

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DOS AGREGADOS EM UTILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS NO RS POR MEIO DE ENSAIOS TRADICIONAIS E PELO PDI

Chaveli Brondani

Doutoranda em Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
chavelib@gmail.com

Cléber Faccin

Professor no Centro de Ensino Superior Riograndense (CESURG)
crfaccin@gmail.com

Karine Wille Kraemer

Aluna de Graduação de Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
karinewillek@gmail.com

Ketrily Killys Martins Saraiva

Aluna de Graduação de Engenharia Civil na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
ketrilysaraiva@gmail.com

Luciano Pivoto Specht

Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade e do PPGEC da UFSM
luspecht@ufsm.br

Marcos Antonio Fritzen

Pesquisador da COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro
marcosantonio_ufrj@yahoo.com.br

Resumo. Diante da relevância de se categorizar um material para sua correta seleção para execução de projetos, o presente trabalho buscou avaliar as propriedades morfológicas de agregados de 15 britagens utilizados na produção de misturas asfálticas no estado do RS, por meio dos ensaios tradicionais e pelo processamento digital de imagem (PDI), utilizando sistema AIMS 2. Dos resultados tradicionais praticamente todas as amostras atenderam aos índices propostos pelos órgãos rodoviários. Já quanto ao AIMS 2 existem divergências e convergências dentro das duas propostas analisadas, mas de modo geral as amostras de agregados estudadas são adequadas para utilização em misturas asfálticas.

Palavras-chave: Propriedades de forma de agregados. Concretos asfálticos. Processamento digital de imagens.

1. INTRODUÇÃO

A maioria das rodovias pavimentadas do estado do Rio Grande do Sul são construídas de pavimentos flexíveis, utilizando como revestimento o concreto asfáltico.

Para misturas asfálticas densas, os agregados representam cerca de 90% a 95% em massa e 80% a 90% do volume, bem como são responsáveis por resistir boa parte da carga imposta ao revestimento, sendo, então, fundamentais ao desempenho do pavimento.

Conforme Mendes (2011), os agregados em um concreto asfáltico cumprem o papel de esqueleto da mistura e as características que lhes conferem resistência são dureza, textura superficial, angularidade, forma e sua distribuição granulométrica.

As características morfológicas das partículas de agregados podem ser definidas em função de três propriedades principais: forma, angularidade e textura superficial.

Essas propriedades afetam a resistência e influenciam na trabalhabilidade dos concretos asfálticos.

Para avaliação da morfologia, no estado do RS, são utilizados os ensaios indicados pelas especificações de serviço vigentes: índice de forma (DNIT) e índice de lamelaridade (DAER). Esses ensaios apresentam alto grau de empirismo dos resultados, não sendo suficientes para caracterizar essas propriedades dos agregados. Conforme Pazos (2015) tem-se buscado metodologias mais expeditas e confiáveis para caracterizar as propriedades geométricas e de textura superficial de agregados, como os sistemas de análise por imagem, incluindo, entre eles, o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS2).

Diante disso, o presente trabalho refere-se ao estudo da avaliação das propriedades morfológicas de agregados de 15 britagens utilizados na produção de misturas asfálticas densas, em diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O concreto asfáltico é um compósito de agregados minerais e ligante asfáltico, tendo

suas características e desempenho diretamente relacionados com esses materiais.

O esqueleto mineral exerce uma função importante no desempenho da mistura asfáltica, uma vez que sua resistência aos principais mecanismos de dano ao pavimento depende do intertravamento de seus agregados constituintes (Bahia, 2013).

Na escolha dos agregados a serem utilizados em concretos asfálticos, faz-se necessário encaixar a mistura em faixas granulométricas especificadas pelo DAER e/ou DNIT. Além disso, atender limites para ensaios de caracterização, incluindo a avaliação da forma por meio da lamelaridade (DAER) e Índice de Forma (DNIT), conforme apresentados na Tabela 1.

De maneira geral, esses parâmetros são atendidos para os agregados produzidos no estado, salvo casos pontuais, principalmente relacionados à operação ou produção inadequada dos mesmos, que influenciam principalmente na morfologia. Essa afirmação é comprovada por pesquisas como a de Boeira (2014), que avaliou as propriedades de agregados minerais utilizados em misturas asfálticas no RS para sete britagens e Faccin (2018) que avaliou os agregados de quinze britagens.

Tabela 1 - Valores das especificações de agregados para utilização em concretos asfálticos

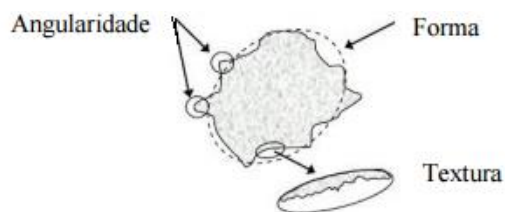
| Características | DNIT ¹ | | DAER/RS ² | |
|---------------------------|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| | Requisito | Método de ensaio Nº | Requisito | Método de ensaio Nº |
| Desgaste Los Angeles (%) | ≤50 | DNER-ME 035 | ≤40 | DAER-ME 211 |
| Índice de forma | >0,50 | DNER-ME 086 | - | - |
| Durabilidade/Sanidade (%) | <12 | DNER-ME 089 | ≤10 | DAER-ME 214 |
| Equivalente de areia (%) | ≥55 | DNER-ME 054 | ≥50 | DAER-ME 217 |
| Lamelaridade | - | - | ≤50 | DAER-ME 231 |

Fonte: ¹DNIT 031/2006 -ES; ²DAER ES-P-16/91.

2.1 Morfologia dos agregados

As características morfológicas das partículas de agregados podem ser definidas em função de três propriedades principais: forma, angularidade e textura superficial, conforme ilustrado na Figura 1 (PAZOS, 2015).

Figura 1 - Esquema da morfologia dos agregados



Fonte: Adaptado de Lugo, Mercado e Spinel (2008).

Para Orchard (1976), apud Balbo (2007), a forma dos grãos pode ser definida em termos de sua esfericidade e angularidade. A esfericidade é considerada como a relação entre o volume de uma esfera que circunscreve o grão e o volume do grão propriamente dito. A angularidade, por sua vez, está associada à presença de cantos vivos nos grãos, geralmente descrita por termos que variam de angulosos a arredondados.

Em relação à textura, esta pode ser estabelecida pelo grau de quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera, e, de acordo com Balbo (2007), essa característica depende de diversos fatores, como tipos de minerais presentes, tamanho dos cristais que compõem a rocha, dureza, clivagem etc. Entre alguns termos que são utilizados para descrever a textura do grão, tem-se: polida, lisa, rugosa, cristalina, porosa, ondulada etc.

2.2 Ensaios tradicionais para análise da morfologia dos agregados para pavimentação

Os ensaios laboratoriais utilizados no estado do RS para avaliação da morfologia dos agregados, indicados pelas especificações de serviço, são o índice de forma (IF), do DNIT, e o índice de lamelaridade (IL), do DAER.

A lamelaridade é um parâmetro geométrico que determina se os componentes dos agregados são alongados ou não. Esse parâmetro relaciona a maior razão existente entre o comprimento (maior diâmetro do agregado) e a largura (maior diâmetro perpendicular ao comprimento do agregado), ou entre a largura e a espessura (menor diâmetro perpendicular ao comprimento do agregado) (BESSA et al., 2009).

O índice de forma é o parâmetro que classifica os agregados quanto à sua esfericidade. É um parâmetro adimensional que varia entre 0 e 1, levando-se em conta que agregados com índices próximos a 1 possuem ótima esfericidade e que agregados com índices próximos a 0 possuem baixa esfericidade, ou seja, são mais lamelares do que esféricas.

2.3 Ensaios por processamento digital de imagens para análise da morfologia dos agregados para pavimentação

De acordo com Masad et. al. (2001), por utilizar métodos diretos e eficientes, o Processamento Digital de Imagens (PDI) já se ajustou como ferramenta para a caracterização das propriedades de forma de agregados. O uso do *Aggregate Image Measurement System 2* (AIMS2) já se encontra entre as principais técnicas de PDI utilizadas na infraestrutura de transportes. Segundo Al Rousan (2004), tal equipamento apresenta o benefício de fornecer a distribuição completa das características de forma para uma amostra de agregado, não apenas valores médios, o que possibilita a classificação dos agregados com distintas propriedades de forma.

Conforme Ibiapina et al. (2018), há duas propostas de normatização em andamento para o AIMS2, uma nos Estados Unidos, submetidas à aprovação da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) (AASHTO TP81, 2010 e AASHTO PP64, 2010) e uma no Brasil, submetida à aprovação pelo IPR/DNIT.

O sistema AIMS 2 fornece informações de angularidade, esfericidade, características de achatamento, alongamento e textura para os agregados graúdos, e angularidade e forma para os agregados miúdos, que pode ser baseada na classificação de agregados desenvolvida por Al Rousan (2004) ou na proposta brasileira de Ibiapina et al. (2018), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de classificação propostos por Al Rousan (2004) e Ibiapina et al. (2018)

| Propriedades | Valores limites | | | | | | | | | |
|---------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | Al Rousan (2004) | | | | | Ibiapina et al. (2018) | | | | |
| Forma 2D | < 6,5 | 6,5 - 8,0 | 8,0 - 10,5 | > 10,5 | | < 4,0 | 4,0 - 11,0 | 11,0 - 15,5 | > 15,5 | |
| | Circular ACI | Semicircular ASC | Semialongado ASA | Alongado AAL | | Circular ICI | Semicircular ISC | Semialongado ISA | Alongado IAL | |
| Angularidade | < 2.100 | 2.100 - 4.000 | 4.000 - 5.400 | > 5.400 | | < 1.260 | 1.260 - 4.080 | 4.080 - 7.180 | > 7.180 | |
| | Arredondado AAR | Subarredondado ASD | Subangular ASB | Angular AAG | | Arredondado IAR | Subarredondado ISD | Subangular ISB | Angular IAG | |
| Esfericidade | < 0,6 | 0,6 - 0,7 | 0,7 - 0,8 | > 0,8 | | < 0,5 | 0,5 - 0,7 | 0,7 - 0,9 | > 0,9 | |
| | Achatado/ Alongado ACH | Pouco esférico APE | Moderadamente e esférico AME | Muito esférico AMT | | Achatado/ Alongado ICH | Baixa esfericidade IBE | Esfericidade moderada IEM | Alta esfericidade IAE | |
| Textura Superficial | < 165 | 165 - 275 | 275 - 350 | 350 - 450 | > 460 | < 260 | 260 - 440 | 440 - 600 | 600 - 825 | > 825 |
| | Polido APO | Macio AMA | Pouco rugoso APR | Moderado rugoso AMR | Muito rugoso AMO | Polido IPO | Macio IMA | Baixa rugosidade IBR | Rugosidade moderada IRM | Alta rugosidade IAR |

Entre as vantagens do sistema AIMS 2, destacam-se (AL ROUSAN, 2004):

- Captura imagens e analisa a forma de uma vasta gama de tamanhos e tipos de agregados (graúdos e finos), com ajuste de resolução das imagens para minimizar a influência do tamanho das partículas nos resultados;

- Determina medidas de diversas propriedades, tais como forma, angularidade e textura, para diferentes tamanhos de agregados;

- Permite análises bidimensionais e tridimensionais, de acordo com o tamanho das partículas;

- Utiliza técnicas de análise de imagem que são baseadas em conceitos científicos;

- Fornece resultados de características morfológicas como distribuições cumulativas e não como valores médios;

- Tem operação rápida, automatizada por computador, precisa e prática;

- Pode ser usado em laboratórios no campo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

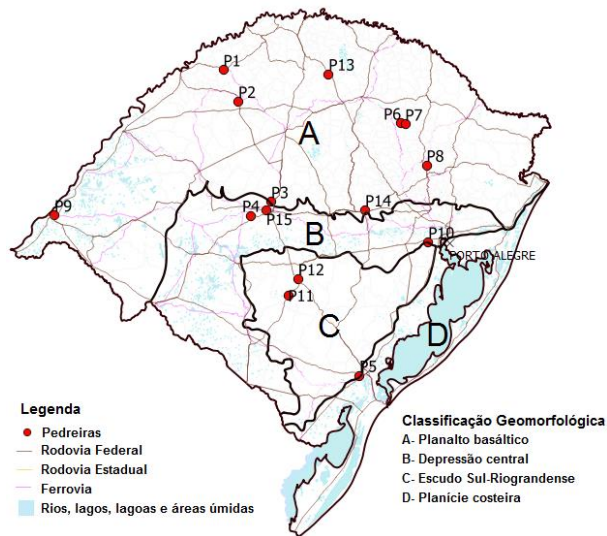
3.1 Materiais utilizados

Os materiais empregados nesta pesquisa são agregados de 15 britagens utilizados na produção de 24 misturas asfálticas densas utilizadas em obras rodoviárias no estado do Rio Grande do Sul.

Os materiais granulares utilizados na produção das misturas foram coletados diretamente das unidades de produção, quando efetuada a coleta dos concretos asfálticos. Para esta pesquisa, foi formado um banco de dados de agregados analisados no AIMS2, composto por 15 britagens, 12 agregados de diferentes tipos de rocha (Tabela 3), oriundos de diferentes regiões e formações geológicas, (Figura 2).

De acordo com a Tabela 3, dois agregados avaliados são compostos da mistura de materiais de diferentes britagens.

Figura 2 – Localização das britagens avaliadas



3.2 Procedimento experimental

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização de propriedades morfológicas dos agregados: os recomendados nas especificações de serviço do DAER e DNIT: lamelaridade e índice de forma, respectivamente, além do Processamento Digital de Imagem, utilizando sistema AIMS 2, para a caracterização de propriedades de forma, angularidade e textura.

Ensaio das especificações brasileiras

Foram utilizados os agregados das frações 1", 3/4" e 3/8", que compõem as misturas asfálticas para determinação do índice de forma e lamelaridade.

Para o DNIT, a forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f), de acordo com o ensaio descrito no método DNER-ME 086/94. Esse índice varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade, quando $f = 1,0$, e lamelar, quando $f = 0,0$.

Tabela 3 – Classificação das rochas e frações avaliadas

| Pedreira | Tipo de agregado | Frações de agregados avaliadas | | | | | |
|----------|---------------------|--------------------------------|----|------|------|----------------------|--------------------|
| | | 1 ^{1/2} " | 1" | 3/4" | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | Pó de pedra (fino) |
| P1 | Basalto | | | X | X | X | |
| P2 | Basalto com olivina | | | X | X | X | |
| P3 | Riodacito | | | X | X | X | |
| P4 | Basalto | | | X | X | X | |
| P5 | Sienogranito | | | X | X | X | |
| P6/P7/P8 | Dacito | | | X | X | X | |
| P9 | Olivina-Basalto | | | X | X | X | |
| P10 | Sienogranito | | | X | X | X | |
| P11/P12 | Mármore | | | X | X | X | |
| P13 | Olivina-Diabasio | | X | X | X | X | X |
| P14 | Andesito | | | X | X | X | |
| P15 | Diabásio | | | X | X | X | |

O ensaio consiste em avaliar a forma dos agregados, por meio da relação entre suas arestas, analisando-se a cubicidade através da passagem dos agregados por uma sequência de crivos de abertura circular e, posteriormente, o

seu achatamento, passando-os por um crivo linear.

Já para o DAER, o ensaio para determinar o índice de lamelaridade é o exigido pela norma DAER/RS-EL 108 de 2001. A lamelaridade pode ser definida como um

parâmetro de forma, que visa determinar se as partículas são alongadas (lamelares) ou não; quanto maior o valor, mais alongadas elas são. Essa norma propõe analisar as partículas, passando-se uma amostra por uma placa com aberturas padronizadas, classificando-as como retidas e passantes das aberturas correspondentes.

Ensaio usando o sistema AIMS 2

O AIMS 2 ainda não possui norma americana ou brasileira. No entanto, o ensaio vem sendo realizado de acordo com a classificação de agregados desenvolvida por Al Rousan (2004 apud BASTOS; FERREIRA; SOARES, 2015).

Figura 3 - Equipamento AIMS 2



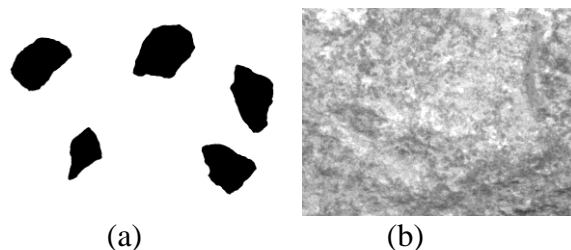
Fonte: Pazos (2015).

O equipamento utilizado para ensaio é o AIMS 2 (Figura 3), versão mais moderna do equipamento com configuração de plataforma giratória para posicionamento dos agregados, disponível no laboratório da COPPE. O sistema Digital de Aquisição e Análise de Imagens possui: Computador para captura de imagens digitais com ampliação variável e software para análise das imagens; Câmera e sistema óptico com capacidade de resolução para todos os tamanhos de partículas; Sistema para posicionar as partículas para a captura das imagens; Sistema de foco automático da imagem (de acordo com o tamanho nominal das partículas) Sistema para a determinação de medidas tridimensionais X, Y,Z (mm) Sistema para determinar e remover da análise partículas que apresentam contato entre si;

Sistema de suporte para as partículas (bandejas) podendo apresentar uma leve reentrância para facilitar o posicionamento das partículas; Sistema de iluminação variável para iluminação superior dos materiais.

Desse modo, os procedimentos foram os mesmos usados por Pazos (2015), consistindo nas seguintes etapas: os agregados neste estudo (para cada britagem) foram peneirados, lavados, secos e separados de acordo com o tamanho nominal dos grãos e o número de partículas sugeridas pelo manual do equipamento, conforme mostrados na Tabela 4. Durante os ensaios, as partículas de agregados foram posicionadas nas ranhuras de bandejas circulares, como mostrado na Figura 3. Depois do alinhamento das partículas nas bandejas, a câmera de alta resolução e o sistema de iluminação do AIMS 2 foram usados para capturar imagens dos agregados. (Figura 4)

Figura 4 – Imagem do AIMS 2 em (a) 2D e (b) 3D



Fonte: Aragão et. al. (2016)

Partículas em contato não foram consideradas na análise, uma vez que o sistema AIMS 2 possui um algoritmo que desconsidera as que se tocam e as que não se enquadram na área do gabarito de leitura, para evitar que sejam interpretadas pelo sistema como uma única partícula com propriedades diferentes. Como resultados, o sistema AIMS 2 fornece informações de angularidade, esfericidade, características de achatamento, alongamento e textura, para os agregados graúdos, ou seja, partículas medindo entre

4,75 mm e 37,5 mm, e angularidade e forma, para os agregados medindo entre 0,075 mm e 4,75 mm.

Tabela 4 - Quantidades mínimas de partículas para ensaios no sistema AIMS 2

| Tamanho da peneira | Número de partículas sugerido |
|--------------------|-------------------------------|
| 25,0 mm (1") | 50 |
| 19,0 mm (3/4") | 50 |
| 12,5 mm (1/2") | 50 |
| 9,5 mm (3/8") | 50 |
| 6,35 mm (1/4") | 50 |
| 4,75 mm (#4) | 50 |
| 2,36 mm (#8) | 150 |
| 1,18 mm (#16) | 150 |
| 0,60 mm (#30) | 150 |
| 0,30 mm (#50) | 150 |
| 0,15 mm (#100) | 150 |
| 0,075 mm (#200) | 150 |

Fonte: Pazos (2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são demonstrados e analisados os resultados encontrados a partir da realização de ensaios tradicionais de morfologia do agregado, bem como os resultados do ensaio AIMS2 para caracterização de forma, angularidade e textura.

O banco de dados é formado por agregados de 12 mineralogias oriundas de diferentes regiões geológicas do estado do Rio Grande do Sul, como apresentado na Tabela 3 e na Figura 2.

4.1 Resultados dos Ensaios tradicionais

Conforme instrui o DNIT, para atender aos requisitos de utilização em misturas asfálticas, os agregados devem possuir índice de forma acima de 0,5. Observa-se na Tabela 5 que todas as pedreiras e todas as frações avaliadas atendem ao valor de IF estipulado pelo órgão rodoviário, ou seja, valores maiores que 0,5. No entanto vale destacar que as

pedreiras P2 e P15, em sua fração 3/8", tiveram os menores índices, ficando próximo de 0,5, enquanto todos os outros agregados e frações ficaram mais próximas de 1, isto quer dizer, apresentando maior cubicidade.

Já o DAER utiliza os parâmetros provenientes do ensaio para determinar o índice de lamelaridade regido pela norma DAER/RS-EL 108 de 2001. Para atender aos requisitos da norma os agregados devem apresentar valores menores que 50, ou seja, menores índices de lamelaridade indicam melhor cubicidade de suas partículas. Mais uma vez praticamente todas as pedreiras atenderam aos requisitos estabelecidos pela norma, ficando apenas a amostra P2 em sua fração 3/8" com valor acima de 50.

Pode-se perceber que, de modo geral, tanto para o IF como para a lamelaridade, a fração 3/4" é mais cubica e menos lamelar que a fração 3/8" indicando melhores propriedades morfológicas, exceto na P11/P12.

4.2 Resultados ensaios AIMS 2

Por não possuir norma vigente para AIMS 2, seguiram-se os protocolos de análise propostos pelos autores Al Rousan (2004) e Ibiapina et al. (2018), com o intuito de classificar os agregados quanto a sua angularidade, da fração miúda e graúda, esfericidade, textura e forma 2D.

Quanto à esfericidade, em suas propostas os dois autores utilizam nomes diferentes, porém com significados muito semelhantes, por exemplo, pouco esférico e baixa esfericidade. No entanto, os intervalos de valores da proposta de Al Rousan (2004) são menores que os intervalos propostos por Ibiapina et al. (2018), daí resultando algumas divergências quanto à classificação do agregado dentro desta propriedade, como é o caso da amostra P2 onde todas as frações foram classificadas como baixa esfericidade segundo Ibiapina et al. (2018) e

achatado/alongado conforme Al Rousan (2004), nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 5 - Resultados ensaios de IF e Lamelaridade

| Pedreira | Mineralogia | Índice de forma | | | Lamelaridade | | |
|----------|----------------------|-----------------|------|------|--------------|-------|-------|
| | | 1" | 3/4" | 3/8" | 1" | 3/4" | 3/8" |
| P1 | Basalto | - | | 0,79 | - | - | 25,90 |
| P2 | Basalto | - | 0,77 | 0,55 | - | 25,80 | 50,80 |
| P3 | Riodacito | - | 0,94 | 0,78 | - | 9,20 | 27,40 |
| P4 | Basalto ¹ | - | 0,87 | 0,75 | - | 14,80 | 17,80 |
| P5 | Granítica | - | 0,84 | 0,70 | - | 20,70 | 37,00 |
| P6/P7/P8 | Basalto ¹ | - | 0,81 | 0,78 | - | 20,80 | 19,20 |
| P9 | Basalto ¹ | - | 0,94 | 0,72 | - | 9,70 | 27,80 |
| P10 | Granítica | - | 0,87 | 0,81 | - | 18,30 | 28,70 |
| P11/P12 | Rocha metamórfica | - | 0,76 | 0,79 | - | 29,70 | 17,60 |
| P13 | Diabásio | 0,80 | 0,92 | 0,82 | 23,40 | 8,20 | 12,50 |
| P14 | Basalto ¹ | - | 0,83 | 0,71 | - | 24,50 | 29,50 |
| P15 | Basalto ¹ | 0,70 | 0,73 | 0,66 | 28,90 | 26,25 | 32,60 |

Ao se analisar a Tabela 6 e Tabela 7, quanto à angularidade do miúdo e angularidade do grão, tanto para a classificação de Al Rousan (2004) quanto para a de Ibiapina et al. (2018), todos os agregados em todas as frações estudadas foram designados como subarredondados. Para essa propriedade ambos utilizaram as mesmas designações.

Quanto à textura, em suas propostas, os dois autores utilizam novamente nomes diferentes, porém com significados muito semelhantes, por exemplo, pouco rugoso e baixa rugosidade. No entanto, os intervalos de valores da proposta de Al Rousan (2004) são menores e com limites mais baixos que os intervalos propostos por Ibiapina et al. (2018). Essa diferença significativa de valores dos intervalos promove, para essa propriedade, uma divergência maior na classificação das amostras, como pode ser observado na Tabela 6 e Tabela 7, por exemplo, todas as frações das pedreiras P1, P2, P4, P13 e P14 classificaram-se como rugosidade moderada para Ibiapina et al. (2018) e muito rugoso para Al Rousan

(2004). Outro exemplo, P5 em todas as suas frações classificou-se como polido segundo Ibiapina et al. (2018) e como macios segundo Al Rousan (2004). Os menores valores de textura foram encontrados nos agregados provenientes de rochas graníticas, indicando a influência da mineralogia nesta propriedade e consequentemente no comportamento das misturas asfálticas.

Para a Forma 2D ambos os autores utilizaram a mesma designação para classificar as amostras, porém, mais uma vez os intervalos estipulados por Ibiapina et al (2018) são maiores que os propostos por Al Rousan (2004) resultando em algumas divergências na classificação da amostra. Segundo a proposta de Ibiapina et al. (2018) todos os agregados e todas as suas frações são classificados quanto a forma 2D como semicirculares. P2, P5, P10, P11/P12 e P15 todas as frações foram classificadas como semialongados conforme proposta de Al Rousan (2004). A P4 e P6/P7/P8 a fração 3/8" é semicircular e o pó de pedra grosso foi classificado como semialongado. P1 e P3 todas as frações foram

classificadas como semicirculares de acordo com Al Rousan (2004). A fração 3/8” de P9 classificou-se como semialongada, enquanto o pó de pedra grosso classificou-se como semicircular. Para a P13, 3/8” e pó de pedra fino classificaram-se como semicircular e o pó de pedra grosso como semialongado (Tabela 6 e Tabela 7).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Parâmetros como índice de forma e lamelaridade são empregados na análise do intertravamento das partículas nas misturas e sua capacidade de quebra durante os processos produtivos e de desempenho futuro. Quando analisados tais ensaios, tradicionais e já normatizados no Brasil, percebe-se que as 12 amostras de agregados atendem aos requisitos estabelecidos pela norma do DNIT (DNER-ME 086/94) e apenas P2 não atende aos requisitos do DAER (DAER/RS-EL 108 /01).

Dependendo das propriedades necessárias em um determinado projeto, a seleção e aplicação dos agregados é bastante heterogênea, portanto categorizar um material torna-se primordial para sua correta seleção. Diante do exposto, propostas como as dos autores Ibiapina et al (2018) e Al Rousan (2004) são bastante pertinentes. Como ainda não há normatização para o ensaio de *AIMS 2* encontram-se divergências e convergências, nestas duas propostas em análise, quanto à classificação dos agregados. Em algumas propriedades como Forma 2D e Esfericidade, por exemplo, não somente na nomenclatura, mas principalmente pelo fato dos intervalos definidos pelos autores Al Rousan (2004) e Ibiapina et al. (2018) serem distintos houveram conflitos nas designações dos agregados. Já a propriedade da angularidade, tanto do graúdo quanto do miúdo, estas divergências não acontecem, sendo todos os agregados classificados com a mesma designação.

Conclui-se que os agregados em utilização no estado do RS apresentam, de modo geral, propriedades morfológicas semelhantes, indicando adequabilidade na utilização de misturas asfálticas.

Agradecimentos

Agradecemos à ANP/Petrobras pela infraestrutura laboratorial e a CAPES e ao CNPq pelas bolsas de pesquisa disponibilizadas.

5. REFERÊNCIAS

AL ROUSAN, T. M. *Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system*. 2004. 229f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Texas A&M University, College Station, TX, 2004.

ARAGÃO, F. T. S.; PAZOS, R. G.; MOTTA, L.; KIM, Y.; NASCIMENTO, L. A. H. Effects of morphological characteristics of aggregate particles on the mechanical behavior of bituminous paving mixtures. *Construction and Building Materials*. 123. 444-453. 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.013. 2016.

BAHIA, H.U. **Asphalt Mixture Visualization - iPas2 Software and Characterization of Aggregate Skeleton** (Apresentação). In: Congresso Brasileiro de Reologia, Aracaju. 2013.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BASTOS, J. B. S. et al. **Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo**. *Revista Transportes*, v. 23, n. 3. p. 44-55, 2015.

- Bessa, I. S.; Castelo Branco, V. T. F. e Soares, J. B. **Caracterização de agregados convencionais e alternativos utilizando técnicas de processamento digital de imagens.** Anais da XXIII ANPET, Vitória, ES. 2009.
- BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales.** 2014. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.
- DAER. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **DAER/RS - ES-P 16/91:** Concreto asfáltico. Porto Alegre: DAER, 1991.
- DAER. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **DAER/RS - EL 108/01:** Determinação do índice de lamelaridade. Porto Alegre: DAER, 2001.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER - ME 086/94:** Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. **DNIT 031/2006 - ES:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.
- FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no rio grande do sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2018.
- IBIAPINA, D. S.; BRANCO, V. T. F. C.;
- DIÓGENES, L. M.; MOTTA, L. M. G. da; FREITAS, S. M. de. **Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil.** Revista Transportes. V. 26, n. 4, p. 116-128, 2018.
- LUGO, A. E. A.; MERCADO, E. A. E.; SPINEL, S. C. **Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados.** Revista Ingeniería e Investigación, v. 28, n. 2, p. 142-151, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092008000200017&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 25 de março. 2019.
- MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L. **Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance.** In: Transportation Research Record 1757. Journal of the Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, 148-156. <http://dx.doi.org/10.3141/1757-17>. 2001.
- MENDES, L. O. **Utilização do Método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas.** 2011. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.
- PAZOS, A. G. **Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas.** 2015. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

Tabela 6 - Resultados ensaios AIMS 2

| Propriedades Morfológicas dos Agregados | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|------|------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|---------|---------|----------------------|---------|--------|--------|----------------------|----------|----------------------|--------------------|
| Pedreiras | Esfericidade | | | | Angularidade do Miúdo | | | Angularidade do Graúdo | | | | Textura | | | | Forma 2D | | |
| | 1" | 3/4" | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | Pó de pedra (fino) | 1" | 3/4" | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | 1" | 3/4" | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | Pó de pedra (fino) |
| P1 | - | - | 0,71 | 0,70 | 2858,32 | 2741,14 | - | - | - | 2618,07 | 2890,27 | - | - | 679,72 | 724,27 | 7,64 | 7,72 | - |
| P2 | - | - | 0,55 | 0,58 | 3290,70 | 3408,00 | - | - | 3000,50 | 3133,70 | 3183,20 | - | 737,00 | 774,10 | 753,70 | 9,27 | 8,39 | - |
| P3 | - | 0,75 | 0,80 | - | 3214,14 | 3200,44 | - | - | 2915,36 | 3081,58 | - | - | 349,39 | 369,26 | - | 7,80 | 8,00 | - |
| P4 | - | 0,77 | 0,80 | 0,82 | 2765,35 | 3434,19 | - | - | 2762,40 | 2759,03 | 2634,29 | - | 506,51 | 624,88 | 704,88 | 7,38 | 8,49 | - |
| P5 | - | 0,64 | 0,64 | 0,66 | 3691,08 | 2971,48 | - | - | 3088,08 | 3286,51 | 3418,22 | - | 211,71 | 196,41 | 168,45 | 9,15 | 8,56 | - |
| P6/P7/P8 | - | 0,67 | 0,72 | - | 2844,29 | 3065,07 | - | - | 2970,39 | 2973,40 | - | - | 561,62 | 465,37 | - | 7,83 | 8,66 | - |
| P9 | - | 0,72 | 0,72 | 0,73 | 3011,00 | 3101,40 | - | - | 2619,62 | 2816,03 | 2745,10 | - | 527,88 | 567,00 | 521,91 | 8,59 | 7,99 | - |
| P10 | - | 0,64 | 0,65 | 0,69 | 3605,24 | 3016,53 | - | - | 3160,87 | 3219,58 | 3200,04 | - | 354,79 | 253,47 | 240,18 | 9,64 | 8,74 | - |
| P11/P12 | - | 0,63 | 0,65 | - | 3278,34 | 2791,68 | - | - | 3265,86 | 2956,56 | - | - | 470,97 | 485,59 | - | 9,20 | 8,36 | - |
| P13 | 0,66 | 0,73 | 0,76 | 0,68 | 3060,42 | 2764,61 | 2765,70 | 2837,62 | 2478,66 | 2592,01 | 3198,96 | 533,58 | 614,57 | 661,48 | 653,84 | 7,44 | 8,11 | 7,96 |
| P14 | - | 0,65 | * | - | * | * | - | - | 2829,41 | * | - | - | 701,66 | * | - | * | * | - |
| P15 | - | 0,70 | 0,73 | 0,69 | 3001,70 | 2696,17 | - | - | 2863,51 | 2735,66 | 3046,18 | - | 608,65 | 428,74 | 532,43 | 8,00 | 8,10 | - |

Fonte: Autores (2019).

SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL
GEORS 2019

Tabela 7 – Classificação dos agregados de acordo com as propostas de Al Rousan (2004) e Ibiapina et al. (2018)

| Propriedades Morfológicas dos Agregados | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|----------|----------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|----------|----------------------|----------|----------------------|--------------------|
| Pedreiras | Esfericidade | | | | Angularidade do Miúdo | | | Angularidade do Graúdo | | | | Textura | | | | Forma 2D | | |
| | 1" | 3/4" | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | Pó de pedra (fino) | 1" | 3/4" | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | 1" | 3/4" | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | 3/8" | Pó de pedra (grosso) | Pó de pedra (fino) |
| P1 | - | - | IEM; AME | IBE; APE | | ISD; ASD | - | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | - | | IRM; AMO | IRM; AMO | ISC; ASC | ISC; ASC | - |
| P2 | - | - | IBE; ACH | IBE; ACH | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | - | IRM; AMO | IRM; AMO | IRM; AMO | ISC; ASA | ISC; ASA | - |
| P3 | - | IEM; AME | IEM; AMT | - | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | IMA; APR | IMA; AMR | - | ISC; ASC | ISC; ASC | - |
| P4 | - | IEM; AME | IEM; AMT | IEM; AMT | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | - | IBR; AMO | IRM; AMO | IRM; AMO | ISC; ASC | ISC; ASA | - |
| P5 | - | IBE; APE | IBE; APE | IBE; APE | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | - | IPO; AMA | IPO; AMA | IPO; AMA | ISC; ASA | ISC; ASA | - |
| P6/P7/P8 | - | IBE; APE | IEM; AME | - | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | IBR; AMO | IBR; AMO | - | ISC; ASC | ISC; ASA | - |
| P9 | - | IEM; AME | IEM; AME | IEM; AME | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | - | IBR; AMO | IBR; AMO | IBR; AMO | ISC; ASA | ISC; ASC | - |
| P10 | - | IBE; APE | IBE; APE | IBE; APE | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | - | IMA; AMR | IPO; AMA | IPO; AMA | ISC; ASA | ISC; ASA | - |
| P11/P12 | - | IBE; APE | IBE; APE | - | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | IBR; AMO | IBR; AMO | - | ISC; ASA | ISC; ASA | - |
| P13 | IBE; APE | IEM; AME | IEM; AME | IBE; APE | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | IBR; AMO | IRM; AMO | IRM; AMO | IRM; AMO | ISC; ASC | ISC; ASA | ISC; ASC |
| P14 | - | IBE; APE | * | - | * | * | - | - | ISD; ASD | * | - | - | IRM; AMO | * | - | * | * | - |
| P15 | - | IBE; APE | IEM; AME | IBE; APE | ISD; ASD | ISD; ASD | - | - | ISD; ASD | ISD; ASD | ISD; ASD | - | IRM; AMO | IMA; AMR | IBR; AMO | ISC; ASC | ISC; ASA | - |

Nota: Siglas correspondentes às classificações de Al Rousan (2004) e Ibiapina et al. (2018) expressas na Tabela 2.

Fonte: Autores (2019).