

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

Daniele Soares Ibiapina¹, Verônica Teixeira Franco Castelo Branco², Lara Marques Diógenes³,
Laura Maria Goretti da Motta⁴, Sílvia Maria de Freitas⁵

¹Universidade Federal do Ceará, Brasil, daniele@det.ufc.br

²Universidade Federal do Ceará, Brasil, veronica@det.ufc.br

³Universidade Federal do Ceará, Brasil, laramdiogenes@det.ufc.br

⁴Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, laura@coc.ufrj.br

⁵Universidade Federal do Ceará, Brasil, silvia@dema.ufc.br

Recebido:

13 de novembro de 2017

Aceito para publicação:

9 de abril de 2018

Publicado:

31 de dezembro de 2018

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chaves:

Propriedades de forma de agregados,
Processamento digital de imagem (PDI),
Análises estatísticas.

Keywords:

Shape properties of aggregates;
Digital Image Processing (DIP).
Statistical analysis.

DOI:10.14295/transportes.v26i4.1510

RESUMO

Os agregados minerais constituem cerca de 90% do volume das misturas asfálticas. O comportamento destas, com relação aos principais defeitos encontrados nos pavimentos (deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico), está diretamente ligado às características de seus agregados constituintes. O *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2) está estabelecido como uma das principais técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) para a caracterização das propriedades de forma de agregados utilizadas em Infraestrutura de Transportes, por usar métodos diretos e eficientes. Diante da importância de se avaliar essas características, esta pesquisa teve como objetivo principal propor um sistema de classificação das propriedades de forma baseado nos resultados do AIMS2, a partir de um banco de dados composto por agregados de mineralogias distintas, oriundos de diferentes localizações no Brasil. Para gerar os valores limites da classificação proposta, foi utilizado o método estatístico de *cluster*. Por fim, comparou-se a classificação proposta com outras existentes e os resultados mostraram que um agregado pode ser classificado de maneira diferente, dependendo do sistema adotado. Essa constatação é importante, pois a classe em que um material é categorizado pode ser determinante para a sua seleção, no âmbito de projeto, a depender das propriedades requeridas para sua aplicação.

ABSTRACT

The constituent aggregates of the asphalt mixtures correspond to about 90% of their volumes. The behavior of these mixtures, concerning the main problems of the pavement (permanent deformation, fatigue cracking and thermal cracking), is directly related to the characteristics of these aggregates. *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2) is established as one of the main techniques of Digital Image Processing (DIP) for the characterization of the shape properties of aggregates used in Transportation Infrastructure, using direct and efficient methods. Considering the importance of evaluating these characteristics, this research aimed to propose a system of classification of the shape properties based on the results of AIMS2, using a database composed of aggregates of distinct mineralogies, coming from different locations in Brazil. To generate the limit values of the proposed classification, the cluster statistical method was used. Finally, the proposed classification was compared to other existing classifications and the results showed that an aggregate can be classified differently, depending on the system adopted. This conclusion is important because the class in which a material is categorized can be determinant for its selection, in the project scope, depending on the properties required for its application.



1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (Abeda), mais de 90% das rodovias nacionais pavimentadas utilizam revestimento asfáltico como parte da estrutura dos denominados pavimentos flexíveis. Os componentes das misturas asfálticas (agregados, ligante asfáltico e vazios) formam uma microestrutura complexa da qual os agregados correspondem a cerca de 90%, em volume, e constituem o esqueleto mineral, o qual depende das propriedades de forma (forma, angularidade e textura), dos tamanhos e das proporções das partículas. 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).

O Processamento Digital de Imagens (PDI) está estabelecido como ferramenta para a caracterização das propriedades de forma de agregados por usar métodos diretos e eficientes (Masad *et al.*, 2001). Entre as principais técnicas de PDI utilizadas na infraestrutura de transportes, está o uso do *Aggregate Imaging Measurement System 2* (AIMS2). Esse equipamento possui a vantagem de fornecer a distribuição completa das características de forma para uma amostra de agregado, não somente valores médios, o que permite a classificação de agregados com diferentes propriedades de forma (Al Rousan, 2004). Esse método de PDI destaca-se dos demais por ser capaz de caracterizar as propriedades de forma a partir de análises de imagens 2D ou 3D das partículas de agregados (Al Rousan, 2004; Al Rousan *et al.*, 2005; Taylor *et al.*, 2006; Masad *et al.*, 2007). O AIMS2 possui duas propostas de normatização em andamento, 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.

Bessa (2012) e Araujo *et al.* (2014) avaliaram os resultados das análises de agregados locais, realizadas no AIMS2 e constataram semelhanças com relação aos valores médios de suas propriedades de forma, ou seja, os agregados foram posicionados, constantemente, nas mesmas faixas da classificação proposta por Al Rousan (2004). Essa constatação levou a questionamentos relacionados ao fato de que os agregados brasileiros poderiam ter características diferentes daquelas encontradas para os agregados americanos, os quais compuseram o banco de dados para a elaboração da classificação proposta por Al Rousan (2004). Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo principal propor um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados, a partir de um banco de dados composto por materiais brasileiros. Espera-se que, no futuro, essa classificação possa ser utilizada para estabelecer critérios objetivos de seleção de agregados, no âmbito de projeto de misturas asfálticas, a fim de otimizar o comportamento mecânico dos revestimentos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Masad (2005), a forma de um agregado está relacionada às suas dimensões, a angularidade relaciona-se aos cantos existentes e a textura, às irregularidades da sua superfície. De acordo com Masad *et al.* (2003), Masad *et al.* (2007) e Mahmoud *et al.* (2010), os métodos de ensaio estabelecidos pela metodologia *Superior Performing Asphalt Pavements* (Superpave) são demorados, possuem resultados dependentes do operador e geram interpretações subjetivas, por vezes baseadas em caracterização indireta das propriedades, além de adotarem critérios de classificação questionáveis.

Há vários estudos realizados no Brasil com o uso do AIMS2, para análise das propriedades

de forma de agregados ao longo dos últimos anos. Pesquisadores constataram a importância dessa ferramenta para as mais diversas aplicações, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1: Estudos realizados no Brasil com a utilização do AIMS2

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

Al Rousan (2004) elaborou a metodologia de classificação das propriedades de forma de agregados a partir dos resultados provenientes do AIMS2. Mahmoud *et al.* (2010) realizaram uma customização dessa classificação para os parâmetros de angularidade e de textura superficial de agregados oriundos do Estado de Illinois, nos Estados Unidos. Esse estudo foi motivado pela constatação de que muitos agregados estavam sendo categorizados em classes que não correspondiam ao seu real desempenho quando utilizados em pavimentos asfálticos, previamente monitorados, analisados segundo a classificação proposta por Al Rousan (2004).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

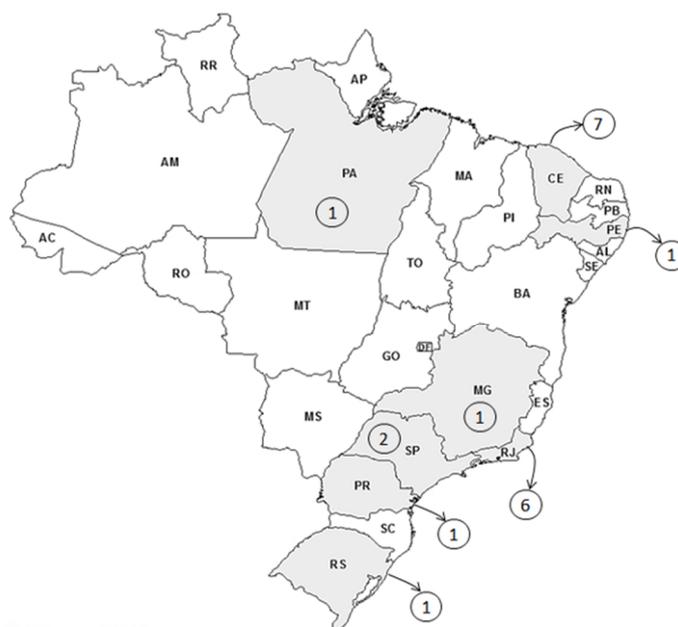
Para esta pesquisa, foi formado um banco de dados de agregados analisados no AIMS2, composto por 20 agregados de diferentes tipos de rocha (Tabela 2), oriundos de diferentes localidades, abrangendo 8 estados brasileiros (Figura 1). Os números nos círculos da Figura 1 correspondem à quantidade de agregados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

Tabela 2: Local, tipo e tamanho dos agregados do banco de dados utilizado nesta pesquisa

Agregado	Local de origem	Tipo	Tamanho do agregado (mm)					
			12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,3
1	Santarém, PA	Seixo Rolado	x	x	x	x	x	x
2	Nova Iguaçu, RJ	Granito-gnaiss	x	x	x	x	x	x
3	São Carlos, SP	Basalto	x	x	x	x	x	x
4	Salgueiro, PE	Granito	x	x	x	x	x	x

Tabela 2: Local, tipo e tamanho dos agregados do banco de dados utilizado nesta pesquisa (continuação)

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

**Figura 1:** Quantidade de agregados do banco de dados oriundos dos estados brasileiros

3.2. Método

Para elaborar a metodologia da classificação das propriedades de forma de agregados para o AIMS2, Al Rousan (2004) utilizou um banco de dados composto por 13 agregados graúdos e 5 agregados miúdos, provenientes de diferentes estados americanos. O citado autor utilizou o procedimento de *cluster* hierárquico através do método de Ward, com a distância euclidiana ao quadrado, para estabelecer os limites dessa classificação.

Mahmoud *et al.* (2010) customizaram a classificação das propriedades de forma proposta por Al Rousan (2004). Os autores reavaliaram somente os valores limites das propriedades de angularidade e de textura superficial, utilizando agregados de diferentes mineralogias encontrados no estado de Illinois, nos Estados Unidos. Foi realizada uma análise estatística com o uso do método dos quartis e do método não hierárquico de *cluster* (K-médias), para determinar os

valores limites da classificação customizada. Os autores adotaram os resultados gerados pelo método dos quartis, pelo fato de o *cluster* (K-médias) categorizar na classe de “alta angularidade” e de “alta textura” apenas partículas com valores extremamente altos dessas propriedades.

A classificação proposta nesta pesquisa foi realizada com o uso do *software* R (R Core Team, 2015), a partir das distribuições de propriedades de forma dos agregados constituintes do banco de dados organizado para esta pesquisa. Foram utilizados como dados de entrada os resultados de cada partícula analisada (para cada agregado, cada fração e cada propriedade, em um total de 12.887 partículas). Para gerar os valores limites, aplicaram-se métodos hierárquicos de *cluster* (Ward, mediana, centroide e média) em cada propriedade, separadamente. Adotou-se a distância euclidiana ao quadrado como medida de proximidade entre as partículas dentro dos *clusters*. Utilizou-se o maior valor da correlação cofenética (Sokal e Rohlf, 1962) como critério de escolha do método mais adequado para cada propriedade de forma. A correlação cofenética mede o grau de ajuste entre a matriz de dissimilaridade (matriz das medidas de similaridade, ou seja, distância euclidiana ao quadrado) e a matriz resultante da simplificação devido ao método de agrupamento. Optou-se por utilizar a mesma nomenclatura para as classes e os mesmos números de *clusters* utilizados por Al Rousan (2004), ou seja, quatro classes para as propriedades de angularidade, de esfericidade e de forma 2D e cinco classes para a de textura superficial, por ser esta a propriedade de forma com maior dispersão (Bessa, 2012; Araujo *et al.*, 2014; Diógenes, 2015 e Araujo, 2016).

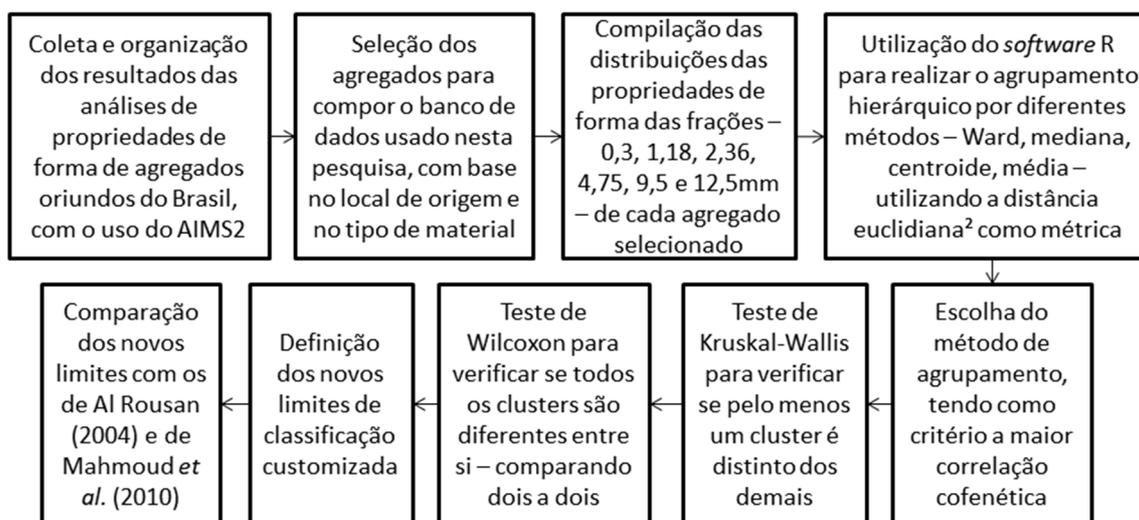


Figura 2: Fluxograma do método utilizado nesta pesquisa

Após a seleção do método de agrupamento para cada propriedade, verificou-se a homogeneidade entre *clusters* pelo teste de Bartlett e a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, que são condições necessárias para se aplicar a análise de variâncias ANOVA. Como esses pré-requisitos não foram satisfeitos, os dados foram tratados como não paramétricos. Foi aplicado, portanto, o teste de Kruskal-Wallis para avaliar a diferença entre os *clusters* e o teste de Wilcoxon para verificar a diferença entre os *clusters*, dois a dois. O nível de significância utilizado em todos os testes foi de 0,05. Após o término das análises estatísticas, foram definidos os valores limites da classificação proposta nesta pesquisa. Por fim, compararam-se os limites supracitados com aqueles das classificações propostas por Al Rousan (2004) e por Mahmoud *et al.*

al. (2010). As atividades realizadas para atingir os objetivos desta pesquisa foram estruturadas de acordo com o fluxograma da Figura 2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O banco de dados foi composto por agregados de mineralogias distintas, oriundos de diferentes fontes do Brasil, conforme foi mostrado na Tabela 2. As amostras constituintes do banco de dados foram rotuladas antes de serem classificadas. A Tabela 3 apresenta as medidas de tendência central e de dispersão das propriedades de forma, por fração, desses agregados. Observou-se que a textura superficial foi a propriedade que apresentou os maiores coeficientes de variação (acima de 55%).

Tabela 3: Medidas descritivas das propriedades de forma por fração

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

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

Utilizou-se o *software* R para realizar o agrupamento hierárquico por quatro diferentes métodos de *cluster*: Ward, média, centroide e mediana. Esses métodos foram aplicados a cada propriedade separadamente e, como critério de escolha, foi utilizado o maior valor de correlação cofenética (Tabela 4). Para a angularidade, a esfericidade e a forma 2D, o método de *cluster* adotado foi o da média, enquanto para a textura adotou-se o de Ward.

Tabela 4: Correlação cofenética dos métodos de agrupamento para cada propriedade

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

Uma vez escolhido o método de agrupamento para cada propriedade, verificou-se que os dados não satisfizeram a homogeneidade entre *clusters* pelo teste de Bartlett, nem a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, portanto, não foi possível aplicar a análise de variâncias ANOVA. Assim, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis e verificou-se que pelo menos um *cluster* era distinto dos demais. Em seguida, aplicou-se o teste de Wilcoxon e verificou-se que havia desigualdade entre os *clusters*, dois a dois (Tabela 5).

A Tabela 6 apresenta a análise descritiva dos clusters. Observou-se que, de forma geral, os clusters de maiores médias mostraram menores dispersões que os clusters de médias mais baixas, para todas as propriedades. Ou seja, as partículas que foram categorizadas nas classes de

médias mais altas encontram-se mais próximas entre si (com maior homogeneidade de resultados) na escala de cada propriedade, enquanto aquelas que estão nas classes mais baixas possuem valores mais distantes entre si, provocando maiores dispersões. Após o término das análises estatísticas, os valores limites da classificação proposta nessa pesquisa foram definidos, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 5: Resultados do teste de Wilcoxon

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

Tabela 6: Medidas descritivas das propriedades de forma por *cluster*

Propriedade	Medida	Cluster				
		1	2	3	4	5
Forma 2D	Média	3,4	7,6	12,1	16,4	-
	DP	0,5	1,5	1,1	0,9	-
	CV (%)	14,8	19,8	9,0	5,6	-
	n	31	9.127	878	52	-
	Frequência (%)	0.31	90.47	8.70	0.52	-
Angularidade	Média	893	3.053	4.955	7.574	-
	DP	271	616	685	388	-
	CV (%)	30,3	20,2	13,8	5,1	-
	n	96	8.612	4.130	49	-
	Frequência (%)	1.05	93.91	4.50	0.53	-
Esfericidade	Média	0,50	0,65	0,79	0,89	-
	DP	0,04	0,05	0,03	0,03	-
	CV (%)	7,6	7,9	4,1	2,8	-
	n	316	1.556	776	133	-
	Frequência (%)	11.36	55.95	27.90	4.78	-
Textura superficial	Média	154	340	511	705	897
	DP	64	49	44	65	47
	CV (%)	41,5	14,5	8,6	9,2	5,2
	n	1.112	764	298	265	152
	Frequência (%)	0.08	51.62	20.13	17.90	10.27

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

Por fim, compararam-se os limites supracitados com aqueles das classificações propostas por Al Rousan (2004) e por Mahmoud *et al.* (2010) (Figura 3). A comparação com a classificação proposta por Mahmoud *et al.* (2010) ficou comprometida, uma vez que os autores utilizaram somente 3 classes (baixa, média e alta) enquanto a proposta nesta pesquisa, baseou-se na mesma quantidade de classes da classificação proposta por Al Rousan (2004) (quatro classes para as propriedades de angularidade, de esfericidade e de forma 2D e cinco classes para a de textura superficial). A classificação proposta neste trabalho apresentou classes extremas com amplitudes menores que aquelas das demais classificações, o que pode estar relacionado à dispersão das distribuições de propriedades e à heterogeneidade entre agregados. Conseqüentemente, as classes intermediárias apresentaram amplitudes maiores. As diferenças de limites

entre as classificações eram esperadas, pois as propriedades de forma são inerentes aos materiais, os quais podem ser distintos em termos de mineralogia, de processo de beneficiamento, entre outros.

Tabela 7: Limites da classificação proposta neste trabalho

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

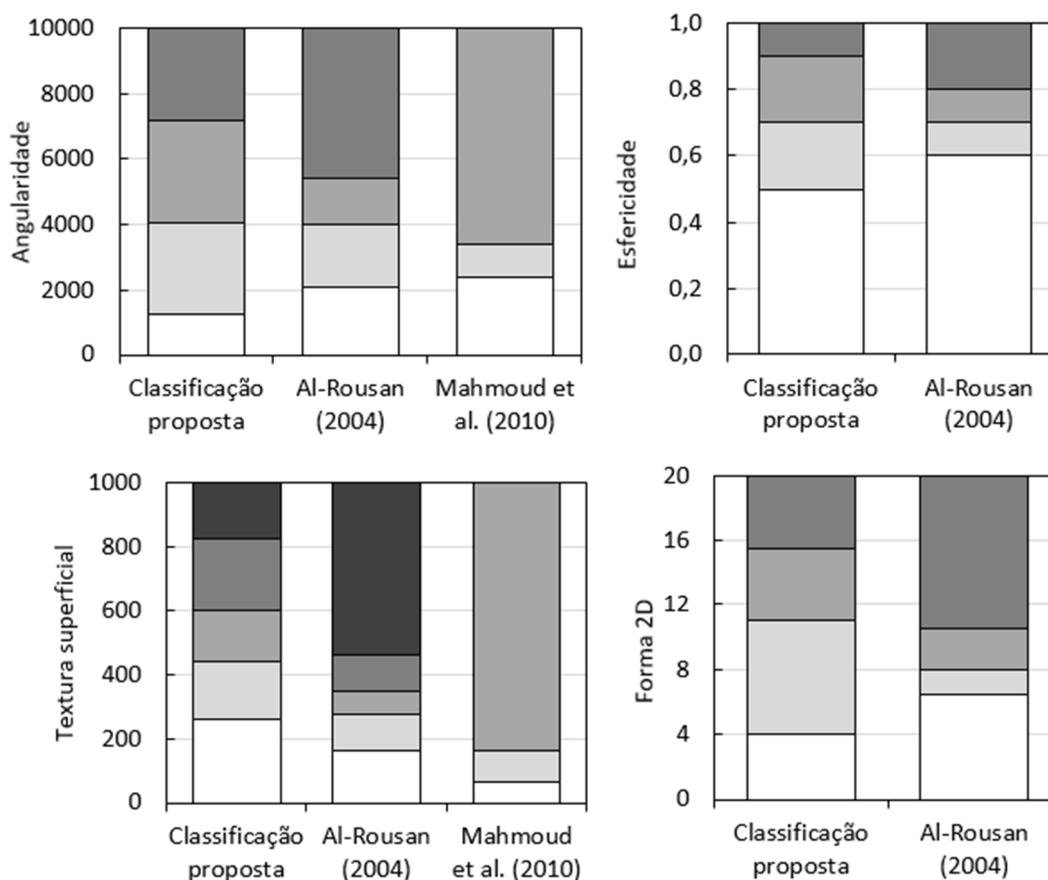


Figura 3: Comparação entre as classificações de propriedades de forma

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

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

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

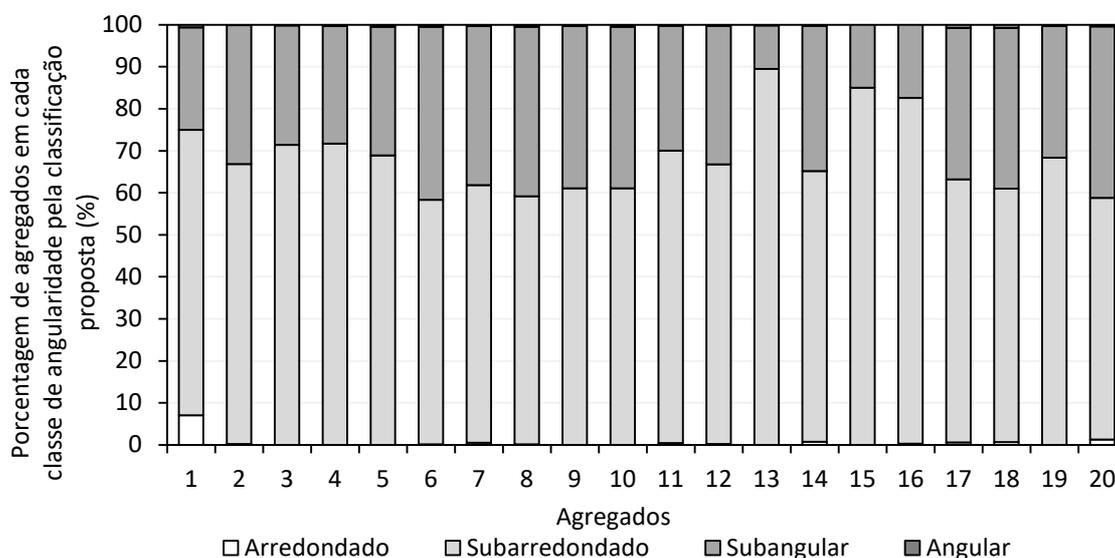


Figura 4: Distribuição das partículas de cada agregado do banco de dados nos grupos de angularidade pela classificação proposta nesta pesquisa

Para exemplificar o exposto acima, calculou-se o percentual de partículas do agregado 8, um gnaïsse proveniente de Maracanaú, CE (Tabela 2), pertencente a cada grupo das classificações de Al Rousan (2004) e da proposta nesta pesquisa para as propriedades de angularidade e textura superficial (Figuras de 4 a 7). Caso a classificação proposta nesta pesquisa seja utilizada (Figura 6), a maior porcentagem de partículas (29%) desse agregado encontra-se na classe “textura moderada”. Utilizando a mesma classificação e a média dos valores de textura (556) como parâmetro, esse agregado é classificado como de “baixa textura”. Caso se utilize a classificação proposta por Al Rousan (2004) (Figura 7), tendo como parâmetro tanto a média dos valores quanto a maior porcentagem de partículas (61%), esse agregado é classificado como de “alta textura”.

As classes extremas da Figura 4 apresentaram percentagens muito baixas devido à existência, nos materiais presentes no banco de dados, de poucas partículas com valores de angularidade muito distantes dos valores das partículas pertencentes aos *clusters* intermediários. Ou seja, apesar da quantidade dessas partículas ser muito pequena, seus valores de angularidade são tão distantes dos demais, que houve a necessidade da criação de *clusters* apenas para elas.

As classes extremas da Figura 4 apresentaram percentagens muito baixas devido à existência, nos materiais presentes no banco de dados, de poucas partículas com valores de angularidade muito distantes dos valores das partículas pertencentes aos *clusters* intermediários. Ou seja, apesar da quantidade dessas partículas ser muito pequena, seus valores de angularidade são tão distantes dos demais, que houve a necessidade da criação de *clusters* apenas para elas.

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

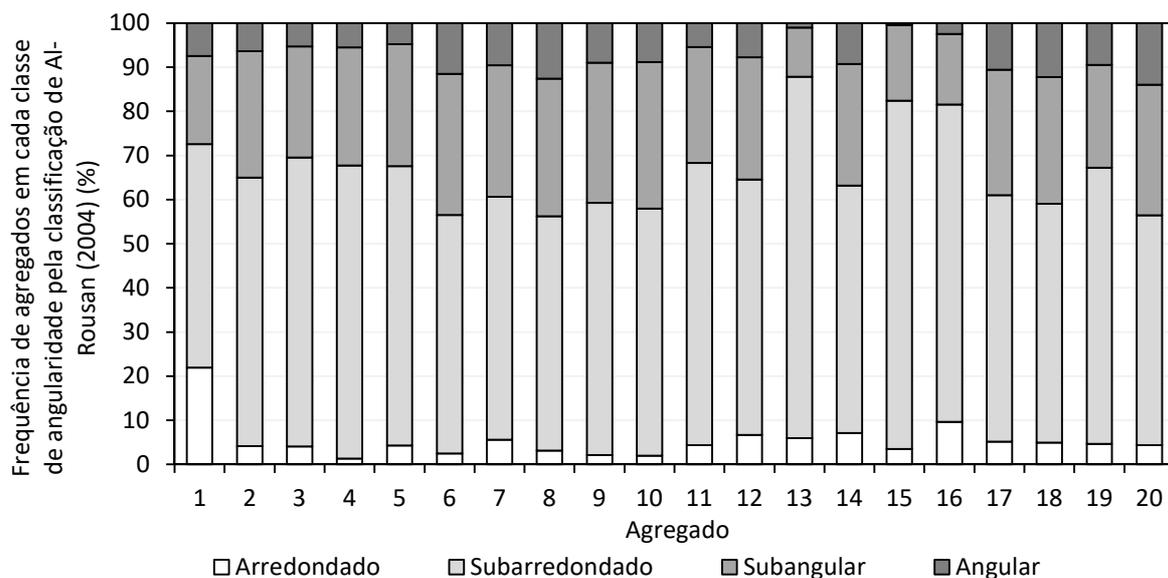


Figura 5: Distribuição das partículas de cada agregado do banco de dados nos grupos de angularidade pela classificação proposta por Al-Rousan (2004).

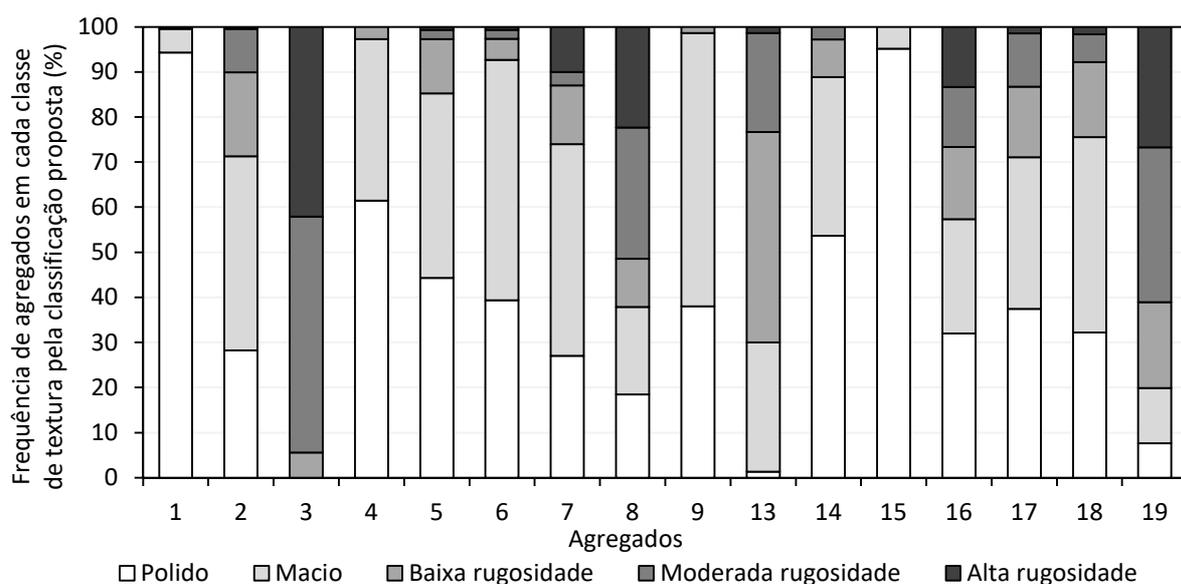


Figura 6: Distribuição das partículas de cada agregado do banco de dados nos grupos de textura superficial pela classificação proposta nesta pesquisa.

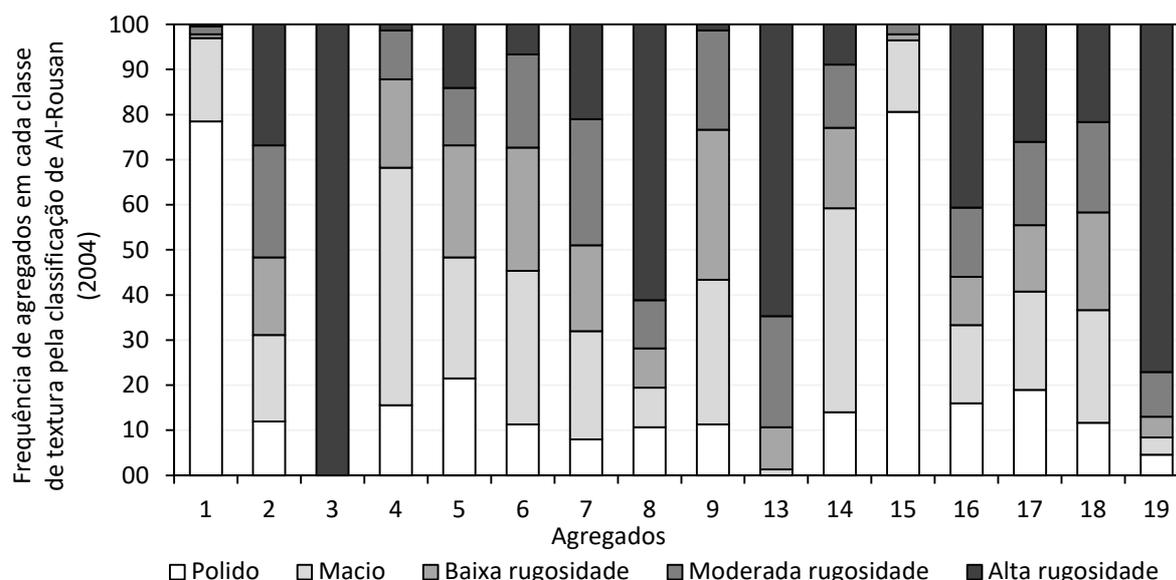


Figura 7: Distribuição das partículas de cada agregado do banco de dados nos grupos de textura superficial pela classificação proposta por Al-Rousan (2004).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa teve como objetivo principal propor uma classificação das propriedades de forma, baseada naquela proposta por Al Rousan (2004), elaborada para o sistema AIMS2, a partir de um banco de dados composto por agregados brasileiros. A motivação para esta pesquisa veio do fato de que esses agregados possuem características diferentes dos agregados americanos utilizados para a elaboração da classificação de Al Rousan (2004). Para tanto, foram selecionados, com base nas informações de origem e tipo de rocha, vinte agregados oriundos de oito estados brasileiros, e os resultados de suas análises realizadas com o uso do AIMS2 foram compilados em um banco de dados.

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

Compararam-se as três classificações de propriedades de forma: Al Rousan (2004), Mahmoud (2010) e a proposta nesta pesquisa. A classificação proposta apresentou classes extremas com amplitudes menores que aquelas obtidas para as demais classificações, o que pode estar relacionado às altas dispersões das distribuições de propriedades e à alta heterogeneidade entre agregados. Observou-se que um agregado pode ser classificado de maneira diferente a depender da classificação adotada. Essa constatação pode evitar, por exemplo, a penalização de agregados que seriam descartados em uma seleção, no âmbito de projeto, dependendo das propriedades requeridas para sua aplicação. Não há conclusão de que existe uma classificação melhor que as outras, entretanto, a classificação proposta nesta pesquisa pode ser mais adequada para os agregados oriundos do Brasil, uma vez que estes compuseram o banco de dados utilizado como base para sua elaboração.

Para trabalhos futuros, sugere-se: incorporar e avaliar agregados provenientes de outros estados do Brasil, para enriquecer o banco de dados composto e calibrar os valores limites propostos; utilizar a classificação proposta para avaliar a influência do processo de britagem nas propriedades de forma de agregados; elaborar especificações técnicas para agregados, baseadas na distribuição das propriedades de forma, ao invés da média das amostras; relacionar as propriedades de forma com parâmetros do esqueleto mineral formado nas misturas asfálticas produzidas em laboratório; utilizar a classificação proposta para comparar os resultados de propriedades de forma dos agregados com os resultados do comportamento mecânico de misturas asfálticas e definir valores limites que descartariam agregados para projetos de misturas asfálticas e para outras aplicações na Engenharia Civil.

REFERÊNCIAS

- AASHTO TP81 (2010) Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO PP64 (2010) Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ALVES, V.A.H.S. (2014) Avaliação da Resistência à Degradação Mecânica de Agregados da Região Metropolitana do Rio de Janeiro por Técnicas Digitais de Imagens. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- AL ROUSAN, T. (2004) Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, College Station, TX. <http://hdl.handle.net/1969.1/1485>.
- AL ROUSAN, T.; MASAD, E.; MYERS, L.; SPEIGELMAN, C. (2005) New Methodology for Shape Classification of Aggregates. Journal of Transportation research Board. Vol.193. <https://doi.org/10.3141/193-02>.
- ARAÚJO, V.M. de C.; BESSA, I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F. (2014) Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens. Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes – XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4842>.
- ARAÚJO, V.M. de C. (2016) Avaliação da Textura de Misturas Asfálticas para uso em Revestimentos Aeroportuários a Partir do Uso do Processamento Digital de Imagens. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- BAHIA, H.U. (2013) Asphalt Mixture Visualization - iPas2 Software and Characterization of Aggregate Skeleton (Apresentação). In: Congresso Brasileiro de Reologia, Aracaju.
- BASTOS, J.B.S. (2016) Considerações sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico. 200 f. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/23173>
- BESSA, I.S. (2012) Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4842>.
- BESSA, I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B.; NOGUEIRA NETO, J.A. (2014) Aggregate Shape Properties and Their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 27, Issue. 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001181](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001181).
- CAVALCANTI, H.P.P. (2016) Avaliação da Degradação de Propriedades de Forma de Agregados Utilizando o Processamento Digital de Imagens. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará, Brasil.
- COSTA, H.N. (2015) Caracterização de Areias de Britagem de Pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza e Avaliação da sua Aplicação no Concreto. 128 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/15541>
- DIÓGENES, D.F., (2016) Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do processamento digital de imagens. 2016. 147 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/21468>
- DIÓGENES, L.M. (2015) Avaliação da Influência da Britagem nas Propriedades de Forma de Agregados por Meio do Processamento Digital de Imagens. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará, Brasil.
- IBIAPINA, D.S. (2016) Avaliação da Relação entre Propriedades de Forma dos Agregados, Parâmetros do Esqueleto Mineral e o Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. Minuta de Qualificação de Doutorado. Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará, Brasil.
- IBIAPINA, D.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; RODRIGUES, C.B.; BESSA, I.S. (2017) Avaliação da Relação entre Angularidade de Agregados e Parâmetros do Esqueleto Mineral de Misturas Asfálticas. XIX CILA-Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Medellín, Colômbia, 27 a 30 de novembro. Poster 317.

- LEANDRO, R.P. (2016) Avaliação do Comportamento Mecânico de Corpos de Prova de Misturas Asfálticas a Quente Resultantes de Diferentes Métodos de Compactação. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. <https://doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-24062016-113652>.
- LIMA, C.D.A. (2016) Estudo da Deformação Permanente de Duas Britas Graduadas para uso em Camadas de Pavimentos. . Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- MAHMOUD, E.M.; 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.
- 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, D.C, 148-156. <http://dx.doi.org/10.3141/1757-17>.
- MASAD, E.A., LITTLE, D.N., TASHMAN, L., SAADEH, S., AL ROUSAN, T.M., SUKHWANI, R. (2003) Evaluation of Aggregate Characteristics Affecting HMA Concrete Performance. Research Report ICAR 203-1. <http://hdl.handle.net/2152/35367>.
- MASAD, E.A. (2005) Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and Applications. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. Project P Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Report nº FHWA/TX-05/5-1707-01-1. <http://tti.tamu.edu/documents/5-1707-01-1.pdf>.
- MASAD, E.A.; AL ROUSAN, T.M.; BATHINA, M.; MCGAHAN, J.; SPIEGELMAN, C. (2007) Analysis of Aggregate Shape Characteristics and its Relationship to Hot Mix Asphalt Performance. Road Materials and Pavement Design, Vol. 8, p. 317-350. <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2007.9690077>.
- MASAD, E.A.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; LITTLE, D.N.; LYTTON, R. (2007) A Unified Method for the Analysis of Controlled-Strain and Controlled-Stress Fatigue Testing. International Journal of Pavement Engineering, vol. 9, pp. 233-246. <http://dx.doi.org/10.1080/10298430701551219>.
- OLIVEIRA, J.A. (2013) Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo. 2013. 139 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11163>
- ONOFRE, F.C. (2012) Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Produzidas com Ligantes Asfálticos Modificados por Ácido Polifosfórico e Aditivos Poliméricos, Enfatizando a Resistência à Deformação Permanente. 2012. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11166>
- PAZOS, A.G.; SACRAMENTO, F.T.; MOTTA, L.M.G. (2015) Efeitos de Propriedades Morfológicas de Agregados no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. 44a. Reunião Annual de Pavimentação, RAPv, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- R CORE TEAM (2015) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- RODRIGUES, A.C. (2013) Avaliação da Influência da Granulometria na Aderência Pneu-Pavimento. 2013. 98 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11176>
- SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. (1962) The Comparison of Dendrograms by Objective Methods. Taxon, 11:33-40
- TAYLOR, M.A.; GARBOCZI, E.J.; ERDOGAN, S.T.; FOWLER, D.W. (2006) Some Properties of Irregular Particles in 3D. Powder Technology, 162, 1-15. 10.1016/j.powtec.2005.10.013.