

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

Daniele Soares Ibiapina

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PETRAN)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Luis Marcelo Gomes de Oliveira

Curso de Engenharia Civil

RESUMO

O Processamento Digital de Imagens está estabelecido como ferramenta para a caracterização das propriedades de forma de agregados. Entre as principais técnicas de PDI está o uso do *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2). Neste trabalho foi avaliado o impacto da mudança das propriedades de forma de agregados, após submetidos a desgaste no Micro Deval (MD), na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas. O agregado selecionado foi analisado no AIMS2, antes e depois do desgaste no MD e posteriormente utilizado na composição de misturas asfálticas. O esqueleto mineral foi analisado utilizando-se o *software Image Processing and Analysis System 2* (iPas2). Os resultados mostraram que para avaliar o impacto na formação do esqueleto mineral das misturas asfálticas, se o indicador for o intertravamento de agregados, as mudanças nas propriedades de forma não devem ser avaliadas isoladamente, mas em conjunto com a granulometria e parâmetros de dosagem.

ABSTRACT

The Digital Image Processing is established as a tool for the characterization of aggregate shape properties. Among the main PDI techniques is the use of Aggregate Imaging Measurement System 2 (AIMS2). This work evaluated the impact of the change of the properties of aggregate form, after being submitted to wear in the Micro Deval (MD), in the formation of the mineral skeleton of asphalt mixtures. The selected aggregate was analyzed in AIMS2, before and after wear in the MD and later used in the composition of asphalt mixtures. The mineral skeleton was analyzed using Image Processing and Analysis System 2 (iPas2). The results showed that to evaluate the impact of the mineral skeleton formation of asphalt mixtures, if the indicator is the interlocking of aggregates, changes in shape properties should not be evaluated in isolation, but in conjunction with grain size and dosage parameters.

1. INTRODUÇÃO

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

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

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

Diante da importância da seleção dos agregados para a formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas, esta pesquisa objetiva colaborar com a proposição de uma melhor seleção desses materiais, ainda no âmbito do projeto dessas misturas. Foi avaliada a influência da mudança das propriedades de forma de agregados nos parâmetros de contato, orientação e segregação do esqueleto mineral de misturas asfálticas. Para isso, foram analisados, por meio das técnicas de PDI, o esqueleto mineral de misturas asfálticas e os agregados antes e depois do uso do equipamento Micro Deval (MD), que, assim como o ensaio de abrasão Los Angeles, modifica as propriedades de forma dos agregados.

2. Materiais e Método

2.1 Materiais

Os agregados, gnáissicos, foram coletados em uma pedreira da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), no estado do Ceará, Brasil. Maiores informações a respeito desses agregados podem ser encontradas em Ibiapina (2016). O material coletado foi classificado na própria pedreira quanto ao Tamanho Máximo Nominal (TMN) em brita de 1", brita de 3/4" e pó de pedra, em quantidades não especificadas.

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

As misturas asfálticas foram produzidas segundo a metodologia Superpave. A curva granulométrica utilizada na produção das misturas asfálticas se enquadra na Faixa C do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (Figura 1).

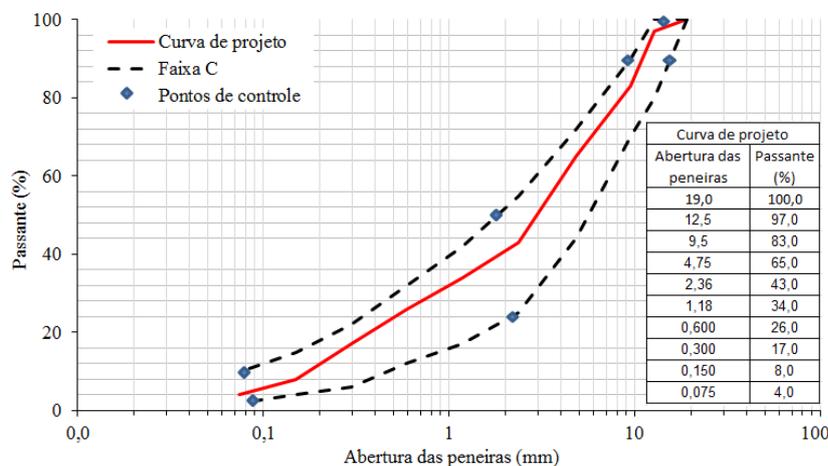


Figura 1: Curva granulométrica de projeto adotada

2.2 Método

O método utilizado para modificar as propriedades de forma, com o uso do MD e avaliar o resultado dessas mudanças, com o uso do AIMS2, em conjunto, foi baseado em Mahmoud e Ortiz (2014). O método consistiu em desgastar as amostras de agregados durante 210 minutos, até as mudanças nas propriedades de forma atingirem o estado terminal, e analisar estas propriedades, Antes do MD (AMD) e Depois do MD (DMD). As mudanças nas propriedades de forma foram calculadas em termos de porcentagem de perda das mesmas. Os ensaios no MD não são normatizados no Brasil, porém há duas designações americanas específicas para agregados graúdos e para miúdos (ASTM D 6928, 2006 e ASTM D 7428, 2008), respectivamente. As atividades realizadas nesta pesquisa foram estruturadas no fluxograma da Figura 2.

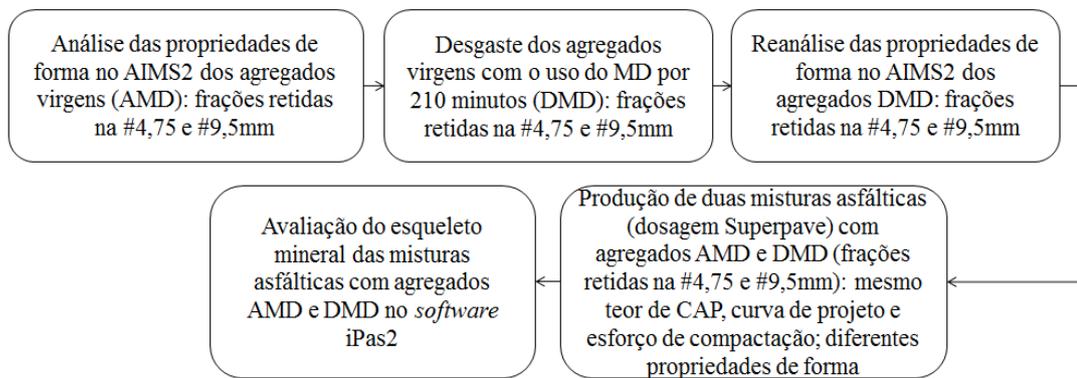


Figura 2: Fluxograma do método utilizado para avaliar o impacto da mudança das propriedades de forma na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas

2.2.1 Desgaste com o uso do Micro-Deval (MD)

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

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

A adaptação da ASTM D 6928 (2006) consistiu em colocar uma amostra de agregado, na quantidade de 750 g (peso inicial), para cada tambor do MD juntamente com 5 kg de esferas de aço e 2 litros de água. Os agregados foram imersos em água durante um período de 1 hora antes do início do desgaste, de 210 minutos, no MD. Posteriormente, foram retiradas as esferas de aço e o agregado foi passado na peneira #1,18 mm, sob água corrente, para a retirada dos finos formados com o desgaste. Por fim, o material retido na peneira #1,18 mm foi colocado na estufa para secagem e pesado novamente (peso final) para a determinação da massa perdida para cada fração de agregado (Equação 2.1).

$$\text{Massa Perdida (\%)} = \frac{P_{AMD} - P_{DMD}}{P_{AMD}} \times 100 \quad (2.1)$$

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

2.2.2 Produção das misturas asfálticas

Para esta pesquisa, foram produzidas duas misturas asfálticas. A Mistura Asfáltica 1 (MA1) foi dosada segundo a metodologia Superpave, com curva granulométrica de projeto enquadrada na Faixa C do DNIT, e o teor de projeto de CAP encontrado, com 100 giros no compactador giratório. A Mistura Asfáltica 2 (MA2) foi diferenciada da MA1 através de seus agregados constituintes, cujas partículas retidas nas peneiras #9,50 mm e #4,75 mm foram submetidas ao MD durante 210 minutos, e foi compactada também à 100 giros.

2.2.3 Parâmetros do esqueleto mineral

Os parâmetros do esqueleto mineral utilizados para descrever o comportamento dos agregados no esqueleto mineral das misturas asfálticas foram a orientação dos agregados, representadas pelo ângulo horizontal de orientação (θ^K) e pelo vetor magnitude de orientação (Δ); número e comprimento das zonas de contato dos agregados; e segregação, que, de acordo com Stroup-Gardiner e Brown (2000), pode ser definida como a falta de homogeneidade entre os constituintes de uma mistura asfáltica.

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

Ao parâmetros do esqueleto mineral anteriormente citados foram obtidos pelo *software* iPas2, e utilizado para analisar a estrutura interna das misturas asfálticas segundo o fluxograma da figura 3.

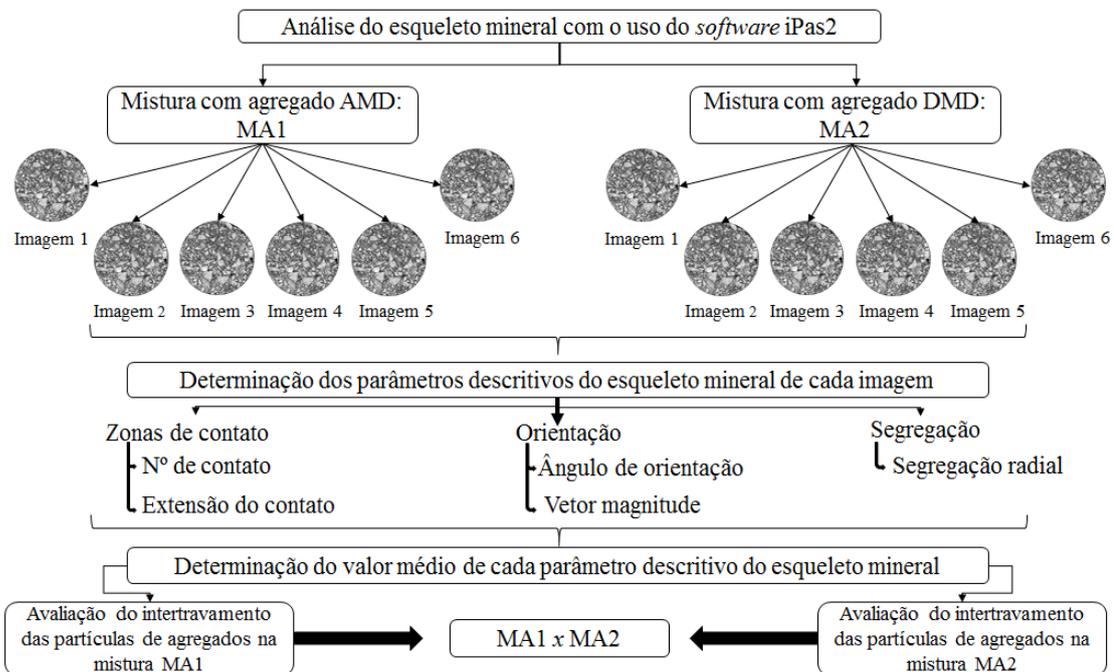


Figura 3: Fluxograma do método utilizado para análise do esqueleto mineral das misturas asfálticas com o uso do *software* iPas2

Há ocorrência de uma zona de contato entre duas partículas de agregado quando elas estão a uma distância máxima entre si, a ser definida pelo usuário. Neste estudo utilizou-se o valor de 0,50 mm (BESSA; CASTELO BRANCO; SOARES, 2012). O *software* estabelece como padrão, para o menor tamanho de agregado o valor de: quatro vezes a distância definida entre esses, ou seja, neste estudo o *software* só analisou partículas iguais ou maiores do que 2,00 mm de diâmetro. Houve uma limitação dessa técnica uma vez que a curva granulométrica de projeto utilizada apresentava 65% de agregados miúdos. O parâmetro obtido pelo iPas2 e, utilizado nesta pesquisa para quantificar a orientação média dos agregados foi o vetor magnitude. A segregação é a medida da heterogeneidade da mistura à partir do centro do corpo de prova. A angularidade por sua vez é a medida do ângulo entre o maior eixo da partícula e o plano horizontal, sendo o vetor magnitude (Equação 2.1) a medida da aleatoriedade de orientação das partículas, podendo variar de 0% (anisotrópico) até 100% (isotrópico).

$$\Delta = \left(\frac{100}{N}\right) x \sqrt{(\sum \text{sen}2\theta_k)^2 + (\sum \text{cos}2\theta_k)^2} \quad (2.2)$$

O seccionamento das amostras foi realizado, atendendo ao mínimo de 3 cortes (6 imagens) por amostra (MASAD *et al.*, 2001). Cada CP tinha 6,5 cm de altura e foi serrado em 4 seções horizontais; as bordas foram descartadas (1,0 cm de cada extremidade); 3 amostras, de 1,5 cm de espessura e 100 cm² de área, cada, foram utilizadas nesta pesquisa e geraram 6 imagens que foram escaneadas e digitalizadas com o uso do *scanner* HP (Modelo HP-deskjet F4280).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Agregados

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

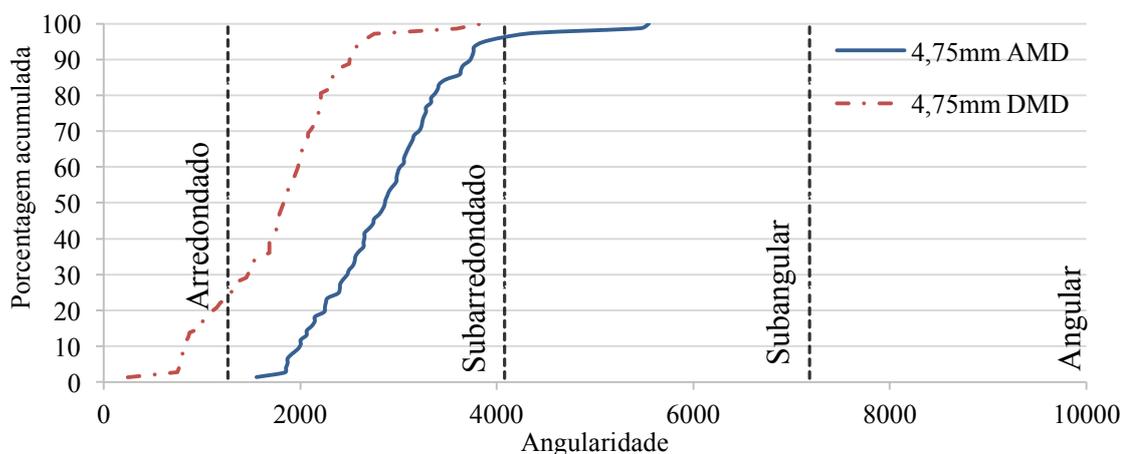


Figura 4: Curvas de distribuição da angularidade da fração #4,75 mm AMD e DMD geradas pelo AIMS2

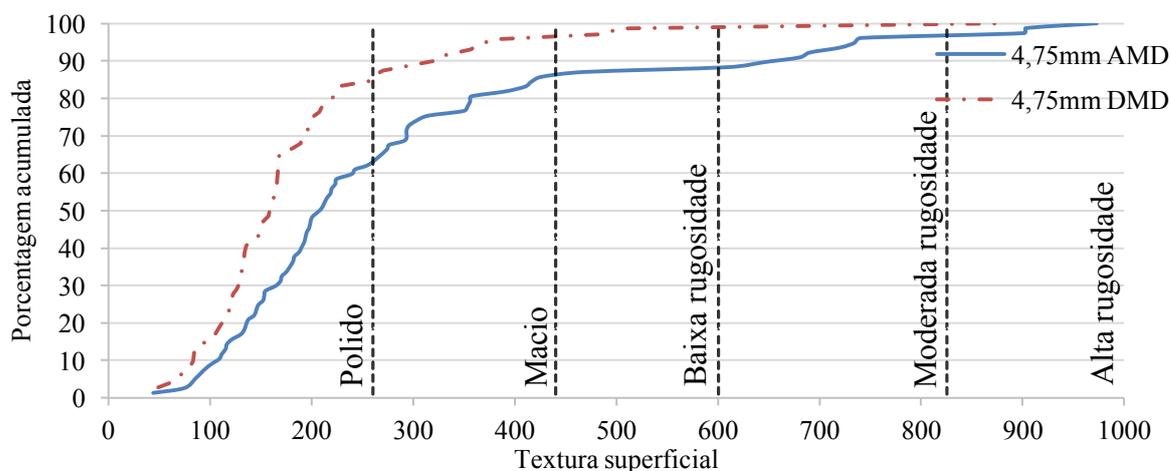


Figura 5: Curvas de distribuição da textura superficial da fração #4,75 mm AMD e DMD geradas pelo AIMS2

O deslocamento das curvas de distribuição da angularidade e da textura superficial para a esquerda indicou que o uso do MD tornou os materiais mais arredondados e polidos, respectivamente, o que era esperado devido ao nível de severidade ao qual os agregados foram submetidos dentro do equipamento. As curvas de distribuição da esféricidade quase não se deslocaram, por isso não foram apresentadas. Isso demonstra que os agregados DMD ficaram com bordas mais arredondadas mas a forma tridimensional não foi consideravelmente modificada para se aproximar de uma forma esférica. As Tabelas 2 e 3 apresentam as médias dos valores das propriedades de forma; as suas perdas relativas, em porcentagem e a classificação do agregado, segundo o sistema de classificação de propriedades de forma proposto em Ibiapina (2018) (Tabela 1), para cada fração analisada, nas duas condições avaliadas: AMD e DMD.

Tabela 1: Limites da classificação proposta nesta pesquisa

Propriedade	Valores limites				
Angularidade	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
	< 1.260	1.260 – 4.080	4.080 – 7.180	> 7.180	-
Esféricidade	Achatado	Baixa esféricidade	Esféricidade moderada	Alta esféricidade	-
	< 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	> 0,9	-
Textura superficial	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade
	< 260	260 - 440	440 - 600	600 - 825	> 825

Fonte: Adaptado de Ibiapina (2018).

Tabela 2: Resultados das propriedades de forma para partículas retidas na #4,75 mm

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

Tabela 3: Resultados das propriedades de forma para partículas retidas na #9,5 mm

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

Os resultados mostraram que houve redução nas propriedades de forma, DMD, para as duas frações analisadas, mas não houve mudança de classe de angularidade e de esfericidade, baseada na classificação proposta em Ibiapina (2018). Com relação à textura superficial, houve mudança de classe, na fração #4,75 mm.

Com relação à porcentagem de massa perdida, a perda DMD foi maior para a fração #4,75 mm (23,7%) do que para a fração #9,5 mm (11,9%). Os resultados indicaram que os agregados menores quebraram com mais facilidade. Possivelmente, devido ao tamanho relativo das partículas (4,75 mm) diante das esferas (9,5 mm) do MD. A redução nos valores das propriedades de angularidade e de textura superficial também foi maior para os agregados miúdos (Tabelas 2 e 3). Constatou-se que houve quebra das partículas, porém essa quebra não impactou o valor da esfericidade. Os resultados demonstram que os agregados de dimensões menores são mais suscetíveis à mudanças devido desgaste no Micro deval. Por outro lado, mesmo nos agregados menores não houve mudanças na esfericidade dos agregados o que sugere que o tempo de desgaste não é suficiente para causar mudanças nessa propriedade, que alguns dos outros parâmetros do ensaio deveria ser modificado ou então que esta propriedade não sofre modificações dentro de sua classe mineral.

3.2 Misturas Asfálticas

Nas misturas MA1 e MA2 produzidas, a primeira atingiu 4,2% de Vv após dosada, e a MA2 atingiu Vv de 1,3% (Tabela 5). Diante do fato da MA2 não ter sido dosada e sim replicada, com agregados DMD, a mesma deve requerer menos CAP e, a queda no seu Vv pode ter sido uma das consequências, em termos de estrutura interna, da redução das propriedades de forma dos seus agregados constituintes (Tabelas 2 e 3), pois o CAP em excesso pode ter preenchido os vazios da MA2.

Tabela 5: Parâmetros de dosagem da MA1 e MA2

MA	Teor de CAP (%)	Vv (%)	G _{mm}	G _{mb}	Tipo de agregado
MA1	4,5	4,2	2,475	2,371	AMD
MA2	4,5	1,3	2,449	2,419	DMD

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

3.2.1 Zonas de contato

Os resultados mostraram que o número de zonas de contato, por 100 cm² de área, das faces do CP representativo da MA2 aumentou 36,25%, em relação ao número de zonas de contato, por 100 cm² de área, das faces do CP representativo da MA1 (Figura 6). Com relação à extensão média das zonas de contato, houve um aumento de 8,40%, ao compararem-se as MA1 e MA2 (Figura 7). Esses parâmetros foram utilizados como descritores do intertravamento entre partículas de agregados. Normalmente, afirma-se na literatura especializada que partículas mais angulares, mais rugosas e mais esféricas aumentam o intertravamento entre elas (contrariando o que foi observado nesta pesquisa). Assumindo que o método utilizado para descrever o intertravamento foi adequado, esse resultado não foi o esperado, pois a MA2 tem agregados menos angulares, menos rugosos e menos esféricos do que a MA1, o que diminuiria o intertravamento entre os mesmos. Este resultado pode ser explicado pelo melhor ajuste interno dos agregados devido às mudanças nas propriedades de forma, o que gerou maior densidade de agregados, como apresentado na Figura 6, resultando menor necessidade de CAP para preencher o menor número de vazios. Visto que o teor de CAP foi mantido para a MA2, o volume de vazios desta mistura caiu drasticamente em relação à MA1.

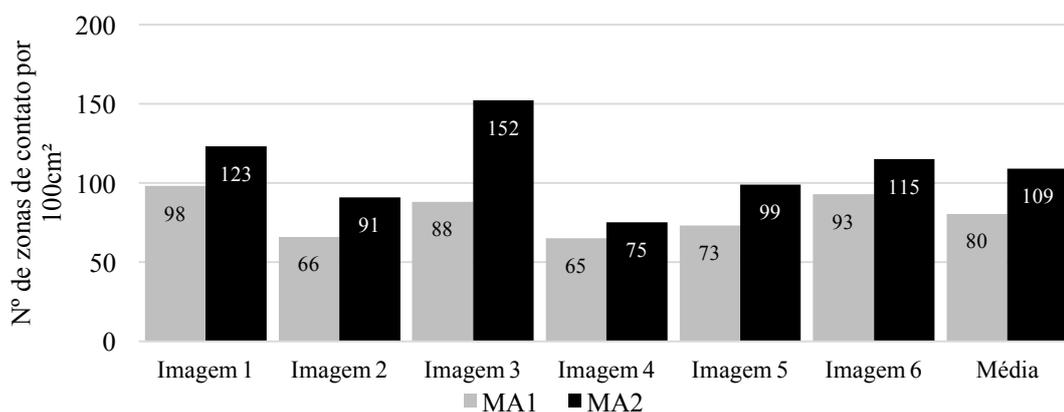


Figura 6: Número de zonas de contato por 100 cm² para cada imagem analisada da MA1 e MA2 geradas pelo iPas2

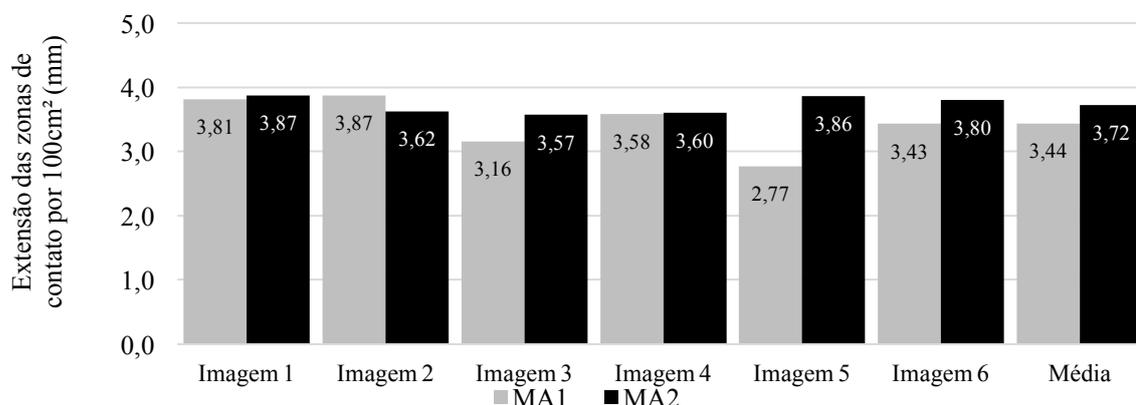


Figura 7: Extensão das zonas de contato por 100 cm² para cada imagem analisada da MA1 e MA2 geradas pelo iPas2

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

3.2.2 Orientação

Os resultados mostraram que não houve diferenças significativas entre os valores do ângulo horizontal médio de orientação da distribuição de agregados na MA1 e na MA2 (Figura 8 e 9). Seus valores não foram próximos de zero para nenhuma das misturas, o que indica boa dispersão dos agregados em todos os intervalos.

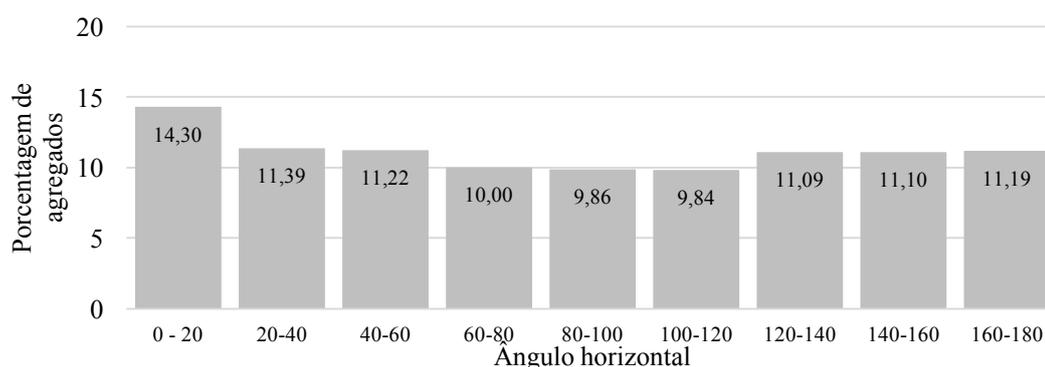


Figura 8: Ângulo horizontal médio de orientação dos agregados na MA1

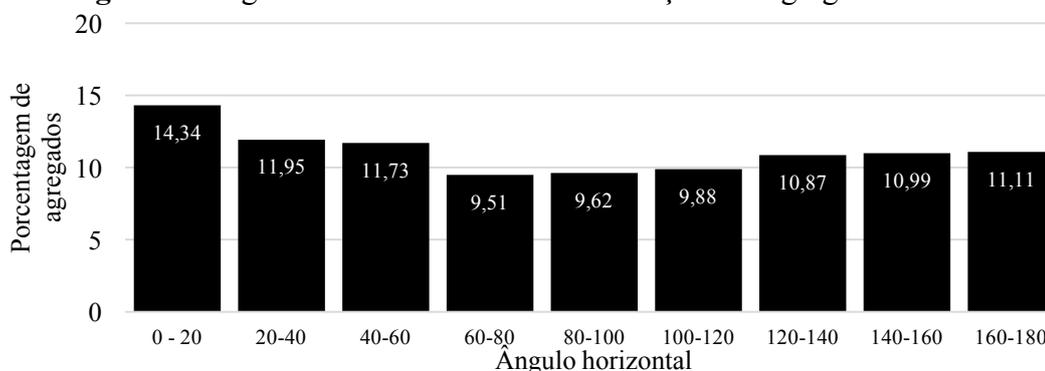


Figura 9: Ângulo horizontal médio de orientação dos agregados na MA2

Os valores absolutos dos vetores magnitude das duas misturas, calculados a partir do ângulo horizontal de orientação de cada partícula, foram de 6,55% para a MA1 e 7,54% para a MA2.

Estes valores são próximos de zero, o que indicou que as partículas estavam tendendo a uma distribuição aleatória, ou seja, anisotrópica. A partir da variação entre os valores dos vetores magnitude da MA1 e MA2, da ordem de 1%, concluiu-se que não houve variação significativa.

3.2.3 Segregação

A segregação radial é descrita por grupos de segregação e representada por histogramas de frequência de agregados separados por tamanho (Figura 10). Os grupos G1, G2 e G3 representam regiões circulares do corpo de prova, sendo G1 o círculo central e G3 o anel mais externo. As médias dos valores dos parâmetros de segregação radial de agregados apresentaram um comportamento semelhante, nas duas misturas asfálticas analisadas (MA1 e MA2) e indicaram que a redução nas propriedades de forma não impactou a segregação radial das partículas de agregados, com base nas análises realizadas com o uso do iPas2.

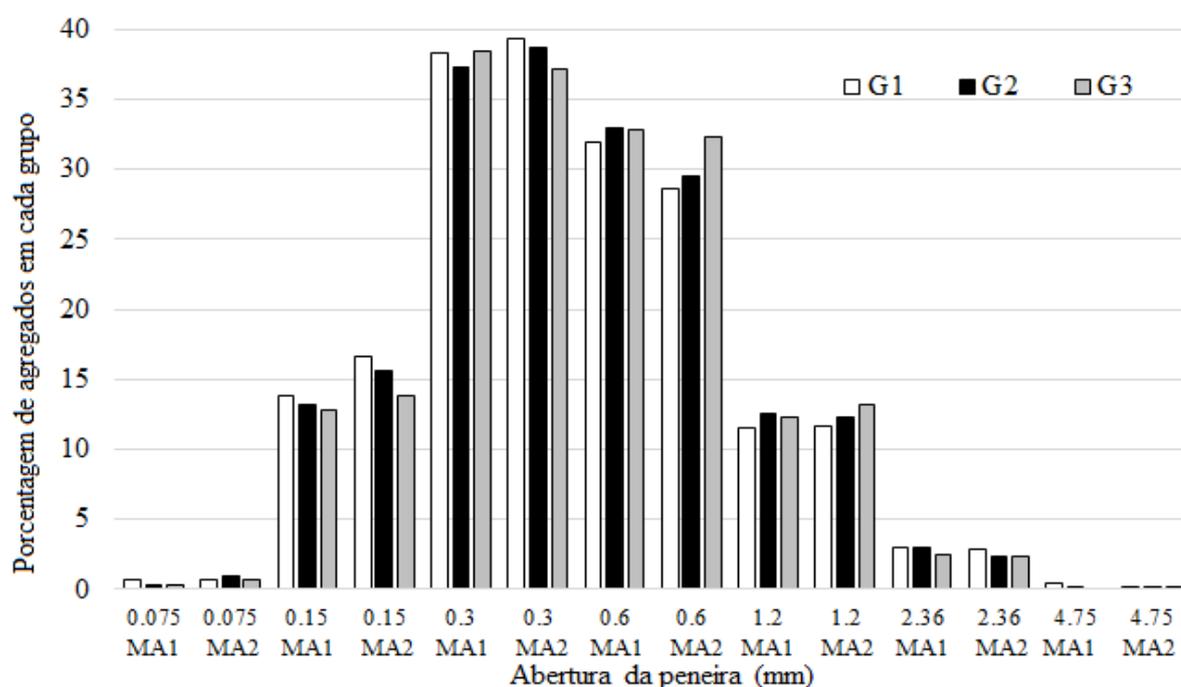


Figura 10: Histogramas representativos da segregação radial média para a MA1 e MA2

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar, através do PDI, o impacto da mudança das propriedades de forma de agregados, gerada através do desgaste dos mesmos com o uso do MD, na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas.

Na avaliação da mudança de forma dos agregados, foi percebido que não houve mudanças significativas na esfericidade dos agregados, o que mostra que esta propriedade pode não sofrer modificações após uso do Micro deva, ou pode sugerir que o tempo de desgaste foi inferior ao necessário. O aumento do tempo de desgaste também deverá causar mudanças nas demais propriedades de forma dos agregados, que apesar de terem sofrido mudanças maiores que a esfericidade, também não mudaram de classificação de forma significativa, segundo o sistema de classificação apresentado neste trabalho.

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

Constatou-se que, as mudanças das propriedades de forma, provocadas com o uso do MD, na formação do esqueleto mineral das misturas asfálticas não devem ser avaliadas isoladamente. Quando o indicador dessas mudanças for o intertravamento de agregados, a granulometria e os parâmetros de dosagem das misturas asfálticas também devem ser levados em consideração.

Para trabalhos futuros de pesquisa, seguem algumas sugestões:

- Avaliar o impacto das propriedades de forma na dosagem de diferentes misturas asfálticas, em termos de Vv;
- Avaliar a influência da mudança de outras frações de agregados desgastados com o uso do MD e comparar com mudanças realizadas também no ensaio de abrasão Los Angeles;
- Realizar desgaste de agregados de diferentes mineralogias em tempos superiores a 210 minutos para avaliar se este tempo corresponde realmente ao tempo onde as propriedades atingem o estado terminal;
- Correlacionar as propriedades de forma com o esqueleto mineral utilizando outras ferramentas como, por exemplo, a tomografia computadorizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL ROUSAN, T. M. *Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Texas A&M University, College Station, Texas, 2004.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. *Regulamento Técnico para Realização dos Investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento e Elaboração do Relatório Demonstrativo das Despesas Realizadas*. Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. *ASTM D 6928: Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro Deval Apparatus*. EUA, 2006
- BAHIA, H. U. *Asphalt Mixture Visualization - iPas2 Software and Characterization of Aggregate Skeleton* (Apresentação). In: Congresso Brasileiro de Reologia, Aracaju, SE, 2013.
- BESSA I. S.; CASTELO BRANCO V. T. F.; SOARES, J. B. *Evaluation of Different Digital Image Processing Software for Aggregates and Hot Mix Asphalt Characterizations Construction and Building Materials*. v. 37, p. 370–378., 2012.
- COENEN, A.; KUTAY, M. E; BAHIA, H. U. Aggregate Structure Characterization of Asphalt Mixtures Using 2-Dimensional Image Analysis, *International Journal of Road Materials and Pavement Design*. 2011. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.711923>.
- HUNTER, A. E.; AIREY, G. D.; COLLOP, A. C. Aggregate Orientation and Segregation in Laboratory-Compacted Asphalt Samples. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1891, p. 8-15, 2004. <https://doi.org/10.3141/1891-02>.
- IBIAPINA, D. S. *Avaliação do impacto da mudança das propriedades de forma de agregados na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2018.
- IBIAPINA, D. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; RODRIGUES, C. B.; BESSA, I. S. Avaliação da Relação entre Angularidade de Agregados e Parâmetros do Esqueleto Mineral de Misturas Asfálticas. *Anais do*

XIX CILA – Congresso Ibero Latino Americano del Asfalto. Medellín, Colômbia, 27 a 30 de novembro. Poster 317, 2017.

- MASAD, E. A.; MUHUNTHAN, B.; SHASHIDHAR, N.; HARMAN, T. Aggregate Orientation and Segregation in Asphalt Concrete. *Geotechnical Special Publication, American Society of Civil Engineering*, v. 85, 69-80, 1998.
- MASAD, E. A.; MUHUNTHAN, B.; SHASHIDHAR, N.; HARMAN, T. Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 13, p. 88-95, 1999.
- MASAD, E. A.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L. Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance. In: *Transportation Research Record 1757*. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 148-156, 2001.
- MASAD, E. A.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. A Unified Method for the Analysis of Controlled-Strain and Controlled-Stress Fatigue Testing. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 9, p. 233-246, 2007.
- MASAD, E. A.; KASSEM, E.; CHOWDHURY, A. Application of Imaging Technology to Improve the Laboratory and Field Compaction of HMA, *Report No FHWA/TX-09/0-5261-1*, Texas Transportation Institute – Texas A&M University, 2009.
- MOON, K. H.; FALCHETTO, A. C.; WISTUBA, M. P.; JEONG, J. H. Analyzing Aggregate Size Distribution of Asphalt Mixtures Using Simple 2D Digital Image Processing Techniques. *Arab J SciEng*, v. 40, p. 1309-1326, 2015.
- RODRIGUES, A. C. *Avaliação da Influência da Granulometria na Aderência Pneu-Pavimento*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2013.
- SEFIDMAZGI, N. R.; TASHMAN, L.; BAHIA, H. Internal Structure Characterization of Asphalt Mixtures for Rutting Performance Using Imaging Analysis. *Road Materials and Pavement Design*, v. 1, n. S1, p. 21-37, 2012.
- STROUP-GARDINER, M.; BROWN, E. R. Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements. *NCHRP Report 441*, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D. C., 2000.
- TAYLOR, M. A.; GARBOCZI, E. J.; ERDOGAN, S. T.; FOWLER, D. W. Some Properties of Irregular Particles in 3D. *Powder Technology*, 162, 1-15, 2006.
- TEYMOURPOUR, P.; BAHIA, H. U. Effects of Binder Modification on Aggregate Structure and Thermovolumetric Properties of Asphalt Mixtures. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, n. 2445, p. 21-28, 2014.
- ZHANG, L.; ZHEREN, W.; GUANGHUI, X.; YINPING, D. Characterization of HMA Internal Structure Using Image Analysis. *The Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals*, p. 1968-1975, 1998.