



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

LARA MARQUES DIÓGENES

**AVALIAÇÃO DAS RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE AGREGADOS
MINERAIS COM BASE NAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE BRITAGEM
E DA ROCHA DE ORIGEM**

FORTALEZA

2018

LARA MARQUES DIÓGENES

AVALIAÇÃO DAS RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE AGREGADOS
MINERAIS COM BASE NAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE BRITAGEM E
DA ROCHA DE ORIGEM

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

Orientadora: Prof^a Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

Coorientador: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto.

FORTALEZA

2018

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)

D622a Diógenes, Lara Marques.

Avaliação das Relações entre Propriedades de Agregados Minerais com Base nas Características do Processo de Britagem e da Rocha de Origem / Lara Marques Diógenes. – 2018.
145 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2018.

Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.

Coorientação: Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto.

1. Agregados minerais. 2. Propriedades de forma. 3. Mineralogia. 4. Britagem. 5. Degradação. I. Título.

CDD 388

LARA MARQUES DIÓGENES

AVALIAÇÃO DAS RELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DE AGREGADOS
MINERAIS COM BASE NAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE BRITAGEM E
DA ROCHA DE ORIGEM

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

Aprovada em: 19/06/2018.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. José de Araújo Nogueira Neto (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Márcio Muniz de Farias, Ph.D.
Universidade de Brasília (UNB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais, Ana Cleire e João Carlos, e à minha irmã, Carla, pelo infinito amor e pelas boas energias que me transmitem diariamente; por serem minha base e por nunca medirem esforços para me ajudar. Ao meu namorado, Davi, pelo amor e pelo companheirismo que ultrapassam qualquer distância. A todos os amigos, especialmente às minhas amigas-irmãs Lívia, Maria Ailza e Talitha, pelo apoio em todos os momentos, pelas conversas e pelos cafés dos quais eu saio renovada.

A todos os colegas do Petran pelos bons momentos vividos. Aos meus colegas de turma, Lívia, Jorge Lucas, Raimi, Manoel, Jorge Luis, Lucas, Márcia e Regilene, pela amizade construída e por terem tornado todos os trabalhos mais leves e prazerosos. Aos “Misturados”, colegas de orientação, pela convivência enriquecedora e pelas trocas de experiências que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Aos companheiros de artigos, Dani e Iuri, por todas as ideias compartilhadas e pelo imensurável aprendizado que me proporcionaram.

Aos professores do Petran pelos conhecimentos e pela motivação que me transmitiram, principalmente, por meio do entusiasmo com suas disciplinas e com suas pesquisas.

À professora Verônica por ser uma orientadora extremamente dedicada; por ter acreditado e apostado no meu potencial bem mais que eu mesma em diversas situações; por sempre se preocupar com questões de seus alunos que vão muito além da vida acadêmica e por ter uma inquietação e uma coragem para realizar mudanças que são fontes de inspiração para todos que a cercam.

Ao professor José Nogueira (Zeca), que, embora fisicamente distante, aceitou ser meu coorientador no desenvolvimento deste trabalho, proporcionando-me o suporte necessário na área da Geologia.

Aos professores Silvrano Adonias e Márcio Muniz por aceitarem participar da banca examinadora desta dissertação e pelos valiosos comentários, críticas e sugestões que ajudaram a aprimorar o trabalho.

Ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP), em especial ao Rômulo, por todo o auxílio prestado durante a realização dos ensaios e pela maravilhosa convivência.

Às pedreiras Britacet, Pyla, OCS e Itatiba por fornecerem os agregados utilizados neste trabalho, além das informações sobre os processos de produção. À Pedreira Britacet, nas figuras de Abdias, de Abner e de Luciana, por permitirem a realização de britagens específicas para esta pesquisa, disponibilizando funcionários, equipamentos, tempo e material.

A toda a equipe do Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da UFC, em especial ao professor Zeca, ao Diones e ao Joel, por tornarem possível a realização das análises petrográficas, fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho, e por todos os ensinamentos sobre rochas e minerais.

Ao NUTEC, em especial à equipe do Laboratório de Materiais e Construção Civil, por ter disponibilizado o britador de mandíbulas de laboratório para uso nesta pesquisa.

À Capes, pelo suporte financeiro.

“Sou das que pensam que a ciência tem uma grande beleza. Um cientista em seu laboratório não é somente um técnico: é também uma criança colocada diante de fenômenos naturais que lhe impressionam como um conto de fadas.” (Marie Curie)

RESUMO

O agregado mineral, por ser o componente predominante em diferentes compósitos empregados na Engenharia Civil, é responsável, de modo significativo, pelo comportamento desses materiais. As propriedades de forma das partículas recebem atenção crescente ao longo dos anos, com o desenvolvimento de métodos modernos para sua caracterização, baseados no Processamento Digital de Imagens (PDI). Essas propriedades são influenciadas pelas características da rocha de origem e pelo processo de britagem utilizado no seu beneficiamento. Esses fatores, entretanto, nem sempre são considerados no intuito de obter o agregado mais adequado para cada aplicação a que se destina. O presente trabalho busca investigar as relações existentes entre as propriedades de forma do agregado, o processo de britagem que o gerou, as características da rocha de origem e sua resistência à degradação. Para tanto, agregados gerados por diferentes processos de britagem e oriundos de diferentes rochas foram comparados com relação às características petrográficas, mineralógicas e morfológicas (forma, angularidade e textura superficial), e cada material foi submetido a testes de degradação mecânica (Tretton e Micro-Deval), sendo avaliada sua tendência à quebra, à abrasão e ao polimento. A partir dos resultados obtidos, puderam ser construídos diagramas que resumem as principais constatações e que podem auxiliar o processo de produção e de seleção de agregados. Algumas das principais conclusões do trabalho foram: o britador cônico com controle da britagem interparticular mostrou-se mais adequado para gerar agregados graúdos com maior esfericidade e menor angularidade, que podem proporcionar maior trabalhabilidade ao compósito, enquanto o britador de impacto de eixo vertical elevou a angularidade das partículas, garantindo seu intertravamento, característica desejável em algumas aplicações, como misturas asfálticas. O teor de biotita, em agregados de origem granítica/gnáissica, indicou, até certo ponto, fornecer às partículas maior resistência quando submetidas ao choque, maiores perdas de massa e menores perdas de rugosidade superficial quando submetidas ao desgaste. Agregados oriundos de rocha fonolítica, em comparação àqueles de origem granítica/gnáissica, apresentam menores perdas de massa e de angularidade com o desgaste, mas maiores perdas de rugosidade superficial. Para agregados miúdos, a rocha de origem fonolítica apresentou menor alongamento e menor angularidade, enquanto rochas de origem granítica/gnáissica formaram partículas com maior angularidade.

Palavras-chave: Agregados minerais. Propriedades de forma. Mineralogia. Britagem. Degradação.

ABSTRACT

The mineral aggregate, as it is the predominant component in different composites used in Civil Engineering, is significantly responsible for the behavior of these materials. The shape properties of the particles attract increasing attention over the years, with the development of modern methods for their characterization, based on Digital Image Processing (DIP). These properties are influenced by the rock characteristics and by the crushing process used in the material processing. These factors, however, are not always used in order to obtain the most appropriate aggregate for each intended application. The present work seeks to investigate the relations between the aggregate's shape properties, the crushing process that generated it, the rock characteristics and its resistance to degradation. For this purpose, aggregates generated by different crushing processes and from different rocks were compared on the basis of the petrographic, mineralogical and morphological characteristics (form, angularity and surface texture), and each material was submitted to mechanical degradation tests (Tretton and Micro-Deval), being evaluated its tendency to breakage, abrasion and polishing. From the obtained results, diagrams that summarize the main findings and that may help the production process and selection of aggregates were constructed. Some of the main conclusions of the study were: cone crusher with controlled interparticular crushing proved to be more suitable to generate coarse aggregates with higher sphericity and lower angularity, which may provide better workability to the composite; while the vertical shaft impact crusher raised the particles angularity, ensuring their interlocking, a desirable feature in some applications, such as asphalt mixtures. The biotite content in aggregates of granite / gneiss indicated, to some extent, to provide a greater resistance when the particles were submitted to breakage, higher mass losses and lower surface roughness losses when the particles were subjected to wear. Aggregates from phonolitic rock, in comparison to those of granitic / gneiss origin, have lower losses in mass and in angularity with wear, but greater losses in surface roughness. For fine aggregate, the phonolitic rock presented lower elongation and lower angularity, whereas granite / gnaiss rocks formed particles with higher angularity.

Keywords: Mineral aggregate. Shape properties. Mineralogy. Crushing. Degradation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Diferenciação entre rochas ígneas de acordo com a composição mineralógica.....	27
Figura 2	– Relações entre mineralogia, petrografia e desempenho de agregados com relação ao polimento, à abrasão e à fragmentação.....	29
Figura 3	– Influência do silício na adesividade entre agregado e ligante asfáltico.	31
Figura 4	– Forma, angularidade e textura superficial das partículas de agregado...	32
Figura 5	– Britador de mandíbulas.....	34
Figura 6	– Britador cônico.....	35
Figura 7	– Britador de impacto vertical.....	36
Figura 8	– Carregamento simples (esquerda) e multiponto (direita).....	38
Figura 9	– Modo de falha de partícula por carregamento simples.....	40
Figura 10	– Modo de falha de partícula por carregamento interparticular.....	40
Figura 11	– Geometrias das partículas utilizadas.....	44
Figura 12	– Localização e classificação da rocha das pedreiras com base em análises petrográficas anteriores ao presente trabalho.....	48
Figura 13	– Fluxograma do método de pesquisa.....	48
Figura 14	– Microscópio de polarização.....	49
Figura 15	– Tipos de contatos entre os minerais.....	50
Figura 16	– Aggregate Image Measurement System (AIMS).....	51
Figura 17	– Disposição de agregados graúdos e miúdos nas bandejas correspondentes para serem analisados por meio do AIMS.....	52
Figura 18	– Exemplos de imagens capturadas pelo AIMS.....	52
Figura 19	– Três dimensões de uma partícula para o cálculo da esfericidade.....	53
Figura 20	– Ângulos de orientação dos pontos do contorno da partícula para cálculo da angularidade.....	54
Figura 21	– Figura 21 – Britador de mandíbulas de laboratório do NUTEC.....	56
Figura 22	– Imagens capturadas para o cálculo da textura superficial de partículas dos agregados A-C (superiores) e B-I (inferiores) com o uso do AIMS.....	58
Figura 23	– Aparelho Treton.....	60
Figura 24	– Micro-deval.....	62
Figura 25	– Frações do agregado da Pedreira A correspondentes a cada lâmina.....	68
Figura 26	– Agregado da Pedreira B.....	68
Figura 27	– Frações do agregado da Pedreira C correspondentes a cada lâmina.....	69

Figura 28	– Frações do agregado da Pedreira D.....	69
Figura 29	– Vista das lâminas relativas à rocha de biotita-gnaiss das Pedreiras C (à esquerda) e D (à direita).....	76
Figura 30	– Fragmentação dos agregados por meio do britador cônico.....	87
Figura 31	– Interpretação para o resultado de esfericidade do produto de britador de mandíbulas com variação do tamanho do material de alimentação..	91
Figura 32	– Fluxograma com as principais relações obtidas entre britagem e propriedades de forma.....	118
Figura 33	– Fluxograma com as principais relações obtidas entre mineralogia, propriedades de forma e resistência à degradação.....	119
Figura 34	– Sugestões de seleção de agregados a partir de características requeridas.....	120
Figura 35	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 1 da Pedreira A – Biotita-gnaiss.....	134
Figura 36	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 da Pedreira A – Gnaiss.....	135
Figura 37	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 3 da Pedreira A – Granito.....	136
Figura 38	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 4 da Pedreira A – Pegmatito.....	137
Figura 39	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina única – Pedreira B – Fonólito.....	138
Figura 40	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 1 – Pedreira C – Biotita-gnaiss.....	139
Figura 41	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 – Pedreira C – Granito.....	140
Figura 42	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 – Parte 1 – Pedreira C – Gnaiss.....	141
Figura 43	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 – Parte 1 – Pedreira C – Pegmatito....	142
Figura 44	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 1 – Pedreira D – Gnaiss.....	143
Figura 45	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 – Pedreira D – Pegmatito.....	144
Figura 46	– Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 3 – Pedreira D – Biotita-gnaiss.....	145

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Consumo (em toneladas) de agregados para diferentes aplicações.....	22
Gráfico 2 – Frequência de partículas lamelares em função do deslocamento do aparelho e do diâmetro da partícula.....	39
Gráfico 3 – Comportamento do modelo de previsão de lamelaridade.....	41
Gráfico 4 – Expansão do concreto aos 14 dias.....	46
Gráfico 5 – Distribuição das partículas do agregado A-ML nas classes de angularidade	72
Gráfico 6 – Distribuição das partículas do agregado A-C nas classes de angularidade...	72
Gráfico 7 – Distribuição das partículas do agregado B-I nas classes de angularidade....	73
Gráfico 8 – Distribuição das partículas do agregado B-M nas classes de angularidade..	73
Gráfico 9 – Distribuição das partículas do agregado C-C nas classes de angularidade...	74
Gráfico 10 – Distribuição de partículas do agregado D-C nas classes de angularidade....	74
Gráfico 11 – Comparação entre a angularidade média dos agregados por fração com base no tipo de britador.....	75
Gráfico 12 – Distribuição das partículas do agregado A-ML nas classes de esfericidade.	76
Gráfico 13 – Distribuição das partículas do agregado A-C nas classes de esfericidade....	77
Gráfico 14 – Distribuição das partículas do agregado B-M nas classes de esfericidade....	78
Gráfico 15 – Distribuição das partículas do agregado B-I nas classes de esfericidade.....	78
Gráfico 16 – Distribuição das partículas do agregado C-C nas classes de esfericidade....	79
Gráfico 17 – Distribuição das partículas do agregado D-C nas classes de esfericidade....	79
Gráfico 18 – Comparação entre a esfericidade média dos agregados por fração com base no tipo de britador.....	80
Gráfico 19 – Distribuição das partículas do agregado A-ML nas classes de forma 2D.....	81
Gráfico 20 – Distribuição das partículas do agregado A-C nas classes de forma 2D.....	81
Gráfico 21 – Distribuição das partículas do agregado B-M nas classes de forma 2D.....	82
Gráfico 22 – Distribuição das partículas do agregado B-I nas classes de forma 2D.....	82
Gráfico 23 – Distribuição das partículas do agregado C-C nas classes de forma 2D.....	83
Gráfico 24 – Distribuição das partículas do agregado D-C nas classes de forma 2D.....	83
Gráfico 25 – Comparação entre a forma 2D média dos agregados por fração com base no tipo de britador.....	84
Gráfico 26 – Angularidade média por fração dos agregados gerados por britador cônico	

com variação da APF.....	85
Gráfico 27 – Esfericidade média por fração dos agregados gerados por britador cônico com variação da APF.....	85
Gráfico 28 – Forma 2D média por fração dos agregados gerados por britador cônico com variação da APF.....	87
Gráfico 29 – Angularidade média por fração dos agregados gerados por britador de mandíbulas com variação do tamanho das partículas de alimentação.....	89
Gráfico 30 – Esfericidade média por fração dos agregados gerados por britador de mandíbulas com variação do tamanho das partículas de alimentação.....	90
Gráfico 31 – Forma 2D média por fração dos agregados gerados por britador de mandíbulas com variação do tamanho das partículas de alimentação.....	91
Gráfico 32 – Distribuição de angularidade e de esfericidade das partículas do agregado da Pedreira A separadas por mineralogia.....	93
Gráfico 33 – Distribuição de angularidade e de esfericidade das partículas do agregado da Pedreira C separadas por mineralogia.....	93
Gráfico 34 – Distribuição de angularidade e de esfericidade das partículas do agregado da Pedreira D separadas por mineralogia.....	94
Gráfico 35 – Distribuição de partículas do agregado A-ML nas classes de textura superficial.....	95
Gráfico 36 – Distribuição de partículas do agregado A-C nas classes de textura superficial.....	95
Gráfico 37 – Distribuição de partículas do agregado B-M nas classes de textura superficial.....	96
Gráfico 38 – Distribuição de partículas do agregado B-I nas classes de textura superficial.....	96
Gráfico 39 – Distribuição de partículas do agregado C-C nas classes de textura superficial.....	97
Gráfico 40 – Distribuição de partículas do agregado D-C nas classes de textura superficial.....	97
Gráfico 41 – Resultados de textura superficial.....	98
Gráfico 42 – Distribuição de textura superficial do agregado da pedreira A fracionado por composição mineral (granito/gnaiss)	100
Gráfico 43 – Distribuição de textura superficial do agregado da pedreira B (fonólito)	100

Gráfico 44 – Distribuição de textura superficial do agregado da pedreira C fracionado por composição mineral (granito/gnaissse).....	101
Gráfico 45 – Distribuição de textura superficial do agregado da pedreira D fracionado por composição mineral (granito/gnaissse).....	101
Gráfico 46 – Resistência Treton: obtido X esperado pela regressão A.....	104
Gráfico 47 – Quantidade de partículas > 16 mm: obtida X esperada pela regressão B.....	105
Gráfico 48 – Quantidade de partículas > 16 mm: obtida X esperada pela regressão C.....	106
Gráfico 49 – Distribuição de esfericidade do agregado A-C antes e após o Treton.....	107
Gráfico 50 – Distribuição de esfericidade do agregado B-M antes e após o Treton.....	107
Gráfico 51 – Distribuição de esfericidade do agregado B-I antes e após o Treton.....	108
Gráfico 52 – Distribuição de esfericidade do agregado C-C antes e após o Treton.....	108
Gráfico 53 – Distribuição de esfericidade do agregado D-C antes e após o Treton.....	108
Gráfico 54 – Distribuição de angularidade do agregado A-C antes e após o Treton.....	109
Gráfico 55 – Distribuição de angularidade do agregado B-M antes e após o Treton.....	109
Gráfico 56 – Distribuição de angularidade do agregado B-I antes e após o Treton.....	110
Gráfico 57 – Distribuição de angularidade do agregado C-C antes e após o Treton.....	110
Gráfico 58 – Distribuição de angularidade do agregado D-C antes e após o Treton.....	110
Gráfico 59 – Distribuição de textura superficial do agregado A-C antes e após o Treton.	111
Gráfico 60 – Distribuição de textura superficial do agregado B-M antes e após o Treton	111
Gráfico 61 – Distribuição de textura superficial do agregado B-I antes e após o Treton..	112
Gráfico 62 – Distribuição de textura superficial do agregado C-C antes e após o Treton.	112
Gráfico 63 – Distribuição de textura superficial do agregado D-C antes e após o Treton.	112
Gráfico 64 – Resultados do ensaio de Micro-Deval.....	113
Gráfico 65 – Média inicial □ média final (após 210 min) das propriedades de forma.....	114
Gráfico 66 – Variação de esfericidade dos agregados quando submetidos ao Micro-Deval.....	115
Gráfico 67 – Variação de angularidade dos agregados quando submetidos ao Micro-Deval.....	115
Gráfico 68 – Variação de textura superficial dos agregados quando submetidos ao Micro-Deval.....	117
Gráfico 69 – Redução de textura superficial e angularidade □ Massa retida na peneira 1,18 mm (após 210 min).....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Escala de dureza de Mohs.....	24
Tabela 2	– Minerais e principais características.....	25
Tabela 3	– Tipos de rochas exploradas para produção de agregados na RMF, com base nas análises petrográficas realizadas para o estudo de Cavalcanti e Parahyba (2012).....	47
Tabela 4	– Origem e classificação preliminar das rochas utilizadas na pesquisa oriundas da RMF, com base nas análises petrográficas realizadas para o estudo de Cavalcanti e Parahyba (2012).....	47
Tabela 5	– Tabela 5 – Frações e quantidade de partículas analisadas por meio do AIMS.....	51
Tabela 6	– Valores-limite da classificação de Al-Rousan (2004).....	55
Tabela 7	– Agregados utilizados para a comparação entre os tipos de britagem.....	56
Tabela 8	– Ajustes de APF utilizados no britador cônico em escala real.....	57
Tabela 9	– Agregados utilizados para a investigação da textura superficial.....	58
Tabela 10	– Agregados utilizados para a investigação da resistência à degradação.....	59
Tabela 11	– Resultados da análise petrográfica – Pedreira A.....	64
Tabela 12	– Resultados da análise petrográfica – Pedreira B.....	65
Tabela 13	– Resultados da análise petrográfica – Pedreira C.....	66
Tabela 14	– Resultados da análise petrográfica – Pedreira D.....	67
Tabela 15	– Conjunto resumido de informações das Pedreiras A, C e D.....	70
Tabela 16	– Conjunto resumido de informações da Pedreira B.....	70
Tabela 17	– Teste de hipóteses para comparação de médias – Variação de APF.....	88
Tabela 18	– Teste de hipóteses para comparação de médias – Variação da alimentação.....	92
Tabela 19	– Resultados médios do ensaio de resistência ao choque – Treton.....	102
Tabela 20	– Tabela de correlações dos resultados do ensaio de resistência ao choque – Treton.....	103
Tabela 21	– Estatísticas da regressão A.....	103
Tabela 22	– Equação de regressão A.....	104
Tabela 23	– Estatísticas da regressão B.....	104
Tabela 24	– Equação de regressão B.....	105
Tabela 25	– Estatísticas da regressão C.....	106
Tabela 26	– Equação de regressão C.....	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações Iniciais	18
1.2	Problema de Pesquisa	19
1.3	Objetivos	20
<i>1.3.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	20
<i>1.3.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.4	Organização da dissertação	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Uso de agregados em obras de Engenharia Civil	22
<i>2.1.1</i>	<i>Funções dos agregados em diferentes aplicações</i>	22
2.2	Minerais e Rochas	24
<i>2.2.1</i>	<i>Minerais e suas propriedades</i>	24
<i>2.2.2</i>	<i>Tipos e propriedades de rochas</i>	26
<i>2.2.3</i>	<i>Características petrográficas das rochas e as propriedades de agregados minerais</i>	28
2.3	Propriedades de forma dos agregados	31
<i>2.3.1</i>	<i>Caracterização das propriedades de forma por meio de ensaios tradicionais</i>	32
<i>2.3.2</i>	<i>Caracterização das propriedades de forma por meio do PDI</i>	33
2.4	Britagem	34
<i>2.4.1</i>	<i>Equipamentos e definições</i>	34
<i>2.4.2</i>	<i>Aspectos da britagem e sua relação com as propriedades de forma de partículas</i> .	36
2.5	Influência das propriedades de forma dos agregados em diferentes aplicações	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	Materiais	47
3.2	Métodos	48
<i>3.2.1</i>	<i>Análise petrográfica das rochas</i>	49

3.2.2	Caracterização dos agregados com relação às propriedades de forma.....	50
3.2.2.1	<i>Cálculo dos parâmetros das propriedades de forma.....</i>	53
3.2.2.2	<i>Classificação dos agregados com relação às propriedades de forma.....</i>	55
3.2.3	Comparação entre forma e angularidade de diferentes agregados.....	55
3.2.3.1	<i>Britadores utilizados</i>	55
3.2.3.2	<i>Britador cônico com variação da APF (em pedreira)</i>	56
3.2.3.3	<i>Britador de mandíbulas com variação do material de alimentação (em laboratório).....</i>	57
3.2.3.4	<i>Diferentes composições mineralógicas presentes em cada agregado</i>	57
3.2.4	Investigação da textura superficial.....	57
3.2.4.1	<i>Variação entre agregados de diferentes origens</i>	58
3.2.4.2	<i>Variação entre partículas do mesmo agregado</i>	59
3.2.5	Análise da resistência à degradação	59
3.2.5.1	<i>Resistência ao choque – Treton.....</i>	59
3.2.5.2	<i>Resistência ao desgaste (abrasão e polimento) – Micro-Deval.....</i>	60
3.2.6	Elaboração de diagramas de auxílio à produção e à seleção de agregados	62
4	RESULTADOS.....	63
4.1	Análises petrográficas	63
4.2	Comparação entre forma e angularidade de diferentes agregados	71
4.2.1	<i>Britadores distintos.....</i>	71
4.2.2	<i>Britador cônico com variação da APF (em pedreira).....</i>	84
4.2.3	<i>Britador de mandíbulas com variação do material de alimentação</i>	88
4.2.4	<i>Diferentes composições mineralógicas presentes em cada agregado.....</i>	92
4.3	Investigação da textura superficial	94
4.3.1	<i>Variação entre agregados de diferentes origens</i>	94
4.3.2	<i>Variação entre partículas do mesmo agregado</i>	99
4.4	Análise da resistência à degradação	101
4.4.1	<i>Resistência ao choque – Treton</i>	102

4.4.2	<i>Resistência à abrasão e ao polimento – Micro-Deval</i>	113
4.5	Diagramas de resumo para auxílio na seleção e na produção de agregados	118
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
5.1	Conclusões sobre a influência da britagem nas propriedades de forma dos agregados.....	121
5.2	Conclusões sobre a influência da mineralogia nas propriedades de forma dos agregados.....	123
5.3	Conclusões sobre a influência da mineralogia e das propriedades de forma na tendência das partículas de agregado à degradação	124
5.4	Sugestões para trabalhos futuros.....	125
	REFERÊNCIAS	126
	APÊNDICE A – FOTOMICROGRAFIAS DAS ROCHAS	134

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O agregado mineral, produto largamente utilizado nas diferentes áreas da Engenharia Civil, é o componente predominante de diversos materiais e estruturas, tais como concreto de cimento Portland, revestimento asfáltico, lastro ferroviário, enrocamentos e filtros (CAVALCANTI e PARAHYBA, 2012). A atenção que os agregados recebem cresceu consideravelmente ao longo dos últimos anos, devido ao desenvolvimento de estudos que mostram que suas características podem afetar, de maneira significativa, o comportamento e a qualidade dos compósitos (AHO, VAVRIK e CARPENTER, 2001; TOPAL e SENGOZ, 2005; RAMYAR, TOPAL e ANDIC, 2005; ZHANG, APEAGYEI e AIREY, 2015).

Um importante aspecto a ser considerado sobre as partículas de um agregado é o conjunto de suas propriedades de forma, que pode ser decomposto em forma, angularidade e textura superficial. Essas três propriedades estão ligadas, respectivamente, à relação entre as dimensões da partícula, às arestas existentes e ao grau de rugosidade de sua superfície e podem ser chamadas, conjuntamente, de propriedades de forma (MASAD, 2001). Os ensaios convencionalmente utilizados para a caracterização dessas propriedades apresentam várias limitações (BRIGGS e EVERTSSON, 1998; RAO; TUTUMLUER; KIM, 2002; FLETCHER *et al.*, 2003; BESSA, 2012). Alguns, por exemplo, resultam apenas em valores médios, não provendo informações sobre a distribuição e a dispersão da amostra; demandam intenso trabalho manual e grande intervalo de tempo, ou não são capazes de medir cada propriedade isoladamente. Como consequência, a atenção geralmente concentra-se apenas na forma, negligenciando a importância da angularidade e da textura superficial. Métodos de caracterização de propriedades de forma baseados no Processamento Digital de Imagens (PDI) foram desenvolvidos e aperfeiçoados com o intuito de proverem análises mais rápidas, completas e confiáveis. Entre eles, está consolidado o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) (TUTUMLUER, RAO e STEFANSKI, 2000; MASAD, 2005; WANG *et al.*, 2009).

Os principais fatores que provocam variações nas propriedades de forma de agregados são as características da rocha de origem e o modo como as partículas são fragmentadas, ou seja, os parâmetros utilizados nos processos de britagem (BERN, 1997; BRIGGS e EVERTSSON, 1998; BÉRUBÉ, 2001; BOUQUETY *et al.*, 2007; RAJAN; SINGH, 2017a). Esse fato, entretanto, nem sempre é utilizado como elemento para produzir e selecionar agregados mais adequados para cada tipo de aplicação na Engenharia Civil. A

análise petrográfica geralmente é realizada apenas no início da exploração do maciço rochoso a fim de determinar a qualidade da rocha. Anastasio *et al.* (2016) afirmam que essa análise é uma poderosa ferramenta para prever o comportamento do material em campo, acompanhar e controlar a atuação de uma pedreira durante sua vida útil. Não se costuma, contudo, tirar benefícios dessa prática no âmbito de projeto de compósitos.

1.2 Problema de Pesquisa

Na composição de misturas asfálticas, assim como de outros compósitos, o agregado, muitas vezes, não recebe a devida atenção, ficando esta mais voltada para o ligante asfáltico ou para o aglutinante utilizado. Os atuais ensaios normatizados que tratam de propriedades de forma possuem uma série de limitações, como, por exemplo, o fato de nem sempre caracterizarem de maneira robusta e eficaz o material analisado e sua variabilidade. Por sua vez, os critérios de utilização estabelecidos pelas normativas vigentes são bastante amplos, propondo a aceitação, sem fazer distinção, de conjuntos de partículas bastante diferentes entre si (com relação às propriedades de forma e à composição mineral). É comum que apenas a forma de partículas graúdas seja considerada, em detrimento de sua angularidade, de sua textura superficial e das propriedades de forma dos agregados miúdos de maneira geral, devido, principalmente, à maior dificuldade de caracterização destas.

Percebe-se uma carência de diálogo entre a Geologia e a Engenharia Civil no que se refere ao uso de agregados minerais, de forma que se perdem informações importantes que poderiam ser retiradas dessa interdisciplinaridade. Com isso, os principais fatores que influenciam as propriedades morfológicas e mecânicas dos agregados (características da rocha e do processo de britagem) não são, na maioria dos casos, utilizados como mecanismos para produzir, ou para escolher dentre as possibilidades disponíveis, os agregados mais adequados para cada uso. Dessa forma, o máximo potencial e a máxima qualidade que os agregados são capazes de oferecer para atenuar ou evitar defeitos apresentados pelos materiais de construção, provavelmente, não estão sendo completamente aproveitados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem o propósito principal de analisar as relações entre alguns aspectos dos agregados minerais, envolvendo as propriedades de forma e a resistência à degradação, com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem.

1.3.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral foi fracionado em quatro objetivos específicos, listados a seguir:

- a) Comparar a forma e a angularidade entre agregados de origens distintas gerados por processos de britagem com parâmetros diferentes;
- b) Avaliar a relação entre a textura superficial medida por meio do PDI e as propriedades petrográficas e mineralógicas de diferentes agregados minerais;
- c) Analisar a resistência das partículas à quebra, à abrasão e ao polimento, buscando relacioná-la às suas propriedades petrográficas e morfológicas;
- d) Elaborar diagramas resumindo e relacionando os resultados a fim de auxiliar a seleção de agregados minerais com base nas características da rocha de origem e do processo de britagem.

1.4 Organização da dissertação

Este trabalho foi organizado em 5 partes, descritas a seguir:

- a) O Capítulo 1 traz as considerações iniciais relativas ao tema estudado, o problema que gerou motivação para a realização da pesquisa e os objetivos, geral e específico, que nortearam a pesquisa.
- b) O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura publicada que possua relação com o assunto trabalhado, desde conceitos básicos necessários à sua compreensão até as pesquisas mais recentes realizadas sobre o tema. Foram abordados: o uso de agregados em obras de Engenharia Civil; minerais e rochas; propriedades de forma dos agregados, britagem e influência das propriedades de forma dos agregados em diferentes aplicações.

- c) O Capítulo 3 apresenta informações sobre os materiais empregados no programa experimental da pesquisa, além dos métodos e dos equipamentos utilizados.
- d) O Capítulo 4 traz os resultados obtidos para cada parte do programa experimental e suas análises e interpretações. É subdividido em: comparação entre a forma e a angularidade de agregados gerados por processos de britagem distintos; investigação da textura superficial; análise da resistência à degradação e propostas para a seleção de agregados em diferentes aplicações.
- e) O Capítulo 5, por fim, apresenta as conclusões que puderam ser pontuadas ao final da realização desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Uso de agregados em obras de Engenharia Civil

As rochas são utilizadas pelo homem como material de construção desde a antiguidade. Por muito tempo, elas foram utilizadas de forma bruta ou pouco trabalhada, enquanto hoje são aplicadas também na forma de agregados, sendo britadas ou moídas (ALMEIDA; LUZ, 2009). As rochas britadas estão presentes em diversas áreas da Engenharia Civil e costumam ser o componente predominante dos materiais que as empregam, sendo, portanto, utilizadas em grandes volumes.

O Gráfico 1 apresenta uma noção geral e simplificada da quantidade de agregados, em massa, consumida em diferentes tipos de obras. Pode-se notar que, para as unidades consideradas, as obras relacionadas à infraestrutura de transportes (estradas, vias urbanas, vias metroviárias) demandam quantidades consideravelmente maiores de agregados minerais se comparadas a obras de construção de casas e edifícios. Apesar disso, no geral, notam-se menores exigências relativas às características desse material quando se trata de obras de infraestrutura de transportes. A escolha do agregado utilizado deve ser baseada em diferentes critérios, considerando, além do custo, as propriedades requeridas para a estrutura da qual farão parte. Cavalcanti e Parahyba (2012) destacam as principais funções que os agregados exercem em diferentes aplicações, as quais são descritas no tópico a seguir.

Gráfico 1 – Consumo (em toneladas) de agregados para diferentes aplicações



Fonte: ANEPAC (2015).

2.1.1 Funções dos agregados em diferentes aplicações

O concreto de cimento Portland pode ser utilizado em elementos estruturais ou não estruturais de edifícios, de pontes e de pavimentos rodoviários, entre outros. Os agregados constituem até 85% da massa do concreto e assumem funções como: contribuir para a

resistência do compósito aos esforços solicitantes e ao desgaste por intemperismo; reduzir variações volumétricas e reduzir o custo do concreto. Para cumprir com essas funções, o agregado deve apresentar trabalhabilidade, não reatividade, boa resistência à compressão simples, à tração, ao desgaste e ao intemperismo.

Os agregados podem estar presentes tanto nas camadas granulares como na camada de revestimento asfáltico de um pavimento e devem contribuir para o suporte da carga do tráfego, para a transmissão dessa carga às camadas inferiores e para a proteção do subleito, principalmente, da ação da água. Destacam-se como propriedades importantes para o agregado, nesse caso, a resistência à compressão, ao impacto, ao desgaste e ao intemperismo. Deve-se ressaltar a importância das características dos agregados para o atrito entre o revestimento asfáltico e os pneus dos veículos, fator essencial à segurança em pavimentos rodoviários e aeroportuários. As propriedades do agregado relacionadas a essa questão são a granulometria, a forma, a textura superficial e a resistência ao polimento (REZAEI; MASAD; CHOWDHURY, 2011).

No lastro de ferrovias, o agregado é, geralmente, o único componente e deve suportar a carga vinda dos dormentes, provenientes das ações verticais e horizontais da passagem dos trens e das variações térmicas; transmitir essas solicitações ao leito, dissipando as tensões e constituir um meio drenante para evitar o acúmulo de água na sua superfície. Dessa forma, as partículas de agregado devem ser resistentes à compressão, ao impacto, ao atrito e a variações de temperatura e de umidade.

Fragmentos de rocha de maiores dimensões, chamados de pedras de mão, podem ser utilizados em contenções, em diques, em dissipadores de energia, em proteção de taludes e em recuperação de áreas erodidas, entre outros. Nessas aplicações, as pedras de mão podem ser submetidas a forças de compressão de elevada intensidade devido a cargas pontuais, ao desconfinamento, ao atrito, à alternância entre umedecimento e secagem, a variações de temperatura e à ação de sais, quando aplicados em obras marinhas. Elas devem resistir, portanto, à compressão, à tração, ao desgaste e ao intemperismo.

Os agregados também podem constituir filtros, apresentando a função de impedir a passagem de partículas finas de solo, ao mesmo tempo em que permitem a passagem de água. Nessa aplicação, o agregado geralmente fica interno à estrutura, permanecendo menos exposto ao intemperismo imposto pela natureza se comparado a outras aplicações. Na fase de execução, entretanto, as partículas de agregado podem ser submetidas ao atrito, à abrasão e ao impacto e, após a construção, elas podem sofrer compressão, abrasão e possíveis reações químicas.

2.2 Minerais e Rochas

2.2.1 Minerais e suas propriedades

Um mineral é uma substância natural, inorgânica e homogênea, cuja estrutura atômica e composição química são bem definidas, e que possui uma série exclusiva de propriedades físicas: dureza, clivagem, fratura, brilho, cor, traço, densidade e hábito cristalino. Milhares de minerais são conhecidos, entretanto, aqueles que predominam na constituição da maioria das rochas, chamados de minerais formadores de rochas, são pouco mais de trinta (PRESS *et al.*, 2006). São descritas, a seguir, de acordo com Press *et al.* (2006), as propriedades consideradas mais relevantes com relação às características dos agregados minerais.

A dureza dos minerais, resistência que eles oferecem ao serem riscados por outro material, é função da estrutura interna do cristal e da força de suas ligações químicas. Essa propriedade impacta diretamente na tendência do mineral ao desgaste, ao sofrer ações abrasivas em um processo de erosão (CHIOSSI, 1987). A escala de Mohs (Tabela 1), que classifica os minerais com base na sua dureza (relativa a outros minerais ou materiais, por meio do risco), é uma das ferramentas mais utilizadas na identificação de um mineral desconhecido.

Tabela 1 – Escala de dureza de Mohs

Mineral	Número na escala	Mineral	Número na escala
Talco	1	Ortoclásio	6
Gipsita	2	Quartzo	7
Calcita	3	Topázio	8
Fluorita	4	Coríndon	9
Apatita	5	Diamante	10

Fonte: Adaptado de Sgarbi (2012).

A clivagem relaciona-se à existência de ligações fracas entre determinados planos de átomos e influencia a tendência do mineral de ser partido segundo superfícies planas. A qualidade da clivagem pode ser classificada como perfeita, boa ou regular. O número de planos de clivagem influi no formato que o mineral apresenta mediante sua quebra, após a qual ele pode formar, por exemplo, cubos quase perfeitos, caso possua três planos de clivagem de alta qualidade (planos de ligações fracas) perpendiculares entre si, ou folhas, caso possua apenas um plano de clivagem de alta qualidade. Alguns minerais, por possuírem

ligações fortes em todas as direções, não apresentam planos de clivagem que possam ser classificados nem mesmo como regulares.

A fratura traduz-se como a tendência dos cristais de minerais a quebrarem-se segundo superfícies irregulares, sem utilizar os planos de clivagem, podendo apresentar diferentes formatos, a depender da estrutura particular de cada mineral. A densidade pode ser definida como a razão entre o peso do mineral no ar e o peso de um volume igual de água pura a 4°C. O hábito cristalino, por sua vez, é o formato que cristais individuais ou agregados de cristais do mineral apresentam ao crescerem e é geralmente relacionado a formas geométricas, como lâminas, placas e agulhas. Essa propriedade está ligada aos planos de átomos ou íons existentes, à velocidade, à direção de crescimento e às características do cristal. A Tabela 2 apresenta uma lista de minerais com algumas de suas principais características.

Tabela 2 – Minerais e principais características

Mineral	Grupo	Fórmula química	Dureza	Clivagem	Outras informações
Biotita	Micas	$K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	2,5 a 3	Perfeita em uma direção	Folhas flexíveis e elásticas. Sob ação do intemperismo, tornam-se lixiviadas de seus álcalis, perdem elasticidade
Albita	Feldspatos plagioclásios	$NaAlSi_3O_8$	6	Duas direções, sendo uma perfeita e uma boa	O feldspato cálcico tende a se alterar para uma mistura complexa de minerais, dentre os quais: calcita e epidoto
Anortita		$CaAl_2Si_2O_8$			
Quartzo	Grupo da sílica	SiO_2	7	Pelo menos uma direção bem desenvolvida	Estabilidade química e mecânica
Microclina	Feldspatos potássicos	$KAlSi_3O_8$	6	Duas direções, sendo uma perfeita e uma boa (89°30' entre si)	Quando atacados por águas ligeiramente ácidas, se alteram, dando lugar a argilo-minerais ou a muscovita
Ortoclásio		$KAlSi_3O_8$	6	Duas direções, sendo uma perfeita e uma boa (90° entre si)	
Sanidina		$KAlSi_3O_8$	6	Duas direções, sendo uma perfeita e uma boa	
Nefelina	Feldspatoides	$(Na,K)AlSiO_4$	6	Imperfeita em uma direção	Nas superfícies de rochas alteradas, tende a ser corroída, o que a distingue do feldspato e do quartzo

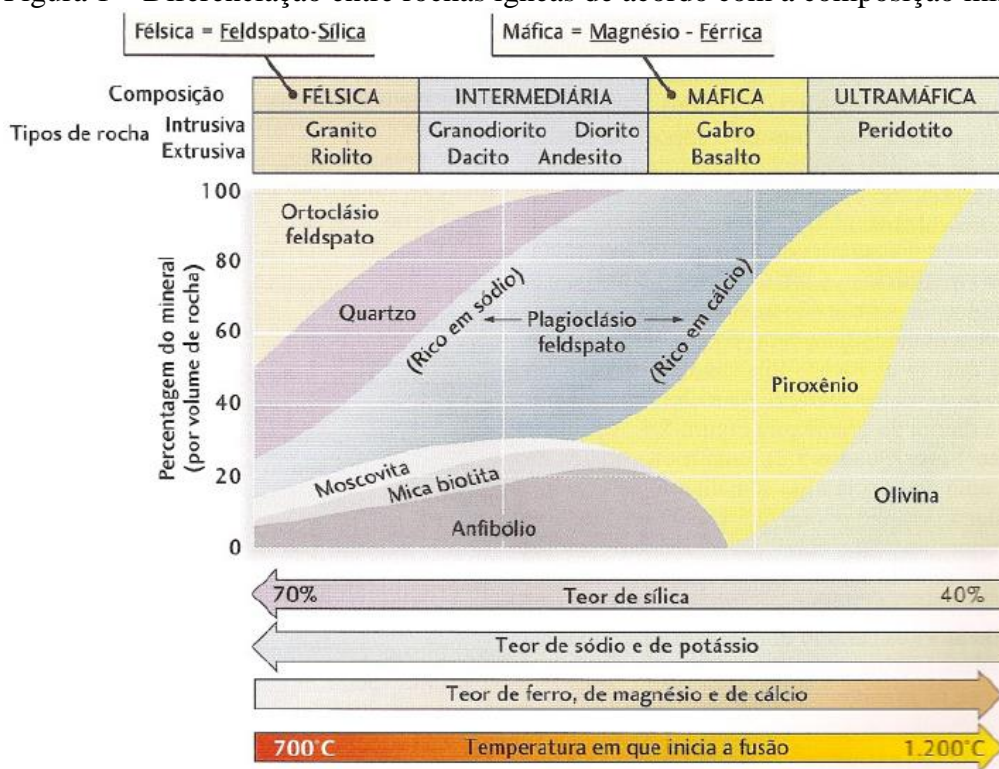
Fonte: Elaborado pela autora com base em Sgarbi (2012).

2.2.2 Tipos e propriedades de rochas

Segundo Oliveira e Brito (1998), uma rocha pode ser definida como “[...] corpo sólido natural, resultante de um processo geológico determinado, formado por agregados de um ou mais minerais, arranjados segundo as condições de temperatura e pressão durante sua formação”. As propriedades físicas que as rochas apresentam em um determinado momento são resultantes não apenas da sua composição mineral, mas também da combinação de efeitos de sua origem e de sua história evolutiva. As rochas são classificadas em três grandes grupos: ígneas, sedimentares e metamórficas, a depender de seu material-fonte e do seu processo formador, sendo mais comumente exploradas, para a produção de agregados, as rochas ígneas e as rochas metamórficas, que estão abordadas a seguir.

As rochas ígneas, formadas a partir do resfriamento e consequente solidificação do magma, distinguem-se entre si pelas diferenças nos tamanhos dos cristais, e pela composição mineralógica e química. A velocidade de resfriamento do magma define o tamanho dos cristais formados, de maneira que, quanto mais lento for o resfriamento, maior é o crescimento dos cristais, e mais fácil é o seu reconhecimento a olho nu. Rochas ígneas vulcânicas, por exemplo, que se resfriam rapidamente na superfície terrestre, apresentam granulação mais fina se comparadas às rochas ígneas plutônicas, as quais resfriam-se lentamente no interior da terra, proporcionando tempo suficiente para o crescimento dos cristais. Com relação à composição mineralógica, as rochas ígneas podem ser classificadas como félsicas, máficas ou intermediárias, de acordo com as proporções dos minerais de cor clara (félsicos) e de cor escura (máficos), conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Diferenciação entre rochas ígneas de acordo com a composição mineralógica



Fonte: Press *et al.* (2006).

As rochas metamórficas são o resultado de mudanças na mineralogia, na textura ou na composição química de qualquer tipo de rocha devido à ação de altas pressões e temperaturas do interior da Terra. Essas temperaturas devem ser altas o suficiente para modificarem as rochas por recristalização e por reações químicas, entretanto, mais baixas que seu ponto de fusão. Os minerais mais abundantes nesse tipo de rocha, assim como nas rochas ígneas, são os silicatos, sendo comuns o quartzo, o feldspato, a mica, o piroxênio e os anfibólitos. Alguns minerais exclusivos das rochas metamórficas são a cianita, a estauroлита e algumas variedades de granadas (PRESS *et al.*, 2006).

A textura, a granulação e as microestruturas são propriedades fundamentais na caracterização de rochas, as quais podem ser determinadas por meio de análise petrográfica. A textura é o arranjo microscópico dos minerais, sendo função da mineralogia e das condições físicas ao longo do tempo de formação da rocha. Ela repercute seu grau de coesão. A granulação trata do tamanho dos grãos. Microestrutura, por sua vez, é uma denominação para estruturas de dimensões microscópicas que influenciam a resistência da rocha, como microfissuras, microfraturas, microfalhas e microdobras (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

O grau de alteração mineral de uma rocha está ligado à sua desintegração e decomposição, causada por agentes naturais químicos e físicos, e pode provocar a transformação dos minerais e destruição das redes cristalinas (BARROS, 1991). Essa

alteração pode ocasionar a formação de neominerais facilmente removíveis, modificando as propriedades da rocha, por exemplo, elevando sua porosidade e diminuindo sua resistência mecânica. As rochas podem ser caracterizadas por reconhecimento macroscópico, por meio do qual se analisam estruturas, descontinuidades e cores, e por estudos microscópicos, comumente feitos por meio de análise petrográfica, que consta da determinação e da quantificação dos seus minerais constituintes, além das suas inter-relações, padrões de alteração, deformação, entre outros.

Duas ocorrências que podem ser vistas em granitos e gnaisses são a textura mirmequítica e a textura pertítica. A primeira é causada pelo intercrescimento entre plagioclásio e quartzo, normalmente com substituição do feldspato potássico. Pode ser identificada como pequenas massas de quartzo em formato de gotas ou em formato vermicular, internas ao plagioclásio. A textura pertítica ocorre do intercrescimento de plagioclásio em feldspato potássico (ABNT, 2008). Segundo alguns autores (WIGUN, 1995; PONCE; BATIC, 2006), essas estruturas podem contribuir para a ocorrência de reação álcali-agregado em concretos, devido, entre outros fatores, ao tamanho reduzido dos grãos internos, característica que eleva sua reatividade pelo aumento da área superficial disponível para a reação. A norma brasileira que trata de reação álcali-agregado (ABNT, 2008) considera essas duas texturas como ocorrências possíveis de intensificar a reatividade dos agregados.

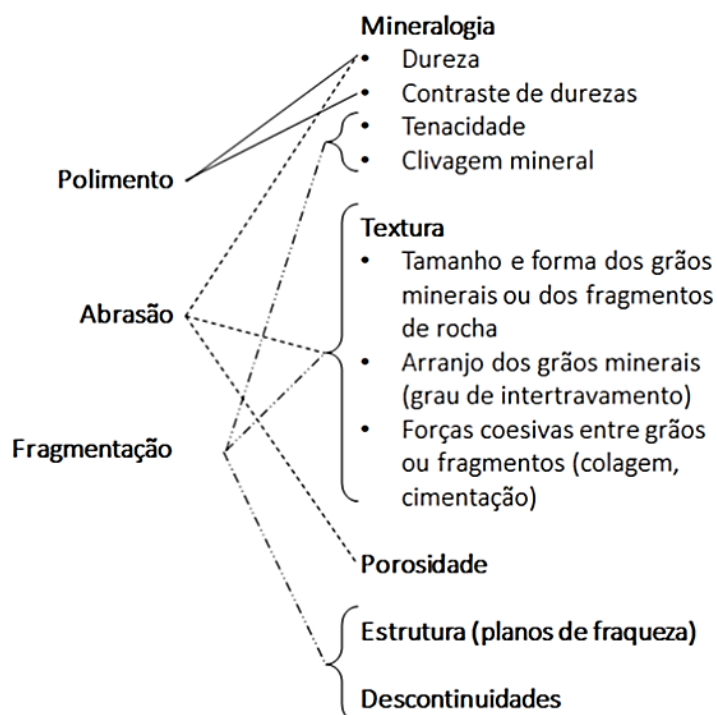
2.2.3 Características petrográficas das rochas e as propriedades de agregados minerais

Berubé (2001) realizou um estudo teórico sobre a relação entre o desempenho de agregados minerais utilizados em concreto e suas características mineralógicas e petrográficas. O autor avaliou várias especificações que os agregados devem atender, como as relacionadas à resistência mecânica, à durabilidade, à reação álcali-agregado, à forma, à textura superficial e à presença de compostos nocivos, evidenciando que o desempenho das partículas é essencialmente influenciado por suas características mineralógicas e petrográficas. O autor ressalta, ainda, que a análise petrográfica, apesar de ser de natureza qualitativa, permanece sendo a ferramenta mais valiosa para determinar a qualidade dos agregados minerais.

A Figura 2 apresenta uma síntese das relações que Berubé (2001) determinou entre mineralogia, petrografia e desempenho de agregados com relação ao polimento, à abrasão e à fragmentação. Pode-se observar que, de acordo com o autor, a resistência ao polimento de um agregado é função das durezas dos minerais presentes e da relação entre

elas. A tendência à abrasão é explicada pela dureza dos minerais, por aspectos texturais da rocha e por sua porosidade, enquanto a resistência à fragmentação é visto como resultado da combinação entre tenacidade e clivagem dos minerais presentes, estrutura, descontinuidades e aspectos da textura da rocha.

Figura 2 – Relações entre mineralogia, petrografia e desempenho de agregados com relação ao polimento, à abrasão e à fragmentação



Fonte: Adaptado de Bérubé (2001).

Pang *et al.* (2010) encontraram relações entre a composição mineralógica de diferentes agregados (calcário, basalto, granito e gnaiss) e suas propriedades físicas. Os autores concluíram que composições minerais de plagioclásio, quartzo e feldspato tendem a possuir maiores resistências à fragmentação; que uma matriz composta principalmente por grãos finos a médios com intertravamento entre seus contornos resultam em resistências superiores à abrasão e à fragmentação. O basalto apresentou as maiores resistências a esse tipo de degradação, seguido do granito, do gnaiss e, por último, do calcário. O gnaiss destacou-se dos outros agregados pelo maior percentual de partículas lamelares.

Anastasio *et al.* (2016) também buscaram explorar a ligação entre as características petrográficas das rochas e suas possíveis aplicações à construção civil, a fim de melhorar o diálogo entre pesquisadores, produtores e construtores. Os autores estudaram quatro materiais: uma combinação de xisto e paragnaisse, um anfíbolito, um metagrauvaque e

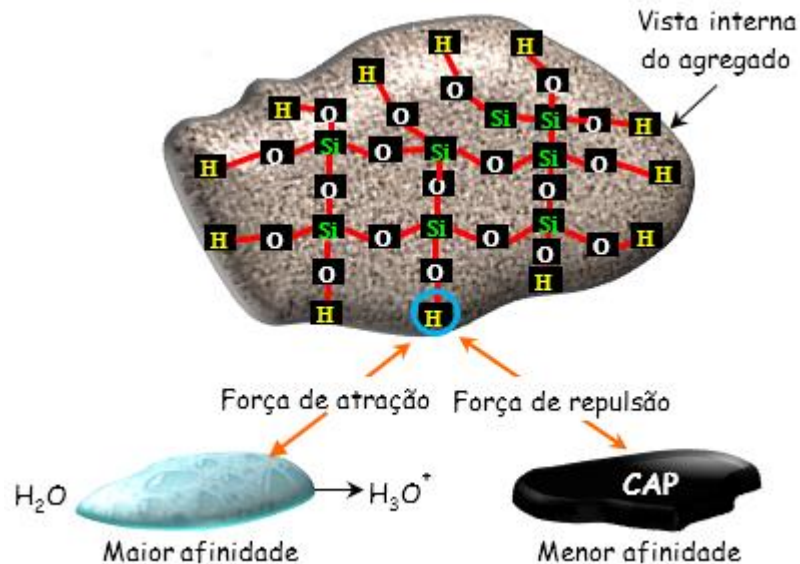
um metagabro. Algumas conclusões dos autores foram: o anfibolito e o metagabro mostraram-se rochas polivalentes, com boa resistência à abrasão, podendo ser utilizadas em qualquer ramo da construção civil; a estrutura foliada do xisto-paragnaisse pode comprometer seu desempenho como agregado, pois, quando britado, ele tende a produzir partículas planas e alongadas; o gabro, apesar de ter uma ampla variedade de propriedades texturais, o que pode tornar o agregado mais frágil caso este apresente textura granular e grãos minerais graúdos, é constituído, tipicamente, por minerais pesados e duráveis. Os autores ressaltam a importância dos especialistas em petrologia para fornecer uma boa compreensão de diferentes parâmetros das rochas responsáveis pelas propriedades dos agregados, considerando que a análise petrográfica é um teste qualitativo e que, por exemplo, duas rochas podem apresentar a mesma mineralogia, mas possuem estruturas internas distintas (a depender do seu processo de formação), provocando comportamentos diferentes aos agregados minerais oriundos de cada uma.

Zhang, Apeageyi e Airey (2015) avaliaram a influência da composição mineralógica dos agregados na susceptibilidade da ligação entre a partícula e o ligante asfáltico, quando expostos à umidade, utilizando quatro tipos de agregados: dois graníticos e dois basálticos. Essa ligação foi analisada antes e após as misturas asfálticas serem condicionadas com relação à umidade induzida, por meio de três ensaios mecânicos: *Peel test*, *Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument (PATI)*, e *Pull-off test*. Os autores observaram que o agregado possui maior efeito na sensibilidade da ligação à umidade se comparado ao ligante asfáltico. A presença de certos minerais nas partículas apresentou grande impacto na sua absorção. Argilominerais e a anortita, por exemplo, mostraram elevar a sensibilidade da ligação à umidade, enquanto a calcita indicou reduzir essa sensibilidade. Os autores comentam que pesquisas anteriores já haviam identificado a albita, o quartzo e o feldspato no primeiro grupo (minerais prejudiciais com relação à presença de umidade).

Agregados com altos teores de silício, como quartzo e granito, oriundos de rochas ácidas apresentam, com maior frequência, falhas na adesividade com o ligante asfáltico, se comparados a agregados oriundos de rochas básicas, como basalto e calcário (READ; WHITEOAK, 2003). Isso acontece porque os primeiros apresentam o composto silanol (grupo funcional com a conectividade SiOH.), que tende a reagir com a água liberando o cátion hidrogênio (H^+) e ficando, assim, com carga negativa. Os grupos ácidos do ácido carboxílico (-COOH) presente no ligante asfáltico também reagem com a água, liberando um cátion hidrogênio (H^+) e deixando uma carga negativa ($-COO^-$) no ligante. Cria-se, portanto, uma força de repulsão entre o agregado e o ligante asfáltico, como ilustrado pela Figura 3.

Read e Whiteoak (2003) ressaltam que, em alguns casos, a influência da rugosidade superficial do agregado nessa adesividade pode ser mais forte que a influência da mineralogia.

Figura 3 – Influência do silício na adesividade entre agregado e ligante asfáltico



Fonte: Lucas Junior (2018).

2.3 Propriedades de forma dos agregados

As propriedades de forma dos agregados minerais, ou seja, a forma, a angularidade e a textura superficial, são independentes entre si, estando relacionadas à análise das partículas em diferentes escalas. A primeira trata das relações entre as três dimensões da partícula, podendo classificá-la, por exemplo, como plana, alongada, lamelar, cúbica e esférica. Com relação à forma, o termo cúbico assemelha-se ao termo esférico, ou seja, significa que a partícula apresenta as três dimensões iguais ou próximas entre si. A angularidade busca descrever os ângulos existentes ao longo da superfície das partículas, enquanto a textura superficial está ligada às suas irregularidades superficiais (MASAD, 2005). Pode-se dizer, portanto, que a forma trata da partícula de agregado em uma menor escala, seguida da angularidade, e, por fim, da textura superficial, que exige uma análise em maior escala para detectar essas menores irregularidades. A Figura 4 mostra uma representação dessas três propriedades.

Figura 4 – Forma, angularidade e textura superficial das partículas de agregado



Fonte: Elaborado pela autora.

2.3.1 Caracterização das propriedades de forma por meio de ensaios tradicionais

No Brasil, costuma-se caracterizar as propriedades de forma dos agregados com base em ensaios normatizados pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT); pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e por instituições estrangeiras, como a *American Society for Testing and Materials* (ASTM). A norma DNER-ME 086 (DNER, 1994) descreve o ensaio de Índice de Forma (IF), o qual é realizado por meio da passagem do material através de crivos circulares e redutores, de aberturas específicas. O resultado do ensaio, o IF, é baseado na relação entre as duas menores dimensões das partículas, não sendo influenciado pela maior dimensão. Métodos de caracterização da forma de agregados também são estabelecidos pela ASTM D 4791 (ASTM, 2010) e pela NBR 7809 (ABNT, 2006), normas que se baseiam na medida das três dimensões das partículas por meio de paquímetros. Tratando-se da angularidade, a norma ASTM D 5821 (ASTM, 2013) propõe uma análise visual para determinar a porcentagem de partículas fraturadas de agregados graúdos, enquanto a ASTM C 1252 (ASTM, 2017) estabelece um procedimento de medição do volume de vazios não compactados entre partículas, com um fator influenciado pela forma, pela angularidade e pela textura superficial do material.

Os ensaios citados anteriormente, apesar de serem os mais utilizados para caracterizar as propriedades de forma de agregados, apresentam desvantagens já apontadas por diversos pesquisadores. Briggs e Evertsson (1998) indicaram que os resultados que esses procedimentos fornecem não são tão adequados por serem apenas valores médios, e não uma distribuição de valores, o que daria informações sobre a dispersão existente nos materiais analisados. Bessa (2012), utilizando um método baseado no PDI para caracterizar as

propriedades de forma de diferentes agregados, verificou que, sozinho, o valor médio das propriedades pode não representar bem cada material. O autor encontrou altos coeficientes de variação para alguns agregados (chegando a mais de 70% para a textura superficial), o que mostrou sua elevada heterogeneidade.

Segundo Rao, Tutumluer e Kim (2002), o método descrito pela norma ASTM D 5821 (2013) para determinar a angularidade de agregados graúdos é subjetivo, além de bastante dispendioso com relação ao tempo e ao trabalho. Gouveia (2006) observou que esse ensaio baseia-se apenas na quantidade de faces fraturadas de cada partícula, mas não no grau de angularidade dos cantos propriamente ditos (valores dos ângulos presentes no contorno das partículas). Pode-se adicionar a essa série de desvantagens a dificuldade de se medir, isoladamente e diretamente, cada propriedade de forma de agregados miúdos, além da ausência de métodos tradicionais para a caracterização da textura superficial.

2.3.2 Caracterização das propriedades de forma por meio do PDI

Devido às limitações que os métodos tradicionais de caracterização das propriedades de forma apresentam, como foi exposto anteriormente, vários pesquisadores buscam desenvolver e utilizar métodos que forneçam análises mais robustas, em sua maioria baseadas no PDI. Alguns desses métodos são o *University of Illinois Aggregate Image Analyzer* (TUTUMLUER; RAO; STEFANSKI, 2000), o *Aggregate Image Measurement System* (AIMS) (MASAD, 2005), o *Portable Image Analysis System for Characterizing Aggregate Morphology* (WANG *et al.*, 2009) e o uso da Tomografia Computadorizada de Raios-X (ERDOĞAN; FOWLER, 2005; ZELELEW *et al.*, 2013).

O AIMS é um sistema desenvolvido para caracterizar forma e angularidade de partículas miúdas (consideradas menores que 4,75 mm) e forma, angularidade e textura superficial de partículas graúdas (maiores que 4,75 mm). O sistema de captação de imagens é formado por uma câmera e por dois modos de iluminação e captura imagens em preto e branco para partículas miúdas e graúdas e em escala de cinza para partículas graúdas.

Mahmoud *et al.* (2010) propuseram melhorias ao sistema AIMS, como a inserção de um fator de cálculo para detectar quando partículas estão em contato e eliminar essas imagens capturadas e um novo método de classificação dos agregados a partir dos resultados fornecidos pelo AIMS. O AIMS2 (versão mais recente do sistema), foi utilizado por Bessa, Castelo Branco e Soares (2011) para propor um método de análise da resistência ao polimento e à abrasão de agregados de diferentes fontes, a partir, respectivamente, das perdas de textura

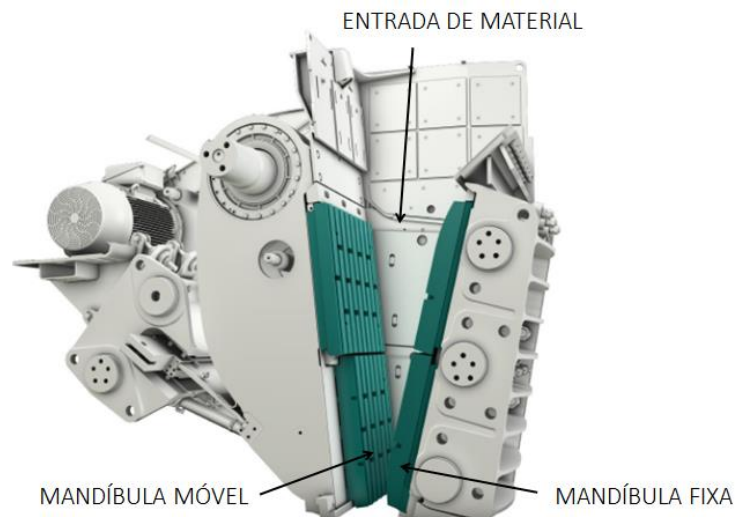
superficial e de angularidade provocadas pelo teste de abrasão Los Angeles. Bessa *et al.* (2015) também utilizaram o AIMS2 a fim de avaliar as propriedades de agregados com diferentes composições mineralógicas oriundos de três pedreiras diferentes e seu impacto na estrutura interna e no comportamento mecânico de misturas asfálticas.

2.4 Britagem

2.4.1 Equipamentos e definições

Existem, no mercado, diversos tipos de equipamentos de cominuição utilizados para reduzir o tamanho de partículas dos mais distintos materiais. No beneficiamento de agregados minerais para aplicação na Engenharia Civil, os equipamentos mais utilizados são britadores de mandíbulas, britadores cônicos e britadores de impacto. O britador de mandíbulas, mostrado na Figura 5, realiza a britagem por meio do esmagamento dos fragmentos de rocha entre duas mandíbulas: uma fixa e uma móvel. Esse tipo de equipamento é geralmente utilizado nos primeiros estágios do processo de cominuição, tendo a função principal de reduzir o tamanho dos fragmentos.

Figura 5 – Britador de mandíbulas



Fonte: Metso (2015).

O britador cônico, apresentado na Figura 6, possui um elemento fixo, o manto, e um elemento móvel, o cone, o qual gira em um movimento excêntrico no interior do manto. Dessa forma, esse tipo de britador trabalha, assim como o britador de mandíbulas, por compressão dos fragmentos. Esse equipamento é geralmente utilizado a partir do segundo

estágio de britagem e possibilita seu uso com a câmara mantida cheia, para garantir que as partículas de rocha sejam comprimidas umas contra as outras, resultando em partículas mais cúbicas que as geradas por britador de mandíbulas (BRIGGS; EVERTSSON, 1988).

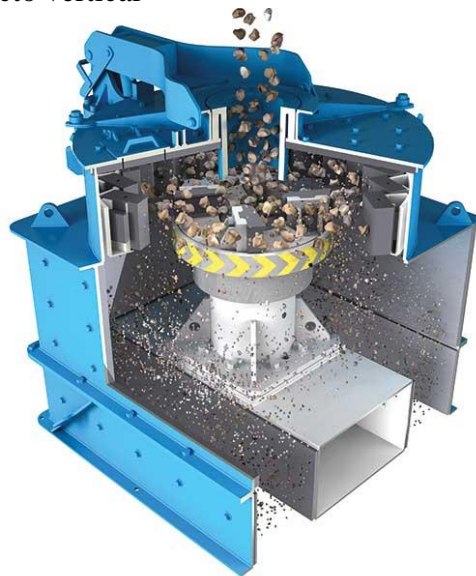
Figura 6 – Britador cônico



Fonte: In the Mine (2014).

O britador de impacto de eixo vertical (ou VSI, do inglês *Vertical Shaft Impact*), observado na Figura 7, realiza a quebra dos fragmentos de rocha, como o nome indica, por impacto. Uma parte do material que entra é centrifugada pelo rotor do equipamento, sofrendo choque com outra parcela do material que segue em fluxo vertical. Esse choque, o qual gera também a abrasão entre as partículas, provoca sua quebra em fragmentos menores. Britadores de impacto são conhecidos por serem capazes de produzir partículas mais cúbicas em relação a outros tipos de britadores (CHAVES; PERES, 2012).

Figura 7 – Britador de impacto vertical



Fonte: Marcotte (2016).

Algumas definições a respeito dos parâmetros de britadores, úteis para a sequência do trabalho, são descritos a seguir, segundo Eloranta (1995):

- a) Abertura na Posição Fechada (APF) é a menor abertura pela qual o material britado sai, no final da cavidade do equipamento, durante o movimento dos britadores de compressão (de mandíbulas e cônico);
- b) Abertura na Posição Aberta (APA) é a maior abertura pela qual o material britado sai, no final da cavidade do equipamento, durante o movimento dos britadores de compressão (de mandíbulas e cônico);
- c) *Stroke* é a diferença entre a APA e a APF;
- d) Alimentação é o material que entra no equipamento para ser britado;
- e) Britagem interparticular é o fenômeno de fragmentação que ocorre quando as partículas de rocha são comprimidas umas contra as outras, e não somente contra as faces internas do britador;
- f) Razão de redução é a relação entre o tamanho médio das partículas do material de alimentação e o tamanho médio das partículas do material resultante da britagem.

2.4.2 Aspectos da britagem e sua relação com as propriedades de forma de partículas

Eloranta (1995) investigou a influência de diferentes características da britagem na forma das partículas produzidas, percebendo que possuem impacto nestas vários

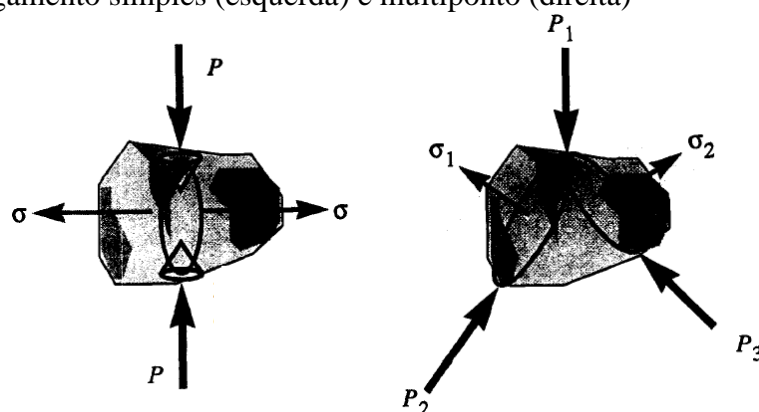
parâmetros operacionais do britador utilizado, como a velocidade, as aberturas de saída (APF e APA), o comprimento e o formato da câmara de britagem e a razão de redução. Os dois principais parâmetros determinados como responsáveis pela forma das partículas produzidas foram o *stroke* e a composição granulométrica do material de alimentação. Pelos resultados do estudo, quando existem finos (partículas menores que a APF) em alta quantidade no material de alimentação, um maior *stroke* proporciona uma fragmentação interparticular, gerando partículas com forma mais cúbica. Em uma situação em que esses finos não estão presentes na alimentação, o maior *stroke* causa uma fragmentação mais brusca, resultando em partículas com forma menos cúbica. O autor ressalta que os parâmetros operacionais do britador podem afetar a forma das partículas produzidas dentro de certos limites, mas o fator mais impactante é, de fato, a composição do material de alimentação. O cuidado deve ser voltado, portanto, ao processo como um todo e não apenas aos equipamentos de maneira isolada.

Segundo Evertsson e Bearman (1997), a forma de partículas britadas pode ser influenciada por diversos fatores, com relação ao britador e ao próprio material: APF, *stroke*, geometria da câmara de britagem, pressão hidráulica, resistência do material, granulometria e forma do material presente na alimentação. Os autores realizaram uma análise da fragmentação interparticular e desenvolveram um modelo mecânico para a previsão do desempenho de britadores cônicos para ser utilizado na fase de projeto desses equipamentos. Eles verificaram que a força de esmagamento máxima cresce exponencialmente com a razão entre o *stroke* e a altura da camada de material (provocando, conseqüentemente, o aumento da energia gasta). A metade superior do britador foi verificada como ineficaz, atuando mais como alimentador que como britador propriamente dito. Apesar da grande importância de se projetar um britador que possua eficiência energética, sabe-se que, dependendo do propósito da britagem, a preocupação com a forma das partículas geradas deve se sobrepor à redução rápida de seu tamanho, dois fatores considerados conflitantes por Briggs e Evertsson (1998).

Segundo Briggs e Evertsson (1998), a distribuição do carregamento que uma partícula sofre para ser fragmentada é um fator que tem grande influência na forma das partículas resultantes. No chamado carregamento simples, em que a partícula sofre forças de compressão em dois pontos em faces opostas, uma zona de cisalhamento é gerada à medida que as cargas aumentam. Nesse caso, geralmente, o fragmento parte-se em dois novos, com tamanhos semelhantes. No carregamento multiponto (interparticular), a partícula é submetida a mais de dois pontos de carga, distribuídos em sua superfície, de maneira que não surge um campo de tensões localizado. Esse caso tende a resultar em um fragmento maior, e em outros

menores arrancados dos pontos de carregamento. Os dois tipos de carregamento descritos estão representados na Figura 8. Os autores verificaram, analisando a forma de partículas geradas pela fragmentação causada pelos dois tipos de carregamento, que o primeiro reduz mais rapidamente o tamanho do fragmento e tende a gerar partículas com forma mais lamelar, enquanto o segundo gera partículas com tamanho mais próximo ao inicial (redução mais lenta) e com maior cubicidade. A escolha da forma de carregamento utilizada deve depender, portanto, dos objetivos do processo de britagem ou do estágio do processo.

Figura 8 – Carregamento simples (esquerda) e multiponto (direita)



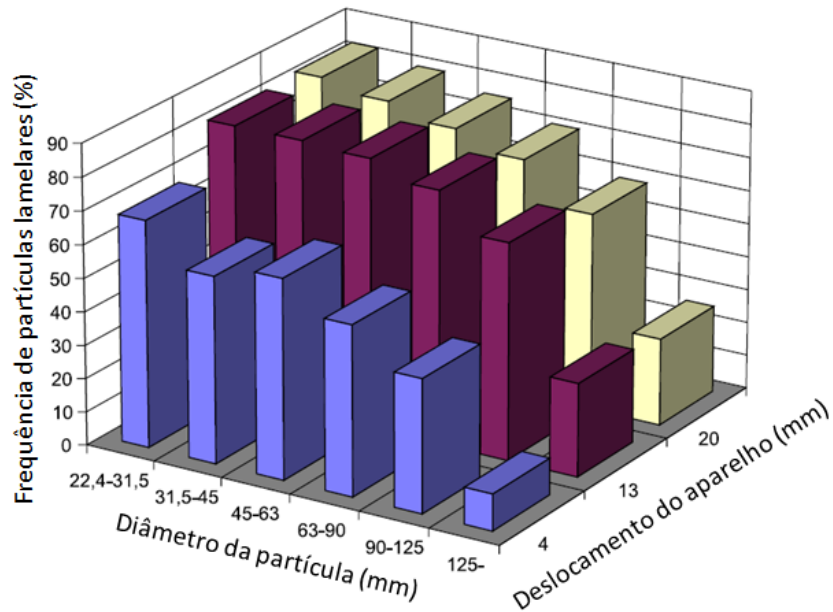
Fonte: Adaptado de Briggs e Evertsson (1998).

Segundo Briggs e Evertsson (1998) e Chaves e Peres (2012), manter um britador com a câmara cheia durante a fragmentação favorece o trabalho interparticular, gerando carregamentos multipontos nas partículas. O britador de mandíbulas, geralmente, não permite o trabalho com câmara cheia, portanto, tende a submeter os fragmentos de rocha a carregamentos uniaxiais (simples). Tavares e Neves (2008), a partir da análise de amostras de agregados oriundos de diferentes processos, observaram que partículas geradas por carregamentos uniaxiais apresentaram-se mais alongadas se comparadas àquelas geradas por britadores cônicos.

Unland e Szelina (2004) simularam o processo de britagem que ocorre na zona de processamento de um britador a fim de avaliar propriedades como probabilidade de quebra, tamanho dos fragmentos gerados e formato das partículas. Os autores utilizaram um equipamento que impõe um deslocamento de compressão pré-determinado ao material (uma ou mais partículas de rocha) e concluíram que deslocamentos maiores do aparelho provocaram a geração de uma maior quantidade de partículas lamelares (consideradas pelos autores aquelas cuja razão entre a maior e a menor dimensão era maior que 3). Os autores constataram, além disso, que a porcentagem de partículas lamelares foi superior para os

fragmentos de menor tamanho, se comparados aos fragmentos graúdos, como pode ser visto pelo Gráfico 2.

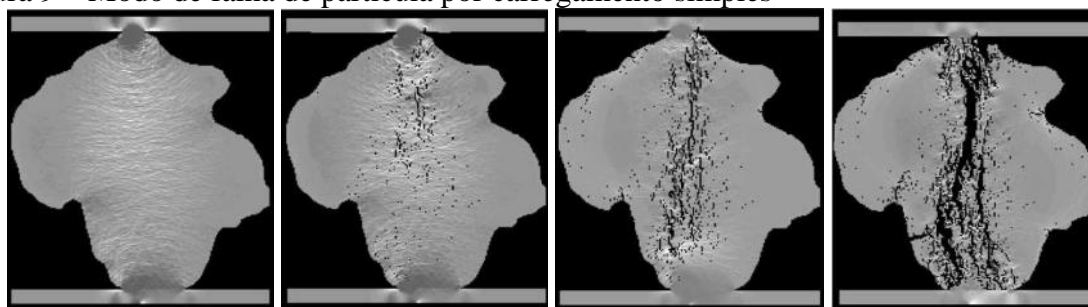
Gráfico 2 – Frequência de partículas lamelares em função do deslocamento do aparelho e do diâmetro da partícula



Fonte: Adaptado de Unland e Szelina (2004).

Tang *et al.* (2001) realizaram uma investigação numérica da fragmentação por carregamento simples de partículas isoladas. As propriedades mecânicas dos elementos do modelo foram descritas estatisticamente por meio da distribuição de Weibull. Segundo os autores, inicialmente, a partícula deforma-se elasticamente, exibindo uma resposta estável e apresentando um campo de tensões assimétrico, devido à condição de carregamento entre as placas e à geometria irregular da partícula. A falha surge entre o ponto de carregamento de uma das placas e o centro da partícula, e o regime elástico finaliza quando tem início uma instabilidade que provoca a quebra da partícula em vários fragmentos. A Figura 9 apresenta o modo de falha de uma partícula submetida a esse tipo de carregamento, determinada pela simulação de Tang *et al.* (2001).

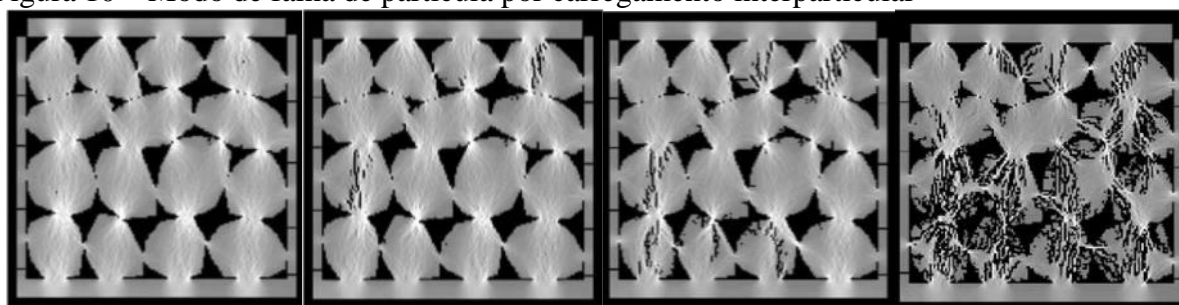
Figura 9 – Modo de falha de partícula por carregamento simples



Fonte: Tang *et al.* (2001).

Como continuação da pesquisa anteriormente citada, Kou *et al.* (2001) realizaram uma investigação numérica da fragmentação interparticular. Os autores verificaram que esse tipo de britagem ocorre em duas etapas. Na primeira, as partículas são rígidas e compõem uma estrutura de comportamento elástico que dissipa pouca energia, impondo deformações locais nas partículas que já entraram na segunda etapa. As partículas da segunda etapa comportam-se como um material frágil e plástico, o qual dissipa energia nos pontos de contato. À medida que o deslocamento imposto aumenta, o material passa por mudanças em sua estrutura, as partículas continuam passando da primeira para a segunda etapa e vão sucessivamente rompendo, tornando a estrutura completa menos resistente ao carregamento. A Figura 10 apresenta o modo de falha de uma partícula submetida a esse tipo de carregamento, determinada pela simulação de Kou *et al.* (2001).

Figura 10 – Modo de falha de partícula por carregamento interparticular



Fonte: Kou *et al.* (2001).

Bouquety *et al.* (2007) analisaram a forma de partículas geradas por britadores cônicos, investigando sua relação com dois parâmetros: a granulometria do material de alimentação e a APF do britador. Os autores concluíram que a APF apresentou influência significativa na forma média de partículas por fração (partículas fracionadas por tamanho), mas na média global, por agregado, essa influência não foi observada, o que foi atribuído a uma compensação que ocorre entre frações. Foi verificado que partículas planas tendem a ser

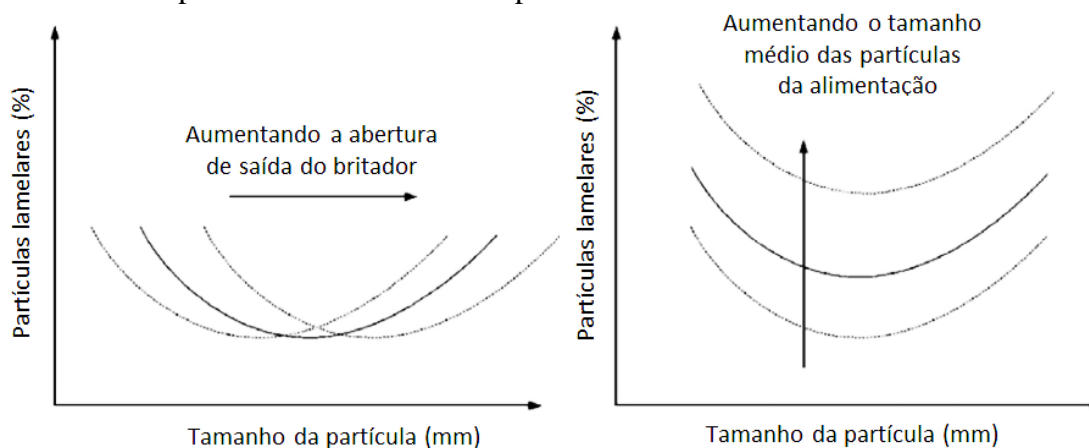
também alongadas, ou seja, a relação entre largura e espessura está relacionada à relação entre comprimento e largura de cada partícula. Os autores sugerem que um entendimento físico do processo de fragmentação poderia explicar esse fato. Além disso, eles observaram que um maior tamanho das partículas do material de alimentação pode provocar a geração de partículas mais planas e alongadas.

Um modelo empírico para previsão da porcentagem em massa de partículas planas geradas por britadores cônicos foi desenvolvido por Bengtsson e Evertsson (2006), com base em três parâmetros: o tamanho da fração, o tamanho médio do material de alimentação e a APF. Pela norma sueca utilizada nesse estudo, partículas são consideradas planas se a razão entre largura e espessura for maior que 2. O modelo é descrito pela Equação 1 e apresenta o comportamento exposto no Gráfico 3. Pode-se notar que à medida que o tamanho da partícula observada aproxima-se da APF do britador, o percentual de partículas lamelares diminui. Quando a APF sofre um aumento, a curva move-se para a direita, de modo que esse tamanho de partícula que mostra um menor percentual de lamelaridade acompanha a APF. Por outro lado, quando o tamanho médio das partículas da alimentação aumenta, todos os tamanhos gerados apresentam um aumento do percentual de partículas lamelares.

$$A(\bar{x}, APF, p) = \frac{0,24}{\bar{x}} \cdot \left(\frac{1,25 \cdot \bar{x} + 20}{APF} \right) \cdot p^2 - \left(\frac{1,25 \cdot \bar{x} + 20}{APF} \right) \cdot p + 1,25 \cdot \bar{x} \quad (1)$$

Onde: A = porcentagem de partículas planas em massa; \bar{x} = tamanho médio das partículas da alimentação e p = tamanho da partícula.

Gráfico 3 – Comportamento do modelo de previsão de lamelaridade



Fonte: Bengtsson e Evertsson (2006).

Rajan e Singh (2017a) investigaram a influência do processo de britagem nas propriedades de forma de partículas graúdas, por meio do AIMS2, utilizando amostras resultantes de duas séries de britagem. A primeira era formada por um britador de mandíbulas, um britador cônico e um britador de impacto de eixo vertical e a segunda, por um britador de mandíbulas e um britador de impacto de eixo horizontal. Os autores verificaram que o segundo processo gerou partículas mais planas e alongadas e com maior textura superficial que o primeiro processos. A menor rugosidade do material foi considerada pelos autores como consequência do impacto e do atrito entre as partículas no britador de impacto de eixo vertical e no britador cônico, respectivamente.

Rajan e Singh (2017b) realizaram um estudo similar ao anterior, mas para agregados miúdos gerados por três tipos de equipamentos: britador de impacto de eixo vertical, britador cônico e britador de impacto de eixo horizontal. Os autores concluíram que o britador de impacto de eixo horizontal produziu as partículas mais angulares e alongadas, seguido do britador cônico e do britador de impacto de eixo vertical, respectivamente. A angularidade medida indiretamente a partir dos vazios não compactados (pelo ensaio tradicional descrito pela AASHTO T304, 2015), apresentou um comportamento oposto à angularidade medida por meio do AIMS2 para o material gerado pelo britador de impacto horizontal. Esses resultados contraditórios foram considerados pelos autores como uma consequência da subjetividade do ensaio tradicional.

2.5 Influência das propriedades de forma dos agregados em diferentes aplicações

Huber *et al.* (1998), quando o programa *Superpave* estava sendo implementado, investigaram o papel da forma e da angularidade de partículas miúdas no comportamento de misturas asfálticas, utilizando o ensaio correspondente ao atual ASTM C1252 (2017). Foram fabricadas misturas asfálticas com quatro tipos de agregados miúdos, com fatores de angularidade *Fine Aggregate Angularity* (FAA) de 48, 46, 42 e 38, mantendo fixos a granulometria e o tipo de agregado graúdo utilizado. A deformação permanente das misturas asfálticas após 8.000 ciclos de carregamento realizados por um simulador de tráfego de laboratório não apresentou correlação com o FAA (R^2 de 0,17), o que os autores atribuíram ao percentual considerado baixo de partículas miúdas nas misturas asfálticas (34% passante na peneira de abertura 2,36 mm), exercendo pouca influência no comportamento geral do compósito. Deve-se ressaltar que a FAA é uma medida indireta, não influenciada apenas pela angularidade, mas também pela forma e pela textura das partículas miúdas, o que pode ter

gerado esse resultado inesperado, por exemplo, pelo aumento desse fator com a lamelaridade das partículas (piorando a resistência das misturas asfálticas).

Foi realizada também, pelos autores supracitados, uma análise da influência da forma de partículas graúdas nas propriedades volumétricas da mistura, com o objetivo de verificar a sensibilidade do compactador giratório *Superpave* e do método *Superpave* de dosagem à forma do agregado graúdo. Essa etapa foi feita por meio da comparação entre misturas asfálticas compostas por dois agregados graúdos distintos, com porcentagem de partículas planas e alongadas (cuja razão entre comprimento e espessura era maior que 3:1) de 19,4 e 9,0%, respectivamente. A porcentagem de partículas com essa razão maior que 5:1 era zero para os dois agregados. Os resultados de massa específica foram semelhantes para as misturas asfálticas comparadas, indicando que o método de dosagem *Superpave* e seu respectivo compactador giratório parecem ser pouco sensíveis a diferenças na forma das partículas graúdas. Observou-se que os autores não consideraram a forma das partículas miúdas nem a angularidade das partículas graúdas, variáveis que podem ter influenciado juntamente com as propriedades medidas, balanceando o comportamento da mistura. Além disso, não se tratou da mineralogia dos agregados utilizados.

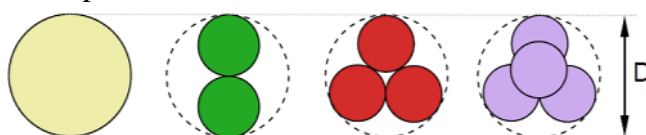
Aho, Vavrik e Carpenter (2001) avaliaram se a quebra de partículas planas e alongadas que ocorre durante a compactação em campo de misturas asfálticas segue a mesma tendência observada em laboratório pelo estudo realizado por Vavrik, Fries e Carpenter (1999). Os autores consideraram a mudança de percentual retido na peneira de número 4 (4,75 mm) como indicador da ocorrência de quebra, e a razão limite entre a maior e a menor dimensão da partícula para ser considerada plana e alongada foi de 3:1. Foi verificado que a espessura da camada de revestimento influenciou mais a quebra de partículas que a porcentagem de partículas planas e alongadas. Em camadas mais espessas de revestimento (espessura maior que quatro vezes o TMN do agregado) e com alta porcentagem de partículas planas e alongadas não ocorreu quebra entre o espalhamento e a compactação da mistura asfáltica, acontecendo essa quebra principalmente entre o local da pedreira e o espalhamento. Os autores concluíram, ainda, que quando o agregado apresenta maior valor de abrasão Los Angeles, a porcentagem de partículas planas e alongadas presentes tem um maior impacto na sua quebra, no sentido de intensificá-la. O compactador giratório de laboratório produziu maior degradação nos agregados que a compactação realizada em campo.

Topal e Sengoz (2005) investigaram o efeito da angularidade do agregado miúdo na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. Para comparar a resistência à deformação permanente das misturas, foi utilizado um simulador de tráfego francês. Para as

quatro misturas asfálticas analisadas, foi utilizado o mesmo tipo de agregado graúdo e de ligante asfáltico, variando apenas o agregado miúdo, sendo a escolha realizada a partir de um conjunto de 30 agregados coletados e caracterizados. A seleção foi feita considerando materiais de mesma mineralogia (calcário) e de angularidades distintas. Os resultados desse estudo mostraram que a deformação permanente das misturas asfálticas apresentou uma tendência de redução com o aumento da angularidade das partículas finas. Os autores ressaltaram a importância de se levar em consideração outras propriedades do agregado miúdo para a análise do comportamento do compósito, como a textura superficial, a absorção e a afinidade com o ligante asfáltico.

Dondi *et al.* (2012) utilizaram a modelagem de elementos discretos para avaliar a influência da angularidade das partículas no comportamento de misturas granulares, por meio do ensaio de compressão triaxial a deformação controlada (taxa de 1 mm/min) e com pressão confinante mantida constante. O estudo foi feito com quatro geometrias de partículas, mostradas na Figura 11, formadas por uma esfera ou por um grupo de esferas. Essas geometrias foram escolhidas, apesar de diferirem bastante daquelas encontradas em agregados reais, por permitirem uma replicação em laboratório para comparar com a simulação computacional, utilizando esferas de aço soldadas a frio. Os autores verificaram que uma maior quantidade de partículas angulares ocasionou o aumento da quantidade de pontos de contato entre os grãos, do seu intertravamento e da uniformidade da distribuição de forças internas, provocando uma melhor interconexão dos elementos da mistura e, conseqüentemente, uma melhor capacidade desta de resistir à deformação permanente.

Figura 11 – Geometrias das partículas utilizadas



Fonte: Dondi *et al.* (2012).

Watson e Julian (2017), por considerarem que a exigência com relação à forma de partículas de agregados utilizados em misturas do tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) pela ASTM M325, que segue critérios europeus, poderia ser mais rigorosa que o necessário, realizaram um estudo para analisar essa hipótese. Foram comparados agregados comuns e agregados produzidos para SMA (mais cúbicos que os primeiros), avaliando a tendência que as partículas apresentavam à quebra, além de avaliarem a resistência à deformação permanente de misturas do tipo SMA compostas por esses agregados. Os autores verificaram

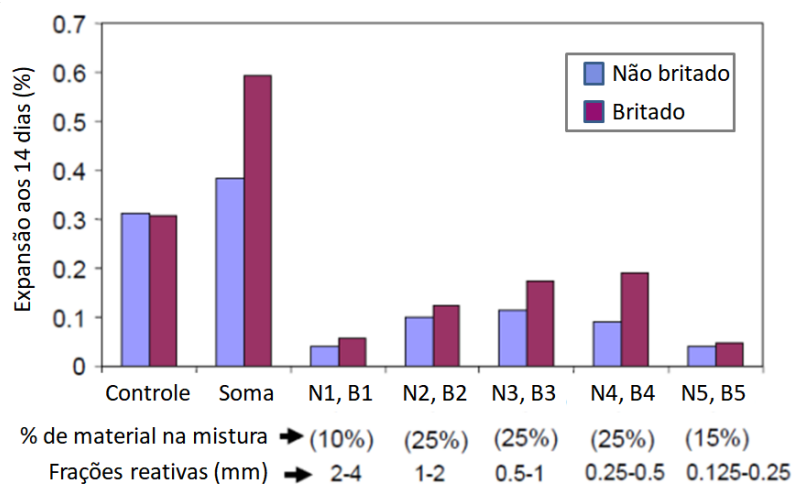
que a susceptibilidade das partículas à quebra não se mostrou relacionada à porcentagem de partículas cuja razão entre comprimento e espessura era maior que 3:1. Por outro lado, misturas compostas por agregados comuns apresentaram valores de resistência à deformação permanente significativamente maiores que aquelas compostas por agregados produzidos para misturas do tipo SMA, ao contrário do esperado. Deve-se ressaltar que a angularidade das partículas, propriedade que não foi analisada nesse estudo, pode ter influenciado os resultados, considerando que agregados gerados por britador cônico para serem menos alongados tendem a ser também menos angulares, podendo prejudicar seu intertravamento (DIÓGENES, 2015).

Aragão, Pazos e Motta (2016) caracterizaram, por meio de métodos tradicionais adotados pelo *Superpave* e por meio do PDI, com uso do AIMS, as propriedades morfológicas de três agregados: um seixo rolado e dois agregados britados gnáissicos de mesma origem, sendo um considerado cúbico e um lamelar, diferenciados pelo processo de britagem. Utilizando combinações desses agregados em diferentes proporções, os autores projetaram seis misturas asfálticas de mesma distribuição granulométrica e analisaram seu comportamento mecânico por meio do módulo dinâmico, do *Flow Number* (FN) (parâmetro do ensaio de deformação permanente) e da tensão de fratura verificada pelo ensaio de tração indireta. Foram encontradas fortes correlações entre as propriedades de forma das partículas e o comportamento da mistura asfáltica, sendo atingido um R^2 de 0,84 para as relações FN *versus* textura e FN *versus* angularidade, medidas pelo AIMS. As propriedades das misturas asfálticas apresentaram correlações mais fortes (chegando a mais de 80% de R^2) com os parâmetros obtidos pelo PDI que com aqueles resultantes dos ensaios tradicionais. Os autores comentaram que a textura superficial dos agregados deveria receber maior atenção e ser cuidadosamente considerada em especificações para misturas asfálticas. Observa-se que houve, nesse estudo, uma dependência entre a textura superficial e a angularidade, considerando que as duas aumentam à medida que se eleva a quantidade de agregado britado na mistura, em relação à de seixo rolado. Não houve, portanto, como detectar a influência de cada uma dessas duas propriedades isoladamente no comportamento mecânico das misturas.

Ramyar, Topal e Andic (2005) estudaram os efeitos da angularidade e do tamanho das partículas de agregado miúdo na reação álcali-sílica em argamassas, fenômeno que provoca indesejável expansão no material. Foram utilizados um agregado natural não britado e um agregado britado (com maior angularidade), sendo os dois reativos e semelhantes entre si com relação à composição mineral, e um agregado britado não reativo (amostra controle). As partículas reativas de tamanhos intermediários (0,25 a 2 mm) mostraram interferir mais

nas reações álcali-sílica que as frações extremas (0,125 mm a 0,25 mm e 2 a 4 mm). Variando apenas as partículas de frações intermediárias (mantendo as outras iguais e não reativas), a argamassa com agregado britado apresentou uma maior expansão que a argamassa com agregado natural com mineralogia semelhante após 14 dias, conforme mostrado no Gráfico 4. A angularidade foi, então, apontada pelos autores como um fator que intensifica a reação álcali-sílica, caso o agregado utilizado já seja reativo.

Gráfico 4 – Expansão do concreto aos 14 dias



Fonte: Ramyar, Topal e Andic (2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Com base em análises realizadas para o desenvolvimento de estudos anteriores (CAVALCANTI; PARAHYBA, 2012), foi efetuada uma identificação prévia dos tipos de rochas exploradas em doze pedreiras localizadas na RMF, conforme mostrado na Tabela 3. Com o intuito de utilizar, na presente pesquisa, agregados oriundos de rochas distintas entre si, foram selecionadas as quatro pedreiras apresentadas na Tabela 4 e na Figura 12. Como algumas análises petrográficas utilizadas nessa investigação preliminar foram realizadas há bastante tempo e os maciços rochosos podem ser bastante heterogêneos, apresentando diferentes características ao longo de sua exploração, foram realizadas, neste trabalho, novas análises para todos os agregados utilizados na pesquisa, conforme está descrito adiante.

Tabela 3 – Tipos de rochas exploradas para produção de agregados na RMF, com base nas análises petrográficas realizadas para o estudo de Cavalcanti e Parahyba (2012)

Pedreira	Localização	Classificação petrográfica	Ano da análise
1	Maracanaú	Biotita gnaisse	1996
2	Maracanaú	Monzogranito	2016
3	Itaitinga	Monzogranito/tectonizado	1996
4	Itaitinga	Monzogranito/tectonizado	1996
5	Itaitinga	Monzogranito/tectonizado	1996
6	Itaitinga	Metassienogranito	2016
7	Itaitinga	Biotita-monzogranito/tectonizado	1996
8	Caucaia	Biotita-granito/tectonizado	1996
9	Caucaia	Biotita-monzogranito/tectonizado	1996
10	Caucaia	Biotita-gnaisse	1996
11	Caucaia	Ortognaisse	2016
12	Eusébio	Nefelina-fonólito	1996

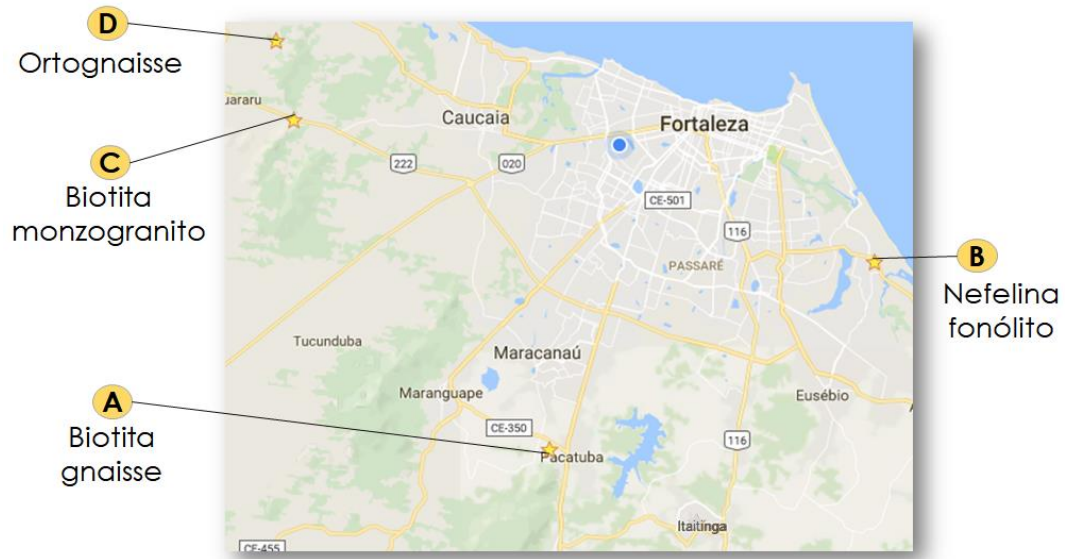
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4 – Origem e classificação preliminar das rochas utilizadas na pesquisa oriundas da RMF, com base nas análises petrográficas realizadas para o estudo de Cavalcanti e Parahyba (2012)

Pedreira	Localização	Classificação petrográfica	Ano da análise
A	Maracanaú	Biotita gnaisse	1996
B	Eusébio	Nefelina-fonólito	1996
C	Caucaia	Biotita-monzogranito/tectonizado	1996
D	Caucaia	Ortognaisse	2016

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – Localização e classificação da rocha das pedreiras com base em análises petrográficas anteriores ao presente trabalho

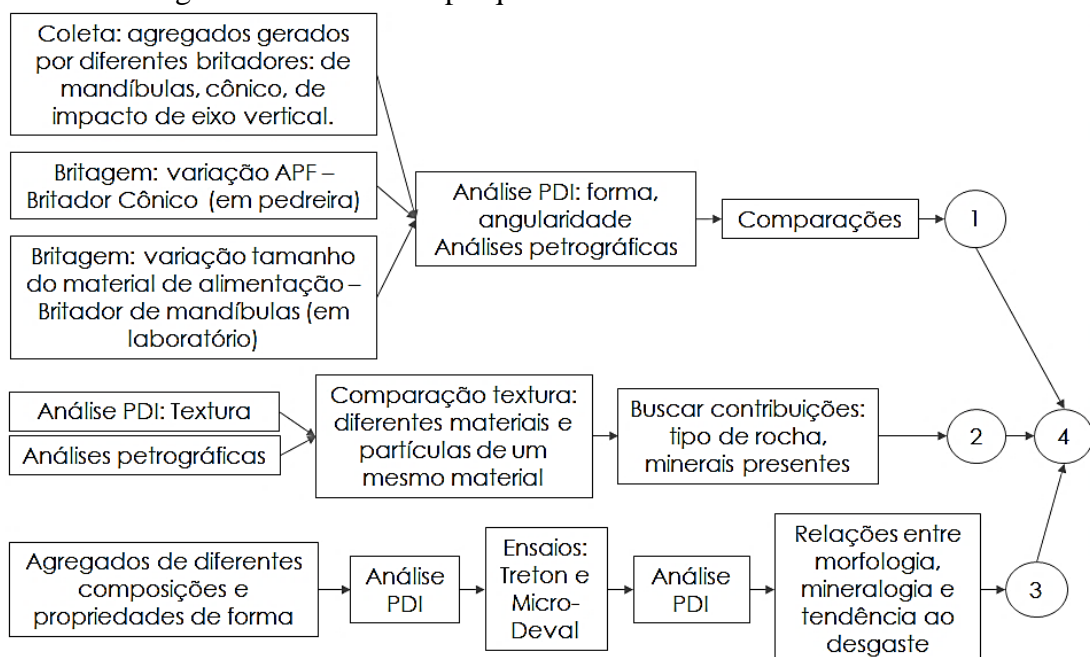


Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Métodos

O fluxograma apresentado na Figura 13 mostra uma visão geral das etapas metodológicas realizadas para atingir cada objetivo específico da presente pesquisa, indicados pelos números à direita. Nos tópicos seguintes, estão descritos com detalhes os métodos utilizados.

Figura 13 – Fluxograma do método de pesquisa

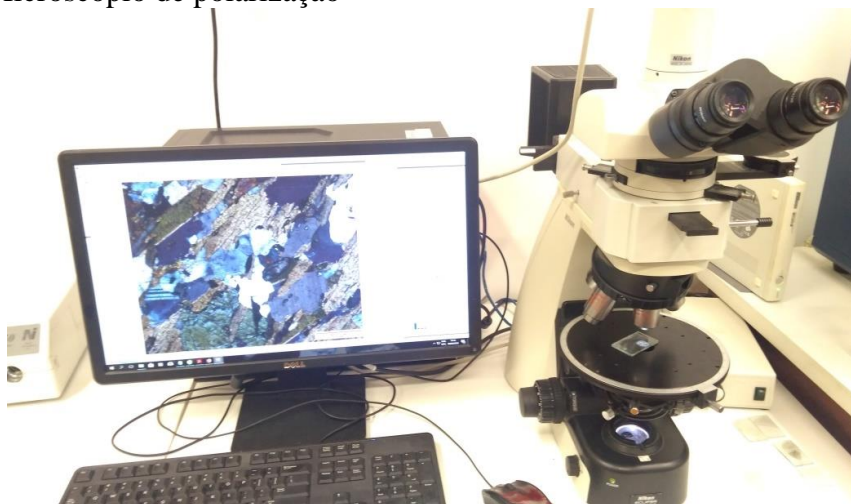


Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.1 Análise petrográfica das rochas

A análise petrográfica foi realizada em amostras de rocha das quatro pedreiras (Tabela 4), a fim de identificar suas características mineralógicas. Os parâmetros analisados foram: composição mineralógica, tamanho dos cristais, relações de contato entre eles e grau de alteração mineral. Essa etapa foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC), utilizando o microscópio de polarização Nikon Eclipse Ci-POL (Figura 14). De cada pedreira, foram selecionadas algumas amostras de fragmentos de rocha que abrangessem, da melhor forma possível, todas as composições presentes no agregado, considerando, por um lado, a heterogeneidade de cada agregado e, por outro, as limitações de uso do equipamento. Foram escolhidas, assim, quatro amostras da Pedreira 1, uma da Pedreira 2, três da Pedreira 3 e três da Pedreira 4, sendo confeccionada uma lâmina de cada amostra. Para realizar a classificação das rochas quanto aos parâmetros analisados foram utilizados os critérios adotados por Silva (2016), conforme descritos a seguir.

Figura 14 – Microscópio de polarização



Fonte: Elaborado pela autora.

As rochas foram classificadas quanto à granulação de acordo com os grupos:

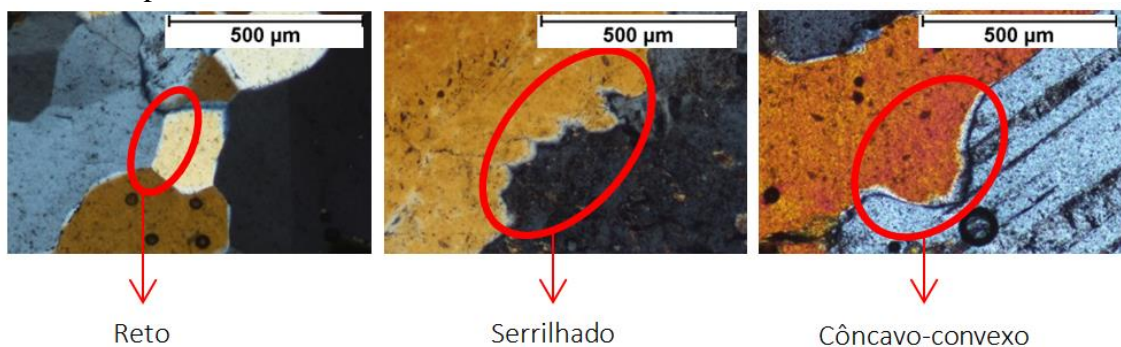
- a) Densa: diâmetro predominante dos cristais inferior a 0,5 mm;
- b) Fina: diâmetro predominante dos cristais entre 0,5 e 1,0 mm;
- c) Média-fina: diâmetro predominante dos cristais entre 1 e 3 mm;
- d) Média: diâmetro predominante dos cristais entre 3 e 7 mm;
- e) Média-grossa: diâmetro predominante dos cristais entre 7 e 10 mm.

As rochas foram classificadas, de acordo com o tamanho relativo entre cristais, em:

- a) equigranulares: quando os grãos minerais apresentam tamanhos que variam dentro de uma faixa estreita;
- b) inequigranulares: quando a razão entre dimensões dos grãos minerais vai até 1:10 e os grãos maiores não se sobressaem aos menores;
- c) porfíricas: quando estão presentes megacristais de dimensões de no mínimo cinco vezes a média dos grãos da matriz, sobressaindo-se visivelmente a estes.

Os contatos entre minerais foram classificados, qualitativamente, em três tipos básicos: plano ou reto, côncavo-convexo e serrilhado, como exemplificado na Figura 15.

Figura 15 – Tipos de contatos entre os minerais



Fonte: Elaborado pela autora.

Para avaliar a intensidade de alteração dos minerais, foi adotada a seguinte classificação:

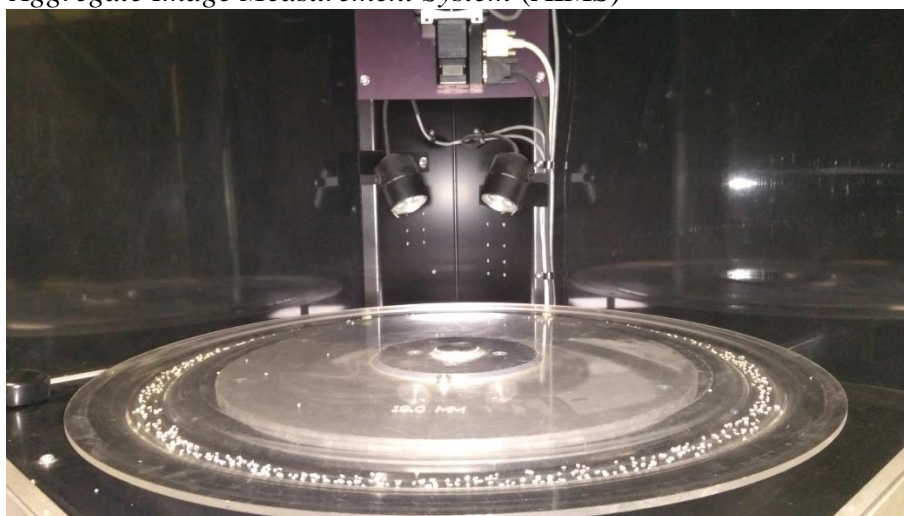
- a) Intenso: maior que 60%;
- b) Moderado: de 30 a 60%;
- c) Incipiente: de 10 a 30%;
- d) Muito incipiente: de 5 a 10%;
- e) Ausente: até 5%.

3.2.2 Caracterização dos agregados com relação às propriedades de forma

A caracterização das propriedades de forma dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizada por meio do PDI, fazendo uso do sistema AIMS2 do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) da UFC, mostrado na Figura 16. Os principais elementos

do sistema são: câmera, dois tipos de iluminação (luz de fundo e luz superior), bandejas e *software*. Para agregados graúdos, o sistema fornece parâmetros de forma (esfericidade, baseada nas três dimensões da partícula), de angularidade (baseado em duas dimensões capturadas por uma imagem em preto e branco) e de textura superficial (baseado em uma imagem em escala de cinza). Já para partículas miúdas, são medidos parâmetros de forma (forma 2D) e de angularidade.

Figura 16 – *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*



Fonte: Elaborado pela autora.

O procedimento de utilização do AIMS2 pode ser dividido em duas etapas: preparação das amostras e análise. Para ser analisado por meio do AIMS, cada material foi quartado e peneirado segundo as frações e quantidades mínimas de partículas apresentadas na Tabela 5. Em seguida, cada fração foi lavada, seca em estufa e guardada em saco ou recipiente que não permitisse a entrada de poeira.

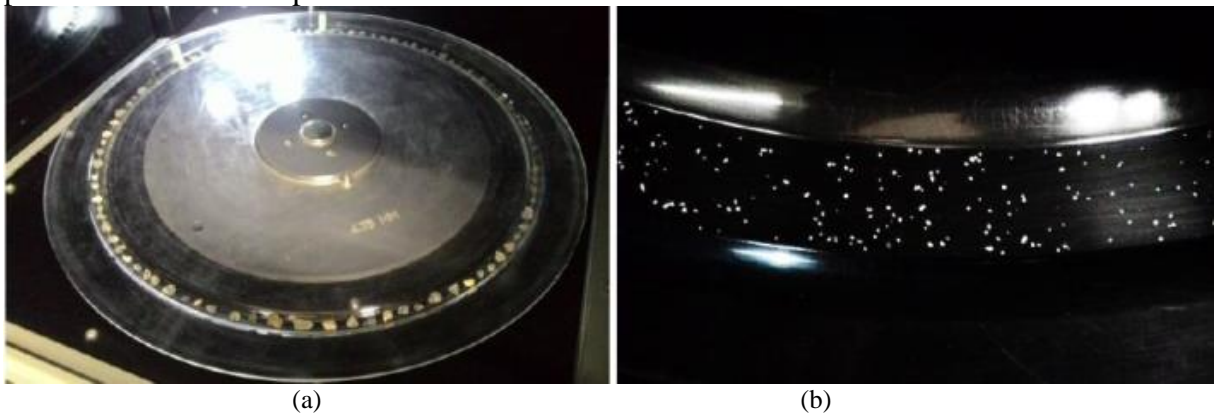
Tabela 5 – Frações e quantidade de partículas analisadas por meio do AIMS

Número da peneira ou pol.	Abertura da peneira (mm)	Graúdo (G) ou Miúdo (M)	Quantidade mínima de partículas retidas analisadas
¾	19,0		
½	12,5		
3/8	9,5	G	50
4	4,75		
8	2,36		
16	1,18		
30	0,6		
50	0,3	M	150
100	0,15		
200	0,075		

Fonte: Elaborado pela autora.

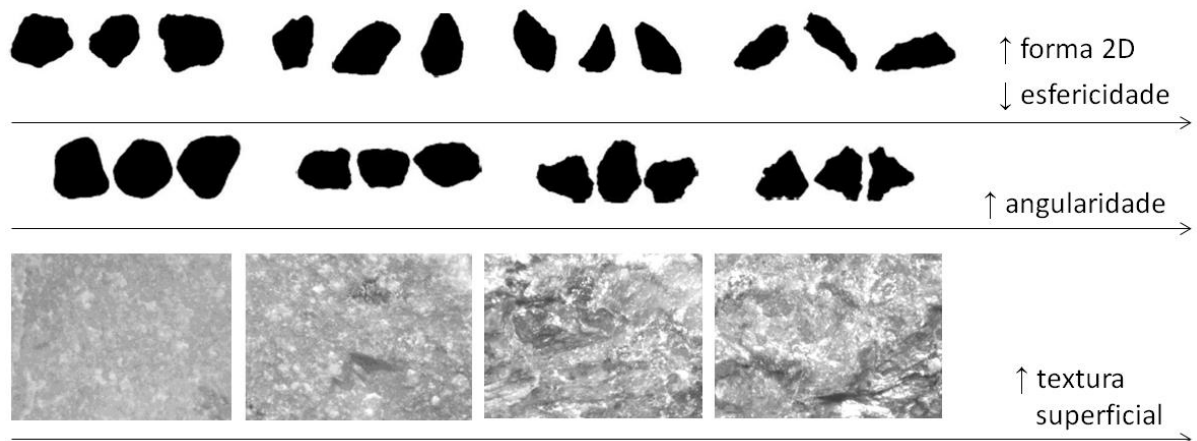
A etapa da análise inicia-se com a distribuição das partículas da fração a ser avaliada na bandeja adequada ao seu tamanho (Figura 17). Para partículas graúdas, o equipamento realiza três giros na bandeja: o primeiro para capturar imagens em preto e branco que possibilitam o cálculo de duas dimensões e da angularidade das partículas, o segundo para calcular sua terceira dimensão (altura) e o terceiro para capturar imagens em escala de cinza utilizadas para o cálculo dos valores de textura superficial. Quando a fração analisada é de partículas miúdas, apenas o primeiro giro é realizado, sendo medidas a forma 2D e a angularidade. A Figura 18 apresenta exemplos da variação dos parâmetros medidos pelo AIMS2 para diferentes imagens de partículas.

Figura 17 – Disposição de agregados graúdos (a) e miúdos (b) nas bandejas correspondentes para serem analisados por meio do AIMS



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – Exemplos da variação dos parâmetros de forma de acordo com o AIMS



Fonte: Elaborado pela autora.

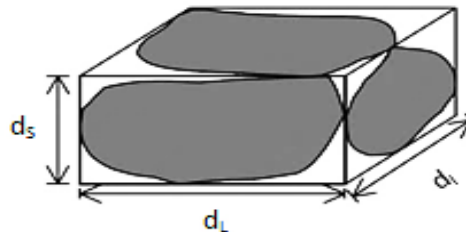
3.2.2.1 Cálculo dos parâmetros das propriedades de forma

O cálculo dos parâmetros de caracterização das propriedades de forma, descritos a seguir, são realizados automaticamente pelo *software* do próprio equipamento. A esfericidade corresponde a uma relação entre as três dimensões da partícula, ou seja, descreve de maneira simplificada sua forma tridimensional, conforme mostra a Figura 19. Seu valor pode variar de 0,0 a 1,0, sendo maior para partículas mais cúbicas (com três dimensões próximas entre si). Calcula-se essa propriedade pela Equação 2, utilizada pelo AIMS2 apenas para agregados graúdos.

$$Esfericidade = \sqrt[3]{\frac{d_s d_l}{d_L^2}} \quad (2)$$

Onde: d_s = menor dimensão; d_l = dimensão intermediária e d_L = maior dimensão da partícula.

Figura 19 – Três dimensões de uma partícula para o cálculo da esfericidade



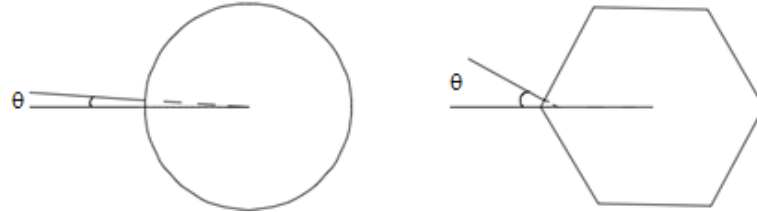
Fonte: Masad *et al.* (2005).

O parâmetro de angularidade, utilizado para agregados graúdos e miúdos, é medido por meio do método do gradiente, que quantifica as alterações de direção existentes ao longo do contorno da partícula, conforme representado na Figura 20. Esse parâmetro, calculado pela Equação 3, varia de 0 a 10.000, assumindo maiores valores para agregados mais angulares.

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

Onde: θ = ângulo de orientação dos pontos do contorno; n = número total de pontos e i = i -ésimo ponto do contorno da partícula.

Figura 20 – Ângulos de orientação dos pontos do contorno da partícula para cálculo da angularidade



Fonte: Adaptado de Masad *et al.* (2005).

A textura superficial, aplicada pelo AIMS2 apenas a agregados graúdos, mensura a rugosidade da superfície da partícula e é calculada pelo método das *wavelets*, pelo qual se quantificam as variações nos níveis de *pixels* da imagem (BESSA, 2012). Seu valor, calculado pela Equação 4, pode variar de 0 a 1.000, aumentando à medida que a superfície do agregado torna-se mais rugosa.

$$Textura\ Superficial_n = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x, y))^2 \quad (4)$$

Onde: n = nível de decomposição da imagem; N = número de coeficientes em uma imagem detalhada; D = função de decomposição; i = direção da textura (1, 2 ou 3); j = índice *wavelet* e x,y = localização dos coeficientes no domínio transformado.

A forma 2D determina se uma partícula de agregado miúdo é mais ou menos alongada, considerando apenas as duas dimensões obtidas a partir da imagem capturada. Seu valor, calculado pela Equação 5, varia de 0 a 20, crescendo à medida que se eleva o alongamento da partícula.

$$Forma\ 2D = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[\frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (5)$$

Onde: R_{θ} = raio da partícula no ângulo 0° e $\Delta\theta$ = variação de incremento no ângulo.

A partir das três dimensões das partículas graúdas obtidas por meio do AIMS, podem ser analisados, também, o achatamento e o alongamento dos agregados graúdos. O achatamento de uma partícula é obtido pela razão entre a menor dimensão (espessura) e a dimensão intermediária (largura), enquanto o alongamento é a relação entre a dimensão intermediária e a maior dimensão (comprimento).

3.2.2.2 Classificação dos agregados com relação às propriedades de forma

A partir dos resultados de propriedades de forma obtidos por meio do AIMS, foi utilizado o sistema desenvolvido por Al-Rousan (2004) para classificar as partículas de cada agregado. Esse sistema foi desenvolvido com base em um banco de dados de treze agregados graúdos e cinco agregados miúdos, oriundos de diferentes fontes dos Estados Unidos, com diferentes mineralogias, tamanhos e propriedades de forma. A Tabela 6 apresenta os valores-limite que determinam cada classe desse sistema.

Tabela 6 – Valores-limite da classificação de Al-Rousan (2004).

Propriedade	Valores-limite				
	Forma 2D	< 6,5 Circular	6,5 – 8,0 Semicircular	8,0 – 10,5 Semialongado	> 10,5 Alongado
Angularidade	< 2.100 Arredondado	2.100 – 4.000 Subarredondado	4.000 – 5.400 Subangular	> 5.400 Angular	-
Esfericidade	< 0,6 Achatado / Alongado	0,6 – 0,7 Baixa Esfericidade	0,7 – 0,8 Esfericidade Moderada	> 0,8 Alta Esfericidade	-
Textura Superficial	< 165 Polido	165 – 275 Macio	275 – 350 Baixa Rugosidade	350 – 460 Rugosidade moderada	> 460 Alta Rugosidade

Fonte: Al-Rousan (2004).

3.2.3 Comparação entre forma e angularidade de diferentes agregados

A fim de contribuir para a investigação da influência do processo de britagem nas propriedades de forma das partículas de agregado, foram avaliados materiais britados por tipos distintos de britadores, e pelo mesmo britador com variação de alguns parâmetros. Os tópicos a seguir descrevem os métodos utilizados para a obtenção de amostras utilizadas nesta etapa da pesquisa.

3.2.3.1 Britadores utilizados

Foram coletados agregados que, no último estágio de seu processo de cominuição, tenham passado por britadores de tipos distintos: britador cônico, britador de impacto, britador de mandíbulas de pedra e britador de mandíbulas de laboratório, como pode ser observado pela Tabela 7. O agregado A-ML corresponde ao agregado A-C após ter sido submetido a um estágio de britagem adicional, com o uso de um britador de mandíbulas de laboratório, realizada no Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC). Foram

comparados parâmetros de forma (esfericidade para frações graúdas e forma 2D para frações miúdas) e de angularidade entre os diferentes agregados, a fim de relacioná-los aos mecanismos de fragmentação utilizados pelos britadores correspondentes. A Figura 21 mostra o britador de laboratório utilizado.

Tabela 7 – Agregados utilizados para a comparação entre os tipos de britagem

Agregado	Origem	Britador
A-C	Pedreira A	Cônico
B-I	Pedreira B	Impacto
B-M	Pedreira B	Mandíbulas
A-ML	Pedreira A	Mandíbulas – Laboratório
C-C	Pedreira C	Cônico
D-C	Pedreira D	Cônico
E-C	Pedreira E	Cônico

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 21 – Britador de mandíbulas de laboratório do NUTEC



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3.2 Britador cônico com variação da APF (em pedreira)

Em uma britagem controlada, em pedreira, mantendo constante o tamanho do material de alimentação, a APF do britador foi ajustada em dois diferentes valores (30 e 35 mm), sendo coletada uma amostra de material resultante de cada ajuste. Os agregados gerados foram coletados diretamente da esteira de saída do britador, para evitar que houvesse mistura com qualquer outro material. Esta etapa foi realizada utilizando o britador cônico (*Hydrocone H-3.000*) da pedreira A.

As aberturas (APF) foram definidas de acordo com a disponibilidade e as limitações da pedreira que possibilitou a realização desta etapa em escala real. Além disso, baseou-se no relato dos operadores da empresa de que a diferença do primeiro para o segundo

ajuste, vistos na Tabela 8, já teria impacto na forma das partículas resultantes. A Tabela 8 mostra também a pressão de esmagamento marcada no painel de controle do britador, que, como pode ser visto, foi reduzida à metade quando se abriu a APF de 30 para 35 mm. Os parâmetros de forma e de angularidade foram comparados entre os materiais, e foi verificado se houve diferenças significativas entre suas médias amostrais, por meio de teste de hipóteses para comparação de médias (utilizando nível de significância α de 5%).

Tabela 8 – Ajustes de APF utilizados no britador cônico em escala real

Ajuste	APF (mm)	Pressão de esmagamento (psi)
1	30	18
2	35	9

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.3.3 *Britador de mandíbulas com variação do material de alimentação (em laboratório)*

Em laboratório, utilizando um britador de mandíbulas de pequeno porte, foram realizadas duas britagens, nas quais foram mantidos fixos os ajustes do equipamento (APF igual a 10 mm) e foi variado o tamanho das partículas do material de alimentação, a fim de verificar sua influência na forma e na angularidade dos agregados resultantes. O agregado usado como material de alimentação foi o A-C. Os materiais resultantes foram novamente caracterizados por meio do PDI, a fim de investigar possíveis mudanças nas suas propriedades de forma e de angularidade.

3.2.3.4 *Diferentes composições mineralógicas presentes em cada agregado*

Nesta etapa, foi comparada a forma e a angularidade entre os subgrupos classificados como diferentes tipos de rocha oriundos de uma mesma pedreira. Essa divisão foi realizada com base na análise petrográfica, buscando categorizar cada partícula de uma amostra de agregados com relação ao tipo de rocha e à predominância de minerais. Pôde-se analisar, portanto, a influência da mineralogia, mantendo constante o tipo de britagem realizada, pois as comparações foram realizadas apenas entre frações do mesmo material.

3.2.4 *Investigação da textura superficial*

Das três propriedades de forma, a textura superficial é a que, frequentemente, apresenta a maior variação entre os agregados oriundos da RMF e a maior dispersão dentro de

cada amostra. Ela está relacionada, principalmente, ao tipo de rocha que origina cada material (BESSA, 2012; DIÓGENES, 2015). Na tentativa de compreender as razões dessa alta variabilidade e as relações entre a rugosidade e as características petrográficas da rocha, foram realizadas as etapas descritas a seguir, utilizando os materiais apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Agregados utilizados para a investigação da textura superficial

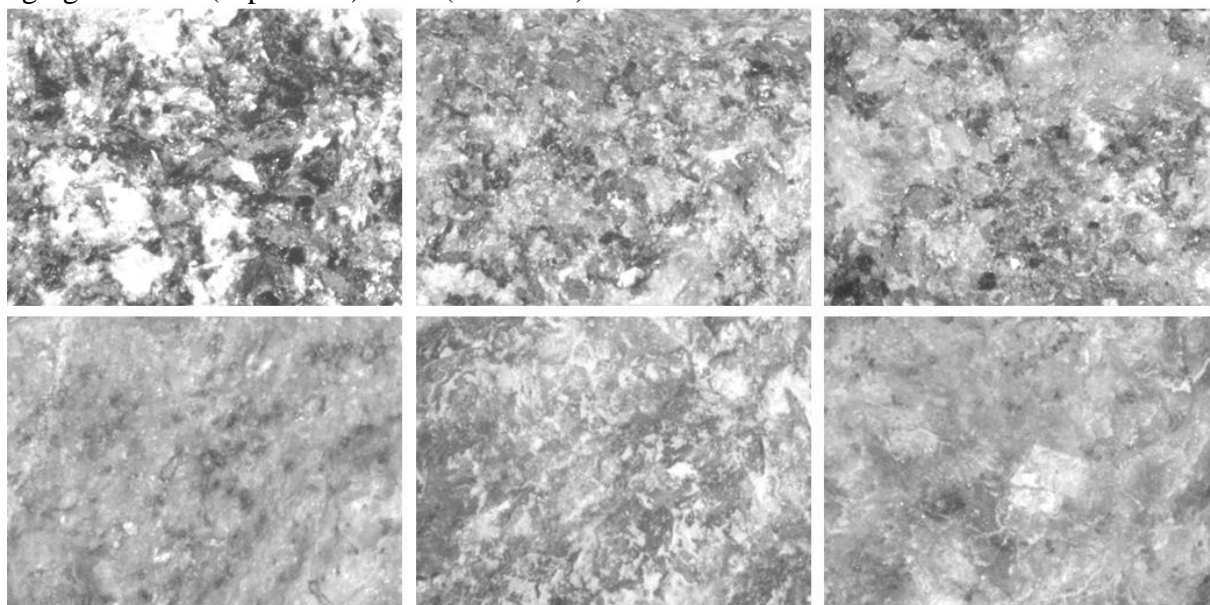
Agregado	Origem
A-C	Pedreira A
B-I	Pedreira B
C-C	Pedreira C
D-C	Pedreira D

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.4.1 *Variação entre agregados de diferentes origens*

A partir da análise petrográfica de cada agregado, foram analisados os resultados de granulação dos minerais da rocha e de tamanho relativo dos minerais, a fim de relacioná-los aos valores de textura superficial resultantes do PDI, realizando comparações entre os diferentes materiais. A Figura 22 mostra exemplos das imagens capturadas pelo AIMS2 para o cálculo da textura superficial de partículas dos agregados A-C (gnaisse) e B-I (fonólito).

Figura 22 – Imagens capturadas para o cálculo da textura superficial de partículas dos agregados A-C (superiores) e B-I (inferiores) com o uso do AIMS



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.4.2 *Variação entre partículas do mesmo agregado*

Diante da constatação dos altos valores de dispersão de textura superficial (chegando a mais de 70% em algumas frações) dentro de cada amostra, se comparados àqueles das outras propriedades de forma, foram realizadas, além de comparações entre os diferentes agregados, comparações entre as partículas de um mesmo material. Alguns maciços rochosos são bastante heterogêneos, tendo sua composição mineralógica e, até mesmo, a classificação da rocha modificada à medida que avança sua exploração. Foram avaliadas, dessa forma, as diferenças de composição mineralógica entre esses grupos de partículas, assim como de textura superficial medida por meio do PDI, a fim de contribuir com o conhecimento sobre as relações entre essas duas características, considerando a dificuldade de acesso a métodos de caracterização de textura superficial.

3.2.5 *Análise da resistência à degradação*

A análise da resistência de agregados à degradação foi realizada a fim de avaliar a influência das propriedades de forma, da mineralogia e das características da rocha de origem na quebra, na abrasão e no polimento das partículas. Foram utilizados, nesta etapa, os materiais listados na Tabela 10 e os procedimentos descritos a seguir.

Tabela 10 – Agregados utilizados para a investigação da resistência à degradação

Agregado	Origem	Britador
A-C	Pedreira A	Cônico (C)
B-I	Pedreira B	Impacto (I)
B-M	Pedreira B	Mandíbulas (M)
C-C	Pedreira C	Cônico (C)
D-C	Pedreira D	Cônico (C)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.5.1 *Resistência ao choque – Treton*

O procedimento descrito pelo Anexo E da norma ABNT NBR 5564 (2011) – Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio – foi utilizado com o intuito de avaliar a tendência das partículas à quebra quando submetidas ao choque. O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) da UFC. Nesse ensaio, realizado com o uso do aparelho *Treton* (visto na Figura 23), um corpo de prova formado por 20 partículas passantes na peneira de 19 mm e retidos na de 16 mm, sofre dez choques

provocados pela queda livre por 380 mm de uma carga de 16 kg. O resultado do ensaio é dado pela porcentagem de massa retida na peneira de 1,68 mm, após o ensaio, em relação à massa inicial. O procedimento é realizado três vezes, sendo calculada a média das medidas.

Além do procedimento descrito pela norma, foi avaliada a granulometria do material após o procedimento, a fim de controlar não somente a massa de material quebrado fino o suficiente para passar na peneira de 1,68 mm, mas também a quantidade de material que tenha sofrido quebra em outros níveis. Por exemplo, um parâmetro de comparação foi o percentual de partículas que não foram consideravelmente quebradas ou desgastadas, ou seja, que não tiveram seu tamanho alterado a ponto de passarem pela peneira que inicialmente as retinha (16 mm), ou que tenham passado a ser retidas na peneira imediatamente inferior (12,5 mm). Cada amostra foi analisada com relação às propriedades de forma por meio do PDI, antes e depois do ensaio, para que se verificassem as alterações de forma, de angularidade e de textura, realizando-se, assim, inferências sobre os fenômenos de quebra, de abrasão e de polimento ocorridos.

Figura 23 – Aparelho *Treton*



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.5.2 Resistência ao desgaste (abrasão e polimento) – *Micro-Deval*

Foi utilizado o equipamento *Micro-Deval* do Departamento de Engenharia de Transportes (DET) da UFC. O procedimento de utilização do equipamento (apresentado na Figura 24) não é regulamentado, atualmente, por norma brasileira. Existem normas

estrangeiras que o descrevem, como a ASTM D6928 (ASTM, 2017). Essa norma foi utilizada como base nesta etapa do estudo, realizando-se adaptações para adequar o procedimento aos objetivos da pesquisa. Como se desejava ter um controle completo do comportamento do material após o desgaste, ou seja, determinar o quanto da amostra inicial transformou-se em partículas de cada tamanho, optou-se por utilizar as adaptações metodológicas definidas por Mahmoud e Ortiz (2014), pelas quais a amostra inicial é composta por apenas uma fração do agregado. Considerando que esses autores concluíram que, no máximo após 210 minutos de ensaio, o material atinge seu estado terminal de degradação, não sofrendo mais alterações significativas de textura superficial, escolheu-se utilizar esse tempo como duração máxima do procedimento. Seguiram-se, dessa forma, os passos apresentados a seguir:

- a) Três amostras de cada material foram formadas, cada uma de 750 g, por partículas passantes na peneira de 12,5 mm e retidas na peneira de 9,5 mm;
- b) As amostras foram analisadas com relação à forma, à angularidade e à textura superficial por meio do PDI;
- c) O tambor do Micro-Deval foi preenchido com as amostras, uma por vez, com 5 kg de esferas de aço de 9,5 mm de diâmetro e com 2 litros de água e deixado em repouso por 60 minutos;
- d) O tambor foi submetido ao desgaste por 105 minutos, em seguida por 180 minutos com a segunda amostra e por 210 minutos com a terceira amostra;
- e) Após o término do desgaste, a amostra foi lavada na peneira de nº. 16 (abertura de 1,18 mm), teve as esferas removidas e foi seca em estufa e pesada;
- f) Em seguida, o material foi fracionado de acordo com as peneiras citadas na Tabela 5 cada fração foi pesada e as partículas graúdas (retidas na peneira de 4,75 mm e na peneira de 9,5 mm) foram reanalisadas, por meio do PDI, com relação às propriedades de forma.

Figura 24 – Micro-deval



Fonte: Gilson Company, Inc. (2017).

3.2.6 Elaboração de diagramas de auxílio à produção e à seleção de agregados

A partir dos resultados obtidos nas etapas anteriores, foram construídos diagramas com o intuito de auxiliar a tomada de decisões na produção e na seleção de agregados para uso na Engenharia Civil: o primeiro identifica as principais relações constatadas entre tipo de britador, parâmetros de britagem e propriedades de forma, o segundo identifica as principais relações entre mineralogia, propriedades de forma e resistência ao choque e ao desgaste e o terceiro relaciona essas informações com algumas características que podem ser requeridas para os agregados em algumas aplicações, exemplificando-as.

4 RESULTADOS

4.1 Análises petrográficas

As Tabelas de 11 a 14, apresentadas a seguir, mostram os resultados obtidos a partir das análises petrográficas de cada rocha. Para os agregados oriundos das Pedreiras A, C e D, foram identificados mais de um tipo de rocha presentes, sendo necessária a realização de análises em várias lâminas, enquanto a Pedreira B mostrou ter uma rocha mais homogênea, sendo necessária apenas uma lâmina para sua caracterização. De cada lâmina, foram identificados os minerais presentes com seus percentuais aproximados na amostra; os tamanhos dos grãos dos minerais predominantes (sendo possível determinar a classificação da rocha com relação à granulação e ao tamanho relativo entre grãos); os graus de alteração dos minerais predominantes e as formas dos contatos entre os grãos. No Apêndice A, podem ser observadas as fotomicrografias das lâminas oriundas de cada rocha analisada.

As rochas das pedreiras A, C e D mostraram ter classificações e composições minerais próximas entre si, com predominância de granitos e gnaisses, mas com algumas variações entre as porcentagens dos minerais. A rocha da pedreira B foi classificada como um fonólito. A partir da análise de cada lâmina, foi realizada uma separação manual entre as partículas de uma amostra de agregado oriundo de cada pedreira, fazendo uma correspondência com cada lâmina analisada, a fim de se obter as porcentagens (tanto de tipos de rocha como de minerais) mais próximas das realmente presentes nos agregados.

O agregado da Pedreira A (Tabela 11) é constituído de quatro frações: biotita-gnaiss, gnaiss, granito e pegmatito, sendo predominante o gnaiss (56%), seguido do granito (30%). Caracteriza-se pela alta quantidade de biotita, mineral que apresenta clivagem perfeita em uma direção, ocorrendo na forma de massas lamelares ou pequenas escamas (Tabela 2). Os outros minerais predominantes são plagioclásio, quartzo e feldspato potássico. Foi observada a presença de textura mirmequítica, que, como visto no tópico 2.2.2, é considerado um fator que pode contribuir para a ocorrência de reação álcali-agregado em concretos. A alteração mineral foi classificada variando de muito incipiente a incipiente nos minerais predominantes, com exceção do quartzo, com alteração ausente.

Tabela 11 – Resultados da análise petrográfica – Pedreira A

Mineralogia e outras características					
Lâmina	1	2	3	4	
Classificação	Biotita-gnaissse	Gnaissse	Granito	Pegmatito (granito)	
Proporção na amostra	6,0	56,0	30,0	8,0	
Minerais (%)	Biotita	30	25	6	< 1
	Anfibólio	5	-	-	-
	Plagioclásio	30	30	28	< 1
	Quartzo	10	15	38	8
	Feldspato potássico	10	22	18	90
	Titanita	3	1	-	-
	Apatita	2	2	-	-
	Zircão	1	1	-	-
	Muscovita	-	1	5	< 1
	Calcita	1	2	2,5	-
	Epidoto	5	-	-	-
	Sericita	-	-	-	< 1
	Opacos	3	1	2,5	< 1
Granulação predominante (mm)	Plagioclásio	0,3 a > 2,5	0,7 a 1,4	1,1 a 1,6	-
	Feldspato potássico	0,9 a 2	0,9 a 2 Poucos > 3	0,5 a 1,2	-
	Quartzo	0,25 a 1,3	0,2 a 1	1,4 a 0,9	-
	Biotita	2,5 a 1,2	0,6 a 1,3	-	-
Granulação	Fina	Fina	Fina	Média-grossa	
Tamanho relativo entre cristais	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	-	
Alteração	Biotita	Incipiente	Incipiente	-	-
	Plagioclásio	Muito incipiente	Incipiente	Incipiente	-
	Quartzo:	Ausente	Ausente	Ausente	-
	Feldspato potássico	Muito incipiente	Muito incipiente	Incipiente	-
Contatos (%)	Reto	25	10	65	-
	Côncavo-convexo	60	50	10	-
	Serrilhado	15	40	25	-
Observações	Presença de textura mirmequítica. Presença de fraturas internas.	Biotitas bastante escuras (ricas em ferro). Cristais de feldspato apresentam muitas fraturas internas.	Presença de minerais carbonáticos (calcita) pode reduzir resistência.	Grande cristal de microclina (feldspato potássico) com formação de cristais intragranulares: quartzo, muscovita, opacos, sericita.	

Fonte: Elaborado pela autora.

O agregado da Pedreira B (Tabela 12) é um fonólito composto em aproximadamente 80% por uma matriz de biotita, anfibólio, álcalis-feldspatos, piroxênio e calcita, e em 20% pelos fenocristais (de dimensões bem maiores que as dos minerais da matriz): nefelina, sanidina e olivina. Foi observado um nível de alteração mineral próximo a 30%, limite superior da classe incipiente, com alteração dos minerais da matriz para argilas (a pequena dimensão dos minerais na matriz facilita o processo de alteração) e dos álcalis-feldspatos para argilas. Devido ao tipo de textura da rocha (a maioria dos grãos extremamente

pequenos, entre 0,02 e 0,05 mm), não foi possível determinar os percentuais de cada mineral e as porcentagens dos tipos de contatos entre minerais.

Tabela 12 – Resultados da análise petrográfica – Pedreira B

Mineralogia e outras características			
Lâmina	1		
Classificação	Fonólito		
Minerais (matriz / fenocristal e %)	Nefelina	Fenocristal	20%
	Sanidina (feldspato potássico)	Fenocristal	
	Olivina	Fenocristal	
	Biotita	Matriz	80%
	Anfibólio	Matriz	
	Álcalis-feldspatos	Matriz	
	Piroxênio	Matriz	
Calcita	Matriz		
Granulação predominante (mm)	Matriz: Maioria: 0,02 a 0,05; os maiores chegam a 0,1 mm Fenocristais: 0,2 a > 2,3		
Granulação	Densa		
Tamanho relativo entre cristais	Porfírica		
Alteração	Incipiente (próximo a 30%)		
Observações	Matriz muito fina alterada (alteração para argilas). Alteração dos álcalis-feldspatos para calcitas.		

Fonte: Elaborado pela autora.

O material oriundo da Pedreira C (Tabela 13) apresenta-se quase na sua metade como um gnaiss (48,6%), mostrando também frações de biotita-gnaiss, granito e pegmatito. Na lâmina de número três, foi identificado o gnaiss com um veio pegmatítico, portanto, sua análise foi dividida em duas, como pode ser visto na tabela: 3G (gnaiss) e 3P (pegmatito). Os minerais predominantes foram: biotita, anfibólio, plagioclásio, quartzo e feldspato potássico, com níveis de alteração, geralmente, entre muito incipiente e incipiente, chegando a moderado para o plagioclásio e mantendo-se ausente para o quartzo. Nesse material, foi observada textura mirmequítica, textura pertítica e sericitização (substituição de feldspatos alcalinos por sericita, ou seja, muscovita de granulação fina).

Tabela 13 – Resultados da análise petrográfica – Pedreira C

Mineralogia e outras características					
Lâmina	1	2	3G	3P	
Classificação	Biotita-gnaisse	Granito	Gnaisse	Pegmatito	
Proporção na amostra	16,2	27,7	48,6	7,5	
Minerais (%)	Biotita	27	7	8	< 1
	Anfibólio	22			
	Plagioclásio	15	28	26	30
	Quartzo	8	48	31	20
	Feldspato potássico	16	17	31	47
	Titanita	5	-	-	-
	Apatita	5	-	-	-
	Piroxênio	2	-	-	-
	Zircão	-	< 1	< 1	-
	Alanita	-	< 1	-	-
	Muscovita	-	< 1	< 1	< 1
	Sericita	-	-	< 1	3
	Clorita	-	-	< 1	-
	Opacos	-	-	2	-
Granulação predominante (mm)	Plagioclásio	0,4 a 1	0,5 a 1,2	0,5 a 1	1 a 3
	Feldspato potássico	0,4 a 1,5	0,5 a 1,0	0,5 a 1	0,5 a 5
	Quartzo	-	0,6 a 2,5	0,2 a 1,3	0,5 a 4
	Biotita	0,6 a 1,3	0,3 a 0,9	0,1 a 0,7	-
Granulação	Fina	Fina	Fina	Média-fina	
Tamanho relativo entre cristais	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	
Alteração	Biotita	Incipiente	-	Ausente na maioria dos grãos; em poucos: incipiente	-
	Plagioclásio	Muito incipiente	Incipiente	Muito incipiente	Moderado
	Quartzo		Ausente	Ausente	Ausente
	Feldspato potássico	Muito Incipiente	Incipiente	Ausente	Incipiente
	Anfibólio	Incipiente	-	-	-
Contatos (%)	Reto	55	20	5	0
	Côncavo-convexo	15	40	60	35
	Serrilhado	30	40	35	65
Observações	-	Presença de textura mirmequítica.	Alteração das biotitas para clorita e hematita. Sericitização. Início de formação de argila dentro do plagioclásios e dos feldspatos potássicos.	Textura pertítica (típica de pegmatitos). Sericitização.	

Fonte: Elaborado pela autora.

A Pedreira D (Tabela 14) mostrou um material composto de gnaisse (63,5%), biotita-gnaisse (19%) e pegmatito-fino. Deve-se notar que tanto o gnaisse da pedreira D como o da Pedreira C diferenciam-se bastante do gnaisse da Pedreira A, por este apresentar uma porcentagem bem mais alta de biotita (aproximadamente 25%) que os primeiros (7 e 8%). Plagioclásio, quartzo e feldspato potássico também estão entre os minerais predominantes da

Pedreira D. O grau de alteração varia entre muito incipiente e incipiente para estes, com exceção do quartzo, no qual a alteração mineral pode ser classificada como ausente, como geralmente ocorre devido à sua alta estabilidade química e mecânica.

Tabela 14 – Resultados da análise petrográfica – Pedreira D

Mineralogia e outras características				
Lâmina	1	2	3	
Classificação	Gnaiss	Pegmatito-fino	Biotita-gnaiss	
Proporção na amostra (%)	63,5	17,5	19,0	
Minerais (%)	Biotita	8	5	30
	Plagioclásio	25	36	17
	Quartzo	38	25	22
	Feldspato potássico	23	30	18
	Titanita	-	-	5
	Zircão	< 1	< 1	-
	Muscovita	3	-	-
	Calcita	-	< 1	-
	Epidoto	-	-	3
	Apatita	-	< 1	2
	Badaleita	-	-	1
	Clorita	-	< 1	-
	Opacos	3	2	2
Granulação predominante (mm)	Plagioclásio	0,5 a 1,5	1,3 a 1,8; muitos > 2,3	0,3 a 1,2
	Feldspato potássico	0,3 a 1,2	0,4 a > 2,3	0,5 a 1,5
	Quartzo	0,9 a 1,2	1,6 a 2,3; 0,1 em algumas porções da lâmina	0,1 a 1,4
	Biotita	0,3 a 0,7	0,3 a 1,1	0,4 a 0,8
Granulação	Fina	Média-fina	Fina	
Tamanho relativo entre cristais	Inequigranular	Inequigranular	Inequigranular	
Alteração	Biotita	Incipiente	Muito incipiente	Incipiente
	Plagioclásio	Muito incipiente	Incipiente	Incipiente
	Quartzo	Ausente	Ausente	Ausente
	Feldspato potássico	Muito incipiente	Incipiente	Muito incipiente
Contatos (%)	Retos	15	0	35
	Côncavo-convexo	15	60	25
	Serrilhado	70	40	40
Observações	Presença de textura mirmequítica.	-	Presença de textura mirmequítica. Muscovita de 2ª ordem na forma de sericita, dentro do plagioclásio ou próximo às bordas das biotitas.	

Fonte: Elaborado pela autora.

As Figuras de 25 a 28 mostram imagens da divisão realizada em uma amostra de agregado de cada pedreira, com base nos tipos de rochas identificados a partir das análises petrográficas. Os números indicam a lâmina à qual cada grupo de partículas corresponde. A

partir da contagem de partículas em cada grupo, pôde ser quantificada, em porcentagem, a presença de cada fração, indicada na linha “Proporção na amostra” das tabelas anteriores. A escala vista em cada imagem está em centímetros.

Figura 25 – Frações do agregado da Pedreira A correspondentes a cada lâmina



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 26 – Agregado da Pedreira B



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 27 – Frações do agregado da Pedreira C correspondentes a cada lâmina



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 28 – Frações do agregado da Pedreira D correspondentes a cada lâmina



Fonte: Elaborado pela autora.

Se fossem utilizados os tipos de rocha predominantes para classificar os agregados A, C e D, os três seriam do tipo gnaiss. Deve-se ressaltar, entretanto, que esse fato não os torna semelhantes. Devido à alta quantidade de informações vistas nas Tabelas de 11 a 14, foram construídas duas tabelas simplificadas (Tabela 15 e Tabela 16) apenas com os dados considerados mais importantes e que implicam em maior distinção entre agregados. O grau de alteração, por exemplo, foi considerado bastante semelhante, principalmente entre as rochas das Pedreiras A, B e C.

Nota-se que o material da Pedreira A difere dos materiais das Pedreiras C e D, principalmente, pela quantidade de biotita (maior) e de quartzo (menor) e pela maior quantidade de contatos retos em relação aos outros. A biotita deve receber grande atenção por ser um mineral com características mais diferentes dos outros minerais que predominam nessas rochas: apresentam clivagem perfeita em uma direção, ocorrendo geralmente em massas lamelares e pequenas escamas; sua estrutura forma folhas flexíveis e elásticas, mas sob a ação do intemperismo sofre lixiviação de seus álcalis, perdendo a elasticidade. Além disso, possui menor dureza (2,5 a 3 na escala de Mohrs, enquanto a maioria dos outros minerais predominantes possui dureza 6, e o quartzo, 7). O quartzo (SiO_2), por conter alto teor de silício, pode contribuir para a baixa adesividade do agregado com ligante asfáltico, como foi visto na Figura 3. As Pedreiras C e D apresentam composições mineralógicas mais próximas entre si, mas mostram uma diferença maior no percentual de contatos serrilhados: 60% na D e 38% na C.

Tabela 15 – Conjunto resumido de informações das Pedreiras A, C e D

Informação	Pedreira			
	A	C	D	
Minerais predominantes (%)	Biotita	18	11	12
	Anfibólio	0	4	0
	Plagioclásio	27	25	26
	Quartzo	21	32	33
	Feldspato potássico	26	26	24
Contatos (%)	Reto	29	17	16
	Côncavo-convexo	38	46	25
	Serrilhado	33	38	60

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 16 – Conjunto resumido de informações da Pedreira B

Informação	Tipo de ocorrência na amostra (conjunto)	
	Matriz	Fenocristais
Proporção na amostra (%)	80	20
Minerais predominantes	Biotita	Nefelina
	Anfibólio	Sanidina (feldspato potássico)
	Álcalis-feldspatos	Olivina
	Piroxênio	-
	Calcita	-

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Comparação entre forma e angularidade de diferentes agregados

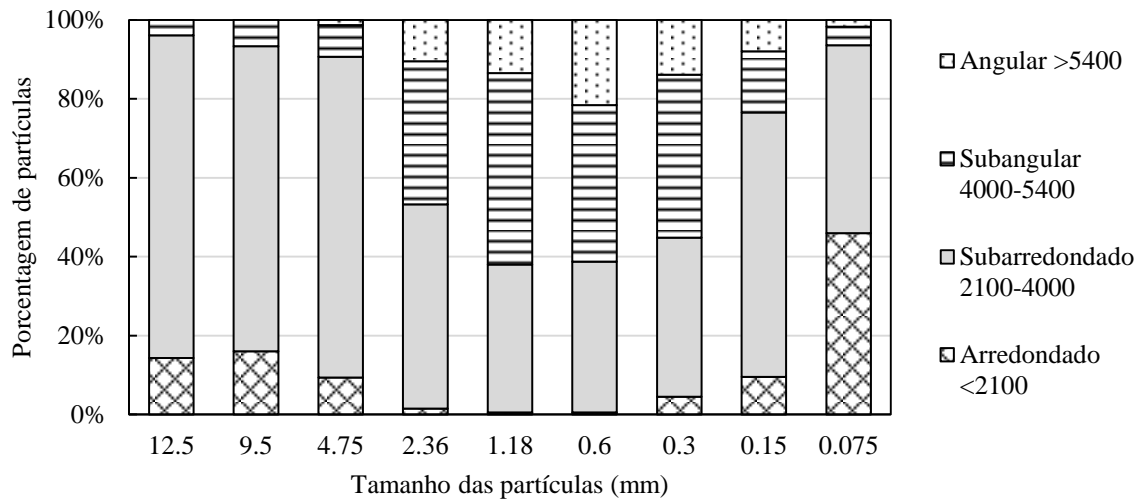
4.2.1 Britadores distintos

Os Gráficos de 5 a 10 mostram a distribuição percentual de partículas em cada classe de angularidade estabelecida por Al-Rousan (2004). Cada fração graúda analisada (4,75 a 19 mm) corresponde a um conjunto de, pelo menos, 75 partículas e cada fração miúda (0,075 a 2,36 mm), a um conjunto de, pelo menos, 200 partículas. O agregado A-ML, devido ao tamanho limite da saída do britador de mandíbulas de laboratório, não apresentou a fração de 19 mm.

O agregado A-ML (gnaisse/granito), gerado por britador de mandíbulas de laboratório, apresentou predominantemente partículas subarredondadas nas suas frações graúdas (Gráfico 5). À medida que se aproxima das frações de 1,18 mm e de 0,6 mm, observa-se que as partículas subarredondadas perdem espaço para as subangulares. Esse comportamento, visto também em outros agregados de origem granítica e gnáissica, pode ser atribuído ao fato de que, nessa faixa de tamanhos, encontra-se a maior parte dos grãos de minerais presentes nos agregados analisados. A angularidade própria dos grãos de minerais pode ser mais decisiva na definição das faces dos agregados, nessas frações, que outros fatores, como a distribuição das forças na superfície da partícula no momento da britagem.

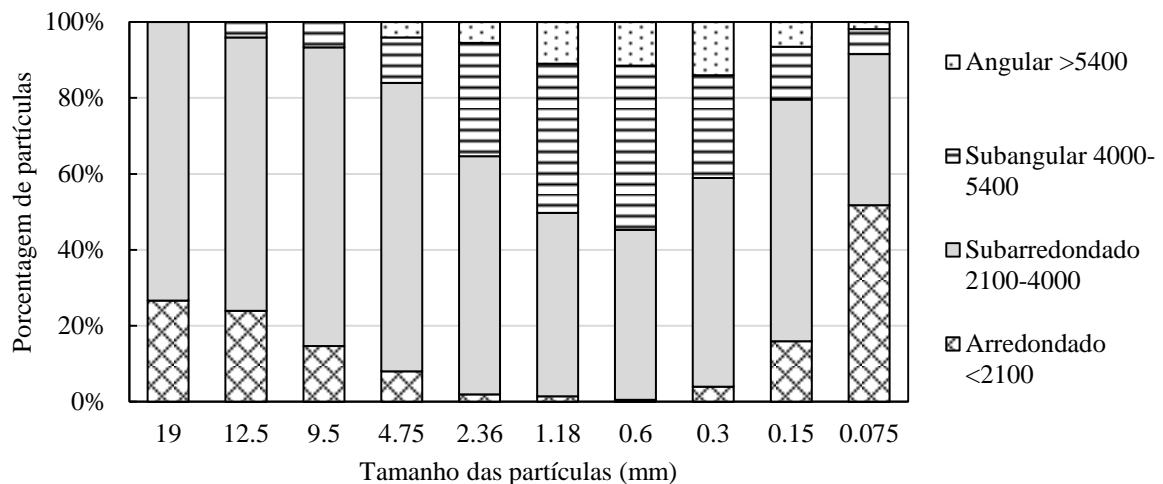
Ao continuar reduzindo o tamanho da fração observada, nota-se o aumento de partículas arredondadas, com percentual máximo na fração de 0,075 mm, podendo ser consideradas mais um resultado do processo de desgaste e polimento que ocorre com as partículas de agregado durante todo o processo de produção e transporte que um produto da própria quebra da britagem. Além disso, os grãos menores, sendo menos resistentes, acabam sendo degradados mais facilmente, tornando-se mais arredondados. A menor angularidade do agregado B-M, que chama atenção nessa fração de 0,075 mm, pode ser atribuída à presença de material fino oriundo diretamente do desmonte do maciço rochoso (por ser proveniente do primeiro estágio de britagem). O agregado A-C (Gráfico 6), oriundo da mesma rocha do A-ML, mas gerado por britador cônico, apresentou comportamento semelhante, porém, com distribuição um pouco deslocada para as classes de menor angularidade, indicando que o britador de mandíbulas, que trabalha com carregamento predominantemente simples, aumentou a angularidade do agregado.

Gráfico 5 – Distribuição das partículas do agregado A-ML nas classes de angularidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 6 – Distribuição das partículas do agregado A-C nas classes de angularidade



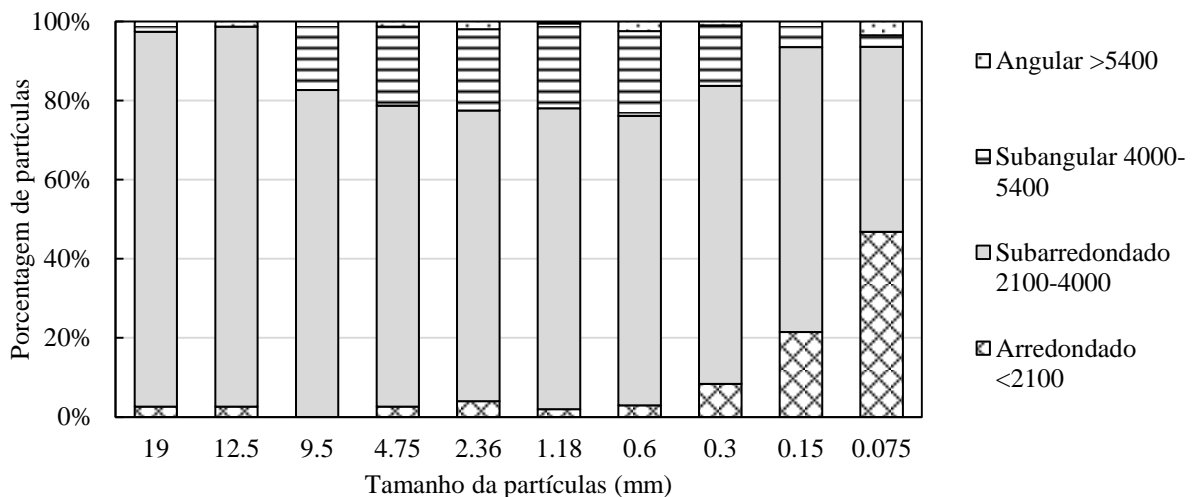
Fonte: Elaborado pela autora.

Os agregados B-I (Gráfico 7) e B-M (Gráfico 8), de mesma origem (fonolítica), apresentaram, considerando todas as frações, as maiores proporções de partículas subarredondadas. A tendência de distribuição das partículas nas classes de angularidade para as diferentes frações foi semelhante para os dois e não apresentou o pico de angularidade em torno da fração de 0,6 mm tão evidente como aconteceu para os agregados oriundos das demais pedreiras. Esse comportamento pode estar relacionado ao fato de que a maior parte dos grãos de minerais dessa rocha (80% do material pertencente à matriz) possui tamanho abaixo de 0,05 mm, dimensão que não é atingida pela análise em questão. Assim, não há uma fração específica em que haja maior concentração de grãos de minerais isolados, mostrando suas faces naturais, pois os minerais da matriz têm tamanho menor que todas essas frações, e

os fenocristais possuem tamanhos distribuídos entre 0,2 e 2,3 mm. Dessa forma, a rocha fonolítica originou agregados mais homogêneos com relação à angularidade, independente do tipo de britador (de mandíbulas ou de impacto).

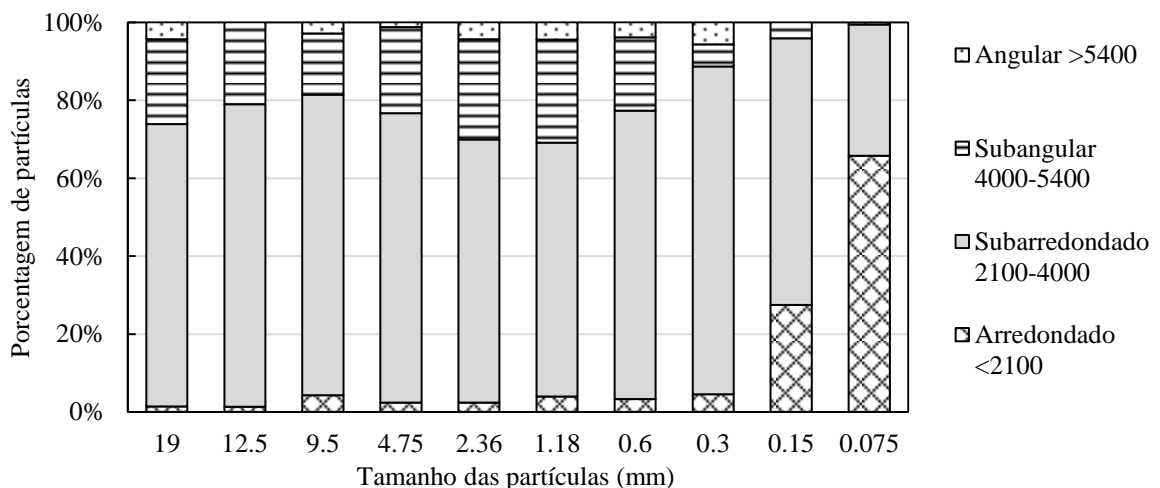
Para as menores frações, percebe-se o mesmo comportamento dos outros agregados, com aumento da quantidade de partículas arredondadas, as quais são produto de polimento e são mais facilmente desgastadas, tornando-se menos angulares. Enquanto isso, para as frações de agregado graúdo, notou-se que, assim como no caso da pedra A, o britador de mandíbulas aumentou os níveis de partículas angulares nas frações de maior tamanho do material da pedra B, em relação ao britador de impacto de eixo vertical. Portanto, pode-se dizer que os britadores de mandíbulas geraram, no geral, agregados graúdos mais angulares que o britador cônico da pedra A e que o britador de impacto da pedra B.

Gráfico 7 – Distribuição das partículas do agregado B-I nas classes de angularidade



Fonte: Elaborado pela autora.

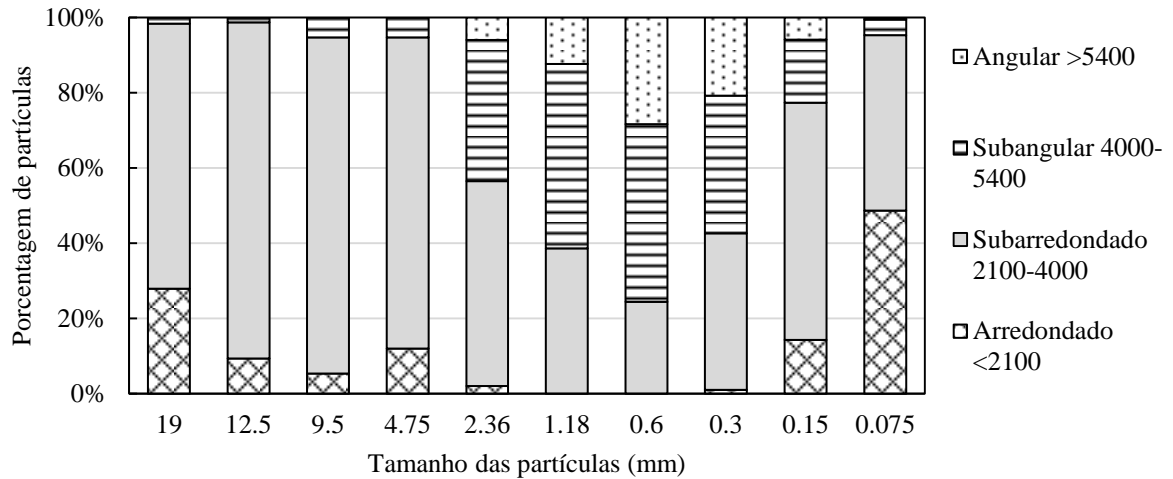
Gráfico 8 – Distribuição das partículas do agregado B-M nas classes de angularidade



Fonte: Elaborado pela autora.

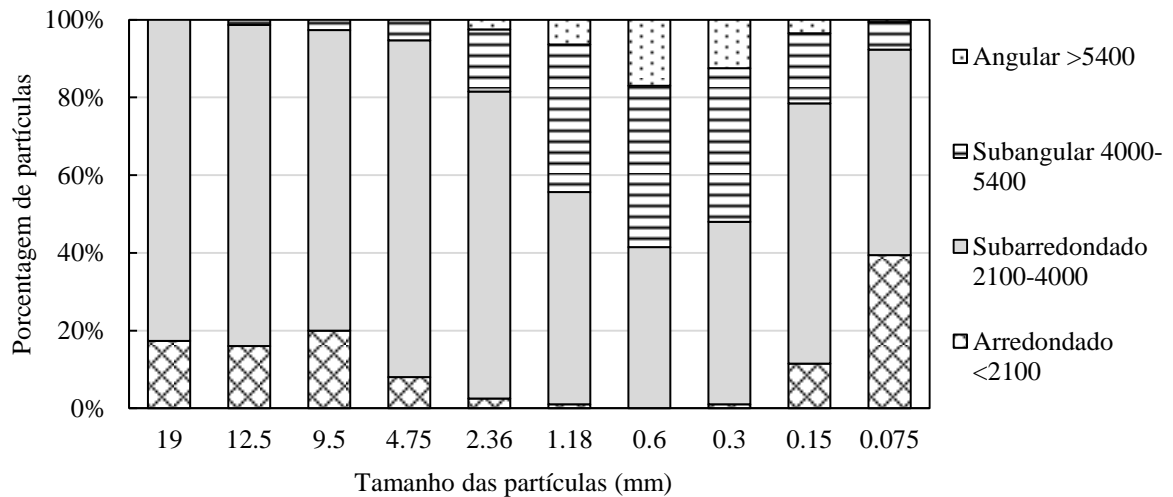
Os agregados C-C (Gráfico 9) e D-C (Gráfico 10), que possuem mineralogia mais próxima ao agregado A-C e foram gerados pelo mesmo tipo de britador, mostram essa similaridade na distribuição das partículas por classe de angularidade. Percebe-se o mesmo formato curvo, com aumento da angularidade à medida que se aproxima da fração de 0,6 mm.

Gráfico 9 – Distribuição das partículas do agregado C-C nas classes de angularidade



Fonte: Elaborado pela autora.

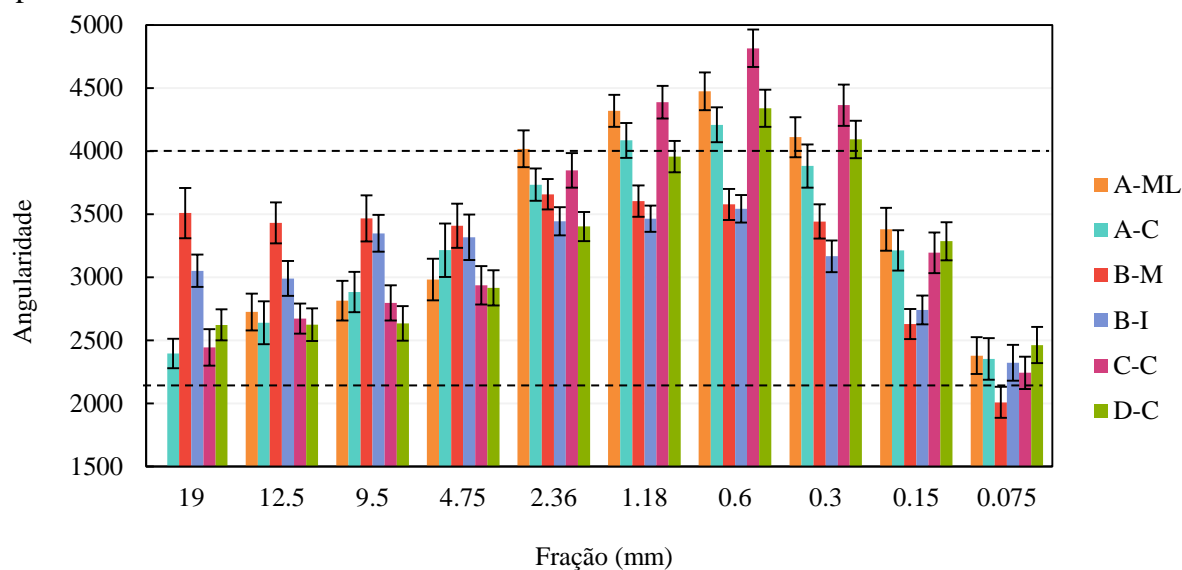
Gráfico 10 – Distribuição de partículas do agregado D-C nas classes de angularidade



Fonte: Elaborado pela autora.

A fim de facilitar a comparação objetiva entre os agregados, apresentam-se no Gráfico 11, os resultados médios de angularidade por fração. As barras de erro representam intervalos de confiança, com base no desvio padrão, na quantidade de partículas analisadas e utilizando o nível de significância (α) de 5%.

Gráfico 11 – Comparação entre a angularidade média dos agregados por fração com base no tipo de britador

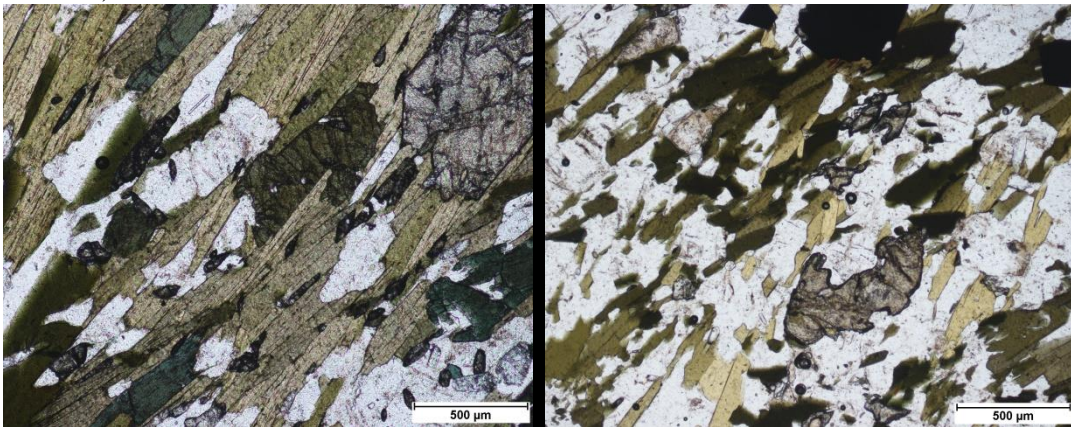


Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que as frações consideradas graúdas (de 4,75 a 19 mm) apresentam, aproximadamente, o mesmo padrão de comportamento entre os agregados: o agregado da pedra B gerado por britador de mandíbulas (B-M) possui a maior angularidade, seguido do B-I, oriundo da mesma pedra e gerado por britador de impacto, enquanto os dois agregados provenientes da pedra A (A-ML e A-C) apresentam valores de angularidade menores e mais próximos aos valores do C-C e do D-C. Essa diferença, mais acentuada para as maiores frações, como se pode notar pela não sobreposição dos intervalos de confiança, torna-se menor à medida que o tamanho das partículas é reduzido.

A partir da primeira fração miúda, 2,36 mm, percebe-se uma inversão de comportamento, ou seja, os agregados oriundos da pedra B, tanto o gerado por britador de mandíbulas de laboratório como o gerado por britador de impacto, passam a apresentar angularidades médias menores que os das pedras A, C e D. Como foi discutido anteriormente, essa maior angularidade nas partículas miúdas dos materiais de A, C e D pode ocorrer pela presença de grãos de minerais com tamanhos que correspondem aos próprios tamanhos das frações, de forma que a angularidade natural do grão, na forma como estava na rocha, é vista no agregado miúdo. Essa interpretação também se aplica à maior angularidade vista nas partículas miúdas do agregado C-C, quando este é comparado aos outros dois oriundos de britadores cônicos (A-C e D-C), de forma que esses valores mais altos devem refletir a própria presença de grãos de minerais mais angulares, conforme exemplificado pela Figura 29, que mostra porções típicas das lâminas de biotita-gnaiss das Pedreiras C e D.

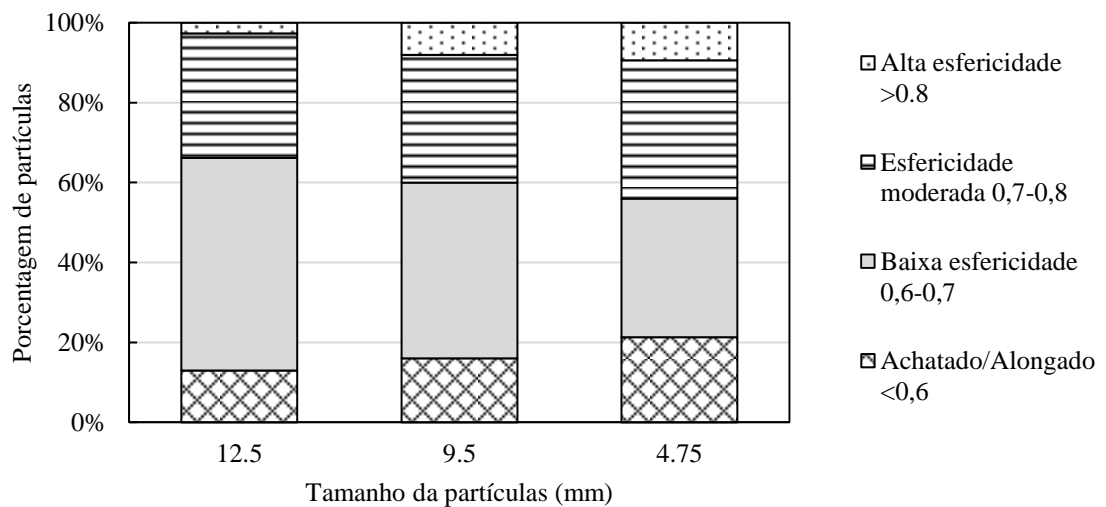
Figura 29 – Vista das lâminas relativas à rocha de biotita-gnaiss das Pedreiras C (à esquerda) e D (à direita)



Fonte: Elaborado pela autora.

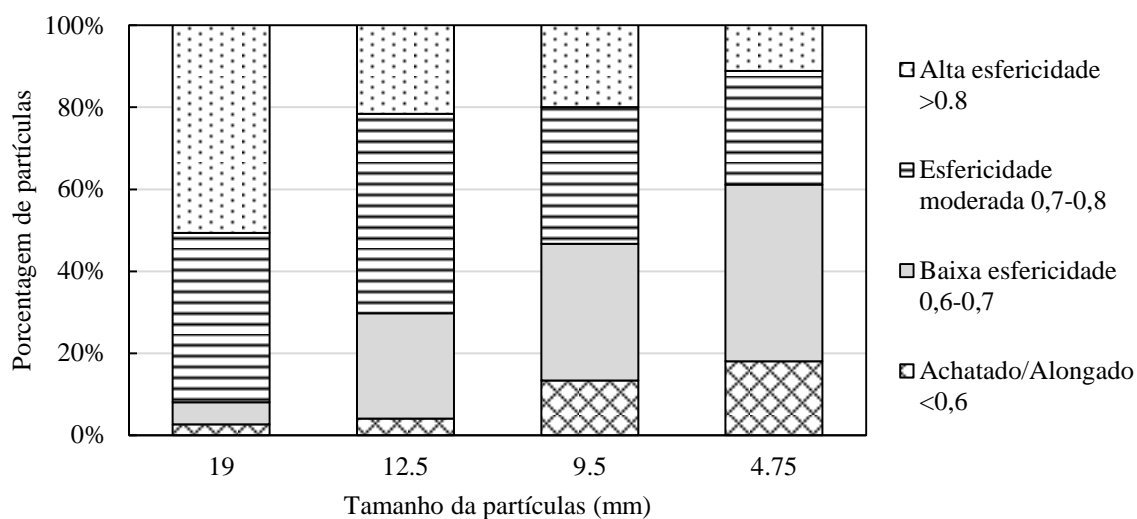
Os Gráficos de 12 a 17 apresentam os resultados do parâmetro de forma para as partículas graúdas: a esfericidade. O agregado A-ML (Gráfico 12) mostrou ter maior percentual de partículas nas classes de baixa e de moderada esfericidade, e não houve grandes variações entre suas diferentes frações. O agregado A-C (originado de britador cônico) apresentou um padrão bastante distinto do anterior, com aproximadamente 50% das partículas da fração de 19 mm na classe de alta esfericidade. Esse percentual diminui, e as classes de esfericidade mais baixa ganham espaço, à medida que se caminha para a menor fração (4,75 mm), na qual os percentuais ficam semelhantes aos do agregado anterior, de mesma origem, mas gerado por britador de mandíbulas de laboratório (A-ML).

Gráfico 12 – Distribuição das partículas do agregado A-ML nas classes de esfericidade



Fonte: Elaborado pela autora.

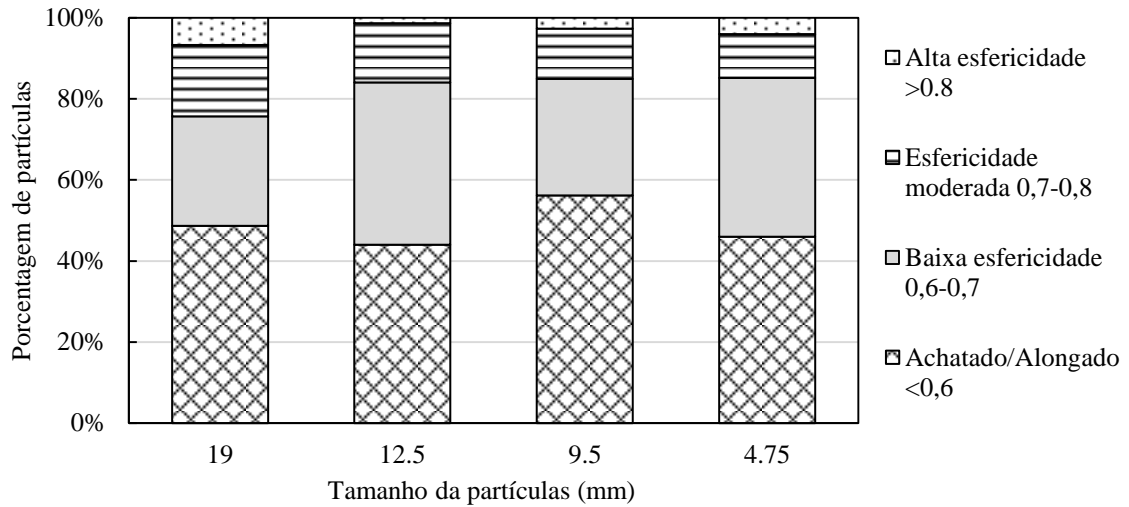
Gráfico 13 – Distribuição das partículas do agregado A-C nas classes de esfericidade



Fonte: Elaborado pelo autora.

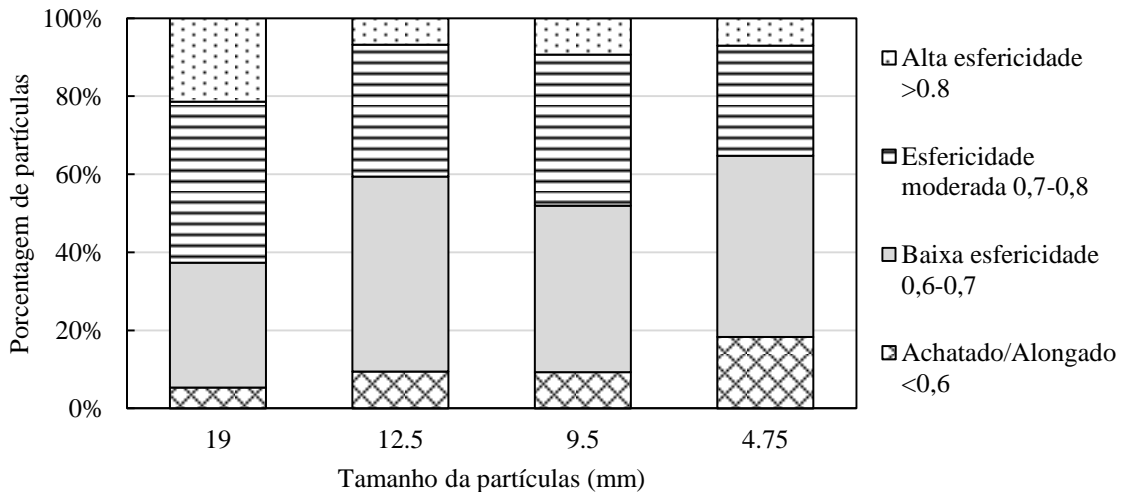
O agregado B-M (Gráfico 14), oriundo de rocha fonolítica e gerado por britador de mandíbulas, apresentou percentuais altos (maiores que 40%) na classe de partículas achatadas/alongadas, seguida da classe de baixa esfericidade. Não houve tendência clara de variação ao longo das frações, assim como no agregado A-ML, também gerado por britador de mandíbulas. No agregado B-I (Gráfico 15), há predominância de partículas nas classes de baixa e de moderada esfericidade, e há uma indicação de redução da esfericidade à medida que se diminui o tamanho da partícula observada, embora seja um comportamento pouco acentuado. Pode-se dizer, então, que o britador de impacto de eixo vertical e o britador de mandíbulas tendem a gerar agregados graúdos com esfericidade mais homogênea ao longo das frações, entretanto, o primeiro proporciona uma maior esfericidade (agregados de forma mais regular, menos susceptíveis à quebra) que o segundo. Enquanto isso, o britador cônico gera agregados mais esféricos nas maiores frações, mas há uma queda do valor dessa propriedade para as menores frações.

Gráfico 14 – Distribuição das partículas do agregado B-M nas classes de esfericidade



Fonte: Elaborado pela autora.

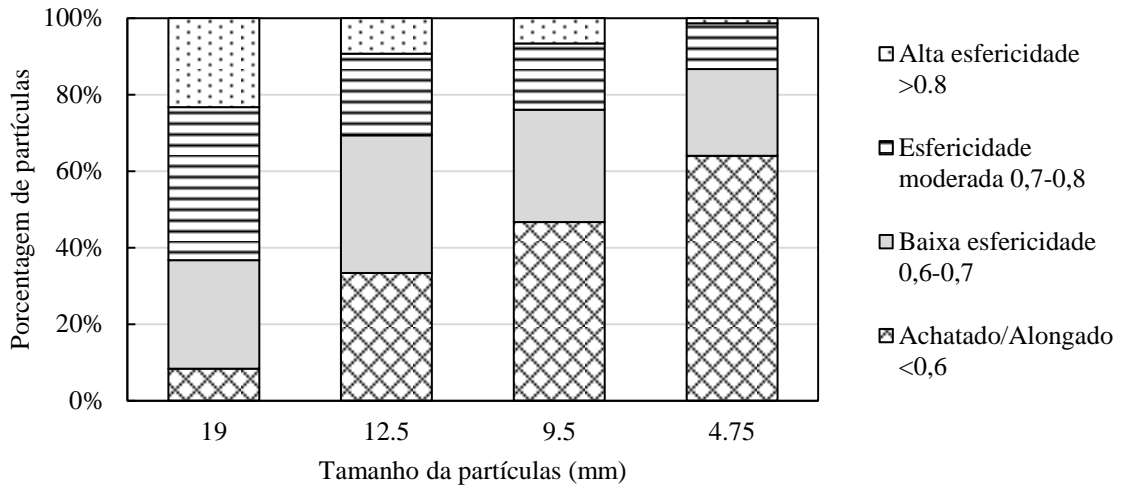
Gráfico 15 – Distribuição das partículas do agregado B-I nas classes de esfericidade



Fonte: Elaborado pela autora.

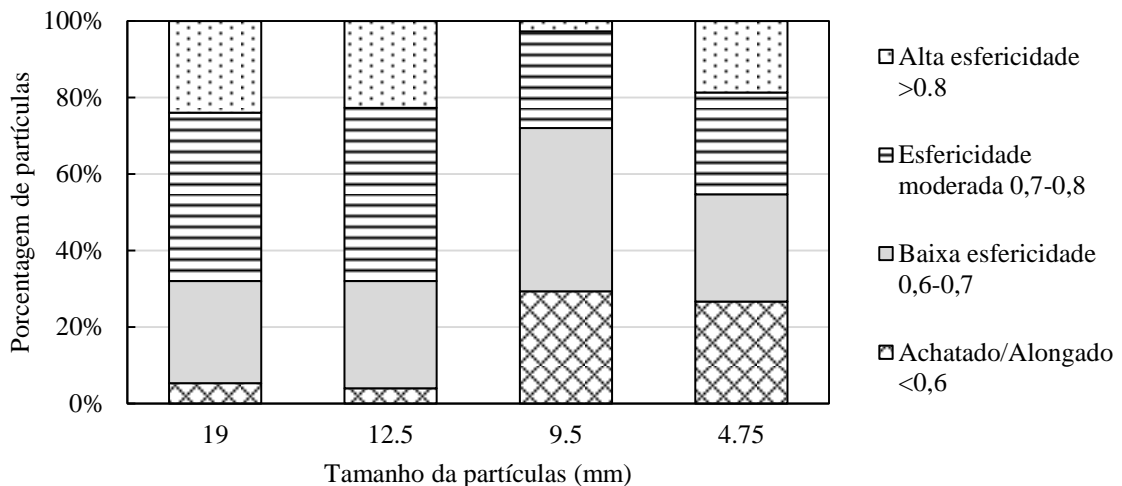
O agregado C-C (Gráfico 16) apresentou um padrão de crescimento da porcentagem de partículas de esfericidade mais baixa com a redução do tamanho da fração, assim como o agregado A-C (também gerado por britador cônico). Entretanto, para o agregado C-C, a presença de partículas nas duas classes superiores foi bem menor (63%, 30%, 24% e 13%) que para o agregado A-C (92%, 71%, 53% e 39%). Essa diferença pode ter sido resultado do controle da britagem interparticular realizado na pedreira A. Apesar de também ter sido gerado por britador de mandíbulas, o agregado D-C (Gráfico 17) não apresentou o comportamento citado de maneira tão definida, contudo, ainda mostrou uma redução da esfericidade das duas menores frações em relação às duas maiores.

Gráfico 16 – Distribuição das partículas do agregado C-C nas classes de esfericidade



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 17 – Distribuição das partículas do agregado D-C nas classes de esfericidade

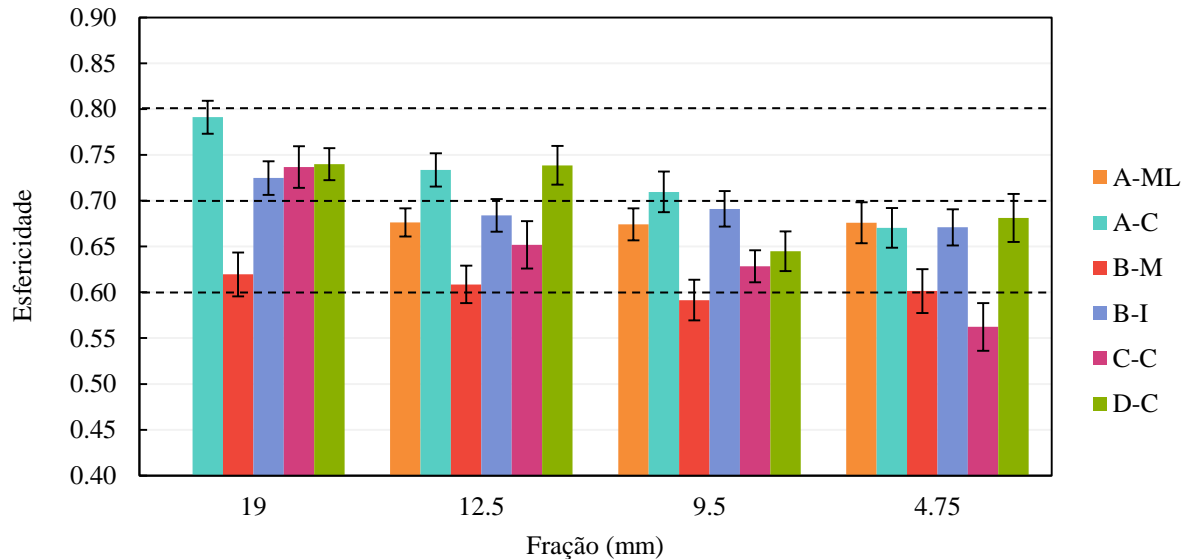


Fonte: Elaborado pela autora.

O Gráfico 18 apresenta as médias de esfericidade de cada material, por fração. Os agregados gerados por britadores de mandíbulas (A-ML e B-M) apresentaram menores médias que os correspondentes (mesma origem e mineralogia) gerados por britador cônico e de impacto (A-C e B-I). O agregado B-M teve as menores médias, sendo constante ao longo das frações. Em oposição, o agregado A-C foi considerado o mais esférico. De maneira geral, a tendência de redução da esfericidade com a redução do tamanho da partícula foi vista para os agregados gerados por britador cônico. Para o agregado gerado por britador de impacto, esse comportamento foi considerado mais fraco, o que pode ser considerado uma vantagem, devido à regularidade de esfericidade ao longo das frações. Ou seja, ele possui esfericidade um pouco menor que os produtos de britador cônico nas maiores frações, mas seu valor se

mantem, enquanto nestes o valor pode cair bastante, tornando-se mais lamelar, como ocorreu para o agregado C-C.

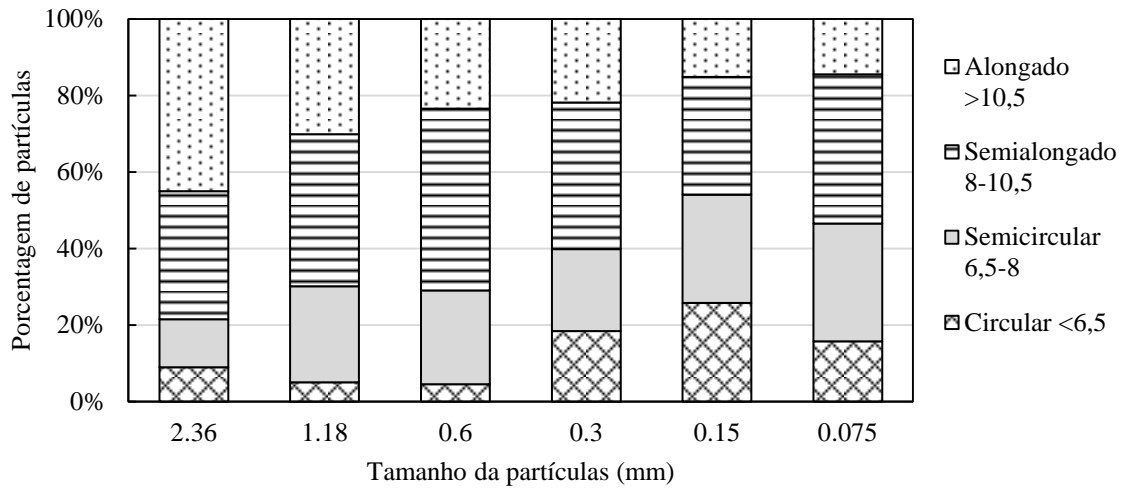
Gráfico 18 – Comparação entre a esfericidade média dos agregados por fração com base no tipo de britador



Fonte: Elaborado pela autora.

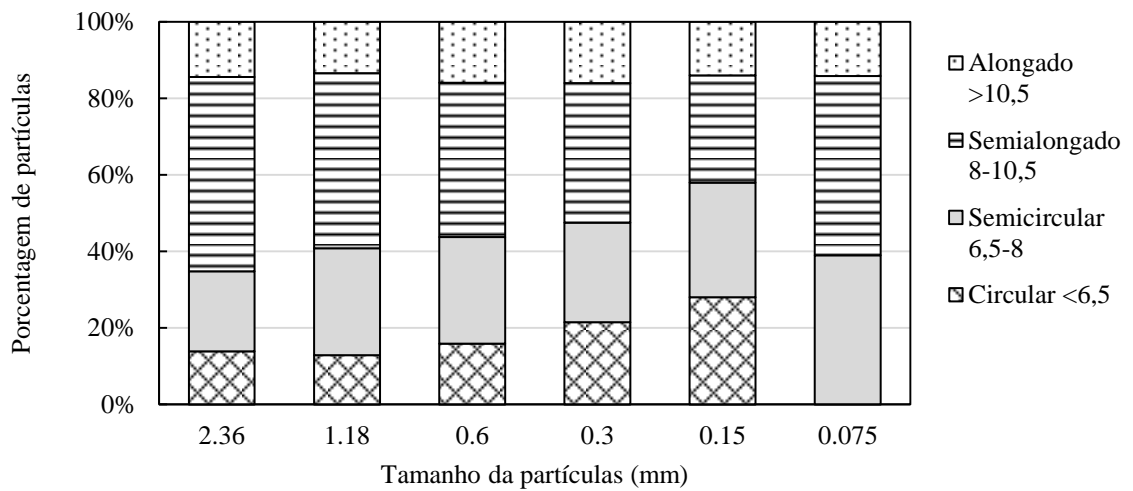
Os Gráficos de 19 a 24 apresentam a distribuição de partículas em cada classe de forma 2D (o parâmetro de forma utilizado apenas para agregados miúdos) por fração, para cada agregado. Relembra-se que o valor de forma 2D é maior para partículas mais alongadas. Nota-se um comportamento semelhante para todos os agregados: o aumento do percentual de partículas circulares à medida que se aproxima da fração de 0,15 mm. Chamou atenção, também, o fato de que os agregados gerados por britadores de mandíbulas (Gráfico 19 e Gráfico 21) tiveram maiores percentuais de partículas alongadas que os demais (segundo a mesma tendência dos agregados graúdos para esfericidade), principalmente para as maiores frações.

Gráfico 19 – Distribuição das partículas do agregado A-ML nas classes de forma 2D



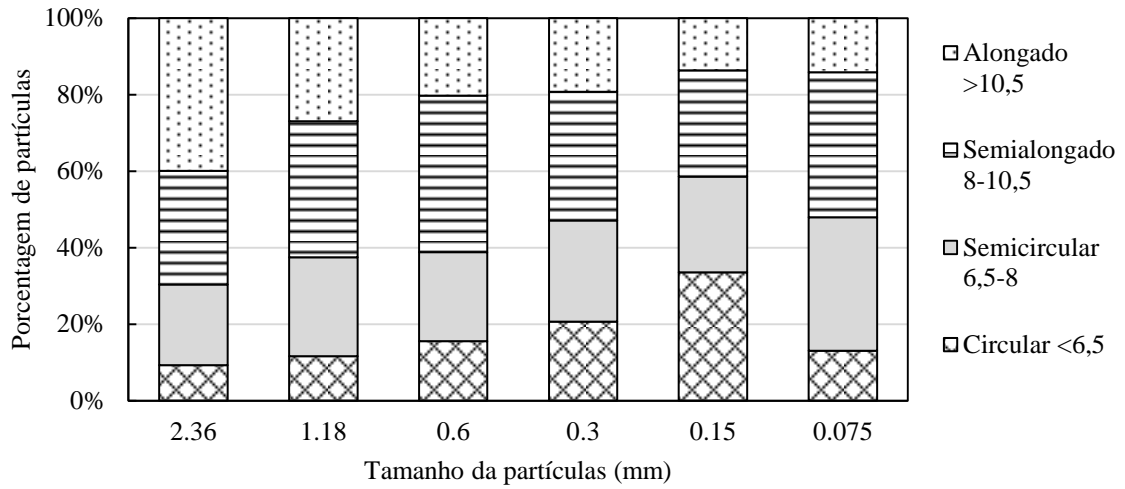
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 20 – Distribuição das partículas do agregado A-C nas classes de forma 2D



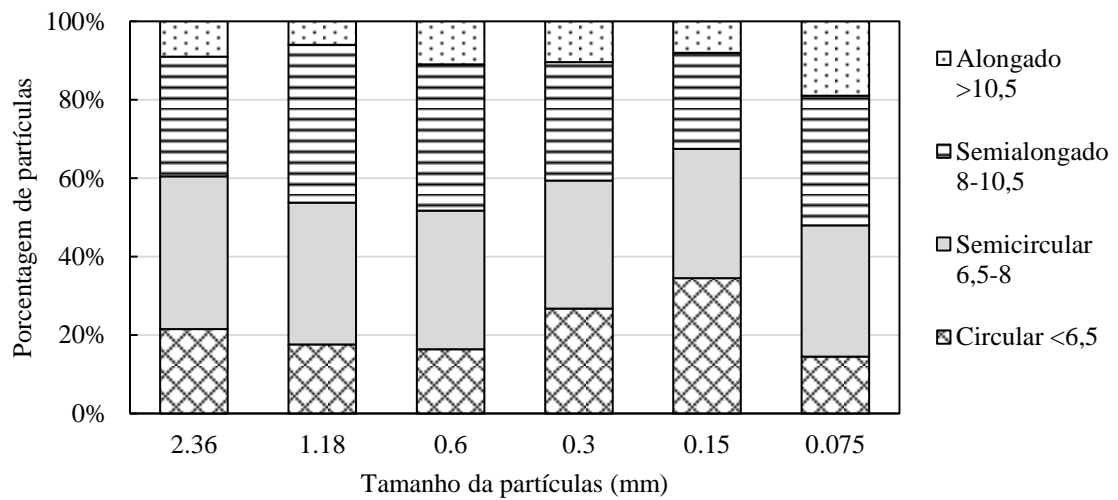
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 21 – Distribuição das partículas do agregado B-M nas classes de forma 2D



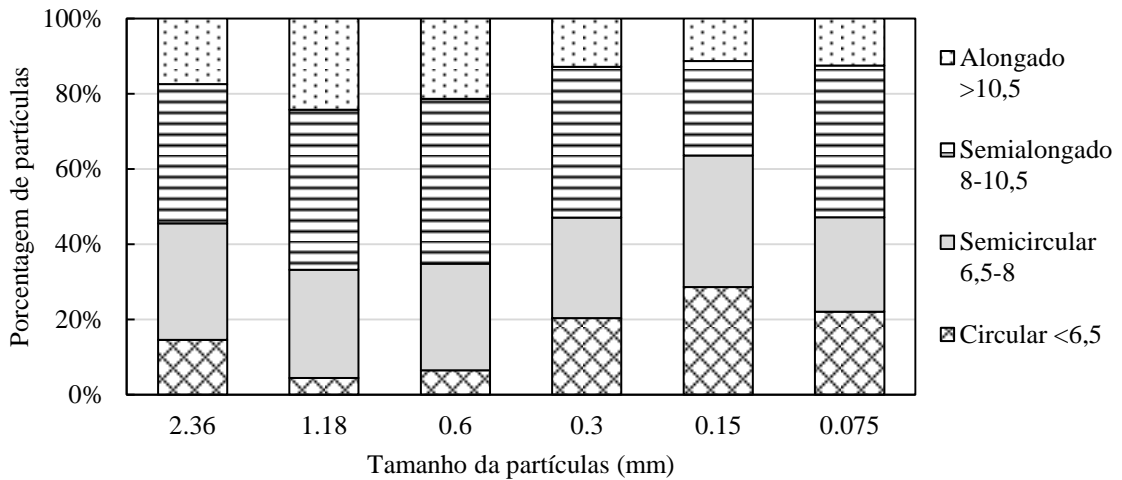
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 22 – Distribuição das partículas do agregado B-I nas classes de forma 2D



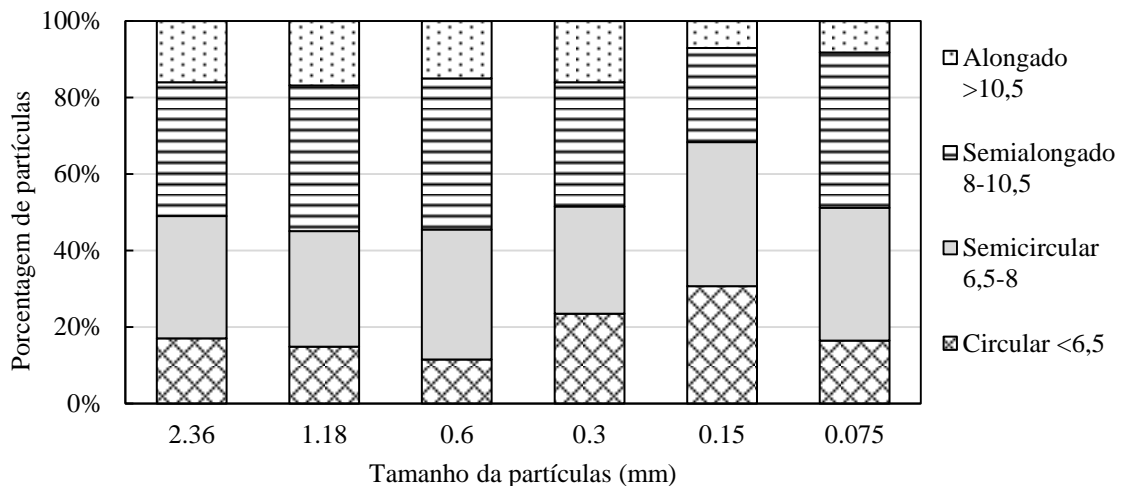
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 23 – Distribuição das partículas do agregado C-C nas classes de forma 2D



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 24 – Distribuição das partículas do agregado D-C nas classes de forma 2D

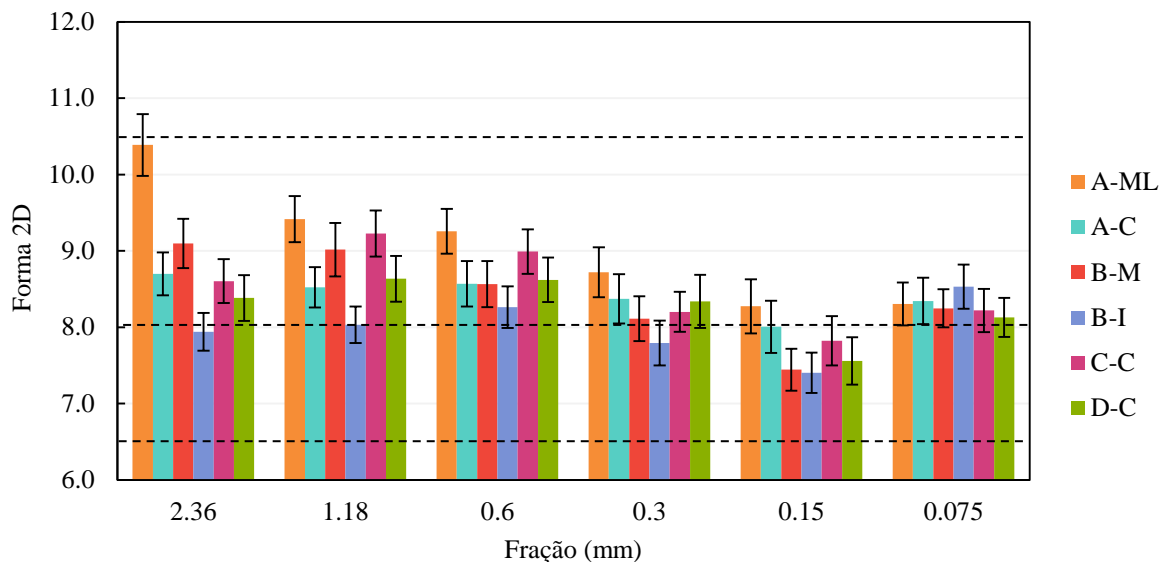


Fonte: Elaborado pela autora.

O Gráfico 25 mostra os resultados médios de forma 2D. Com base nos valores médios, pode-se notar que o agregado oriundo da pedra A, gerado por britador de mandíbulas de laboratório (A-ML), mostrou-se, significativamente, mais alongado que os demais para as frações de partículas maiores (2,36 mm), reduzindo-se essa diferença à medida que se diminui o tamanho das partículas. De maneira geral, o agregado miúdo que pôde ser considerado mais circular foi o oriundo da pedra B (fonólito), gerado por britador de impacto (B-I). Há uma aproximação entre todos os agregados à medida que se reduz o tamanho da fração, até que na menor fração (de 0,075 mm), os intervalos de confiança de todos se sobrepõem parcialmente, sugerindo que a forma dessas partículas menores sofre pouca ou nenhuma influência da mineralogia. Nota-se ainda que, à medida que se reduz o

tamanho das partículas, agregados de mesma origem gerados por britadores distintos (A-ML e A-C; B-M e B-I) aproximam-se entre si, indicando que o tipo de britagem tem seu impacto suavizado com a redução do tamanho da partícula.

Gráfico 25 – Comparação entre a forma 2D média dos agregados por fração com base no tipo de britador



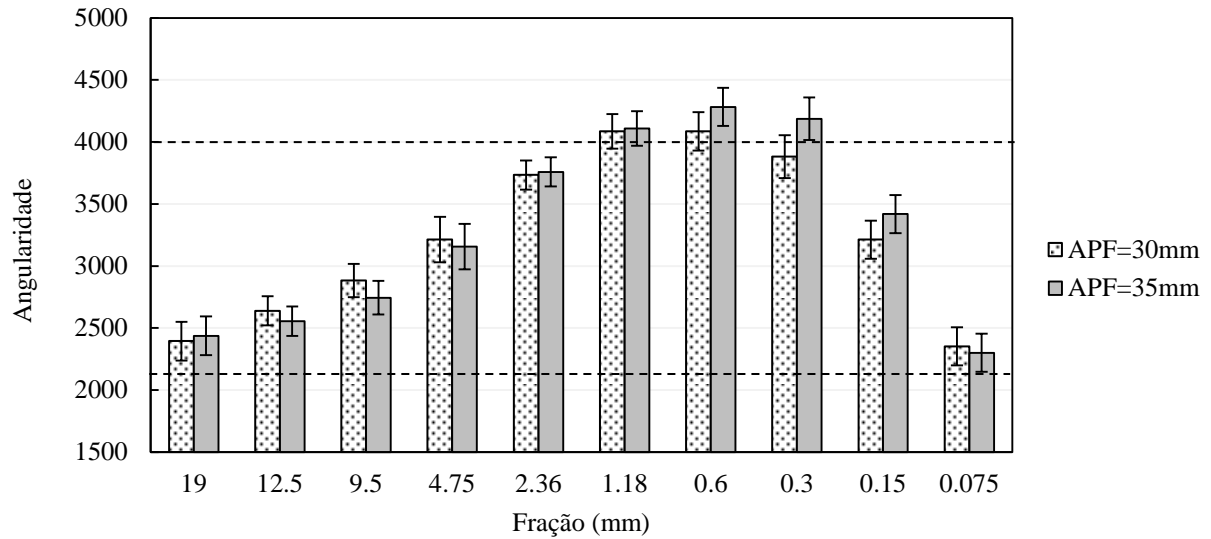
Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2 Britador cônico com variação da APF (em pedra)

Nesta etapa, foram comparadas a forma e a angularidade de dois agregados de mesma origem gerados pelo mesmo britador cônico, a partir do mesmo material de alimentação, sendo o único fator variável o ajuste de APF, que foi alterado de 30 para 35 mm, valores usualmente utilizados na pedra em que foi realizado o procedimento (pedreira A). No Gráfico 26, são apresentados os resultados médios, por fração, de angularidade, de esfericidade e de forma 2D para os dois materiais.

Apesar de os valores de angularidade (Gráfico 26) terem ficado próximos, havendo sobreposição dos intervalos de confiança de todas as frações, pôde-se constatar certa tendência de comportamento. Para as frações graúdas, o agregado gerado com menor valor de APF (e, conseqüentemente, com maior pressão de esmagamento), apresentou valores médios maiores de angularidade, enquanto para as frações miúdas, esse comportamento se inverteu, evidenciando maiores distâncias entre as médias para as frações de 0,6, 0,3 e 0,15 mm.

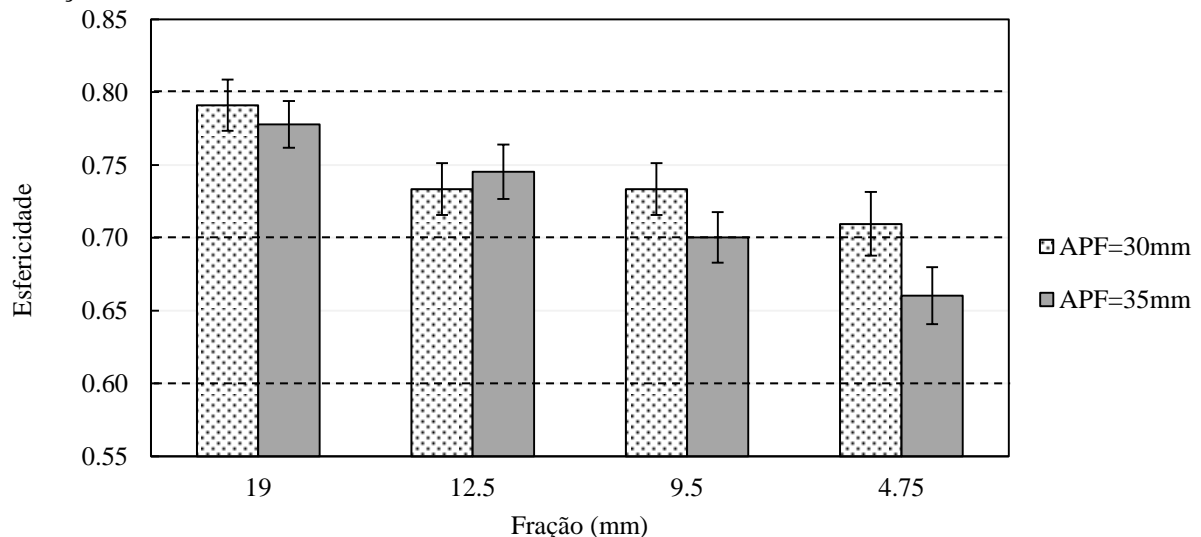
Gráfico 26 – Angularidade média por fração dos agregados gerados por britador cônico com variação da APF



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de esfericidade (Gráfico 27) também foram próximos, no geral, para os dois materiais. Analisando as duas menores frações (9,5 e 4,75 mm), observa-se uma maior distância entre suas médias, chegando a haver separação total dos intervalos de confiança na fração de 4,75 mm. Ou seja, pode-se inferir que o material gerado com o uso da maior abertura (APF) mostrou-se mais alongado ou lamelar, fato que condiz com resultados anteriormente encontrados por meio de ensaios tradicionais (BENGTSSON; EVERTSSON, 2006). Apesar de a causa física desse comportamento não ter sido investigada por esses autores nem pela presente pesquisa, é sugerida, a seguir, uma possível explicação para o fato.

Gráfico 27 – Esfericidade média por fração dos agregados gerados por britador cônico com variação da APF

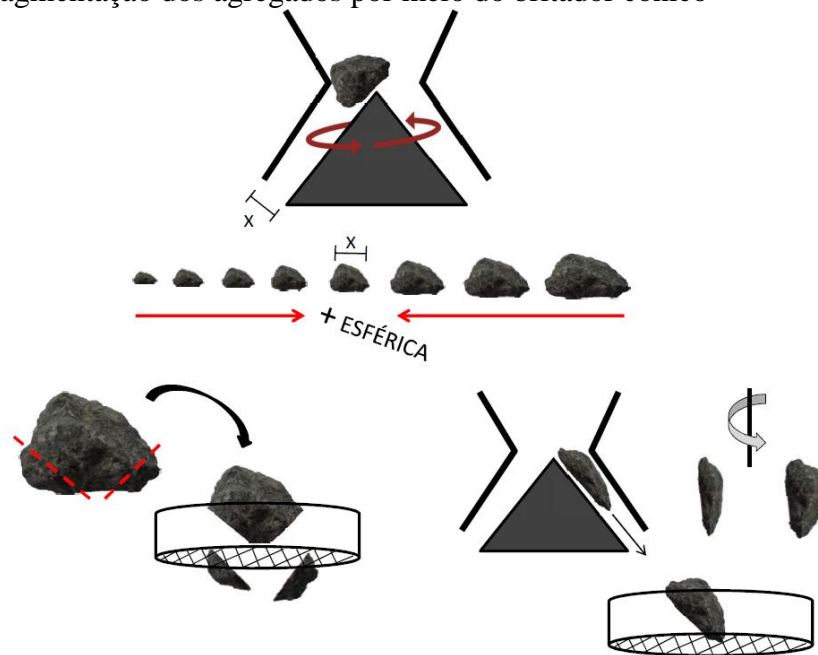


Fonte: Elaborado pela autora.

Ao serem fragmentadas por um britador cônico, as partículas de determinado material são quebradas predominantemente por compressão até que seu tamanho permita sua passagem pela saída do equipamento, ou seja, até que uma de suas três dimensões seja menor que a abertura instantânea (que pode variar entre a APF e a APA) do britador. As partículas de menor tamanho podem ser tratadas como o resultado da quebra das porções mais frágeis dos fragmentos maiores, que são seus ângulos ou quinas. Dessa forma, enquanto as partículas de menor tamanho são geradas com formato mais lamelar e angular, essa quebra ajuda a tornar a partícula original, de maior tamanho, mais regular (esférica) e mais arredondada (menos angular). Ao aumentar o tamanho da APF, portanto, essas partículas produzidas com forma mais regular (esférica) acompanham o tamanho da abertura, ou seja, passam a ser maiores.

Por outro lado, quando uma partícula enquadra-se em um tamanho maior que a APF do britador após ter passado pelo processo de classificação, ela tende a ser mais lamelar, por ter, obrigatoriamente, uma dimensão pequena o suficiente para ter passado pela abertura do britador, e as outras duas suficientemente grandes para determinar que ela fique retida na peneira de maior abertura (considerando que a abertura do britador limita apenas uma dimensão, enquanto as grelhas e peneiras limitam duas dimensões do agregado). Assim, as partículas de tamanho próximo à APF do britador tendem a ser mais esféricas que aquelas maiores e menores que a APF. Com a Figura 30, buscou-se ilustrar essa sugestão de explicação do aumento da lamelaridade com o distanciamento do tamanho da partícula do valor da APF.

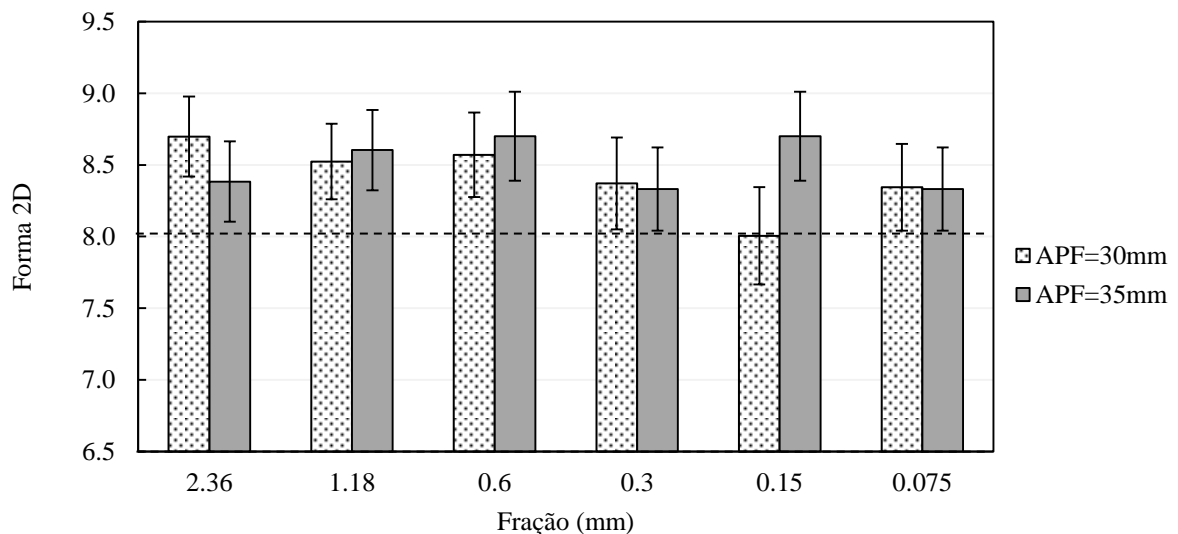
Figura 30 – Fragmentação dos agregados por meio do britador cônico



Fonte: Elaborado pela autora.

A forma 2D (Gráfico 28) das partículas miúdas não mostrou ter sofrido influência visível da variação de APF, entretanto, apresentou um comportamento inesperado na fração de 0,15 mm, em que o material gerado por APF de 30 mm teve sua menor média, enquanto o gerado por APF de 35 mm teve sua maior média. Por não seguir um padrão, não se considerou que essa diferença, apesar de corroborada pelos intervalos de confiança, deva ser considerada como resultado da influência da variação de APF.

Gráfico 28 – Forma 2D média por fração dos agregados gerados por britador cônico com variação da APF



Fonte: Elaborado pela autora.

Apresentam-se, na Tabela 17, os resultados dos testes de hipóteses realizados entre as médias amostrais. Comparando os valores-p com o nível de significância de 0,05, percebeu-se que aquelas frações que mostraram uma diferença maior entre as médias das duas amostras realmente indicaram uma diferença entre as médias populacionais. Os valores marcados em negrito, menores que 0,05, portanto, deram indícios suficientes para rejeitar a hipótese de que as duas amostras vieram de populações com médias iguais (hipótese nula), ou seja, de que a variação de APF não influenciou as propriedades de forma das partículas produzidas. Acredita-se que, com uma maior variação entre os dois valores de APF, uma quantidade maior de frações teria mostrado diferenças significativas.

Tabela 17 – Teste de hipóteses para comparação de médias – Variação de APF

Propriedade	Estatística	Fração (mm)									
		19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Esfericidade	t	1,089	0,899	2,63	3,29	-	-	-	-	-	-
	t crítico	1,66	1,66	1,66	1,66	-	-	-	-	-	-
	Valor-p	0,14	0,19	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
Angular	t	0,431	0,798	1,303	0,403	0,285	0,236	1,870	2,469	1,819	0,446
	t crítico	1,66	1,66	1,66	1,66	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Valor-p	0,33	0,21	0,10	0,34	1,65	0,41	0,03	0,01	0,03	0,33
Forma 2D	t	-	-	-	-	1,557	0,409	0,595	0,182	2,951	0,059
	t crítico	-	-	-	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Valor-p	-	-	-	-	0,06	0,34	0,28	0,43	0,00	0,48

Fonte: Elaborado pela autora.

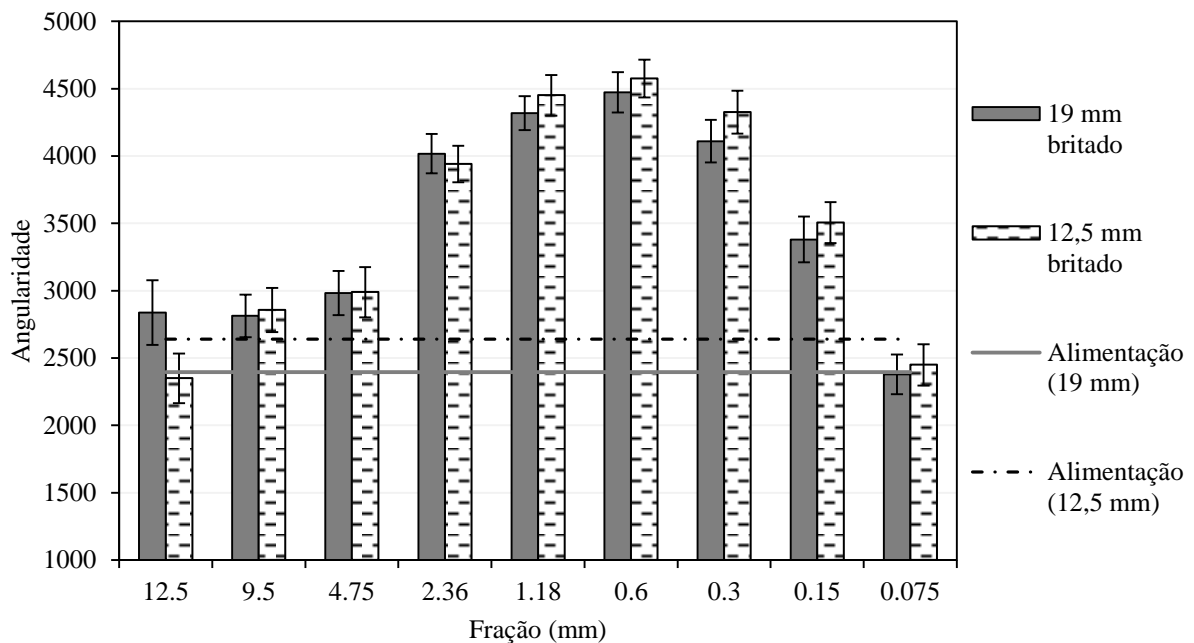
4.2.3 Britador de mandíbulas com variação do material de alimentação

Nesta etapa, foi utilizado um britador de mandíbulas de laboratório, com parâmetros fixos (APF = 10 mm), para realizar a britagem de partículas de diferentes tamanhos de um mesmo material (A-C). Ou seja, a variável cuja influência na forma e na angularidade se buscou analisar foi a dimensão das partículas do material de alimentação do britador de mandíbulas. Pôde-se observar, nesse procedimento, que ocorreu fragmentação predominantemente do tipo simples, ao contrário da fragmentação interparticular que pode ocorrer na câmara do britador cônico.

As linhas horizontais dos Gráficos de 29 a 31, os quais apresentam os resultados de angularidade e de esfericidade, respectivamente, representam o valor médio do material da alimentação, ou seja, o material antes de ser britado. Por exemplo, a linha horizontal tracejada do Gráfico 29 indica o valor médio de angularidade do material constituído apenas por

partículas de 12,5 mm, utilizado para ser britado, e as colunas com preenchimento tracejado indicam a angularidade das frações resultantes dessa britagem. Nota-se que, apesar de o objetivo inicial ter sido avaliar a influência do tamanho das partículas da alimentação, surgiu outra variável: as propriedades de forma iniciais, próprias de cada fração, logo, estas devem ser também consideradas. O Gráfico 31, relativo à forma 2D, não apresenta as linhas horizontais, pois os materiais utilizados como alimentação foram todos de partículas graúdas, enquanto a forma 2D aplica-se apenas a partículas miúdas.

Gráfico 29 – Angularidade média por fração dos agregados gerados por britador de mandíbulas com variação do tamanho das partículas de alimentação



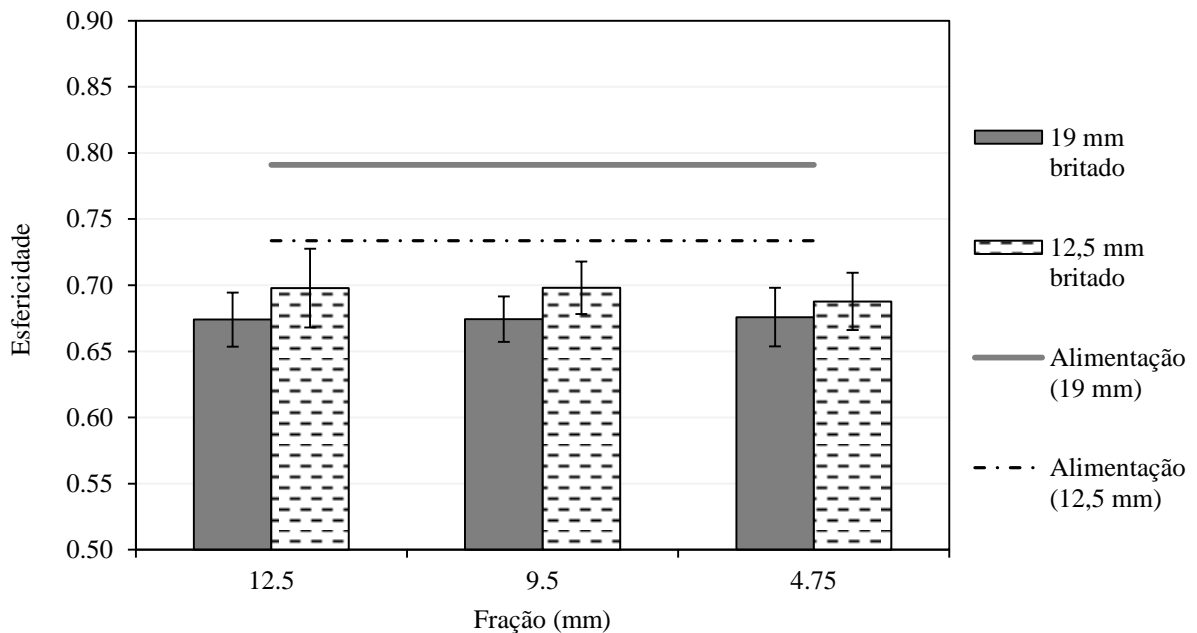
Fonte: Elaborado pela autora.

Não houve um comportamento padrão para todas as frações graúdas, de aumento ou de redução das propriedades com a variação do tamanho do material de alimentação. Apenas a fração de 12,5 mm mostrou um resultado significativo para a angularidade, em que o material gerado pela britagem de partículas de 19 mm apresentou-se mais angular que o gerado pela britagem de partículas de 12,5 mm. Pode-se interpretar esse resultado considerando que quebras menos intensas dos ângulos das partículas (o que ocorre para a alimentação de 12,5 mm forçadas a passar por uma APF de 10 mm) tornam-nas menos angulares em relação ao que eram originalmente, enquanto quebras mais intensas (alimentação de 19 mm forçada a passar por uma APF de 10 mm) podem atuar de forma contrária, elevando seu grau de angularidade. Para as frações miúdas, apesar de os resultados

também terem sido próximos, notou-se um padrão de crescimento da angularidade com a redução do tamanho das partículas de alimentação, fato que parece corresponder à angularidade inicial do material.

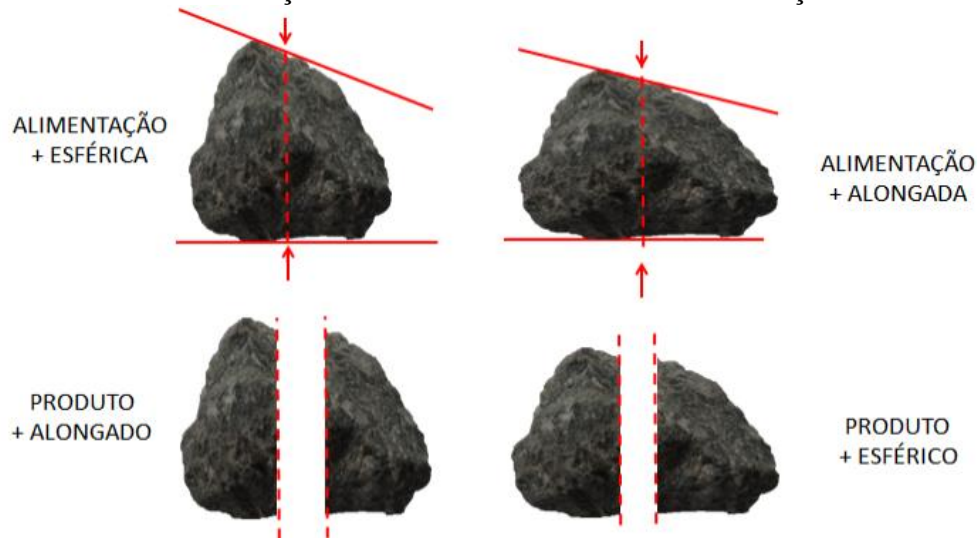
A esfericidade não apresentou diferenças significativas, porém, indicou o mesmo padrão para as três frações: aumento da esfericidade com a redução do tamanho das partículas de alimentação (aproximação desse tamanho da abertura do britador, assim como foi visto para o britador cônico). Outra interpretação que pode ser considerada, neste caso, é baseada na forma inicial do agregado: o material de alimentação mais lamelar (linha verde, com menor esfericidade) foi fragmentado em partículas mais esféricas, enquanto o material de alimentação mais esférico gerou partículas mais alongadas (Figura 31). A forma 2D não mostrou tendências nem diferenças significativas entre os materiais, indicando que as variações foram produto da aleatoriedade da britagem e das amostras.

Gráfico 30 – Esfericidade média por fração dos agregados gerados por britador de mandíbulas com variação do tamanho das partículas de alimentação



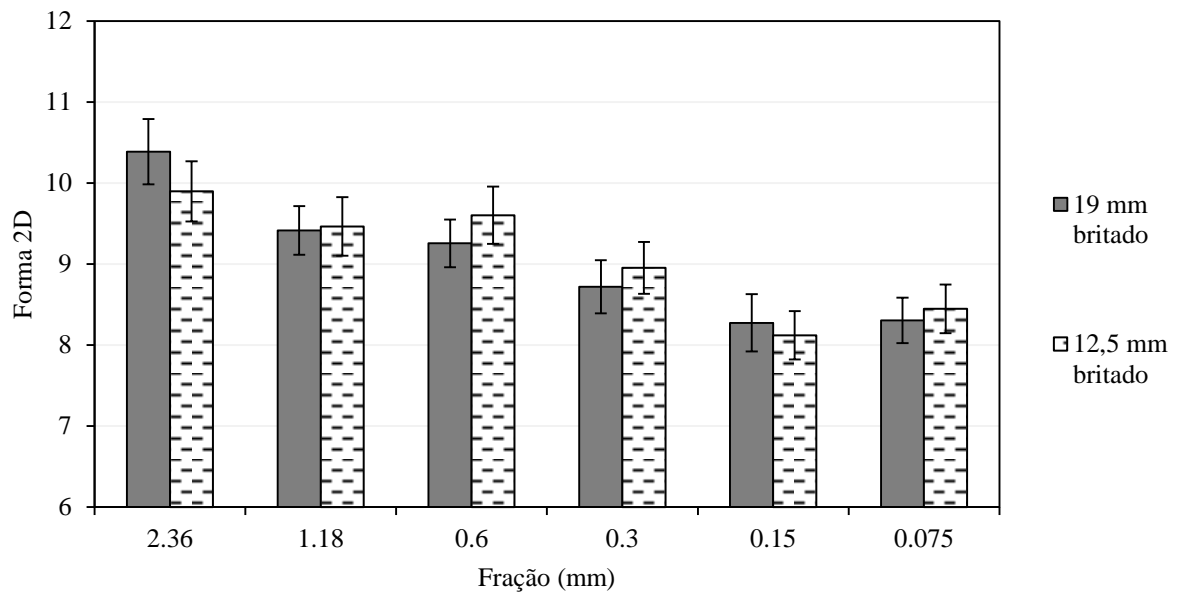
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 31 – Interpretação para o resultado de esfericidade do produto de britador de mandíbulas com variação do tamanho do material de alimentação



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 31 – Forma 2D média por fração dos agregados gerados por britador de mandíbulas com variação do tamanho das partículas de alimentação



Fonte: Elaborado pela autora.

Apresentam-se, na Tabela 18, os resultados dos testes de hipóteses realizados entre as médias amostrais. Comparando os valores-p com o nível de significância de 0,05, percebeu-se que poucas frações realmente indicaram uma diferença entre as médias populacionais. Os valores marcados em **negrito**, menores que 0,05, deram indícios suficientes para rejeitar a hipótese de que as duas amostras vieram de populações com médias iguais (hipótese nula), ou seja, de que a variação do tamanho da alimentação não influenciou as propriedades de forma das partículas produzidas. Deve-se ressaltar, como foi visto, que as propriedades de forma dos dois grupos – alimentação de 12,5 mm e alimentação de 19 mm –

já mostravam diferenças, portanto, não há como separar, neste caso, a real influência dessas propriedades de forma iniciais da real influência do tamanho da alimentação no material produzido.

Tabela 18 – Teste de hipóteses para comparação de médias – Variação da alimentação

Propriedade	Estatística	Fração								
		12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Esfericidade	t	1,335	1,781	0,761	-	-	-	-	-	-
	t crítico	1,68	1,66	1,66	-	-	-	-	-	-
	Valor-p	0,09	0,04	0,22	-	-	-	-	-	-
Angularidade	t	3,307	0,379	0,052	0,759	1,322	0,971	1,897	1,076	0,656
	t crítico	1,67	1,66	1,66	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Valor-p	0,00	0,35	0,48	0,22	0,09	0,17	0,03	0,14	0,26
Forma 2D	t	-	-	-	1,756	0,204	1,480	1,006	0,654	0,681
	t crítico	-	-	-	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
	Valor-p	-	-	-	0,04	0,42	0,07	0,16	0,26	0,25

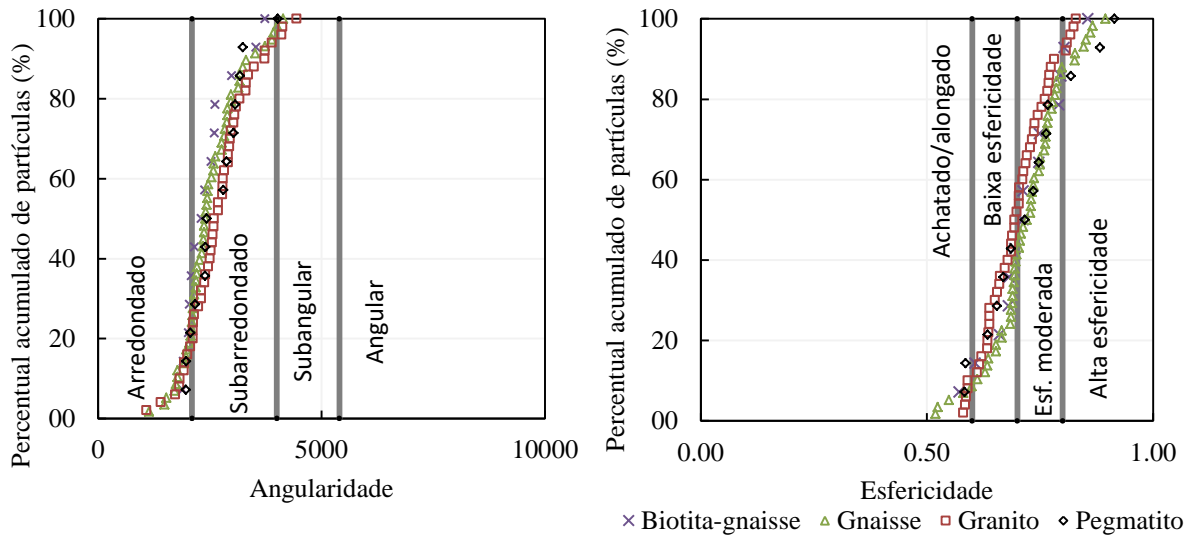
Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Diferentes composições mineralógicas presentes em cada agregado

Para avaliar a influência da mineralogia na forma e na angularidade de agregados graúdos, mantendo constante qualquer parâmetro de britagem, foram utilizados os subgrupos separados de cada agregado com base na mineralogia (correspondentes às lâminas utilizadas nas análises petrográficas). Os Gráficos de 32 a 34 apresentam o percentual acumulado de partículas ao longo dos valores das duas propriedades de forma. O agregado da Pedreira B não fez parte desta etapa por ser um material homogêneo, de forma que só foi analisada uma lâmina de sua rocha.

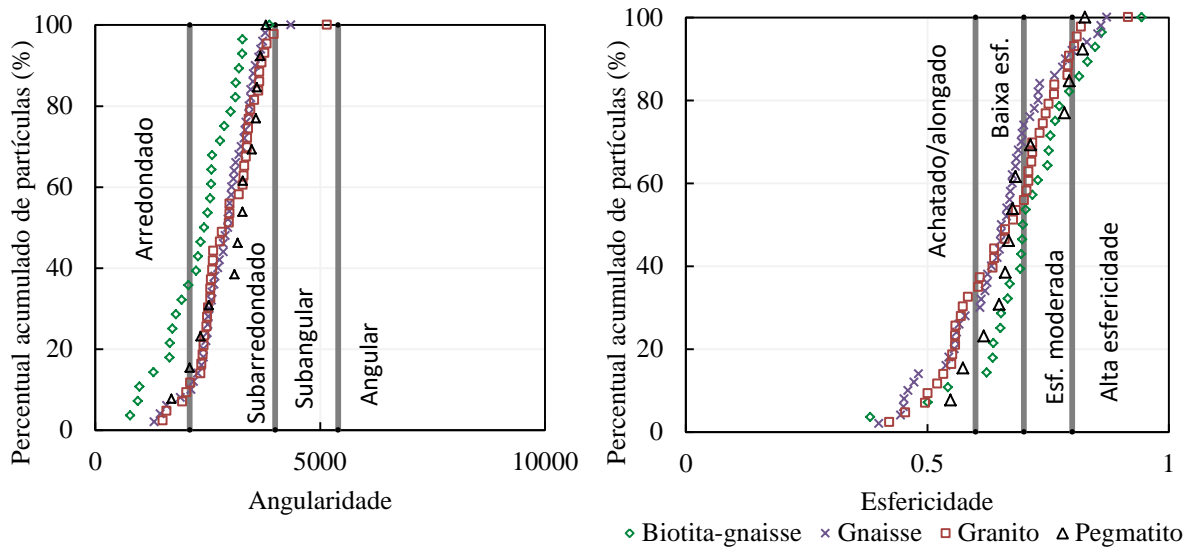
Nota-se que a maior parte das curvas se sobrepõe, indicando que não há diferenças na forma e na angularidade causadas pelas variações de mineralogia que existem dentro de cada agregado (sua heterogeneidade). A curva que mostra maior separação em relação às outras é a que representa a angularidade da fração de biotita-gnaiss do agregado C (Gráfico 33), com menores valores de angularidade. Esse padrão, entretanto, não é seguido pela fração de biotita-gnaiss dos agregados A e D, podendo-se concluir que não pode ser generalizado.

Gráfico 32 – Distribuição de angularidade e de esfericidade das partículas do agregado da Pedreira A separadas por mineralogia



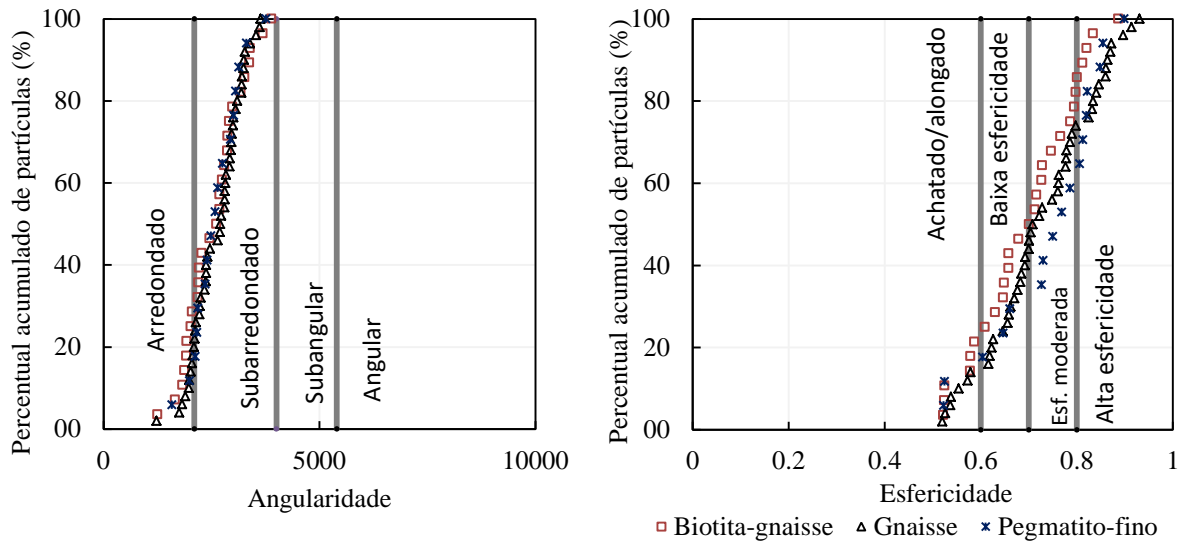
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 33 – Distribuição de angularidade e de esfericidade das partículas do agregado da Pedreira C separadas por mineralogia



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 34 – Distribuição de angularidade e de esfericidade das partículas do agregado da Pedreira D separadas por mineralogia



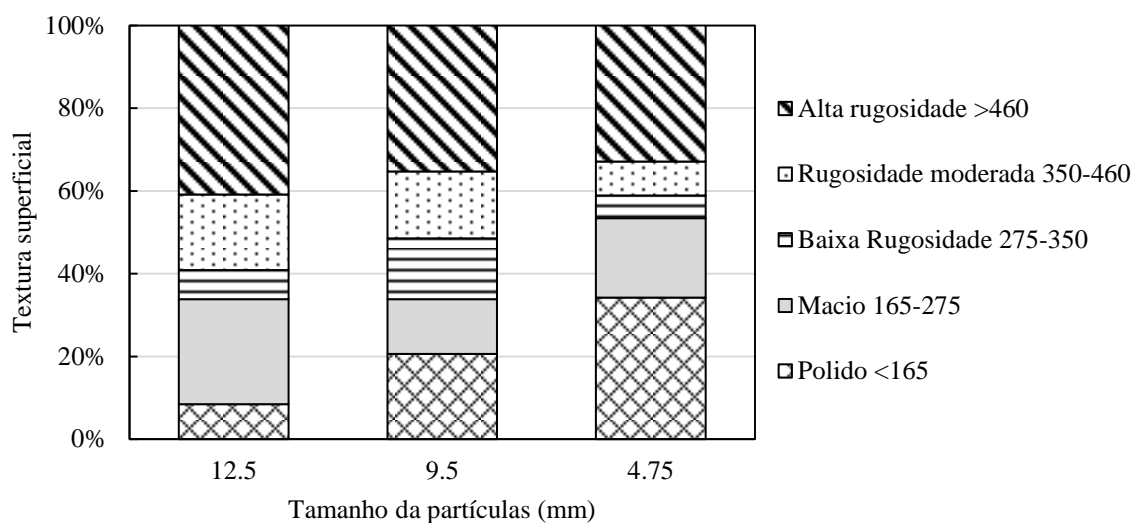
Fonte: Elaborado pela autora.

4.3 Investigação da textura superficial

4.3.1 Variação entre agregados de diferentes origens

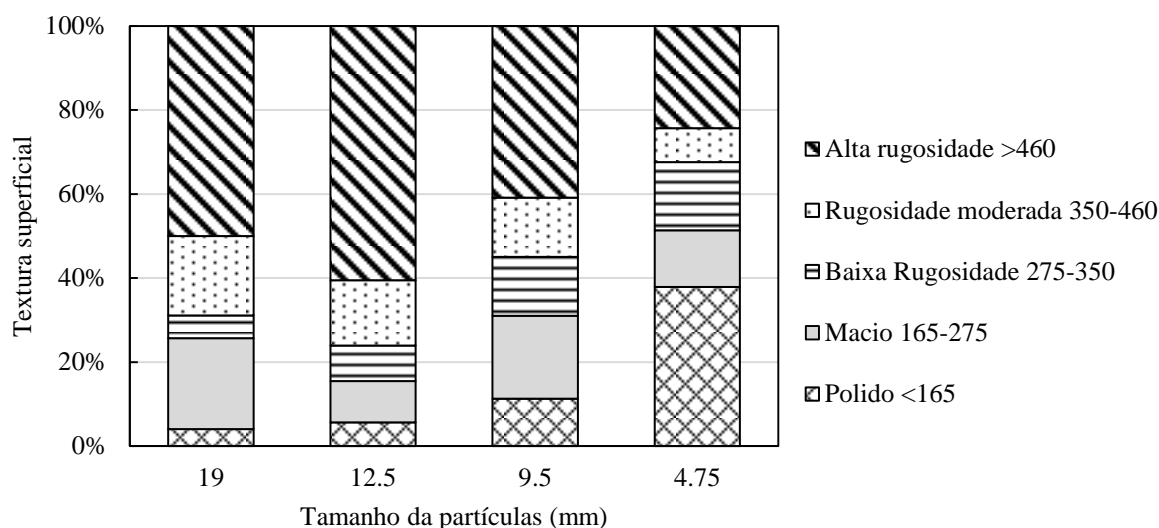
Nesta etapa, foram analisados os agregados oriundos de cada local com relação à textura superficial e buscadas as relações dessa propriedade com as características das respectivas rochas de origem, a partir das análises petrográficas. Observa-se, no Gráfico 35, que o agregado A-ML, de composição predominantemente gnáissica e gerado por britador de mandíbulas de laboratório, apresenta, para a fração de 12,5 mm, em torno de 40% de suas partículas na classe de alta rugosidade, percentual que sofre uma pequena redução, enquanto as classes de textura superficial mais baixa ganham espaço à medida que se caminha para as frações menores. No Gráfico 36, observam-se os resultados do agregado A-C (mesma origem, mas gerado por britador cônico; foi o agregado que serviu de alimentação para o britador de mandíbulas de laboratório para gerar o agregado A-ML). Pode-se perceber que esse material (A-C) apresentava maiores percentuais de partículas com alta rugosidade e, portanto, sofreu um processo de polimento ao passar pelo britador de mandíbulas, resultando em um material com menor rugosidade (A-ML).

Gráfico 35 – Distribuição de partículas do agregado A-ML nas classes de textura superficial



Fonte: Elaborado pela autora.

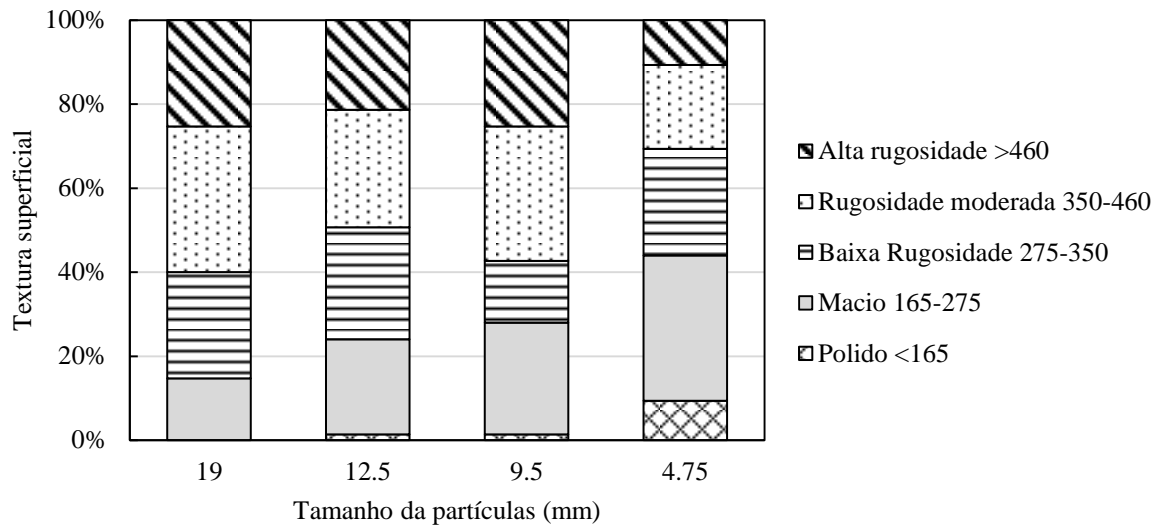
Gráfico 36 – Distribuição de partículas do agregado A-C nas classes de textura superficial



Fonte: Elaborado pela autora.

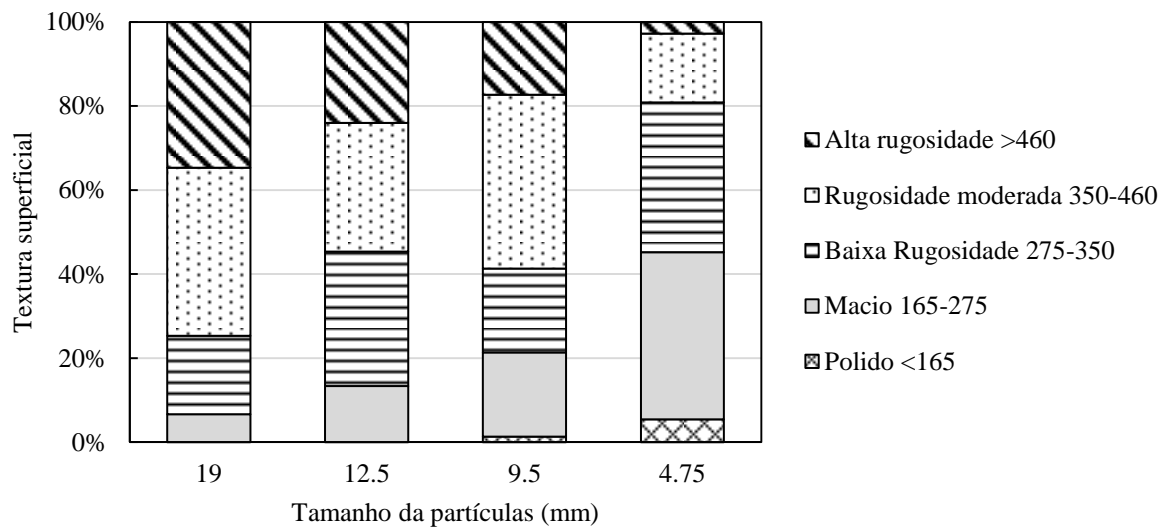
Os Gráficos 37 e 38 apresentam os resultados dos agregados oriundos da Pedreira B (rocha fonolítica) gerados, respectivamente, por britador de mandíbulas e de impacto. Não foram identificadas diferenças expressivas entre eles. Ressalta-se que, pelo fato de que a textura superficial é uma propriedade que apresenta altas dispersões dentro de cada agregado, se comparada às outras propriedades de forma, deve-se ter cuidado ao realizar comparações, pois muitas diferenças vistas podem ser apenas variações resultantes da aleatoriedade das amostras. Mais adiante, serão utilizados intervalos de confiança em torno das médias, assim como foi realizado para as outras propriedades.

Gráfico 37 – Distribuição de partículas do agregado B-M nas classes de textura superficial



Fonte: Elaborado pela autora.

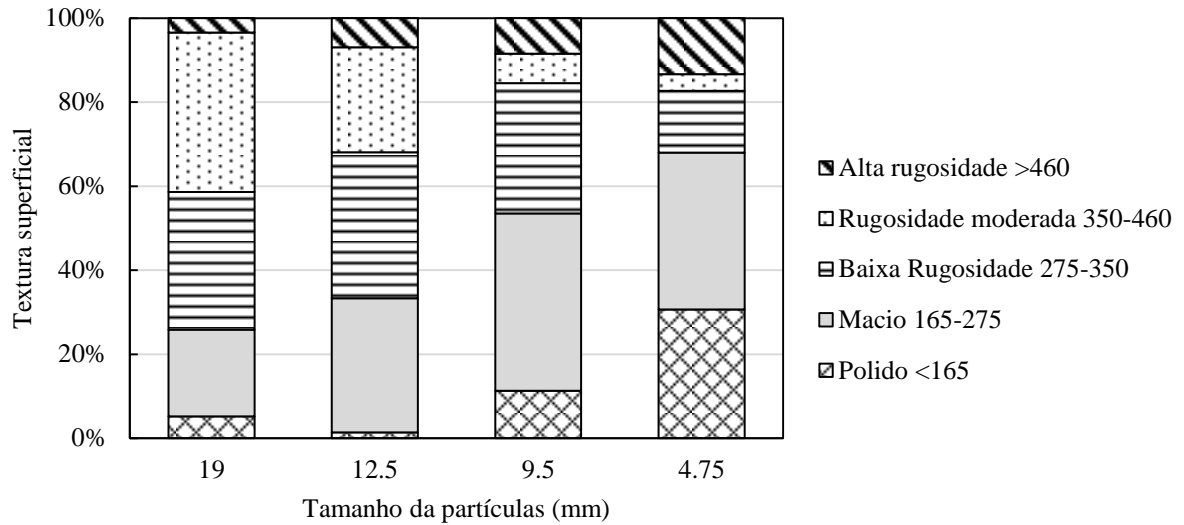
Gráfico 38 – Distribuição de partículas do agregado B-I nas classes de textura superficial



Fonte: Elaborado pela autora.

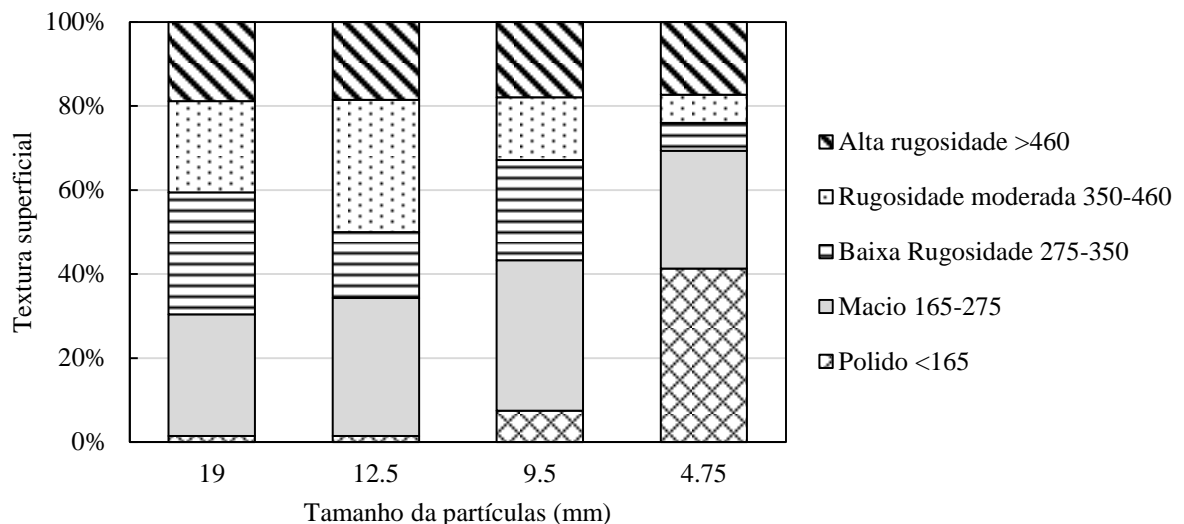
Os agregados C-C (Gráfico 39) e D-C (Gráfico 40), predominantemente gnáissicos, apresentaram menores quantidades de partículas com altas rugosidades que os agregados de origem A e B. Cabe lembrar que as principais diferenças de composição mineralógica vistas entre esses dois agregados e o agregado de origem A foi a menor quantidade de biotita e maior quantidade de quartzo, que pode ser a causa de partículas menos rugosas.

Gráfico 39 – Distribuição de partículas do agregado C-C nas classes de textura superficial



Fonte: Elaborado pela autora.

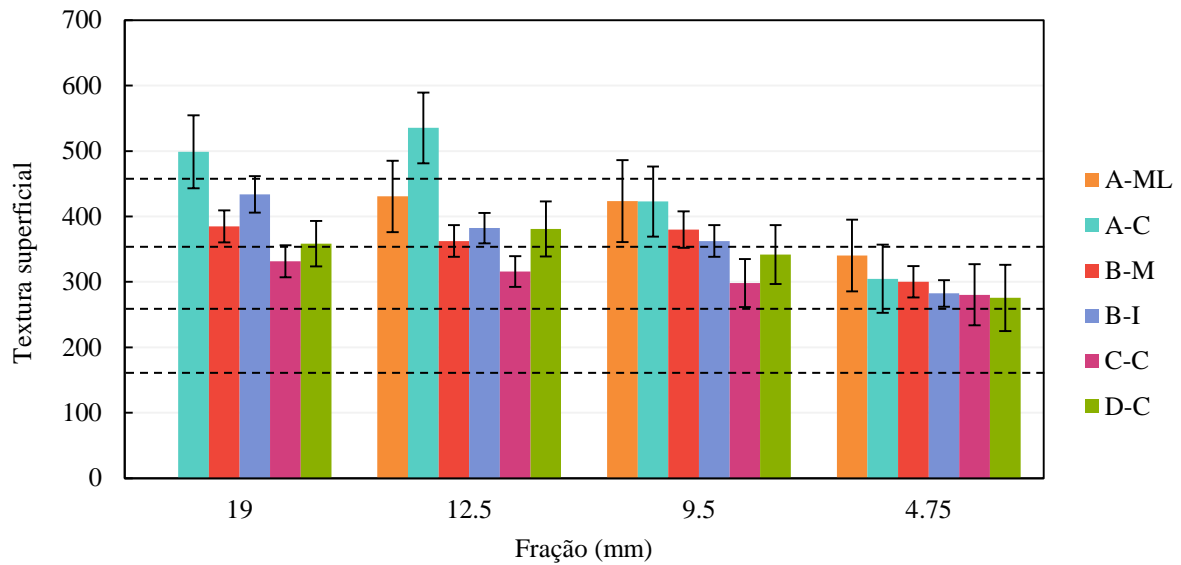
Gráfico 40 – Distribuição de partículas do agregado D-C nas classes de textura superficial



Fonte: Elaborado pela autora.

No Gráfico 41, pode-se comparar mais objetivamente a textura superficial dos agregados. O agregado mais rugoso, no geral, foi o de origem gnáissica, gerado por britador cônico (A-C), com maior percentual de biotita e menor percentual de quartzo. Entre os agregados de origem C e D, com composições mineralógicas muito próximas, um fator que pode ter contribuído para a maior rugosidade do agregado D é a maior porcentagem de contatos serrilhados entre os minerais (60%), contra os 38% do agregado C, pois, com a quebra, a forma desses contatos fica à mostra na superfície da partícula, gerando irregularidades que podem ser traduzidas como textura superficial.

Gráfico 41 – Resultados de textura superficial



Fonte: Elaborado pela autora.

Os agregados de origem fonolítica (B-M e B-I) apresentaram rugosidade intermediária, mostrando que, mesmo sendo o material de composição mais diferente, houve maior distinção entre os próprios agregados de classificações semelhantes (gnáissica/granítica) que entre estes e o fonólito. Esse fato chama atenção para a importância de se verificar as diferenças entre materiais que parecem ser (e muitas vezes são considerados) semelhantes (rochas com mesma classificação), como ocorre na RMF.

A queda da textura superficial no sentido das menores partículas, que, no geral, é um comportamento padrão para todos os agregados, em maior ou menor grau, pode ser interpretada de duas maneiras. A primeira seria pela ideia de que as partículas menores passaram por maior desgaste para chegar a esses tamanhos, sofrendo, simultaneamente às quebras, maior polimento e, conseqüentemente, tornaram-se menos rugosas. Outra interpretação possível seria a possibilidade de que, nesses materiais, partículas com maior textura superficial, devido à sua mineralogia, possuam maior resistência à quebra, de forma que as frações menores acabam sendo compostas por partículas que quebram mais facilmente, ou seja, com menor rugosidade (não pela textura superficial em si, mas pela composição mineralógica da rocha a que corresponde essa textura).

A rugosidade dos agregados pode ser uma vantagem em algumas situações, como quando se deseja uma maior aderência entre o agregado e o ligante asfáltico em revestimentos asfálticos, ou entre o agregado e a pasta de cimento no caso de concretos. Em materiais em que não é utilizado nenhum aglomerante, como em bases de pavimentos, a rugosidade pode

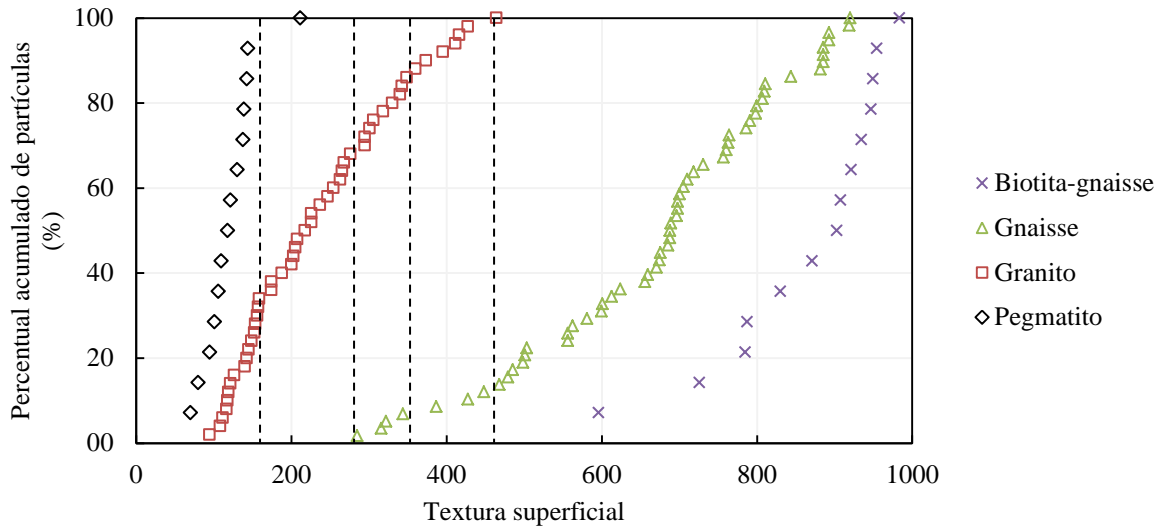
melhorar o atrito e, conseqüentemente, o intertravamento entre partículas de agregado. Por outro lado, essa condição aumenta o consumo do ligante ou do cimento, que, por serem os componentes mais onerosos, elevam o custo do material como um todo. Toda seleção de agregados, portanto, deve ser analisada e realizada caso a caso.

4.3.2 Variação entre partículas do mesmo agregado

Para avaliar mais detalhadamente a influência da mineralogia na textura superficial dos agregados, foram utilizadas partículas de 12,5 mm dos subgrupos separados de cada agregado com base na mineralogia (correspondentes às lâminas utilizadas nas análises petrográficas). Os Gráficos de 42 a 45 apresentam o percentual acumulado de partículas ao longo dos valores da textura superficial.

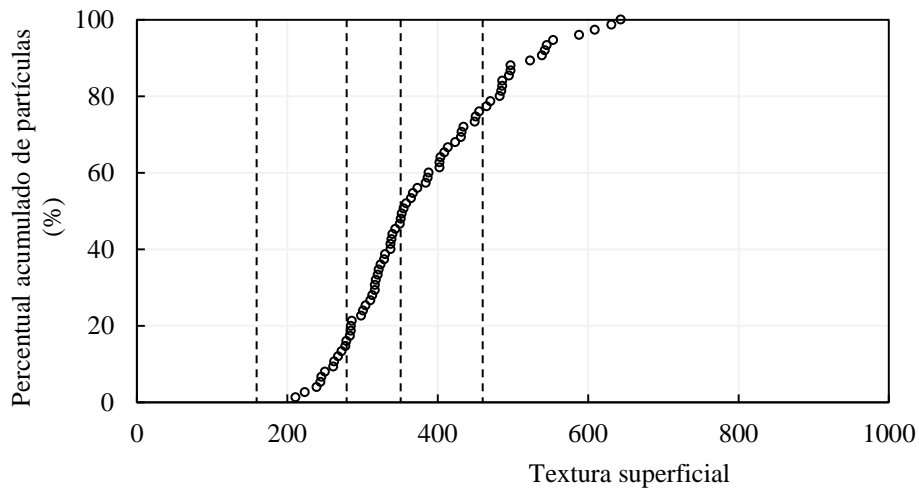
Pode-se perceber uma clara diferença nas distribuições de textura superficial entre os subgrupos formados. Todos os agregados apresentam o mesmo comportamento: a fração com maior textura superficial é a biotita-gnaiss, seguida do gnaiss, do granito, e, finalmente, do pegmatito, que é um granito com grãos de grandes dimensões. Nota-se que a presença de biotita parece estar fortemente relacionada a esse comportamento, podendo ser o principal indicador da textura superficial de granitos e gnaisses, provavelmente devido à sua ocorrência em massas lamelares. A biotita, assim, torna a superfície dos agregados mais áspera que os minerais cujos grãos apresentam forma irregular. O pegmatito, por ser composto por grãos de minerais com dimensões maiores e, geralmente, pouca ou nenhuma biotita, possui uma superfície mais lisa, pois a simples presença de mais contatos entre minerais (que ocorre quando os grãos apresentam menor tamanho) pode causar uma irregularidade superficial na partícula, afetando sua textura superficial. O fonólito oriundo da Pedreira B (Gráfico 43), como era esperado devido à já citada homogeneidade de sua mineralogia, apresentou uma distribuição de textura superficial menos dispersa, variando aproximadamente entre 200 e 650, enquanto todos os outros agregados mostraram valores, aproximadamente, de 70 até bastante próximos a 1.000.

Gráfico 42 – Distribuição de textura superficial do agregado da pedra A fracionado por composição mineral (granito/gnaiss)



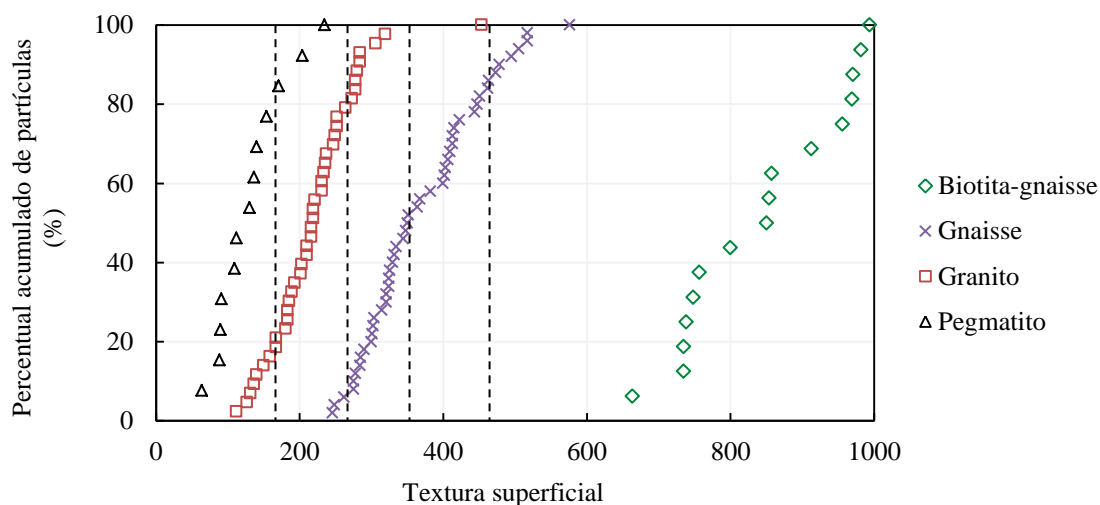
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 43 – Distribuição de textura superficial do agregado da pedra B (fonólito)



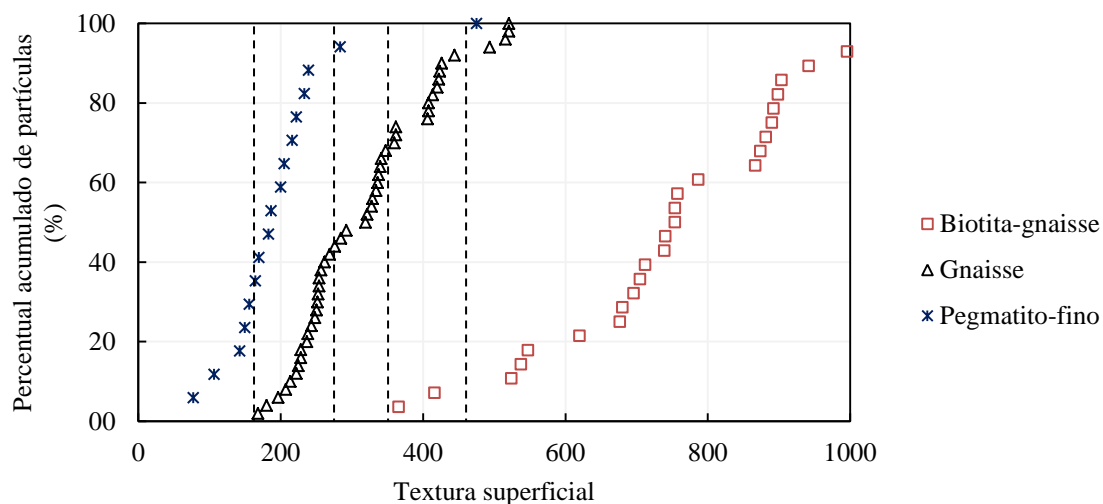
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 44 – Distribuição de textura superficial do agregado da pedra C fracionado por composição mineral (granito/gnaisse)



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 45 – Distribuição de textura superficial do agregado da pedra D fracionado por composição mineral (granito/gnaisse)



Fonte: Elaborado pela autora.

4.4 Análise da resistência à degradação

Neste tópico, são apresentados os resultados dos ensaios de desgaste e de choque aos quais foram submetidos os agregados, e serão buscadas as relações entre os resultados e as características iniciais de cada material.

4.4.1 Resistência ao choque – Treton

A Tabela 19 reúne os resultados do ensaio de resistência ao choque (na primeira linha, “Resistência Treton”) e outras informações que puderam ser retiradas do ensaio, como a quantidade de partículas que não sofreram quebra e continuaram retidas na peneira de 16 mm e a porcentagem em massa dessas partículas e das que ficaram retidas na peneira de 12,5 mm. Além disso, a tabela inclui alguns valores relacionados às características iniciais dos agregados, a fim de utilizá-las para buscar interpretar os resultados obtidos.

Tabela 19 – Resultados médios do ensaio de resistência ao choque - Treton

Agregado		A-C	B-M	B-I	C-C	D-C
Resultados	Resistência Treton (a = % massa > 1,68 mm)	95,3	90,1	94,8	91,6	92,0
	Quantidade partículas > 16 mm (b)	12,3	3,0	8,3	3,7	2,7
	% Massa > 16 mm (c)	55,5	12,9	38,1	18,8	12,8
	% Massa >12,5 mm (d)	75,7	32,5	62,6	53,4	30,1
Características iniciais das partículas	% partículas com lamelaridade > 2:1 (e)	20,2	86,7	45,0	38,3	20,0
	Angularidade inicial média (f)	2536,3	3242,4	3041,4	2572,3	2413,1
	Textura inicial média (g)	513,2	348,6	416,5	302,6	324,8
	Esfericidade inicial média (h)	0,75	0,63	0,72	0,74	0,79

Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar que os cinco agregados tiveram valores de resistência do ensaio Treton acima de 90% de massa retida na peneira de 1,68 mm de abertura, todos entre 90% e 96%. Esses valores, entretanto, representam apenas a perda de partículas miúdas (menores que 1,68 mm), e não as quebras em outros níveis que aconteceram no material. Por isso, foram calculadas a quantidade e a massa de partículas que se mantiveram acima de 16 mm (seu tamanho inicial), e a massa das que passaram para a peneira imediatamente inferior (12,5 mm).

Foi gerada uma tabela de correlação (Tabela 20) entre as variáveis presentes na Tabela 19, para fornecer uma visão geral de possíveis relações. A resistência Treton (*a*) apresentou coeficientes de correlação coerentes com os outros resultados retirados do ensaio (*b*, *c* e *d*). Ao contrário do que se poderia esperar, as propriedades relacionadas à forma (esfericidade e lamelaridade), isoladas, não mostraram explicar os resultados do ensaio Treton. Ao compará-las entre si, nota-se que o percentual de partículas com lamelaridade maior que 2:1 (*e*) mostrou melhores coeficientes de correlação com as quatro variáveis de resultado, *a*, *b*, *c* e *d* que a esfericidade (*h*).

A angularidade mostrou os piores coeficientes de correlação com as variáveis de resultados. Outro fato que chama a atenção é o indício de alta correlação da textura superficial com os resultados da resistência ao choque. Ressalta-se que nem sempre a existência de uma

boa correlação significa uma relação de causa e efeito. Acredita-se que a textura superficial, em si, ou seja, a rugosidade da superfície, não influencie a resistência ao choque das partículas de agregado, entretanto, por ela estar extremamente relacionada à mineralogia da rocha, como foi visto no tópico 4.3.1, pode indicar uma verdadeira correlação. Cabe lembrar que, nos agregados de predominância granítica/gnássica, a textura superficial pareceu indicar o nível de presença da biotita. Não foram incluídos aqui parâmetros das análises petrográficas, pois muitos deles não foram aplicáveis a todos os agregados, de forma que há certa dificuldade de se comparar quantitativamente os agregados de origem granítica/gnássica com o agregado fonolítico, por este ter uma estrutura bastante distinta dos demais.

Tabela 20 – Tabela de correlações dos resultados do ensaio de resistência ao choque – Treton

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	
Resistência Treton	<i>a</i>	1,000							
Quantidade partículas > 16 mm	<i>b</i>	0,913	1,000						
% Massa > 16 mm	<i>c</i>	0,922	0,999	1,000					
% Massa >12,5 mm	<i>d</i>	0,859	0,920	0,937	1,000				
% partículas com lamelaridade > 2:1	<i>e</i>	-0,609	-0,401	-0,429	-0,412	1,000			
Angularidade inicial média	<i>f</i>	-0,250	-0,105	-0,133	-0,156	0,907	1,000		
Textura inicial média	<i>g</i>	0,831	0,964	0,949	0,789	-0,290	-0,008	1,000	
Esfericidade inicial média	<i>h</i>	0,455	0,183	0,213	0,214	-0,970	-0,915	0,068	1,000

Fonte: Elaborado pela autora.

Com base nos resultados da Tabela 20, optou-se por realizar a análise de algumas regressões lineares, com nível de significância de 0,05, utilizando as variáveis que indicaram melhores coeficientes de correlação. As Tabelas de 21 a 26 apresentam as informações resultantes das regressões lineares e os Gráficos de 46 a 48 relacionam os valores esperados por cada regressão com os valores realmente obtidos do ensaio. A regressão A, em que se buscou prever o resultado próprio da norma do ensaio Treton a partir da textura superficial e da lamelaridade do agregado, apresentou R^2 de 0,84 e F de significação de 0,161. Considerando o nível de significância adotado de 0,05, pode-se dizer que essas variáveis independentes não descreveram bem a variável dependente (0,161 maior que 0,05, logo, não foi significativo).

Tabela 21 – Estatísticas da regressão A

R múltiplo	R²	R² ajustado	Erro padrão	Observações	ANOVA: F de significação
0,92	0,84	0,68	1,26	5	0,16

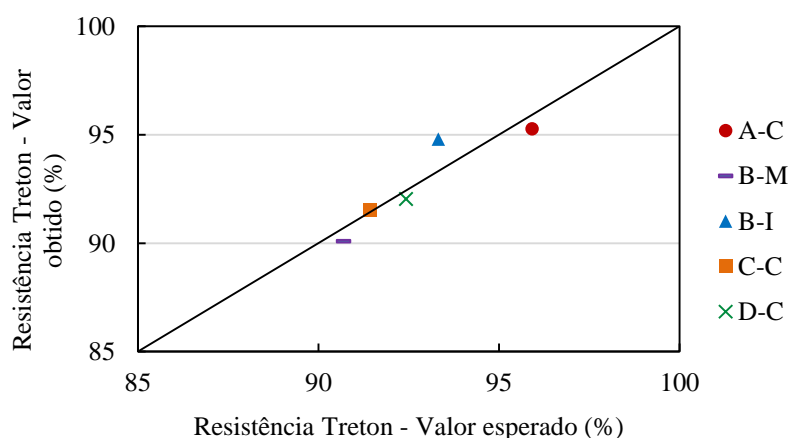
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 22 – Equação de regressão A

	Interseção	% partículas com lamelaridade > 2:1	Textura inicial média
Coefficientes	87,05193	-0,03258	0,018568
Erro padrão	3,417358	0,024066	0,007702
Estatística t	25,47346	-1,35357	2,410836
Valor-P	0,001538	0,308552	0,137453
Inferior 95%	72,34822	-0,13612	-0,01457
Superior 95%	101,7556	0,070973	0,051706

Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 46 – Resistência Treton: obtido X esperado pela regressão A



Fonte: Elaborado pela autora.

Na regressão B, utilizaram-se as mesmas variáveis independentes, mas agora a fim de prever a quantidade de partículas que não sofreram quebra suficiente para passar pela peneira com abertura de 16 mm, um indicativo da resistência dos agregados ao choque. Obteve-se um maior R^2 , se comparado ao da regressão A. O F de significação foi de 0,05, valor igual ao nível de significância escolhido, portanto, pode-se dizer que a porcentagem de partículas lamelares e a textura superficial dos agregados podem fornecer uma boa previsão da quantidade de partículas que continuam retidas na sua peneira inicial após o ensaio de resistência ao choque.

Tabela 23 – Estatísticas da regressão B

R múltiplo	R^2	R^2 ajustado	Erro padrão	Observações	ANOVA: F de significação
0,97	0,95	0,89	1,39	5	0,05

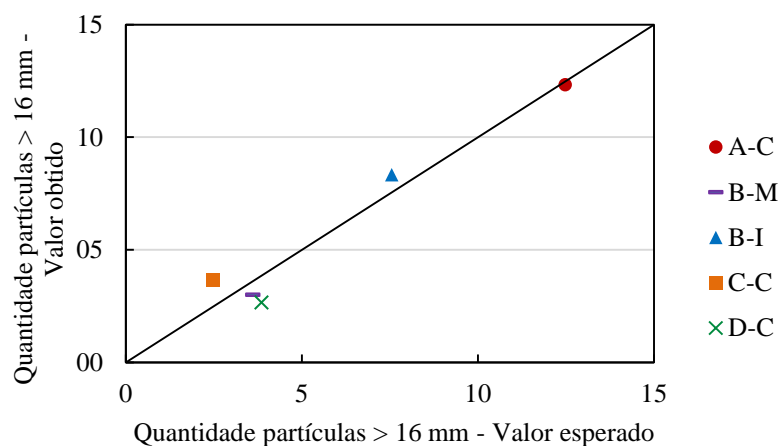
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 24 – Equação de regressão B

Parâmetro	Interseção	% partículas com lamelaridade > 2:1	Textura inicial média
Coefficientes	-10,63	-0,02	0,046
Erro padrão	3,77	0,03	0,008
Estatística t	-2,82	-0,75	5,400
Valor-P	0,11	0,53	0,033
Inferior 95%	-26,84	-0,13	0,009
Superior 95%	5,58	0,09	0,082

Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 47 – Quantidade de partículas > 16 mm: obtida X esperada pela regressão B



Fonte: Elaborado pela autora.

Observando os valores-p dos coeficientes de cada variável independente da regressão B (Tabela 24), nota-se que a textura superficial (valor-p de 0,033) mostrou-se mais significativa que a porcentagem de partículas lamelares (valor-p de 0,53). Decidiu-se, então, avaliar uma regressão linear simples, semelhante à B, mas utilizando como variável independente apenas a textura superficial. O R^2 obtido foi menor que o anterior, entretanto, o R^2 ajustado, indicado para comparar regressões com quantidades de parâmetros distintas, foi maior, o que significa que a variável porcentagem de partículas lamelares não acrescentou informações significativas à regressão. A textura superficial natural dos agregados estudados, portanto, sugeriu manter uma forte relação com sua resistência ao choque. A biotita, ao contrário do que se poderia esperar pela sua baixa dureza, indicou elevar a resistência dos agregados ao choque (o agregado A-C mostrou-se o mais resistente). Como esse mineral apresenta cristais na forma de folhas flexíveis e elásticas, ele pode ter agido, até certo ponto, como um melhorador da resistência à tração das partículas, tornando-as mais resilientes. Ressalta-se que os agregados das Pedreiras C e D, apesar de terem apresentado menores teores médios de biotita, apresentaram maiores porcentagens da fração de biotita-gnaiss que o agregado da Pedreira A.

Apesar do maior R^2 ajustado da regressão C, no caso dos agregados B-M e B-I, de mesma origem (fonolítica) e gerados por britadores distintos (de mandíbulas e de impacto), a diferença de textura superficial (348,6 e 416,5, respectivamente) deve ser atribuída não a variações na mineralogia, mas sim, ao fato de que o britador de impacto proporciona uma britagem com menor atrito e, conseqüentemente, menor polimento. Acredita-se que a diferença entre seus resultados de resistência provenientes do ensaio, portanto, deveu-se realmente à maior lamelaridade do agregado B-M, e não à sua menor textura superficial. Dessa forma, a despeito dos resultados das regressões, considera-se importante incluir o parâmetro de forma das partículas como variável previsora da resistência ao choque.

Tabela 25 – Estatísticas da regressão C

R múltiplo	R ²	R ² ajustado	Erro padrão	Observações	ANOVA: F de significação
0,96	0,93	0,91	1,28	5	0,01

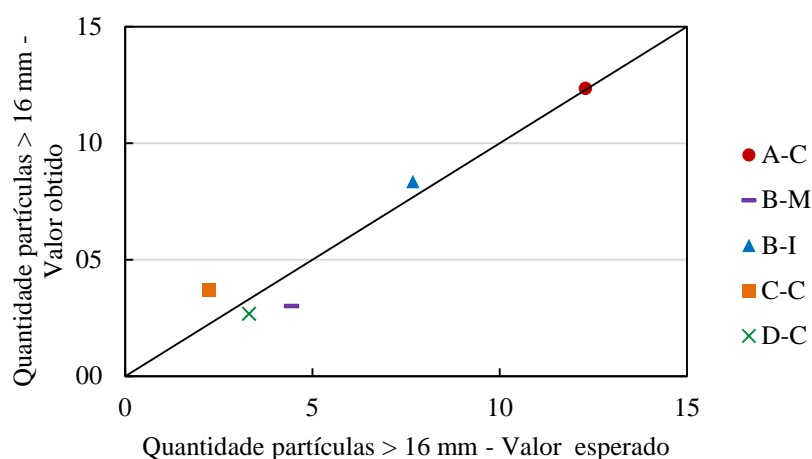
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 26 – Equação de regressão C

	Interseção	Textura inicial média
Coefficientes	-12,18	0,048
Erro padrão	2,92	0,008
Estatística t	-4,17	6,345
Valor-P	0,03	0,008
Inferior 95%	-21,48	0,024
Superior 95%	-2,88	0,072

Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 48 – Quantidade de partículas > 16 mm: obtida X esperada pela regressão C



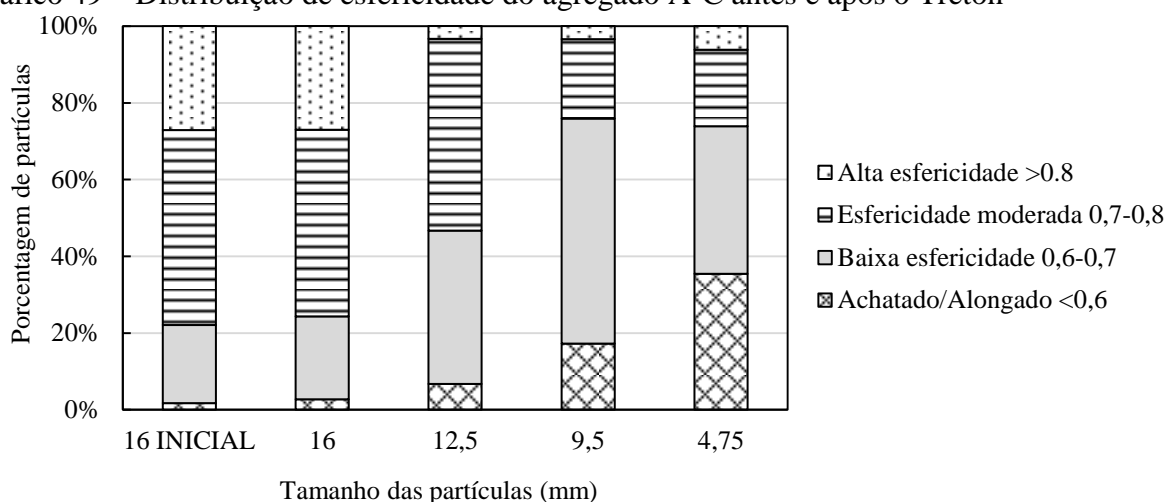
Fonte: Elaborado pela autora.

A seguir, apresentam-se as distribuições das partículas nas classes de cada propriedade de forma, antes e depois de submetidas ao Treton. A fração inicial é composta

sempre de partículas retidas na peneira com abertura de 16 mm, e as frações após o ensaio são retidas nas peneiras de aberturas 16; 12,5; 9,5 e 4,75 mm.

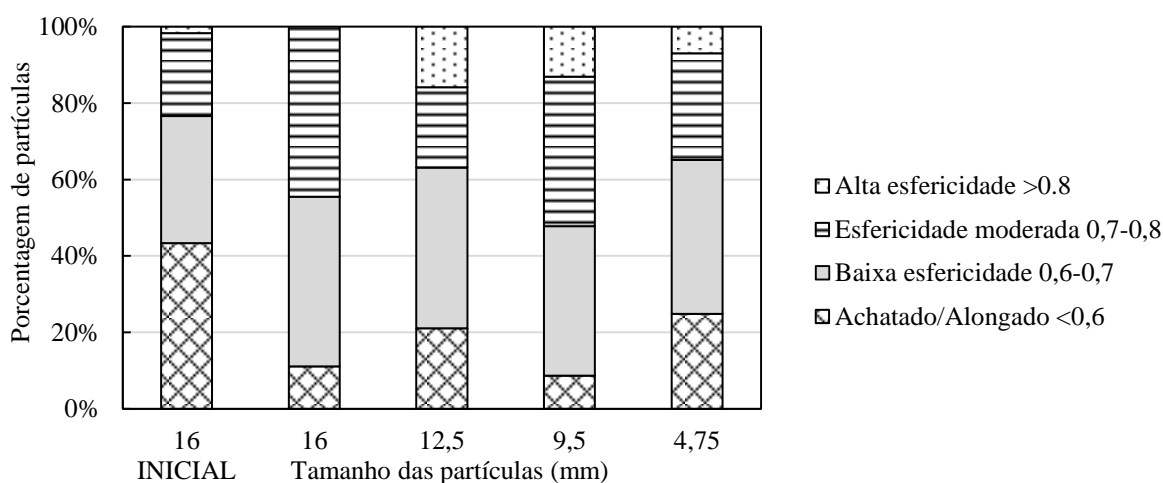
Observando os gráficos relativos à esfericidade (Gráficos de 49 a 53), nota-se que o comportamento padrão dos agregados que inicialmente possuíam partículas com maior esfericidade (A-C, B-I, C-C e D-C) foi de resultar em partículas de 16 mm com distribuição de esfericidade semelhante à inicial e de mostrar uma redução da esfericidade à medida que se reduz o tamanho da partícula, assim como se observou anteriormente nos agregados gerados por britadores cônicos. Por outro lado, o agregado B-M, que inicialmente apresentava partículas mais lamelares, resultou em partículas mais esféricas e sem a queda de esfericidade no sentido das menores partículas, sugerindo seguir o comportamento discutido com a Figura 31.

Gráfico 49 – Distribuição de esfericidade do agregado A-C antes e após o Treton



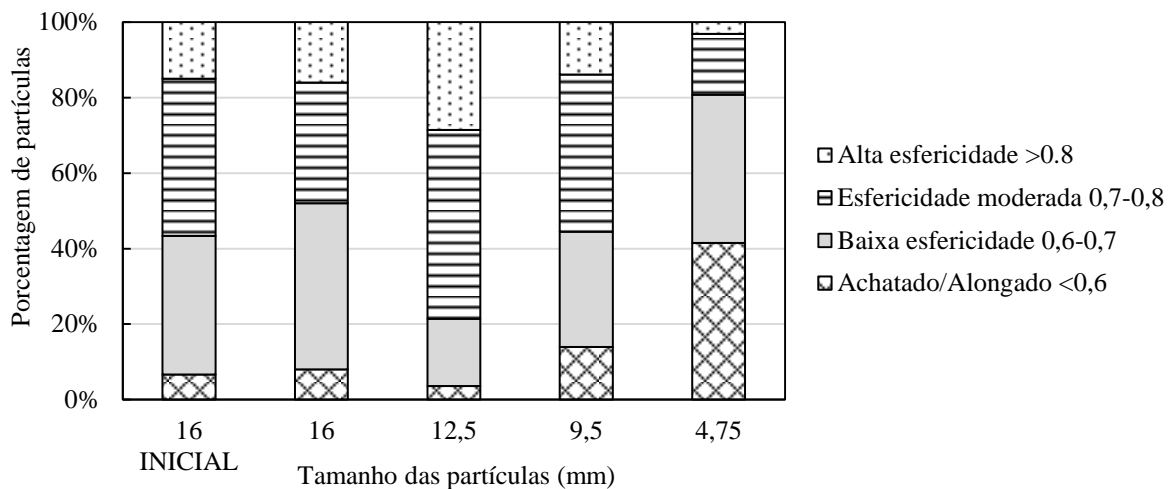
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 50 – Distribuição de esfericidade do agregado B-M antes e após o Treton



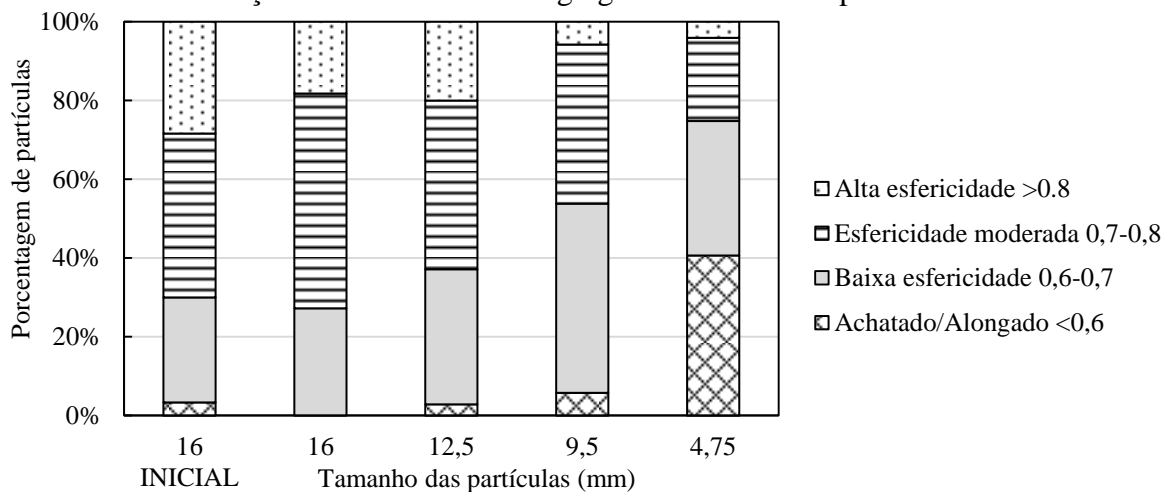
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 51 – Distribuição de esfericidade do agregado B-I antes e após o Treton



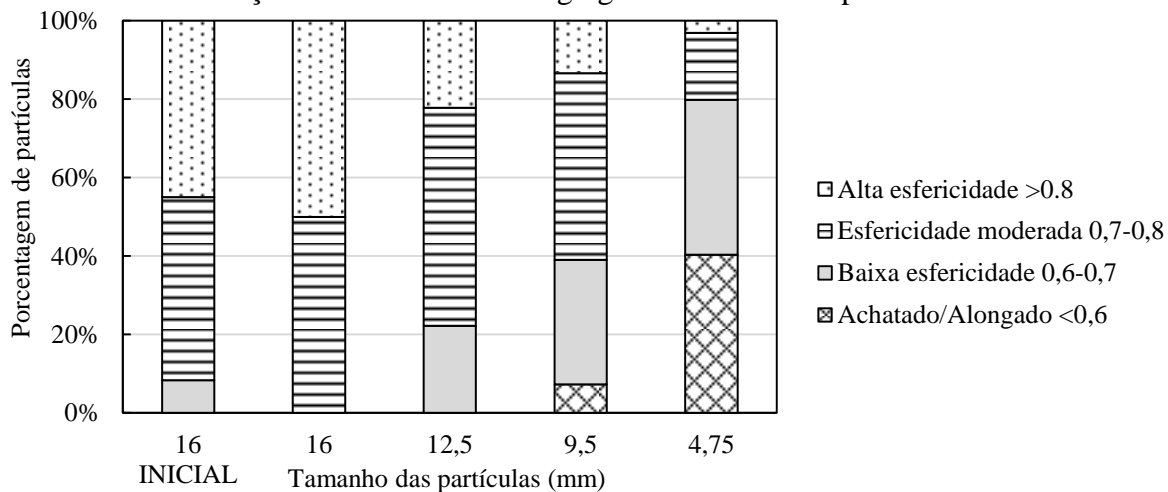
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 52 – Distribuição de esfericidade do agregado C-C antes e após o Treton



Fonte: Elaborado pela autora.

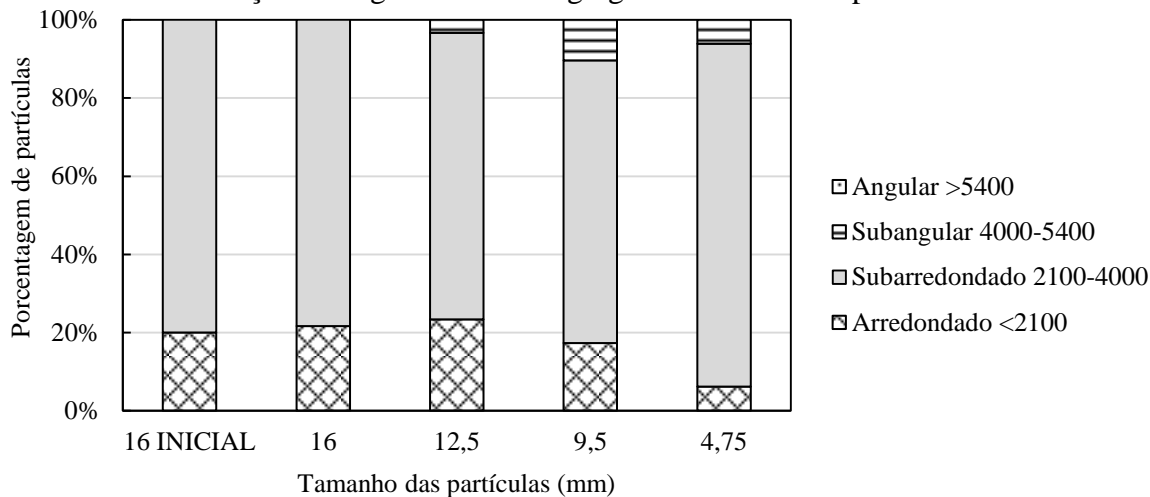
Gráfico 53 – Distribuição de esfericidade do agregado D-C antes e após o Treton



Fonte: Elaborado pela autora.

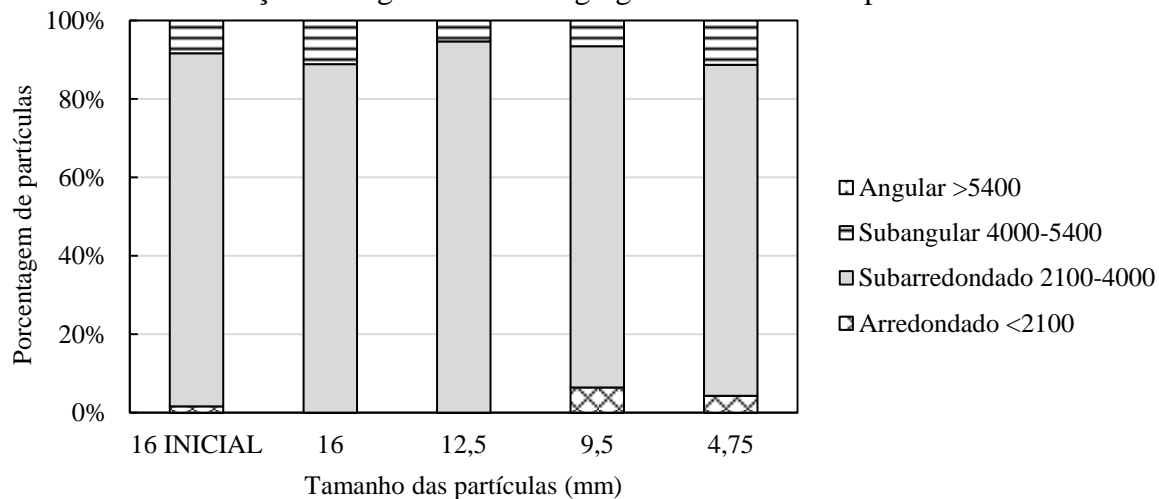
Com relação à angularidade (Figuras de 54 a 58), percebe-se que, no geral, as frações de 16 e 12,5 mm mantêm distribuições muito próximas às iniciais ou apresentam um leve aumento de partículas arredondadas (pois perderam seus ângulos). Enquanto isso, as menores frações tendem a mostrar um aumento de partículas angulares, as quais devem ser os ângulos perdidos das partículas maiores.

Gráfico 54 – Distribuição de angularidade do agregado A-C antes e após o Treton



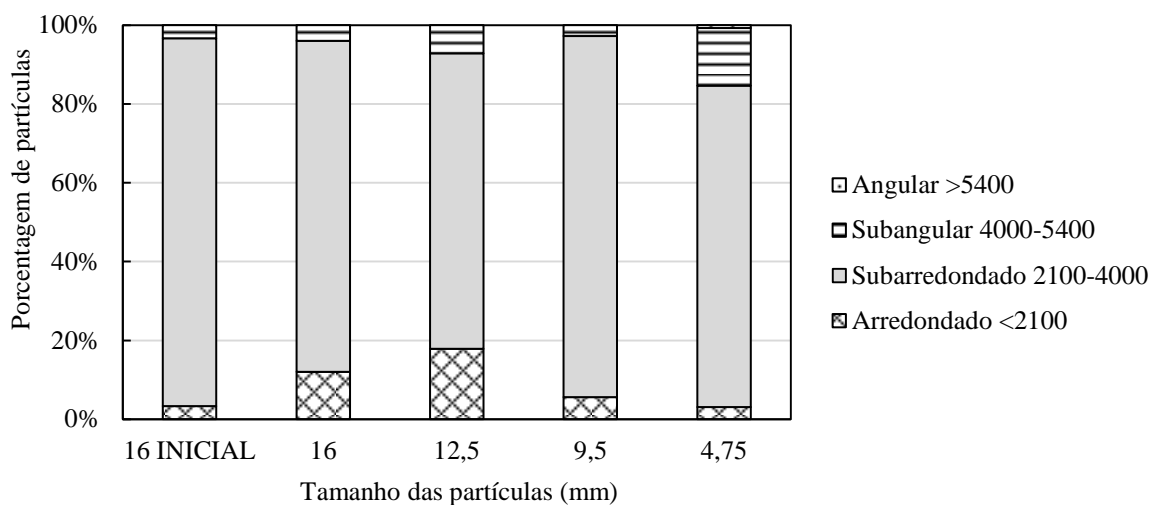
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 55 – Distribuição de angularidade do agregado B-M antes e após o Treton



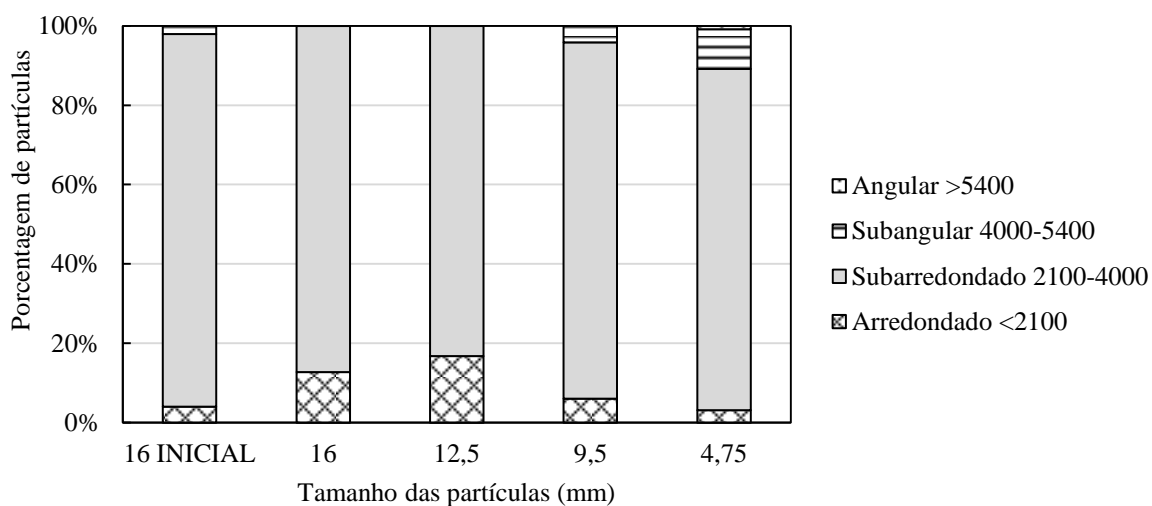
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 56 – Distribuição de angularidade do agregado B-I antes e após o Treton



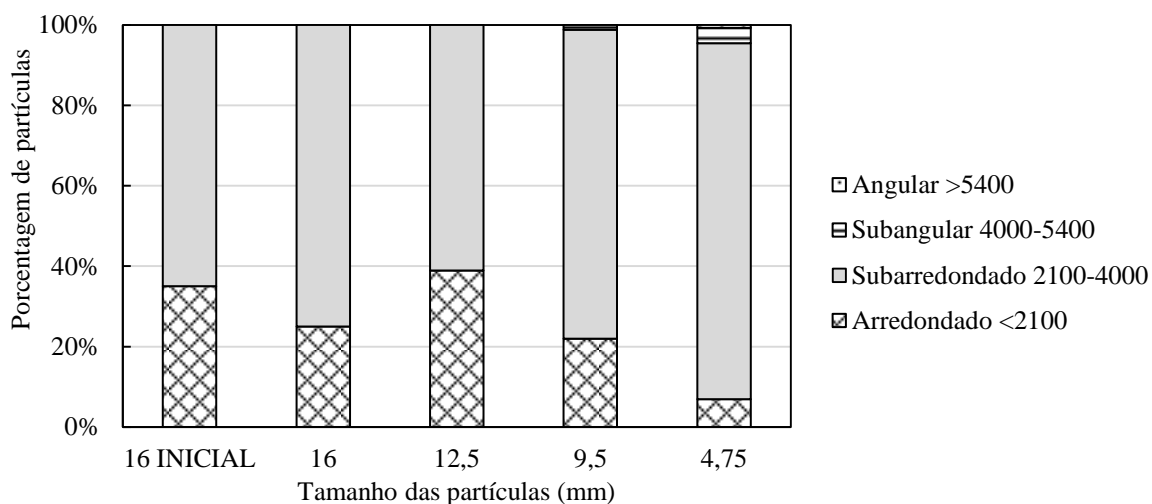
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 57 – Distribuição de angularidade do agregado C-C antes e após o Treton



Fonte: Elaborado pela autora.

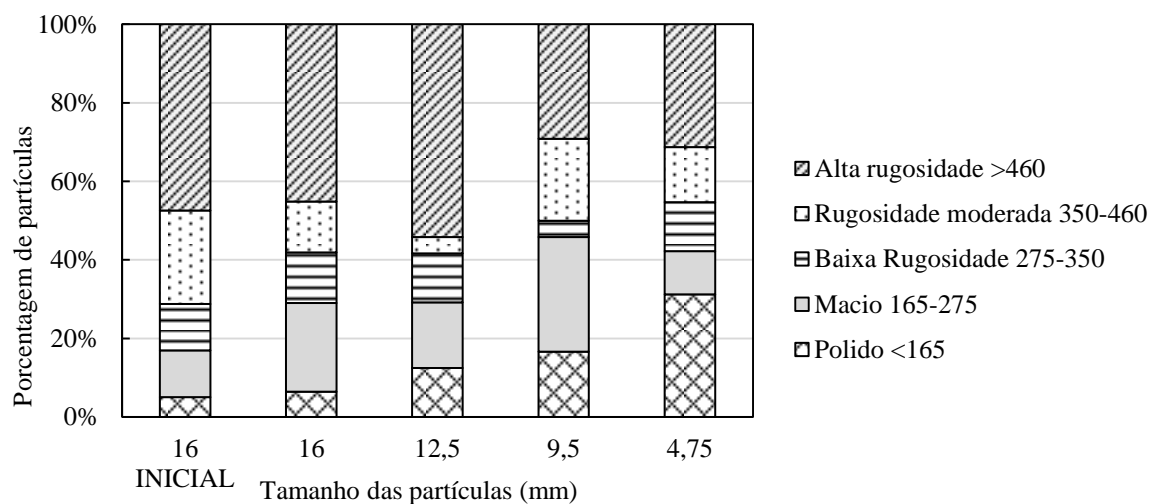
Gráfico 58 – Distribuição de angularidade do agregado D-C antes e após o Treton



Fonte: Elaborado pela autora.

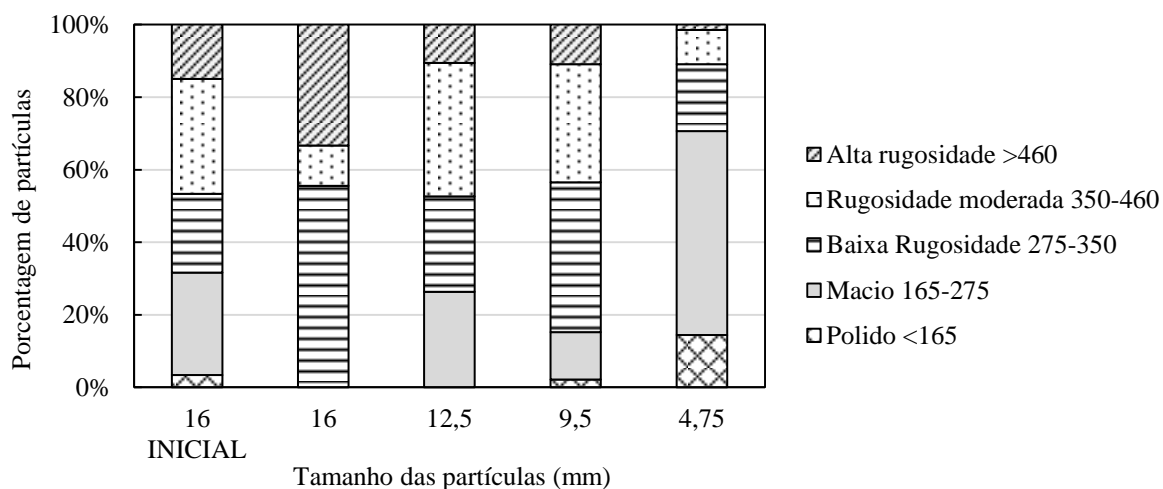
A textura superficial (Gráficos de 59 a 63), no geral, indicou que, durante o ensaio Treton, ocorre um desgaste com polimento das partículas reduzindo sua textura superficial e, assim como já havia sido visto nos agregados da maneira como foram coletados das pedreiras, essa redução também ocorre no sentido das menores partículas geradas. Em algumas frações, entretanto, foi observado um aumento da rugosidade, como nos agregados B-M e D-C, o que pode ser atribuído à possibilidade de que as partículas iniciais que já haviam sofrido polimento durante seu processo de produção e transporte, foram quebradas, gerando faces com sua rugosidade original.

Gráfico 59 – Distribuição de textura superficial do agregado A-C antes e após o Treton



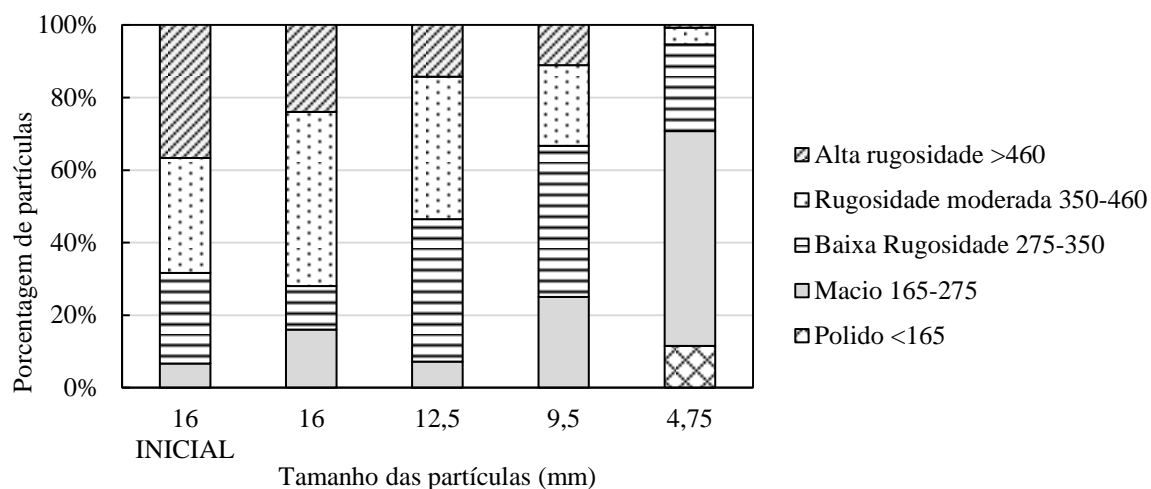
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 60 – Distribuição de textura superficial do agregado B-M antes e após o Treton



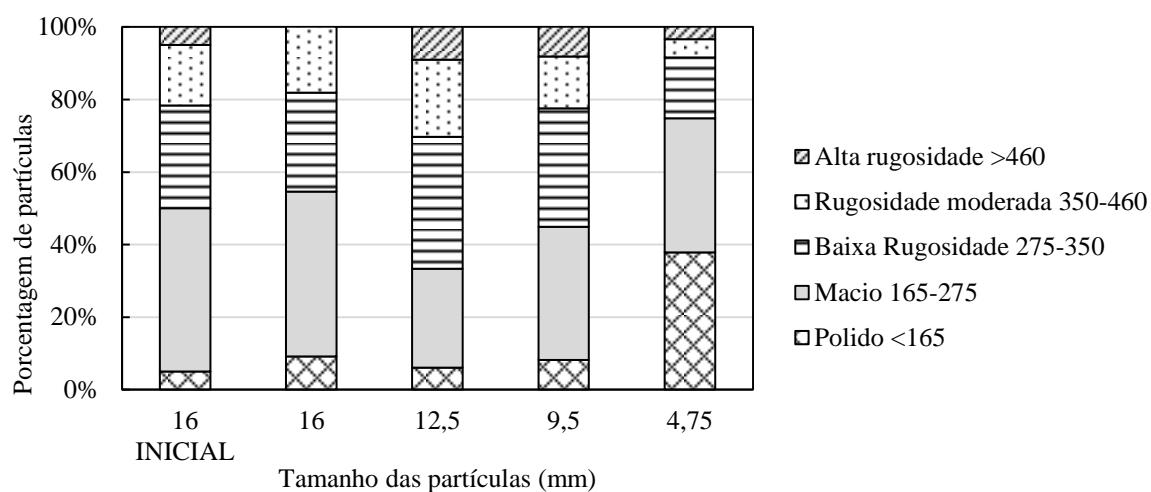
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 61 – Distribuição de textura superficial do agregado B-I antes e após o Treton



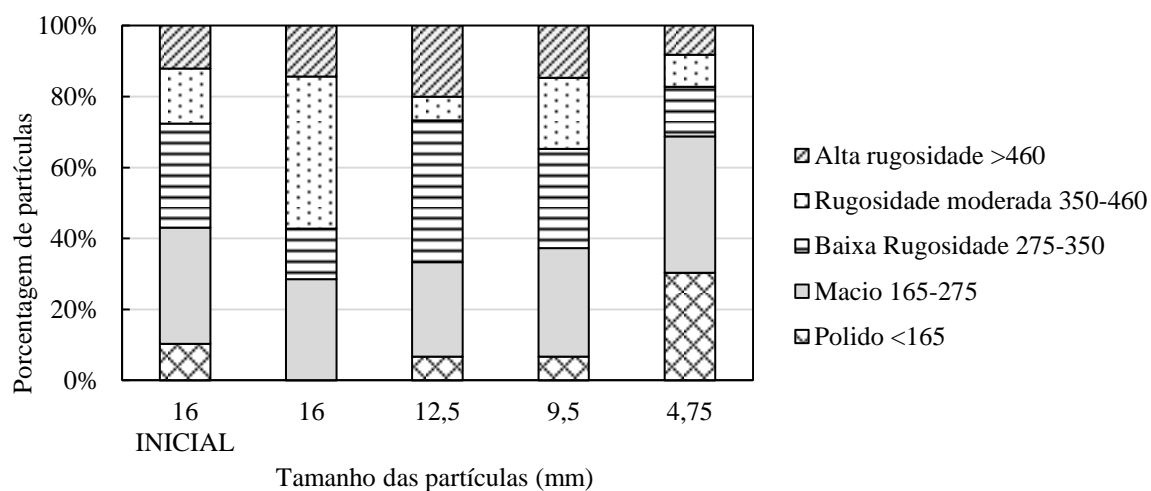
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 62 – Distribuição de textura superficial do agregado C-C antes e após o Treton



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 63 – Distribuição de textura superficial do agregado D-C antes e após o Treton



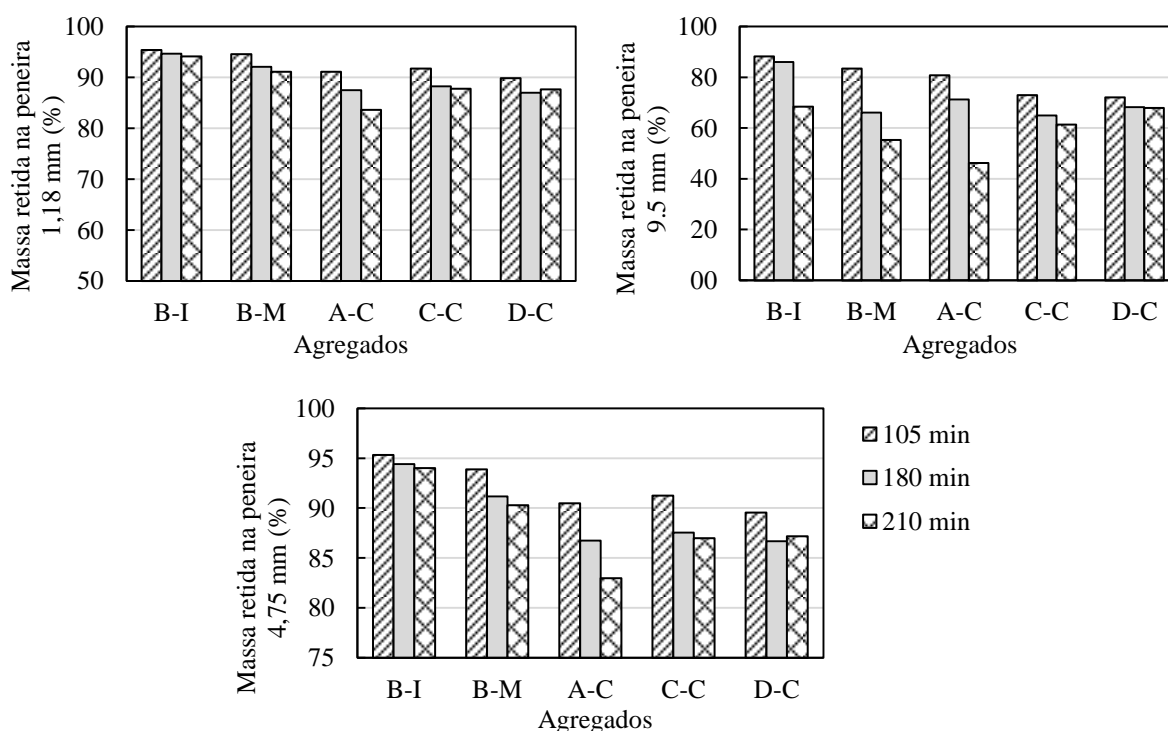
Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.2 Resistência à abrasão e ao polimento – Micro-Deval

O Gráfico 64 apresenta os resultados do ensaio de resistência à abrasão e ao polimento, utilizando o equipamento Micro-Deval. O primeiro gráfico mostra a massa retida na peneira de abertura 1,18 mm após o ensaio, o segundo mostra a massa retida na peneira de 9,5 mm (que retinha a amostra inicial) e o terceiro mostra a massa retida na peneira de 4,75 mm. Observa-se que as três formas de quantificar a resistência dos agregados ao desgaste foram coerentes entre si, indicando maiores intensidades para os mesmos agregados, entretanto, a massa percentual retida nas peneiras 9,5 mm e 4,75 mm mostraram diferenciar mais os materiais que a massa retida na peneira de 1,18 mm (resultado adotado pela norma).

O agregado A-C, predominantemente gnáissico com maior quantidade de biotita em relação aos outros, apresentou as maiores perdas de massa, que podem ser atribuídas à essa elevada presença de biotita, cujos grãos desprendem-se mais facilmente durante o desgaste. Por outro lado, o agregado B-I, fonólito resultante de britador de impacto, mostrou os melhores resultados (menores perdas de massa). Sua textura porfirítica, com a maioria dos grãos muito pequenos (pertencentes à matriz), pode ser uma causa desse fato, por tornar sua estrutura mais coesa e pelo fato de que os próprios grãos que se desprendem são menores e mais leves.

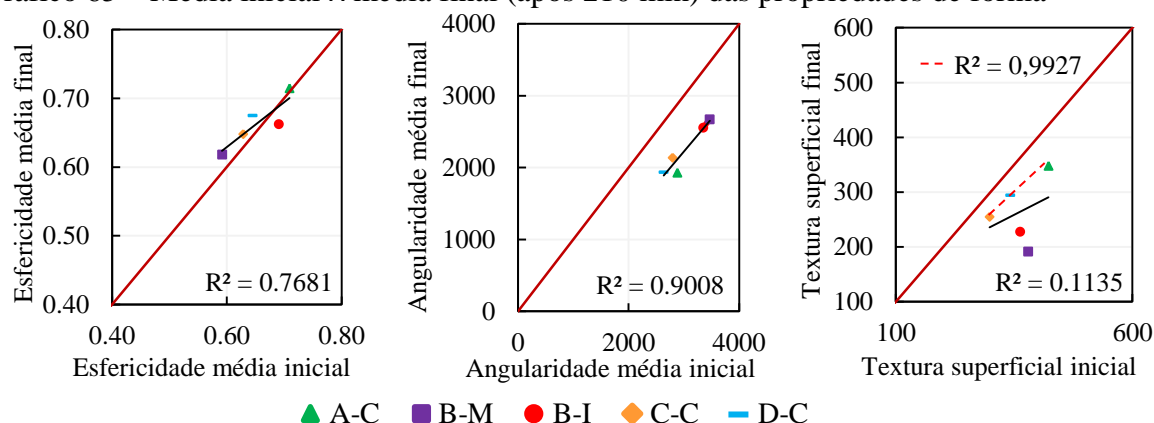
Gráfico 64 – Resultados do ensaio de Micro-Deval



Fonte: Elaborado pela autora.

No Gráfico 65, foram plotadas as médias das propriedades de forma antes e depois do desgaste de cada agregado por meio do Micro-Deval. A esfericidade e a angularidade seguem um padrão aproximadamente linear e crescente, ou seja, os materiais que eram inicialmente mais esféricos continuam a ser após o processo de abrasão e polimento, e o mesmo acontece para a angularidade. A textura superficial, por outro lado, não segue esse comportamento, mostrando que a rugosidade de alguns agregados foram mais reduzidas que a de outros. No entanto, os dois pontos com textura superficial final (eixo y) mais baixas são os dois agregados de origem fonolítica, como será visto nos próximos gráficos. Os três agregados de composição granítica e gnáissica, portanto, formariam aproximadamente uma reta crescente (representada em vermelho tracejado).

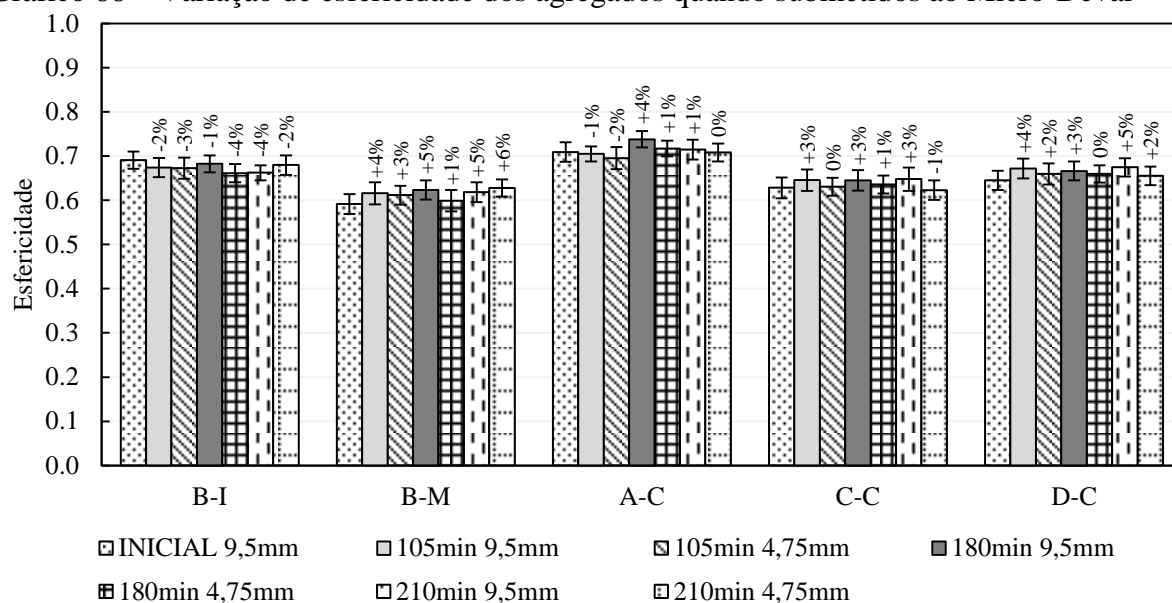
Gráfico 65 – Média inicial X média final (após 210 min) das propriedades de forma



Fonte: Elaborado pela autora.

Os Gráficos 66, 67 e 68 apresentam as médias das propriedades de forma antes do ensaio e após cada intervalo de tempo (105, 180 e 210 min), para as frações de 9,5 e de 4,75 mm, com suas respectivas variações, em porcentagem, em relação ao valor inicial. Pode-se observar que a esfericidade não sofreu variações significativas ao longo do processo de degradação, mostrando que o Micro-Deval não causou quebra nas partículas que modificassem sua forma, mas atuou principalmente no polimento e na abrasão de suas superfícies.

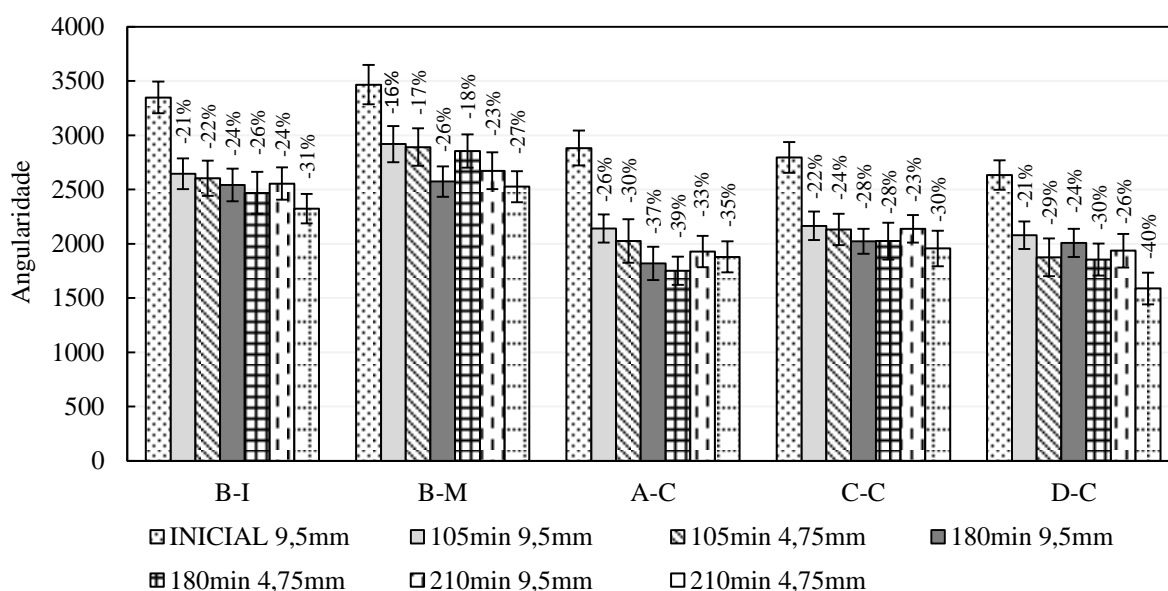
Gráfico 66 – Variação de esfericidade dos agregados quando submetidos ao Micro-Deval



Fonte: Elaborado pela autora.

A angularidade (Gráfico 67) de todos os agregados sofreu redução. No geral, os agregados de origem gnáissica/granítica sofreram maiores reduções de angularidade que os agregados de origem fonolítica, seguindo o comportamento visto pelas perdas de massa (Gráfico 64).

Gráfico 67 – Variação de angularidade dos agregados quando submetidos ao Micro-Deval



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar, pelo Gráfico 68, que os agregados fonolíticos (B-I e B-M) apresentaram as maiores reduções de textura superficial. Suas frações de 4,75 mm

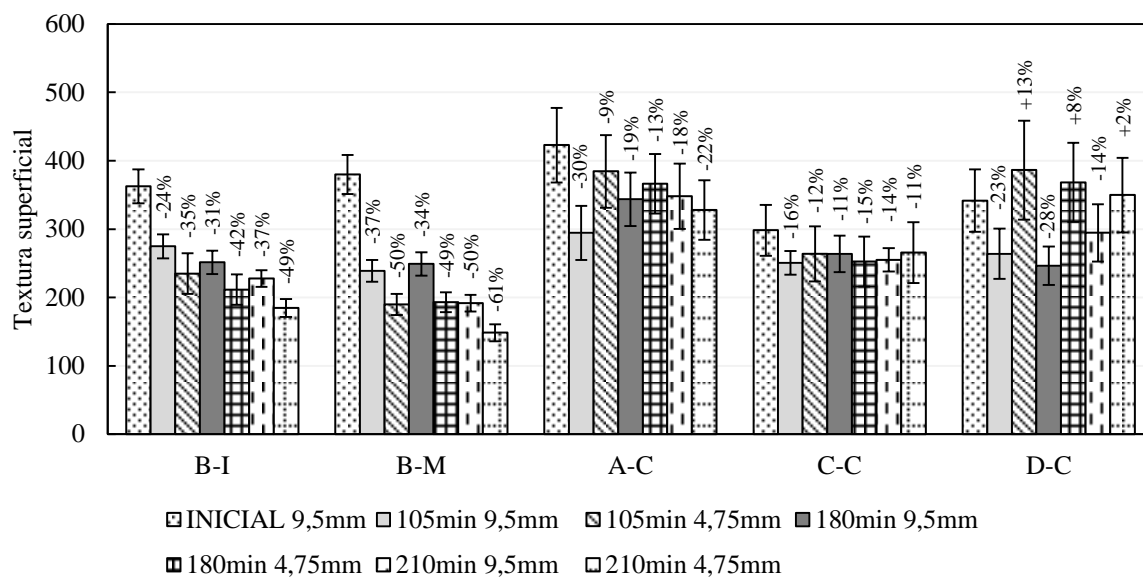
apresentaram rugosidades menores que as frações de 9,5 mm (para cada duração do ensaio), indicando que as partículas que foram mais desgastadas, a ponto de chegar ao tamanho de 4,75 mm tornaram-se menos rugosas, ou seja, realmente existiu um processo contínuo de polimento. Isso não ocorreu para os materiais de origem granítica/gnáissica, conforme exposto a seguir.

Nos agregados A-C e D-C, percebe-se que, no geral, as frações de 4,75 mm apresentaram rugosidade maior que as frações de 9,5 mm correspondentes (relativas ao mesmo tempo de duração do ensaio). Esse fato foi interpretado da seguinte forma: considerando a constatação realizada anteriormente de que o material com maior presença de biotita sofre maior perda de massa, infere-se que as partículas com essa característica foram as que sofreram maior redução de tamanho, tornando-se parte da fração de 4,75 mm. Entretanto, nesse tipo de material, a perda de massa não corresponde necessariamente a um polimento, ou seja, as partículas são desgastadas e perdem grãos de minerais, mas, pela estrutura de folhas flexíveis e elásticas da biotita, elas mantêm a maior parte de sua rugosidade superficial.

Por outro lado, as partículas com menor teor de biotita (granitos, pegmatitos com maior quantidade de quartzo e feldspato potássico) são menos susceptíveis à perda de massa por polimento, devido às altas durezas desses minerais, logo, conseguem manter seu tamanho original (9,5 mm). Sua textura superficial, entretanto, já é naturalmente mais baixa, como foi visto no tópico 4.3.2, explicando, assim, as menores rugosidades vistas em relação às frações de 4,75 mm. Essa diferença entre as duas frações parece reduzir com o tempo de desgaste, o que se deve, provavelmente, à passagem de partículas com alto teor de biotita da fração de 9,5 mm para a de 4,75 mm.

O agregado C-C, apesar de possuir uma mineralogia próxima àquelas dos agregados A-C e D-C, apresentou um comportamento mais regular, com valores muito próximos para todas as frações e tempos de duração. A partir dessa observação, deduziu-se que sua amostra inicial apresentava-se mais homogênea com relação à mineralogia e, pelo valor inicial mais baixo de textura superficial, provavelmente, com maior presença de granitos e pegmatitos.

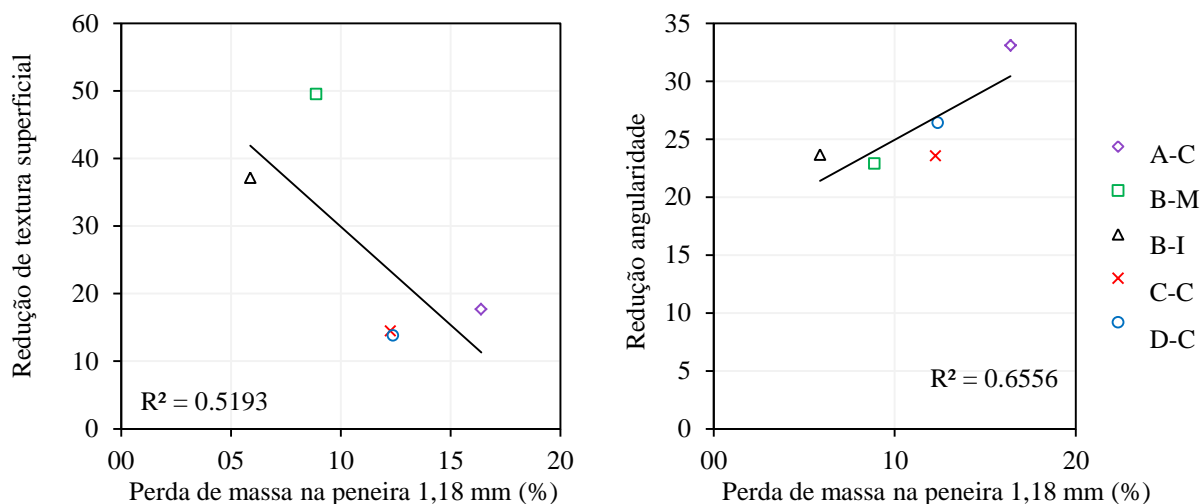
Gráfico 68 – Variação de textura superficial dos agregados quando submetidos ao Micro-Deval



Fonte: Elaborado pela autora.

O Gráfico 69 apresenta as relações da redução de textura superficial e de angularidade com a perda de massa passante na peneira de 1,18 mm de abertura. Conforme esperado a partir dos resultados anteriores, a redução de textura superficial não mostrou correlação com a perda de massa, enquanto a angularidade apresentou uma tendência de aumento com a perda de massa, com R^2 de 0,66. Realizando uma comparação geral entre os materiais, os agregados fonolíticos apresentaram baixa perda de massa, porém com elevada redução da textura superficial. Os de composição granítica/gnáissica apresentaram menor redução da textura superficial e maior perda de massa, sobretudo o de maior teor de biotita.

Gráfico 69 – Redução de textura superficial e angularidade X Massa retida na peneira 1,18 mm (após 210 min)

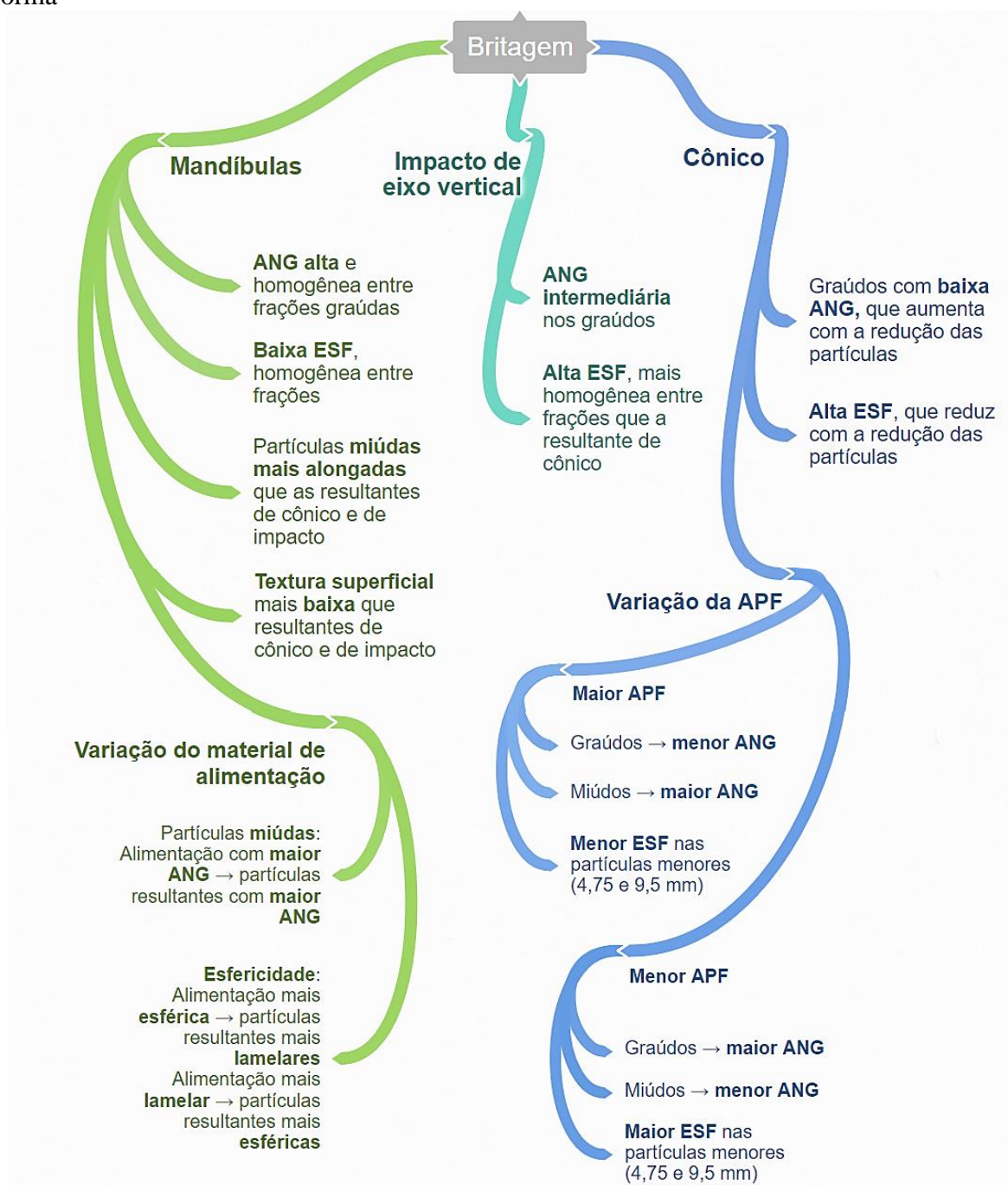


Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Diagramas de resumo para auxílio na seleção e na produção de agregados

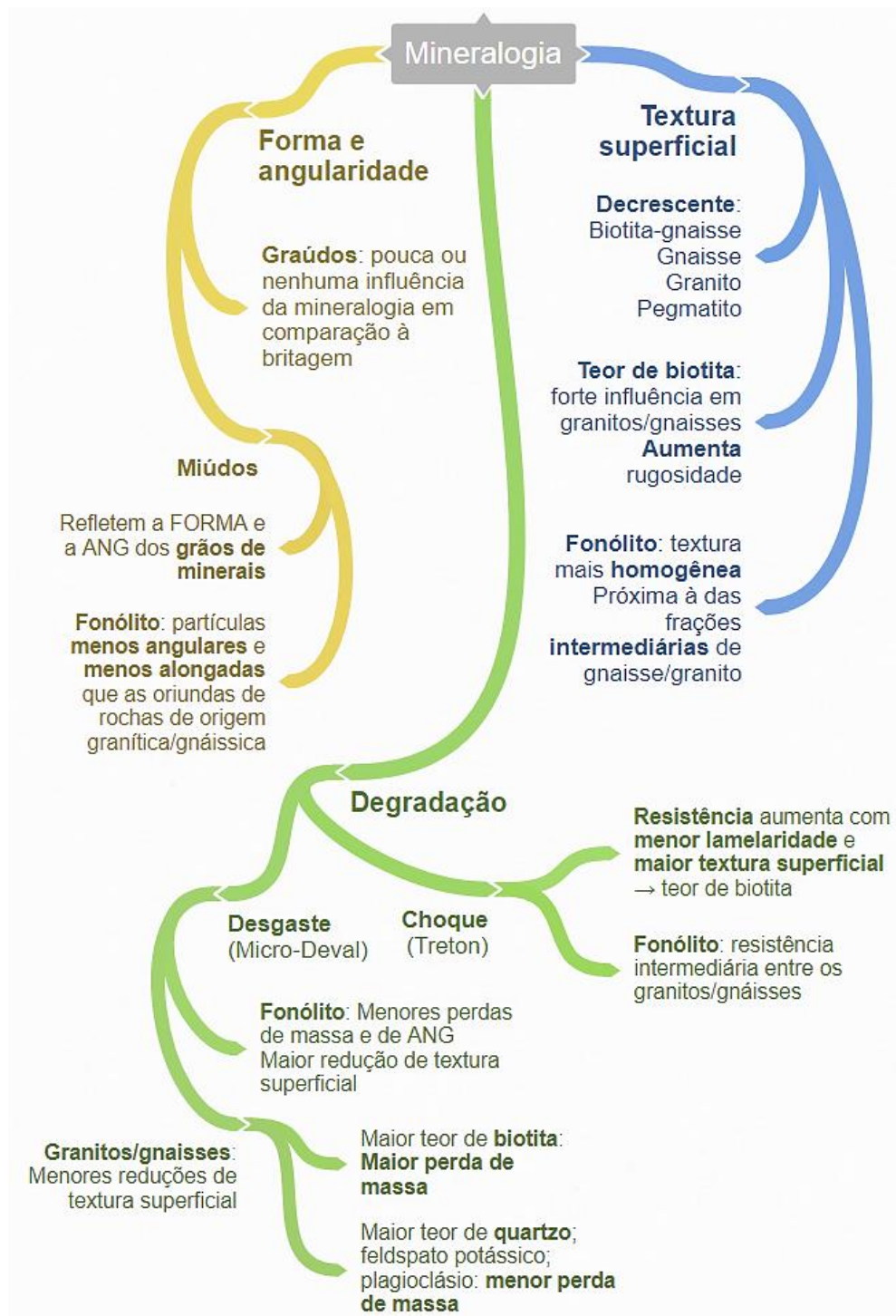
As Figuras 32, 33 e 34, a seguir, apresentam diagramas que resumem os principais resultados obtidos com a realização desta pesquisa, a fim de auxiliar e direcionar, de forma prática, decisões gerais a respeito da seleção e da produção de agregados.

Figura 32 – Fluxograma com as principais relações obtidas entre britagem e propriedades de forma



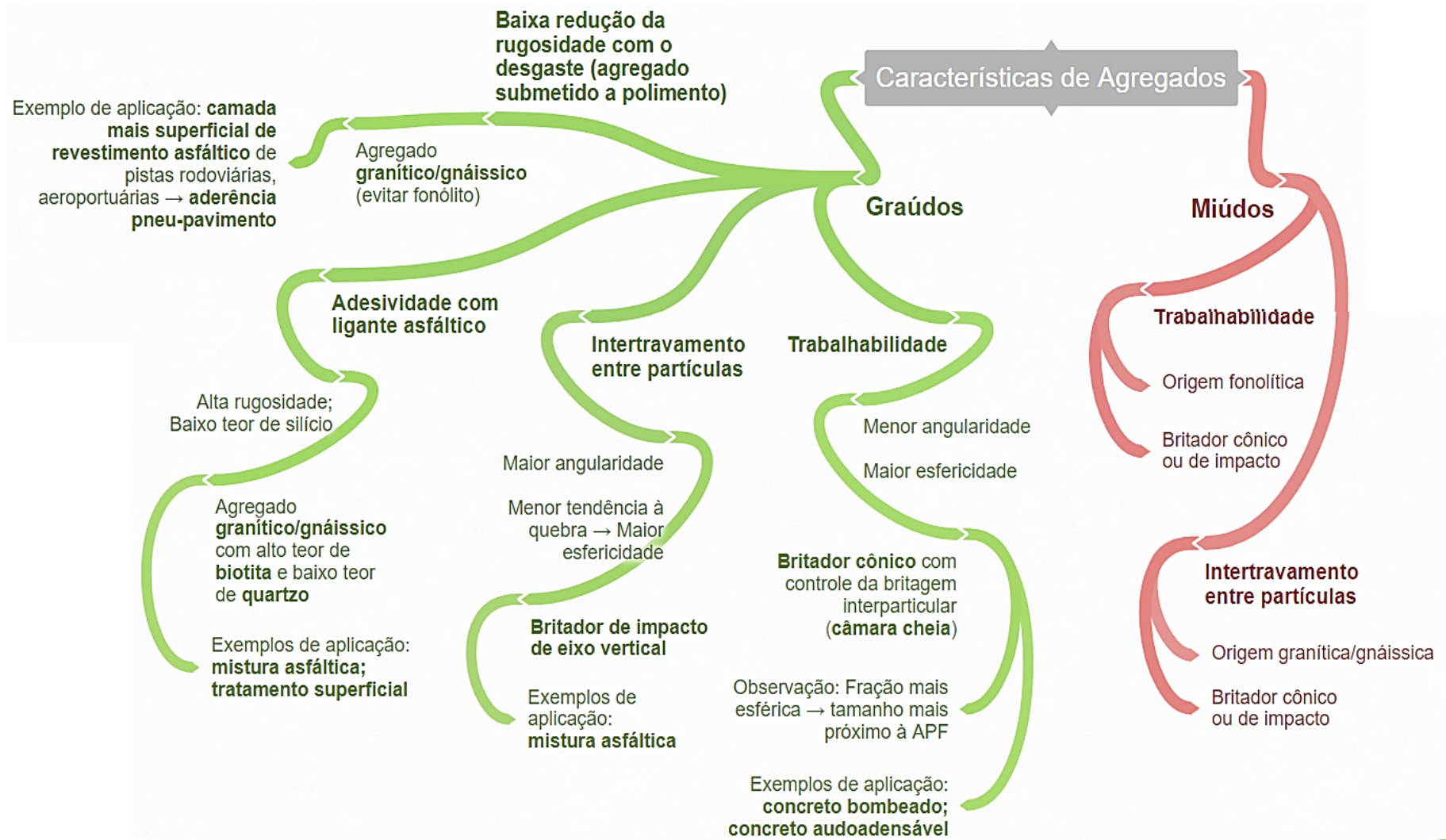
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 – Fluxograma com as principais relações obtidas entre mineralogia, propriedades de forma e resistência à degradação



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 – Sugestões de seleção preliminar de agregados a partir de características requeridas



Fonte: Elaborado pela autora.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento da presente dissertação, foram identificados alguns comportamentos dos agregados estudados que puderam ser relacionados ao tipo de britagem utilizada ou à mineralogia do material. Foram, também, detectadas características dos agregados que podem contribuir para sua maior resistência à degradação, na forma de polimento, abrasão e quebra. Dessa forma, foram fornecidas, com o auxílio dos diagramas finais, sugestões que podem direcionar escolhas a serem tomadas com relação à produção e à seleção preliminar de agregados, considerando as características das partículas requeridas para cada aplicação desejada, as quais devem ser analisadas caso a caso. Estão organizadas, nos três tópicos que seguem, as principais conclusões que puderam ser destacadas e, em seguida, são sugeridos alguns temas de pesquisa para trabalhos futuros, que podem dar continuidade à pesquisa aqui relatada.

5.1 Conclusões sobre a influência da britagem nas propriedades de forma dos agregados

Serão listadas, a seguir, as principais conclusões do trabalho sobre a influência da britagem nas propriedades de forma dos agregados:

- a) Com relação aos agregados graúdos gerados por diferentes britadores, aquele oriundo de britador cônico com controle da britagem interparticular apresentou os maiores valores de esfericidade e menores valores de angularidade, indicando ser adequado para compósitos que demandam alta trabalhabilidade e cuja resistência não dependa fortemente do intertravamento entre partículas, como o concreto de cimento Portland. O agregado gerado por britador de impacto de eixo vertical mostrou-se menos esférico que o supracitado, mas apresentou angularidade superior, sendo uma boa indicação para compor misturas asfálticas;
- b) O britador cônico gera uma queda de esfericidade com a redução do tamanho das partículas. Essa queda é vista, em menor grau, para o britador de impacto, e não ocorre para o britador de mandíbulas;
- c) Com relação aos agregados miúdos gerados, pôde-se concluir que as características dos grãos de minerais presentes são refletidas na angularidade e, principalmente, na forma das partículas, sobressaindo-se à influência do tipo de britador. Entre os agregados de mesma origem, aqueles gerados por

britadores de mandíbulas (tanto em pedreira como em laboratório) mostraram, de maneira geral, formas mais alongadas e angulares que os correspondentes gerados por britadores de impacto e cônico. À medida que se reduz o tamanho das partículas, agregados de mesma origem gerados por britadores distintos aproximam-se entre si com relação à forma 2D, indicando que o tipo de britagem tem seu impacto no alongamento das partículas suavizado com essa redução;

- d) A partir da comparação entre agregados oriundos da mesma rocha, gerados pelo mesmo britador cônico, sendo variada apenas a APF do equipamento, o aumento desse ajuste indicou ter elevado a angularidade dos agregados miúdos e reduzido a esfericidade dos agregados graúdos;
- e) Com relação à variação do tamanho do material de alimentação do britador de mandíbulas de laboratório, foi constatado que as maiores partículas resultantes (12,5 mm) tiveram sua angularidade influenciada pela britagem. O material que era inicialmente maior (19 mm) e sofreu uma quebra mais intensa (APF de 1 mm) tornou-se mais angular em relação ao que era antes da britagem, enquanto o material que era inicialmente menor (12,5 mm) e sofreu uma quebra menos intensa (mesma APF de 1 mm) teve sua angularidade reduzida em relação à inicial. Para as partículas miúdas, apesar de os resultados terem sido próximos, notou-se uma tendência de crescimento da angularidade com a redução do tamanho das partículas de alimentação (e conseqüente aumento da sua angularidade), fato que indicou uma correspondência entre a angularidade inicial do material e a angularidade final das partículas miúdas;
- f) A esfericidade não apresentou diferenças significativas, mas indicou a mesma tendência para todas as frações graúdas: aumento da esfericidade com a redução do tamanho de alimentação (aproximando-o da APF do britador). Considerando a diferença de esfericidade inicial entre os dois materiais de alimentação, pôde ser dada outra interpretação a esse fato: o material de alimentação mais lamelar foi fragmentado em partículas mais esféricas, enquanto o material de alimentação mais esférico gerou partículas mais lamelares. A forma 2D não mostrou tendências nem diferenças significativas entre os materiais.

5.2 Conclusões sobre a influência da mineralogia nas propriedades de forma dos agregados

Serão listadas, a seguir, as principais conclusões do trabalho sobre a influência da mineralogia nas propriedades de forma dos agregados:

- a) A partir da análise de agregados graníticos/gnáissicos separados por mineralogia, conclui-se que essas diferenças internas de mineralogia (pegmatito, granito, gnaïsse e biotita-gnaïsse) possuíram pouca ou nenhuma influência na forma e na angularidade de partículas graúdas;
- b) Para agregados miúdos, os materiais fonolíticos (principalmente o gerado por britador de impacto) apresentaram, no geral, partículas menos alongadas e menos angulares. Os materiais de origem granítica/gnáissica apresentaram um crescimento da angularidade à medida que o tamanho das partículas aproximaram-se de 0,6 mm, o que foi atribuído à predominância de grãos de minerais com esse tamanho, vistos por meio das análises petrográficas, ou seja, as partículas com esse tamanho são os próprios grãos de minerais, com sua angularidade natural. Diferentemente, os grãos de minerais presentes nos materiais fonolíticos predominam em tamanhos menores que os analisados, por isso, não mostraram esse ápice de angularidade em torno da fração de 0,6 mm;
- c) Houve, para todos os agregados, uma queda da forma 2D (que representa o alongamento) das partículas miúdas com a redução de seu tamanho, o que foi atribuído à perda de influência da britagem nas menores frações. Na menor fração, de 0,075 mm, todos os agregados apresentaram valores de forma 2D semelhantes, indicando não ter havido influência nem da mineralogia nem da britagem. Essa menor fração pode ser considerada mais um resultado do desgaste e do polimento que sofrem os agregados em todo o processo de produção e de transporte que um resultado da quebra própria da britagem;
- d) Dentre os agregados oriundos de rochas graníticas/gnáissicas, o material com maior teor de biotita apresentou partículas com maiores valores de textura superficial, ou seja, mais rugosas. O agregado fonolítico apresentou textura superficial média próxima àquelas dos demais agregados graníticos/gnáissicos;

- e) Por meio das análises de cada agregado granítico/gnáissico fracionado por mineralogia, observou-se que os três materiais apresentaram a mesma sequência interna de rugosidade: pegmatito, granito, gnaïsse e biotita-gnaïsse, em ordem crescente e com expressiva diferenças entre si. O agregado fonolítico, já tratado como homogêneo, corroborou essa consideração, apresentando menor amplitude de textura superficial das partículas.

5.3 Conclusões sobre a influência da mineralogia e das propriedades de forma na tendência das partículas de agregado à degradação

Serão listadas, a seguir, as principais conclusões do trabalho sobre a influência da mineralogia e das propriedades de forma na tendência das partículas de agregado à degradação:

- a) A resistência das partículas submetidas à quebra por meio do ensaio de Resistência ao Choque (Tretón) sugeriu elevar-se com o aumento da textura superficial e com a redução do percentual de partículas lamelares e alongadas. Buscando relacionar esse fato com a associação anteriormente realizada da textura superficial com a presença de biotita, concluiu-se que, até certo ponto, um maior teor desse mineral pode elevar a resistência dos agregados à quebra. Esse fato pode ser explicado pela sua estrutura de cristais na forma de folhas flexíveis e elásticas, que pode agir, quando agregado a outros minerais, como um melhorador da resistência à tração das partículas, tornando-as mais resilientes;
- b) O agregado predominantemente gnáissico com maior quantidade de biotita e menor quantidade de quartzo em relação aos outros, apresentou as maiores perdas de massa quando submetido ao Micro-Deval. Essas maiores perdas de massa podem ser atribuídas à elevada presença de biotita, cujos grãos apresentam menor dureza e desprendem-se mais facilmente durante o desgaste, fato que foi observado durante a pesquisa antes mesmo de os agregados serem submetidos à degradação. Os agregados fonolíticos apresentaram as menores perdas de massa após sofrerem o processo de desgaste por meio do Micro-Deval;
- c) No geral, os agregados de origem gnáissica/granítica sofreram maiores reduções de angularidade que os agregados de origem fonolítica, após

passarem pelo Micro-Deval, seguindo o mesmo comportamento visto pelas perdas de massa;

- d) As reduções de textura superficial, por outro lado, não mostraram seguir o mesmo comportamento das perdas de massa. Realizando uma comparação geral entre os materiais, os agregados fonolíticos apresentaram baixa perda de massa, porém elevada redução da textura superficial. Os de composição granítica/gnáissica apresentaram menor redução da textura superficial e maior perda de massa, sobretudo o de maior teor de biotita.

5.4 Sugestões para trabalhos futuros

Serão listadas, a seguir, algumas sugestões para trabalhos futuros que podem dar continuidade à pesquisa aqui relatada:

- a) A utilização de lógica fuzzy para buscar, com maior precisão, as relações entre as propriedades dos agregados e as características das rochas de origem e da britagem;
- b) A aplicação dos materiais estudados nesta pesquisa em compósitos, como misturas asfálticas e concreto de cimento Portland, a fim de verificar o impacto das diferenças vistas entre os agregados no comportamento dos compósitos (propriedades físicas e mecânicas);
- c) A realização dos ensaios de resistência à degradação realizados nesta pesquisa, com cada grupo de mineralogia dos agregados (biotita-gnaïsse, gnaïsse, granito e pegmatito);
- d) A realização de outros ensaios nos agregados, como a determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos, utilizando uma prensa com carga uniformemente variada;
- e) A investigação dos agregados que indicaram presença de textura mirmequítica e pertítica com relação à reação álcali-agregado em concretos e argamassas;
- f) A investigação da relação entre as características dos agregados vistas e a sua adesividade com o ligante asfáltico.

REFERÊNCIAS

AHO, B.; VAVRIK, W.; CARPENTER, S. Effect of Flat and Elongated Coarse Aggregate on Field Compaction of Hot-Mix Asphalt. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1761, p. 26-31, 2001. DOI: 10.3141/1761-04.

AIRES-BARROS, L. **Alteração e Alterabilidade de Rochas**. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 1991.

ALMEIDA, S.; LUZ, A. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.

AL-ROUSAN, T. M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Texas A&M University, College Station, 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/szfK0B>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1252-17**: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). West Conshohocken, 2017.

_____. **ASTM D4791**: Standard Test Methods for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, 2010.

_____. **ASTM D5821**: Standard Test Methods for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken, 2013.

_____. **ASTM D6928**: Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ANASTASIO, S. *et al.* Relevant Petrological Properties and their Repercussions on the Final use of Aggregates. **Energy Procedia**, v. 97, p. 546-553, 2016. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.073.

ANEPAC. **O Mercado de Agregados no Brasil**. Relatório Novembro 2015. São Paulo, 2015.

ARAGÃO, F. *et al.* Effects of Morphological Characteristics of Aggregate Particles on the Mechanical Behavior of Bituminous Paving Mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 444-453, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564**: Via Férrea – Lastro Ferroviário – Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 9935**: Agregado Graúdo – Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 15577-3**: Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise Petrográfica para Verificação da Potencialidade Reativa de Agregados em Presença de Álcalis do Concreto. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15845-1**: Rochas para Revestimento – Análise Petrográfica. Rio de Janeiro, 2015.

BENGTSSON, M.; EVERTSSON, C. An Empirical Model for Predicting Flakiness in Cone Crushing. **International Journal of Mineral Processing**, v. 79, n. 1, p. 49-60, 2006. DOI: 10.1016/j.minpro.2005.12.002.

BERN, R. Agregados Cúbicos – Produção de Agregados de Alta Qualidade com Impactores e Britadores Cônicos. **Areia e Brita**, v. 1, p. 13 – 20. ANEPAC, 1997.

BÉRUBÉ, M. The Mineralogical and Petrographic Analysis of Concrete Aggregates. **JOM: The Member Journal of the Minerals, Metals & Materials Society**, v. 53, n. 12, p. 45-47, 2001. DOI: 10.1007/s11837-001-0014-y.

BESSA, I. **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BESSA, I. *et al.* Aggregate Shape Properties and their Influence on the Behavior of Hot-Mix Asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. 04014212, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001181.

BESSA, I. *et al.* Evaluation of Polishing and Degradation Resistance of Natural Aggregates and Steel Slag Using the Aggregate Image Measurement System. **Road Materials and Pavement Design**, v. 15, p. 1-21, 2014. DOI: 10.1080/14680629.2014.883323.

BOUQUETY, M. *et al.* Experimental Study of Crushed Aggregate Shape. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 4, p. 865-872, 2007. DOI: j.conbuildmat.2005.12.013.

BRIGGS, C.; EVERTSSON, C. Shape Potential of Rock. **Minerals Engineering**, v. 11, n. 2, p. 125-132, 1998. DOI: 10.1016/S0892-6875(97)00145-3.

CAVALCANTI, V. M. M.; PARAHYBA, R. E. R. **A Indústria de Agregados para Construção Civil na Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: DNPM, 2012.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Britagem, Peneiramento e Moagem**. 5ª ed. – São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CHIOSSI, N. **Geologia Aplicada à Engenharia**. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1987.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086: Agregado – Determinação do Índice de Forma**. Rio de Janeiro, 1994.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação da Influência da Britagem nas Propriedades de Forma de Agregados por Meio do Processamento Digital de Imagens**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

DONDI, G. *et al.* Discrete Element Modelling of Influences of Grain Shape and Angularity on Performance of Granular Mixes for Asphalts. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 53, p. 399-409, 2012. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.09.891.

ELORANTA, J. ***Influence of Crushing Process Variables to the End Product Quality of Crushed Rock***. Publicação Técnica. Tampere, 1995.

ERDOĞAN, S. T. e FOWLER, D. W. **Determination of Aggregate Shape Properties Using X-ray Tomographic Methods and the Effect of Shape on Concrete Rheology**. Relatório Técnico. International Center for Aggregates Research, The University of Texas. Austin, 2005.

EVERTSSON, C.; BEARMAN, R. Investigation of Interparticle Breakage as Applied to Cone Crushing. **Minerals Engineering**, v. 10, n. 2, p. 199-214, 1997. DOI: 10.1016/S0892-6875(96)00146-X.

FLETCHER, T. *et al.* Aggregate Imaging System for Characterizing the Shape of Fine and Coarse Aggregates. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1832, p. 67-77, 2003. DOI: 10.3141/1832-09.

GILSON COMPANY INC. **Micro-Deval Apparatus**. Disponível em: <<https://www.globalgilson.com/micro-deval-apparatus>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

GOUVEIA, L. T. de. **Contribuições ao Estudo da Influência de Propriedades de Agregados no Comportamento de Misturas Asfálticas Densas**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Transportes) – Departamento de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

HUBER, G. *et al.* Contribution of Fine Aggregate Angularity and Particle Shape to Superpave Mixture Performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1609, p. 28-35, 1998. DOI: 10.3141/1609-04.

IN THE MINE. **Produtividade na Manutenção de Britadores** « Revista In The Mine. Disponível em: <<http://inthemine.com.br/site/produtividade-na-manutencao-de-britadores>>. Acesso em: 7 mai. 2017.

LUCAS JUNIOR, J. **Influência da Adesividade na Interface Agregado-ligante no Trincamento por Fadiga de Misturas Asfálticas**. 2018. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Transportes) - Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

KOU, S. *et al.* Numerical Investigation of Particle Breakage as Applied to Mechanical Crushing – Part II: Interparticle Breakage. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 38, n. 8, p. 1163-1172, 2001. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00076-4.

MAHMOUD, E.; ORTIZ, E. **Implementation of AIMS in Measuring Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion, and Breakage**. Relatório Técnico FHWA-ICT-14-014. Illinois Center for Transportation/Illinois Department of Transportation, 2014.

MARCOTTE, E. **VSI Crushers Maximize First-pass Yields** | Pit & Quarry. Disponível em: <<http://www.pitandquarry.com/vsi-crushers-maximize-first-pass-yields-lower-operating-costs/>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

MASAD, E. A. **Aggregate Imaging Measurement System (AIMS): Basics and Applications**. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. Project Performed in Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Report nº FHWA/TX-05/5-1707-01-1, 2005.

MASAD, E. A. *et al.* **Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture and Angularity**. Relatório Técnico NCHRP – 555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, D.C., 2005.

MASAD, E. A.; LUCE, A.; MAHMOUD, E. **Implementation of AIMS in Measuring Aggregate Resistance to Polishing, Abrasion and Breakage**. Relatório Técnico FHWA/TX-06/5-1707-03-1. Texas Transportation Institute, 2006.

MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L. Correlation of Imaging Shape Indices of Fine Aggregate with Asphalt Mixture Performance. **Transportation Research Board, 80th Annual Meeting**. Washington, D.C., 2001. DOI: 10.3141/1757-17.

METSO. **Aggregates - Crushers**. Disponível em: <<http://www.metso.com/products/jaw-crushers/jaw-crusher-nordberg-c>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

OLIVEIRA, A.; BRITO, S. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

PANG, L.; WU, S.; ZHU, J.; WAN, L. Relationship between Retrographical and Physical properties of aggregates. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 25, n. 4, p. 678-681, 2010. DOI: 10.1007/s11595-010-0069-0.

PONCE, J. M.; BATIC, O. R. Different Manifestations of the Alkali-silica Reaction in Concrete According to the Reaction Kinetics of the Reactive Aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1148-1156, 2006.

PRESS, F. *et al.* Para Entender a Terra. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RAJAN, B.; SINGH, D. Comparison of Shape Parameters and Laboratory Performance of Coarse Aggregates Produced from Different Types of Crushing Operations. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 7, p. 04017044, 2017a. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001874.

RAJAN, B.; SINGH, D. Understanding Influence of Crushers on Shape Characteristics of Fine Aggregates Based on Digital Image and Conventional Techniques. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 833-843, 2017b. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.058.

RAMYAR, K.; TOPAL, A.; ANDIÇ, Ö. Effects of Aggregate Size and Angularity on Alkali-Silica Reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 11, p. 2165-2169, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.010.

RAO, C.; TUTUMLUER, E.; KIM, I. Quantification of Coarse Aggregate Angularity Based on Image Analysis. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1787, p. 117-124, 2002. DOI: 10.3141/1787-13.

READ, J.; WHITEOAK, D. **The Shell Bitumen Handbook**. Thomas Telford, 2003.

REZAEI, A.; MASAD, E.; CHOWDHURY, A. Development of a Model for Asphalt Pavement Skid Resistance Based on Aggregate Characteristics and Gradation. **Journal of Transportation Engineering**, v. 137, n. 12, p. 863-873, 2011. DOI: (ASCE)TE.1943-5436.0000280.

SGARBI, G. N. C. **Petrografia Macroscópica das Rochas Ígneas, Sedimentares e Metamórficas**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

SILVA, F. D. O. **Avaliação da Cor e Taxa de Exalação de Radônio em Rochas Graníticas entre Ciclos de Envelhecimento Acelerado**. Tese (Doutorado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SWEDISH STANDARD INSTITUTE, 1997. **SS EN 933-3**: Tests for Geometrical Properties of Aggregates – Part 3: Determination of Particle Shape – Flakiness Index. Estocolmo, 1997.

TANG, C. *et al.* Numerical Investigation of Particle Breakage as Applied to Mechanical Crushing – Part I: Single-particle breakage. International. **Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 38, n. 8, p. 1147-1162, 2001. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00075-2.

TOPAL, A.; SENGOZ, B. Determination of Fine Aggregate Angularity in Relation with the Resistance to Rutting of Hot-mix Asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 155-163, 2005. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.004.

TUTUMLUER, E., RAO, C. e STEFANSKI, J. A. **Video Image Analysis of Aggregates** (Report No. FHWA-IL-UI-278). Urbana: Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000.

VAVRIK, W.; FRIES, R.; CARPENTER, S. Effect of Flat and Elongated Coarse Aggregate on Characteristics of Gyratory Compacted Samples. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1681, p. 28-36, 1999. DOI: 10.3141/1681-04.

WANG, L. *et al.* Portable Image Analysis System for Characterizing Aggregate Morphology. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2104, p. 3-11. Washington, DC, 2009. DOI: 10.3141/2104-01.

WATSON, D. E.; JULIAN, G. Effect of Flat and Elongated Aggregate on SMA Performance. **In: Transportation Research Board 97th Annual Meeting**, 2017.

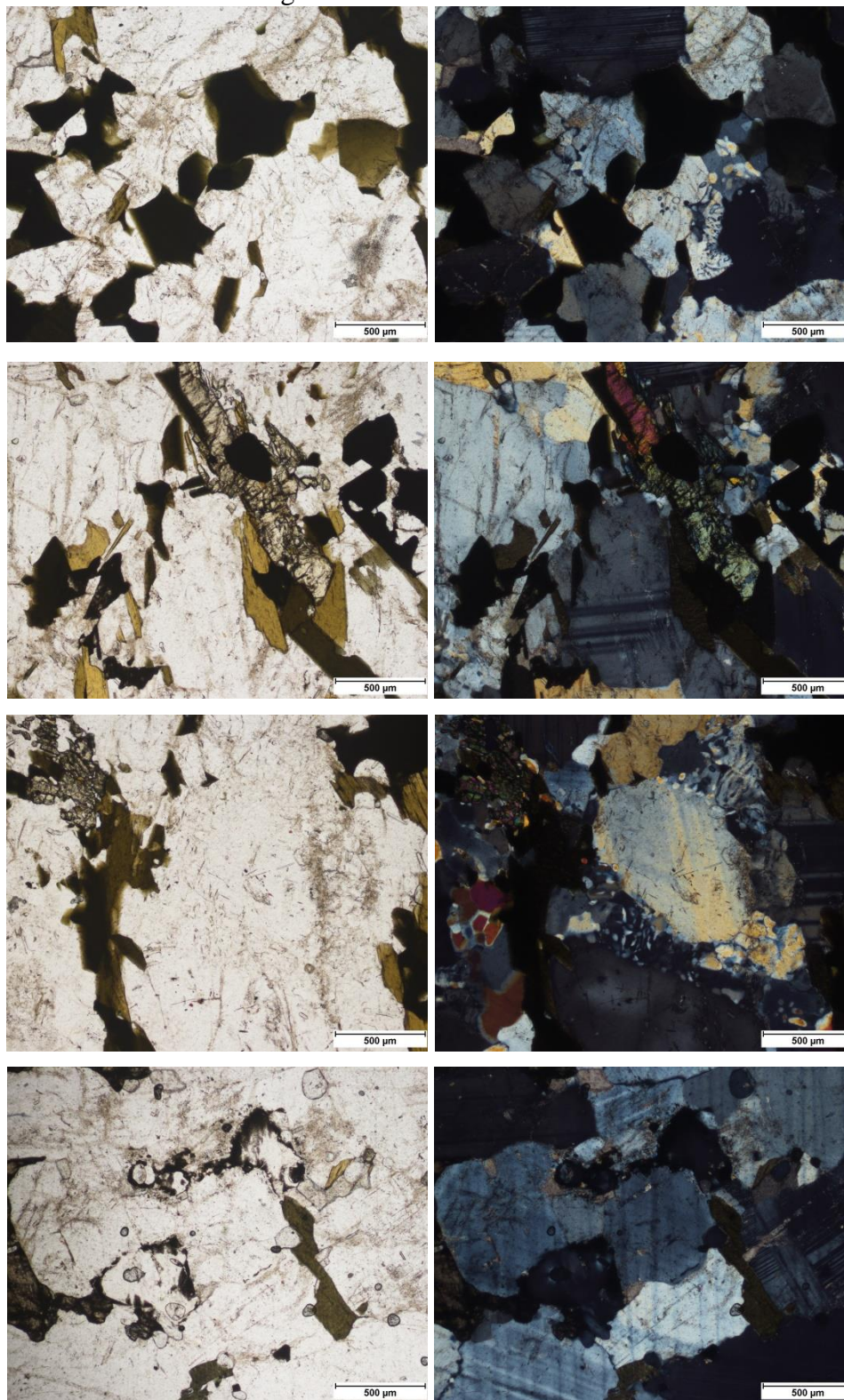
WIGUM, B. J. Examination of Microstructural Features of Norwegian Cataclastic Rocks and their Use for Predicting Alkali-reactivity in Concrete. **Engineering Geology**, v. 40, n. 3-4, p. 195-214, 1995. DOI: 10.1016/0013-7952(95)00044-5.

ZELELEW, H. *et al.* An Improved Image Processing Technique for Asphalt Concrete X-ray CT Images. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n. 2, p. 341-359, 2013. DOI: 10.1080/14680629.2013.794370.

ZHANG, Jizhe; APEAGYEI, Alex K.; AIREY, Gordon D. Effect of Aggregate Composition on Moisture Sensitivity of Aggregate-Bitumen Bonds. **In: Transportation Research Board 94th Annual Meeting**. Washington, DC, 2015.

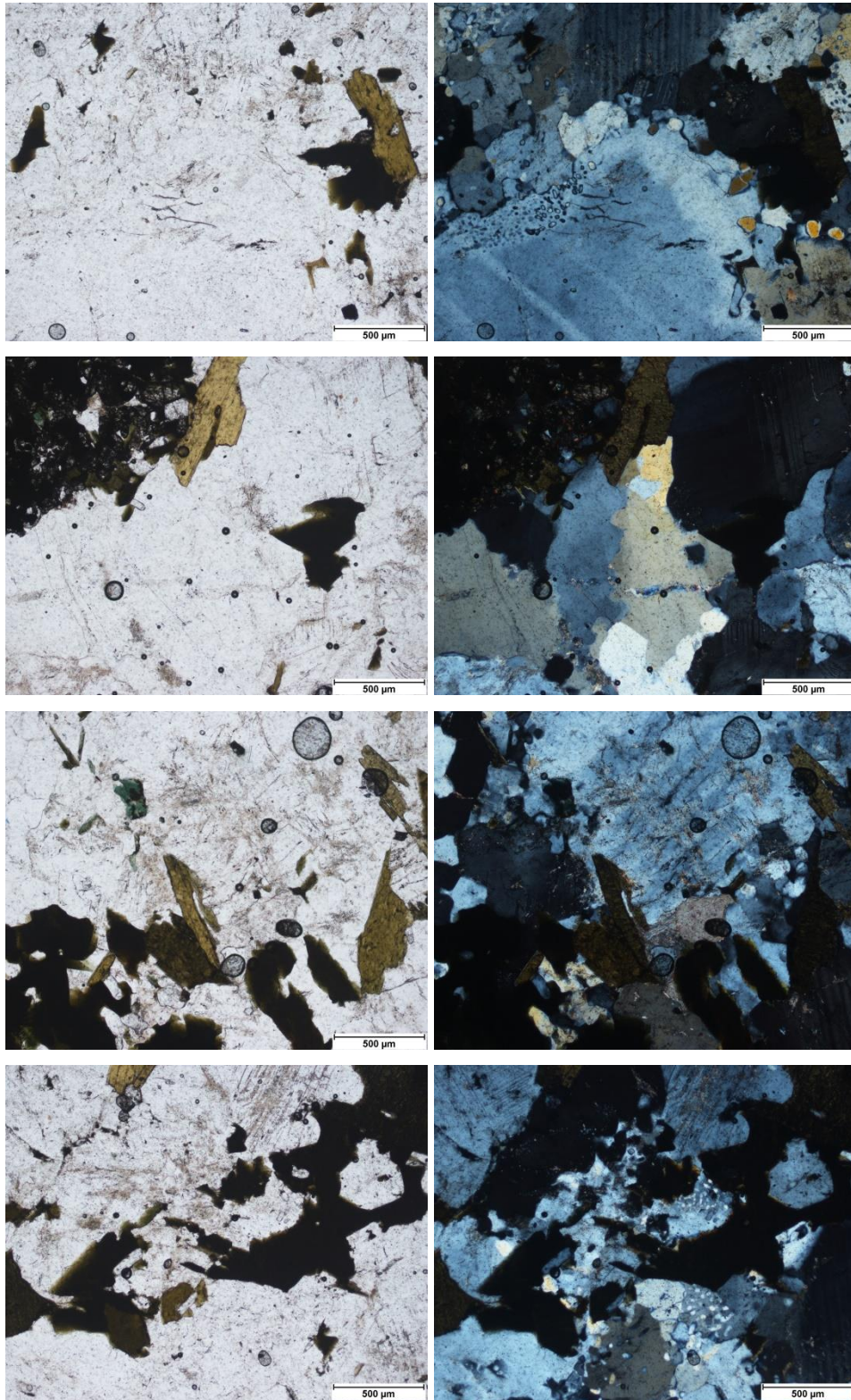
APÊNDICE A – FOTOMICROGRAFIAS DAS ROCHAS

Figura 35 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 1 da Pedreira A – Biotita-gnaiss



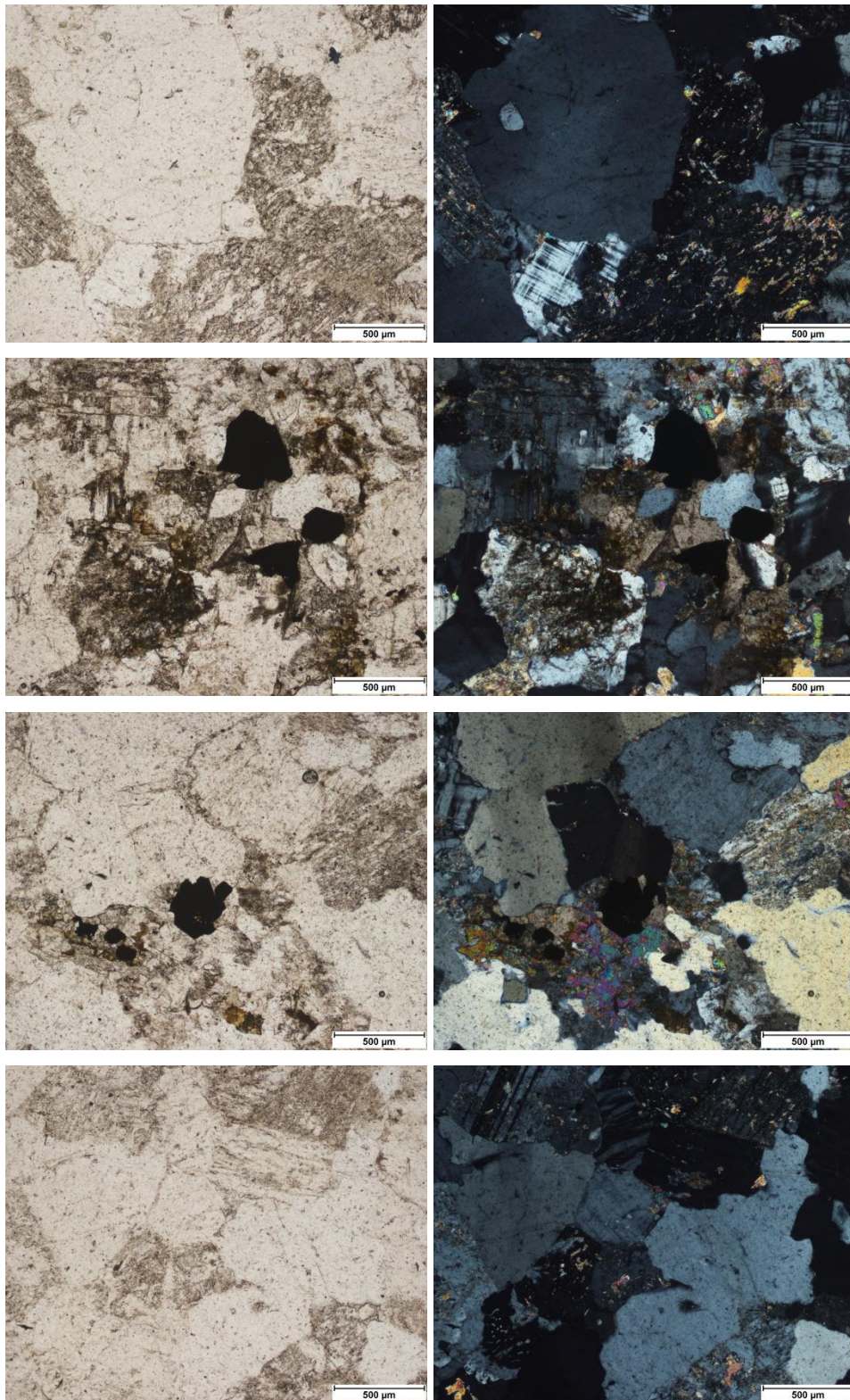
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 36 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 da Pedreira A – Gnaiss



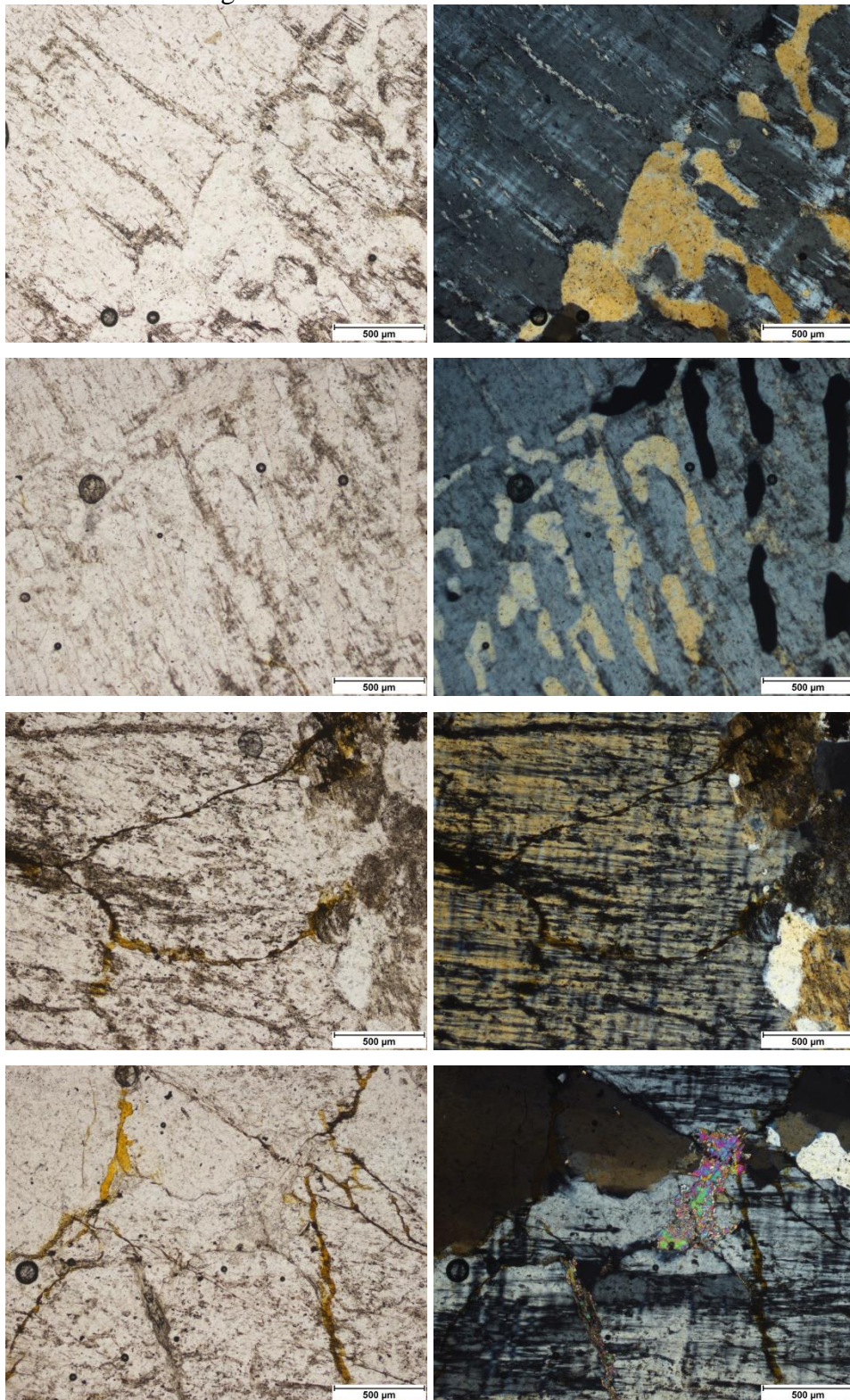
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 37 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 3 da Pedreira A – Granito



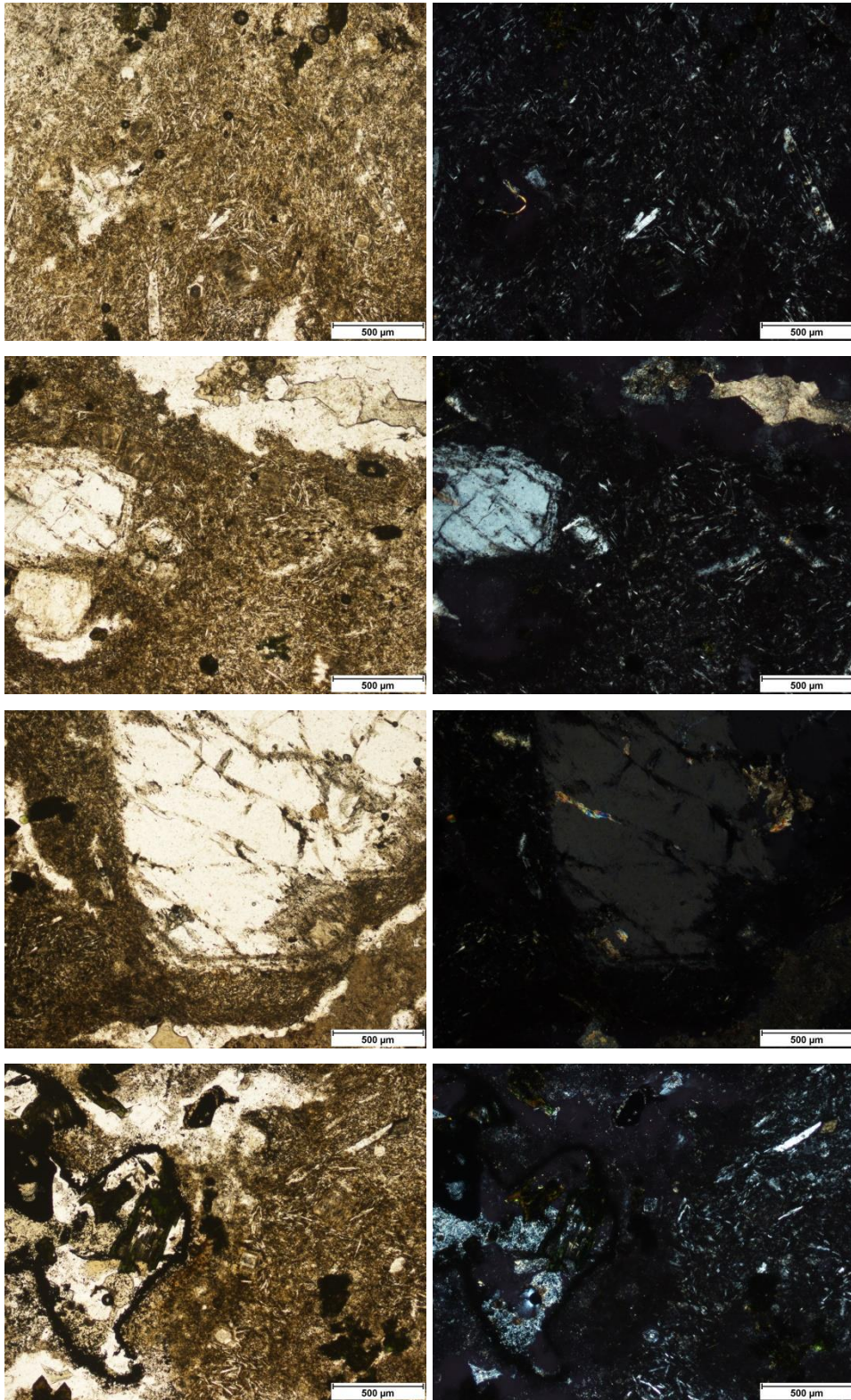
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 38 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 4 da Pedreira A – Pegmatito



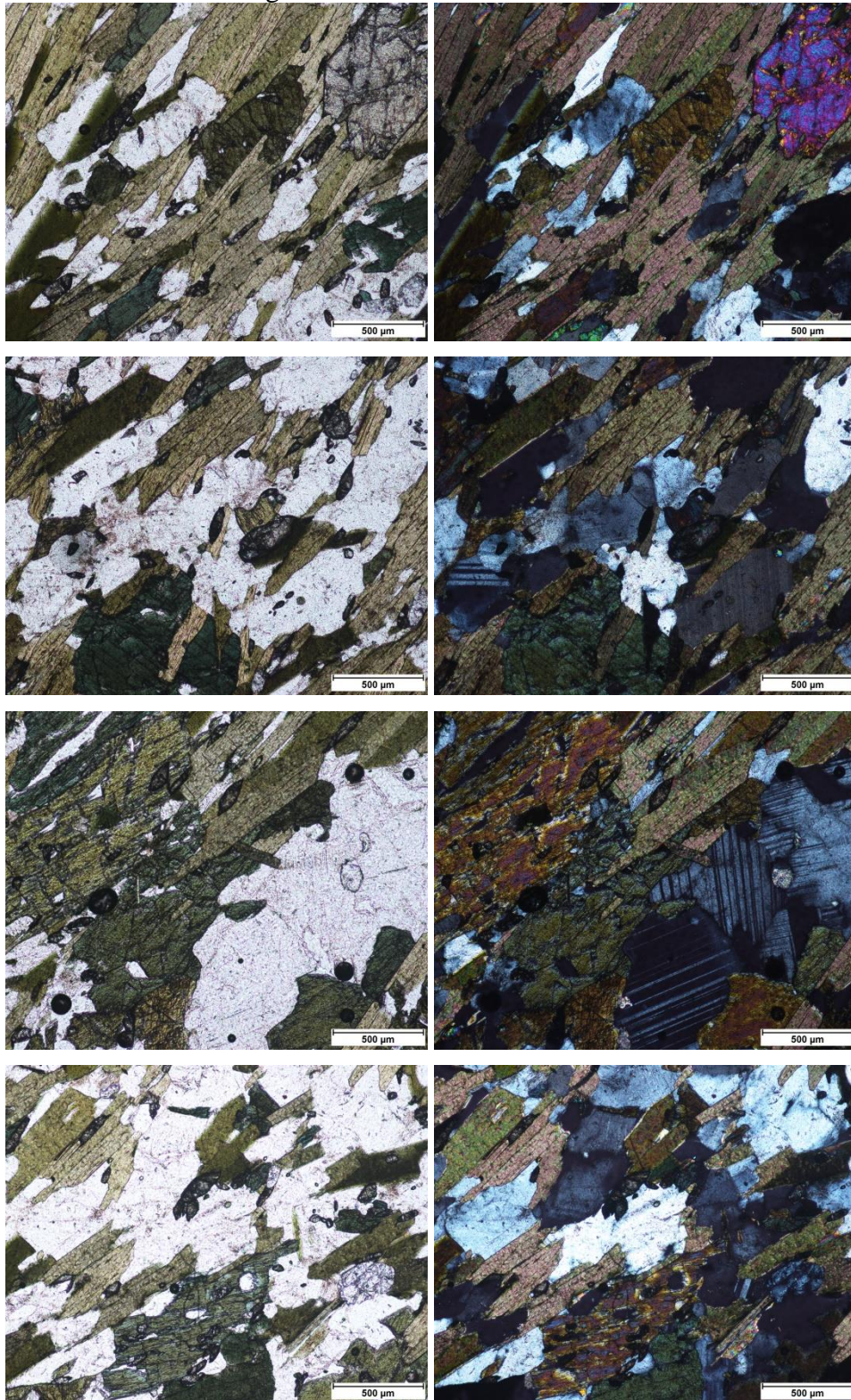
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 39 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina única – Pedreira B – Fonólito



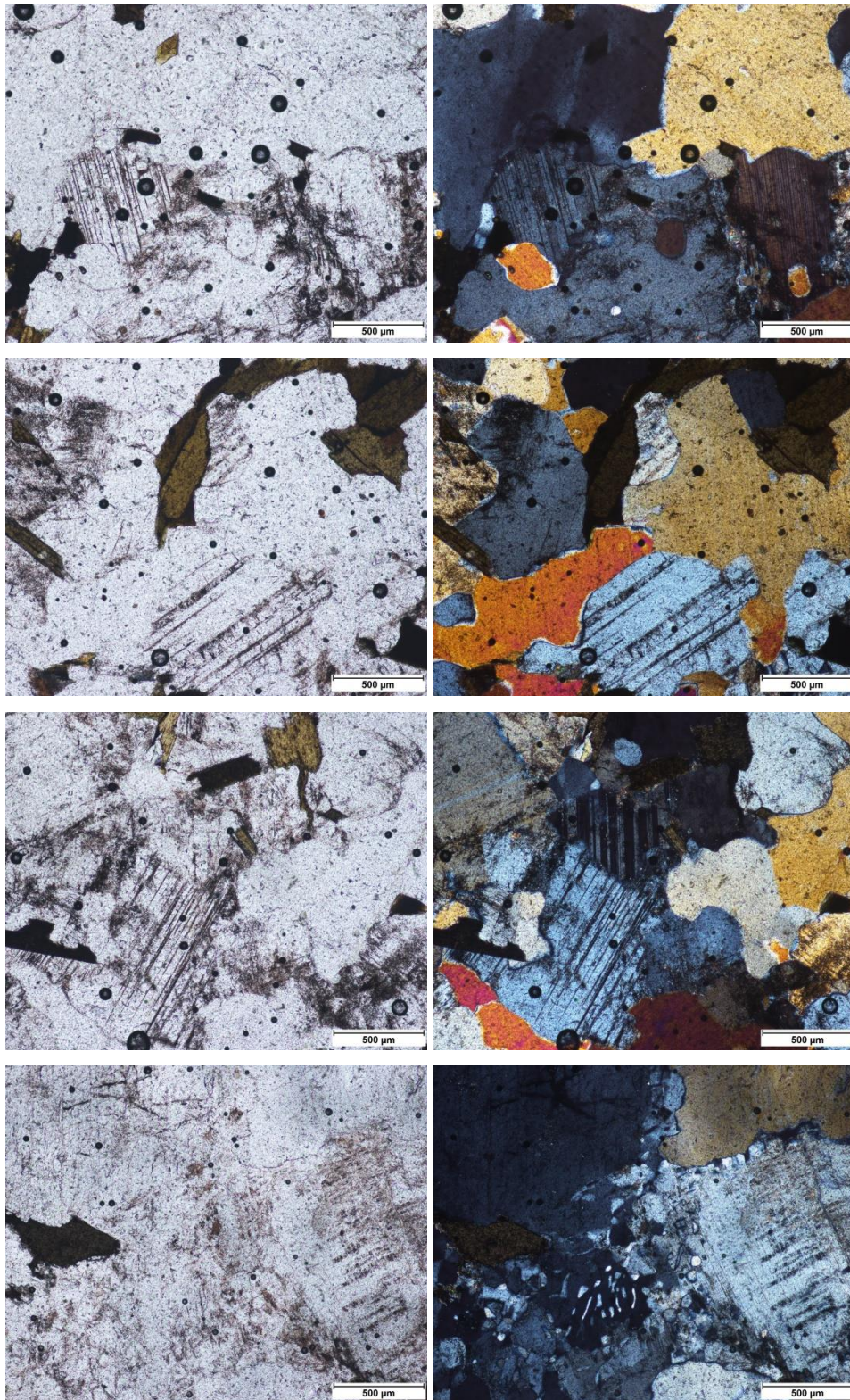
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 40 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 1 – Pedreira C – Biotita-gnaiss



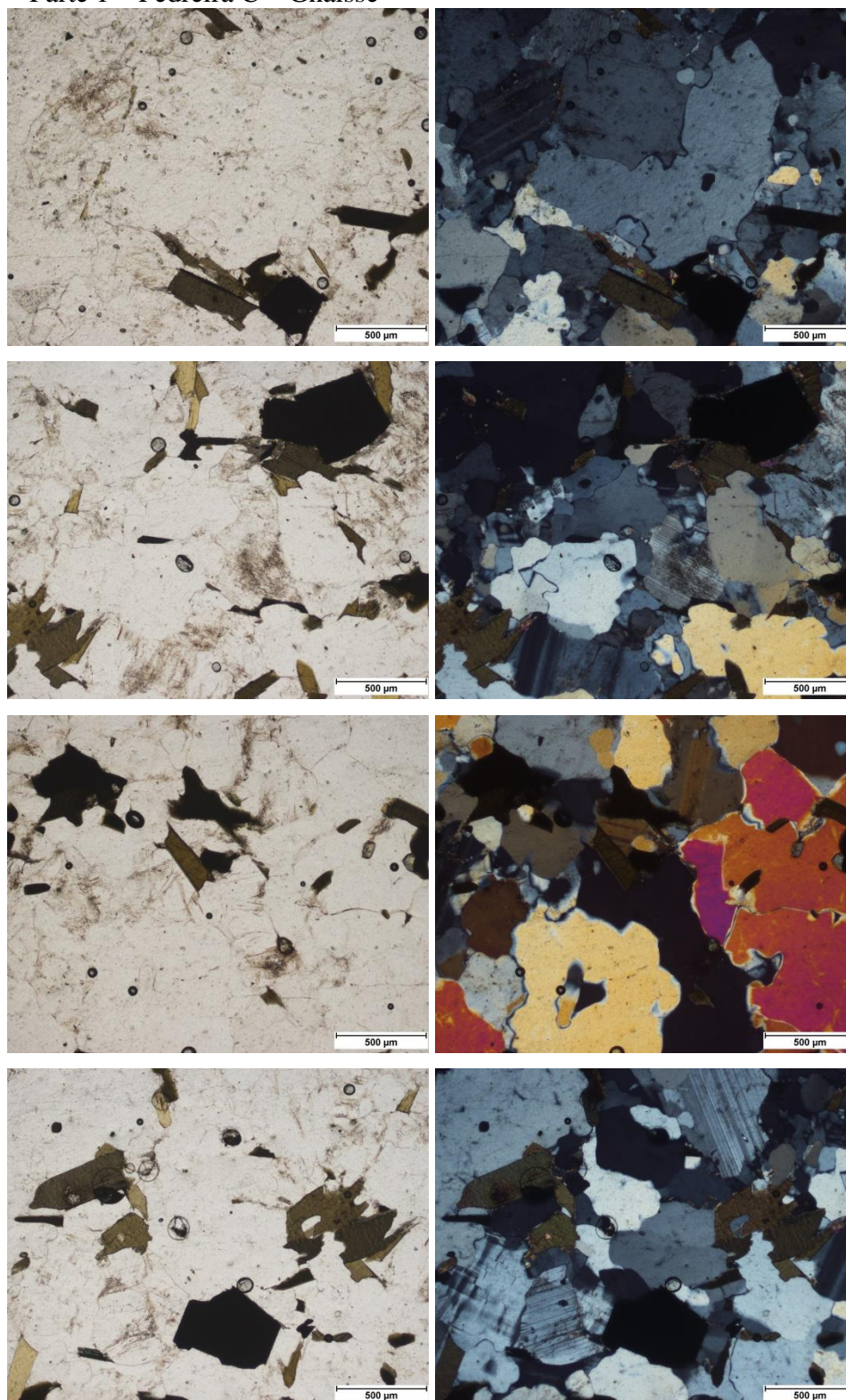
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 41 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 – Pedreira C – Granito



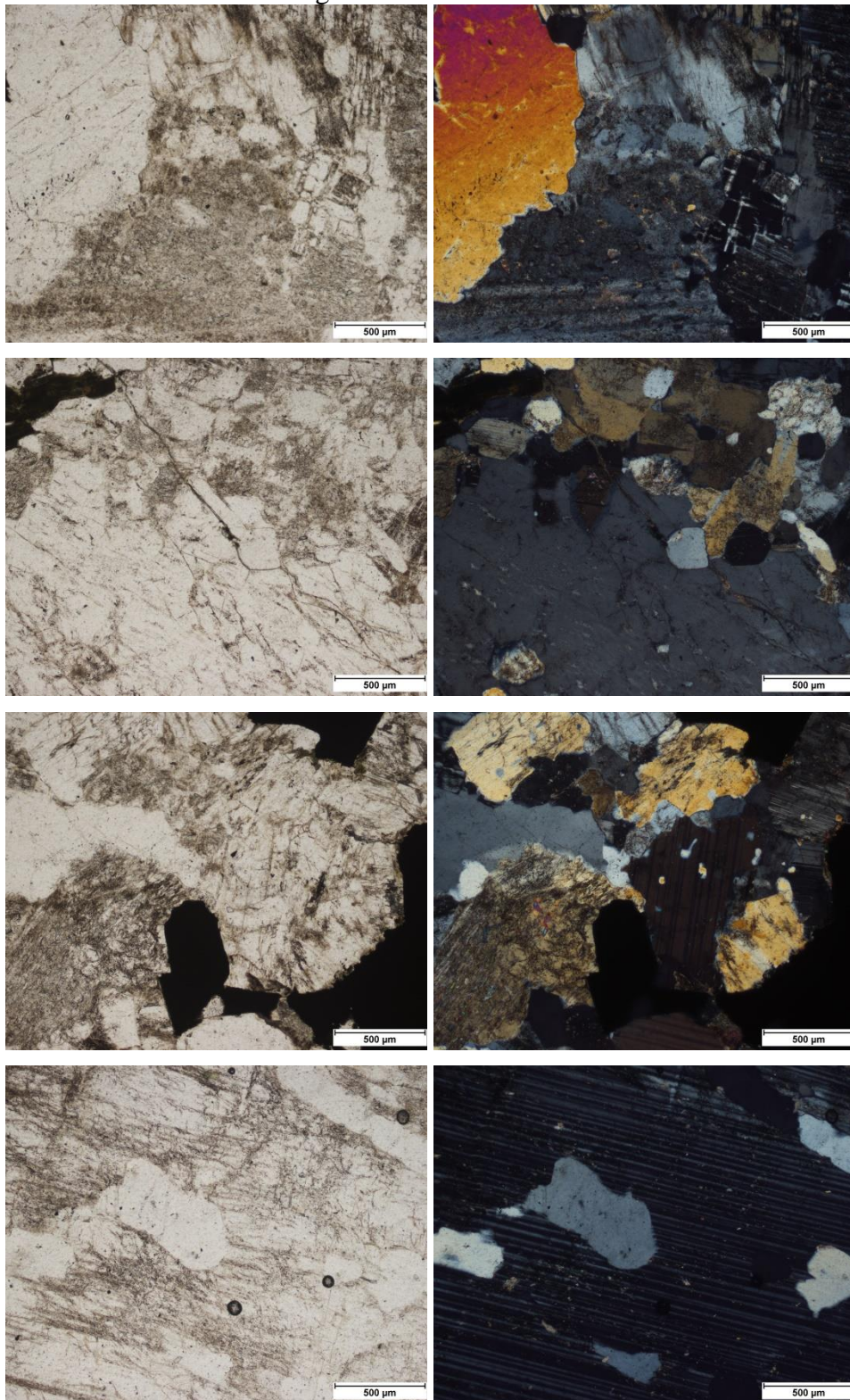
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 42 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 – Parte 1 – Pedreira C – Gnaiss



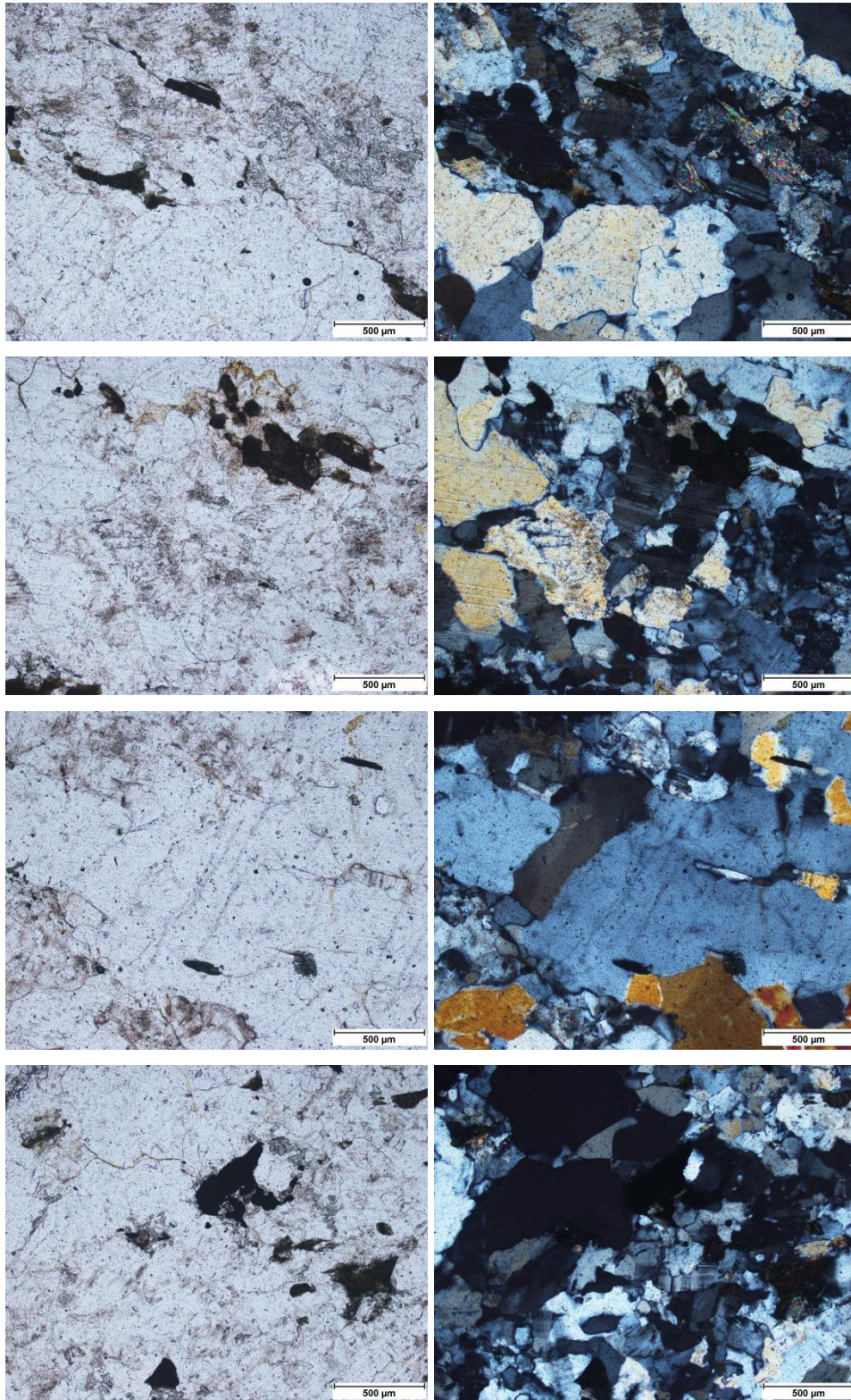
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 43 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 – Parte 1 – Pedreira C – Pegmatito



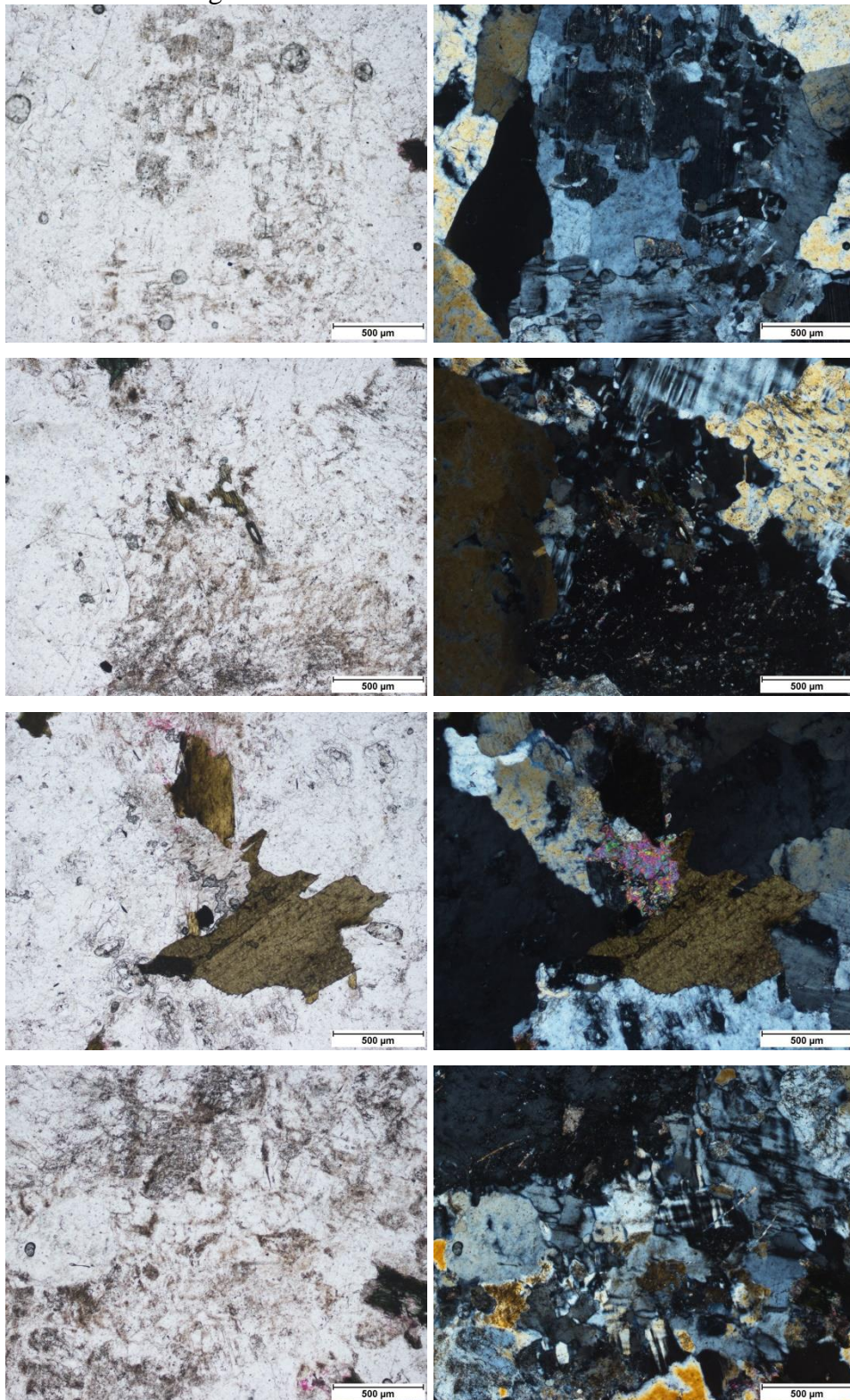
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 44 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 1 – Pedreira D – Gnaisse



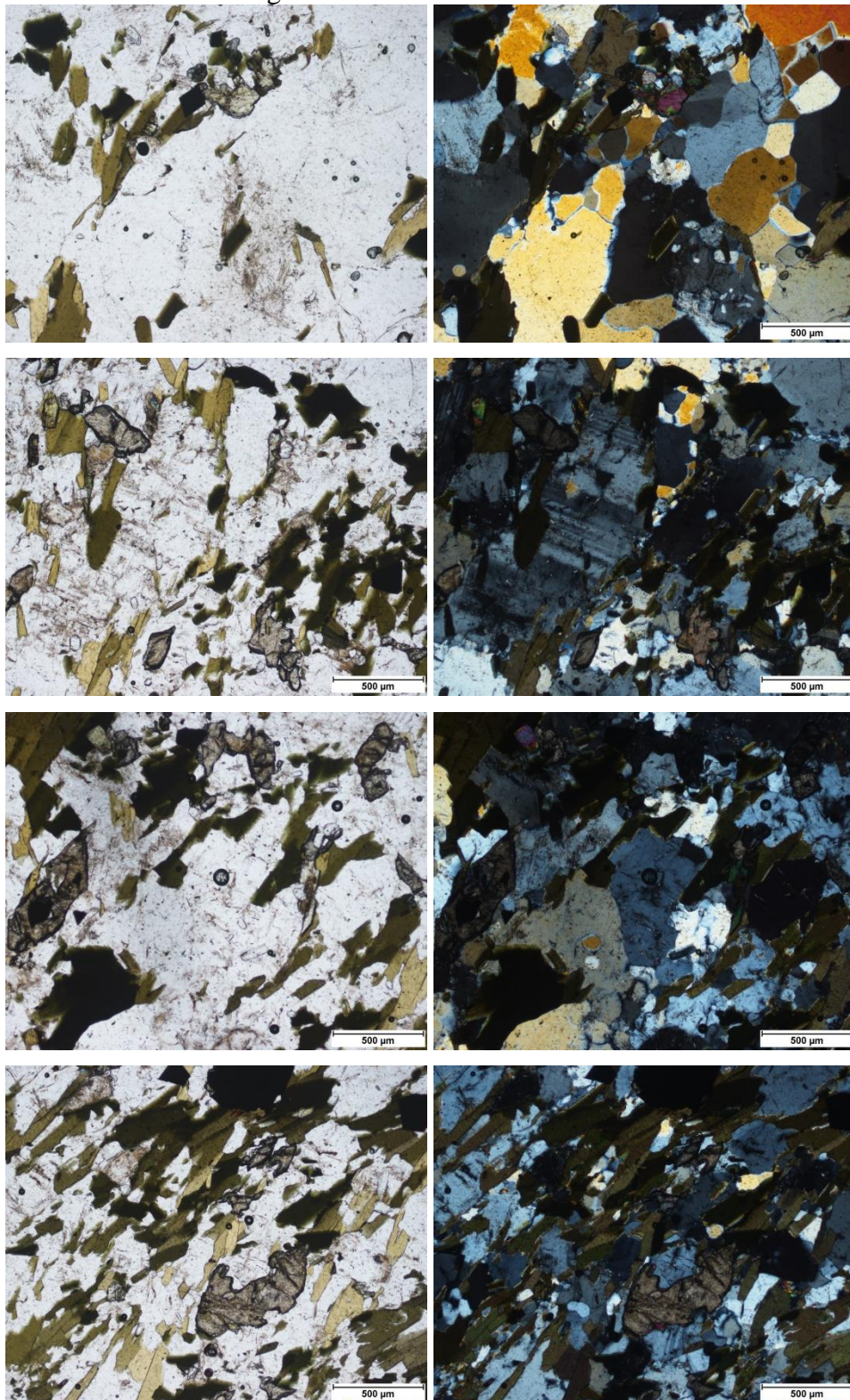
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 45 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 2 – Pedreira D – Pegmatito



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 46 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Lâmina 3 – Pedreira D – Biotita-gnaiss



Fonte: Elaborada pela autora.