



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**ENGENHARIA CIVIL**

**ALDAIANNY DE OLIVEIRA MAIA**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE ATIVAÇÃO DO LIGANTE**  
**ASFÁLTICO NAS PROPRIEDADES DO AGREGADO FRESADO**

**FORTALEZA**

**2019**

ALDAIANNY DE OLIVEIRA MAIA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE ATIVAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO  
NAS PROPRIEDADES DO AGREGADO FRESADO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em engenharia Civil.

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes

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

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M184a Maia, Aldaianny de Oliveira.  
Avaliação da influência do grau de ativação do ligante asfáltico nas propriedades do agregado fresado /  
Aldaianny de Oliveira Maia. – 2019.  
73 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

1. Fresado. 2. Propriedades de Forma. 3. PDI. 4. Grumos. 5. Ativação de ligante. I. Título.

CDD 620

---

ALDAIANNY DE OLIVEIRA MAIA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE ATIVAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO  
NAS PROPRIEDADES DO AGREGADO FRESADO

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em engenharia Civil.  
Área de concentração: Infraestrutura de Transportes

Aprovada em: 04/12/2019

BANCA EXAMINADORA

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

\_\_\_\_\_  
Prof. Marcelo Silva Medeiros Júnior, Ph.D. (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

\_\_\_\_\_  
Prof. Wellington Lorrán Gaia Ferreira, M.Sc. (Examinador Externo)  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

A Deus.

À minha família e a todos que de alguma forma  
contribuíram para a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por me dar força diariamente e me fortalecer na fé, de modo a acreditar que todos somos capazes de superar nossos limites, assim queiramos.

Agradeço também ao meu pai Aldenir (in memoriam), por ter sido e ser fonte de inspiração e ensinamentos que me tornaram a pessoa que eu sou hoje. À minha mãe, Marinalva, que nunca mediu nenhum esforço para conseguir dar o melhor para os filhos, ela que me ensinou e me ensina diariamente que tudo precisa ser batalhado e que não há conquistas sem que haja um trabalho árduo por trás. Ainda aos meus pais, por terem simplesmente me apoiado e feito o possível e o impossível para que meu sonho de ingressar e concluir o ensino superior pudesse se tornar realidade.

Aos meus irmãos: Aldenizia, Aldeir, Aldeiza e Aldemiziani por todo apoio e positividade que me deram ao longo da vida, me possibilitando viver momentos incríveis e ensinamentos que eu levarei por todo o sempre.

À minha orientadora, por ter me apresentado com a chance de fazer parte do seu grupo de pesquisa e poder compartilhar tantos momentos nesse período de orientação, me auxiliando e ensinando tantos caminhos possíveis ao longo desses últimos dois anos em que tive a oportunidade de ser sua orientanda.

Ao CAMP, grupo de pesquisa em que estou inserida, principalmente: Lorrán, Marília, Daianne e Renan que estiveram mais próximos, nas linhas de pesquisa, ao longo desses anos de iniciação científica e projeto de graduação, me transmitindo conhecimentos e me auxiliando sempre que eu precisei.

À banca, Lorrán e Marcelo, por aceitarem o convite de participação e por todas as contribuições ofertadas ao trabalho, de modo tão compreensivo acerca do que foi apresentado.

Ao CNPq pelo incentivo financeiro à pesquisa.

À Insttale, na pessoa do Victor Mosca, que gentilmente cedeu o material de estudo e se mostrou tão solícito em todos os momentos.

Ao LMP, por ceder o espaço para que eu pudesse realizar parte dos ensaios, principalmente ao Rômulo, Vinícius e Alisson, por todo auxílio prestado nas atividades no laboratório.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e seus responsáveis que sempre se mostraram tão disponíveis e ao Joel a quem eu tanto solicitei ajuda no reparo e ajuste dos equipamentos.

As irmãs que a REU me deu, Jardélia e Patrícia, por terem sido ao longo desses últimos anos uma família e me dado suporte emocional em tantos momentos. A Eduarda e Assunção por serem pessoas incríveis de se conviver e me auxiliarem em tantos momentos.

Ao primeiro grupo que eu fui inserida na universidade, Beliza, Diego e Luana com quem eu dividi todos ou quase todos os trabalhos, estresses e momentos incríveis também ao longo desses últimos 5 anos e que por diversas vezes me auxiliaram. Aos que se disponibilizaram tantas vezes em me ajudar devido as dificuldades dos experimentos: Gabriel Amorim e Lucas Moreira. A Isabel Nibon e Renata Sales com quem eu tive a oportunidade de trabalhar mais de perto e dividir tantas atividades e momentos de descontração ao longo do curso.

Aos professores que passaram pela minha vida acadêmica ao longo desses 5 anos, deixo meu sentimento de gratidão pela oportunidade de conhecer pessoas tão incríveis e dispostas a transmitir conhecimento.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para que esse sonho fosse realizado, sintam-se aqui colocados.

“Algumas vezes cheguei a acreditar em até seis coisas impossíveis antes do café da manhã. ” (Carroll, 2009, p. 228)



## RESUMO

O reaproveitamento de resíduos na indústria da pavimentação se tornou atrativo ao longo das últimas décadas, principalmente pela ideia de sustentabilidade, que ganha ainda mais destaque na sociedade atual, além da redução de recursos naturais e custos na preparação de misturas asfálticas. Diante desse cenário o fresado, principal resíduo da pavimentação, se tornou objeto de estudo na busca pela compreensão da influência de sua incorporação nas misturas asfálticas recicladas para aplicação em camadas de revestimentos do pavimento. Apesar de ser um resíduo constituído por materiais provenientes do processo de restauração de pavimentos, agregado e ligante envelhecido, ainda existem questões que dificultam a adição do material e seu entendimento enquanto constituinte do compósito a ser formado, tais como: heterogeneidade, condições de armazenamento, ausência de mapeamento da origem do material além dos conceitos inerentes ao próprio fresado que não foram completamente compreendidos pela comunidade científica como: o grau de ativação do ligante e o processo de formação de grumos. Mediante a tantas variáveis ainda desconhecidas, a caracterização do material com uma visão voltadas para suas propriedades do agregado, se mostra de grande importância no entendimento de como ocorre as variações das características do agregado fresado. Aqui analisados com base nas curvas granulométricas e nas propriedades de forma, obtidas por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI), diante de variáveis que influenciam o processo de ativação do ligante envelhecido como: temperatura, tempo de mistura e abrasão. Para avaliar as mudanças nas propriedades do agregado fresado nesse estudo, utilizou-se da simulação de mistura que ocorre anterior à adição do ligante, com auxílio do micro-deval como simulador alterando as variáveis tempo de mistura e temperatura. Diante da metodologia aplicada, observou-se que houve aparecimento de materiais abaixo da peneira limite adotada no processo, que podem ser relacionadas a influência da abrasão no desmembramento de grumos, além do mais as propriedades de forma como textura superficial e angularidade sofreram alteração a depender da temperatura aplicada. Portanto, verificou-se que as propriedades do agregado fresado sofrem influências das variáveis analisadas. Entretanto, estudos futuros devem ser realizados de modo a melhor avaliar e compreender essas relações entre as variáveis que influenciam o processo de ativação do ligante, como a ativação em si e as mudanças ocorridas no agregado fresado.

**Palavras – Chave:** Fresado; Propriedades de Forma; PDI; Grumos; Ativação de ligante.

## ABSTRACT

The reuse of residues in the pavement industry has become attractive over the last decades, mainly due to the idea of sustainability that gains even more prominence in today's society, besides the reduction of natural resources and costs in the preparation of asphalt mixtures. Given this scenario the reclaimed asphalt (RA), the main pavement residue, it has become the object of study in search of the perception of the influence of its incorporation in recycled asphalt mixtures for application in layers of floor coverings. Despite being a waste made of materials after the pavement restoration process, aggregate and binder aged, there are still issues that make it difficult to add material and its understanding as a constituent of the compound to be formed, such as: heterogeneity, storage conditions, lack of mapping of the source of the material beyond the concepts inherent to the object itself that were not completely understood by the scientific community as the degree of binder activation and cluster formation process. Through the selected variables still unknown for the characterization of the material with a view to its properties as an aggregate, it shows the extreme importance in understanding how changes in aggregate characteristics occur, seen here based on particle size and shape. On the shape forms, analysed by Digital Image Processing (PDI), in front of variables that influence the aged binder activation, such as temperature, mixing time and abrasion. To evaluate how changes in RA aggregates properties in this study, use mix samples that occur before the binder addition with the aid of micro-deval as a simulator by changing variations in mixing time and temperature. Given the applied methodology, if there is material below the maximum limit adopted in the process, which may be related to influences of abrasion and break up of clusters, as well as shape properties such as surface texture and angularity suffered by use of the applied temperature. Therefore, it was verified that the RA aggregate properties were influenced by the analysed variables. However, future studies should perform the best way to better assess and understand these relationships between the variables that influence the binder activation, as the changes in the RA aggregate.

**Keywords:** Reclaimed Asphalt; Shape properties; PDI; Clusters; Binder activation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Realização de fresagem em trecho em obra.....	21
Figura 2 - Curva Granulométrica do fresado antes e após o processo de extração .....	23
Figura 3 - Diferentes estágios de difusão do filme de ligante que reveste o fresado:(a) fresado com filme de ligante; (b) fresado + ligante virgem, sem ativação; (c) fresado + ligante virgem, ativação parcial; (d) fresado + ligante virgem, ativação total.....	26
Figura 4 - Propriedades de forma do agregado .....	29
Figura 5 - Tipos de curvatura do agregado fresado .....	30
Figura 6 – Fresado utilizado no estudo.....	31
Figura 7 - Composição das pilhas de fresado conforme tamanho de moagem .....	32
Figura 8 - Fluxograma das etapas metodológicas do presente trabalho .....	33
Figura 9 - Equipamento AIMS .....	34
Figura 10 - Micro-deval com os dois tambores.....	35
Figura 11 - Imagem obtida pelo AIMS para a análise de angularidade da amostra A12 (#2,36mm) .....	60
Figura 12 - Textura superficial para partículas retidas na #4,75mm para o fresado inicial.....	65
Figura 13 - Textura superficial para as partículas retidas na #4,75mm para a amostra A1 .....	65
Figura 14 - Textura superficial para as partículas retidas na #4,75mm para a amostra A7 .....	65
Figura 15 - Material após o procedimento de mistura no micro-deval .....	67
Figura 16 - Esferas após o procedimento de mistura no micro-deval com aquecimento .....	68
Figura 17 - Partículas da amostra A12 após o procedimento de mistura de 15 minutos com aquecimento.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura das amostras avaliadas para a variável tempo de mistura.....	36
Tabela 2 - Nomenclatura das amostras avaliadas com aquecimento.....	36
Tabela 3 - Valores limites para classificação das propriedades de forma dos agregados .....	37
Tabela 4 - % Massa passante na #2,36 para as amostras sem aquecimento .....	43
Tabela 5 – Diferença do % massa passante para cada fração das amostras sem aquecimento.	44
Tabela 6 – Diferença do % massa passante para todas as frações das amostras sem aquecimento .....	49
Tabela 7 - Propriedades de formas obtida pela média das peneiras para o fresado inicial.....	50
Tabela 8 - Propriedades de formas obtida para o fresado submetido a diferentes tempos de mistura .....	53
Tabela 9 - Propriedades de formas obtida para o fresado submetido ao aquecimento e a diferentes tempos de polimento.....	58
Tabela 10- Quantidade de partículas antes e depois da mistura para a #9,5mm .....	63

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva Granulométrica do fresado coletado para o estudo .....	38
Gráfico 2 - Curva granulométrica obtida para as amostras avaliadas para o tempo de mistura ( $T \approx 33^{\circ}\text{C}$ ) .....	40
Gráfico 3 - Curvas granulométricas das amostras para o tempo de mistura ( $T \approx 33^{\circ}\text{C}$ ) a partir da #4,75mm .....	41
Gráfico 4 - Curva Granulométrica para amostras com tempo de misturas de 5 minutos.....	42
Gráfico 5 - Curva Granulométrica para amostras com tempo de misturas de 10 minutos.....	42
Gráfico 6 - Curva Granulométrica para amostras com tempo de misturas de 15 minutos.....	43
Gráfico 7 - Curva granulométrica para amostras submetidas a temperatura de $160^{\circ}\text{C}$ .....	45
Gráfico 8 - Curva granulométrica para amostras com $T=160^{\circ}\text{C}$ e tempo de mistura = 5 minutos .....	45
Gráfico 9 - Curva granulométrica para amostras com $T=160^{\circ}\text{C}$ e tempo de mistura = 10 minutos .....	46
Gráfico 10 - Curva granulométrica para amostras com e sem aquecimento e tempo de mistura = 5 minutos .....	46
Gráfico 11 - Curva granulométrica para amostras com e sem aquecimento e tempo de mistura = 10 minutos .....	47
Gráfico 12 - Curva granulométrica para amostras com $T = 160^{\circ}\text{C}$ e tempo de mistura = 15 minutos .....	48
Gráfico 13 - Curva granulométrica para amostras com e sem aquecimento e tempo de mistura = 10 minutos .....	48
Gráfico 14 - Angularidade obtida para o fresado analisado no AIMS antes da simulação .....	50
Gráfico 15 - Textura superficial obtida para o fresado analisado no AIMS antes da simulação .....	51
Gráfico 16 - Esfericidade obtida para o fresado analisado no AIMS antes da simulação .....	51
Gráfico 17 - Forma 2D obtida para o fresado analisado no AIMS antes da simulação.....	52
Gráfico 18 - Esfericidade obtida para o fresado analisado no AIMS para diferentes tempos de misturas.....	54
Gráfico 19 – Textura superficial obtida para o fresado analisado no AIMS para diferentes tempos de misturas sem aquecimento .....	55
Gráfico 20 - Angularidade obtida para as amostras sem aquecimento até a #0,6mm analisado no AIMS .....	56

Gráfico 21 - Angularidade obtida para as amostras sem aquecimento abaixo da #0,6mm analisado no AIMS .....	56
Gráfico 22 – Forma 2D obtida para as amostras abaixo da #0,6mm analisado no AIMS.....	57
Gráfico 23 - Angularidade obtida para as amostras aquecidas a 160° C até a #0,6mm analisadas no AIMS .....	59
Gráfico 24 - Angularidade obtida para as amostras aquecidas a 160° C abaixo da #0,6mm analisado no AIMS .....	59
Gráfico 25 - Textura Superficial para amostras aquecidas a 160° após análise no AIMS .....	61
Gráfico 26 – Forma 2D para amostras aquecidas a 160° C após análise no AIMS .....	61
Gráfico 27 – Esfericidade para amostras aquecidas a 160° C após análise no AIMS.....	62
Gráfico 28 – Diferenças percentuais para a angularidade calculada pela média das peneiras .	63
Gráfico 29 – Diferenças percentuais para a textura superficial calculada pela média das peneiras .....	64
Gráfico 30 – Diferenças percentuais para a esfericidade calculada pela média das peneiras ..	66
Gráfico 31 – Diferenças percentuais para a Forma 2D calculada pela média das peneiras .....	66

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMA E QUESTÕES MOTIVADORAS</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Problema Motivador</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Questões Motivadoras</b> .....	<b>18</b>
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>20</b>
<b>4.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>20</b>
<b>4.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1</b>	<b>Fresado</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Presença de grumos no fresado</b> .....	<b>23</b>
<b>5.2</b>	<b>Misturas Asfálticas Recicladas (MAR)</b> .....	<b>24</b>
<b>5.3</b>	<b>Ativação do Ligante do Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas</b> .....	<b>25</b>
<b>5.3.1</b>	<i>Influência da temperatura no processo de reciclagem do fresado</i> .....	<b>28</b>
<b>5.3.2</b>	<i>Propriedades de Forma</i> .....	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
<b>6.1</b>	<b>Material – Fresado</b> .....	<b>31</b>
<b>6.2</b>	<b>Método</b> .....	<b>32</b>
<b>6.2.1</b>	<i>Determinação da curva granulométrica</i> .....	<b>33</b>
<b>6.2.2</b>	<i>Análise das propriedades de forma através do PDI</i> .....	<b>34</b>
<b>6.2.3</b>	<i>Ativação do ligante e desassociação de grumos utilizando o micro-deval</i> .....	<b>35</b>
<b>6.3</b>	<b>Análise dos resultados</b> .....	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
<b>7.1</b>	<b>Análise da Curva Granulométrica</b> .....	<b>38</b>
<b>7.1.1</b>	<b>Curva granulométrica para caracterização do fresado inicial</b> .....	<b>38</b>
<b>7.1.2</b>	<b>Curva granulométrica para diferentes tempos de misturas</b> .....	<b>39</b>
<b>7.1.3</b>	<b>Curva granulométrica obtida para mudança na temperatura</b> .....	<b>44</b>
<b>7.2</b>	<b>Caracterização das propriedades de forma – AIMS</b> .....	<b>49</b>
<b>7.2.1</b>	<b>Caracterização das propriedades de forma do fresado inicial</b> .....	<b>49</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Caracterização das propriedades de forma para diferentes tempos de mistura</b> .....	<b>52</b>
<b>7.2.3</b>	<b>Caracterização das propriedades de forma com a mudança de temperatura</b> .....	<b>57</b>
<b>7.3</b>	<b>Análise de sensibilidade a variável tempo de mistura e temperatura</b> .....	<b>62</b>

<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de locomoção e transporte, sejam esses de cargas, produtos ou pessoas, existe a preocupação em atender a questões de segurança, conforto, economia, consciência ambiental, entre outras, e ainda garantir condições mínimas de trafegabilidade aos usuários. A construção de pavimentos nesse sentido, se torna uma ferramenta para a realização de deslocamentos mais eficientes. Conforme dados apresentados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2016), em 2015 apenas cerca de 210.619 km de rodovias eram pavimentadas, representando cerca de 12,2% da malha viária nacional, das quais conforme apresentado no DECONCIC/FIESP (2017) mais de 96% eram de pavimentação asfáltica para o mesmo ano. Ainda segundo este, o uso da pavimentação como um mecanismo de melhora nas condições das vias cresce aproximadamente 0,2% ao ano.

Mediante o crescimento da implementação de vias pavimentadas, e da grande aplicação de pavimentos asfálticos, existe certa preocupação quanto à redução do uso de recursos naturais empregados nesta: agregados e Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Dessa forma, alguns estudos nos últimos anos buscaram analisar a incorporação de materiais alternativos, a citar, o resíduo da indústria siderúrgica: a escória de aciaria (CASTELO BRANCO *et al.*, 2004; FREITAS *et al.*, 2008; TAVARES *et al.*, 2011), a borracha de pneu moída (ODA & FERNANDES JÚNIOR, 2001; NEVES FILHO, 2004), resíduos da construção civil (MOTTA, 2005), além do próprio resíduo da pavimentação (ROCHA SEGUNDO, 2014; GENNESSEAU, 2015; LO PRESTI *et al.*, 2016; ROCHA SEGUNDO *et al.*, 2016) em substituição as matérias primas. De modo a tentar compreender o comportamento desses materiais alternativos, e garantir que tais adições proporcionem condições mínimas exigidas para um bom desempenho funcional e estrutural do pavimento.

Diante da preocupação em reaproveitar resíduos visando a redução de custos e a conscientização ambiental para construção de pavimentos, percebe-se a importância no desenvolvimento de métodos para reutilização do fresado (RA, do inglês *reclaimed asphalt*). Definido como o principal resíduo proveniente da indústria da pavimentação, oriundo da fresagem, que é o “desbastamento a quente ou a frio da superfície asfáltica, como parte de um processo de reciclagem do pavimento asfáltico” (DNIT, 2017), busca-se compreender como essa adição, normalmente adotada em valores entre 10-30% de fresado, é capaz de influenciar nas condições necessárias para resistência do composto enquanto camada do pavimento submetida aos esforços do tráfego e as intempéries.

O fresado pode se apresentar sob diferentes formas a depender do objetivo da fresagem, da temperatura de ocorrência (a frio ou a quente), dos equipamentos utilizados, da espessura de corte, dentre outros. Por exemplo, na fresagem a frio não ocorre o aquecimento prévio da estrutura, o que facilita a quebra dos agregados presentes na camada de revestimento e conseqüentemente a mudança na curva granulométrica deste, ou seja, a formação de um novo material com maiores quantidades de grumos (Bonfim, 2011). Além dos diferentes parâmetros para a realização da fresagem, o material muitas vezes é armazenado em pilhas juntamente com fresados de origens distintas, seja pela ausência de práticas de gestão do material na indústria, seja pela falta de espaço para armazenamento em pilhas separadas. Tais comportamentos de execução, produção e estocagem, são fatores que tornam o fresado um material heterogêneo e dificulta o entendimento de suas características, assim como o reaproveitamento mais consciente.

Além da heterogeneidade do fresado, a presença do ligante envelhecido no material, e a necessidade de altas temperaturas de aquecimento, sem envelhecer o ligante ainda mais e fazer com que seja ativado, é um dos problemas na etapa de produção de misturas asfálticas recicladas (GUNGAT *et al.*, 2019; LO PRESTI *et al.*, 2016). O conceito de ativação foi definido por Lo Presti *et al.* (2019) como a quantidade de ligante presente no fresado disponível para se misturar na mistura asfáltica reciclada, devido a fatores como temperatura e tempo de mistura aplicados e que pode ser influenciado também pela adição de agentes rejuvenescedores. Para que ocorra o aquecimento do fresado o processo utiliza transferência de calor por condução, onde o agregado virgem deve ser superaquecido e quando misturado ao fresado transmitir energia na forma de calor para este.

Ao adicionar resíduos na composição das misturas asfálticas, busca-se que estes possam apresentar bom comportamento resistente estrutural. Bessa (2012) mostrou que as propriedades de forma dos agregados estão diretamente ligadas aos principais defeitos de pavimentos. Visto que, as misturas asfálticas são compostas de 90 – 95% de agregados, ao aumentar as taxas de fresado incorporados à mistura, cresce a quantidade de agregado fresado contido neste, e entender seu comportamento dentro dos possíveis graus de ativação se torna uma ferramenta na racionalização dos métodos de dosagens e escolhas adotadas no processo de preparação de misturas asfálticas recicladas.

Diante da limitação apresentada pelos métodos convencionais para obtenção das propriedades de forma, o Processamento Digital de Imagens (PDI) se apresenta como uma ferramenta no auxílio para obtenção desses dados. Araújo *et al.* (2013) avaliaram amostras de fresado, cuja variável era a velocidade da fresadora, por meio do PDI, e observaram que a

mudança na velocidade apresentou pouca alteração nas propriedades do agregado tais como, o agregado miúdo se apresentou aproximadamente 2% mais circular quando a velocidade foi maior comparando os valores obtidos antes da extração do ligante. O processo de extração do ligante do fresado é realizado com o uso de solventes de modo a conseguir retirar camadas do ligante presente no fresado, por imersões sucessivas deste no solvente escolhido, conhecido por extrações por etapa.

## **2 PROBLEMA E QUESTÕES MOTIVADORAS**

### **2.1 Problema Motivador**

A importância de se conhecer o impacto da adição de resíduos na indústria de pavimentação, de modo a não haver redução nas características de resistência da estrutura é devidamente compreendida. A adição de fresado não deixa de ser uma preocupação nesse quesito, tendo em vista a complexidade do entendimento do material em si, além da dificuldade de prever o comportamento do fresado diante do fenômeno de ativação do CAP envelhecido e do desmembramento dos grumos quando utilizado na elaboração de misturas recicladas. Diante disso, é necessário compreender esse processo de ativação tanto do ponto de vista do ligante asfáltico, quanto do ponto de vista do agregado que estão presentes no material e desta forma tentar realizar inferências dos possíveis comportamentos que poderão existir.

É sabido que as propriedades de forma dos agregados possuem relação com o comportamento resistente do pavimento, de tal modo que ao encontrar relações entre diferentes quantidades de ligante ativado e seu impacto na mudança das propriedades de forma do fresado, tornará possível o entendimento dos prováveis comportamentos que este poderá ter quando inserido em misturas asfálticas recicladas.

### **2.2 Questões Motivadoras**

São apresentadas, a seguir, as questões que motivaram a elaboração desse trabalho:

- a) Quais mudanças podem ser observadas nas curvas granulométricas dos agregados fresados, conforme a condição de ativação do ligante e devido ao desmembramento dos grumos?
- b) Como a variação de temperatura, tempo de mistura e a abrasão, influenciam nas propriedades de forma e no processo de formação de grumos?
- c) Quais as propriedades granulométricas e de forma dos agregados formados devido ao processo de mistura do fresado com os agregados virgens?

### 3 JUSTIFICATIVA

O resíduo gerado no processo de recuperação de pavimentos, conhecido como fresado, assim como qualquer outro, necessita de uma destinação. Diante disso, já foram conduzidos alguns estudos de modo a tentar entender como o fresado (ligante envelhecido e agregado) se comporta quando inserido em novas misturas asfálticas. Entretanto, estes estudos foram mais direcionados ao comportamento do ligante envelhecido presente na mistura asfáltica reciclada, sua ativação e como se dá sua influência na composição da mistura reciclada.

Considerando a importância dos agregados no comportamento das misturas asfálticas, sobretudo no que diz respeito à influência das propriedades de forma dos agregados, faz-se necessário compreender como o agregado fresado modifica suas propriedades, sob diferentes condições de ativação de ligante asfáltico do fresado, que dependem principalmente do processo de aquecimento, do tempo de mistura em usina e da abrasão quando misturado aos agregados virgens.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é inferir com base em diferentes condições de simulação da ativação do ligante (provocadas por: variação de temperatura, tempo de mistura e abrasão) as propriedades de forma que o agregado fresado possa vir a adquirir e ainda como este poderá se comportar no compósito a depender do processo ao qual será submetido.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- a) Analisar como a presença de grumos influencia na composição granulométrica e nas propriedades de forma do agregado fresado;
- b) Analisar a influência da temperatura, do tempo de mistura e da abrasão na ativação do ligante e no processo de formação de grumos;
- c) Avaliar as mudanças ocorridas nas propriedades de forma do agregado fresado quando o ligante asfáltico é ativado;

## 5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1 Fresado

O fresado é o produto obtido a partir do processo de desbastamento da superfície asfáltica. A fresagem é um recurso na recuperação de pavimentos, na correção de defeitos superficiais, na recuperação de áreas contínuas ou descontínuas, na correção da inclinação do pavimento, dentre outras aplicações, a Figura 1 apresenta o procedimento executado em campo. A depender do objetivo da fresagem, existem no mercado diferentes equipamentos capazes de alterar a classificação da fresagem conforme a espessura de corte e rugosidade da pista, variáveis estas dependentes do tipo de cilindro fresador, velocidade de operação, temperatura de execução, entre outros (BONFIM, 2011). Estes fatores são ainda responsáveis pelo fresado que será obtido.

Figura 1 - Realização de fresagem em trecho em obra



Fonte – Rocha Segundo (2014)

O desconhecimento das propriedades do resíduo é um agravante quanto ao entendimento do processo de reciclagem. A falta de informações sobre as origens do material, o armazenamento em pilhas sem identificação ou separação por locais de origem, a ausência de dados dos pavimentos desbastados, são exemplos de variáveis que influenciam na heterogeneidade do fresado e na complexidade em compreender seu comportamento. Lo Presti *et al.* (2016) observaram que apesar das vantagens de utilizar o fresado na incorporação de misturas asfálticas recicladas, para aplicação nas camadas de revestimento, alguns países ainda

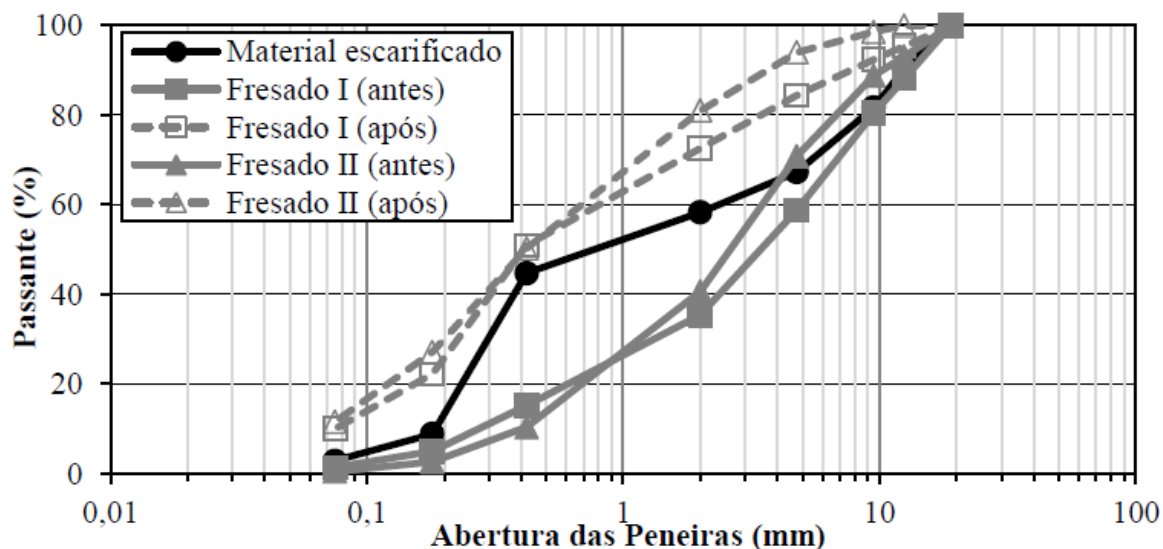
limitam seu uso, seja por questões da legislação local, seja pelas dificuldades técnicas apresentadas, como: variabilidade das propriedades do fresado, incerteza na performance da mistura, desconhecimento da origem do material, dentre outros.

Gennesseaux (2015) buscou controlar o grau de homogeneidade deste componente por meio de recomposição, que consistiu em separar as amostras de fresado em quatro frações granulares obtidas por peneiras de 2mm, 4mm e 8mm. Para tanto a autora avaliou os materiais fracionados e percebeu que as quantidades de ligante variavam a depender da porção analisada (passante na #2mm, retido na #2mm e passante na #4 mm, retido na #4 mm e passante na #8mm e retido na #8mm). Observou ainda que frações mais finas continham maior teor de ligante em relação as gráudas. Entretanto, apesar da variação do teor de ligante, as propriedades de dureza, suscetibilidade térmica e nível de envelhecimento foram consideradas as mesmas para todas as frações. Tebaldi *et al.* (2018) afirmam que a homogeneidade das propriedades do fresado é um fator crítico no controle de qualidade para o desenvolvimento de misturas asfálticas recicladas.

Araújo *et al.* (2013) analisaram amostras de fresado obtidas pelo processo de escarificação e por fresagem, neste variando a velocidade de operação em 23% (Fresado I) e 46% (Fresado II) da velocidade máxima do equipamento. Eles verificaram, com base nas curvas granulométricas dos materiais, apresentadas na Figura 2, que o procedimento de fresagem ocasionou mais a quebra do agregado e o aumento da velocidade da fresadora foi responsável pela presença de maiores quantidades de finos na curva granulométrica deste, ainda é possível observar na imagem a mudança nas curvas granulométricas devido ao processo de extração do ligante. Bonfim (2011) também faz considerações acerca das mudanças ocorridas nas curvas granulométricas do fresado. O autor percebeu que a curva se tornou mais aberta após a extração do ligante asfáltico, enquanto sem a extração do ligante esta tornou-se mais densa graças ao desmembramento dos grumos.



Figura 2 - Curva Granulométrica do fresado antes e após o processo de extração



Fonte – Araujo *et al.* (2013)

### 5.1.1 Presença de grumos no fresado

Bonfim (2011) traz a definição de grumos como fragmentos do revestimento composto por mais de um agregado envolto com partículas finas e ligante envelhecido, obtidos a partir do processo de fresagem. Segundo o autor, um dos impasses preponderantes quanto ao processo de reciclagem se refere à granulometria oriunda da fresagem, devido ao aparecimento dos grumos e como estes podem ser desmembrados e tornar a curva granulométrica diferente da inserida em projetos de misturas, por exemplo, quando ocorre a ativação do ligante e o processo de abrasão devido a mistura com os novos agregados.

Segundo Bressi *et al.* (2016) podem existir dois tipos de aglomerações para os grumos, que são classificadas como: grumos velhos e grumos novos. A nomenclatura de grumos velhos se refere aos aglomerados contidos no material anterior ao processo de mistura devido ao processo de fresagem do pavimento, enquanto os novos são aqueles formados devido ao processo de mistura, onde o ligante adquire certa adesividade devido a ativação, e permite que novos grumos sejam formados.

Bressi *et al.* (2016) afirmaram que a formação de grumos (*clusterização*) pode ser influenciado pela temperatura de fabricação, tempo de mistura e quantidade de energia utilizada, propriedades do CAP adotado, quantidades de fresado inserido, além de outras variáveis. Observaram também que diante da metodologia adotada, apenas as partículas menores (< 4mm) eram capazes de contribuir com o processo de formação de *clusters*, ou seja, ao aumentar a quantidade de fresado na mistura diminuía-se o percentual de agregados virgens

nesta e o processo se tornou menos notório, devido ao aumento no tamanho das partículas do fresado adicionado. Além de verificar que a qualidade e quantidade dos agregados naturais inseridos influenciaram no processo abrasivo entre estes e o fresado, aumentando a superfície da partícula e os pontos de contato para a formação dos grumos.

Xu *et al.* (2019) avaliou duas amostras de fresado, onde buscou analisar o processo de formação de grumos, composição de partículas no fresado, além da estabilidade dos grumos presente nas amostras. O estudo utilizou o *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*, assim como teste Cântabro e processos de extração para avaliação do processo de formação dos grumos. Eles observaram que o fenômeno é um dos fatores que limitam as taxas de utilização do material na indústria da pavimentação.

De acordo com Xu *et al.* (2019), a presença dos grumos é evidenciada à medida que o tamanho das partículas aumenta, isto é, partículas acima da peneira de 4,75mm apresentaram maior presença de grumos. Com a análise do índice de estabilidade observaram três comportamentos para a estrutura dos grumos, baseado na estabilidade destes definidos como: estruturas fracas, estruturas fortes e agregado velhos quebrados pelo processo de fresagem. Diante disso, constataram que estruturas fracas na formação são as que merecem maior atenção quanto ao uso, devido sua maior facilidade na mudança da curva granulométrica, graças à instabilidade e conseqüentemente maior facilidade de quebra destas quando inseridas nas misturas asfálticas recicladas.

## **5.2 Misturas Asfálticas Recicladas (MAR)**

A utilização de misturas asfálticas recicladas é uma técnica que visa o reaproveitamento de resíduos, como o fresado, assim como a redução de agregados e ligante virgem. Rocha Segundo (2014) estudou o comportamento de Misturas Asfálticas Recicladas à Quente (MARQ) com alto percentual de fresado e percebeu diante dos resultados que seu material de estudo pode ser utilizado para fins menos nobres, além da aplicação como bases de pavimentos especiais. Ele verificou ainda que a Resistência à Tração (RT), o Módulo de Resiliência (MR) e o *Flow Number* (FN) apresentaram aumentos em seus valores com a adição do fresado na mistura, além de perceber que a mistura com a maior adição de fresado apresentou a menor deformação total das misturas avaliadas, fato atribuído a rigidez adquirida pela mistura devido ao ligante envelhecido presente no compósito.

Lo presti *et al.* (2016) concluíram que para o desenvolvimento de misturas asfálticas com altos teores de fresado em usinas, ainda se faz necessário o desenvolvimento tecnológico

da maioria destas, além do desenvolvimento de técnicas para o manuseio do fresado e políticas locais, de modo que o aumento na quantidade e a qualidade do fresado não se tornem problemas. Os autores indicaram que os percentuais utilizados na composição de misturas asfálticas são limitados, valores entre 10% e 30%. West (2015) apontou que as indústrias de pavimentação asfáltica nos Estados Unidos haviam aumentando a média de uso do fresado para valores próximos a 20%.

Rocha Segundo *et al.* (2016) investigaram a incorporação de elevados percentuais de fresado em MARQ como Misturas Asfálticas de Módulo Elevado, para tanto variaram o percentual de fresado adotado em valores de 100% e 75% destes em substituição aos agregados naturais, com aplicação em camadas de bases e/ou camadas de ligação em pavimentos especiais, devido seu alto MR. Os autores apontaram vantagens advindas da técnica como: desenvolvimento de pavimentos mais esbeltos, diminuição na ocorrência de danos por fadiga além da minoração das deformações por tração na região inferior da camada de revestimento.

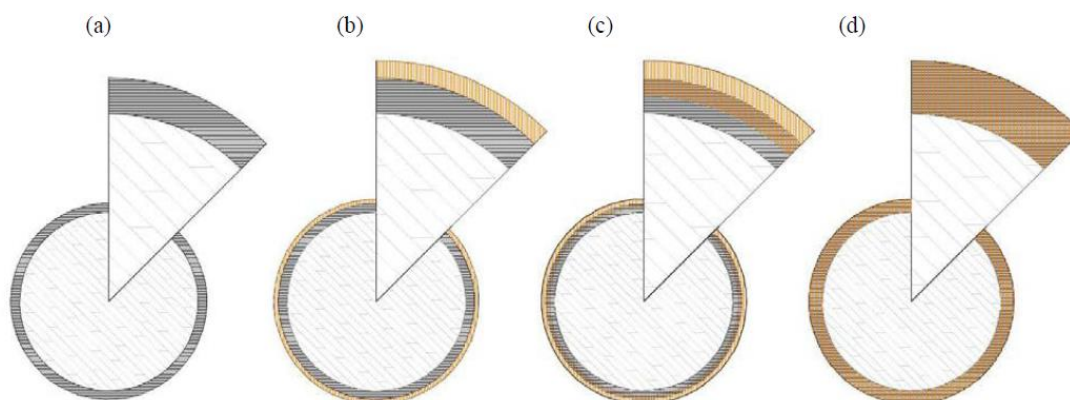
Genesseeux (2015) analisou duas misturas asfálticas recicladas com 50% de fresado cada (MARM e MARQ), para avaliar parâmetros de durabilidade destas com relação ao seu comportamento mecânico tais como: dano por umidade, deformação permanente, resistência à fadiga e módulo complexo. Anterior ao processo de dosagem das misturas, o RAP teve suas curvas granulométricas assim como seu teor de CAP determinado, por meio do processo de extração do ligante deste, assim como uma pré-seleção de tamanhos de partículas do fresado que seriam incorporados à mistura a fim de obter melhor homogeneidade do material. Para a dosagem, a autora considerou a ativação total do ligante presente no fresado e a curva granulométrica referente a ele.

### **5.3 Ativação do Ligante do Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas**

Considera-se que podem existir três diferentes comportamentos quanto ao grau de interação dos ligantes virgem e envelhecido (proveniente do fresado) em misturas asfálticas recicladas (DING *et al.*, 2016). O primeiro comportamento julga a ocorrência da total interação entre o ligante do fresado e o ligante virgem adicionado na mistura, processo também conhecido como “*Full Blending*”. O segundo acredita que o material se comporta apenas como agregado e não há nenhum grau de interação entre os ligantes, conhecido como “Black rock”. Por fim, o terceiro considera a ativação parcial do ligante presente no resíduo, onde parte deste irá se incorporar à mistura enquanto o restante continuará aderido ao agregado. Cada um dos cenários

pode ser verificado na Figura 3. A ativação parcial é a mais aceita diante dos achados de alguns autores.

Figura 3 - Diferentes estágios de difusão do filme de ligante que reveste o fresado:(a) fresado com filme de ligante; (b) fresado + ligante virgem, sem ativação; (c) fresado + ligante virgem, ativação parcial; (d) fresado + ligante virgem, ativação total



Fonte - Liphardt *et al.* (2015)

Lo Presti *et al.* (2016) perceberam a importância de conhecer os conceitos de grau de ativação e substituição de ligante virgem pelo ligante envelhecido do material fresado, como ferramenta no desenvolvimento de misturas mais reais e conseqüentemente a obtenção de suas propriedades. Shirodkar *et al.* (2011) notaram que o grau de ativação parcial do fresado depende do grau de ligante na mistura, do percentual do resíduo incorporado, da temperatura de aquecimento do agregado na mistura, o qual é na maioria das vezes superaquecido, e das propriedades do ligante presente no fresado. Em acordo ao encontrado por Lo Presti *et al.* (2019) onde afirmam que o fenômeno de mistura e ativação do ligante do fresado é influenciado pelas condições de processamento deste, tais como o tempo e a temperatura de mistura, as taxas de fresado adicionado, o tipo de fresado, a adição de agentes de reciclagem.

Rocha Segundo (2014) verificou em seus estudos com altos percentuais de fresados que ocorre a diminuição de ligante virgem a ser adicionado na mistura à medida que essa adição no compósito aumentava, ao utilizar um percentual de 100% de fresado reduziu a 0% o percentual de ligante virgem no processo enquanto para valores de 75% fresado + 25% agregado natural e um teor de ligante de 4,6% o ligante virgem adicionado foi referente a 1%.

Gaspar *et al.* (2017) avaliaram a heterogeneidade presente em uma mistura usinada com adição de fresado por meio do processo de extrações parciais de ligante asfáltico. Os autores verificaram que a técnica serve como uma alternativa na tentativa de previsão da

quantidade de ligante ativado na mistura, baseado na heterogeneidade do ligante obtido a partir desta. Eles perceberam que os ligantes obtidos a partir de cada etapa de extração realizada não apresentavam o mesmo comportamento, ou seja, cada camada de ligante envelhecido que recobre o agregado presente no fresado, possuiu um comportamento diferente devido a interação progressiva e em partes durante o processo de extração.

Liphardt *et al.* (2015) concluíram que a ativação ocorrida no ligante presente no fresado ocorre de maneira parcial, onde as propriedades deste variavam a depender do filme de ligante em cada camada. Os autores observaram ainda que a extração por etapas do ligante presente no material, é uma maneira eficiente na obtenção de amostras para avaliar o grau de interação do fresado quando inserido em misturas asfálticas mornas. O que condiz ao encontrado por Huang *et al.* (2005), os quais observaram que apenas parte do ligante presente no fresado está disponível para misturar-se ao ligante virgem da mistura, enquanto o restante deste tende a continuar aderido ao agregado fresado.

Huang *et al.* (2005) conduziram estudos laboratoriais onde avaliaram a ativação do ligante do agregado fresado quando este foi misturado apenas ao agregado virgem, sem a presença do ligante. Para tanto, os autores definiram a amostra composta por agregado fresado passante na peneira de 4,75mm enquanto os agregados virgens foram aqueles superiores a peneira de 4,75 e passantes na #37,5mm, de modo a facilitar o processo de separação destes posteriores ao processo de mistura. Eles variaram o percentual de fresado em valores de 10%, 20% e 30%, para a temperatura de mistura de 190° C e o tempo de mistura aplicado igual a 3 minutos. Posterior a isso, os autores determinaram o percentual de ligante ativado, com base nos valores antes e após o procedimento. Eles concluíram que os percentuais de fresado inseridos não influenciaram na quantidade de ligante ativada e ainda que ocorre uma redução de cerca de 0,6% do teor de ligante entre o fresado antes e após a mistura com os agregados virgens.

Lo presti et al. (2019) analisaram diferentes estudos onde todos relacionados ao fenômeno de mistura levaram em consideração a presença de agentes de reciclagem. Os autores apontam que apesar da existência de conceitos claros quanto ao fenômeno de mistura do ligante envelhecido do fresado com os agentes de reciclagem, tal processo não é completamente compreendido pela comunidade científica. Além disso, embora ativação parcial seja um conceito reconhecido e aceito por alguns pesquisadores, na prática para o desenvolvimento de misturas asfálticas é considerado que o percentual de fresado inserido terá seu ligante completamente disponível para misturar-se no processo (AASTHO M323 17, 2017).

### ***5.3.1 Influência da temperatura no processo de reciclagem do fresado***

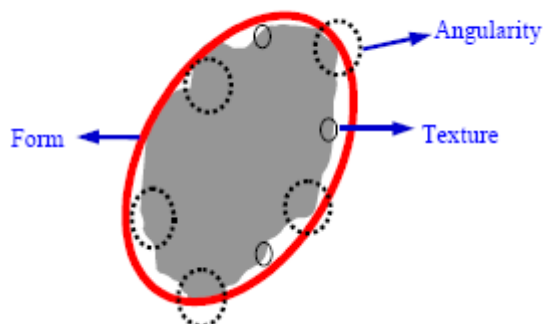
Zaumanis e Mallick (2015) indicam que o princípio comumente utilizado para o aquecimento do fresado quando inserido em misturas asfálticas recicladas ocorre por condução, onde o agregado virgem deve ser superaquecido de modo a transferir energia para o material. A temperatura de aquecimento é dependente de fatores como quantidade de fresado inserido, umidade e temperatura de descarga necessária.

Ding *et al.* (2016) avaliaram três diferentes MAR nos teores de 50% de fresado e teor ótimo de ligante de 4,5%, uma Mistura Asfáltica Reciclada Morna (MARM) e duas Misturas Asfálticas Reciclada Quente (MARQ) com e sem adição de agente rejuvenescedor. Observou-se que o teor de oxidação varia para as partículas do fresado e que a maior interação entre os ligantes ocasiona a redução dessa variação, ou seja, a variabilidade entre a mistura padrão (composta de agregados e ligante virgens) e as MAR diminui à medida que o processo de interação dos ligantes é mais efetivo. Diante disso, observou-se para as amostras avaliadas que a MARM foi a que apresentou o maior grau de interação dos ligantes, pois foi a que obteve maior coeficiente de significância (onde um alto coeficiente de significância indicava baixa variabilidade entre as misturas comparadas) com a mistura padrão.

### ***5.3.2 Propriedades de Forma***

Forma, angularidade e textura são basicamente três variáveis independentes que definem as propriedades dos agregados. Segundo Al Rousan (2004), a forma reflete as variações nas proporções das partículas, a angularidade descreve variações relacionadas aos cantos, enquanto a textura se refere as irregularidades da superfície. Conforme pode ser verificado na Figura 4.

Figura 4 - Propriedades de forma do agregado



Fonte - Masad (2001, apud Al Rousan, 2004)

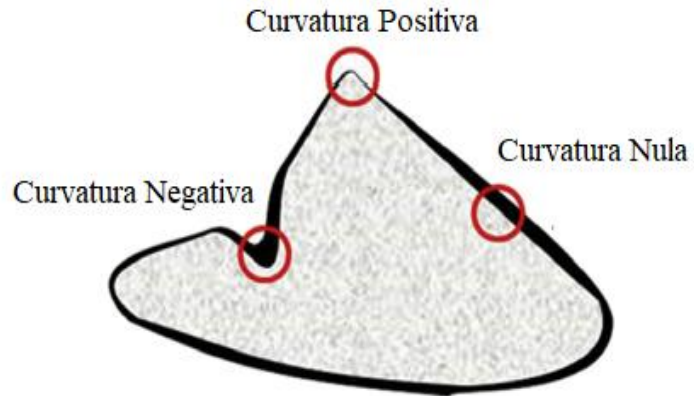
Araújo *et al.* (2013) avaliaram as propriedades de forma do material fresado antes e após a extração do betume. Eles perceberam que a maior mudança ocorreu para o parâmetro de textura superficial, que alterou sua classificação de alta rugosidade (antes da extração) para baixa rugosidade (após a extração). Estes autores verificaram ainda a diminuição da lamelaridade dos agregados, os quais se tornaram menos achatados e alongados em relação ao material inicial. Rocha Segundo (2014) observou que as propriedades de forma para os agregados fresados, obtidos por meio do PDI (AIMS), após a extração do betume foram partículas semicirculares (Forma 2D), com baixa esfericidade, subarredondadas e com textura superficial caracterizada como lisa.

Xu *et al.* (2019) observaram que em relação aos agregados novos, os agregados provenientes do fresado possuíram maior angularidade devido aos grumos, o que indica maior susceptibilidade à quebra para estes, em relação a aqueles, devido a uma maior instabilidade apresentada. Quanto a esfericidades os autores observaram que o agregado fresado apresentou menor esfericidade também devido a presença dos grumos, ou seja, menores esfericidades apresentam maior grau de clusterização e ainda pior estabilidade para os grumos e facilidade de quebra.

As propriedades de forma no agregado fresado influenciam no processo de ativação do ligante. Cavalli, Partl e Poulikakos (2017) avaliou as sucessivas camadas que recobrem o agregado fresado quando submetido ao processo de ativação do ligante, devido a inserção em misturas asfálticas recicladas, a depender da temperatura a qual estavam submetidos. Os autores concluíram que o filme de ligante que recobre o agregado fresado, quando sujeito ao processo de ativação, é dependente de fatores como temperatura e das propriedades de forma do agregado. A citar, destacaram que pode existir parcelas do ligante não ativado nas partículas do fresado, devido ao fenômeno intitulado como curvatura do agregado, e quando esta é negativa

(permite o acúmulo de ligante) torna mais complexo e quase inexistente a ativação local do ligante nesta, funcionando como uma espécie de *black-rock* local. A Figura 5, apresenta o conceito da curvatura do agregado fresado comentado pelos autores.

Figura 5 - Tipos de curvatura do agregado fresado



Fonte - Adaptado de Cavalli, Partl e Poulidakos (2017)



## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

### 6.1 Material – Fresado

O fresado avaliado neste estudo é oriundo do procedimento de fresagem de vias da cidade de Fortaleza. O material foi cedido pela empresa Insttale Engenharia Ltda., proveniente da fresagem da obra realizada no anel viário de Fortaleza, mas não se tem informações sobre características da mistura de projeto (teor de projeto de ligante e curva granulométrica), relativas ao material quando foi aplicado em campo, tempo de serviço, dentre outros fatores que facilitariam a previsão do comportamento do material no presente estudo. O fresado coletado para realização do estudo pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Fresado utilizado no estudo



(a) Pilha de fresado na usina

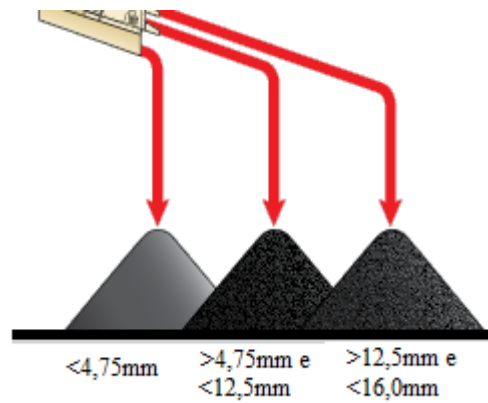


(b) *Fresado coletado*

Fonte – Elaborado pela autora

Quanto ao armazenamento do material, foram obtidas informações que as pilhas são formadas por combinações de tamanhos do fresado provenientes do processo de britagem. Inicialmente, o fresado é separado em 3 pilhas, das quais a primeira é composta pelos materiais passantes da peneira de 4,75mm, a segunda possui os materiais entre as frações acima de #4,75mm e abaixo da #12,5mm e a terceira é do fresado acima da #12,5mm e abaixo da #16mm, a ilustração pode ser observada na Figura 7. O fresado coletado para ser utilizado no estudo era proveniente de uma pilha formada pela junção de outras duas provenientes do processo de britagem, sendo 1/3 de sua composição constituída por fresado com tamanhos entre 4,75mm e 12,5mm e 2/3 relativos a partículas inferiores ao tamanho de 4,75mm.

Figura 7 - Composição das pilhas de fresado conforme tamanho de moagem

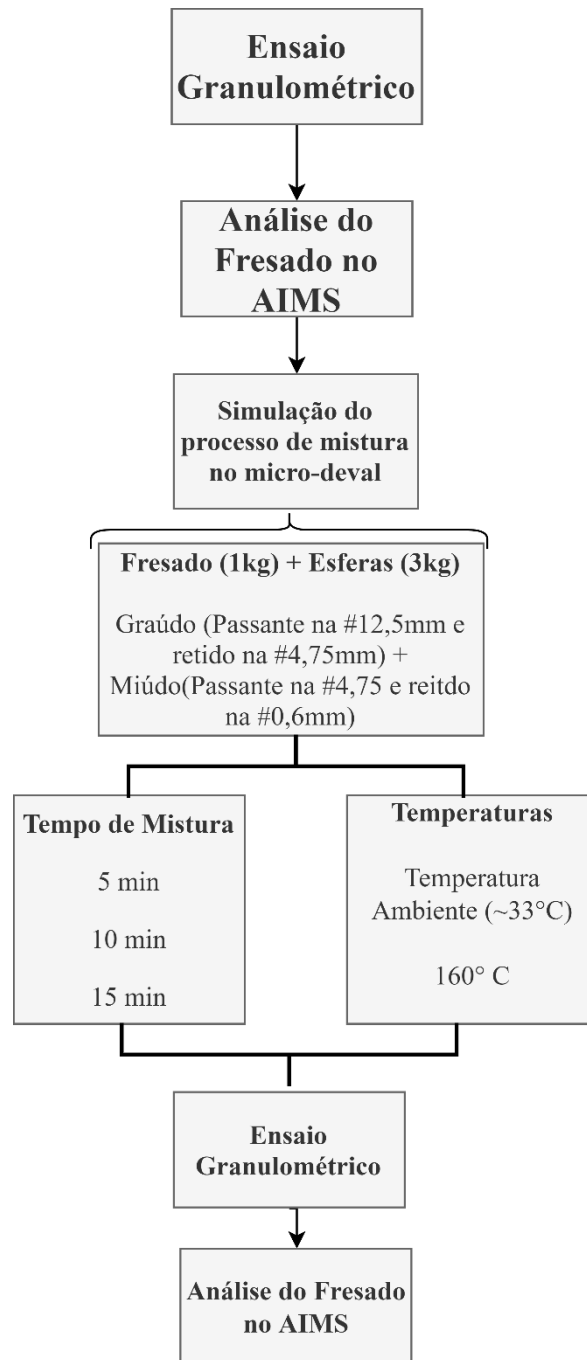


Fonte – Elaborado pela autora

## 6.2 Método

Nesta seção será apresentado o método aplicado para a elaboração deste trabalho. Como demonstrado no tópico de Revisão Bibliográfica, a ativação do ligante asfáltico contido no fresado e sua influência nas propriedades de forma dos agregados que compõem a mistura asfáltica reciclada ainda não foi completamente compreendida. Buscou-se a aplicação de um método capaz de realizar uma simulação do que, possivelmente, ocorre durante a usinagem da mistura asfáltica, exceto pela ausência de ligante asfáltico virgem. O fluxograma das atividades desenvolvidas pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma das etapas metodológicas do presente trabalho



Fonte – Elaborado pela autora

### 6.2.1 Determinação da curva granulométrica

O material coletado para a análise foi, inicialmente, quarteado, de modo a tornar a amostra avaliada para cada ensaio o mais homogêneo possível. Para a caracterização do fresado, realizou-se o ensaio de granulometria conforme a DNER-ME 083/98, entretanto as peneiras utilizadas foram as correspondentes as frações que são avaliadas no AIMS, que são: material

gráudo (9,5mm e 4,75mm) e material miúdo (2,36mm, 1,18mm, 0,6mm, 0,3mm, 0,15mm e 0,075mm). Alguns autores (Bonfim, 2011; Araujo *et al.*, 2013), identificaram que a curva granulométrica no fresado é uma variável que depende de fatores como: velocidade da fresadora, tipo de fresagem e tipos de cilindros de fresagem utilizados no processo.

### 6.2.2 *Análise das propriedades de forma através do PDI*

A fim de se avaliar as mudanças ocorridas nas propriedades de forma (angularidade, forma e textura) do agregado fresado, quando submetido a diferentes condições de temperatura e tempo de mistura, o agregado fresado foi avaliado por meio do PDI, com a utilização do AIMS, antes e após o procedimento realizado com o uso do micro-deval considerando as diferentes variáveis avaliadas nesse estudo.

A análise com o uso do AIMS é feita separadamente para cada fração. Para agregados graúdos (retidos na #4) são obtidos resultados de textura superficial, forma 3D e angularidade, enquanto que para os agregados miúdos (passante na #4 e retidos na #200) as propriedades obtidas são a forma bidimensional e a angularidade. Para tanto, o equipamento faz a análise com um número mínimo de 50 partículas para os agregados graúdos e de 150 partículas para os agregados miúdos. Os resultados são obtidos na forma de planilhas e gráficos onde são apresentados os dados individuais e agrupados das partículas. O AIMS pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Equipamento AIMS



(a) Visão externa



(b) Visão interna

Fonte – Elaborado pela autora

### 6.2.3 Ativação do ligante e desassociação de grumos utilizando o micro-deval

Apesar de ser um equipamento comumente utilizado para avaliar o desgaste de agregados, o micro-deval, apresentado na Figura 10, foi escolhido como um simulador do misturador utilizado na usina, com o objetivo de analisar a variação das propriedades de forma e granulometria do agregado fresado ao variar fatores como tempo e temperatura de mistura, assim como sua influência destes na desassociação dos grumos. Para a análise com variação da temperatura, foi necessário isolar termicamente o tambor que compõe o equipamento, de modo a evitar a perda de energia para o meio externo e o possível comprometimento das condições de operação do aparelho. Diante das variáveis que influenciam o processo de ativação do ligante e a desassociação dos grumos, podem ser destacadas o aquecimento, o efeito abrasivo e o tempo de mistura aplicado durante o processo de preparação das misturas asfálticas recicladas.

Figura 10 - Micro-deval com os dois tambores



Fonte – Elaborado pela autora

Para a primeira fase experimental analisaram-se 3 amostras (realizadas em duplicata) onde 1kg de fresado (que continha material de todas as frações a partir da #9,5mm até a #0,6mm). Essas amostras foram avaliadas no micro-deval com 3kg de esferas (carga abrasiva) que foram utilizadas no lugar do agregado virgem pela facilidade de separação das partículas posterior ao processo de mistura, onde a variável no processo foi o tempo de ensaio de 5 min para a primeira amostra, 10 min para a segunda amostra e 15 min para a terceira

amostra, conforme apresentado na Tabela 1. Outra variável que pode ser destacada no processo é relativa à quantidade de rotações por minuto (rpm) que é fornecida pelo micro-deval ao fim do tempo de análise.

Tabela 1 - Nomenclatura das amostras avaliadas para a variável tempo de mistura

<b>Temperatura ambiente <math>\approx 33^\circ</math></b>	Amostra 1 – A1
<b>Tempo de mistura = 5 min</b>	Amostra 2 – A2
<b>Temperatura ambiente <math>\approx 33^\circ</math></b>	Amostra 3 – A3
<b>Tempo de mistura = 10 min</b>	Amostra 4 – A4
<b>Temperatura ambiente <math>\approx 33^\circ</math></b>	Amostra 5 – A5
<b>Tempo de mistura = 15 min</b>	Amostra 6 – A6

Fonte – Elaborado pela autora

Para a segunda fase experimental foram avaliadas 3 amostras (realizadas em duplicata). O processo foi o mesmo que o apresentado para a fase anterior, entretanto aplicou-se a temperatura de  $160^\circ$  C. Para realizar o processo de aquecimento, tanto o agregado fresado quanto as esferas foram aquecidos, para a temperatura de análise, durante aproximadamente 20 minutos. A temperatura foi baseada em misturas asfálticas recicladas propostas por estudos anteriores (Bowers *et al.*, 2014; Bressi *et al.*, 2016; Cavalli *et al.*, 2017). Essa escolha ainda se sustenta na justificativa de que  $160^\circ$  C é um valor próximo ao valor limite estabelecido na Norma DNIT 031/2006 e costuma ser aplicado na usinagem de misturas asfálticas no Estado.

Tabela 2 - Nomenclatura das amostras avaliadas com aquecimento

<b>Temperatura = <math>160^\circ</math></b>	Amostra 7 – A7
<b>Tempo de mistura = 5 min</b>	Amostra 8 – A8
<b>Temperatura = <math>160^\circ</math></b>	Amostra 9 – A9
<b>Tempo de mistura = 10 min</b>	Amostra 10 – A10
<b>Temperatura = <math>160^\circ</math></b>	Amostra 11 – A11
<b>Tempo de mistura = 15 min</b>	Amostra 12 – A12

Fonte – Elaborado pela autora

### 6.3 Análise dos resultados

Para a classificação das propriedades de forma dos agregados, utilizou-se o sistema proposto por Ibiapina (2018), apresentado na Tabela 3. O sistema utilizado apresenta uma classificação baseada em um banco de dados de agregados brasileiros, de modo a classificar as

propriedades analisadas para cada amostra. Diante das classificações obtidas buscar inferir como esses resultados serão capazes de auxiliar no cumprimento do objetivo geral proposto neste trabalho.

Tabela 3 - Valores limites para classificação das propriedades de forma dos agregados

Propriedade	Valores limites				
Forma 2D	< 4,0	4,0 - 11,0	11,0 - 15,5	> 15,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Angularidade	< 1260	1260 - 4080	4080 - 7180	> 7180	-
	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 Superficial	< 260	260 - 440	440 - 600	600 - 825	> 825
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Fonte: Adaptado de Ibiapina (2018)

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

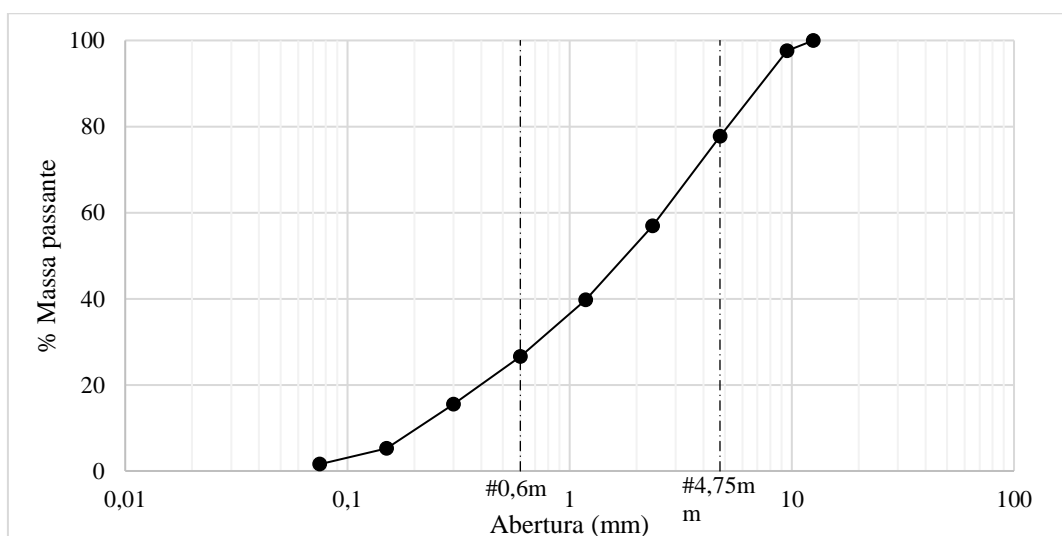
### 7.1 Análise da Curva Granulométrica

Nesta primeira parte dos resultados serão apresentadas as mudanças e observações realizadas para a análise da variação na granulometria do fresado, de modo a buscar compreender possíveis influências das variáveis estudadas, diante da metodologia aplicada. As curvas granulométricas serão apresentadas para o agregado fresado que não passou por nenhum procedimento de simulação do processo de mistura, para o agregado fresado submetido à simulação de mistura variando o tempo de mistura e para o fresado submetido ao aquecimento para diferentes tempos de mistura, respectivamente.

#### 7.1.1 Curva granulométrica para caracterização do fresado inicial

O fresado que compõe o estudo é composto prioritariamente por frações miúdas, cerca de 77,4 % são partículas passantes na peneira de 4,75mm, conforme pode ser observado pela curva granulométrica apresentada no Gráfico 1. Diante da análise do gráfico observa-se que o material é composto por agregados passantes na #12,5mm até a fração da #0,075mm, onde a maior parte deste é formada pela soma das partículas passantes na #9,5mm e retidas na #4,75mm e as passantes desta e retidas na #2,36 mm, as duas frações juntas correspondem a cerca de 40,7% de massa da amostra analisada.

Gráfico 1- Curva Granulométrica do fresado coletado para o estudo



Fonte – Elaborado pela autora



O fresado em estudo, ao observar o Gráfico 1, pode ser classificado como um material contínuo e bem graduado dentro de suas frações constituintes. Tal classificação dentro da preparação de misturas asfálticas convencionais é relevante para a otimização do esqueleto mineral desta, devido a presença de materiais que permitem melhor organização na estrutura e, conseqüentemente, provavelmente mais resistência para o compósito. Pode-se dizer ainda que, devido a presença de um grande percentual de finos no material, espera-se que este possua maiores quantidades de ligantes quando comparado a uma curva composta em sua maioria por agregados graúdos devido a área de superfície específica dos materiais de tamanho menor.

Para as amostras que foram submetidas ao processo de mistura, observou-se a quantidade de material retido para cada uma das frações do material inicial e obteve-se o equivalente a este para as frações avaliadas, retidos na peneira 9,5mm e retidos na peneira 0,6mm, de modo a encontrar a massa para cada peneira dentro desse intervalo para a amostra de 1kg, o que levou o percentual passante para a peneira de 0,6mm igual a zero. As curvas granulométricas podem ser observadas nos resultados encontrados nas próximas sessões.

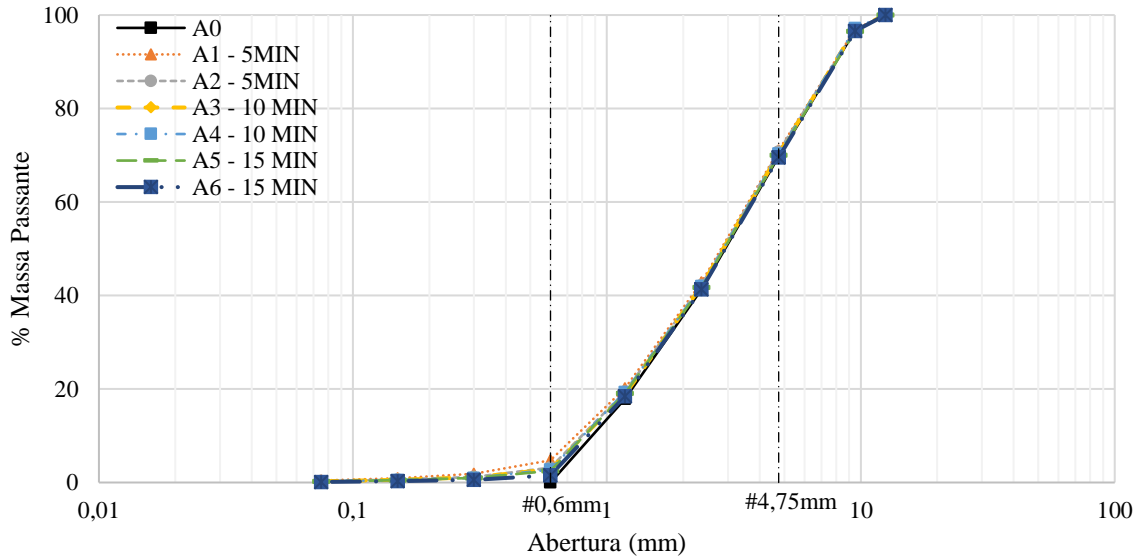
### ***7.1.2 Curva granulométrica para diferentes tempos de misturas***

O Gráfico 2 apresenta a curva granulométrica obtida para todas as amostras analisadas na primeira parte experimental. É possível observar que após o procedimento realizado no micro-deval nos tempos estabelecidos, houve o aparecimento de frações inferiores a peneira limite de 0,6mm para todas as amostras, acredita-se que diante da existência de grumos nas amostras esse foi um comportamento esperado. No entanto, a presença de materiais mais finos também pode ser referente ao processo abrasivo ao qual o material foi submetido. Segundo Cavalcanti (2016) a variação de massa durante o processo de polimento utilizando o micro-deval, deve ser suave com pequenas variações de massa. Entretanto o autor observou que, podem ocorrer duas situações em relação ao polimento, uma em que o agregado é polido de modo a ficar retido na peneira subsequente a fração ao início do processo, e outra onde este pode sofrer uma maior influência do polimento e ter suas partículas retidas em peneiras inferiores a trabalhada, que não seja a imediatamente inferior a peneira inicial.

Ou seja, tanto o desmembramento dos grumos quanto o processo abrasivo podem ter sido responsáveis pela mudança na curva granulométrica, o que leva a crer que serviços de pavimentação que façam a incorporação do fresado na mistura estejam sujeitos a sofrerem

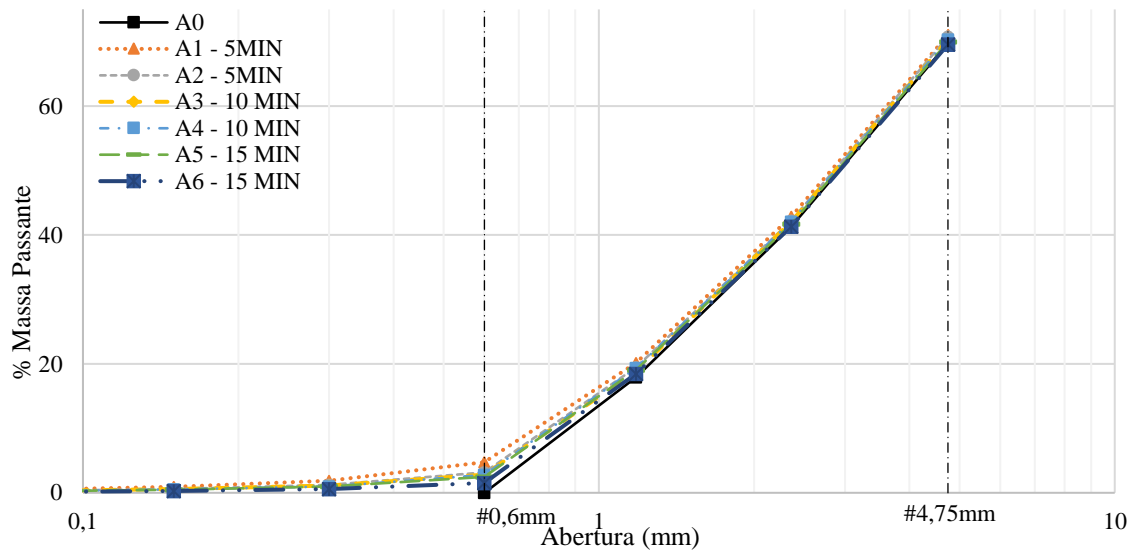
influência de ambos os fatores no comportamento da mistura asfáltica reciclada e no arranjo mineral estrutural desta.

Gráfico 2 - Curva granulométrica obtida para as amostras avaliadas para o tempo de mistura ( $T \approx 33^{\circ}\text{C}$ )



Fonte – Elaborado pela autora

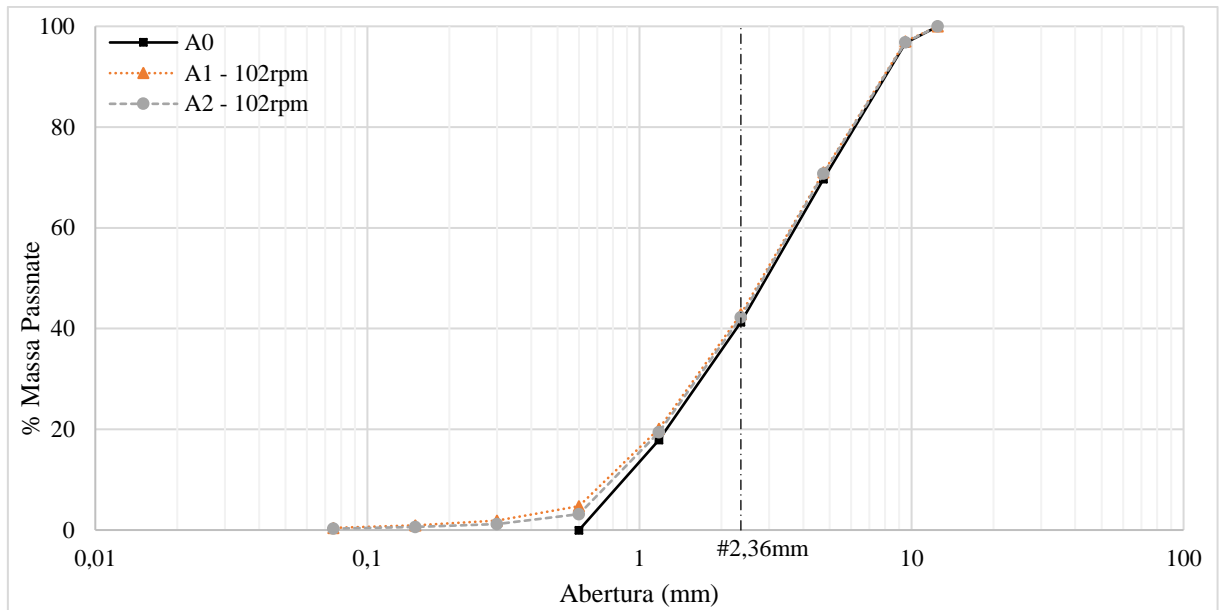
No Gráfico 3 estão apresentadas as curvas granulométricas para as frações a partir da peneira de 4,75mm. É possível observar melhor o comportamento obtido para as curvas e as frações mais finas diante dos dados apresentados onde estes seguem um padrão em que as amostras, começam a apresentar certo deslocamento em relação à curva base a partir da fração de 4,75mm. Percebe-se ainda que as amostras submetidas aos menores tempos de mistura estão deslocadas acima das curvas das amostra em que houve maiores tempos de misturas ou mesmo da amostra A0 que se refere ao material sem nenhum tempo de mistura aplicado.

Gráfico 3 - Curvas granulométricas das amostras para o tempo de mistura ( $T \approx 33^\circ\text{C}$ ) a partir da #4,75mm

Fonte – Elaborado pela autora

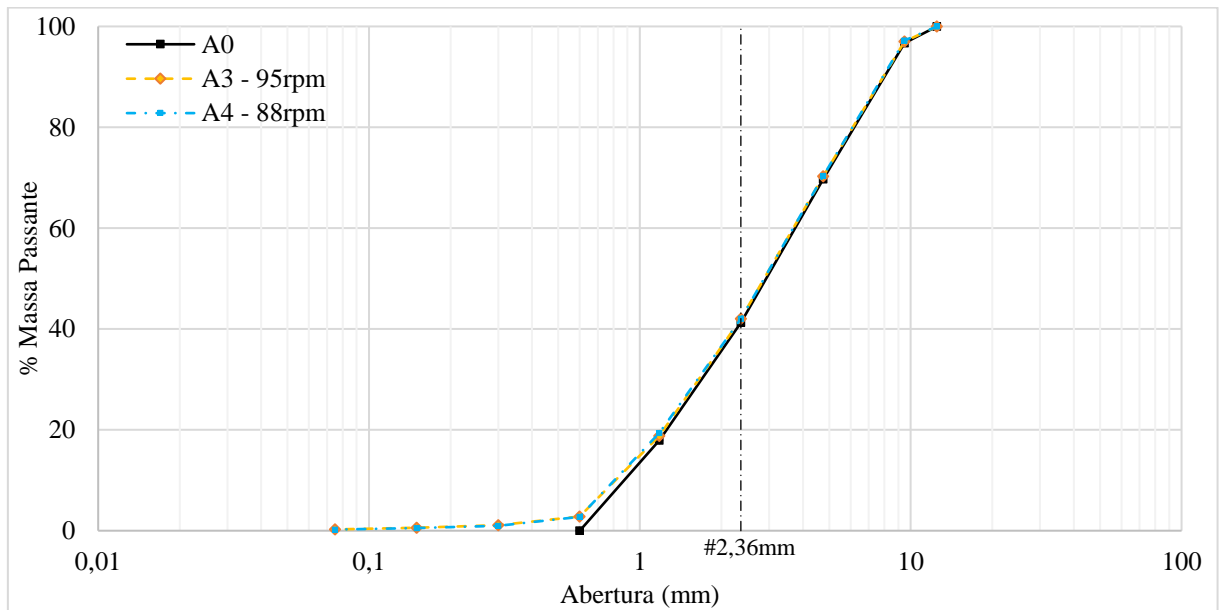
Essa observação de que menores tempos possuíram curvas com maiores percentuais de massa passante pode estar relacionado a mudança identificada na quantidade de rotações por minuto para cada um dos materiais. Apesar de possuírem menor tempo, observou-se que as amostras A1 e A2 apresentaram maiores números de rotação por minuto, de 102 rpm, enquanto as amostras A5 e A6 obtiveram em média 77 rotações por minuto, o que provavelmente influenciou na quantidade de finos abaixo da peneira limite para as amostras. As curvas para cada um dos tempos assim como a quantidade de rpm para cada amostra podem ser melhor visualizadas nos Gráficos 4, 5 e 6.

Gráfico 4 - Curva Granulométrica para amostras com tempo de misturas de 5 minutos



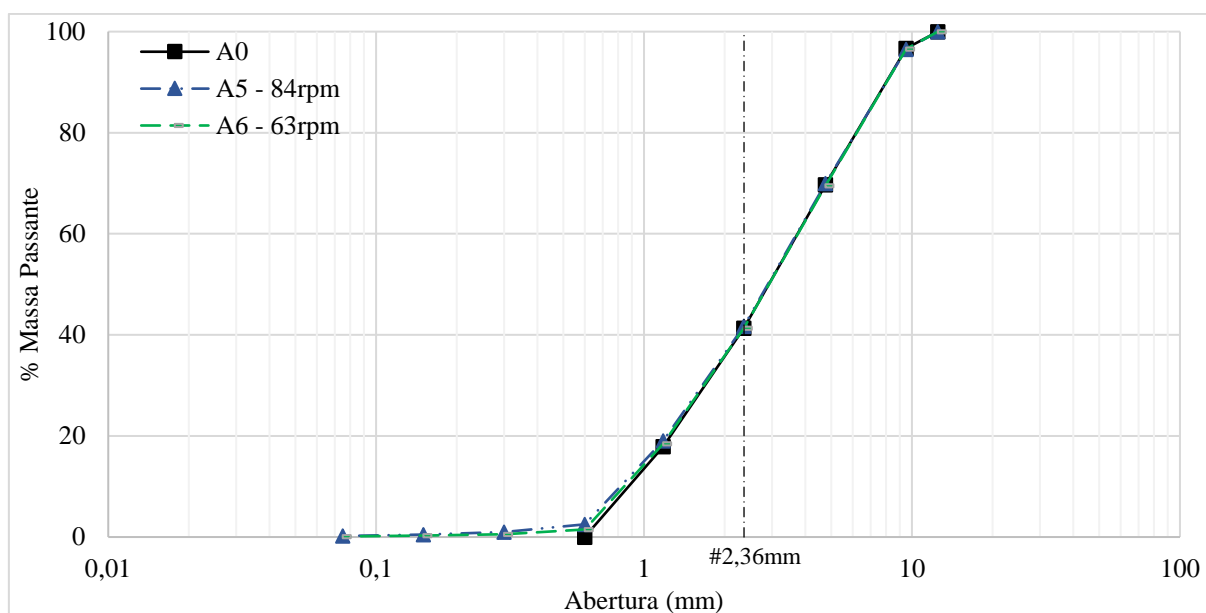
Fonte – Elaborado pela autora

Gráfico 5 - Curva Granulométrica para amostras com tempo de misturas de 10 minutos



Fonte – Elaborado pela autora

Gráfico 6 - Curva Granulométrica para amostras com tempo de misturas de 15 minutos



Fonte – Elaborado pela autora

Diante dos dados obtidos para as curvas granulométricas com os diferentes tempos de misturas, é possível notar que estas se sobrepõem até a peneira de 2,36mm, onde a partir desta observa-se uma tendência de deslocamento superior da curva, indicando maiores percentuais de partículas passantes na peneira para as frações inferiores a esta, conforme pode ser verificado na Tabela 4. O aparecimento das frações inferiores a peneira limite pode ter ocorrido, conforme mencionado anteriormente, tanto pelo desgaste das partículas quanto pelo desmembramento de grumos.

Tabela 4 - % Massa passante na #2,36 para as amostras sem aquecimento

Amostra	%Passante	Média %Passante
<b>A0</b>	41,32	41,32
<b>A1 - 5min</b>	42,85	42,53
<b>A2 - 5min</b>	42,21	
<b>A3- 10min</b>	42,06	42,05
<b>A4- 10min</b>	42,03	
<b>A5- 15min</b>	41,70	41,51
<b>A6- 15min</b>	69,55	

Fonte – Elaborado pela autora

Na Tabela 5 podem ser verificadas as diferenças dos percentuais de massa passante para cada par de amostras submetidas ao mesmo tempo de ensaio. É possível

observar numericamente que as diferenças são pequenas e não chegam a 2% de massa percentual passante para as amostras em nenhuma das frações.

Tabela 5 – Diferença do % massa passante para cada fração das amostras sem aquecimento

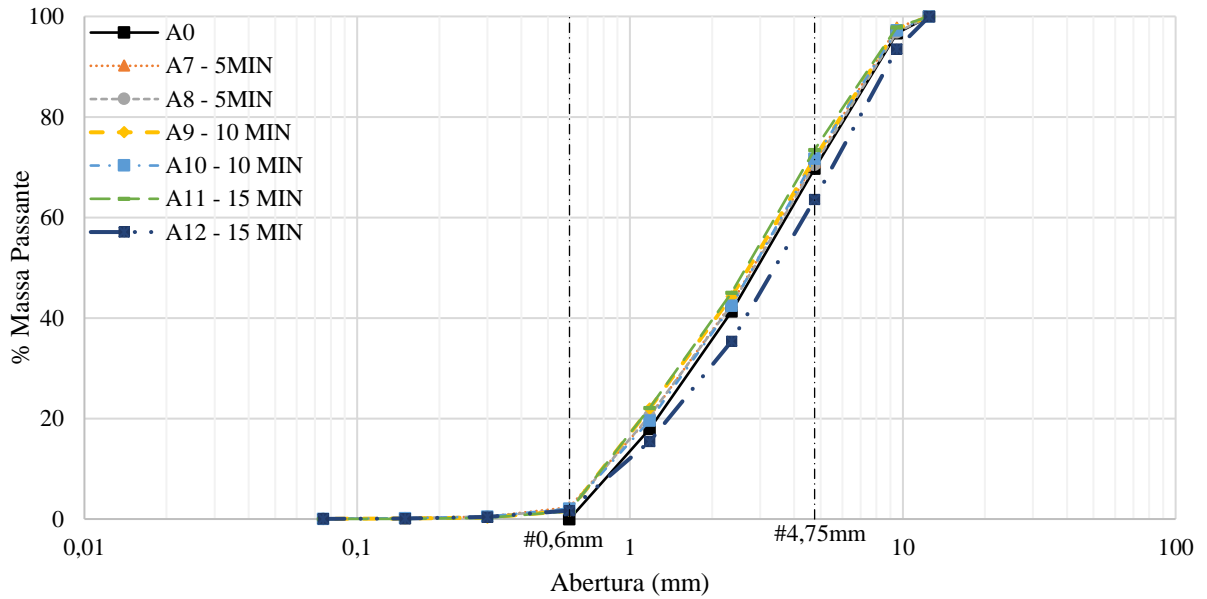
<b>Peneira</b>	<b>(A1 - A2)</b>	<b>(A3 - A4)</b>	<b>(A5 - A6)</b>
<b>12,5</b>	0,00	0,00	0,00
<b>9,5</b>	0,17	-0,23	-0,08
<b>4,75</b>	0,28	-0,02	0,43
<b>2,36</b>	0,64	0,03	0,39
<b>1,18</b>	0,71	-0,54	0,58
<b>0,6</b>	1,60	0,06	0,97
<b>0,3</b>	0,68	0,12	0,40
<b>0,15</b>	0,32	0,07	0,20
<b>0,075</b>	0,16	0,03	0,09

Fonte – Elaborado pela autora

### **7.1.3 Curva granulométrica obtida para mudança na temperatura**

As curvas para as amostras submetidas ao aquecimento, com os mesmos tempos de misturas das anteriores, podem ser observadas no Gráfico 7. É possível perceber que houve uma menor inclinação da curva referente ao surgimento das frações inferiores a peneira de 0,6mm em relação as amostras sem o aquecimento. A inclinação encontrada para as amostras aquecidas teve valor máximo de 3,87 para a amostra A7 (5min – 160°C), enquanto a menor inclinação das amostras sem aquecimento foi de 4,14 para amostra A5 (15min – 33°C), superior à obtida para amostras aquecidas. Além disso, é possível observar que apesar de possuírem comportamento similar as amostras que não foram submetidas à variação da temperatura, uma das amostras apresentou-se deslocada à direita da curva inicial, o que indica que houve maior percentual de material retido.

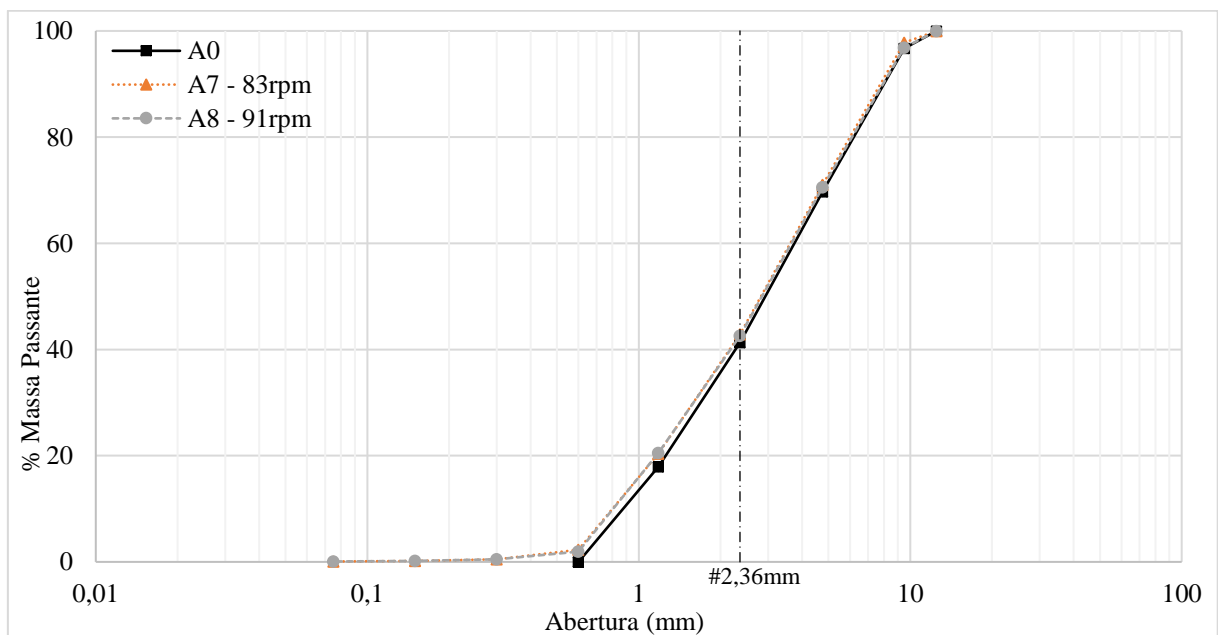
Gráfico 7 - Curva granulométrica para amostras submetidas a temperatura de 160°C



Fonte – Elaborado pela autora

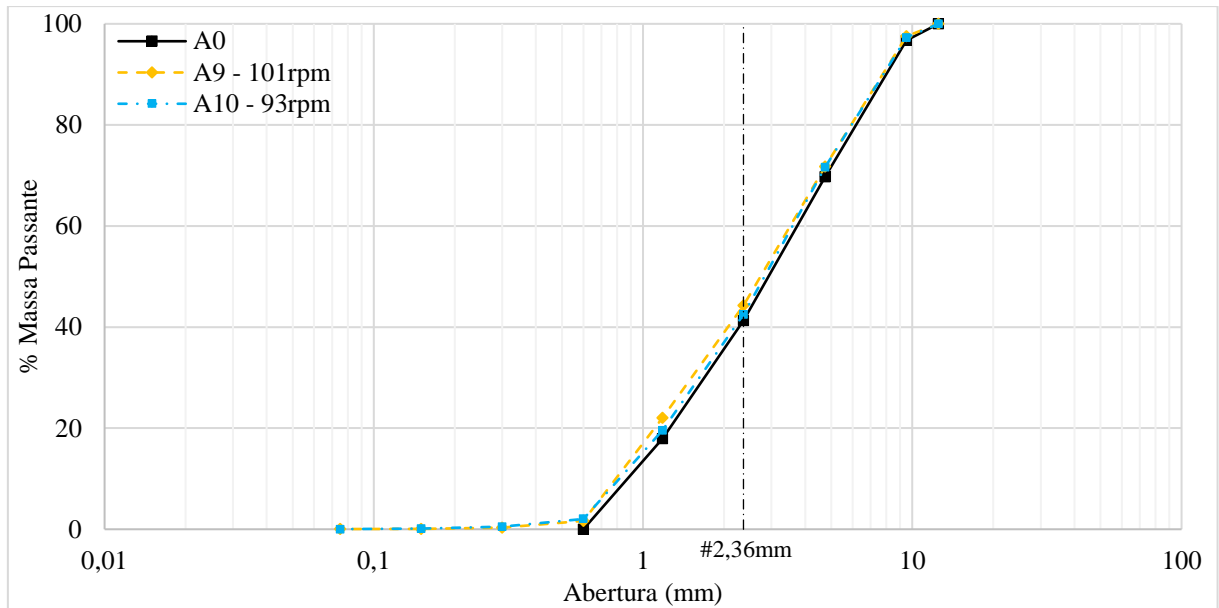
Os Gráficos 8 e 9 apresentam as curvas granulométricas obtidas para as amostras aquecidas e submetidas aos tempos de misturas de 5 e 10 minutos, respectivamente. Nota-se que estes são similares as curvas correspondentes ao processo sem aquecimento, tanto em relação ao aparecimento das frações inferiores a peneira limite, quanto em relação a sobreposição das curvas, conforme pode ser observado nos Gráficos 10 e 11.

Gráfico 8 - Curva granulométrica para amostras com T=160°C e tempo de mistura = 5 minutos



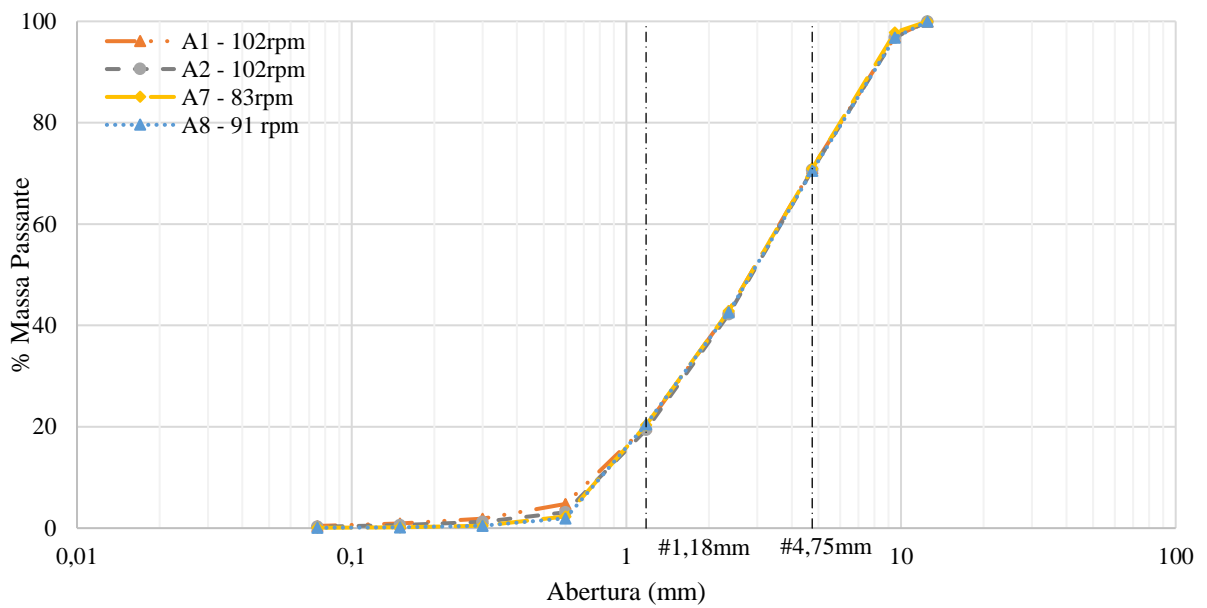
Fonte – Elaborado pela autora

Gráfico 9 - Curva granulométrica para amostras com T=160°C e tempo de mistura = 10 minutos



Fonte – Elaborado pela autora

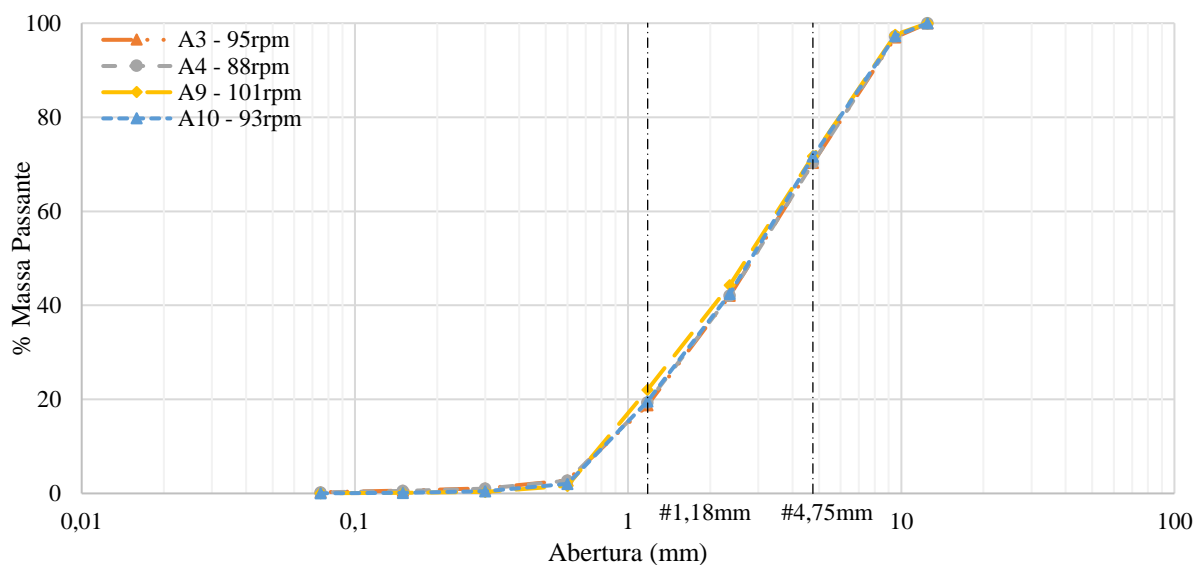
Gráfico 10 - Curva granulométrica para amostras com e sem aquecimento e tempo de mistura = 5 minutos



Fonte – Elaborado pela autora



Gráfico 11 - Curva granulométrica para amostras com e sem aquecimento e tempo de mistura = 10 minutos



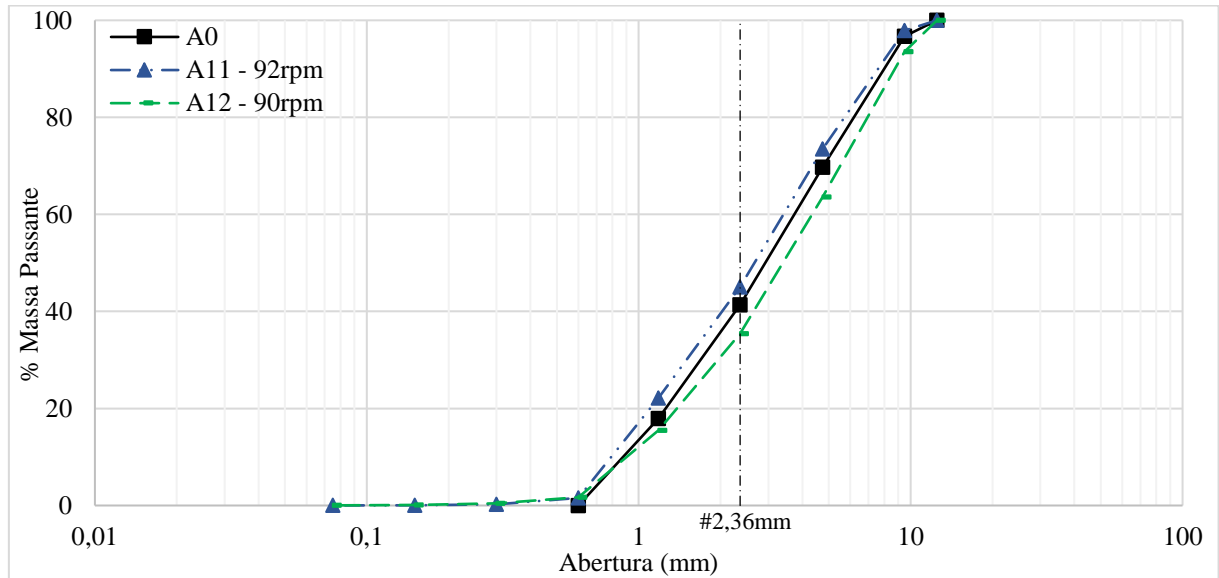
Fonte – Elaborado pela autora

O Gráfico 12 apresenta as curvas granulométricas para o tempo de mistura de 15 minutos. Diferente do que ocorreu para as amostras anteriores, ele mostra a curva para cada uma das amostras em posições diferentes em relação ao material base. A amostra A11, similar ao que ocorreu para as outras análises, se apresentou deslocada a esquerda para todas as frações, indicando que houve mais partículas passantes para cada uma das peneiras, e, conseqüentemente, este fato deve ser relacionado a influência das variáveis em relação ao desmembramento dos grumos. No entanto, ao observar-se a curva referente a amostra A12, submetida à mesma temperatura e ao mesmo tempo de mistura aplicado que a anterior, esta apresenta maiores quantidades de partículas retidas para cada uma das frações até chegar na peneira de 1,18mm.

Analisando com base no ensaio experimental, pode se relacionar o fato do aparecimento de maiores percentuais de partículas retidas a algumas variáveis como: o tempo que a amostra permaneceu dentro do tambor finalizado o tempo de rotação; a influência do percentual das frações miúdas, que foram as principais constituintes da amostra representando mais de 69% da massa analisada; e ainda a maior quantidade de ligante para a parte fina do material que, quando aquecido, favoreceu a união das partículas pelo processo de formação de grumos. Ou seja, o aquecimento das partículas, assim como o tempo de espera após o processo de mistura, diante do procedimento adotado e da amostra analisada, possibilitou o processo de formação de grumos. Entretanto, o fator preponderante para a ocorrência do fenômeno foi o

tempo de espera sem rotação, visto que todos os outros fatores também estavam presentes nas outras amostras onde não ocorreu este efeito de modo tão perceptível.

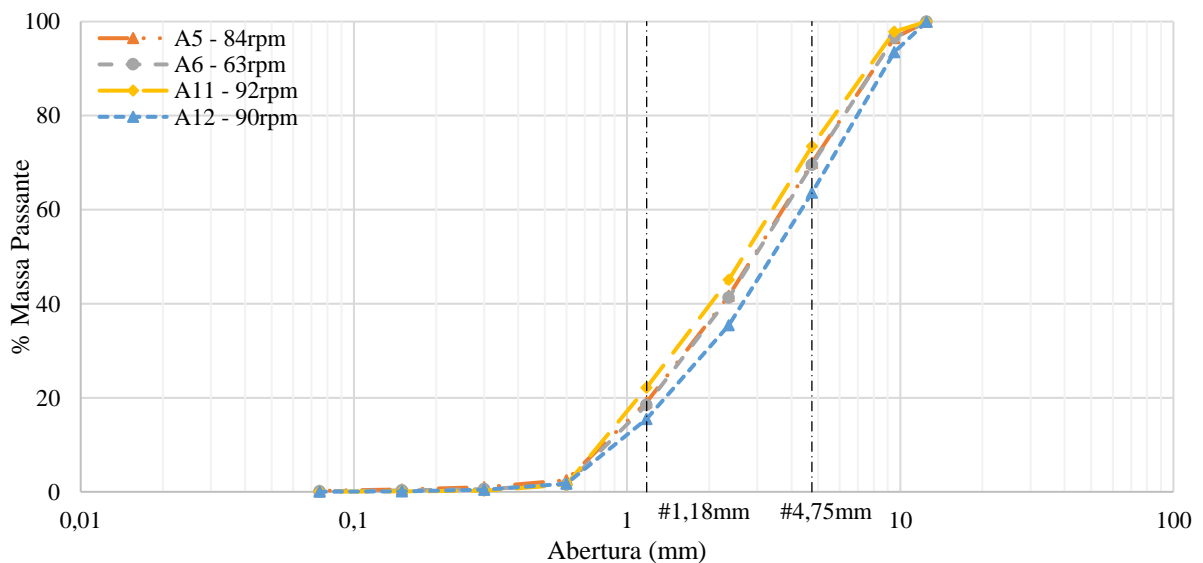
Gráfico 12 - Curva granulométrica para amostras com  $T = 160^\circ \text{C}$  e tempo de mistura = 15 minutos



Fonte – Elaborado pela autora

A comparação para as amostras submetidas ao tempo de mistura igual a 15 minutos, sem aquecimento e aquecidas a  $160^\circ \text{C}$ , pode ser observada no Gráfico 13. Em relação as amostras com o mesmo tempo, essa foi a que obteve maior divergência de valores em relação aos percentuais passantes, que pode ser visualmente verificado no gráfico.

Gráfico 13 - Curva granulométrica para amostras com e sem aquecimento e tempo de mistura = 10 minutos



Fonte – Elaborado pela autora

Na Tabela 5 podem ser verificadas as diferenças dos percentuais de massa passante para cada par de amostras submetidas ao mesmo tempo de ensaio. Como pode ser verificado nos gráficos as diferenças são pequenas em relação a cada peneira, as amostras submetidas ao tempo de 15 minutos foram as que apresentaram maiores distância dos valores entre si.

Tabela 6 – Diferença do % massa passante para todas as frações das amostras sem aquecimento

<b>Peneira</b>	<b>(A7 - A8)</b>	<b>(A9 - A10)</b>	<b>(A11 - A12)</b>
<b>12,5</b>	0,00	0,00	0,00
<b>9,5</b>	0,98	0,28	4,36
<b>4,75</b>	0,48	0,09	9,92
<b>2,36</b>	0,31	1,82	9,66
<b>1,18</b>	-0,15	2,44	6,71
<b>0,6</b>	0,36	-0,43	-0,18
<b>0,3</b>	-0,01	-0,17	-0,21
<b>0,15</b>	0,00	-0,06	-0,06
<b>0,075</b>	0,01	0,01	-0,01

Fonte – Elaborado pela autora

## **7.2 Caracterização das propriedades de forma – AIMS**

Neste tópico, serão apresentadas as mudanças e observações realizadas para a etapa de caracterização das propriedades de forma, pelo PDI, do agregado fresado. Serão apresentados os resultados para o agregado fresado natural sem passar por nenhum procedimento de simulação do processo de mistura, para o agregado fresado submetido à simulação de mistura variando-se o tempo de mistura e para o fresado submetido ao aquecimento para diferentes tempos de mistura, respectivamente.

### **7.2.1 Caracterização das propriedades de forma do fresado inicial**

Diante da análise realizada com o AIMS foi possível obter as propriedades de forma do material tanto pela valor médio de cada fração, apresentada na Tabela 7, como pelo percentual de partículas para cada classificação. A angularidade das partículas foi classificada

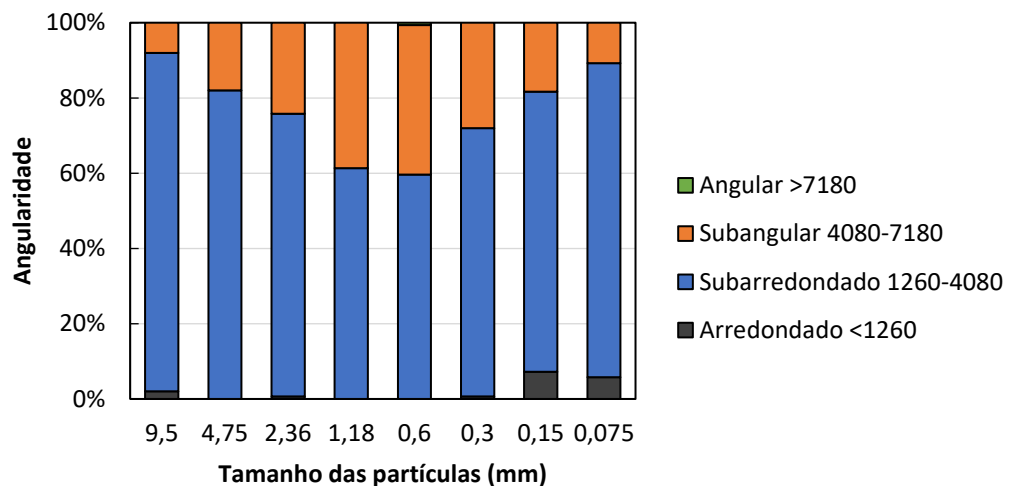
como subarredondadas tanto para a média das frações, quanto para o percentual de partículas. Ainda é possível perceber que, com exceção das partículas da peneira 0,6mm todas as outras apresentaram mais que 60% do seu material dentro da categoria, conforme pode ser verificado no Gráfico 14, enquanto o segundo maior percentual foi de partículas subangulares.

Tabela 7 - Propriedades de formas obtida pela média das peneiras para o fresado inicial

PROPRIEDADE	VALOR	CLASSIFICAÇÃO
Angularidade	3371,43	Subarredondado
Textura	726,65	Rugosidade moderada
Forma 2D	7,39	Semicircular
Esfericidade	0,71	Esfericidade moderada

Fonte – Elaborado pela autora

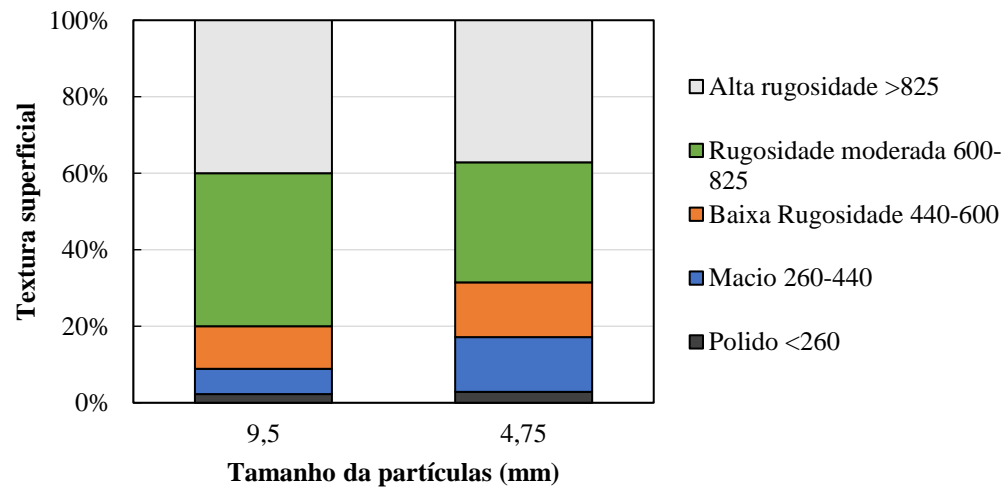
Gráfico 14 - Angularidade obtida para o fresado analisado no AIMS antes da simulação



Fonte – Elaborado pela autora

Para a textura superficial, conforme está apresentado no Gráfico 15, as partículas estão com 40% do total analisado classificados com rugosidade moderada e 40% classificados com alta rugosidade, para a peneira de 9,5mm e com maior percentual em relação as outras classificações para alta rugosidade na #4,75mm, quando se avalia o valor para a média das frações dessa variável, ela é considerada como rugosidade moderada.

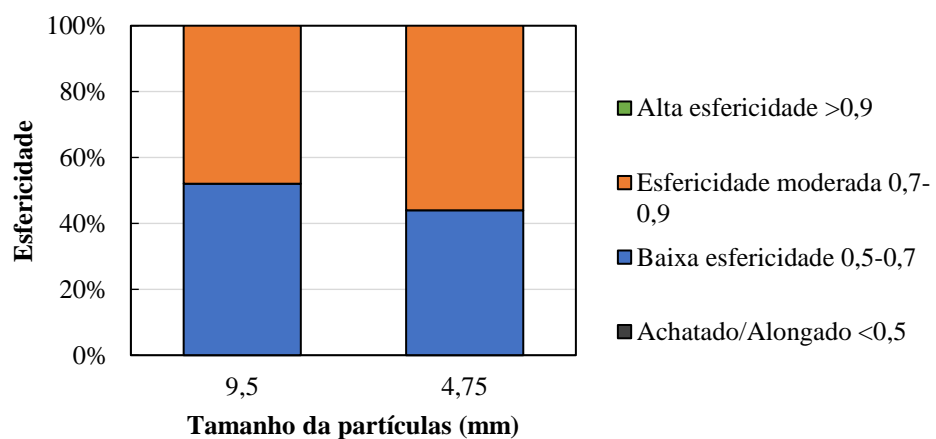
Gráfico 15 - Textura superficial obtida para o fresado analisado no AIMS antes da simulação



Fonte – Elaborado pela autora

Para os valores de esfericidade obtidos, conforme a média das peneiras, as partículas são consideradas com esfericidade moderada. Entretanto, ao avaliar cada peneira, individualmente, para a classificação de acordo com o percentual de partículas em cada fração dentro da categoria a peneira de 9,5 mm é considerada como de baixa esfericidade com 52% de suas partículas compreendidas nessa categoria. Os resultados podem ser visualizados no Gráfico 16.

Gráfico 16 - Esfericidade obtida para o fresado analisado no AIMS antes da simulação

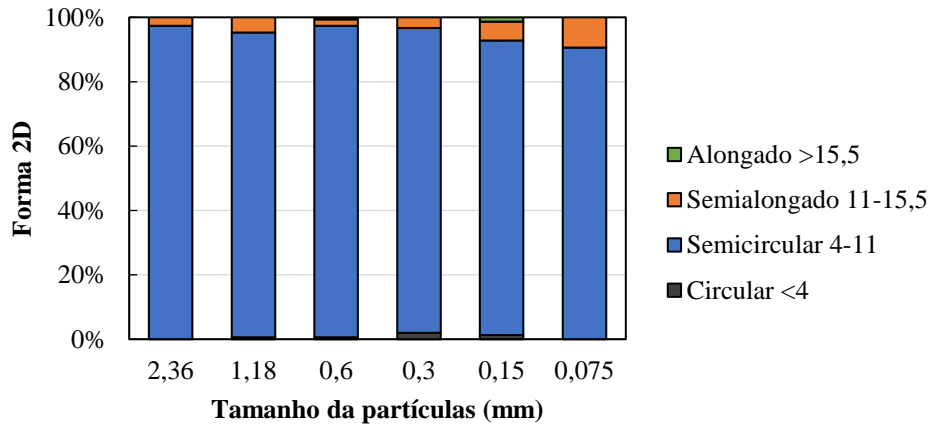


Fonte – Elaborado pela autora

Para a propriedade de Forma 2D é possível perceber que todas as frações miúdas se apresentam com mais de 90% das partículas classificadas como semicirculares, conforme está

apresentado no Gráfico 17. Essa classificação, para a área de infraestrutura de transportes, pode ser considerada melhor do que a existência de partículas mais alongadas, pois estas diminuem a probabilidade de quebra devido ao processo de preparação, transporte e aplicação das misturas asfálticas.

Gráfico 17 - Forma 2D obtida para o fresado analisado no AIMS antes da simulação



Fonte – Elaborado pela autora

### 7.2.2 Caracterização das propriedades de forma para diferentes tempos de mistura

Para as propriedades de forma das 6 amostras avaliadas no AIMS, em comparação ao fresado não submetido a nenhum processo de simulação de mistura, observou-se que os resultados para as médias das peneiras não apresentaram alterações capazes de modificar a classificação para a angularidade e forma 2D, entretanto deve se pontuar que a classificação abrange uma ampla faixa para cada classificação, conforme foi visto na Tabela 3. A esfericidade para 3 das amostras submetidas aos tempos superiores (10 e 15 minutos) tiveram as suas classificações alteradas de esfericidade moderada para baixa esfericidade, levando em consideração a média das peneiras, conforme pode se verificar na Tabela 8. Tal fato indica que, apesar de não ser tão perceptível a mudança, a amostra se tornou mais susceptível a quebra.

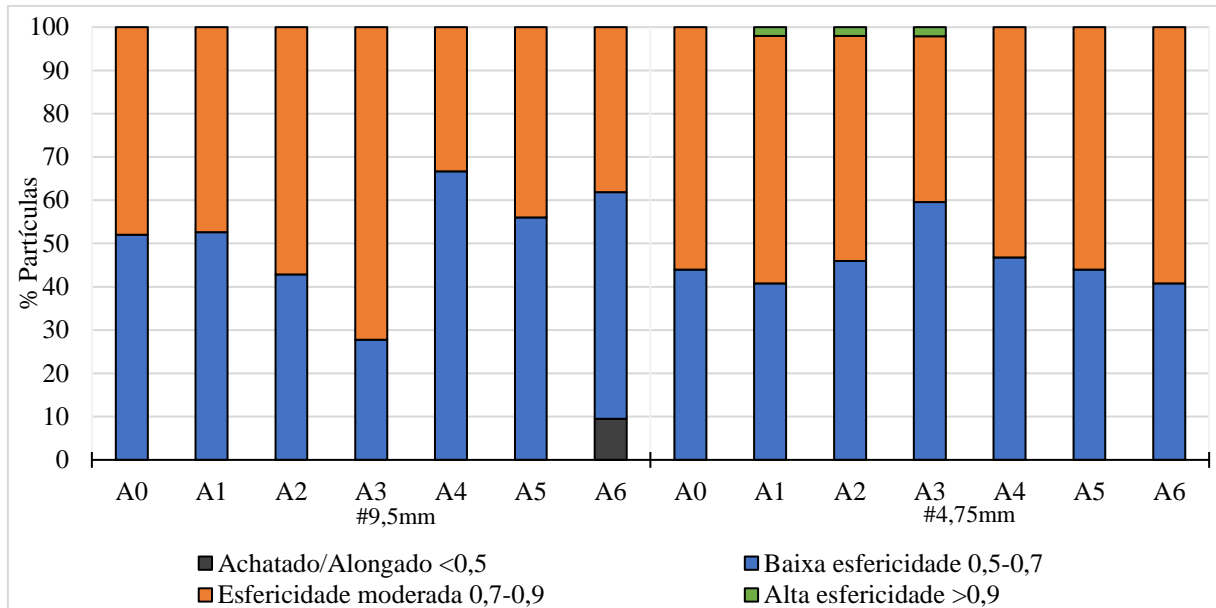
Tabela 8 - Propriedades de formas obtida para o fresado submetido a diferentes tempos de mistura

	A1 - 5 MIN		A2 - 5 MIN	
<b>PROPRIEDADE</b>	<b>VALOR</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>VALOR</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
<b>ANGULARIDADE</b>	3.084,22	Subarredondado	3.222,83	Subarredondado
<b>TEXTURA</b>	449,86	Baixa rugosidade	523,45	Baixa rugosidade
<b>FORMA 2D</b>	7,11	Semicircular	7,18	Semicircular
<b>ESFERICIDADE</b>	0,71	Esfericidade moderada	0,72	Esfericidade moderada
	A3 - 10 MIN		A4 - 10 MIN	
<b>PROPRIEDADE</b>	<b>VALOR</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>VALOR</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
<b>ANGULARIDADE</b>	3.115,77	Subarredondado	3.285,79	Subarredondado
<b>TEXTURA</b>	502,91	Baixa rugosidade	555,31	Baixa rugosidade
<b>FORMA 2D</b>	7,15	Semicircular	7,26	Semicircular
<b>ESFERICIDADE</b>	0,70	Esfericidade moderada	0,69	Baixa esfericidade
	A5 - 15 MIN		A6 - 15 MIN	
<b>PROPRIEDADE</b>	<b>VALOR</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>VALOR</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO</b>
<b>ANGULARIDADE</b>	3.168,83	Subarredondado	3.255,71	Subarredondado
<b>TEXTURA</b>	498,64	Baixa rugosidade	548,95	Baixa rugosidade
<b>FORMA 2D</b>	7,19	Semicircular	7,29	Semicircular
<b>ESFERICIDADE</b>	0,70	Baixa esfericidade	0,69	Baixa esfericidade

Fonte – Elaborado pela autora

Conforme apresentado na Tabela 8, os valores de esfericidade obtidos para o tempo de mistura igual a 15 minutos é o mesmo encontrado para as amostras submetidas ao tempo de 10 minutos. Ou seja, apesar de acreditar que o processo de polimento deveria afetar na redução dos valores de esfericidade, diante dos resultados obtidos para este estudo, não se observa essa distinção com base na média da esfericidade para as frações. Ao analisar individualmente as frações para a peneira de 9,5mm, percebe-se a tendência na redução do percentual das partículas com esfericidade moderada, a amostra A3 pode ser considerada um outlier analisando sob essa perspectiva. Para a fração de 4,75mm existe a tendência no aumento de partículas com menores esfericidades à medida que se aumenta o tempo de mistura, com exceção do tempo de 15 minutos, onde os valores para o percentual diminuem, conforme pode ser visto no Gráfico 18.

Gráfico 18 - Esfericidade obtida para o fresado analisado no AIMS para diferentes tempos de misturas

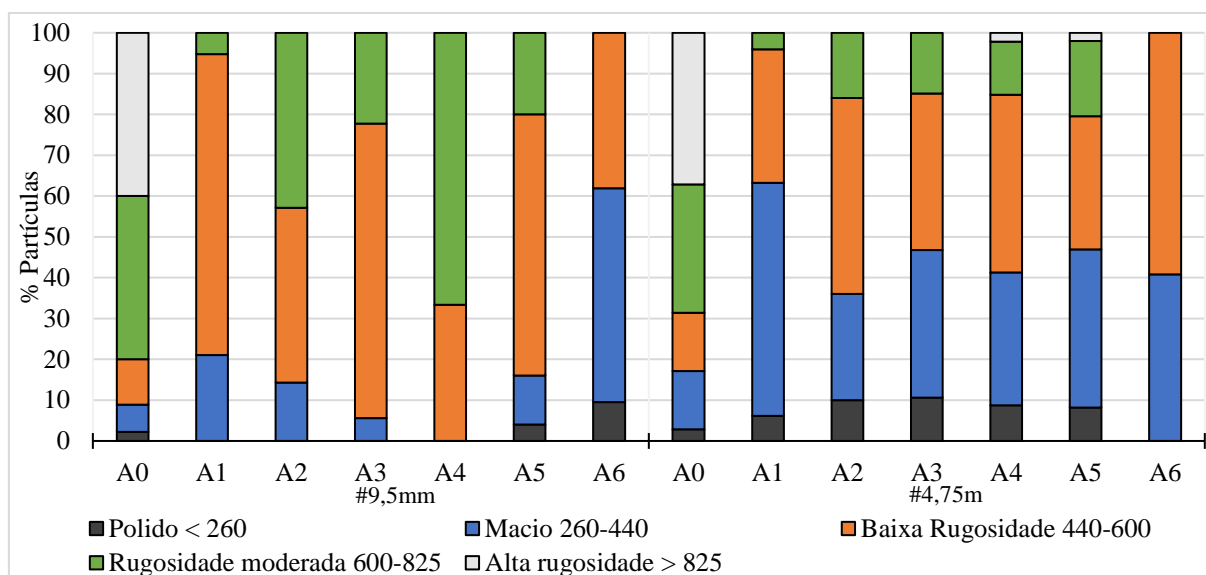


Fonte – Elaborado pela autora

Além da esfericidade, a textura superficial também apresentou redução em seu valor. Como pode ser visto no Gráfico 19, a quantidade de partículas dentro de classificações menos esféricas se tornou maior. Isto pode ser relacionado tanto ao efeito abrasivo na superfície do agregado, de modo a torna-lo mais polido, como também devido a diminuição dos grumos aderidos à superfície, que são capazes de mascarar os valores reais deste parâmetro. Entretanto, levando em consideração o número mínimo de partículas, deveria ser considerada apenas a peneira de 4,75mm para fins de análise, haja vista que a peneira de 9,5mm não possuiu o valor mínimo de 50 partículas para obtenção dos parâmetros.



Gráfico 19 – Textura superficial obtida para o fresado analisado no AIMS para diferentes tempos de misturas sem aquecimento



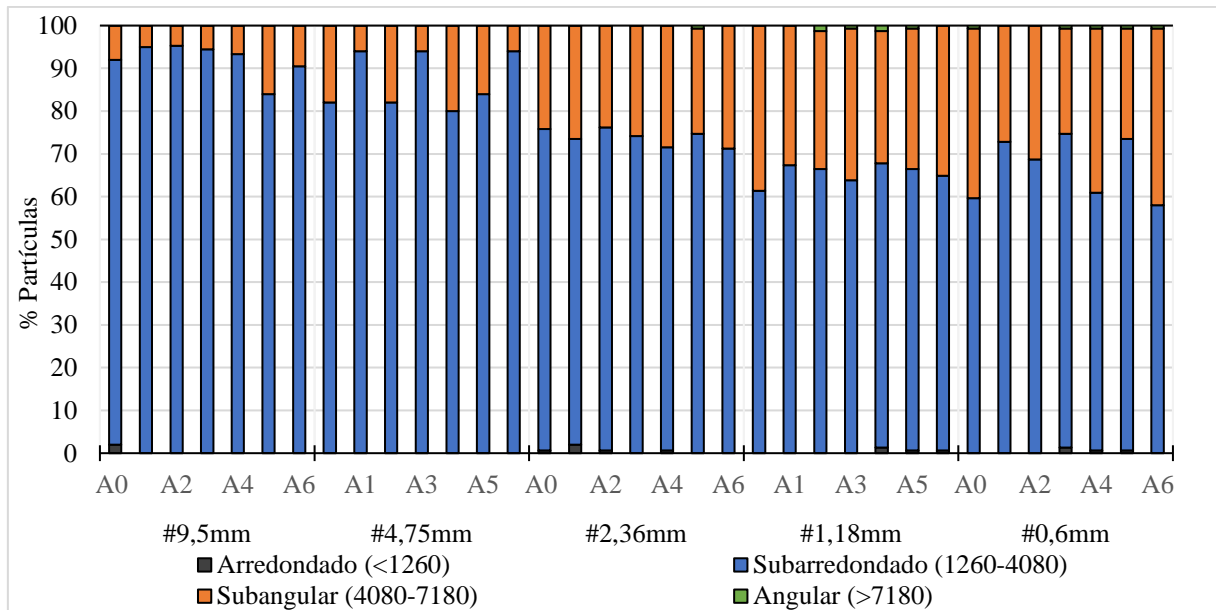
Fonte – Elaborado pela autora

Apesar da quantidade mínima de partículas não ter sido considerada suficiente, os valores obtidos para o ensaio, até então, se apresentaram de acordo com os obtidos para o fresado sem a realização de algum procedimento. Além do mais, considerar que o comportamento apresentado pelas partículas retidas na peneira de 4,75mm ocorre para as todas as frações graúdas pode ser um equívoco, visto que a presença de grumos é observada principalmente nas frações graúdas.

No Gráfico 20 estão apresentados os percentuais de partículas para cada classificação de angularidade para tamanhos até a peneira de 0,6mm. É possível perceber que a maioria das partículas se classificam na categoria de subarredondadas, nota-se ainda que o percentual de partículas subangulares aumenta para a fração miúda da amostra, em relação as frações graúdas analisadas no estudo, seguindo o material base, que também se apresenta com maiores percentuais da categoria para as frações menores.

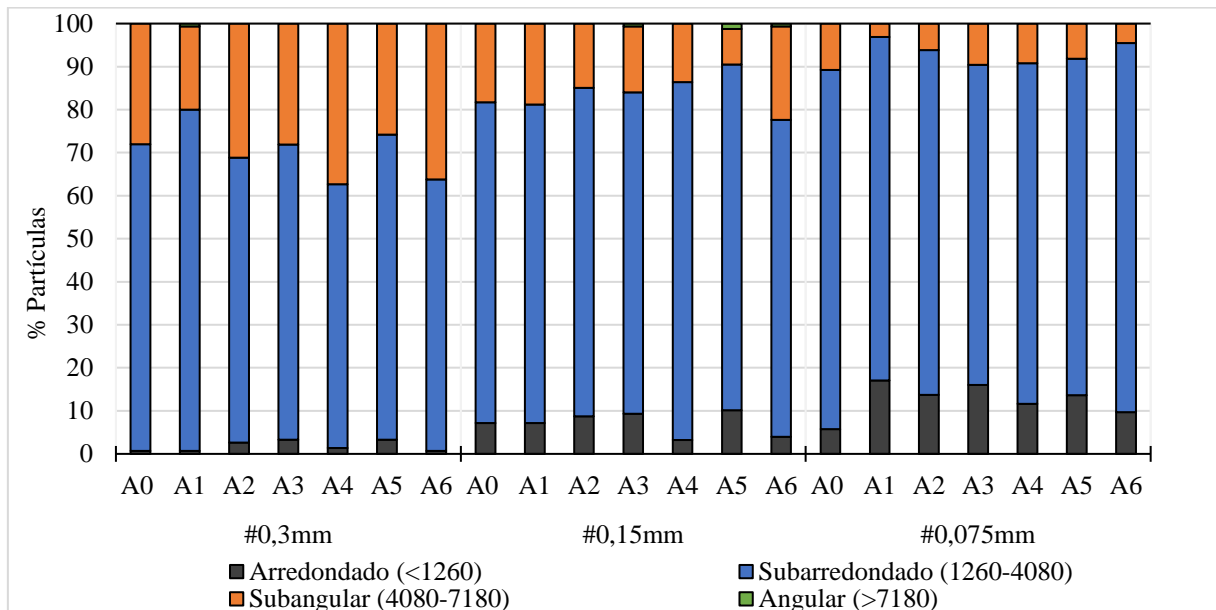
No Gráfico 21 temos as partículas abaixo da peneira limite, de 0,6mm, diferentemente das frações maiores, estas apresentam percentuais de partículas arredondadas. É notável que as partículas que apareceram devido ao processo de mistura possuem características bem semelhantes, em relação a caracterização das propriedades de forma do fresado base avaliado anteriormente. Além do mais, a peneira de 0,075mm foi a que apresentou mais partículas em relação ao material inicial com classificação arredondada.

Gráfico 20 - Angularidade obtida para as amostras sem aquecimento até a #0,6mm analisado no AIMS



Fonte – Elaborado pela autora

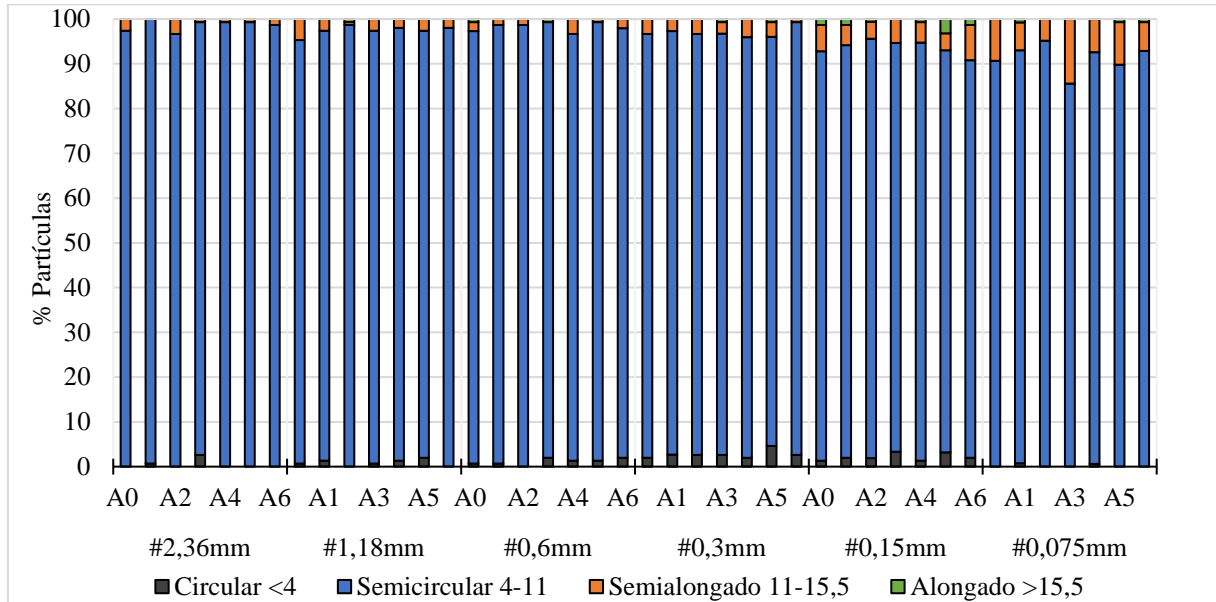
Gráfico 21 - Angularidade obtida para as amostras sem aquecimento abaixo da #0,6mm analisado no AIMS



Fonte – Elaborado pela autora

Para a Forma 2D apresentada no Gráfico 22 observa-se que não houve alterações significativas para essa propriedade devido ao processo aplicado de mistura, onde a média do parâmetro ficou entre valores de 7,11 – 7,29, com mais de 85% de partículas classificadas como semicircular para todas as frações.

Gráfico 22 – Forma 2D obtida para as amostras abaixo da #0,6mm analisado no AIMS



Fonte – Elaborado pela autora

### 7.2.3 Caracterização das propriedades de forma com a mudança de temperatura

Ao avaliar as propriedades de forma obtidas para as amostras onde se aplicou o aquecimento, pode-se verificar que sua classificação calculada com base na média das peneiras, conforme pode ser verificada na Tabela 9, foi a mesma que a obtida para o fresado avaliado sem nenhum aquecimento. Com exceção do valor de textura superficial para a amostra A12 (15 min – 160° C) que se apresentou com baixa rugosidade. Entretanto, ao avaliar numericamente observa-se que todos os valores para cada uma das propriedades de forma aqui analisadas, referentes ao mesmo tempo de mistura aplicado para as amostras ensaiadas em temperatura ambiente, apresentaram maiores valores médios para todos os parâmetros (angularidade, textura superficial, esfericidade e forma 2D).

Tabela 9 - Propriedades de formas obtida para o fresado submetido ao aquecimento e a diferentes tempos de polimento

PROPRIEDADE	A7 - 160° C - 5 MIN		A8 - 160° C - 5 MIN	
	VALOR	CLASSIFICAÇÃO	VALOR	CLASSIFICAÇÃO
<b>Angularidade</b>	3374,22	Subarredondado	3443,91	Subarredondado
<b>Textura</b>	620,18	Rugosidade moderada	680,07	Rugosidade moderada
<b>Forma 2D</b>	7,42	Semicircular	7,62	Semicircular
<b>Esfericidade</b>	0,71	Esfericidade moderada	0,73	Esfericidade moderada

PROPRIEDADE	A9 - 160° C - 10 MIN		A10 - 160° C - 10 MIN	
	VALOR	CLASSIFICAÇÃO	VALOR	CLASSIFICAÇÃO
<b>Angularidade</b>	3308,27	Subarredondado	3675,30	Subarredondado
<b>Textura</b>	737,84	Rugosidade moderada	718,82	Rugosidade moderada
<b>Forma 2D</b>	7,33	Semicircular	7,56	Semicircular
<b>Esfericidade</b>	0,71	Esfericidade moderada	0,72	Esfericidade moderada

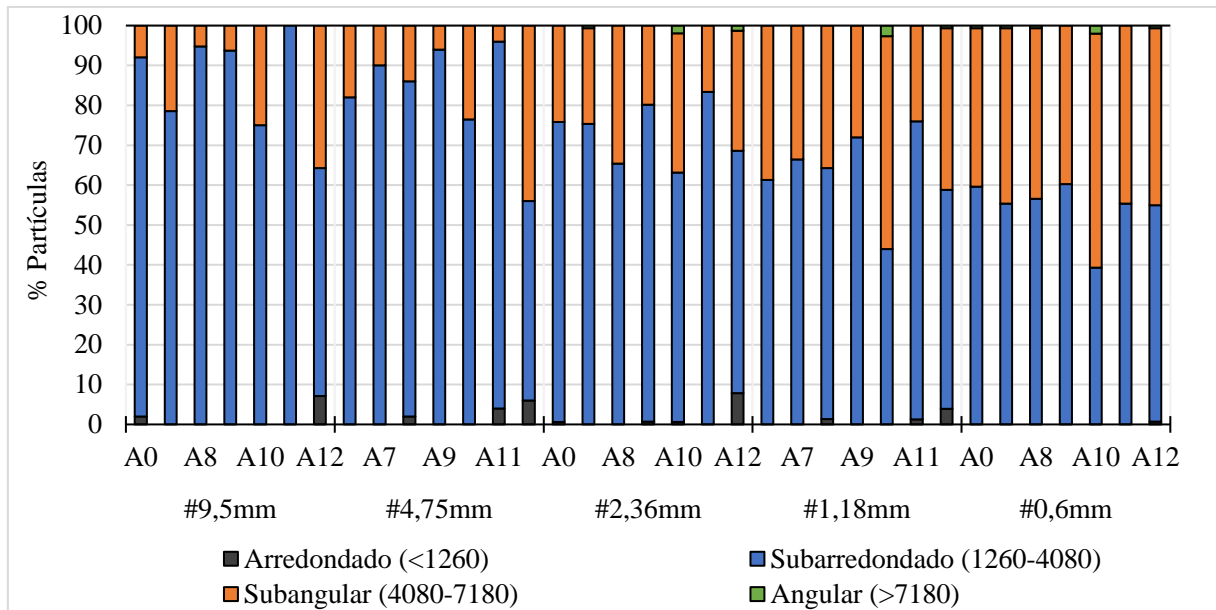
  

PROPRIEDADE	A11 - 160° C - 15MIN		A12 - 160° C - 15MIN	
	VALOR	CLASSIFICAÇÃO	VALOR	CLASSIFICAÇÃO
<b>Angularidade</b>	3213,15	Subarredondado	3501,03	Subarredondado
<b>Textura</b>	660,16	Rugosidade moderada	577,49	Baixa rugosidade
<b>Forma 2D</b>	7,44	Semicircular	7,32	Semicircular
<b>Esfericidade</b>	0,75	Esfericidade moderada	0,76	Esfericidade moderada

Fonte – Elaborado pela autora

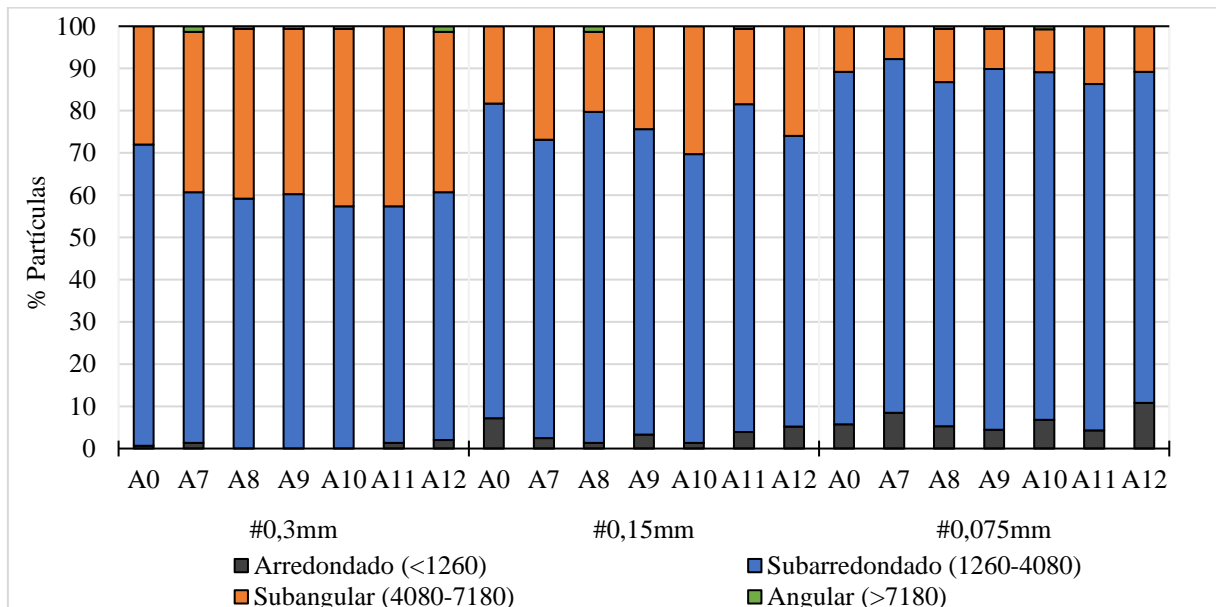
Para a angularidade obtida pelo percentual de partículas definidas individualmente, estão apresentadas no Gráfico 23 as amostras até a peneira de 0,6mm e no Gráfico 24 as partículas abaixo da peneira 0,6mm, que surgiram após a aplicação do processo de mistura. Onde é possível observar que, apesar da classificação ser subarredondada, as frações possuem o segundo maior percentual de suas partículas classificadas como subangulares. De forma geral, o comportamento para as amostras foi similar ao observado para aquelas sem aplicação de temperatura.

Gráfico 23 - Angularidade obtida para as amostras aquecidas a 160° C até a #0,6mm analisadas no AIMS



Fonte – Elaborado pela autora

Gráfico 24 - Angularidade obtida para as amostras aquecidas a 160° C abaixo da #0,6mm analisado no AIMS



Fonte – Elaborado pela autora

É possível observar que a amostra A12, que foi aquela que apresentou a curva granulométrica mais distinta do restante das amostras, devido a formação de grumos e, conseqüentemente, maiores quantidades retidas em cada fração, posterior ao processo de aquecimento e mistura, ocorreu a presença de percentuais com partículas consideradas arredondadas para todas as frações, a excetuar-se a fração de 0,6mm. Este comportamento para as outras amostras estavam presentes apenas nas frações abaixo da peneira de 0,6mm. Tal fato,

pode estar associado a formação de novas partículas, visto que, para as outras frações, as que apresentaram partículas mais arredondadas foram exatamente aquelas que não estavam presentes na amostra inicial, abaixo da peneira limite de 0,6mm.

A Figura 11 mostra uma imagem da análise de angularidade para a amostra A12 da peneira de 2,36mm, onde é possível verificar diferentes partículas relacionadas a diferentes valores de angularidade.

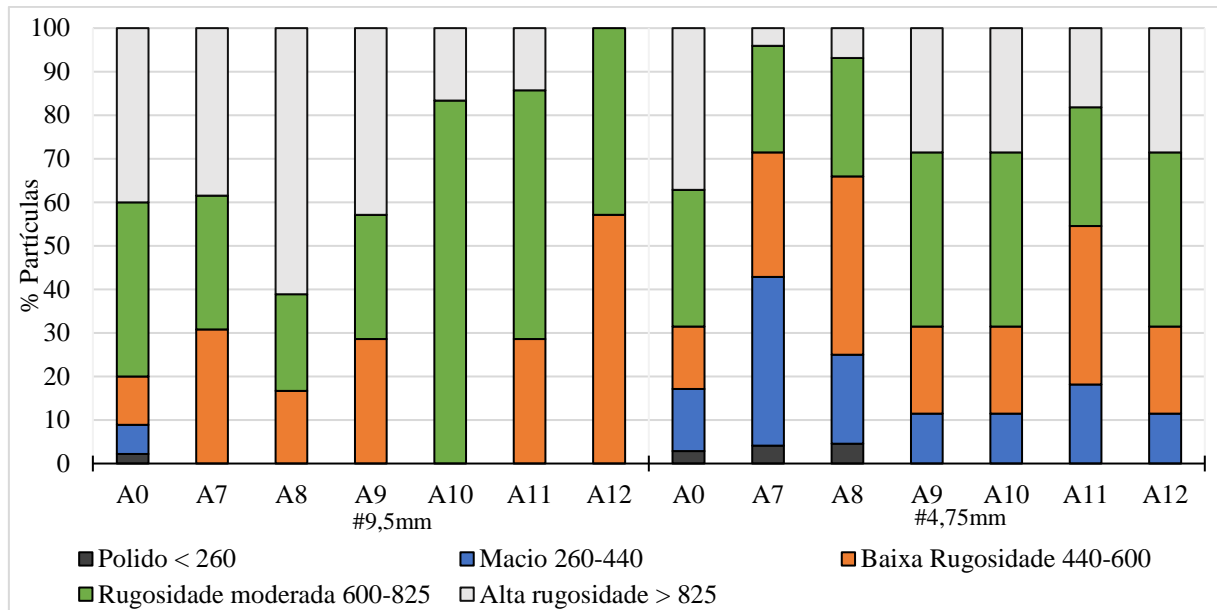
Figura 11 - Imagem obtida pelo AIMS para a análise de angularidade da amostra A12 (#2,36mm)



Fonte – Elaborado pela autora

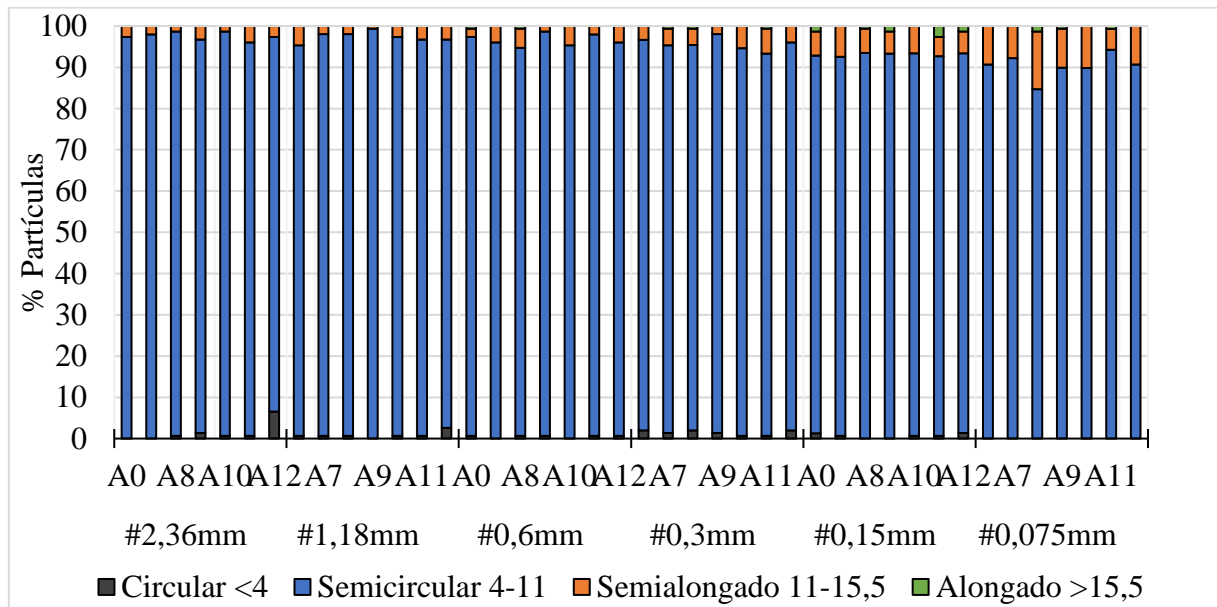
O parâmetro de textura superficial, obtido para as amostras com o uso do aquecimento, que pode ser verificado no Gráfico 25, diferente do que foi apresentado para aquelas onde houve apenas a variação do tempo de mistura, apresentou partículas com alta rugosidade, principalmente para a fração de 9,5mm. No entanto, essa classificação para a peneira de 4,75mm apresentou-se em menores percentuais. O aumento da textura superficial, observado nas amostras onde houve o aumento da temperatura de análise, se deve a possibilidade de aderência de partículas finas na superfície dos agregados, quando do aquecimento do ligante, permitindo a formação de grumos. A propriedade de forma 2D apresentou comportamento semelhante as amostras vistas anteriormente, conforme pode ser observado nos Gráfico 26, em que todas as frações possuíram mais que 90% de suas partículas classificadas como semicirculares e por média estão todas com valores entre 7,32 e 7,62 para este parâmetro.

Gráfico 25 - Textura Superficial para amostras aquecidas a 160° após análise no AIMS



Fonte – Elaborado pela autora

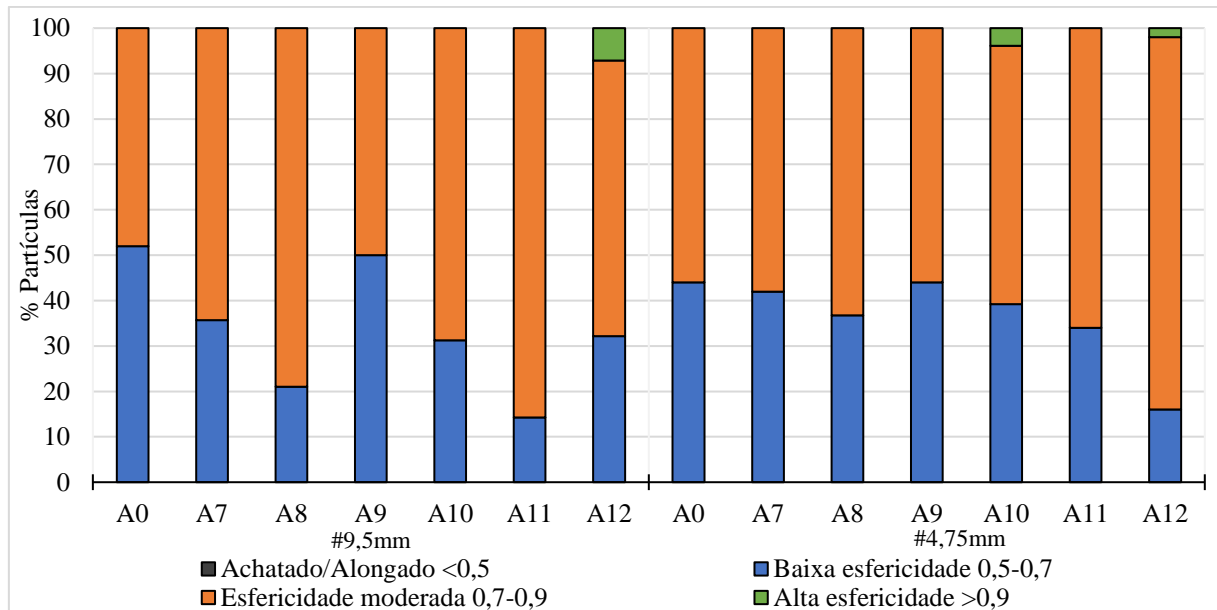
Gráfico 26 – Forma 2D para amostras aquecidas a 160° C após análise no AIMS



Fonte – Elaborado pela autora

O Gráfico 27 apresenta a esfericidade obtida para as amostras onde ocorreu a aplicação da temperatura, verifica-se que as amostras apresentaram um maior percentual de partículas com maiores valores do parâmetro em relação ao material inicial.

Gráfico 27 – Esfericidade para amostras aquecidas a 160° C após análise no AIMS



Fonte – Elaborado pela autora

### 7.3 Análise de sensibilidade a variável tempo de mistura e temperatura

Inicialmente foram avaliadas partículas de todas as frações a fim de compreender o comportamento do fresado quando este foi submetido às variáveis: tempo de mistura e temperatura. No entanto, conforme já foi dito anteriormente, a quantidade mínima exigida para análise de frações graúdas é de 50 partículas. Diante da granulometria do material, que é composto em sua maioria pelas frações miúdas, percebeu-se que este valor era próximo a 20 partículas analisadas e optou-se por fazer o controle da quantidade de partículas para as amostras onde se aplicou temperatura.

Na Tabela 10 estão apresentadas as amostras que foram preparadas para serem submetidas aos diferentes tempos de misturas e ao aquecimento, para tanto foram contabilizadas as partículas inseridas nas amostras antes do processo de mistura e a quantidade de partículas retidas na mesma peneira que foram analisadas no AIMS. Observa-se que a amostra A7 submetida ao tempo de mistura de 5 min, teve quase metade das partículas reduzidas para análise, enquanto a amostra A12 apresentou mais de 27% de partículas que foram adicionadas a quantidade previamente determinada. Vale ainda ressaltar, que o número de partículas que foi analisado pelo AIMS, nem sempre foi condizente com as quantidades realmente inseridas na bandeja do equipamento podendo por vezes o equipamento ter descartado algumas dessas pelo não ajuste da imagem ou tamanho durante o ensaio.



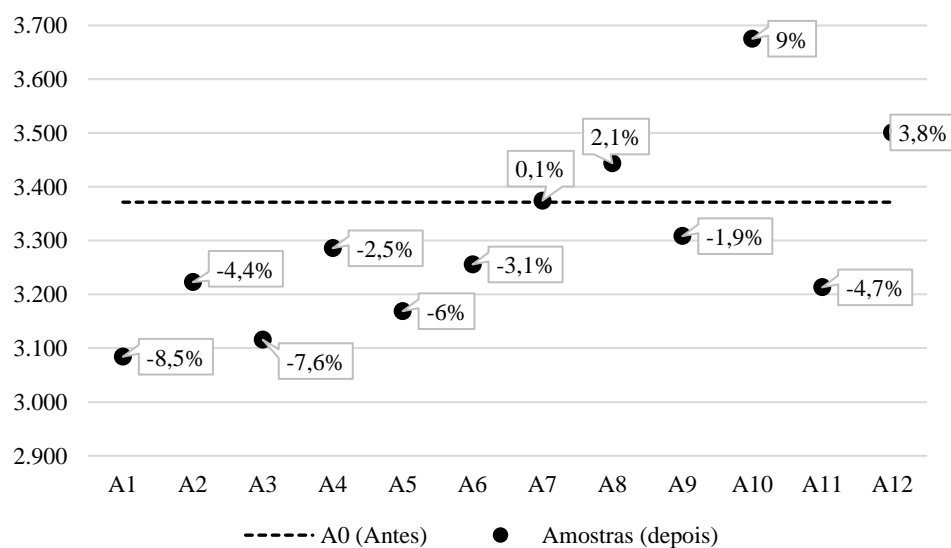
Tabela 10- Quantidade de partículas antes e depois da mistura para a #9,5mm

	Amostra	Antes	Depois	%
5min – 160° C	A7	26	14	-46,2
	A8	21	19	-9,5
10min – 160° C	A9	24	16	-33,3
	A10	24	16	-33,3
15min – 160° C	A11	23	14	-39,1
	A12	22	28	27,3

Fonte – Elaborado pela autora

O Gráfico 28 contém os valores relativos as diferenças percentuais para a angularidade das amostras em relação ao fresado que não foi submetido a nenhum processo de mistura. Pode-se observar que todas as amostras referentes a análise apenas avaliando o tempo de mistura, apresentaram reduções, todas inferiores a 10% nos valores de angularidade. Em contrapartida, para as amostras onde houve o aquecimento, com exceção das amostras A9 e A11, estas apresentaram aumentos de até 9% nos valores obtidos para este parâmetro. Como verificado anteriormente durante a análise dos resultados para a propriedades de forma, essas alterações não foram tão grandes chegando a máximas variações de 9% para a amostra A10 e de -8,5% para a amostra A1, estando as restantes dentro desse intervalo, de modo que não ocorreu mudança na classificação do material.

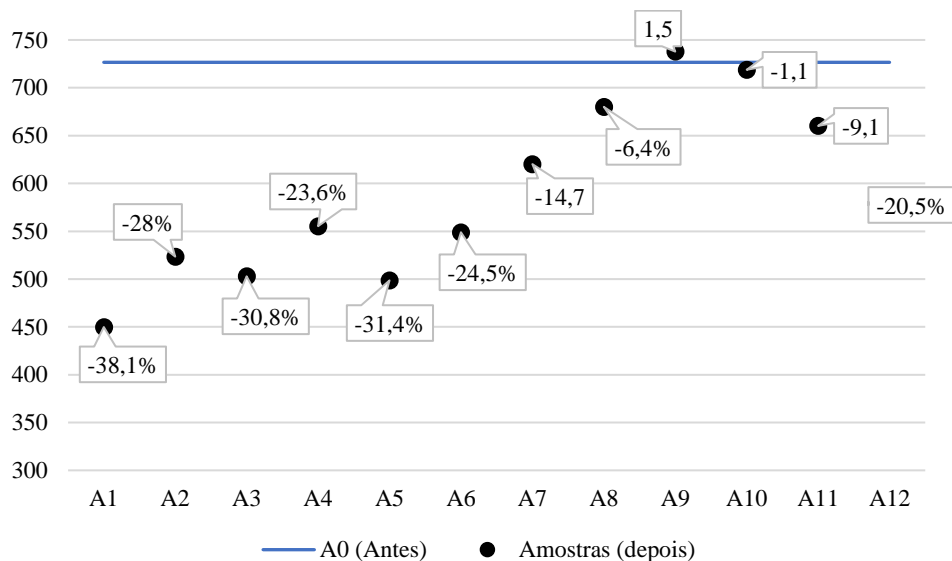
Gráfico 28 – Diferenças percentuais para a angularidade calculada pela média das peneiras



Fonte – Elaborado pela autora

Para a textura superficial, representada no Gráfico 29, observa-se que as amostras onde ocorreram apenas a variação do tempo de mistura foram as que mais apresentaram redução nos valores médios do parâmetro analisado, com reduções de aproximadamente 38% do valor inicial comparado com aquele encontrado para a amostra A1, por exemplo. Para os valores obtidos, onde houve a variação de temperatura, nota-se que esta redução não ocorreu, apenas 2 das amostras apresentaram valores maiores. O que pode ser considerado de acordo com os resultados obtidos anteriormente.

Gráfico 29 – Diferenças percentuais para a textura superficial calculada pela média das peneiras

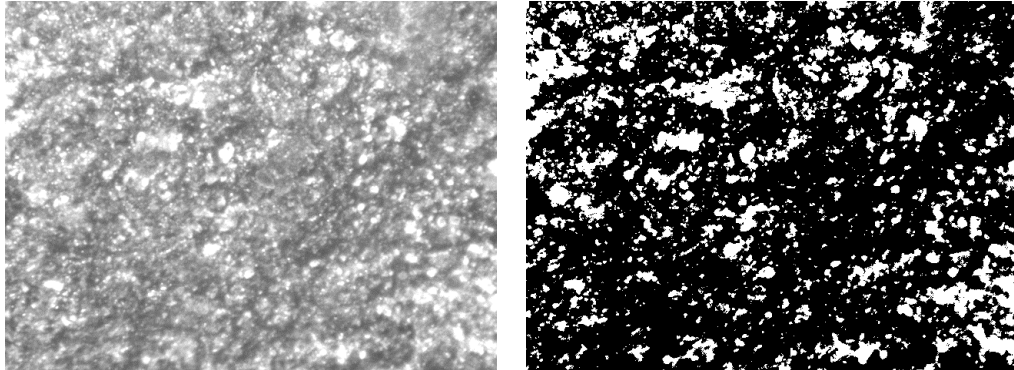


Fonte – Elaborado pela autora

A análise da textura superficial é feita com base em imagens em escalas de cinza obtidas no AIMS, nas Figuras 12(a), 13(a) e 14(a) estão apresentadas imagens que foram capturadas durante a análise para obtenção do parâmetro, as Figuras 12(b), 13(b) e 14(b) apresentam a mesma ilustração com aplicação de um filtro preto e branco de modo a tentar facilitar a visualização das mudanças ocorridas para cada uma das partículas. Observa-se, na Figura 12, que os pontos onde ocorrem maior presença da coloração escura é em decorrência do aumento da rugosidade, presença de desníveis na superfície. Já na Figura 13 percebe-se que ocorre mais incidências de zonas mais claras na superfície dos agregados, indicando que o processo referente a mistura, apenas para 5, minutos apresentou um certo polimento da superfície. Para a aplicação da temperatura, apesar de não terem ocorrido mudanças significativas na textura superficial em relação a amostra base, a Figura 14 mostra que a superfície possui zonas mais limpas concentradas em relação às partículas de fresado inicial,

indicando que ocorreram mudanças na superfície das partículas, seja pela ativação do ligante devido ao aquecimento, seja pelo processo abrasivo.

Figura 12 - Textura superficial para partículas retidas na #4,75mm para o fresado inicial

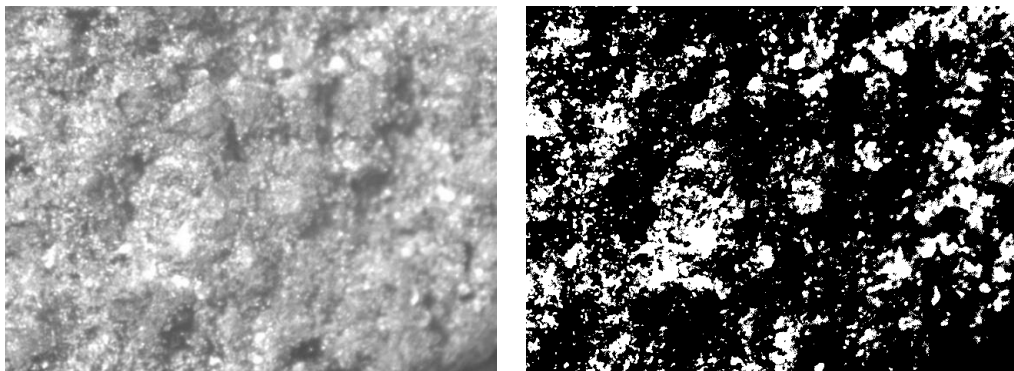


(a) Textura obtida pelo AIMS

(b) Efeito Preto e Branco – 75% aplicado

Fonte – Elaborado pela autora

Figura 13 - Textura superficial para as partículas retidas na #4,75mm para a amostra A1

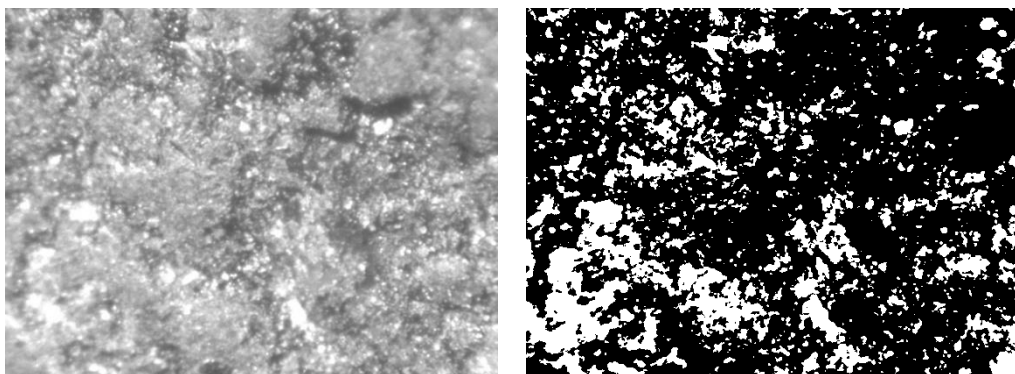


(a) Textura obtida pelo AIMS

(b) Efeito Preto e Branco – 75% aplicado

Fonte – Elaborado pela autora

Figura 14 - Textura superficial para as partículas retidas na #4,75mm para a amostra A7



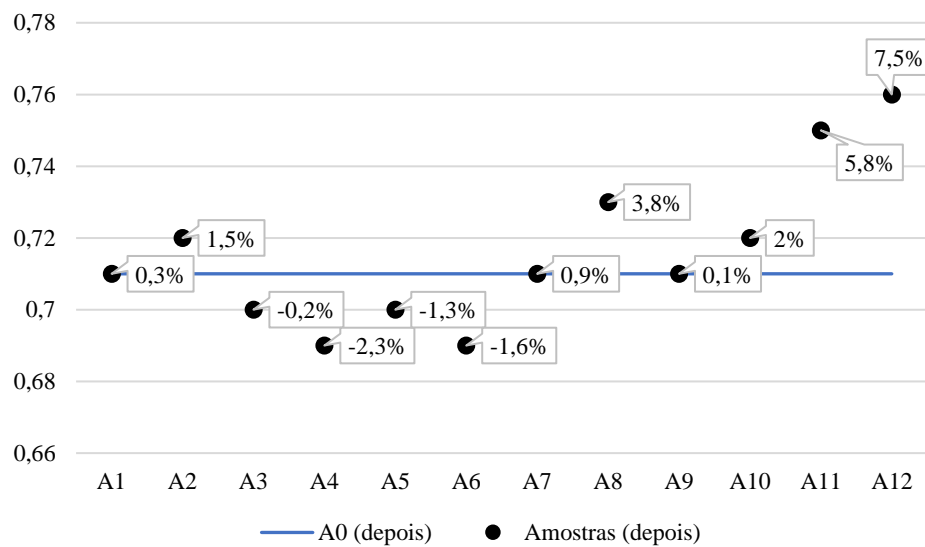
(a) Textura obtida pelo AIMS

(b) Efeito Preto e Branco – 75% aplicado

Fonte – Elaborado pela autora

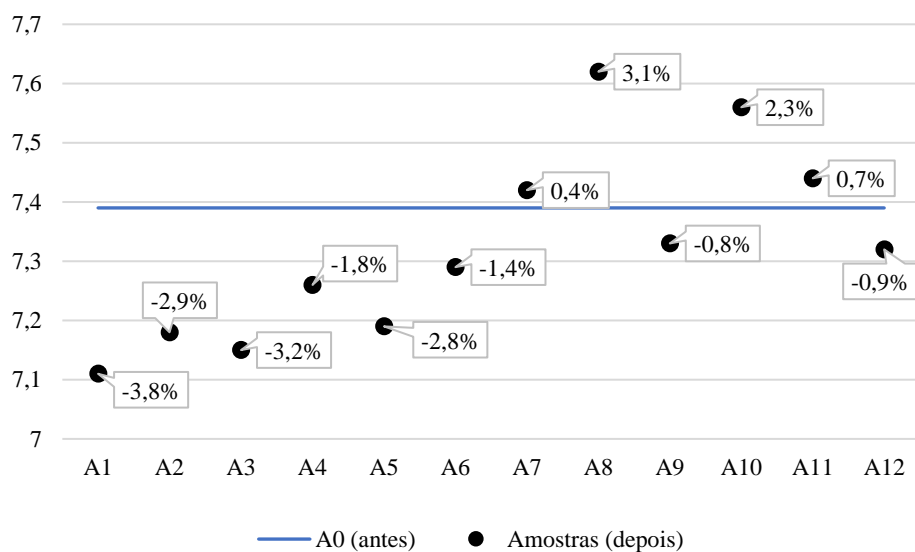
Ao observar os valores percentuais para as diferenças antes e depois dos processos de misturas aplicados para a esfericidade, conforme o Gráfico 30, nota-se que não houve alterações significativas e as maiores diferenças para este parâmetro se deu para as amostras com temperatura de 160° C e com tempo de mistura de 15 minutos, mas estas foram inferiores a 10% do valor absoluto. No Gráfico 31 verifica-se que a forma 2D, aqui analisada em termos de mudanças, não apresentou grandes percentuais de mudança em relação a amostra base.

Gráfico 30 – Diferenças percentuais para a esfericidade calculada pela média das peneiras



Fonte – Elaborado pela autora

Gráfico 31 – Diferenças percentuais para a Forma 2D calculada pela média das peneiras



Fonte – Elaborado pela autora

Além das informações obtidas baseadas nos ensaios experimentais, parte do que foi mostrado pode ser visualizado com auxílio de análises visuais. Na Figura 15 estão apresentadas amostras submetidas ao procedimento aplicado nos ensaios, das quais do lado (a) verifica-se a amostra apenas para o tempo de mistura dentro do tambor ainda com as esferas após a finalização do tempo de rotação. A coloração do material leva a crer que o processo abrasivo foi o que mais se destacou para esta, o que condiz ao obtido pela curva visto que essas apresentaram quantidades de finos levemente superiores ao processo com uso da temperatura. Na imagem (b), onde houve a aplicação da temperatura, observou-se a presença da coloração escura mais forte, que se deve ao aquecimento da ligante e conseqüentemente certa mudança nas suas características. Neste último caso, ainda não se tornou tão evidente o processo de desgaste ocorrido.

Figura 15 - Material após o procedimento de mistura no micro-deval



(a) Sem temperatura



(b) Com temperatura

Fonte – Elaborado pela autora

Na Figura 16 estão demonstradas as esferas após o processo de mistura com o aquecimento do fresado. Observa-se que parte do ligante, antes presente na superfície do agregado fresado, foi ativado com a aplicação da temperatura, mesmo que em poucas quantidades, e desse modo transferir parte desse ligante para a superfície das esferas. Além disso, as esferas ainda participaram do processo de formação de grumos conforme a imagem (b), onde devido a presença de ligante na superfície e ao fato de existir maiores quantidades de ligante nas frações mais finas, estas aderiram às esferas demonstrando a ocorrência do fenômeno. Na Figura 17 (a) e (b) é possível observar melhor a formação dos grumos e a disposição das partículas para ocorrência do processo.

Figura 16 - Esferas após o procedimento de mistura no micro-deval com aquecimento



(a) Conjunto de esferas retirados da A12

Fonte – Elaborado pela autora



(b) Esfera com formação de grumos

Figura 17 - Partículas da amostra A12 após o procedimento de mistura de 15 minutos com aquecimento



(a) Partículas #9,5mm

Fonte – Elaborado pela autora



(b) Grumos formados pelas partículas e esfera

## 8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse estudo avaliou-se com base em diferentes condições de simulação da ativação do ligante, provocadas pela alternância das variáveis de temperatura e tempo de mistura, as propriedades de forma que o agregado fresado adquiriu além das mudanças na granulometria do material devido ao processo. Para isso, avaliaram-se três diferentes tempos de misturas (5, 10 e 15 minutos) e amostras onde não houve aquecimento e aquelas onde variou-se a temperatura para 160° C.

O efeito da abrasão relacionado ao tempo de mistura, assim como a mudança de temperatura são responsáveis pela geração de curvas granulométricas mais finas em relação ao fresado inicial. Destaca-se que a mudança na granulometria ocorreu para todas as amostras com exceção da amostra submetida à temperatura de 160° C e tempo de mistura de 15 minutos. Esse comportamento se relaciona ao desmembramento de grumos e ainda ao próprio processo de desgaste pelo impacto entre as partículas, de fresado, e as esferas.

Com base nas amostras avaliadas percebe-se que, quando estas são submetidas ao aquecimento, as amostras apresentam maiores valores para as médias de angularidade e textura superficial, o que indica que, apesar das mudanças na curva granulométrica demonstrando o aparecimento das partículas mais finas, ocorre formação de grumos com aderência de finos à superfície das outras partículas, responsáveis por esses aumentos na angularidade e textura superficial.

De modo geral, observa-se que os comportamentos dentro das classificações para cada uma das propriedades analisadas foram similares para a maioria das amostras, entretanto ao avaliar de forma mais individual cada resultado, observam-se certas mudanças principalmente para os parâmetros de angularidade e textura, enquanto a esfericidade e forma 2D não resultaram em mudanças significativas para as amostras sem aquecimento e com aquecimento do fresado.

A seguir, fazem-se sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar o processo de simulação com a adição de agregados virgens à mistura no lugar das esferas metálicas, de modo a tornar mais realístico o processo observado em campo;
- Variar as temperaturas aplicadas ao processo, de modo a observar para quais temperaturas ocorre maiores mudanças nas propriedades do material, assim como ocorrem grandes influências em relação ao processo de ativação para temperaturas mais elevadas;
- Variar os percentuais de agregado fresado e esferas ou agregados virgens adicionados,

de modo a observar as variações no comportamento para maiores adições de fresado, e até quanto em adição apresenta resultados melhores do ponto de vista de preparo de misturas asfálticas recicladas;

- Aplicar o processo ao fresado proveniente de diferentes frações, apenas à fração graúda, apenas à miúda, uma fração por vez, e verificar quais os condicionantes e resultados para cada uma dessas aplicações;
- Avaliar, no procedimento aplicado, como a utilização das esferas influencia na quantidade de ligante ativado diante do processo e que se aderiu a superfície destas;
- Avaliar se a ativação de ligante do fresado no processo de mistura é influenciado pela diferença da textura superficial dos agregados virgens, adicionados ao processo, para diferentes tipos de agregados.



## REFERÊNCIAS

- AL ROUSAN, T. M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. (2004) Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, College Station, Texas.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. **M 323 - 17**: Standard specification for superpave volumetric mix design. 2017.
- Anuário CNT do transporte** – estatísticas consolidadas 2016. – 2ª tiragem. – Brasília: CNT, 2016.
- ARAUJO, Victor M.C. *et al.* **Utilização do Processamento Digital de Imagens para Caracterização de Material Fresado**. XXVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET, Belém, PA, 2013.
- BESSA, I. S. **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas**. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- BONFIM, Valmir. **Fresagem de pavimentos asfálticos** – 3ª edi. rev. e atual. – São Paulo: Exceção Editorial, 2007.
- BOWERS, Benjamin F. *et al.* **Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency through GPC and FTIR**. Construction and building materials, v. 50, p. 517-523, 2014.
- BRESSI, Sara *et al.* **A framework for characterizing fresado clustering in asphalt concrete mixtures**. Construction and Building Materials, v. 106, p. 564-574, 2016.
- CASTELO BRANCO, V. T. F.; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B. (2004) **O efeito da heterogeneidade do agregado de escória de aciaria as propriedades de misturas asfálticas**. In: XVIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis – SC.
- CAVALCANTI, Henrique Pinto Pacheco. **Avaliação da degradação de propriedades de forma de agregados utilizando o processamento digital de imagens**. 2016. 86 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- CAVALLI, Maria Chiara; PARTL, Manfred N.; POULIKAKOS, Lily D. **Measuring the binder film residues on black rock in mixtures with high amounts of reclaimed asphalt**. Journal of cleaner production, v. 149, p. 665-672, 2017.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **ME 083** - Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Glossário de termos técnicos rodoviários**. - 2. ed. – Rio de Janeiro, 2017.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **NORMA DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006.

DING, Yongjie; HUANG, Baoshan; SHU, Xiang. **Characterizing blending efficiency of plant produced asphalt paving mixtures containing high fresado.** Construction and Building Materials, v. 126, p. 172-178, 2016.

FIESP, Departamento da Indústria da Construção. **Pavimento de vias no Brasil: infraestrutura de transportes terrestres rodoviários e cadeias produtivas da pavimentação.** São Paulo, 2017.

FREITAS, Hérica Braga; DA MOTTA, Laura Maria Goretti. **Uso de escória de aciaria em misturas asfálticas de módulo elevado.** TRANSPORTES, v. 16, n. 2, 2008.

GASPAR, Matheus S. *et al.* **Procedimento de extração em etapas para avaliação da interação entre ligantes na reciclagem a quente e morna.** In XIX Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA), Medellín, Colômbia.

GENNESSEAU, Manuela de Mesquita Lopes. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. doi:10.11606/T.3.2016.tde-14072016-145634. Acesso em: 2019-06-03.

HUANG, Baoshan *et al.* **Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement.** Transportation Research Record, v. 1929, n. 1, p. 37-45, 2005.

IBIAPINA, D. S. **Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens para a seleção de materiais brasileiros.** 2018. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

LIPHARDT, Adam; RADZISZEWSKI, Piotr; KRÓL, Jan. **Binder blending estimation method in hot mix asphalt with reclaimed asphalt.** Procedia Engineering, v. 111, p. 502-509, 2015.

LO PRESTI, Davide *et al.* **Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies.** Journal of cleaner production, v. 131, p. 43-51, 2016.

LO PRESTI, Davide *et al.* **On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents.** Road Materials and Pavement Design, p. 1-20, 2019.

MOTTA, Rosângela dos Santos. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NEVES FILHO, Cláudio Luiz Dubeux. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas SMA produzidas com ligante asfalto-borracha.** 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

ODA, Sandra; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação.** *Acta Scientiarum*, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.

ROCHA SEGUNDO *et al.* **Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado.** *TRANSPORTES*, v. 24, n. 4, p. 85-94, 2016.

ROCHA SEGUNDO, I. G. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SHIRODKAR, Prashant *et al.* **A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (fresado) binder for high fresado hot mix asphalt.** *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 1, p. 150-155, 2011.

TAVARES, Diogo Santos; ODA, Sandra; MOTTA, LMG. **Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em pavimentação asfáltica.** COPPE–Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ilha do Fundão–RJ, 2011.

TEBALDI, Gabriele *et al.* **Recommendation of RILEM TC237-SIB: protocol for characterization of recycled asphalt (RA) materials for pavement applications.** *Materials and Structures*, v. 51, n. 6, p. 142, 2018.

WEST, Randy C. **Best Practices for RAP And RAS Management.** 2015. Disponível em: <[http://www.asphalt pavement.org/PDFs/EngineeringPubs/QIP129\\_RAP\\_-\\_RAS\\_Best\\_Practices\\_lr.pdf](http://www.asphalt pavement.org/PDFs/EngineeringPubs/QIP129_RAP_-_RAS_Best_Practices_lr.pdf)>. Acesso em: 08 jun. 2019.

XU, Guangji *et al.* **The Evaluation Method of Particle Clustering Phenomena in fresado.** *Applied Sciences*, v. 9, n. 3, p. 424, 2019.

ZAUMANIS, Martins; MALLICK, Rajib B. **Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art.** *International Journal of Pavement Engineering*, v. 16, n. 1, p. 39-55, 2015