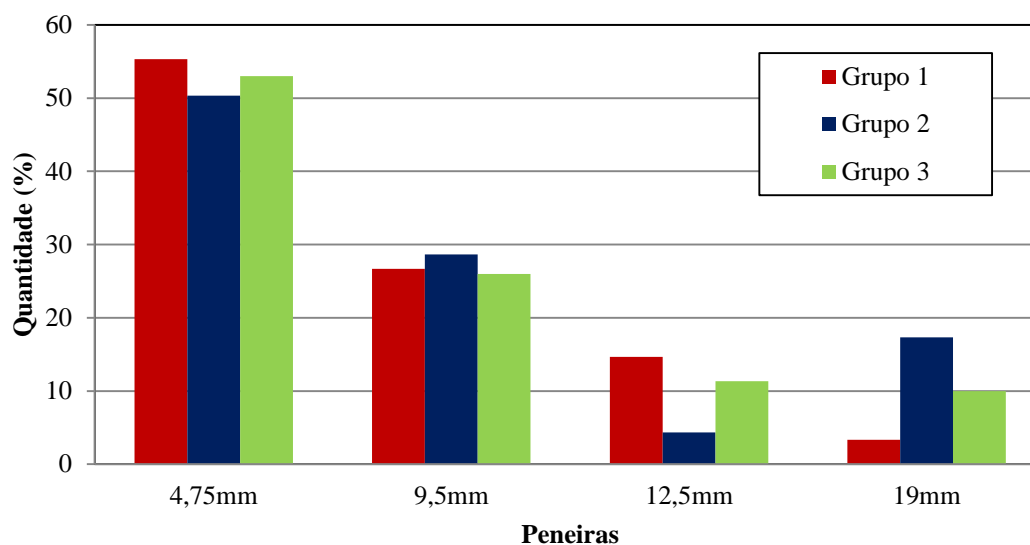
Tabela 30 - Valores de vetor magnitude

Mistura	<i>Software</i>			
	<i>ImageTool</i>		<i>Digital Image Analysis System</i>	
	Média	CV (%)	Média	CV (%)
1	9,87	33,18	9,92	35,29
2	10,08	33,28	10,16	18,96

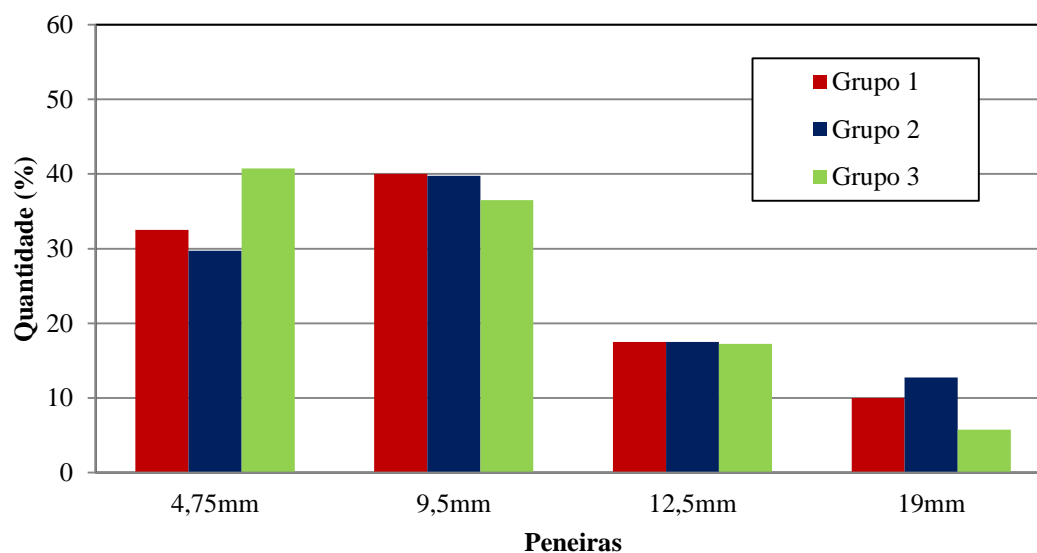
Os resultados de vetor magnitude mostram que, as duas misturas possuem seus agregados orientados de maneira muito parecida, uma vez que os valores desse parâmetro foram quase os mesmos, com uma mínima diferença entre cada um. Os dois *software* de análise de imagens geraram valores quase iguais de vetor magnitude, independente da mistura, o que pode indicar que ambos são uma boa ferramenta para a obtenção desse parâmetro. Os valores elevados de CV indicam que as diversas faces dos CPs serrados possuem configurações distintas no que diz respeito à distribuição de seus agregados na estrutura interna das misturas asfálticas. Resultados mais detalhados indicam que, no geral, as faces mais próximas do topo são aquelas que possuem um vetor magnitude mais baixo, ou seja, seus agregados estão distribuídos de forma mais aleatória dentro da mistura.

Em relação à segregação das partículas, o *software Digital Image Analysis System* foi capaz de fornecer a quantidade de cada tamanho de agregado por grupo de segregação: (i) grupo 1, relativo ao círculo mais interno, de raio igual a um terço do raio da superfície do CP; (ii) grupo 2, relativo ao anel intermediário, de raio igual a dois terços do raio do CP; e (iii) grupo 3, relativo ao anel da borda externa, de raio igual ao raio do CP. O *software* considerou os agregados retidos em quatro peneiras: N<sup>o</sup>4, 3/8", 1/2" e 3/4". Os resultados, média de quatro faces de CP por mistura, apresentados na Figura 47, mostram a segregação dos agregados de cada mistura.

Figura 47 - Segregação de agregados: (a) mistura 1 (M1) e (b) mistura 2 (M2)



(a)



(b)

A partir dos gráficos, é possível concluir que, no geral, a Mistura 2 apresentou uma menor segregação de seus agregados em relação a Mistura 1, ou seja, suas partículas estiveram mais bem distribuídas nos três grupos de segregações para as faces dos CPs analisadas, principalmente para o tamanho de 12,5mm, que apresentou quase a mesma porcentagem de agregados em todos os grupos de segregação. No entanto, não se pode afirmar com precisão que tal mistura tem seus agregados mais segregados ou não, pois não há uma tendência bem definida com relação a isso. Além disso, a análise individual de cada face dos CPs serrados apresentou grandes variações em relação às porcentagens de agregados em cada grupo de segregação ao longo da profundidade do CP.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusões a respeito das propriedades de forma dos agregados

Este trabalho teve como objetivo estudar diversos agregados produzidos por três diferentes pedreiras localizadas na RMF. Propriedades de forma, de angularidade e de textura foram investigadas a fim de se comparar as características dos diferentes materiais analisados. No geral, as propriedades dos agregados provenientes das três fontes foram muito semelhantes para os diversos parâmetros, e os agregados foram classificados da mesma forma independente de sua origem. Acredita-se que, isso se deve ao fato de que as pedreiras de onde os agregados foram coletados possuem processos de britagem muito parecidos. A única propriedade que variou bastante entre os agregados foi a textura superficial, que deve ser influenciada mais pela origem dos agregados (ou seja, o tipo de rocha e a sua respectiva textura original) do que pela britagem. Como outras conclusões pode-se destacar:

- O uso da média de valores para caracterizar e classificar um agregado não é um método preciso, pois podem existir variações nas propriedades de acordo com os tamanhos e as frações dos agregados. Há também variações de propriedades em uma amostra dentro de uma mesma fração de agregados. Há uma tendência de aumento no valor de angularidade e de redução na textura quando se diminui o tamanho de um agregado;
- Os valores de CV foram, no geral, mais elevados para as médias do parâmetro de angularidade, pois este parâmetro é utilizado tanto para agregados graúdos quanto para agregados miúdos;
- Os resultados obtidos mostraram que, o TMN dos agregados analisados não influenciou nos valores médios para cada uma das propriedades estudadas. Os agregados individuais para cada TMN seriam classificados da mesma forma que foram através de sua média geral, levando em consideração todos os seus TMNs;
- Os CVs elevados encontrados para o parâmetro de textura superficial podem ser explicados pela aleatoriedade da posição de cada partícula ao se preparar a amostra a ser analisada no AIMS. No caso do agregado fonolítico, não houve tanta variação, o que pode indicar que esse material possui superfícies mais uniformes em relação à sua textura;
- O uso do AIMS associado a um equipamento que promova processos que simulam o polimento dos agregados em campo, como o Los Angeles ou o Micro-Deval, pode ser uma importante ferramenta no controle de agregados no que diz respeito a características que podem impactar na segurança viária;

A utilização do AIMS na caracterização de agregados é importante para se obter uma análise mais completa e detalhada dos parâmetros de forma, de angularidade e de textura, uma vez que é possível obter não só uma média de valores, mas também distribuições de propriedades.

Uma conclusão importante que pode ser tirada desta pesquisa é que, ao se analisar uma matriz de agregados tão grande, composta por várias frações e diversos tamanhos de agregados com origens em rochas distintas, acaba existindo uma dificuldade em definir quais tamanhos de agregados vão influenciar mais significativamente no comportamento mecânico das misturas asfálticas compostas por eles, bem como quantificar a influência de cada uma das propriedades relacionadas à forma (esfericidade, lamelaridade, angularidade e textura superficial) na resistência dessas misturas aos diversos mecanismos de dano. Além disso, o uso de agregados com composições mineralógicas distintas, comum em diversos projetos de pavimentação, também torna mais difícil a interpretação de resultados relacionados ao desempenho de pavimentos e também ligados à interação agregado/ligante asfáltico e agregado/agregado, bem como a formação do esqueleto mineral.

## **5.2 Conclusões a respeito do comportamento mecânico das misturas**

Neste trabalho foram produzidas duas misturas asfálticas com alguns dos agregados analisados. Os agregados graúdos e miúdos de “melhores” propriedades resultaram em uma mistura considerada como “melhor cenário” (M1), ou seja, da qual se esperava um melhor comportamento mecânico. Já os agregados de “piores” propriedades constituíram uma mistura considerada como o “pior cenário” (M2), ou seja, com possíveis propriedades mecânicas inferiores.

As principais conclusões obtidas através desse estudo é que os valores de MR e de RT para as duas misturas foram muito próximos. O valor de RT da mistura de “melhor cenário” foi um pouco superior (cerca de 12%) se comparado aquele encontrado para a “pior mistura”, porém essa diferença não parece ser muito significativa. Em relação aos resultados dos ensaios de vida de fadiga e de *creep* dinâmico, as duas misturas também se comportaram de maneira muito similar. Os valores de ruptura de ambas as misturas para esses ensaios foram próximos, com uma pequena superioridade da M1 para os resultados dos dois ensaios.

Os resultados descritos acima podem ser explicados pelo fato de que as propriedades dos diferentes agregados utilizados nas duas misturas eram muito próximas, ou

seja, mesmo selecionando agregados com melhores ou piores propriedades, as diferenças entre eles não seria suficiente para impactar no comportamento das misturas.

O teor de ligante asfáltico encontrado para a M2 foi mais elevado (0,3% a mais do que aquele encontrado para a M1), mesmo utilizando a mesma granulometria e os mesmos métodos de dosagem e de compactação em ambas as misturas. Esse fato pode ser explicado pela absorção dos agregados graúdos utilizados em cada uma das misturas. Para a M1, o agregado utilizado (fonolítico) teve um valor de absorção aproximadamente metade do valor encontrado para o agregado graúdo utilizado na M2 (granítico).

### 5.3 Sugestões para futuras pesquisas

Como principais sugestões para o prosseguimento do presente trabalho, propõe-se:

- A realização de outros ensaios mecânicos nas misturas asfálticas descritas, como: módulo dinâmico, resistência ao dano por umidade induzida, simulação em laboratório através do simulador de tráfego de pequeno porte para a avaliação da deformação permanente, além da obtenção dos parâmetros de compactação;
- A produção de outras misturas asfálticas, sejam elas compostas por novas combinações entre os agregados aqui apresentados, ou compostas apenas por agregados originados de um tipo de rocha em cada mistura;
- A utilização do Método Bailey em misturas compostas pelos agregados em estudo nesta pesquisa e a verificação de sua influência na granulometria das misturas e, conseqüente, comportamento mecânico das mesmas;
- O uso de outros métodos de ensaios para a caracterização dos agregados em relação a suas propriedades de polimento e de degradação, através de outros equipamentos, como o *Wet Track Abrasion Track* (WTAT) e o Micro-Deval. Além disso, a análise da macrotextura de misturas asfálticas, através de ensaios, no AIMS, de CPs produzidos em laboratório, pode ser realizada;
- O uso de outros *software*, mais sofisticados e mais precisos, para a análise da estrutura interna de misturas asfálticas, além de novos equipamentos de análise de imagens, que vêm sendo desenvolvidos e aprimorados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO TP 58 (2000) *Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO.
- ABDUL-MALAK, M.-A.U.; FOWLER, D. W.; CONSTANTINO, C. A. (1996) *Aggregate Characteristics Governing Performance of Seal Coat Highway Overlays*. Transportation Research Record 1547, Transportation Research Board, Washington, DC, 15-22.
- AIREY, G. D.; HUNTER, A. E.; COLLOP, A. C. (2008) *The Effect of Asphalt Mixture Gradation and Compaction Energy on Aggregate Degradation*. Construction and Building Materials, v. 22, 972-980.
- AL ROUSAN, T. M. (2004) *Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, College Station, Texas.
- ALSHAMSI, K. S. (2006) *Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Baton Rouge, Louisiana.
- ANP (2005) Resolução ANP Nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7.2005. Regulamento Técnico Nº 3/2005. Agência Nacional do Petróleo.
- ARASAN, S.; HASILOGLU, A. S.; AKBULUT, S. (2010) *Shape Properties of Natural and Crushed Aggregate Using Image Analysis*. International Journal of Civil and Structural Engineering, v. 1, 221-233.
- ASTM C 127-00 (2000) *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- ASTM D 2041 (2000) *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- ASTM E 303 (1998) *Standard Test Method for Measuring Surface Friction Properties Using the British Pendulum Tester*. American Society for Testing and Materials, ASTM.
- BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2007), *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro, RJ.
- BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2009) *Caracterização de Agregados Convencionais e Alternativos Utilizando Técnicas de Processamento Digital de Imagens*. In: XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Vitória, ES.
- BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2011) *Avaliação da Resistência ao Polimento e à Degradação de Agregados Utilizando a Abrasão Los Angeles e o*

Processamento Digital de Imagens. In: 7o. Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu, PR.

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

BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2012) *Evaluation of Different Digital Image Processing Software for Aggregates and Hot Mix Asphalt Characterizations*. Construction & Building Materials, v. 37, p. 370-378.

BHOSALE, S. S.; MANDAL, J. N. (2008) *Open Graded Asphalt Concrete for Mitigation of Reflection Cracking on Asphalt Concrete Overlays*. The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), October 1-6, 2008, Goa, India, 4409-4416.

BLOEM, D. (1971) *Skid Resistance – The Role of Aggregates and Other Factors*. National Sand and Gravel Association Circular 109, Silver Spring, MD, 1-30.

CASTELO BRANCO, V. T. F.; MASAD, E.; LITTLE, D. N.; SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G. (2006) Caracterização de Forma, Angularidade e Textura de Agregado de Brita Granítica e Escórias de Aciaria Usando o *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)*. In: XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília, DF.

CAVALCANTI, V. M. M.; PARAHYBA, R. E. R. (2011) A Indústria de Agregados para Construção Civil na Região Metropolitana de Fortaleza. Departamento Nacional de Produção Mineral, DPNM.

CONSUEGRA, A.; LITTLE, D. N.; VON QUINTOS, H.; BURATI, J. (1989) *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, DC, 80-87.

COOLEY JR, L.; JAMES, R. (2003) *Micro-Deval Testing of Aggregates in the Southeast*. Transportation Research Record 1837, Transportation Research Board, Washington, DC, 73-79.

CROSS, S. A.; PURCELL, E. M. (2001) *Effects of Fine Aggregate Angularity on VMA and Rutting of Kansas HMA Mixtures*. ASTM STP 1412 – American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA.

CROUCH, L. K.; DUNN, T. R. (2005) *Identification of Aggregates for Tennessee Bituminous Surface Courses*. Tennessee Department of Transportation (TDOT) Project Number TNSPR-RES1149, Final Report, Cookeville, TN.

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

CUNHA, M. B.; GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JR, J. L.; MOTTA, L. M. G. (2004) Influência dos Agregados Sobre Propriedades Mecânicas e Volumétricas de Misturas Asfálticas: Análise do Método Bailey. In: XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Florianópolis, SC.

DELAGE, K. P. (2000) *The Effect of Fine Aggregate Angularity on Hot Mixture Asphalt Performance*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI.

DESSOUKY, S. H.; MASAD, E. A.; LITTLE, D. N. (2006) *Mechanistic Modeling of Permanent Deformation in Asphalt Mixes with the Effect of Aggregate Characteristics*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 75, p. 535-571.

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

DNER-ME 054 (1997) Equivalente de Areia, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DNER-ME 078 (1994) Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DNER-ME 081 (1998) Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. Departamento Nacional de Estradas e Rodagens – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

DNER-ME 084 (1995) Agregado Miúdo – Determinação da Densidade Real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.

DNER-ME 085 (1994) Material Finamente Pulverizado: Determinação da Massa Específica Real – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

DNER-ME 133 (1994) Misturas Betuminosas – Determinação do Módulo de Resiliência. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DNER-ME 138 (1994) Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

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

ERDOGAN, S. T. (2005) *Determination of Aggregate Shape Properties Using X-ray Tomographic Methods and the Effect of Shape on Concrete Rheology*. Tese de Doutorado. University of Texas at Austin, Austin, TX.

EVANGELISTA JR, F.; SOUZA, L. T.; SOARES, J. B. (2005) *Processamento Digital de Imagens Aplicado à Caracterização de Agregados Quanto à Forma*. In: XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Recife, PE.

FOSTER, C. R. (1970) *Dominant Effect of Fine Aggregate on Strength of Dense-Graded Asphalt Mixes*. Highway Research Board Special Report 109. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1-3.

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

GAMA, R. (2008) *Caracterização Geoquímica de Óleos Biodegradados dos Campos de Marlim Sul e Roncador, na Bacia de Campos*. Dissertação de Mestrado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.

GATCHALIAN, D.; MASAD, E.; CHOWDHURY, A.; LITTLE, D. (2006) *Characterization of Aggregate Resistance to Degradation in Stone Matrix Asphalt Mixtures*. Research Report ICAR – 204-1F. International Center for Aggregates Research. Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station, TX.

GOUVEIA, L. T. de (2006) *Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

HUNTER, A. E.; AIREY, G. D.; COLLOP, A. C. (2004) *Aggregate Orientation and Segregation in Laboratory-Compacted Asphalt Samples*, Transportation Research Record, TRB, No. 1891, TRB, 8-15.

KANDHAL, P; PARKER JR., F. (1998) *Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements*. National Cooperative Highway Research Program Report 405, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.

KIM, H.; HAAS, C. T.; RAUCH, A. F. (2003) *Image Texture Based Quality Control of Aggregate Production*. International Center for Aggregates Research 11<sup>th</sup> Annual Symposium: Aggregates – Asphalt Concrete, Bases and Fines. Austin, TX.

KIM, Y. R.; DANIEL, J. S.; WEN, H. (2002) *Fatigue Performance Evaluation of WesTrack Asphalt Mixtures Using Viscoelastic Continuum Damage Approach*. Final Report to Federal Highway Administration/North Carolina Department of Transportation, Report No. FHWA/NC/2002-004.

LEE, K. W.; GUNDAPUNENI, S. K.; SINGH, A. (2010) *Effects of Asphalt Binder Grade on the Performance of Rhode Island Hot-Mix Asphalt*.

LOPES, M. M.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2010) Efeito do Tipo de Compactação nos Parâmetros Volumétricos e no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. In: 20º Encontro de Asfalto - Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, RJ.

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

MAHMOUD, E.; BAHIA, H. (2004) *Using the Gyrotory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures*, Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02, Madison, WI.

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

MARQUES, G. L. O. (2001) Procedimentos de Avaliação e Caracterização de Agregados Minerais Usados na Pavimentação Asfáltica. Seminário de Qualificação ao Doutorado. Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

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

MASAD, E. (2005) *A Progress Report Submitted to the Pavement Engineering Program Of the Federal Highway Administration. Simulation, Imaging, and Mechanics of Asphalt Pavements – FHWA DTFH61-03-X-00026*. Progress Report, College Station, TX.

MASAD, E.; KASSEM, E.; CHOWDHURY, A. (2009) *Application of Imaging Technology to Improve Laboratory and Field Compaction of HMA*, The Transportation Research Information Services, TRIS, p. 250.

MASAD, E.; AL-ROUSAN, T.; BUTTON, J.; LITTLE, D.; TUTUMLUER, E. (2005) *Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity*. Report NCHRP – 555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, DC.

MASAD, E.; BUTTON, J. W. (2000) *Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, v. 15, 273-280.

MASAD, E.; JANDHYALA, V. K.; DASGUPTA, N.; SOMADEVAN, N.; SHASHIDHAR, N. (2002) *Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes Using X-ray Computed Tomography*. Journal of Materials in Civil Engineering, 122-129.

MASAD, E.; MUHUNTHAN, B.; SHASHIDHAR, N.; HARMAN, T. (1999) *Effect of Compaction Procedure on the Aggregate Structure in Asphalt Concrete*. Transportation Research Record 1681, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 179-184.

- MASAD, E.; MUHUNTHAN, B; SHASHIDHAR, N.; HARMAN, T. (1998) *Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete*. Geotechnical Special Publication, American Society of Civil Engineering, v. 85, 69-80.
- MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L. (2001) *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, DC, 148-156
- MONISMITH, C. L. (1991) *Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete*, SHRP-A/lr-91-104, National Research Council, Washington, D.C.
- MULLEN, W.; DAHIR, S.; BARNES, B. (1971) *Two Laboratory Methods for Evaluating Skid-Resistance Properties of Aggregates*. Highway Research Record 37, 123-135.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2008) Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. Dissertação de Mestre. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, RJ.
- NITTA, N.; SAITO, K.; ISOZAKI, S. (1990) *Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*. ASTM Special Technical Publication 1031, American Society for Testing and Materials, 113-126.
- ONOFRE, F. C.; BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2011) Correlação Entre Variáveis de Densificação do Compactador Giratório e Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Convencionais e com Resíduos. Transportes (Rio de Janeiro), v. XIX, p. 13-22.
- PEREIRA, C. A. (2010) Análise da Aderência Pneu-Pavimento em Rodovias do Estado do Pernambuco e da Paraíba com Elevado Índice de Acidentes. Tese de Doutorado. CTG/UFPE, Recife, PE.
- PERRY, M.; WOODSIDE, A.; WOODWAR, W. (2001) *Observations on Aspects of Skid-resistance of Greywacke Aggregate*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology 34, 347-352.
- PIDWERBESKY, B.; WATERS, J.; GRANSBERG, D.; STEMPOK, R. (2006) *Road Surface Texture Measurement Using Digital Image Processing and Information Theory*. Land Transport New Zealand Research Report, 290, 65 p.
- ROBERTS, F.L.; KANDHAL, P.S.; KENNEDY, T.W. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. National Center for Asphalt Technology, 2ª Edição, Lanham, MD.
- ROGERS, C. (1998) *Canadian Experience with the Micro-Deval Test for Aggregates*. Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation 13, 139-147.
- SANDERS, C. A.; DUKATZ, E. L. (1992) *Evaluation of Percent Fracture of Hot-Mix Asphalt Gravels in Indiana*. Effect of Aggregate and Mineral Filler on Asphalt Mixture

Performance, R. C. Meininger, ed., American Society for Testing and Materials, STP 1147. Philadelphia, PA.

SOUSA, J. B.; HARVEY, J.; PAINTER, L.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. (1991) *Evaluation of Laboratory Procedures for Compacting Asphalt – Aggregate Mixtures, Report No. SHRP-A-UWP=91-523*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC.

SOUZA, L. T.; EVANGELISTA JR, F.; SOARES, J. B. (2006) *Processamento Digital de Imagens Aplicado a Análise Micromecânica de Misturas Asfálticas*. In: 18º Encontro de Asfalto - IBP, Rio de Janeiro, RJ.

SOUZA, J. B. de Q. (2007) *Comportamento de Misturas Asfálticas a Quente com Agregados Provenientes de Jazidas de Seixo no Estado do Pará*. Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande, PB.

SOUZA, L.T. (2009) *Investigation of Aggregate Angularity Effects on Asphalt Concrete Mixture Performance Using Experimental and Virtual Asphalt Samples*. Dissertação de Mestrado, UNL, Lincoln, NE.

STAKSTON, A. D. (2002) *The Effect of Fine Aggregate Angularity, Asphalt Content and Performance Graded Asphalts on Hot-Mix Asphalt Performance in a Laboratory Study*. Dissertação de Mestrado. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, EUA.

STIADY, J.; HAND, A.; WHITE, T. (2001) *Quantifying Contributions of Aggregate Characteristics to HMA Performance Using PURWheel Laboratory Tracking Device*. In: *Aggregate Contribution to Hot-Mix Asphalt Performance – ASTM STP 1412*, 1-15, Orlando, Florida, EUA, Novembro.

STROUP-GARDINER, M.; BROWN, E. R. (1998) *Segregation in Hot Mix Asphalt Pavements, Interim Report, Study No. 9-11*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC.

TASHMAN, L.; MASAD, E.; LITTLE, D.; HUSSEIN, Z. (2004) *A Microstructure-Based Viscoplastic Model for Asphalt Concrete*. International Journal of Plasticity.

TASHMAN, L.; MASAD, E.; PETERSON, B.; SALEH, H. (2001) *Internal Structure Analysis of Asphalt Mixes to Improve the Simulation of Superpave Gyrotory to Field Conditions*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 70, 605-655.

VASCONCELOS, K. L. (2004) *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e Superpave com Diferentes Granulometrias*. Dissertação de Mestrado. UFC, Fortaleza, CE

VASCONCELOS, K. L.; EVANGELISTA JR., F.; SOARES, J. B. (2005) *Análise da Estrutura Interna de Misturas Asfáticas*. In: XVII Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes, Recife, PE.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B.; LEITE, L. M. (2003) Influência da Densidade Máxima Teórica na Dosagem de Misturas Asfálticas. In: XII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, RJ.

VAVRIK, W.R.; PINE, W.J.; CARPENTER, S.H. (2002) *Aggregate Blending for Asphalt Mix Design: "The Bailey Method"*. 81<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC.

VAVRIK, W.R.; PINE, W.J.; HUBER, G.A.; CARPENTER, S.H.; BAILEY, R. (2001) *The Bailey Method of Gradation Evaluation: The Influence of Aggregate Gradation and Packing Characteristics on Voids in Mineral Aggregate*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 70, 132-169.

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

WALD, C. W. (2003) *Investigation Of The Use Of The Bailey Method Of Aggregate Gradation Selection For Asphalt Mix Design In Arkansas*. Dissertação de Mestrado, University of Arkansas, Arkansas.

WEDDING, P. A.; GAYNOR, R. D. (1961) *The Effect of Using Crushed Gravel as the Coarse and Fine Aggregate in Dense-Graded Bituminous Mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, 30, 469-492.

WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T. (2002) *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. National Cooperative Highway Research Program NCHRP-465, Washington, DC.

WU, Y.; PARKER, F.; KANDHAL; P. S. (1998) *Aggregate Toughness/Abrasion Resistance and Durability/Soundness Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements*. Transportation Research Record 1638, Transportation Research Board, Washington, DC, 85-93.

XUE, W.; DRUTA, C.; WANG, L.; LANE, D. S. (2010) *Assessing the Polishing Characteristics of Coarse Aggregates using Micro-Deval and Imaging System*. GeoShanghai 2010 International Conference.

YEGGONI, M.; BUTTON, J. W.; ZOLLINGER, D. G. (1996) *Fractals of aggregates correlated with creep in asphalt concrete*. ASCE Journal of Transportation Engineering, 22-28.

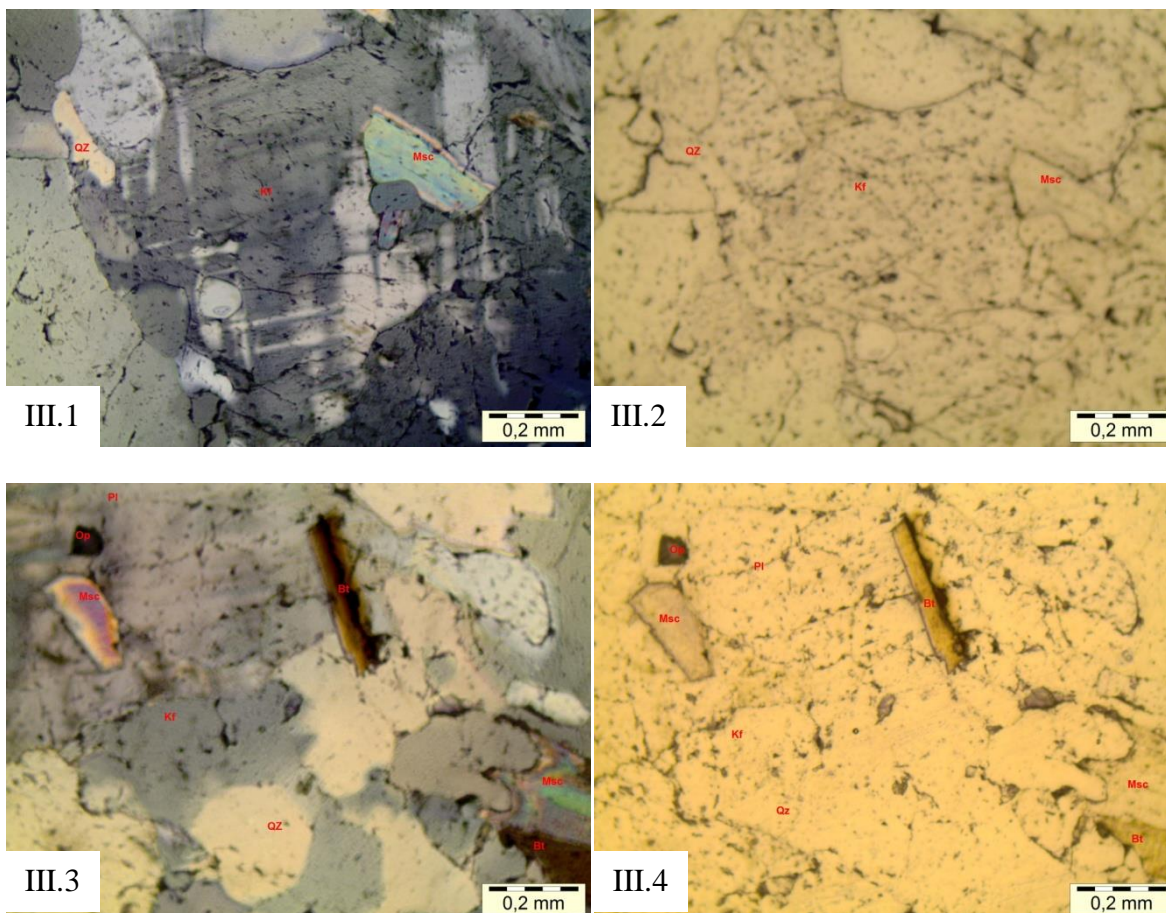
YU, H.; SHEN, S. (2010) *Investigation of Aggregate Packing Using Discrete Element Modeling*. American Society of Civil Engineers. Pavement Base Materials, 296-304.

ZHANG, L.; WANG, Z.; XU, G.; DING, Y. (2008) *Characterization of HMA Internal Structure Using Image Analysis*. American Society of Civil Engineers, 1968-1975.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Descrição petrográfica do agregado 1 (granítico)

Essa rocha exibe cor que varia de branco a cinza, com textura hipidiomórfica inequigranular, com granulação de média a grossa (grãos maiores de feldspatos de 2 a 7mm). Em seção exibe os seguintes minerais: feldspato potássico (35%), quartzo (25%), Plagioclásio (25%), Biotita e Muscovita (10%), e minerais acessórios (5%). Neste sentido, pela composição modal, corresponderia a um Monzogranito. O quartzo possui contato irregular e está disposto em grãos menores entre os outros minerais. Constitui grãos xenomórficos, por vezes fraturados, e com dimensões entre 0,5 a 3mm. O feldspato potássico exibe hábito xenomórfico com tamanho que varia de 0,6 a 2mm, apresenta macla em “xadrez” de microclina. Por vezes estão dispostos em grãos menores juntamente com o plagioclásio e quartzo. A muscovita mostra hábito lamelar e contatos retos com outros grãos minerais. Estão dispersas pela seção sem orientação preferencial. A biotita constitui a fase máfica da rocha. Possui pleocroísmo forte, que varia entre castanho e marrom escuro, em lamelas dispersas por toda a lâmina, isentas de orientação. Por vezes são observados halos de pleocroísmo na biotita pela inclusão de zircão na mesma. Pode também ser reconhecidas biotitas como inclusões em quartzo. Os minerais acessórios são representados por apatita, zircão e opacos.



**Fotomicrografia III.1** – textura hipidiomórfica inequigranular, exibindo quartzo, feldspato potássico e muscovita a luz ortoscópica.

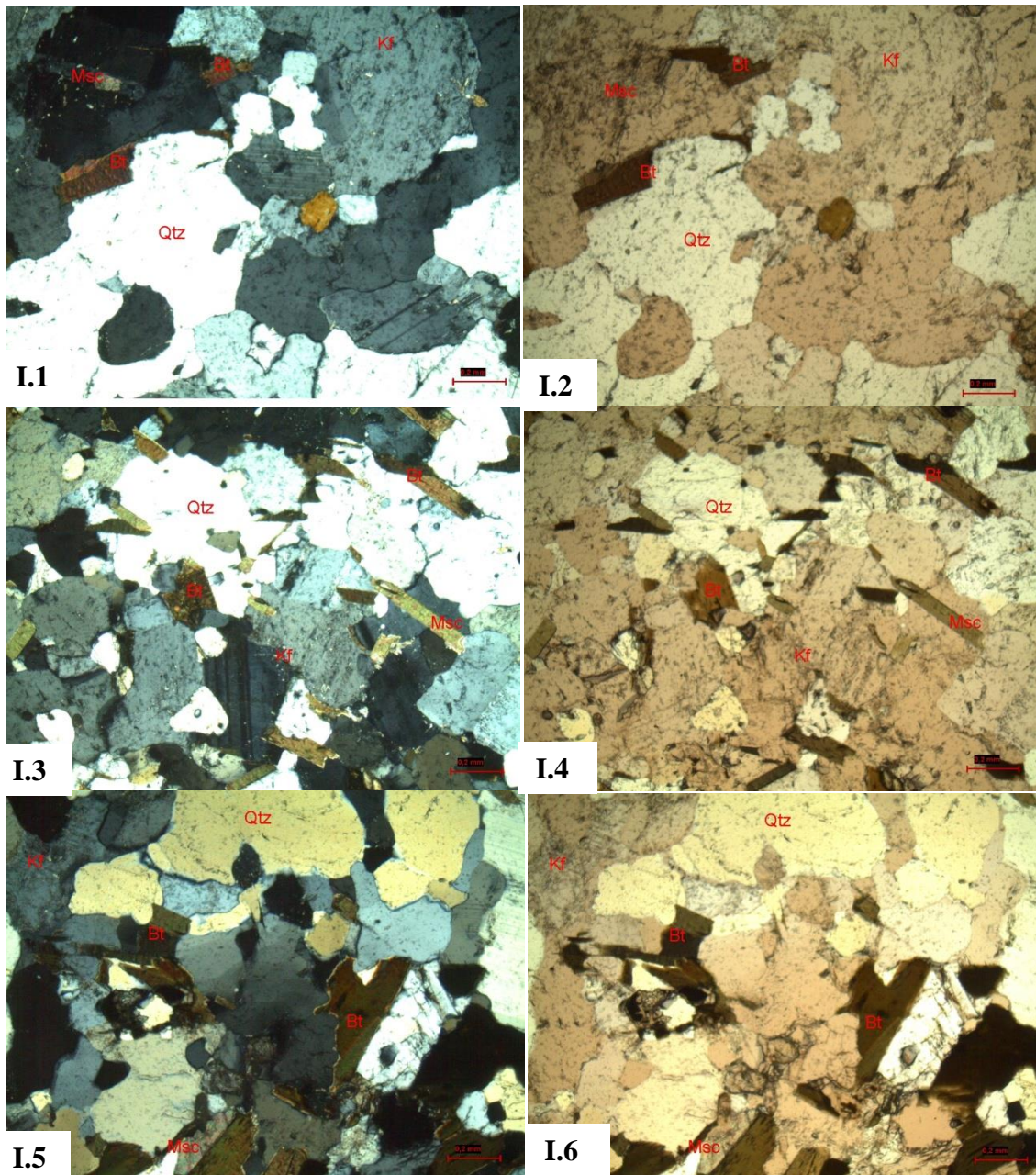
**Fotomicrografia III.2** – textura hipidiomórfica inequigranular, exibindo quartzo, feldspato potássico e muscovita a luz natural polarizada.

**Fotomicrografia III.3** – presença de biotita e muscovita, como parte dos constituintes minerais da textura hipidiomórfica inequigranular, luz ortoscópica.

**Fotomicrografia III.4** – presença de biotita e muscovita, como parte dos constituintes minerais da textura hipidiomórfica inequigranular, luz natural polarizada.

## **APÊNDICE B – Descrição petrográfica do agregado 2 (gnáissico)**

Esta rocha possui coloração clara, com granulação que varia de média a grossa (1 a 5mm de diâmetro de grãos), com um bandamento fracamente desenvolvido. Tal bandamento evidencia certa orientação da rocha, constituído pelo arranjo paralelo de entre níveis formados por muscovita e biotita, alternados por bandas quartzo-feldspáticas. A associação metamórfica é constituída por quartzo, plagioclásio, feldspato potássico, muscovita, biotita e acessórios como zircão, epidoto e minerais opacos. O plagioclásio exhibe geminação segundo a lei da Albita, cujos grãos mantêm contato irregular com o feldspato potássico e quartzo. Os grãos de plagioclásio exibem diâmetro médio que varia de 1 a 3mm, apresentam-se fraturados e com algumas inclusões de biotita, com hábitos de subdiomórficos a xenomórficos. O feldspato potássico apresenta-se comumente xenomórfico que em contato irregular com quartzo e plagioclásio, a dimensão dos grãos varia de 1 a 2mm. Exibe geminação em “xadrez” típica da microclina, e apresenta também inclusões de muscovita. Quartzo apresenta-se em grãos xenomórficos, com dimensões de até 2mm, usualmente possuem extinção ondulante, e frequentemente fraturados. Muscovita e biotita constituem bandas com orientação mineral, nas quais a biotita predomina sobre muscovita. Ambas as micas estão presentes como cristais lamelares. Os minerais acessórios estão dispersos pela seção em meio às bandas ou como inclusões, e correspondem a zircão, epidoto e minerais opacos.



**Fotomicrografia I.1** – orientação de biotitas com luz ortoscópica, próximo ao quartzo e feldspato potássico.

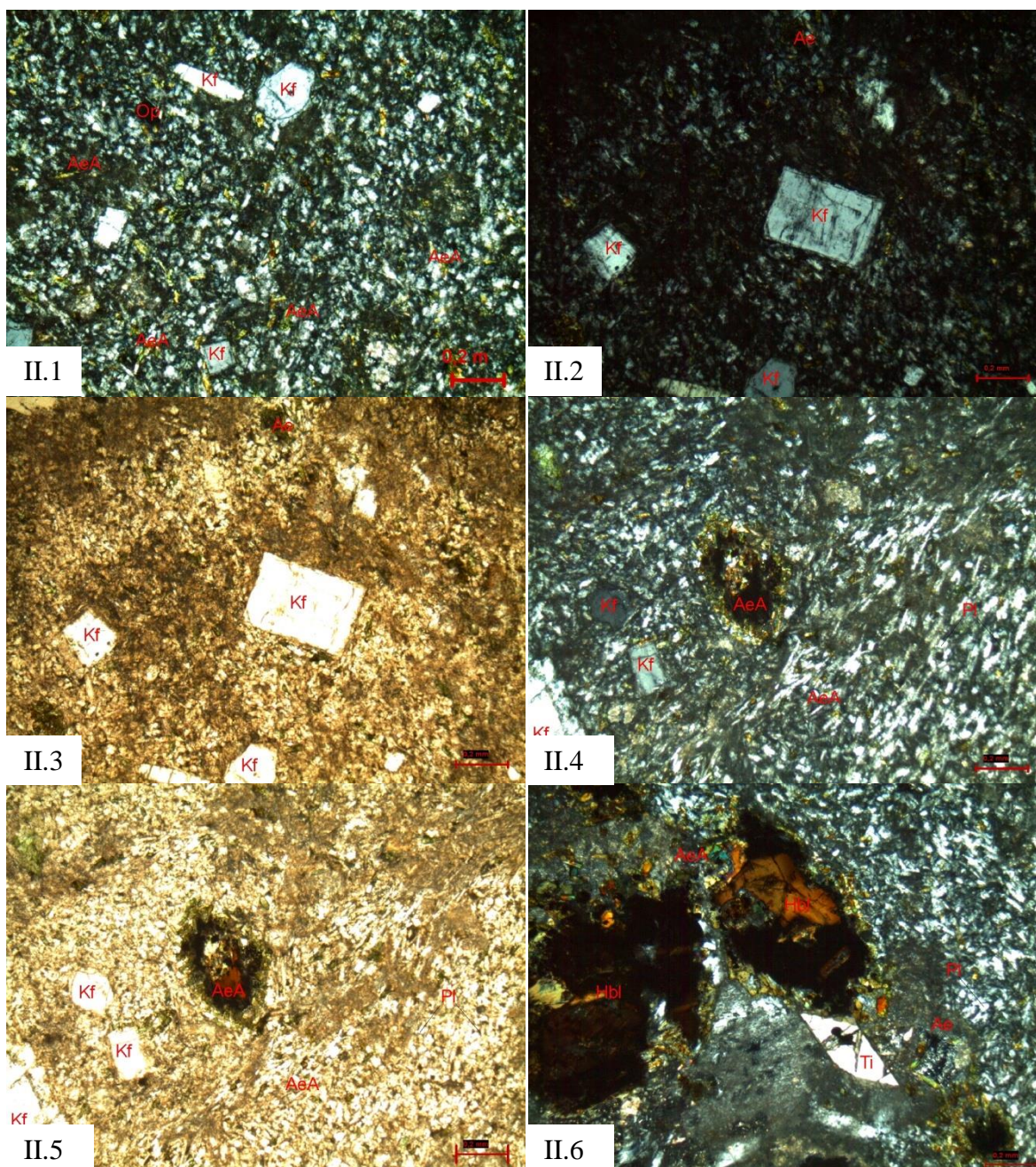
**Fotomicrografia I.2** – orientação de biotitas com luz natural polarizada, próximo ao quartzo e feldspato potássico.

**Fotomicrografia I.3** – biotitas e muscovitas com luz ortoscópica, demonstrando orientação mineral do gnaíse.

**Fotomicrografia I.4** – biotitas e muscovitas com luz natural polarizada, exibindo orientação mineral do gnaíse.

### **APÊNDICE C – Descrição petrográfica do agregado 3 (fonolítico)**

A rocha possui coloração cinza-esverdeada com granulação fina e textura traquítica a subofítica na qual são observados fenocristais de feldspatos e ocasionalmente feldspatóides, dispostos aleatoriamente na matriz da rocha, e por vezes feldspatos potássicos dispostos em arranjo distintamente traquitoide em estrutura de fluxo magmático. A mineralogia representada essencialmente por feldspato potássico sob a forma de ripa, e com alguns feldspatos zonados. A aegirina-augita está presente em proporções elevadas, com cristais prismáticos alongados, de coloração verde intensa e por vezes zonados. O anfibólio (hornblenda) exhibe cristais prismáticos de cor marrom-avermelhada, por vezes em seções basais com duas direções de clivagens características, e em associação ao plagioclásio. O plagioclásio disposto em cristais tabulares, geralmente possuem geminação polissintética (lei da albita) e alguns grãos exibem saussuritização. Os minerais acessórios mais frequentes na descrição correspondem epidoto, óxido de ferro, opacos e carbonatos ocupando feições amigdaloides inclusas em plagioclásio.



**Fotomicrografia II.1** – textura de fluxo traquitica da rocha com aegerina-augita, opacos, feldspato potássico, observação a luz natural polarizada.

**Fotomicrografia II.2** – fenocristais de feldspatos potássicos em observação a luz ortoscópica.

**Fotomicrografia II.3** – fenocristais de feldspatos potássicos observados a luz natural polarizada.

**Fotomicrografia II.4** – orientação de plagioclásios por fluxo magmático, com fenocristais de feldspatos potássicos e presença da aegerina-augita, observação a luz ortoscópica.

**Fotomicrografia II.5** – orientação de plagioclásios por fluxo magmático, com fenocristais de feldspatos potássicos e presença da aegerina-augita, observação a luz natural polarizada.

**Fotomicrografia II.6** – hornblenda bordejada por aegerina-augitas na presença de esfeno e alguns cristais de aegerina, a luz ortoscópica.

**APÊNDICE D – Distribuição de propriedades dos demais agregados**

Figura 1 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 1 (19mm)

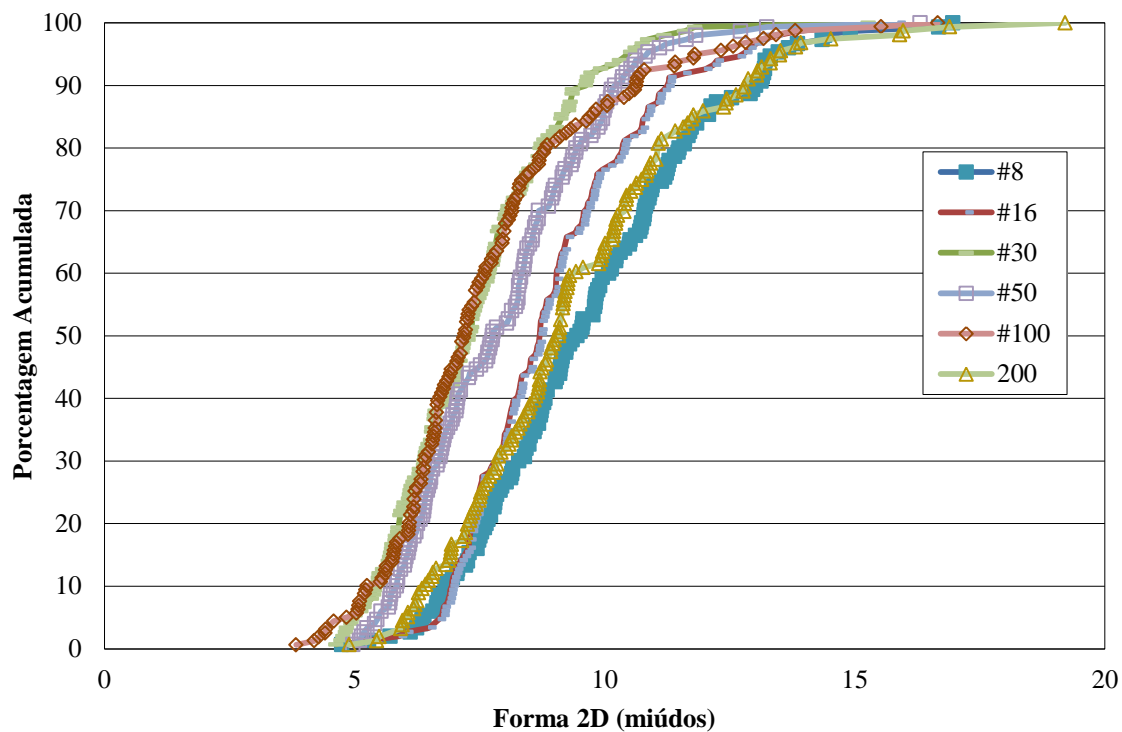


Figura 2 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 1 (9,5mm)

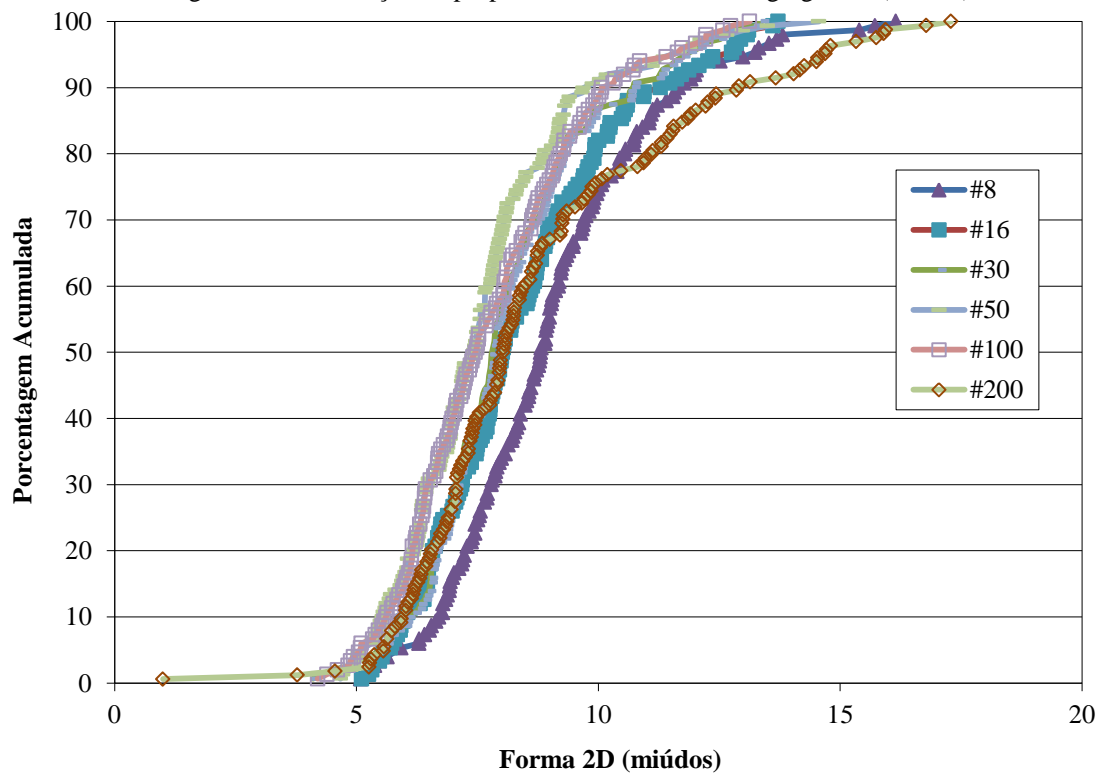


Figura 3 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 1 (pó de pedra)

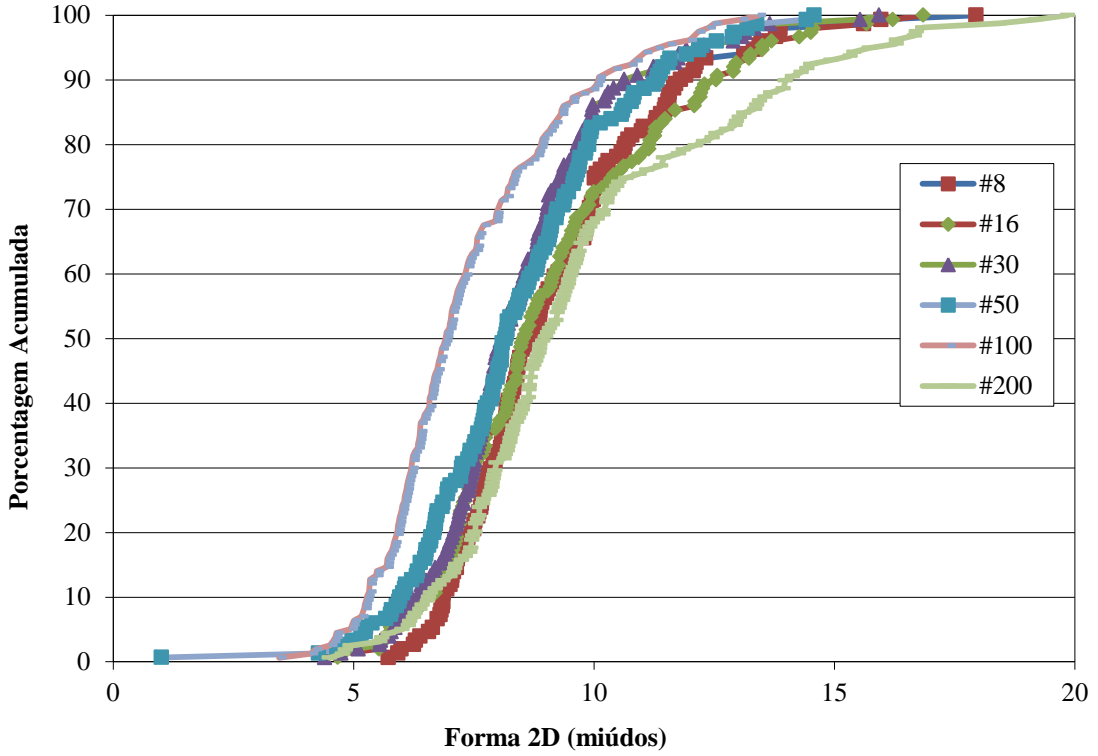


Figura 4 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 2 (19mm)

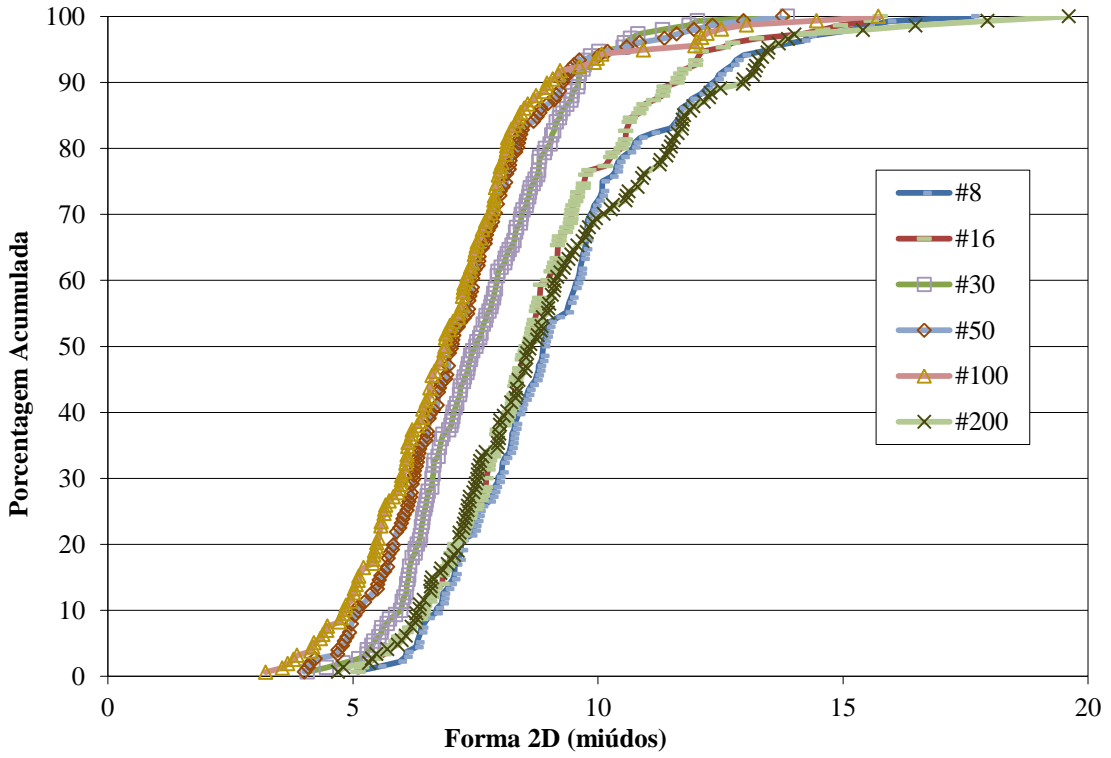


Figura 5 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 2 (12,5mm)

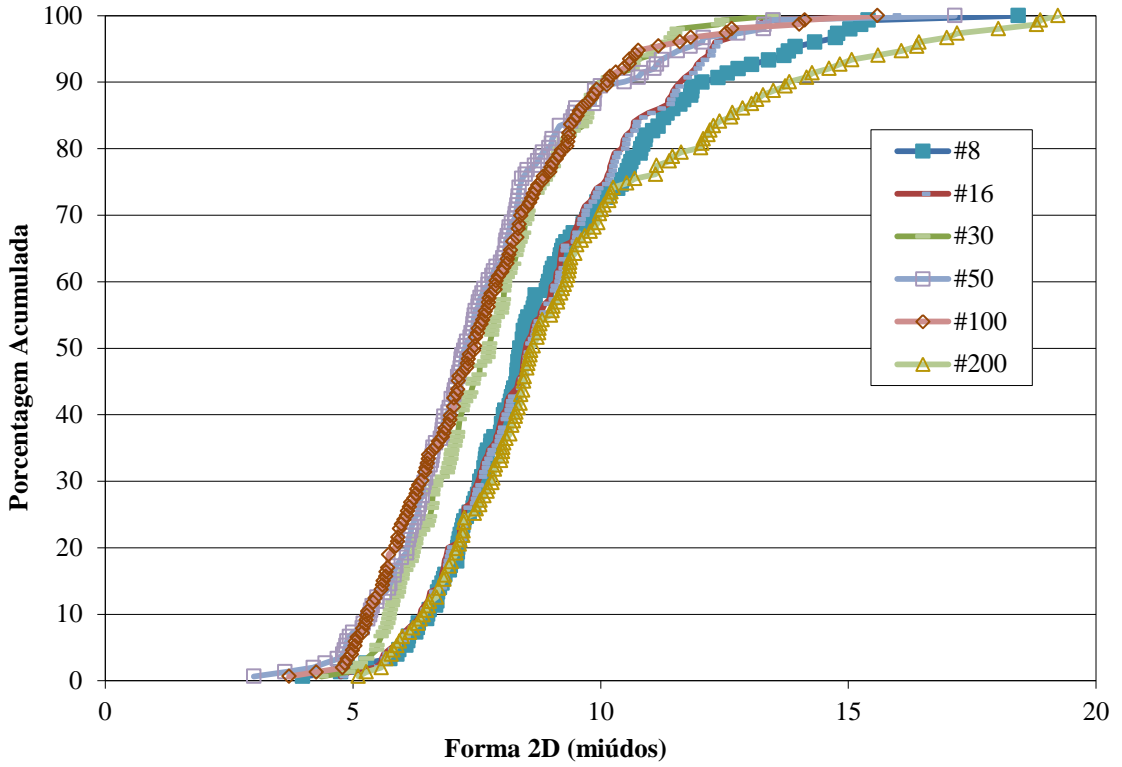


Figura 6 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 2 (9,5mm)

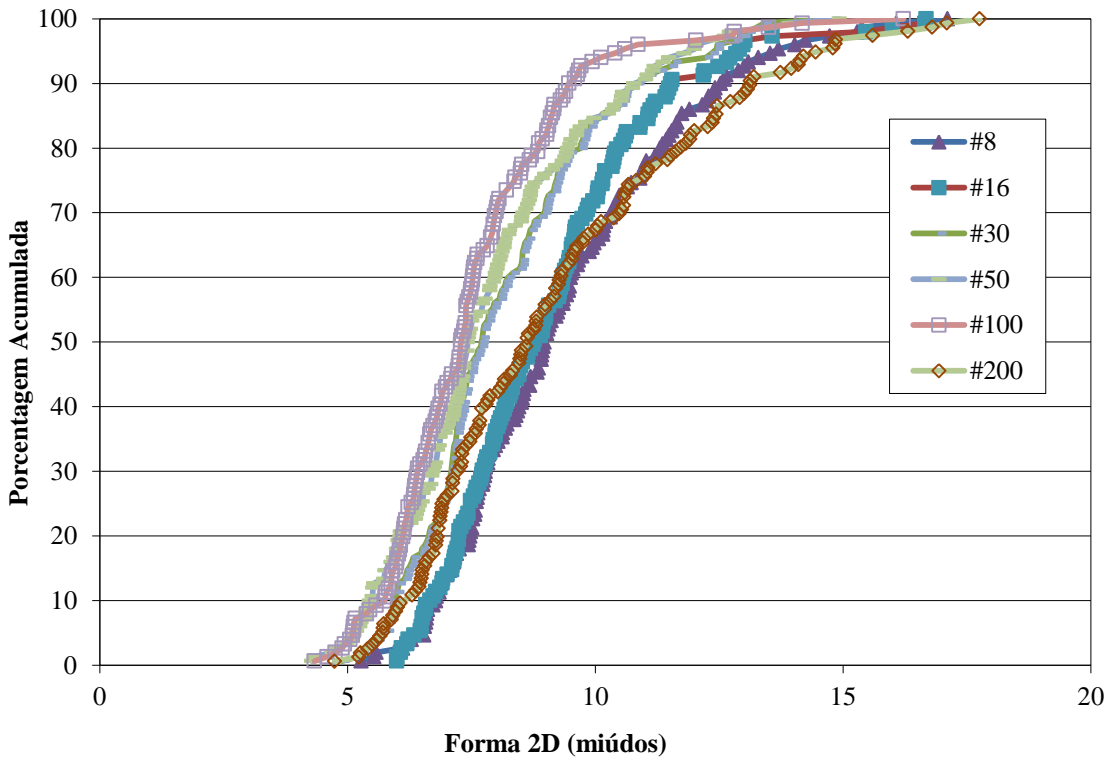




Figura 9 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 3 (9,5mm)

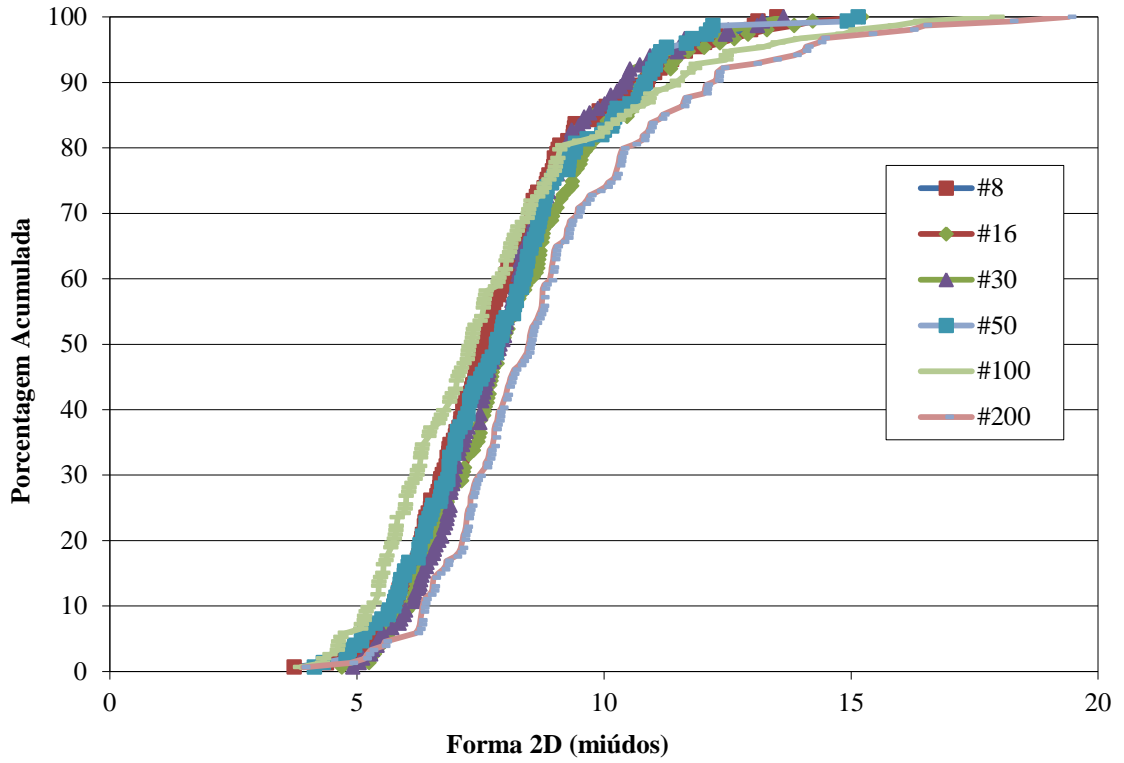


Figura 10 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 3 (4,75mm)

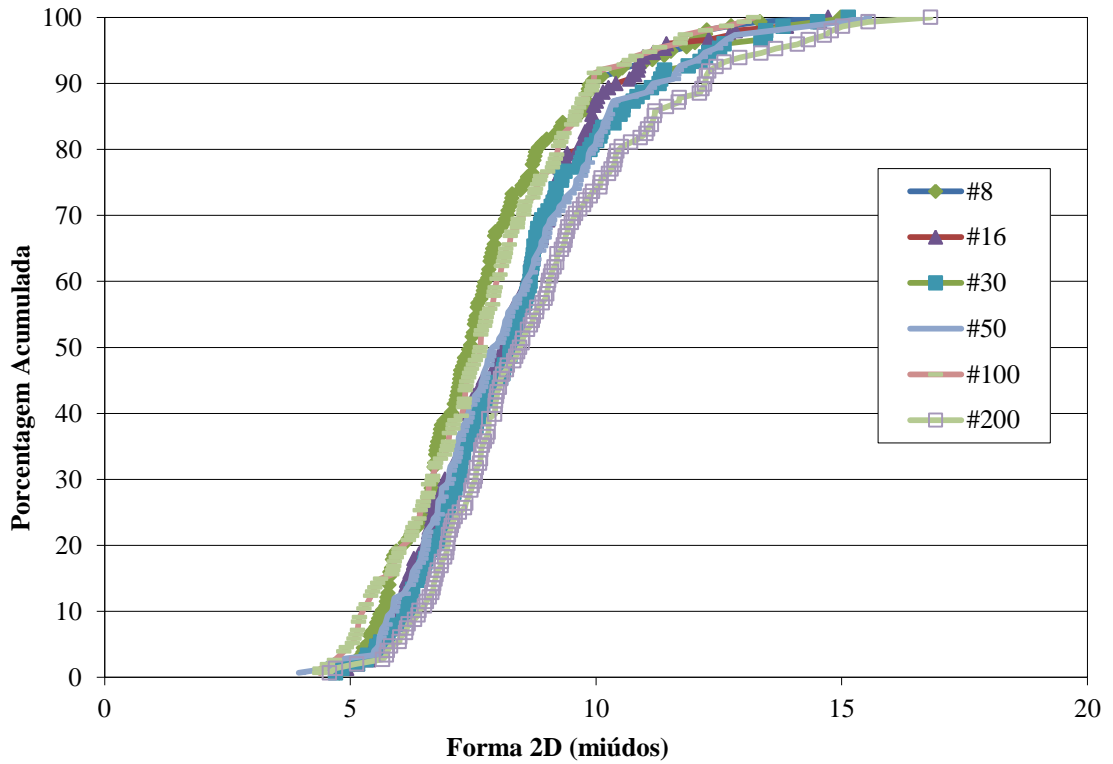


Figura 11 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 3 (areia grossa)

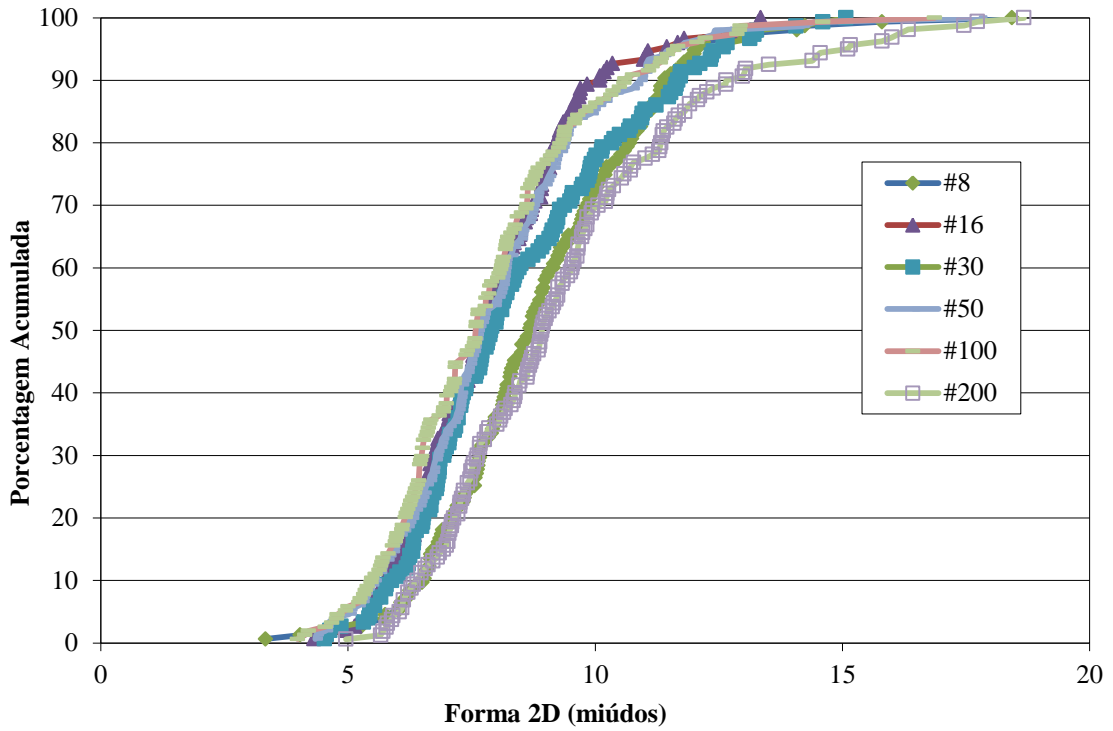


Figura 12 – Distribuição da propriedade de Forma 2D – agregado 3 (areia fina)

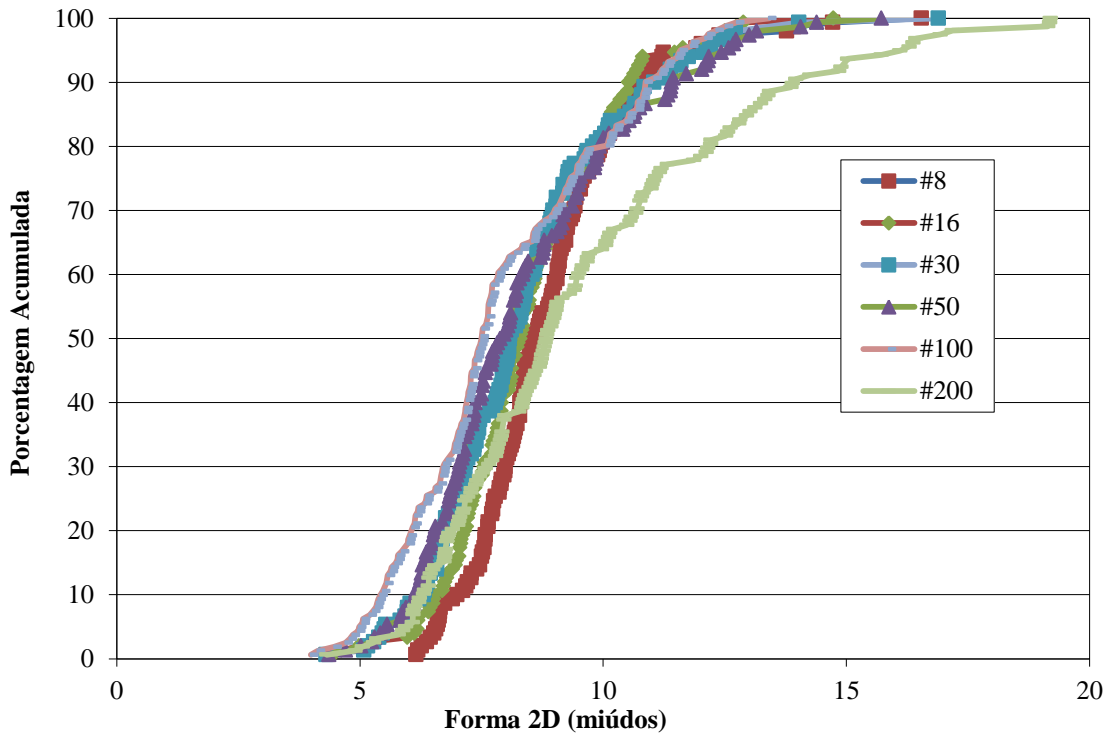


Figura 13 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 1 (19mm)

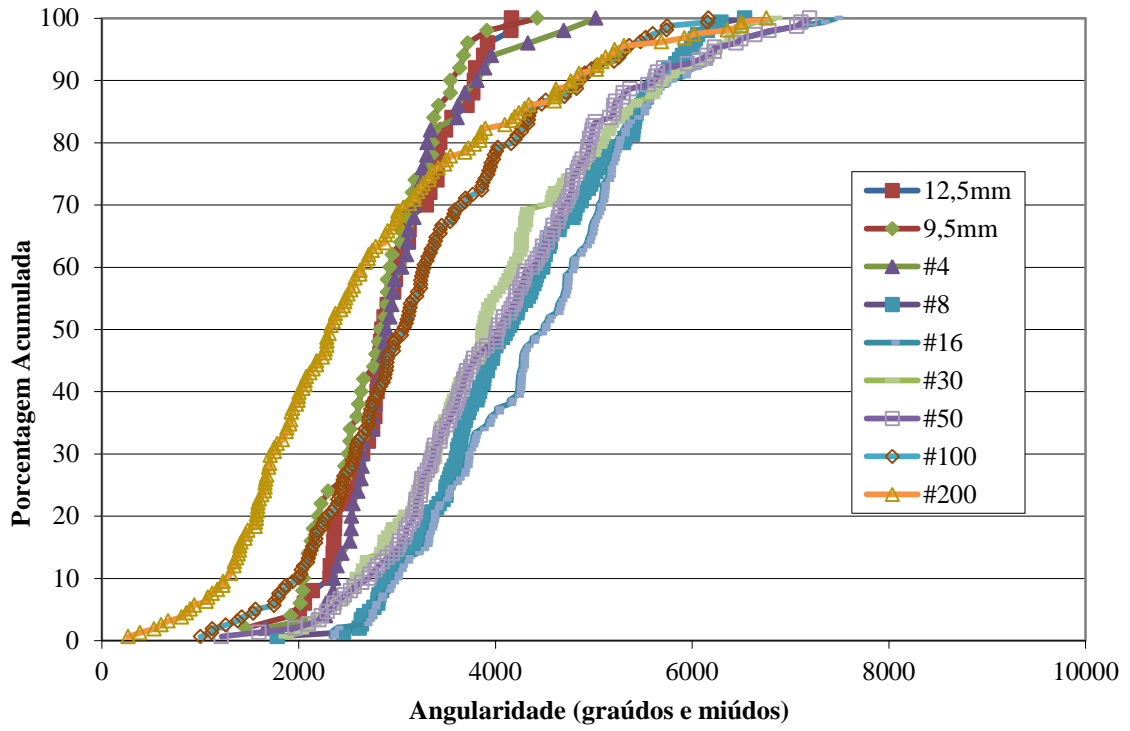


Figura 14 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 1 (9,5mm)

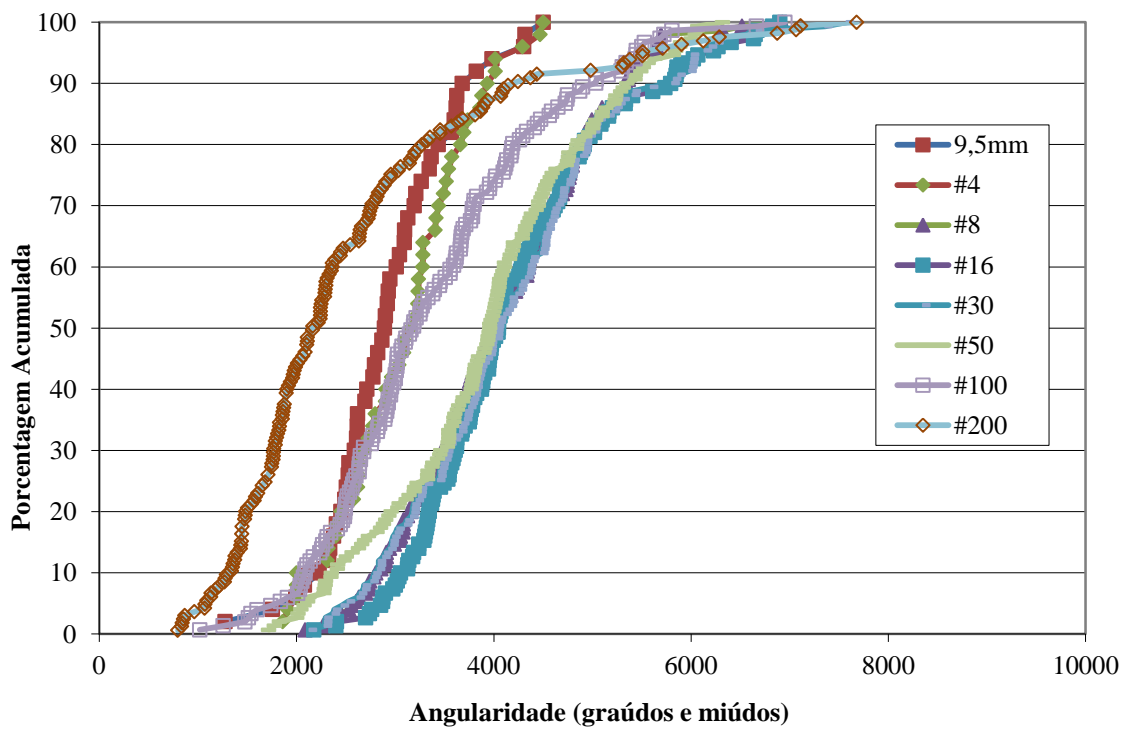


Figura 15 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 1 (pó de pedra)

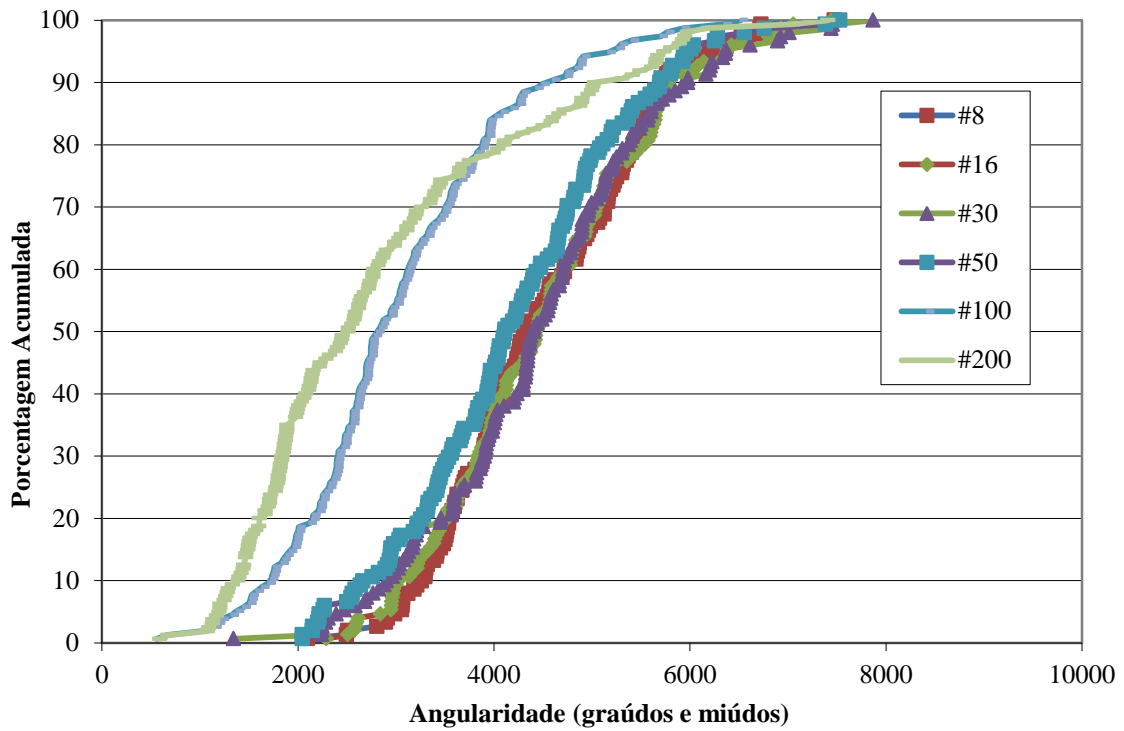


Figura 16 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 2 (19mm)

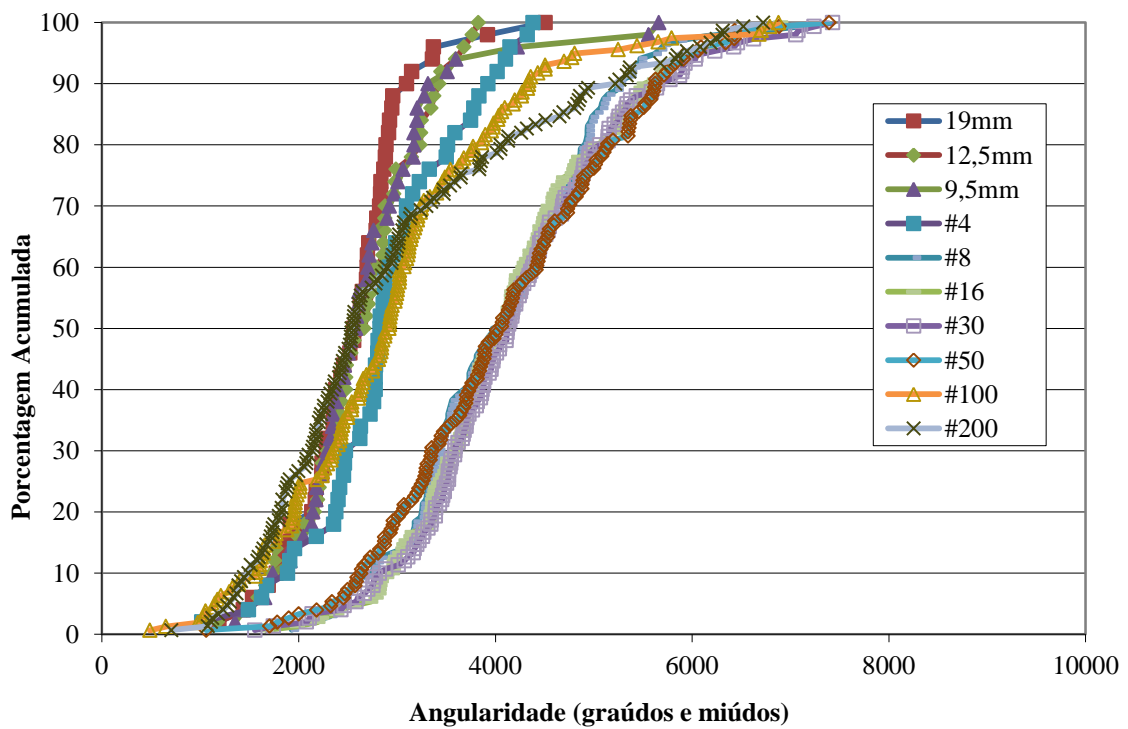


Figura 17 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 2 (12,5mm)

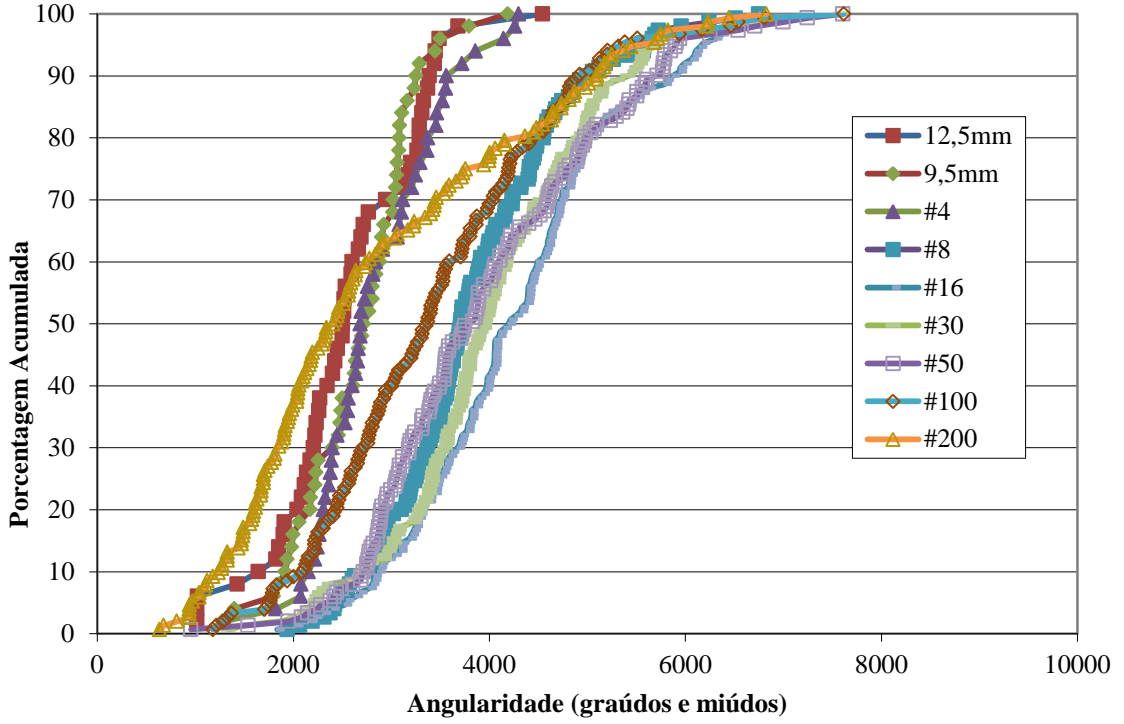


Figura 18 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 2 (9,5mm)

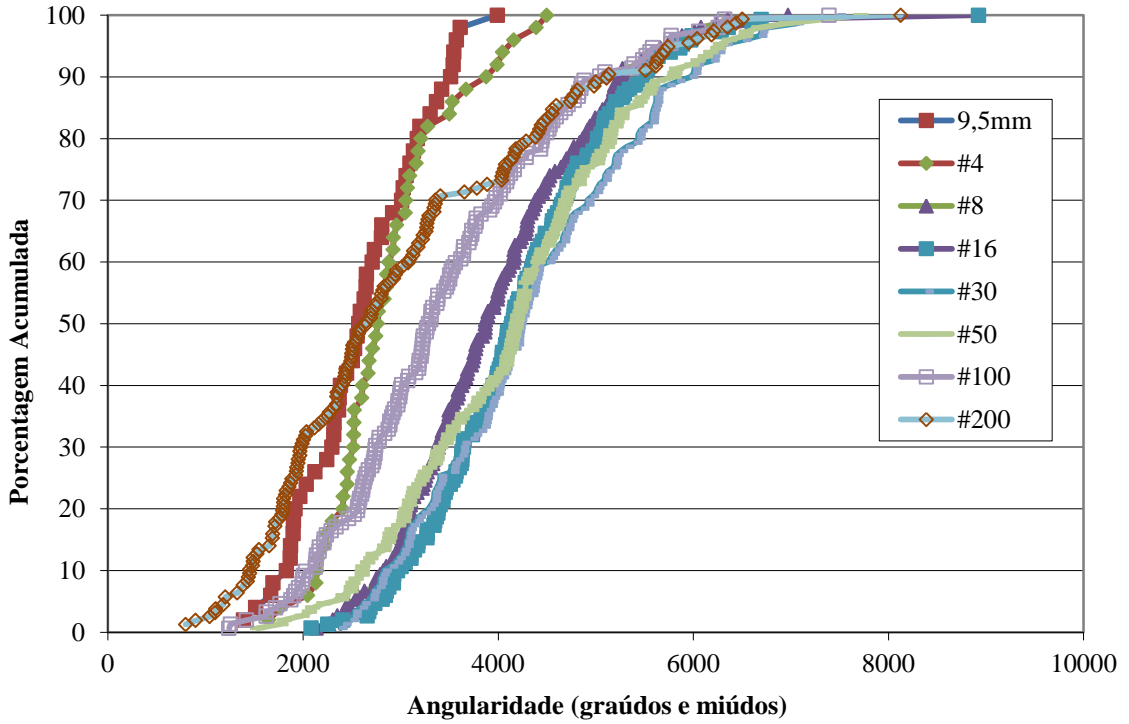


Figura 19 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 2 (pó de pedra)

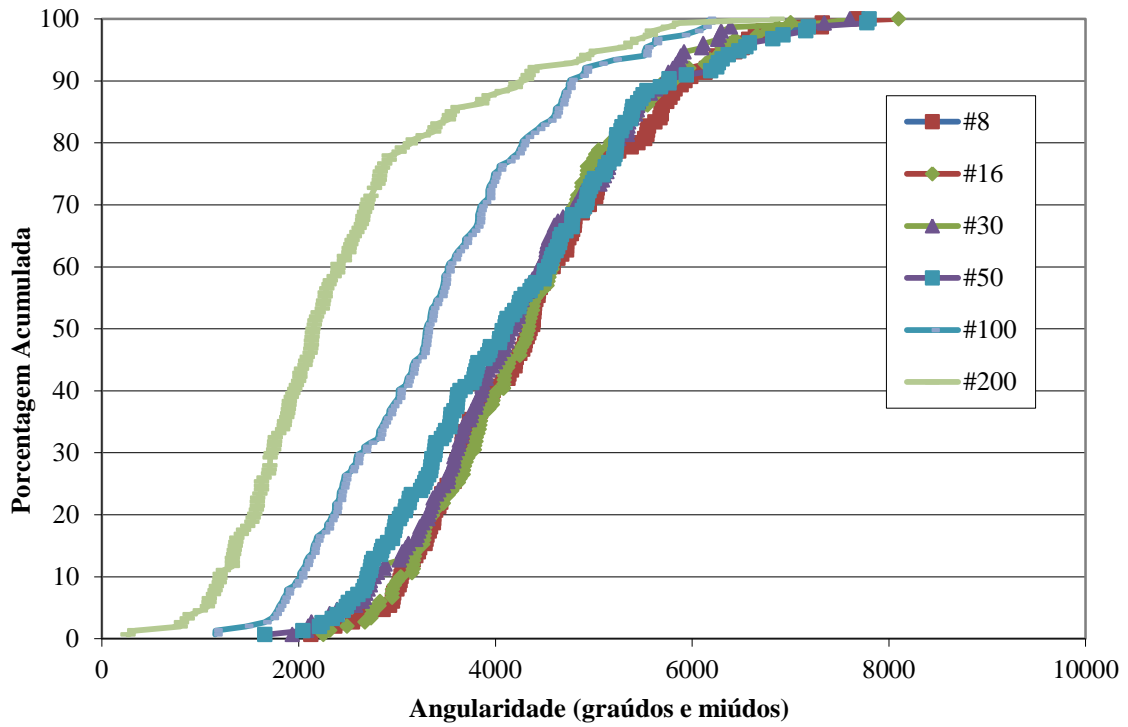


Figura 20 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 3 (25mm)

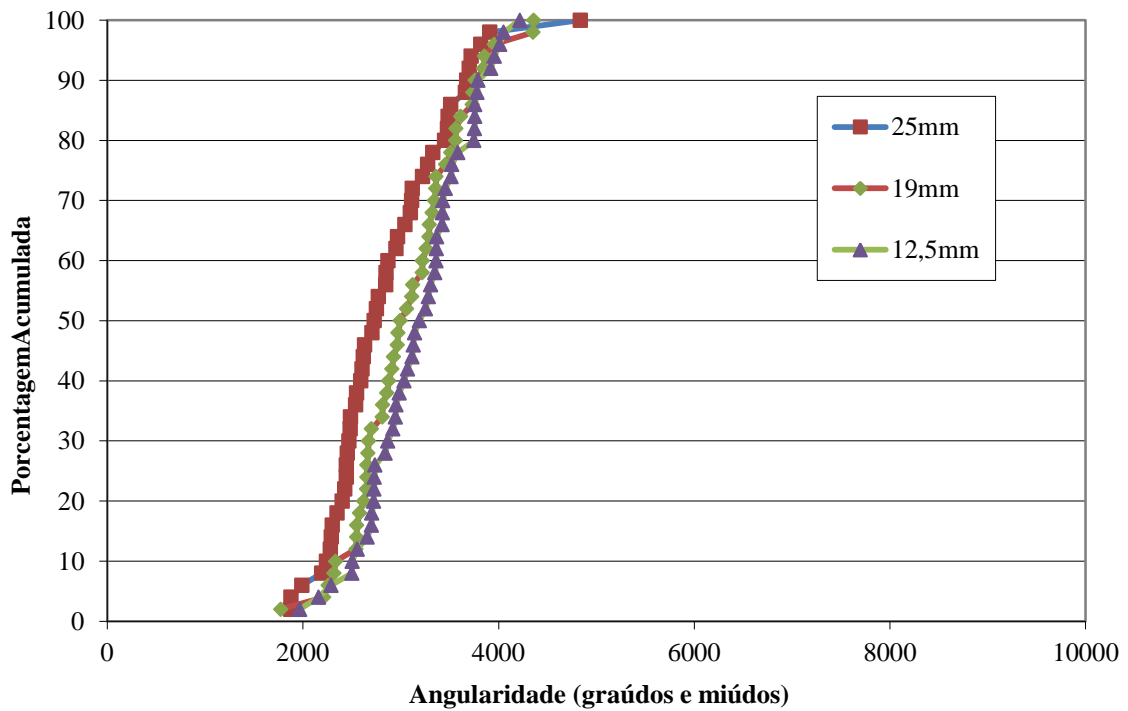


Figura 21 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 3 (12,5mm)

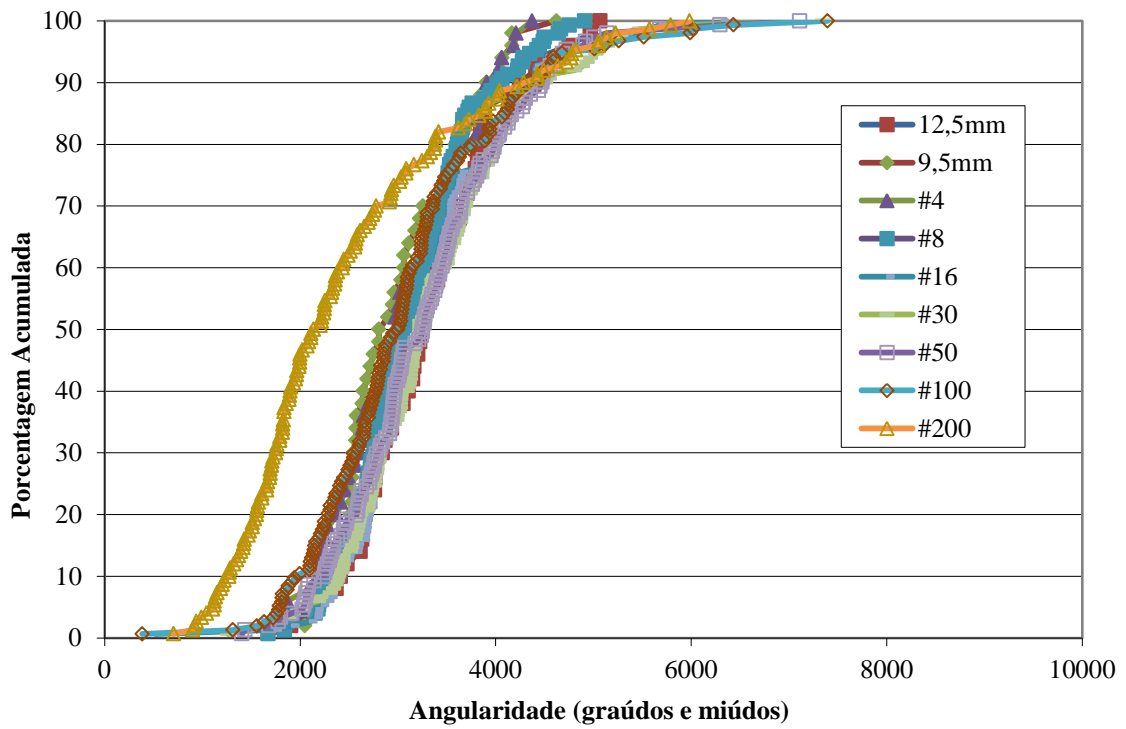


Figura 22 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 3 (9,5mm)

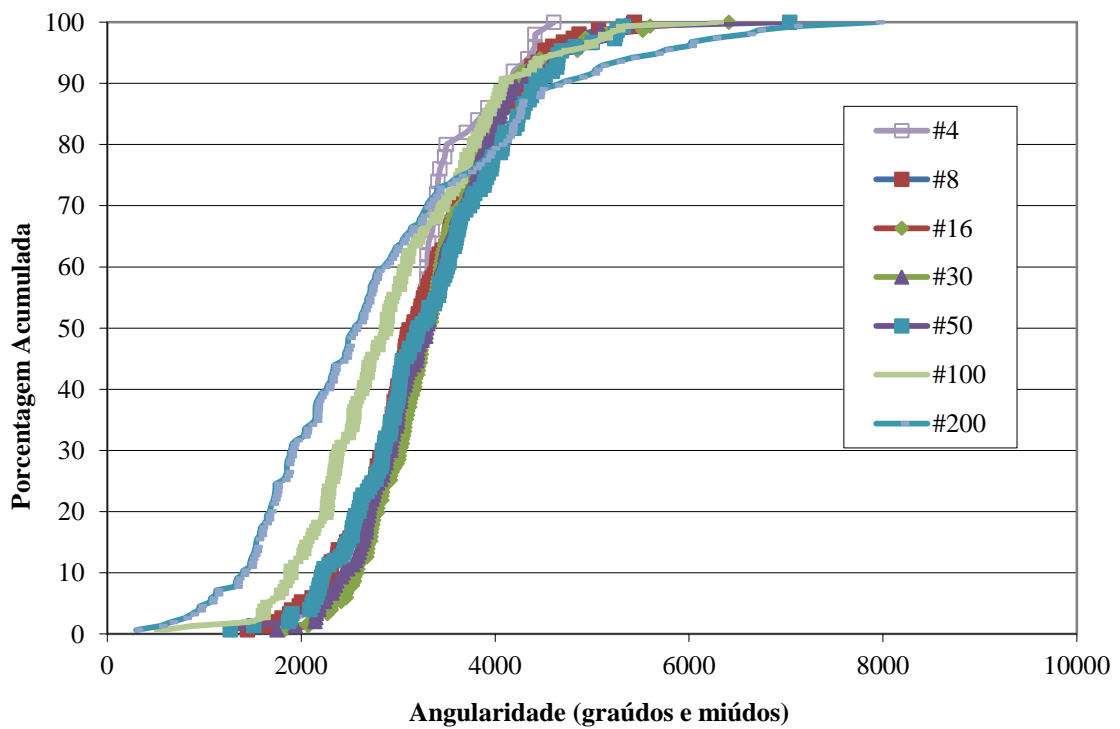


Figura 23 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 3 (4,75mm)

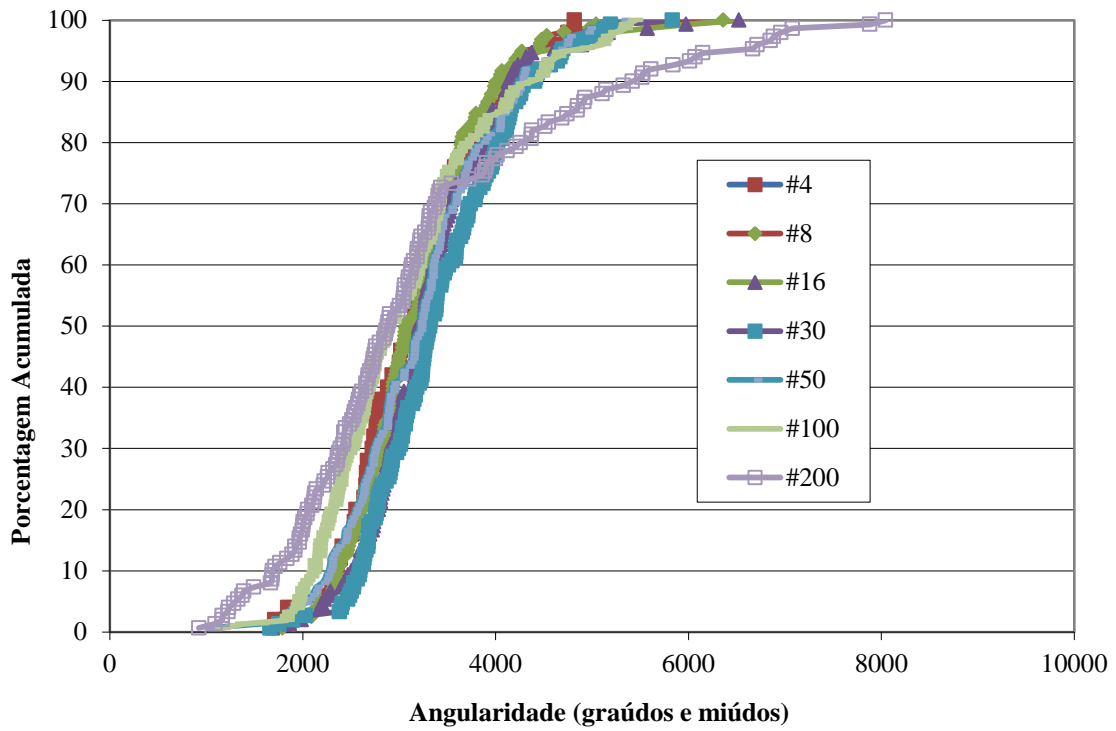


Figura 24 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 3 (areia grossa)

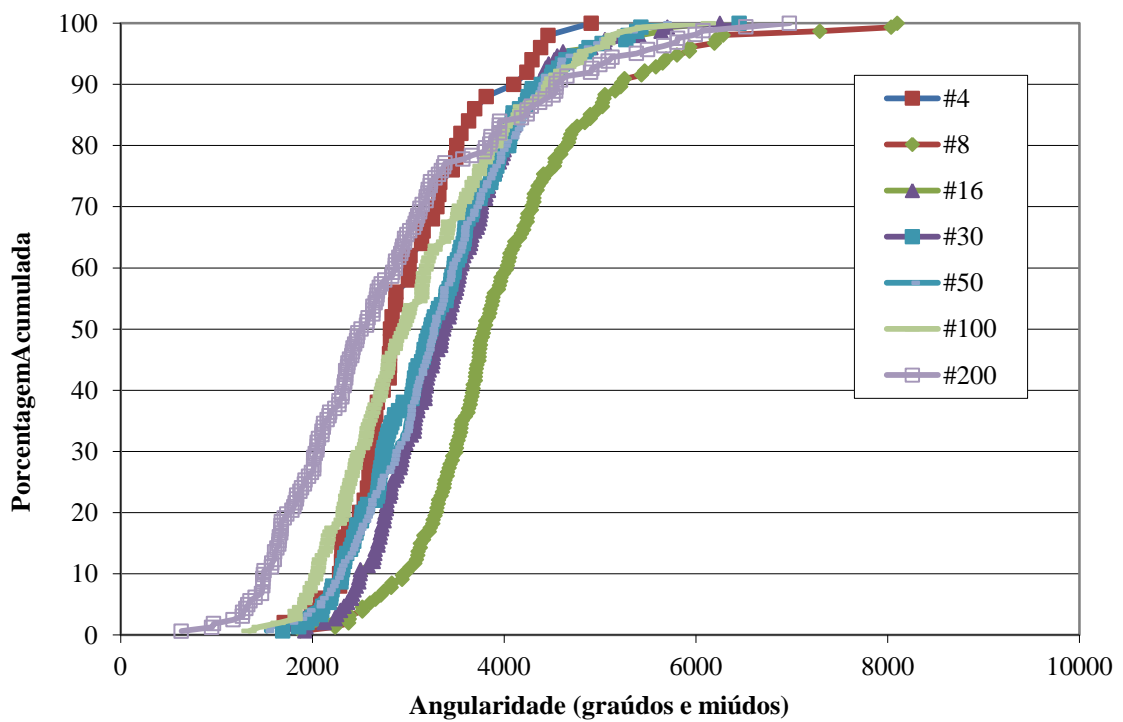


Figura 25 – Distribuição da propriedade de Angularidade – agregado 3 (areia fina)

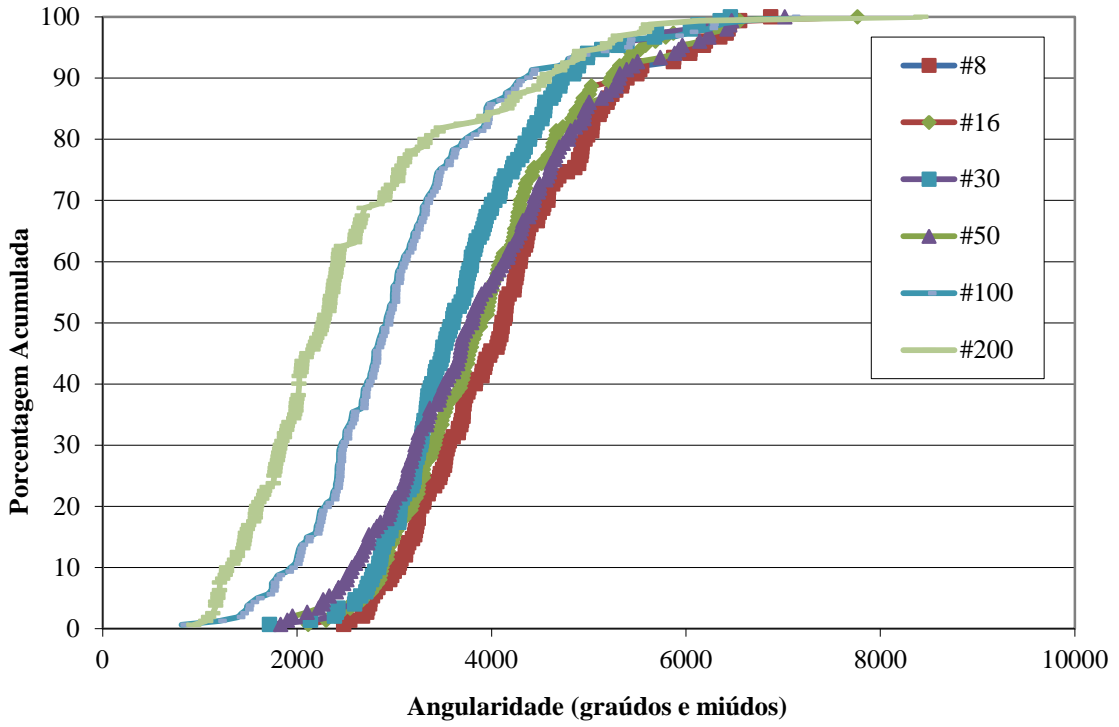


Figura 26 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 1 (19mm)

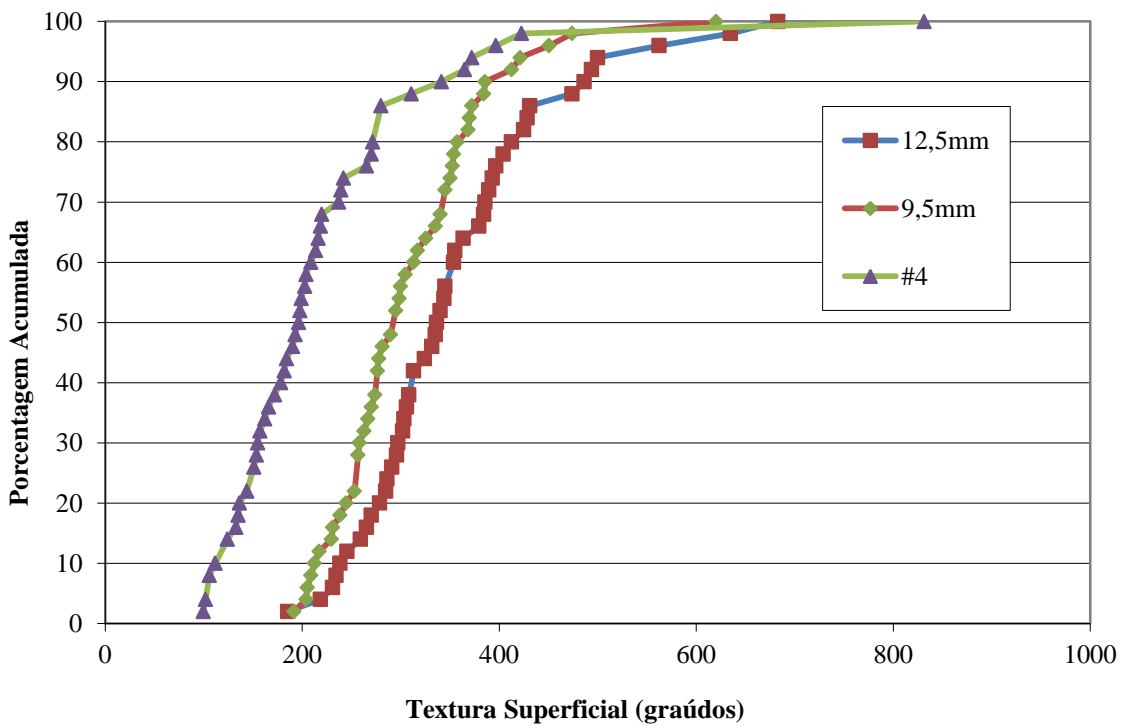


Figura 27 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 1 (9,5mm)

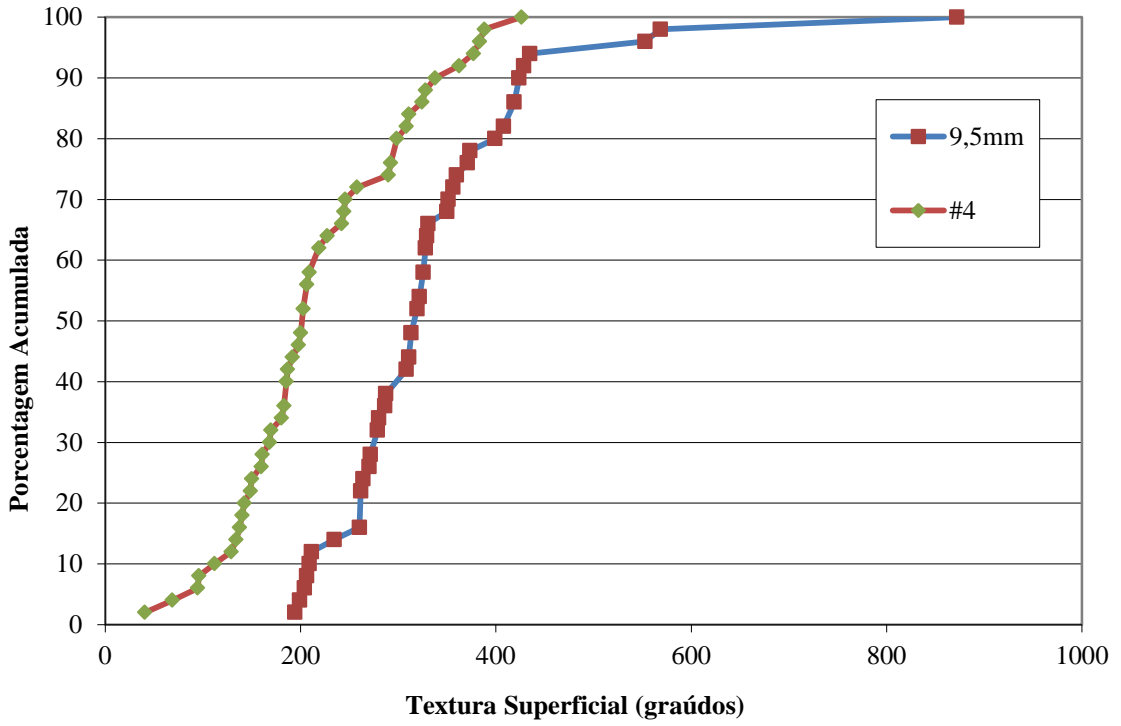


Figura 28 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 2 (19mm)

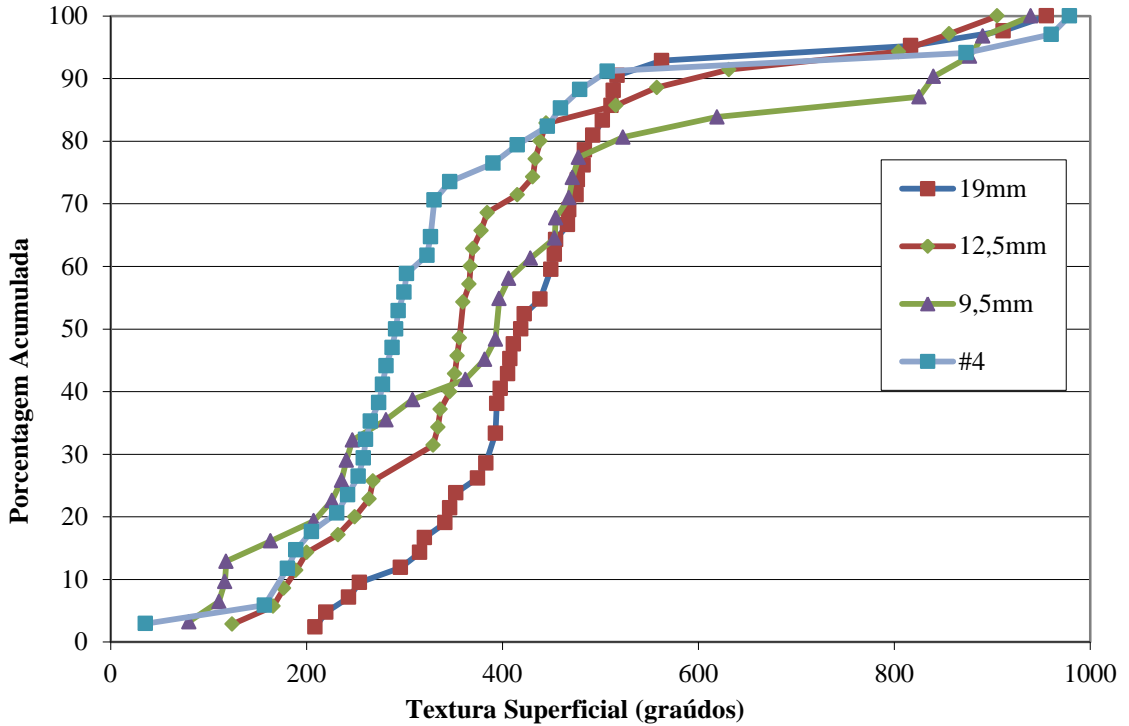


Figura 29 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 2 (12,5mm)

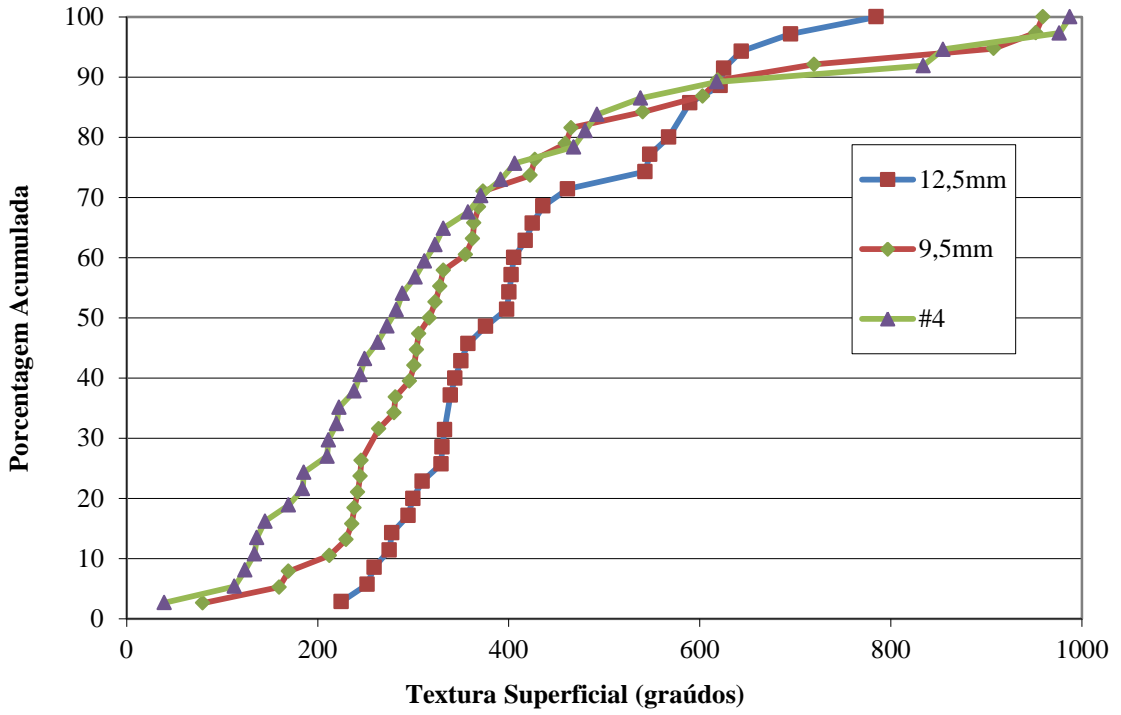


Figura 30 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 2 (9,5mm)

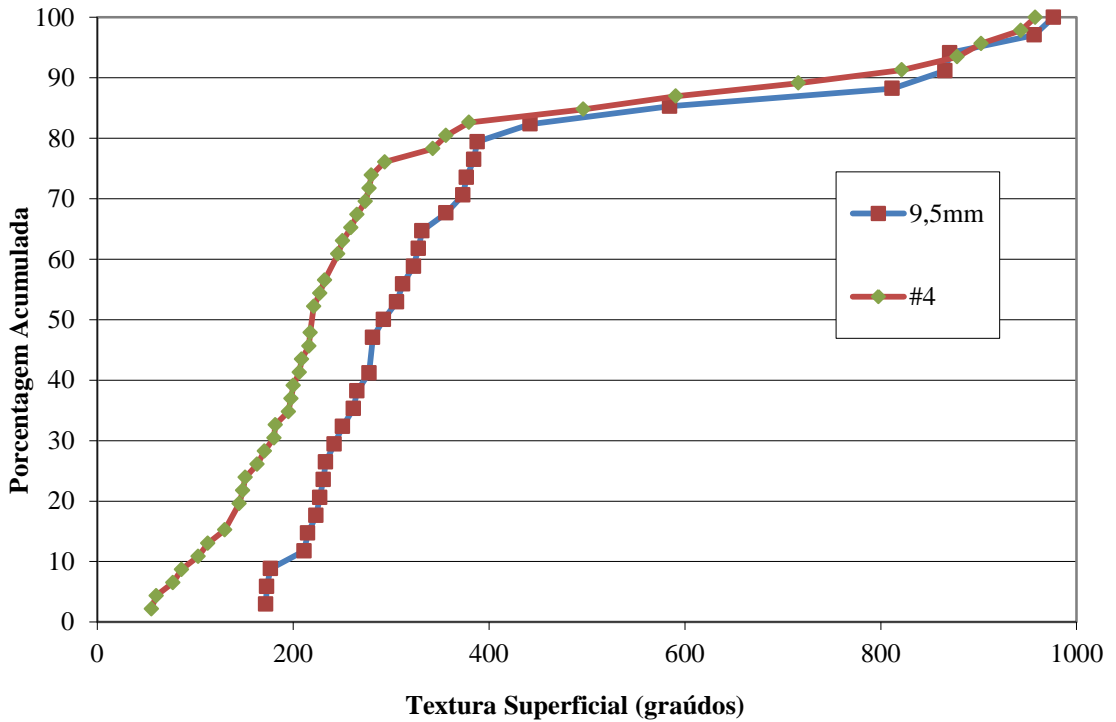


Figura 31 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 3 (25mm)

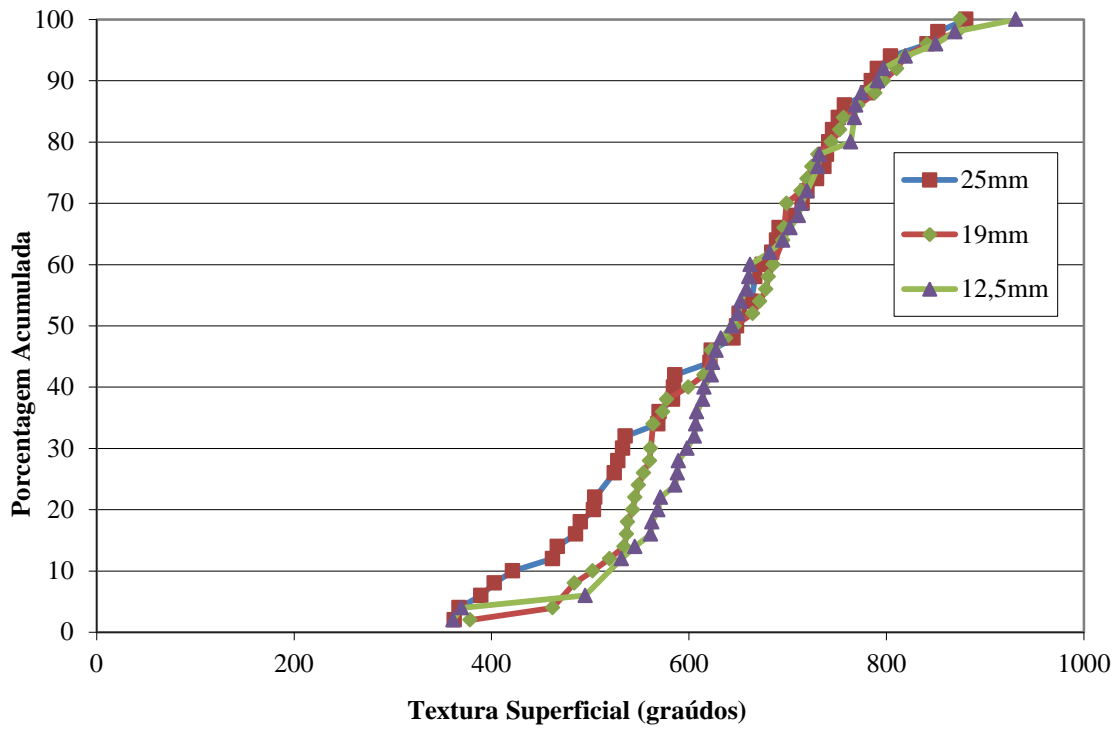


Figura 32 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 3 (12,5mm)

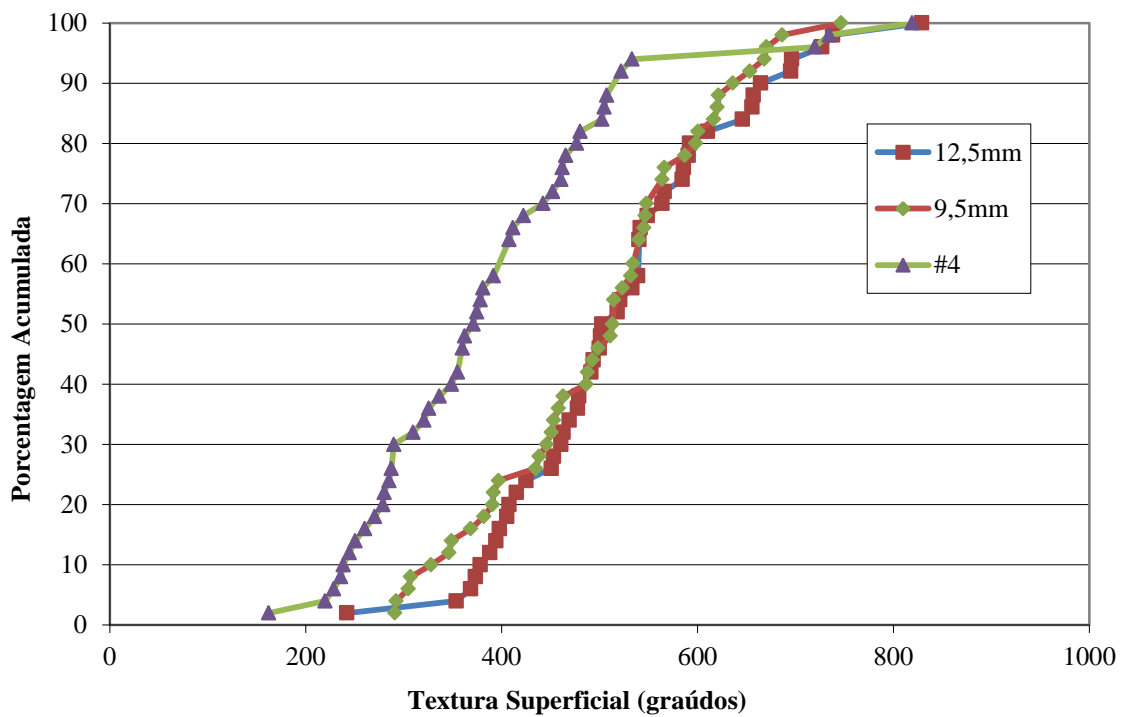


Figura 33 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 3 (9,5mm)

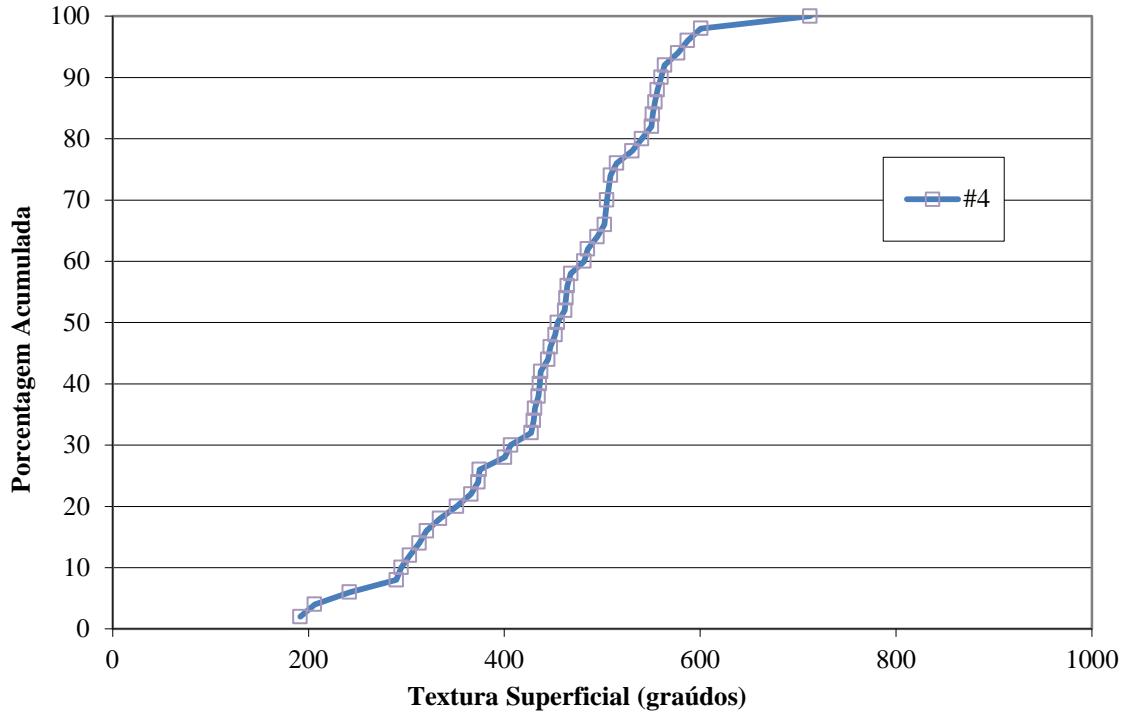


Figura 34 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 3 (4,75mm)

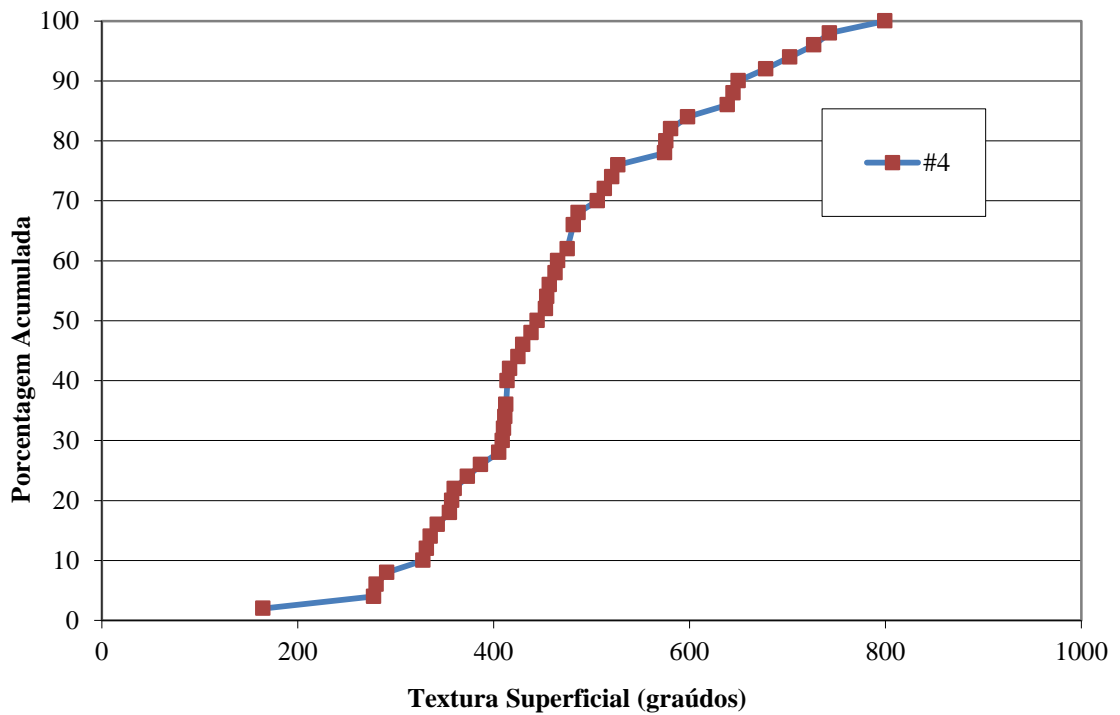


Figura 35 – Distribuição da propriedade de Textura Superficial – agregado 3 (areia grossa)

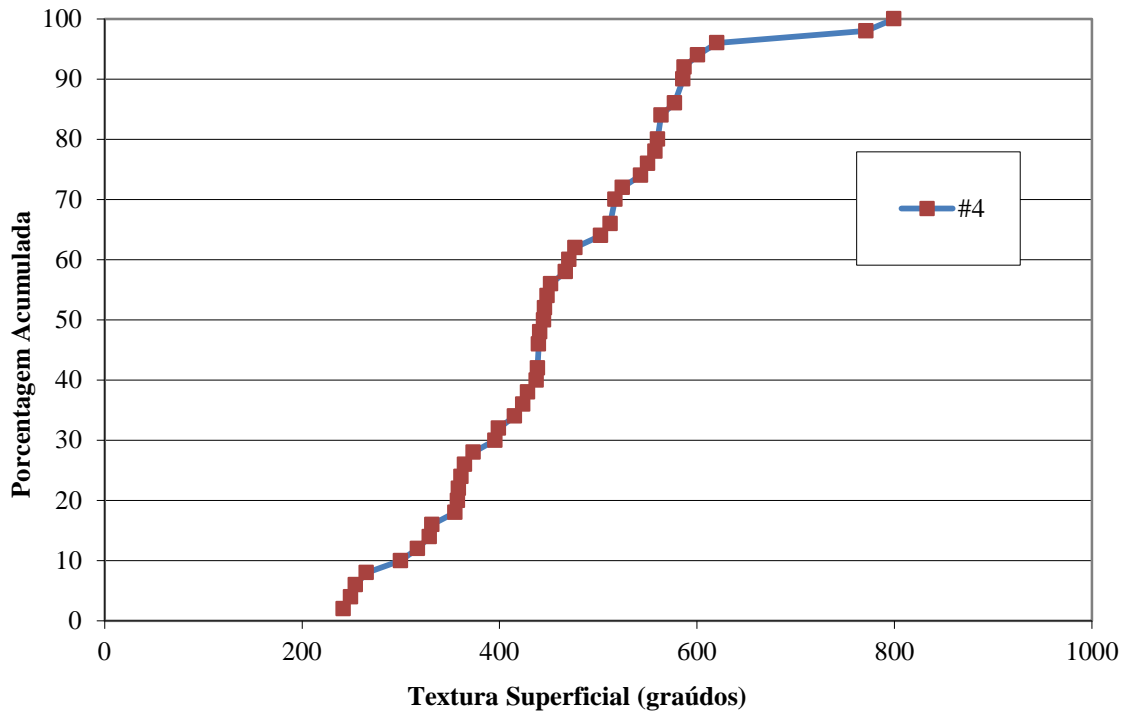


Figura 36 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 1 (19mm)

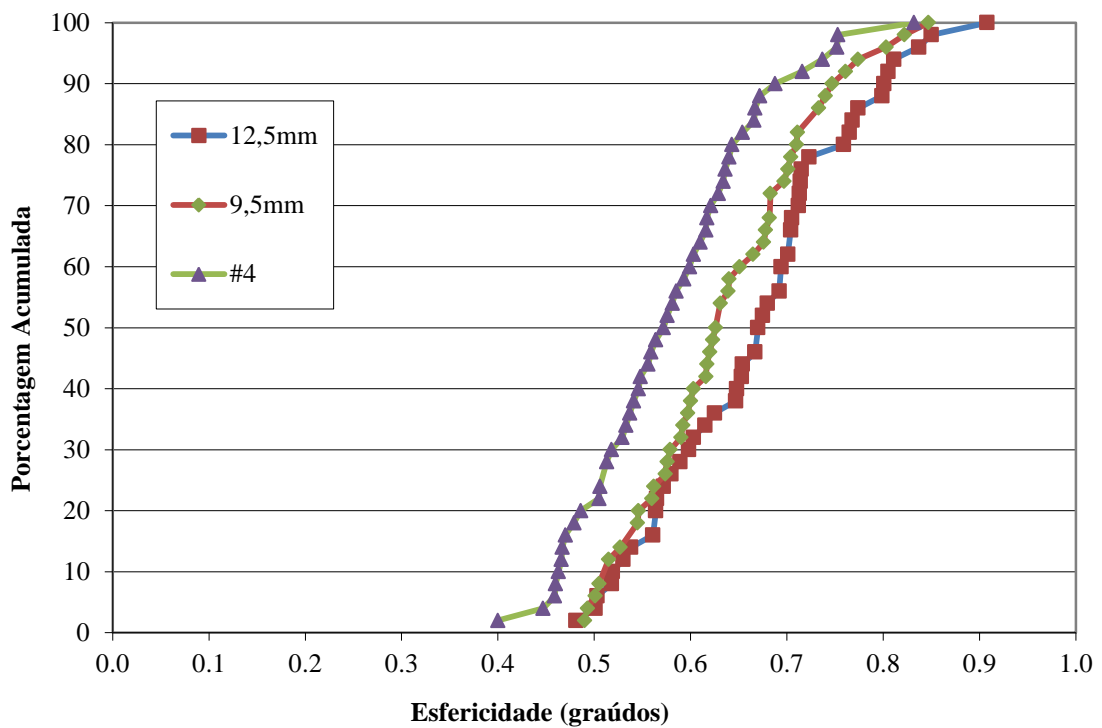


Figura 37 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 1 (9,5mm)

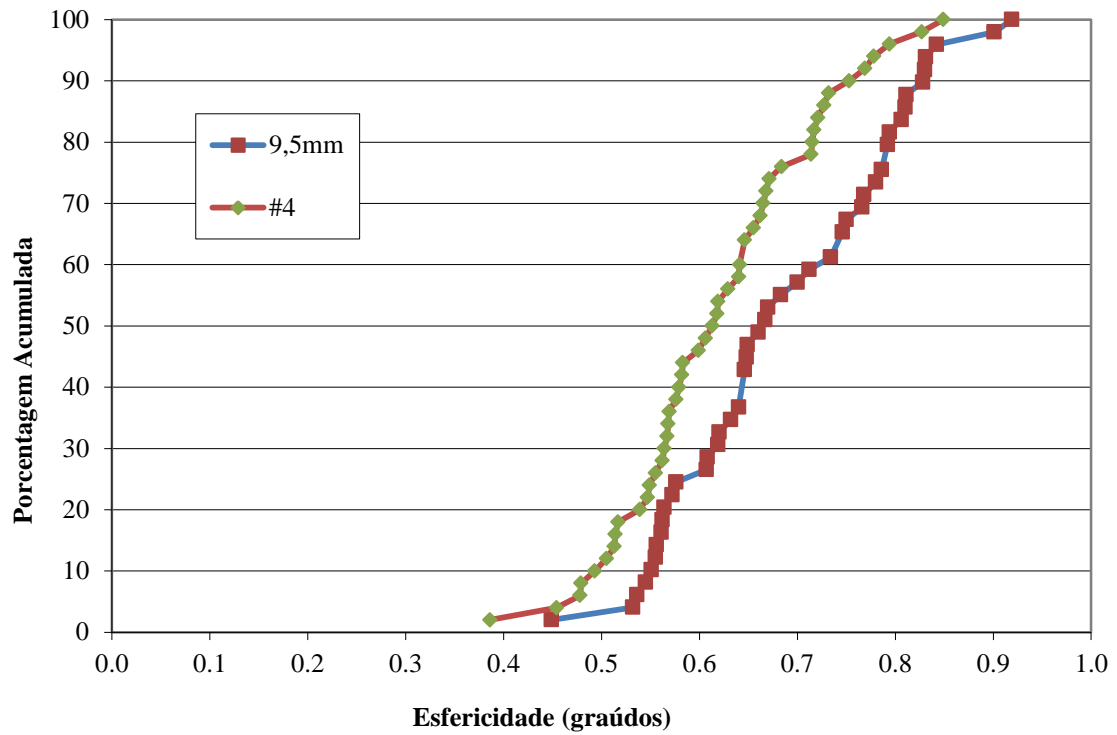


Figura 38 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 2 (19mm)

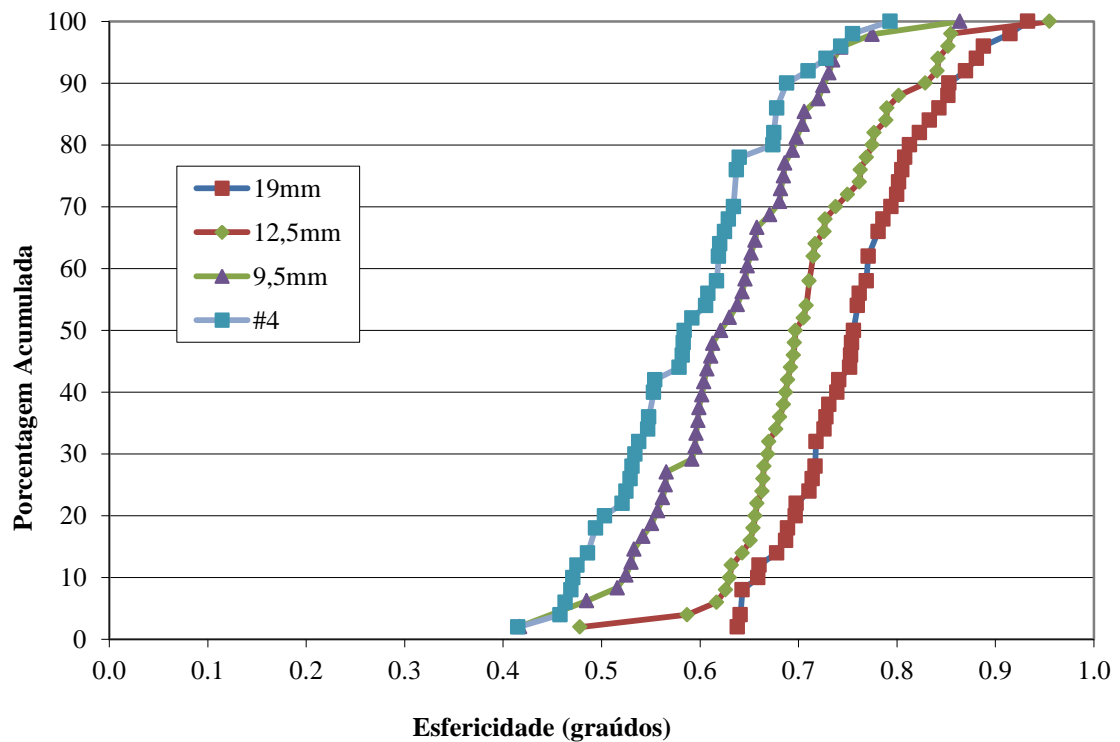


Figura 39 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 2 (12,5mm)

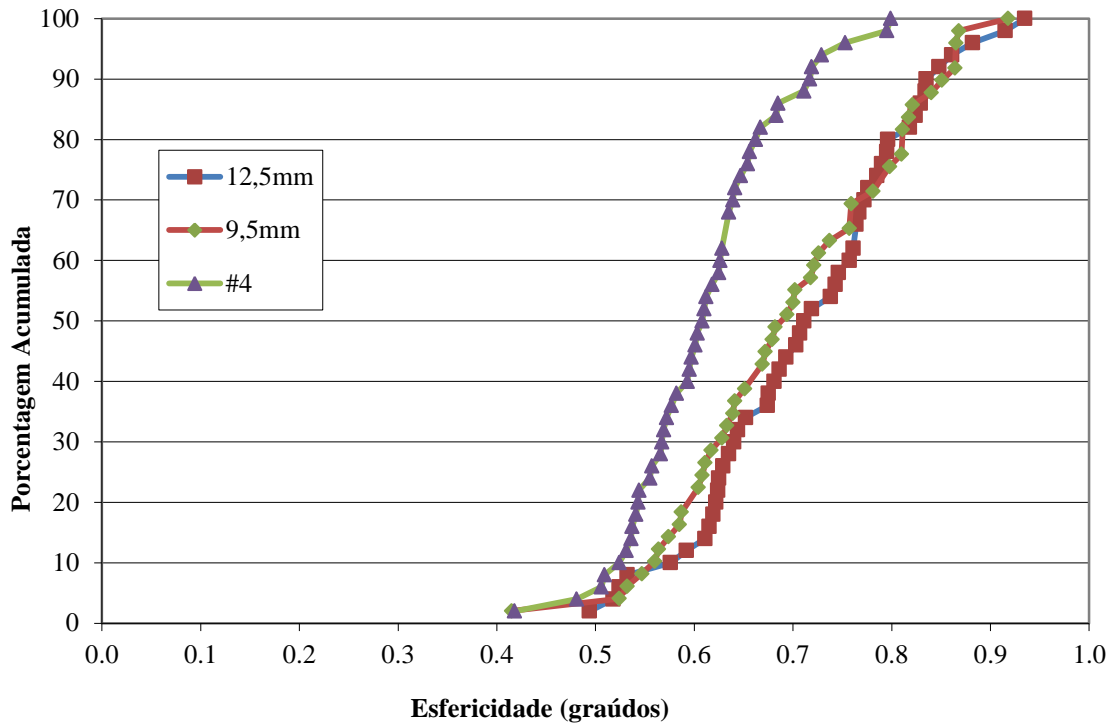


Figura 40 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 2 (9,5mm)

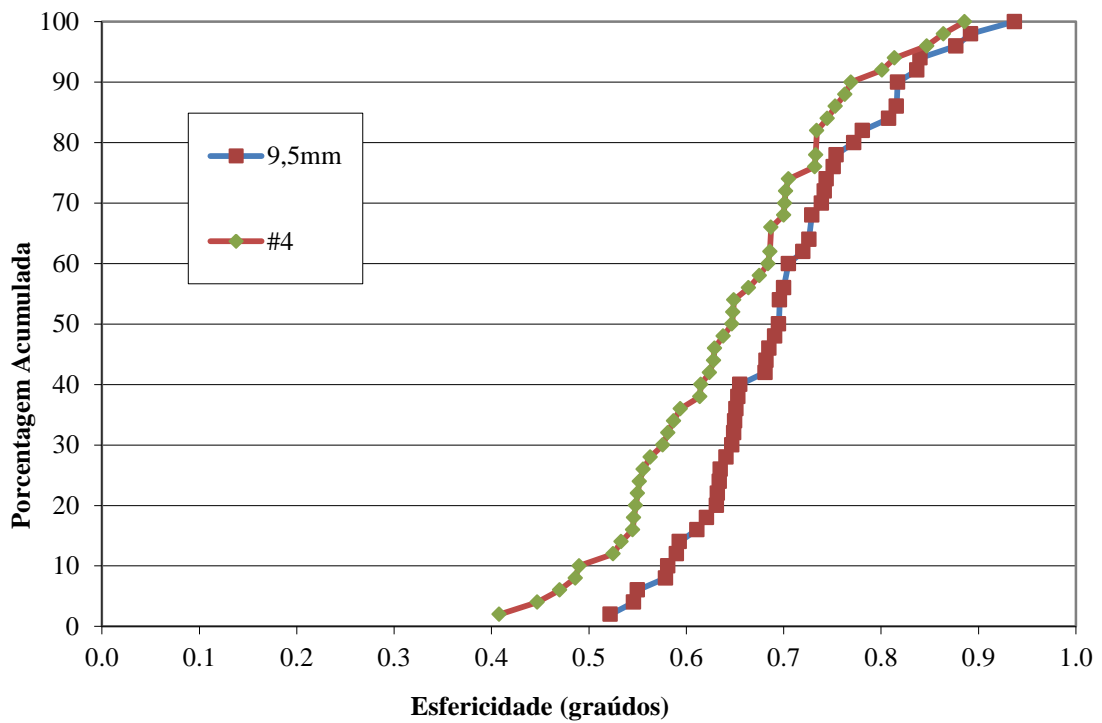


Figura 41 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (25mm)

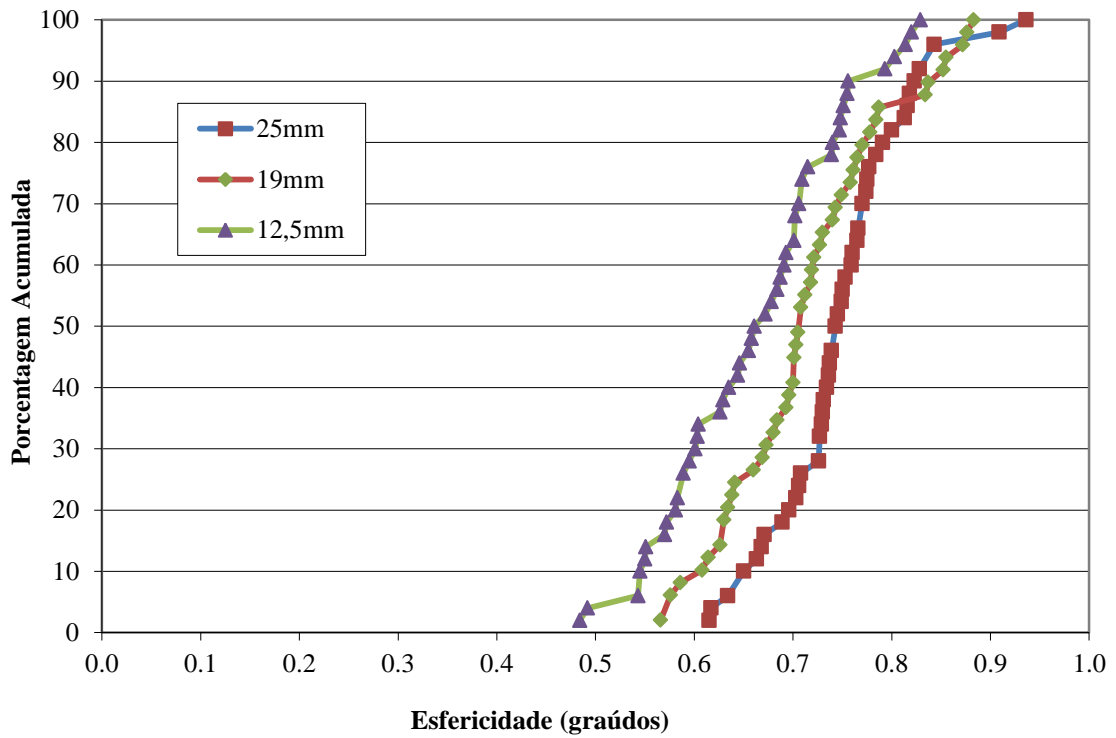


Figura 42 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (12,5mm)

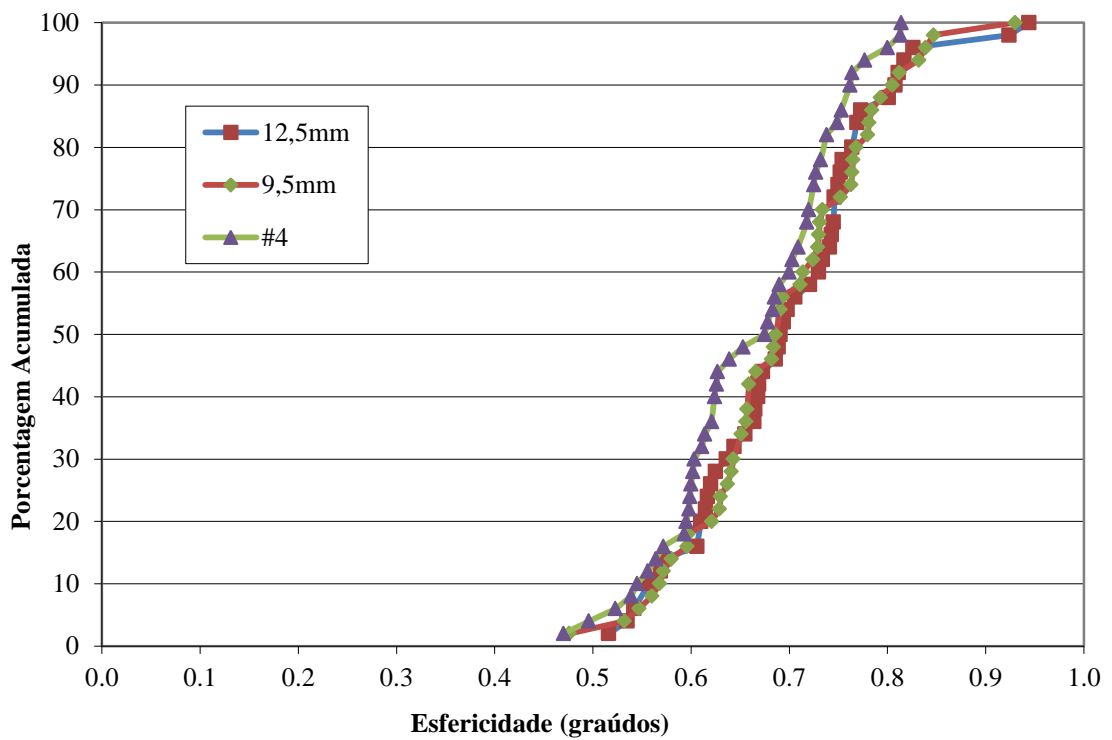


Figura 43 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (9,5mm)

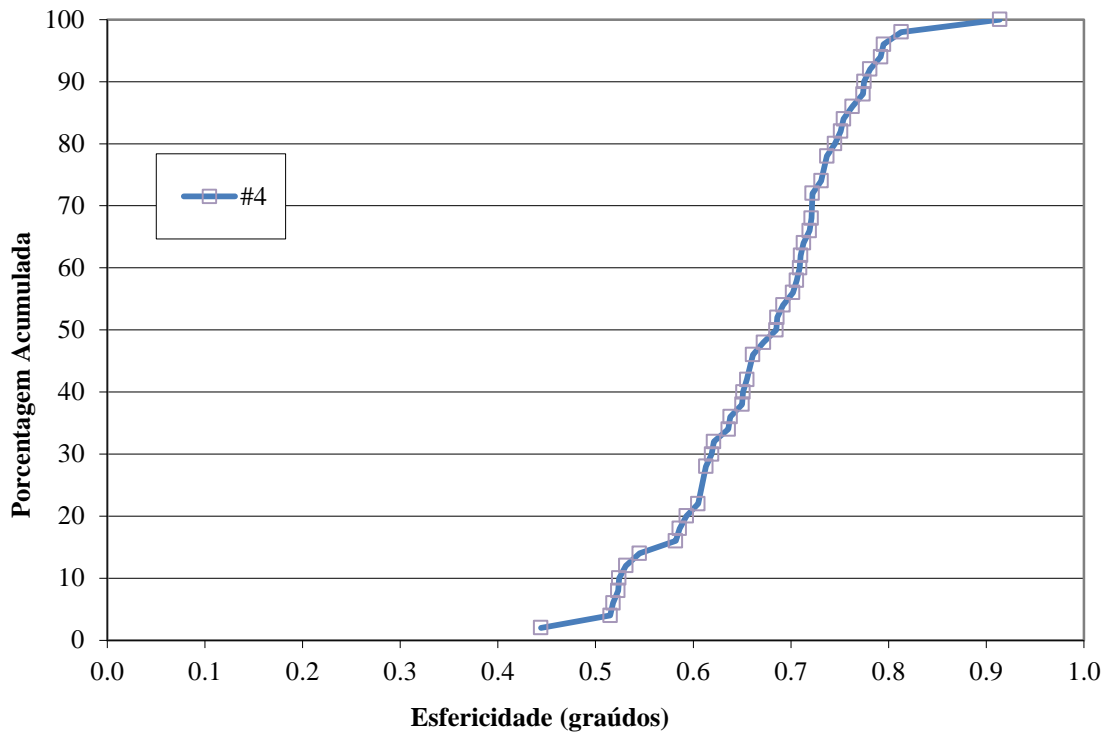


Figura 44 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (4,75mm)

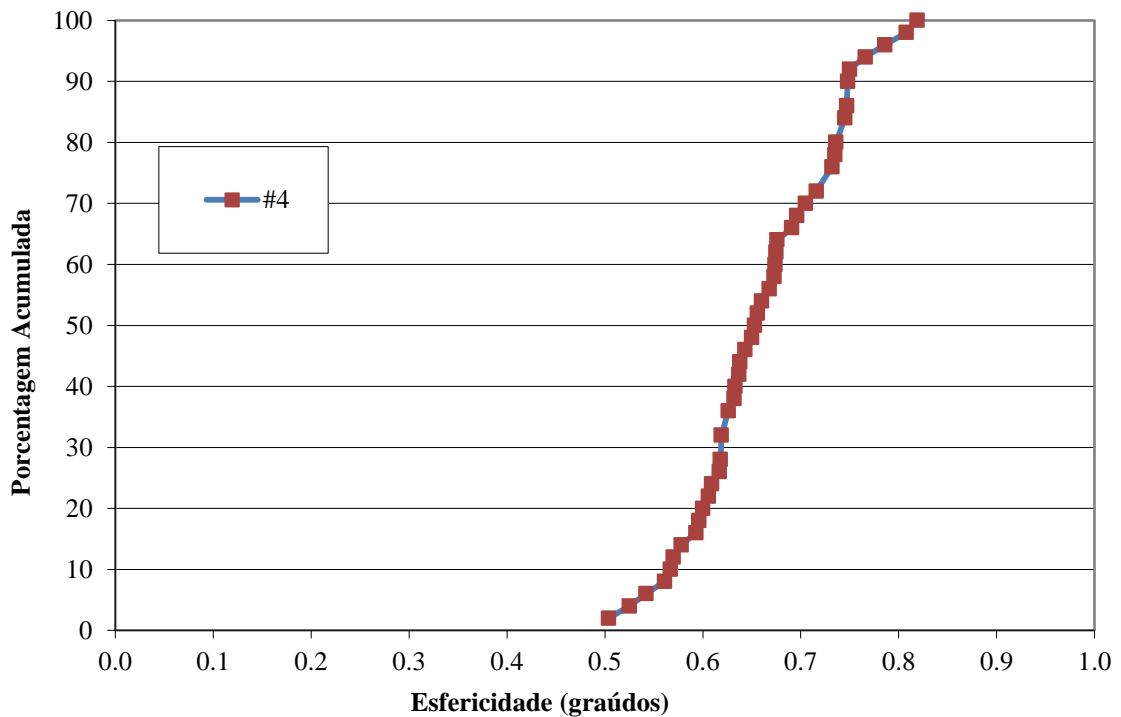


Figura 45 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (areia grossa)

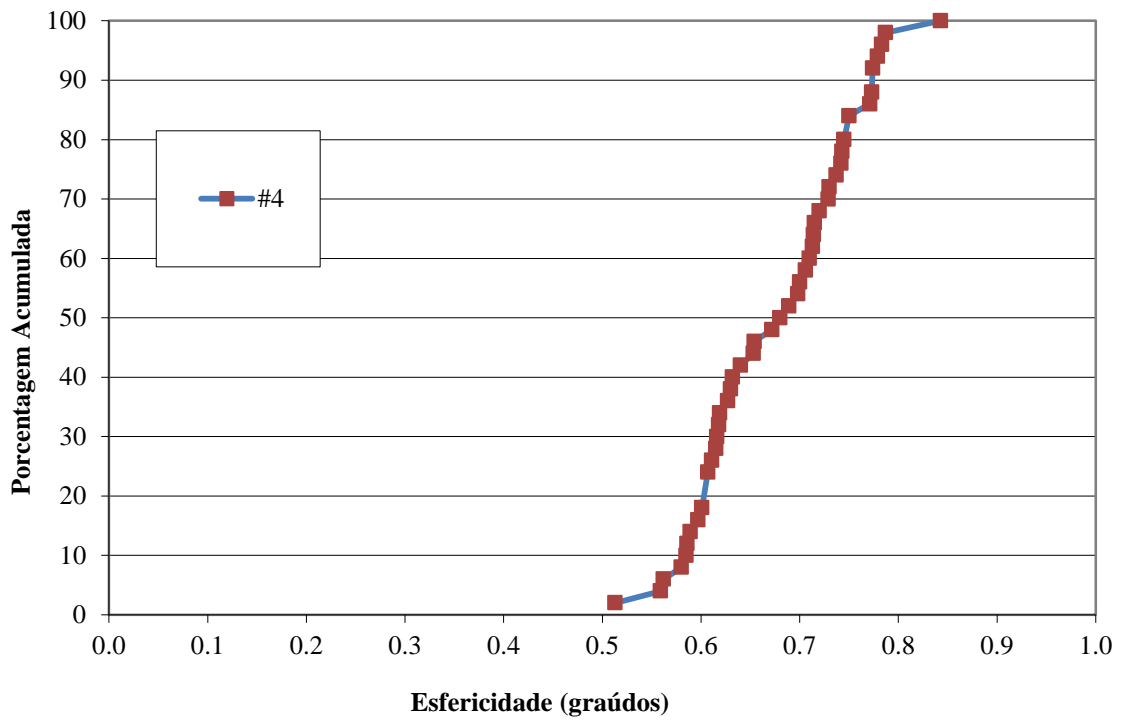


Figura 46 – Distribuição da propriedade de Lamelaridade – agregado 1 (19mm)

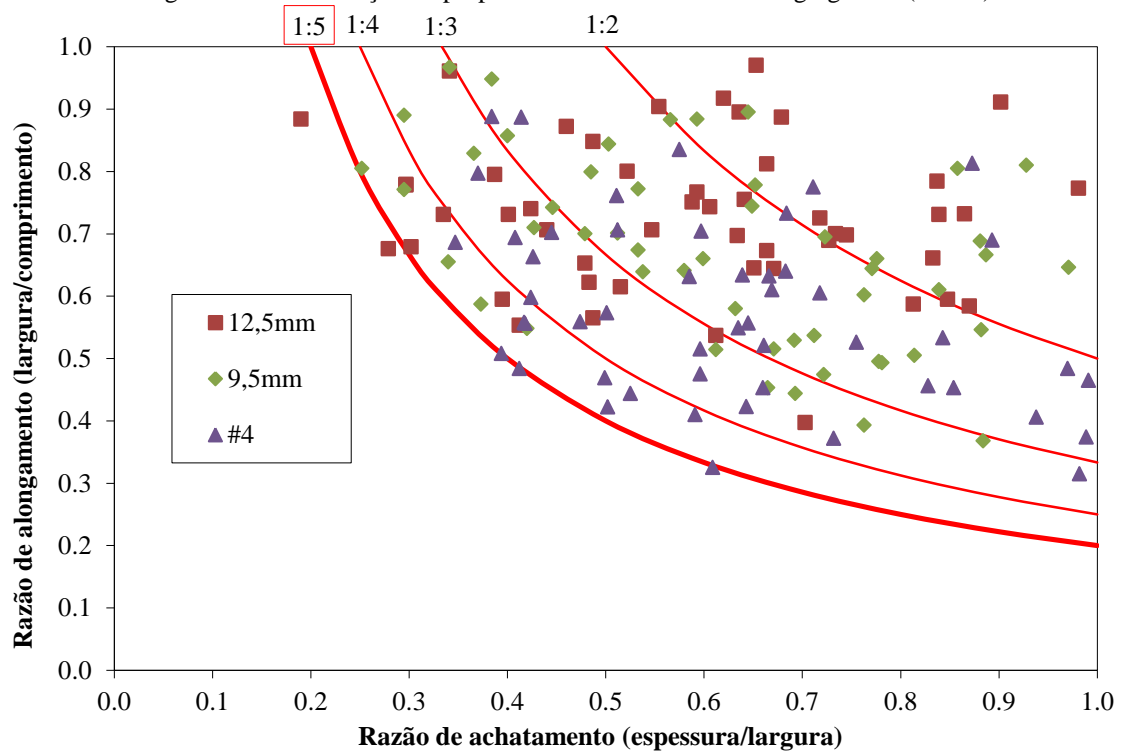


Figura 47 – Distribuição da propriedade de Lamelaridade – agregado 1 (9,5mm)

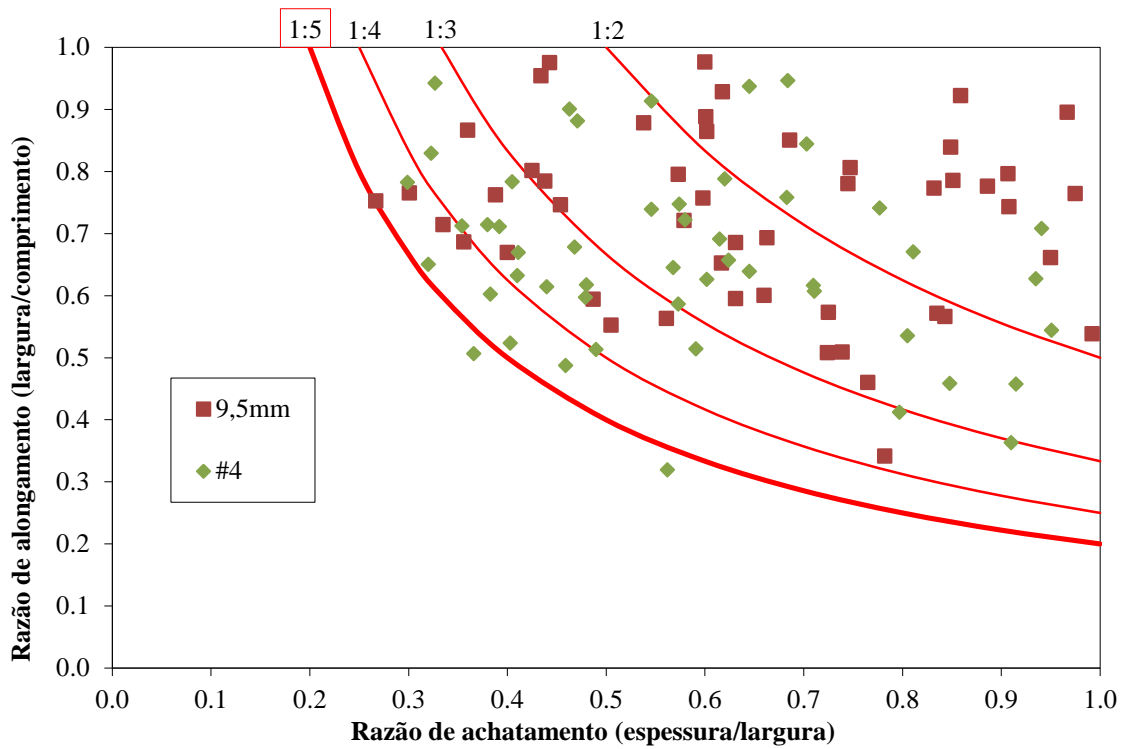


Figura 48 – Distribuição da propriedade de Lamelaridade – agregado 2 (19mm)

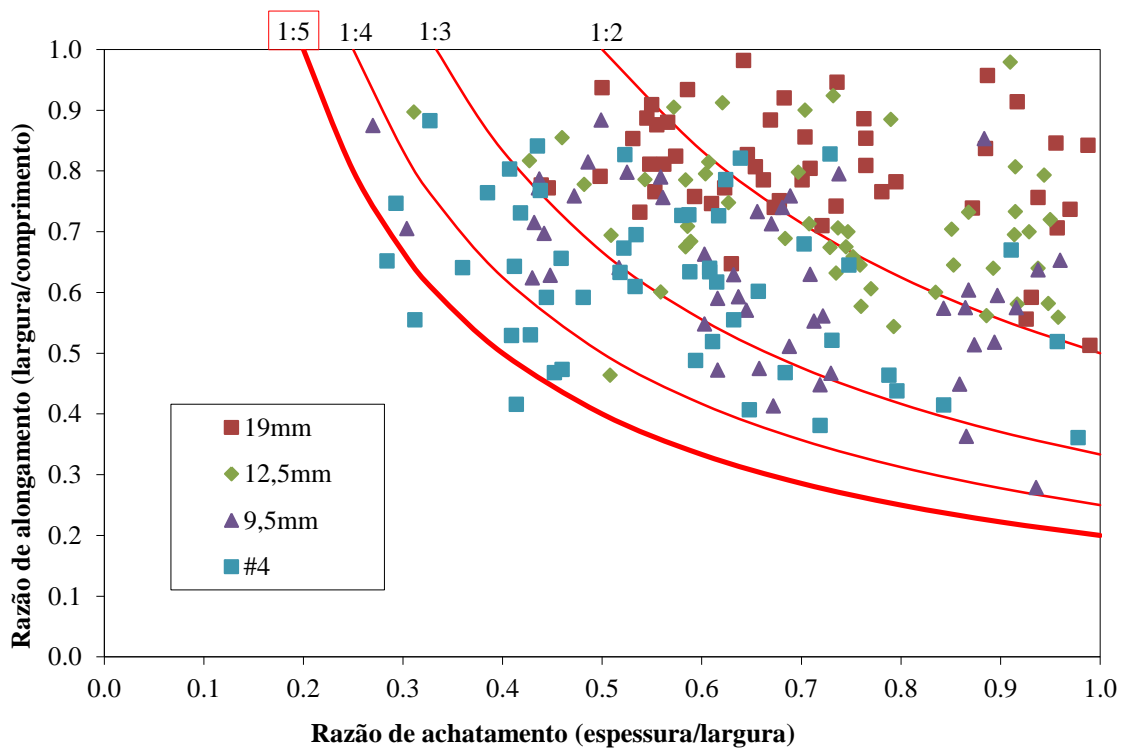


Figura 49 – Distribuição da propriedade de Lamelaridade – agregado 2 (12,5mm)

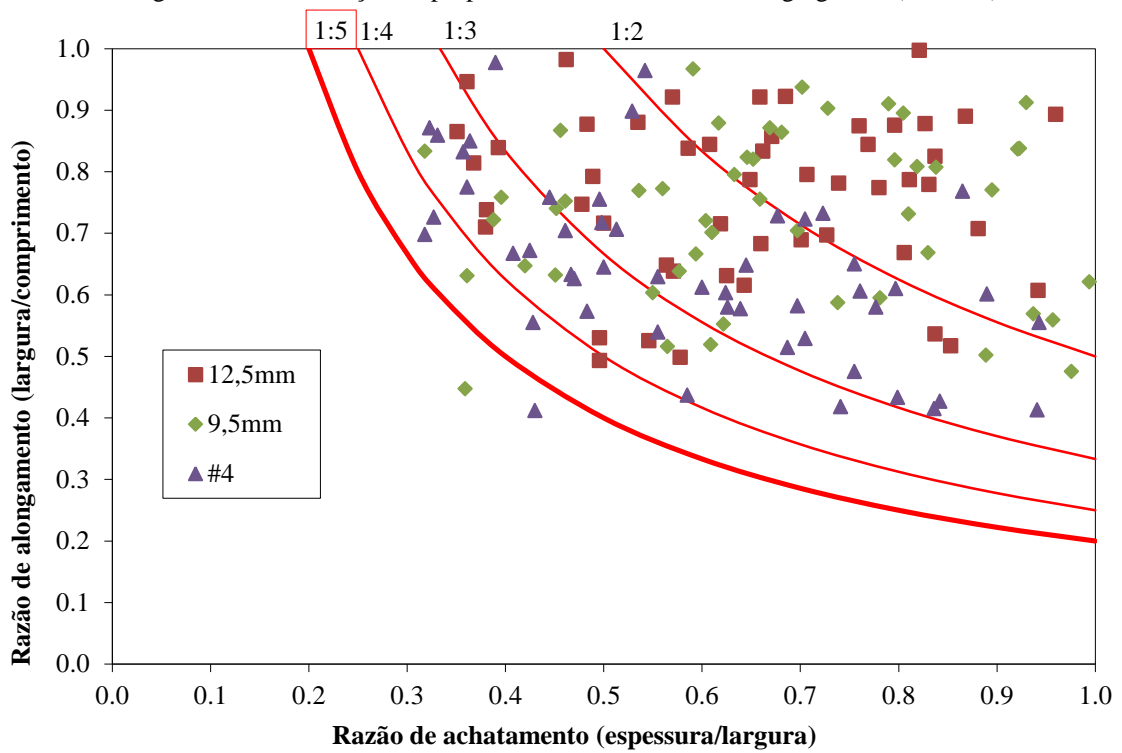


Figura 50 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 2 (9,5mm)

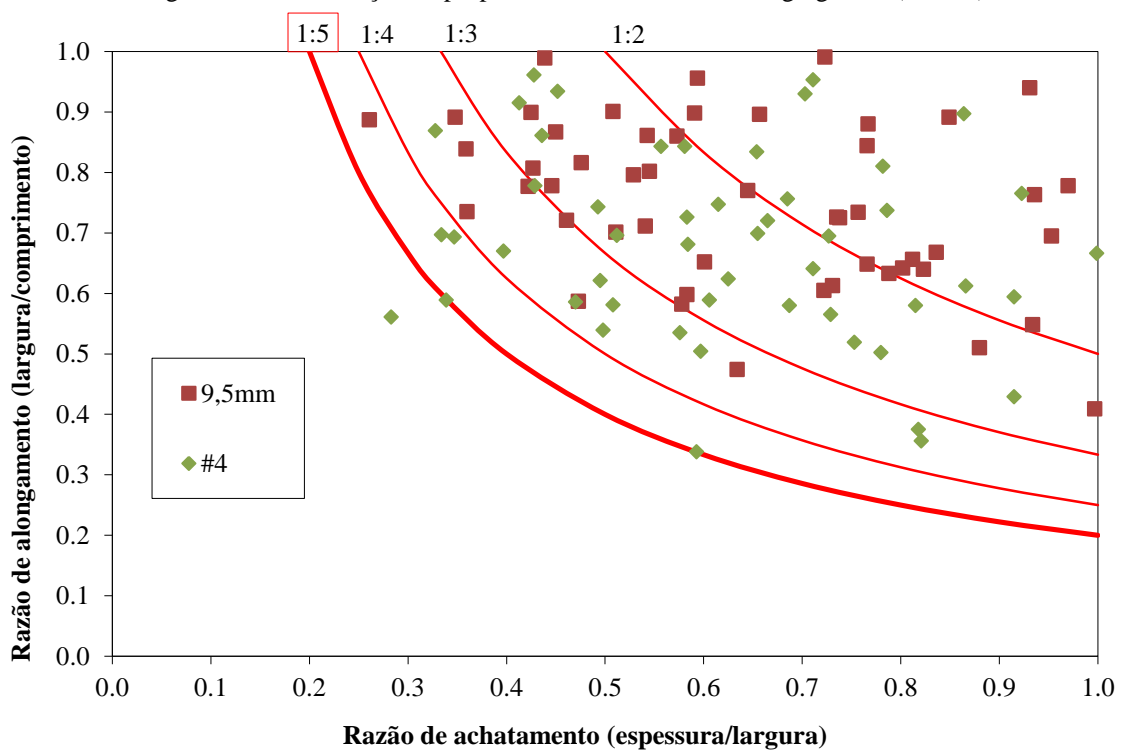


Figura 51 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (25mm)

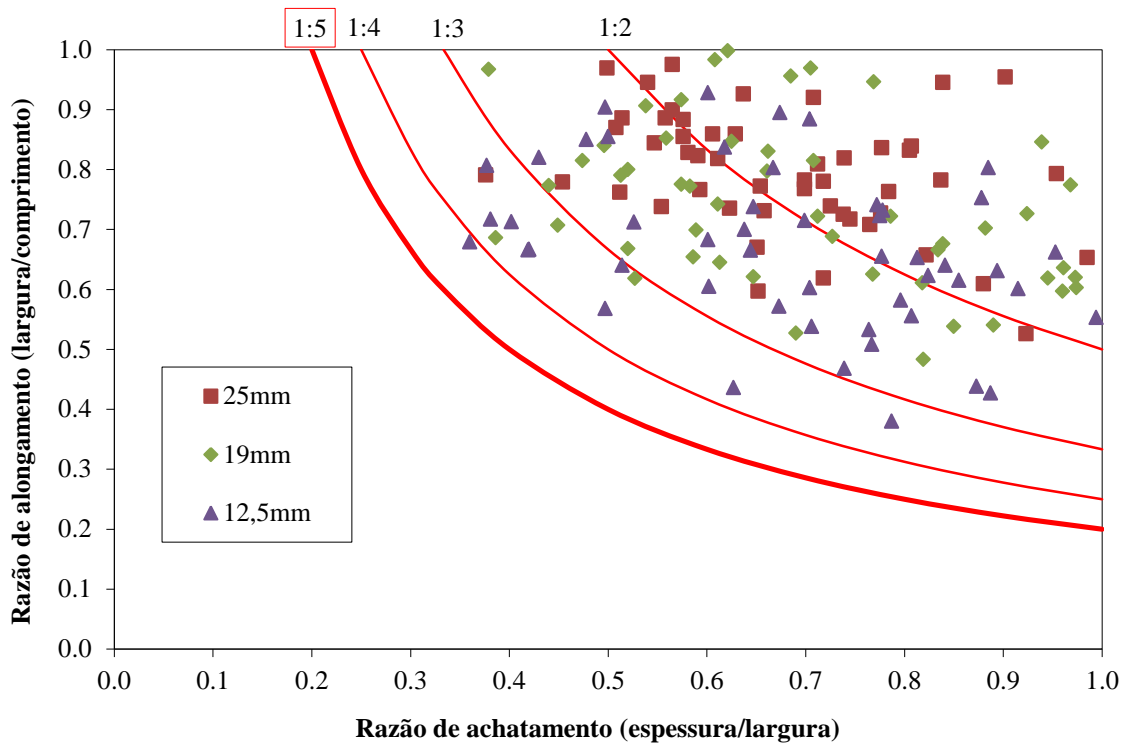


Figura 52 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (12,5mm)

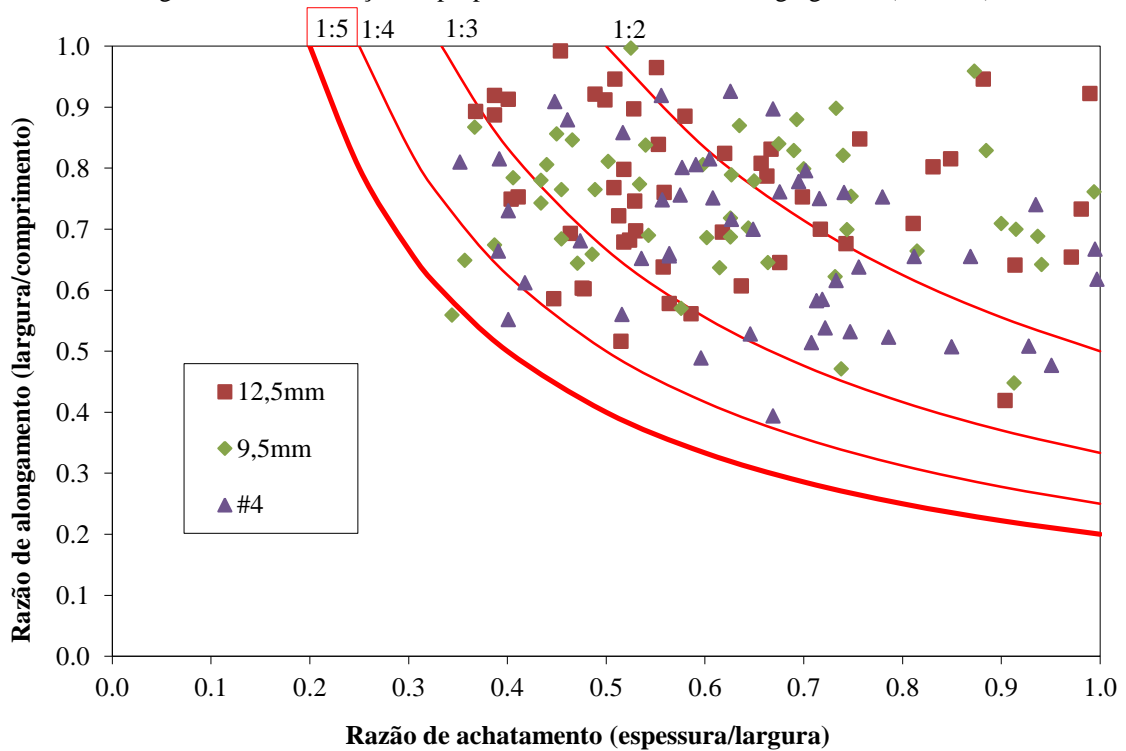


Figura 53 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (9,5mm)

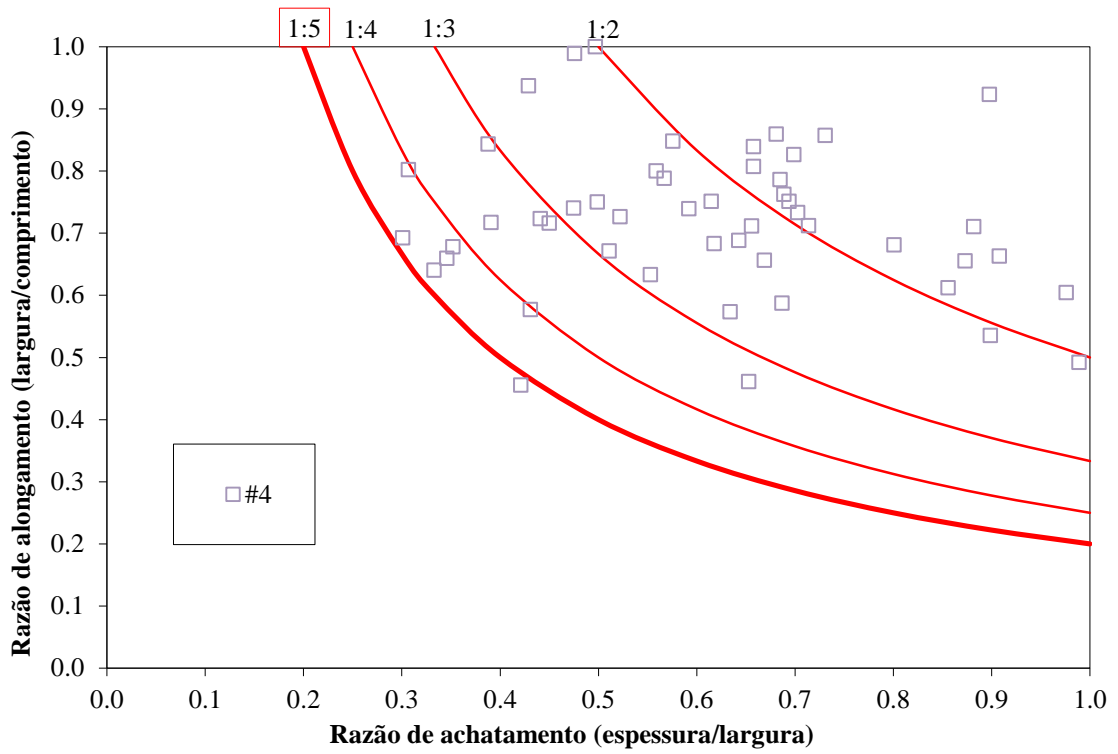


Figura 54 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (4,75mm)

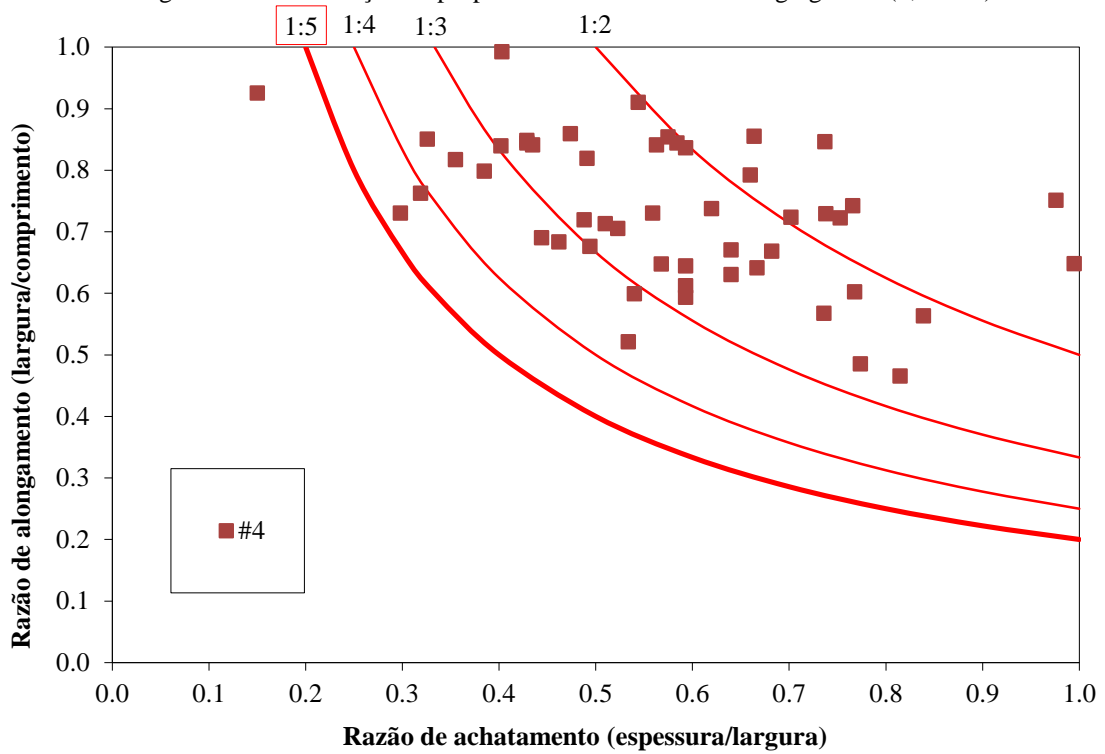


Figura 55 – Distribuição da propriedade de Esfericidade – agregado 3 (areia grossa)

