



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

**AVALIAÇÃO MULTIESCALA DE PROPRIEDADES (PETROGRÁFICAS, FÍSICAS
E MORFOLÓGICAS) DE AGREGADOS E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS
PARA COMPOSIÇÃO DE LASTROS FERROVIÁRIOS**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Infraestrutura de Transportes
LINHA DE PESQUISA: Caracterização de Materiais Aplicados à Pavimentação

FORTALEZA/ CE
2021

DAIANNE FERNANDES DIÓGENES

**AVALIAÇÃO MULTIESCALA DE PROPRIEDADES (PETROGRÁFICAS, FÍSICAS
E MORFOLÓGICAS) DE AGREGADOS E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS
PARA COMPOSIÇÃO DE LASTROS FERROVIÁRIOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

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

Coorientador: Márcio Muniz de Farias, Ph. D.

**FORTALEZA/CE
2021**

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, DAIANNE FERNANDES DIÓGENES.
AVALIAÇÃO MULTIESCALA DE PROPRIEDADES (PETROGRÁFICAS, FÍSICAS E MORFOLÓGICAS) DE AGREGADOS E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS PARA COMPOSIÇÃO DE LASTROS FERROVIÁRIOS / DAIANNE FERNANDES DIÓGENES
Diógenes. – 2021.
300 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.

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

Coorientação: Prof. Dr. Márcio Muniz de Farias.

1. Agregados. 2. Petrografia. 3. Propriedades de Forma. 4. Propriedades Físicas. 5. Empacotamento. I. Título.

DAIANNE FERNANDES DIÓGENES

AVALIAÇÃO MULTIESCALA DE PROPRIEDADES (PETROGRÁFICAS, FÍSICAS E MORFOLÓGICAS) DE AGREGADOS E EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS PARA COMPOSIÇÃO DE LASTROS FERROVIÁRIOS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

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

Coorientador: Márcio Muniz de Farias, Ph. D.

Aprovada em: ____ / ____ / _____

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof.^a Sílvia Maria de Freitas, D. Sc. (Examinadora Interna)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. José de Araújo Nogueira Neto, D. Sc. (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Laura Maria Goretti Motta, D. Sc. (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof.^a Lilian Ribeiro de Rezende, D. Sc. (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Goiás (UFG)

AGRADECIMENTOS

Ao anjo da minha guarda que entre detalhes, entrelinhas e mistérios ouviu meus pedidos: "sempre me rege, me guarde, me governe, me RENOVE e me ilumine". Nesse renovar e iluminar cada tropeço se aprimorou em equilíbrio e sabedoria emocional.

Todas as pessoas que participaram dessa trajetória foram necessárias para o meu crescimento. Cada pessoa é um ser iluminado, disfarçado, a nos mostrar o caminho. Tudo que vem, vem para ensinar! Ninguém vem em vão, ninguém vai em vão. Há um propósito para a vinda de cada pessoa. Algumas vem para testar, algumas para ensinar, algumas para usar, e outras para mostrar o melhor que há em nós. Sou sinceramente agradecida por todos. Por tudo sou grata e reconheço a importância de todas as fases desse processo.

No todo, são as diferenças que nos tornam especiais, mas nem por isso somos melhores ou piores que os demais. Somos seres, cada um de nós é um SER único e a grandeza é saber/aceitar que todos temos o mesmo tamanho.

Segue a vida.
Mãos, palma com palma, em prece (Coen).

RESUMO

O desempenho da via permanente lastrada está ligado à qualidade do conjunto de agregados que constitui a matriz granular da camada de lastro. Tal camada é a única que possibilita regularização e nivelamento da superfície da via. Desse modo, esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar a relação multiescala de propriedades de agregados (petrográficas, físicas e morfológicas) e empacotamento de partículas para composição de lastro ferroviário. Para tanto, foi organizado um banco de dados de agregados analisados com o uso do *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS) e caracterizados por valor médio e percentual de partículas quanto aos dois sistemas de classificação de propriedades de forma existentes, Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018). Por meio de relações de tendências e de correlações, um banco de dados de rochas, constituído de propriedades petrográficas, físicas e morfológicas de agregados foi analisado. Posteriormente, o empacotamento da matriz granular da camada de lastro ferroviário foi avaliado, considerando a variação morfológica das partículas 3D virtuais geradas a partir de imagens 2D obtidas com o uso do AIMS, por meio de testes estatísticos. Os resultados mostraram que um mesmo agregado pode ser classificado de maneira diferente, textura superficial e forma 2D, dependendo da classificação escolhida; que a petrografia (variáveis qualitativas e quantitativas) é fundamental para prever o comportamento quanto à degradação e à morfologia de agregados (rochas com forma do grão anédrica ou anédrica/subédricas, granulação mais grossa (média/grossa), textura equigranular e contato reto apresentam tendência a maior degradação por ação abrasiva (LA), impacto (Treton) e esmagamento); que existe relação direta entre teor de minerais máficos e a resistência à degradação dos agregados; que o teor de biotita é um indicativo da angularidade antes da realização da abrasão LA e do esmagamento; que rochas com maiores teores de máficos e biotita contribuem para aumentar o valor da angularidade de agregados após a realização dos ensaios de desgaste MD; que rochas com granulação média/grossa induzem um maior valor de microfissuramento intergrãos não preenchidos entre minerais; que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas da rocha tem relação direta com a resistência à compressão uniaxial e indireta com os índices físicos de porosidade e absorção d'água; que o ensaio de abrasão LA pode ser usado para explicar os resultados do ensaio de impacto Treton e a resistência ao esmagamento; que o ensaio de impacto Treton pode ser usado para explicar a resistência ao esmagamento; que a morfologia é fundamental para prever os efeitos degradativos de agregados, sendo possível estimar as propriedades de forma de agregados a longo prazo a partir dos resultados na condição inicial; que para avaliar o empacotamento da matriz granular de lastro ferroviário, as partículas 3D virtuais foram consideradas adequadamente representadas pela formação de uma imagem 2D real obtida com o uso do AIMS, mas considerando o índice de vazios, como indicador de empacotamento, não foi possível identificar a influência da morfologia dos agregados classificados em esfericidade baixa e moderada. Por fim, contribuiu-se propondo critérios para a avaliação e seleção de agregados, ainda na fase de projeto, a depender de propriedades.

Palavras-chave: Agregados. Petrografia. Propriedades de Forma. Propriedades Físicas. Empacotamento.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 Considerações iniciais | 9 |
| 1.2 Problema de pesquisa | 10 |
| 1.3 Justificativa | 11 |
| 1.4 Objetivos | 11 |
| 1.4.1 <i>Objetivo Geral</i> | 11 |
| 1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 11 |
| 1.5 Estrutura do Documento | 12 |
| 2 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS CARACTERIZADOS PELO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS | 14 |
| 2.1 Introdução | 14 |
| 2.2 Revisão Bibliográfica | 15 |
| 2.2.1 <i>Caracterização morfológica de agregados</i> | 15 |
| 2.2.1.1 <i>Caracterização das propriedades de forma de agregados pelo uso do AIMS</i> | 16 |
| 2.2.2 <i>Sistemas de classificação das propriedades de forma de agregados com o uso do AIMS</i> | 19 |
| 2.2.3 <i>Influência das propriedades de forma dos agregados</i> | 21 |
| 2.3 Materiais e Método | 25 |
| 2.3.1 <i>Agregados</i> | 25 |
| 2.3.2 <i>Método</i> | 25 |
| 2.4 Resultados e Discussões | 28 |
| 2.4.1 <i>Classificação das propriedades de forma utilizando a média fração a fração</i> | 28 |
| 2.4.2 <i>Classificação das propriedades de forma utilizando a média geral</i> | 35 |
| 2.4.3 <i>Classificação das propriedades de forma utilizando percentual fração a fração</i> | 37 |
| 2.4.4 <i>Classificação das propriedades de forma por percentual geral</i> | 44 |
| 2.4.5 <i>Correlações entre os sistemas de classificação de agregados</i> | 46 |
| 2.5 Considerações finais | 57 |
| 3 AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES PETROGRÁFICAS, FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DE AGREGADOS PARA LASTRO FERROVIÁRIO | 59 |
| 3.1 Introdução | 59 |
| 3.2 Revisão Bibliográfica | 60 |
| 3.2.1 <i>Função e componentes de vias férreas</i> | 60 |
| 3.2.1.1 <i>Via permanente lastreada</i> | 60 |
| 3.2.2 <i>Especificações do lastro</i> | 61 |
| 3.2.3 <i>Análise petrográfica</i> | 64 |
| 3.2.4 <i>Análise morfológica</i> | 68 |
| 3.2.5 <i>Análise física</i> | 71 |
| 3.3 Materiais e Método | 77 |

| | |
|--|------------|
| 3.4 Resultados e Discussões | 80 |
| <i>3.4.1 Influência das características petrográficas no comportamento físico</i> | <i>83</i> |
| <i>3.4.2 Influência das características petrográficas no comportamento morfológico</i> | <i>94</i> |
| <i>3.4.2.1 Tendências entre petrografia e morfologia: Etapa 1</i> | <i>94</i> |
| <i>3.4.2.2 Tendências entre petrografia e morfologia: Etapa 2</i> | <i>99</i> |
| <i>3.4.3 Influência das propriedades físicas no comportamento morfológico</i> | <i>105</i> |
| <i>3.4.3.1 Tendências entre propriedades físicas</i> | <i>106</i> |
| <i>3.4.3.2 Tendências entre propriedades morfológicas</i> | <i>108</i> |
| <i>3.4.4 Protocolo para auxiliar na seleção de agregados na fase de projeto</i> | <i>111</i> |
| 3.5 Considerações finais | 112 |
| | |
| 4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS DE AGREGADOS NO EMPACOTAMENTO DA MATRIZ GRANULAR DE LASTRO ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES COM MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS | 115 |
| | |
| 4.1 Introdução | 115 |
| 4.2 Revisão Bibliográfica | 116 |
| <i>4.2.1 Desempenho da camada de lastro ferroviário: escala real e reduzida</i> | <i>116</i> |
| <i>4.2.2 Simulação discreta em lastro ferroviário: empacotamento e formato das partículas</i> | <i>120</i> |
| <i>4.2.3 Geração de partículas 3D</i> | <i>128</i> |
| <i>4.2.4 Caracterização do empacotamento de agregados</i> | <i>146</i> |
| 4.3 Materiais e Método | 149 |
| <i>4.3.1 Materiais</i> | <i>149</i> |
| <i>4.3.2 Método</i> | <i>149</i> |
| <i>4.3.2.1 Projeções das partículas 3D virtuais</i> | <i>151</i> |
| <i>4.3.2.2 Formação das partículas 3D virtuais por descritores de Fourier</i> | <i>153</i> |
| <i>4.3.2.3 Validação das partículas: 2D versus 3D</i> | <i>154</i> |
| <i>4.3.2.4 Banco de partículas 3D</i> | <i>156</i> |
| <i>4.3.2.5 Simulações de empacotamento da matriz granular</i> | <i>156</i> |
| 4.4 Resultados e Discussões | 159 |
| <i>4.4.1 Validação das partículas: 2D real versus 3D virtual</i> | <i>159</i> |
| <i>4.4.1.1 Esfericidade</i> | <i>159</i> |
| <i>4.4.1.2 Achatamento (ds/dI)</i> | <i>162</i> |
| <i>4.4.1.3 Alongamento (dI/dL)</i> | <i>165</i> |
| <i>4.4.1.4 Relação entre achatamento e alongamento (dL/ds)</i> | <i>168</i> |
| <i>4.4.2 Banco de partículas: 2D versus 3D</i> | <i>171</i> |
| <i>4.4.3 Simulações de empacotamento da matriz granular</i> | <i>176</i> |
| 4.5 Considerações finais | 182 |
| | |
| 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 184 |
| | |
| REFERÊNCIAS | 187 |

| | |
|---|-----|
| APÊNDICE A – BANCO DE DADOS | 195 |
| APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO POR MÉDIA FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE FRACÇÕES CLASSIFICADAS IGUAIS | 204 |
| APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO POR MÉDIA FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE FRACÇÕES CLASSIFICADAS DIFERENTES | 206 |
| APÊNDICE D – CARACTERIZAÇÃO POR MÉDIA FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE ALTERAÇÃO EM ALGUMA FRAÇÃO | 209 |
| APÊNDICE E – CARACTERIZAÇÃO POR PERCENTUAL FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE FRACÇÕES CLASSIFICADAS IGUAIS | 212 |
| APÊNDICE F – CARACTERIZAÇÃO POR PERCENTUAL FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE FRACÇÕES CLASSIFICADAS DIFERENTES | 214 |
| APÊNDICE G – CARACTERIZAÇÃO POR PERCENTUAL FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE ALTERAÇÃO EM ALGUMA FRAÇÃO | 217 |
| APÊNDICE H – DADOS PETROGRÁFICOS | 222 |
| APÊNDICE I – DADOS FÍSICOS E MORFOLÓGICOS | 227 |
| APÊNDICE J – PARÂMETROS 2D REAIS E 3D VIRTUAIS | 234 |
| APÊNDICE K – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO ESFERICIDADE | 250 |
| APÊNDICE L – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO ACHATAMENTO | 254 |
| APÊNDICE M – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO ALONGAMENTO | 258 |
| APÊNDICE N – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO RELAÇÃO ACHATAMENTO E ALONGAMENTO | 262 |
| APÊNDICE O – QUANTITATIVO DE PARTÍCULAS 3D VIRTUAIS POR PENEIRAS PARA AS SIMULAÇÕES DE EMPACOTAMENTO | 266 |
| ANEXO A – FOTOMICROGRAFIAS DAS ROCHAS APLICADAS NO ESTUDO | 274 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O carregamento dinâmico em uma via férrea gera fortes vibrações nos componentes da via permanente o que pode, inclusive, causar alterações no seu perfil e no alinhamento da mesma, ou seja, instabilidade geométrica. A seleção de procedimentos capazes de aumentar a estabilidade e a segurança da via permanente é fundamental para manter a confiabilidade da indústria ferroviária e garantir capacidade suficiente para suportar possíveis aumentos de carga, sem a ocorrência de acidentes, como descarrilamentos.

Dentre os elementos constituintes da estrutura férrea elástica, o lastro é considerado o único componente que possibilita a regularização e o nivelamento da superfície da via. Com o intuito de reduzir custos relativos à manutenção da subestrutura e aperfeiçoar a operação, um melhor entendimento das características físicas e mecânicas dos materiais da subestrutura é essencial, sendo o lastro uma camada importante.

O lastro ferroviário é uma camada da subestrutura constituída de agregados e situada entre os dormentes (face inferior) e o sublastro, de modo a funcionar como um colchão amortecedor e absorver, assim como, transmitir os esforços solicitantes à fundação (SELIG e WATERS, 1994). Além disso, essa camada deve suprimir as irregularidades da via, impedir os deslocamentos dos dormentes, sejam estes longitudinais e/ou transversais, e, principalmente, facilitar a drenagem da superestrutura. Para atender estas funções, as características dos materiais a serem aplicados na camada lastrada são fundamentais para o desempenho do lastro ferroviário, bem como da via permanente como um todo.

O desempenho da camada de lastro está ligado à qualidade do conjunto de partículas que constitui a matriz granular lastrada. A análise petrográfica é um estudo minucioso utilizado como ferramenta para compreender as características originais da rocha e assim prever o desempenho do material utilizado na via, bem como o comportamento do mesmo diante de processos de degradação (CHRISMER, 1986; WATTERS; KLASSEN; CLIFTON, 1987; SELIG; WATERS, 1994; NAVARRO; ARTUR, 2002). Semelhante à análise petrográfica, para Huang (2010), Wnek *et al.* (2013), Ouhbi *et al.* (2016), Diógenes (2016), Koohmishi e Palassi (2017), entre outros, a análise morfológica é importante para o adequado entendimento acerca do desempenho do lastro. Tal análise busca compreender as características relacionadas ao tamanho e às propriedades de forma (forma 2D, esfericidade, angularidade e textura superficial). As propriedades físicas, por sua vez, são fundamentais para efetuar a

previsão do comportamento dos agregados sob as mais diversas situações e/ou solicitações submetidas, como por exemplo, compressão, pressão, fricção, impacto, agentes intempéricos, agentes químicos, entre outros (SELIG; BOUCHER, 1990; ORTIZ; MAHMOUD, 2014; MOAVENI *et al.*, 2016; GUO; JING, 2017; QIAN *et al.*, 2017; REMÉDIO, 2017).

Outra característica fundamental que remete à eficiência da via é a granulometria dos agregados. Essa característica está ligada ao empacotamento dos agregados (intertravamento; resistência ao cisalhamento; rigidez e deformação da matriz) e é afetada por diversos fatores, tais como: o tempo de uso da via, a contaminação por materiais externos, a colmatação por materiais finos provenientes do desgaste do próprio lastro ou de bombeamento de finos provenientes de camada inferiores e dos processos de manutenção através, principalmente, da socaria, que causam quebras e desgaste nos mesmos. Nesse contexto, a seleção de agregados com propriedades adequadas para uso na camada de lastro ferroviário pode contribuir para um melhor desempenho da via, reduzir desgastes e falhas dos elementos constituintes da via, assim como, o número de intervenções de manutenção.

Este estudo busca otimizar a seleção de agregados para lastro a partir de ensaios característicos simples com variação multiescala, como as obtidas pela petrografia, morfologia e caracterização física. Além disso, busca caracterizar o empacotamento de um conjunto de partículas na formação da matriz granular lastrada a partir de variações morfológicas das partículas. Contudo, existe a complexidade de estudar, em laboratório, os mecanismos que influenciam o comportamento da camada de lastro diante do Tamanho Máximo Nominal (TMN) das partículas. Para tanto, a aplicação de Métodos dos Elementos Discretos (MED) para a estimativa de empacotamento/intertravamento da matriz granular pode ser empregada com eficiência a fim de otimizar o percurso experimental da pesquisa.

1.2 Problema de pesquisa

Conforme a problemática apresentada na contextualização, o lastro é um dos principais elementos responsável por assegurar resistência, segurança e conforto à via permanente. A nível de projeto, a seleção dos agregados a partir de propriedades determinadas de forma tradicional, baseadas em índices, pode conduzir a seleção de materiais inapropriados diante das solicitações aplicadas. Este fato pode ocasionar desgastes e falhas prematuras na via permanente, de modo a provocar a necessidade de realização de intervenções rotineiras de manutenção não desejadas. Outra questão é que as propriedades originais dos agregados são modificadas a partir do tráfego e da realização de manutenções/socarias, principalmente com

alteração nas propriedades de forma dos grãos. Diante disso, altera-se o empacotamento da matriz granular de lastro e, conseqüentemente, a capacidade de suporte da estrutura da via.

1.3 Justificativa

Diante da problemática, justifica-se o esforço de pesquisa para auxiliar na seleção de agregados para camadas de lastro ferroviário que proporcionem desempenho funcional eficiente no maior período de tempo possível, de modo a estabelecer um empacotamento da matriz granular resistente a deformação permanente e eficaz quanto à permeabilidade d'água. Por outro lado, justifica-se o estudo por este estar diretamente associado à estabilidade da via e a programação das intervenções de manutenção na camada granular lastrada de forma econômica, e não de forma prematura.

Assim, almeja-se na presente pesquisa alcançar previsões de empacotamento de agregados a partir das características morfológicas dos mesmos para explicar e avaliar um fenômeno que é complexo. Tal fenômeno, normalmente é avaliado através de pesquisa experimental em laboratorial e em campo, o que necessita de elevada quantidade de material a ser ensaiado, bem como de uma infraestrutura laboratorial robusta, e de instrumentação da via permanente.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa tem como objetivo geral avaliar a relação multiescala de propriedades de agregados (petrográficas, físicas e morfológicas) e empacotamento de partículas para composição de lastro ferroviário. Em especial, foca-se na camada de lastro ferroviário para obter o desempenho de vias mais resistentes (empacotamento) no que se refere ao principal mecanismo de dano que afeta as vias permanentes que é a deformação permanente.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral da presente pesquisa, alguns objetivos específicos foram delineados:

1. Avaliar se os sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados estabelecidos por Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018) conduzem a resultados de propriedades de forma diferentes para os mesmos agregados;
2. Avaliar as relações entre propriedades petrográficas, físicas e morfológicas de agregados;
3. Analisar a geração de partículas 3D virtuais desenvolvida a partir de parâmetros de forma extraídos de agregados caracterizados pelo Processamento Digital de Imagens (PDI) em escala 2D;
4. Analisar a influência de diferentes propriedades morfológicas de agregados no empacotamento da matriz granular de lastros ferroviários simulado em Métodos dos Elementos Discretos (MED).

1.5 Estrutura do Documento

O presente documento de tese está dividido em capítulos independentes, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1: O presente capítulo apresenta a contextualização da problemática a respeito das características da via permanente, com foco na camada de lastro que é responsável por transmitir os esforços dinâmicos do material rodante, pela regularização e pelo nivelamento da superfície da via. Este capítulo apresenta, também, as questões de pesquisa, bem como o objetivo geral, os objetivos específicos da pesquisa, assim como a estrutura deste documento de tese.

Capítulo 2: Este capítulo contextualiza a aplicação de agregados em diversas áreas, descrição dos parâmetros de propriedades de forma de agregados com o uso do equipamento *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)*, bem como os dois sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados caracterizadas com o uso do AIMS e a influência destas propriedades em diversas aplicações. Busca-se contribuir com a organização de um banco de dados de propriedades de forma de agregados brasileiros de modo a analisar quais modificações e tendências ocorrem na classificação de mesmos agregados através de dois sistemas de classificação: Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018). É uma continuação do estudo realizado por Ibiapina (2018) que uma publicação na Revista Transportes em dezembro de 2020 (Ibiapina *et al.*, 2020).

Capítulo 3: Este capítulo apresenta as funções, componentes, características e especificações de ensaio de uma via férrea com foco na camada de lastro ferroviário e a

influência das análises petrográficas, físicas e morfológicas para agregados. Objetiva avaliar a relação entre as características petrográficas, físicas e morfológicas de agregados, de modo a otimizar a seleção dos mesmos para composição do lastro ferroviário a partir de ensaios de fácil obtenção com variação multi escala, auxiliar na previsão do comportamento de lastro ferroviário, que permita a redução de desgastes e falhas nos elementos de via e intervenções rotineiras de manutenção não desejadas. Por fim, apresenta diagramas que auxiliam na escolha dos materiais ainda na fase de projeto para as diversas áreas, como por exemplo, ferroviária, rodoviária, construção civil e aplicações ornamentais. Este capítulo foi reduzido em artigo e submetido ao periódico *Engineering Geology* em março de 2021.

Capítulo 4: Este capítulo contextualiza a via lastrada, a simulação em MED para lastro com partículas esféricas, poliédricas regulares e irregulares, aglomerados de esferas e partículas esféricas com atrito superficial, a obtenção de parâmetros morfológicos através de imagem 2D, as técnicas de geração de partículas 3D desde descritores de Fourier à Harmônicos esféricos. Foi desenvolvido um banco de partículas 3D virtuais a partir de imagens 2D reais, obtidas com o uso do PDI, e avaliada a influência dos parâmetros morfológicos de agregados no empacotamento de lastro. Por fim, apresenta as análises de regressão para os parâmetros esfericidade, achatamento, alongamento e relação achatamento e alongamento inseridos na geração das partículas 3D virtuais para três formas diferentes e resultados de testes estatísticos para as comparações entre os empacotamentos gerados.

Capítulo 5: Este capítulo apresenta as conclusões gerais após a avaliação de dois sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados; após a avaliação da relação entre propriedades petrográficas, físicas e morfológicas de agregados e após a avaliação da influência de diferentes propriedades morfológicas de agregados no empacotamento da matriz granular de lastros ferroviários. Este capítulo contém, também, algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE FORMA DE AGREGADOS CARACTERIZADOS PELO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

2.1 Introdução

As propriedades de forma de agregados podem ser expressas por alguns parâmetros tais como: forma (forma 2D e esfericidade), textura superficial e angularidade. Estas características são relevantes para inúmeras aplicações.

Na construção civil, as seguintes aplicações podem ser mencionadas: produção de argamassas mais resistentes/aderentes devido ao melhor intertravamento entre partículas; concreto com melhor intertravamento entre partículas de modo a reduzir os vazios e, conseqüentemente, retardar as manifestações patológicas devido ao intemperismo; na pavimentação a partir da produção de misturas asfálticas/tratamentos superficiais mais resistentes aos principais mecanismos de dano: deformação permanente e fadiga, assim como na produção de revestimentos com elevada aderência pneu-pavimento; para a constituição de camadas de lastro e sublastro com desempenho superior.

O Processamento Digital de Imagens (PDI) é uma ferramenta que, nas últimas décadas, foi utilizada para a obtenção das propriedades de forma de agregados de maneira precisa, rápida e principalmente, com resultados pouco influenciados pelo operador. No Brasil, a maior parte dos estudos publicados com o uso do PDI utiliza o AIMS, desenvolvido por Masad (2005). Por muito tempo, no Brasil, a classificação das propriedades de forma de agregados com o uso do AIMS foi baseada no sistema proposto por Al Rousan (2004), que foi desenvolvido a partir da análise de um banco de dados de agregados americanos. A partir da customização do sistema de classificação proposto por Al Rousan (2004), Ibiapina (2018) idealizou outro sistema a partir de um banco de dados composto por agregados brasileiros. Embasado no estudo de Ibiapina (2018), a normatização para a determinação das propriedades de forma dos agregados graúdos e miúdos por meio do PDI foi estabelecida, ME 432 (DNIT, 2020).

Nesse contexto, muitas pesquisas brasileiras utilizaram o sistema de caracterização americano para apontar propriedades de forma de agregados o que pode não representar convenientemente a realidade encontrada para o cenário brasileiro. A partir da existência dos dois sistemas de classificação, esta pesquisa objetiva avaliar se os sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados, Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018), conduzem a resultados de propriedades de forma diferentes para os mesmos agregados. De modo específico,

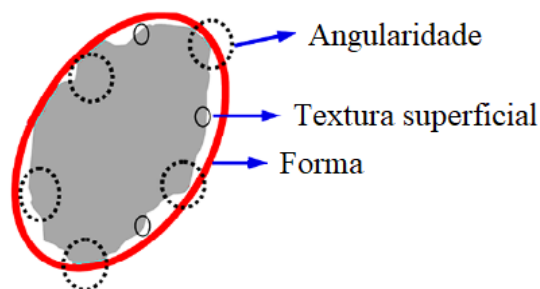
busca-se analisar quais propriedades de forma sofrem modificações quando avaliadas pelos dois sistemas e se existe alguma tendência de alteração nas propriedades dos materiais a partir destas diferenças. A realização do estudo contribui para uma adequada seleção de agregados para suas inúmeras aplicações, e previsões mais realistas ainda na fase de projeto.

2.2 Revisão Bibliográfica

2.2.1 Caracterização morfológica de agregados

A morfologia de agregados pode ser representada por três propriedades independentes, forma (dividida em forma 2D e esfericidade), angularidade e textura superficial (Figura 2.1), sendo estas denominadas de maneira geral de propriedades de forma de agregados (MASAD *et al.*, 2001). A forma é representada pelas variações nas dimensões das partículas. A angularidade envolve variações dos cantos das partículas e quanto à textura são avaliadas as irregularidades superficiais em escala microscópica. Segundo Al Rousan (2004), a forma de um agregado pode ser analisada pelo parâmetro de lamelaridade. A razão entre as dimensões menor e intermediária representa a relação de achatamento. A razão entre as dimensões intermediária e maior representa o alongamento.

Figura 2.1 – Propriedades de forma de agregados



Fonte: Adaptado de Masad (2005).

As normatizações para caracterização de propriedades de forma de agregados são diversas. No Brasil, são utilizadas as normatizações do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), atual Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), ME 086 (DNER, 1994); ME 425 (DNIT, 2020); da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 7809 (ABNT, 2006), e oriundas de instituições estrangeiras, como a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) expressas em D 4791 (ASTM, 2010); D 5821

(ASTM, 2013) e C 1252 (ASTM, 2017). Apesar destes serem ensaios tradicionais e normatizados, suas escalas mostram-se imprecisas quando comparadas e normalmente conduzem a resultados variáveis, dependentes do operador, demorados, empíricos e subjetivos quanto a interpretação dos resultados (CASTELO BRANCO *et al.*, 2006; ANOCHIE-BOATENG; KOMBA; MVELASE, 2011; BESSA, 2012; MOAVENI *et al.*, 2013). Briggs e Evertsson (1998) mencionam que os materiais são caracterizados com relação a valores médios, e não por uma distribuição de valores de modo a considerar a dispersão existente nos mesmos. Para Masad *et al.* (2007), a partir do uso de métodos tradicionais, a textura superficial dos agregados não é medida e sim avaliadas indiretamente a partir de outras propriedades (angularidade e forma).

Para aprimorar a obtenção das propriedades de forma de agregados, muitos pesquisadores aplicaram métodos que fornecem análises mais robustas para aperfeiçoar os processos experimentais, em sua maioria auxiliados pelo PDI, como por exemplo, método de decomposição *Wavelet* para imagens em escala de cinza para análise de textura superficial (CHANDAN *et al.*, 2004); transformada de Fourier para a determinação da angularidade e da forma (BOWMAN; SOGA; DRUMMOND, 2000). Alguns sistemas que utilizam o PDI para caracterização da forma de agregados podem ser citados: *Enhanced University of Illinois Aggregate Image Analyzer* (E-UIAIA) (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).

2.2.1.1 Caracterização das propriedades de forma de agregados pelo uso do AIMS

O AIMS (Figura 2.2) foi desenvolvido com o objetivo de capturar imagens e de analisar a forma de uma vasta quantidade de tipos e de tamanhos de agregados. Apresenta um sistema que realiza a caracterização das propriedades de forma de partículas miúdas (menores que 4,75 mm) e graúdas (maiores que 4,75 mm). Este equipamento opera em dois módulos: o primeiro funciona para a análise de agregados miúdos (forma 2D e angularidade), enquanto o segundo funciona para a análise de agregados graúdos (esfericidade, angularidade e textura superficial) (AL-ROUSAN, 2004). Consiste em uma câmera com dois tipos diferentes de iluminação, que seleciona as partículas nas bandejas levando em consideração a eliminação daquelas que estão em contato entre si, e assim, não causando interferência no resultado global.

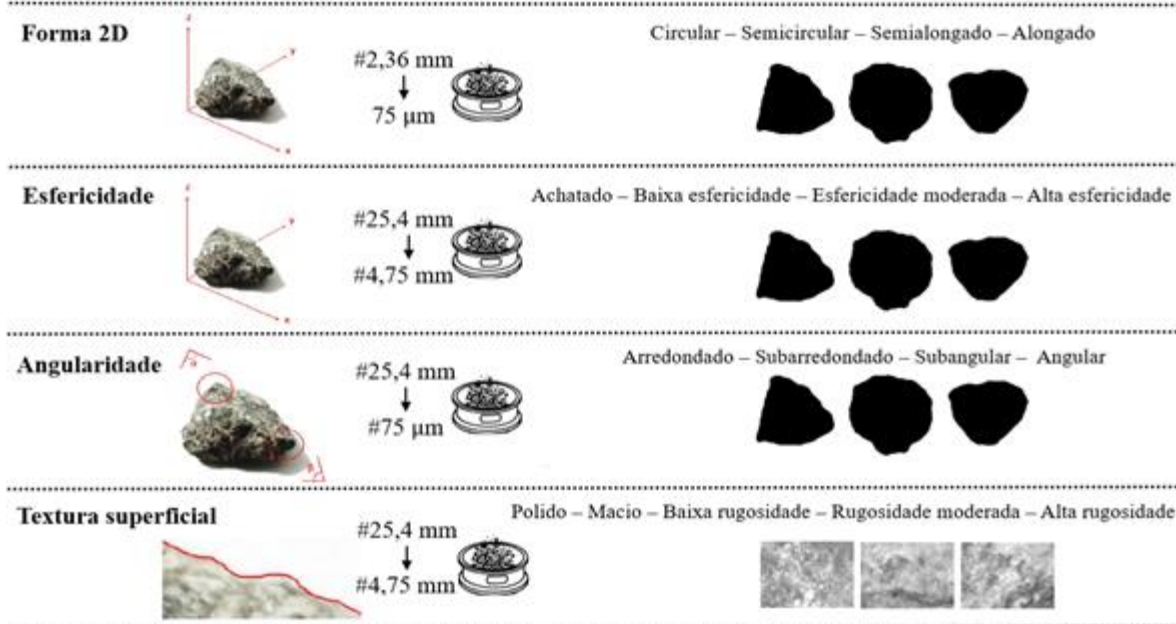
A Figura 2.3 apresenta os principais parâmetros estabelecidos pelo PDI com o uso do AIMS, suas respectivas frações de análise e as classificações qualitativas para cada propriedade morfológica (AL ROUSAN, 2004; IBIAPINA, 2018; DNIT ME 432, 2020).

Figura 2.2 – *Aggregate Image Measurement System (AIMS)*



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 2.3 – Propriedades de forma de agregados estabelecidas pelo AIMS



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A forma do agregado é analisada pela transformada de Fourier ou pelo método dos raios através de relações com as médias de raios curtos (dS), intermediários (dI) e longos (dL). Diante das projeções das partículas obtidas através de imagens capturadas pela câmera e pelo microscópio, dois dos raios das partículas podem ser obtidos. A terceira dimensão é obtida utilizando-se a função autofocus do equipamento. A distância entre a mesa e a câmera é

determinada e tomada como referência. Na sequência, o microscópio movimenta-se e foca na superfície da partícula. A diferença entre as duas distâncias é tomada como a terceira dimensão da partícula. Esta análise permite diferenciar entre partículas alongadas ou lamelares e partículas alongadas e lamelares (MASAD, 2003). Dois parâmetros utilizados para avaliação da forma de agregados são calculados: esfericidade (Eq. 2.1) e índice de forma (Eq. 2.2). A esfericidade representa as relações entre as três dimensões da partícula, ou seja, descreve sua forma tridimensional (Figura 2.4). O valor de esfericidade pode variar de 0,0 a 1,0 de maneira que quando este for igual a um (1,0), a partícula possui todas as dimensões iguais (cúbica). Um valor de índice de forma igual à zero (0,0) representa um círculo perfeito.

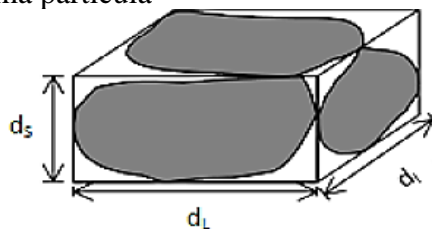
$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{d_s \times d_l}{(d_L)^2}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

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

$$\text{Índice de Forma} = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left| \frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right| \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde, Θ é o ângulo direcional, $\Delta\Theta$ é a diferença de incremento do ângulo e R é o raio em diferentes direções.

Figura 2.4 – Dimensões de uma partícula



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

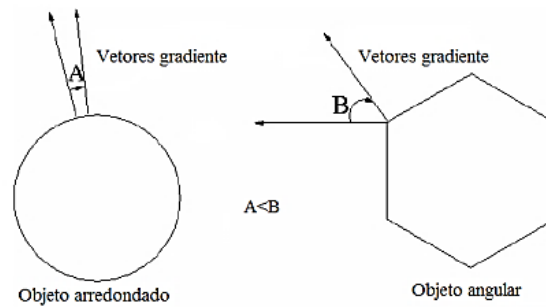
A textura superficial é analisada através do método das *Wavelets*, que caracteriza a superfície dos materiais através da média e do desvio padrão dos valores de *pixels* das imagens analisadas. O índice de textura (Eq. 2.3), para cada agregado, é obtido para um determinado nível de decomposição. Al Rousan (2004) descreveu a textura como sendo a irregularidade da superfície do agregado em uma escala tão pequena a ponto de não afetar a forma geral do grão. Para valores de índice de textura igual a 0,0, a superfície da partícula é dita totalmente polida. Esse índice varia de 0,0 a 1.000.

$$\text{Índice de Textura} = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N (D_{i,j}(x,y))^2 \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde, N é o número de coeficientes na imagem detalhada de textura, i representa as três direções de textura e j é o índice do coeficiente *Wavelet*.

Para Masad (2003), a angularidade representa as quinas dos agregados e é obtida através do método do gradiente. Esse método baseia-se no fato de que a velocidade na qual a direção do vetor gradiente é alterada depende da angularidade das partículas (Figura 2.5). Para partículas pontiagudas, o vetor gradiente muda rapidamente de direção, em partículas arredondadas esta mudança se dá de forma mais lenta. O valor do Índice de Angularidade (IA), Equação 2.4, pode variar de 0,0 a 10.000 de maneira que quando este for igual zero (0,0) significa que a partícula é totalmente arredondada. Quanto maior for o IA, mais angular é a partícula.

Figura 2.5 – Diferenças de vetores gradiente entre partículas



Fonte: Adaptado de Al Rousan (2004).

$$IA = \sum_{i=1}^{N-3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Sendo, i um ponto na borda da partícula, N o número total de pontos na borda da partícula e θ o ângulo de orientação para os pontos de borda. O valor numérico três indica que a cada três pontos na borda há mudança na direção do vetor gradiente.

2.2.2 Sistemas de classificação das propriedades de forma de agregados com o uso do AIMS

Al Rousan (2004) utilizou um banco de dados americanos composto por treze tipos de agregados graúdos e cinco tipos de agregados miúdos e realizou três ensaios no AIMS para cada tamanho com o mesmo operador, além de utilizar diferentes operadores para um mesmo ensaio. Os agregados avaliados no estudo apresentavam composição mineralógica distintas, tamanhos diversos e variações significativas em relação às propriedades de forma dos grãos.

Diante dos resultados dos ensaios, o citado autor desenvolveu uma metodologia de classificação dos agregados de acordo com os valores fornecidos pelo AIMS para cada parâmetro analisado. O método estatístico dos agrupamentos foi aplicado para as análises de seus resultados, a partir das distribuições das propriedades de forma e limites de classificação para cada propriedade obtida através do AIMS foram estabelecidos.

Mahmoud *et al.* (2010) desenvolveram um fator de cálculo para identificar e descartar imagens capturadas de partículas em contato a partir de 200 amostras de agregados de diferentes mineralogias oriundas do estado de Illinois, nos Estados Unidos. Os autores customizaram a classificação das propriedades de forma proposta por Al Rousan (2004) por meio de métodos estatísticos e estabeleceram novos limites para a classificação de angularidade e de textura superficial (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Valores limites para a classificação das propriedades de forma de agregados proposta por Mahmoud *et al.* (2010)

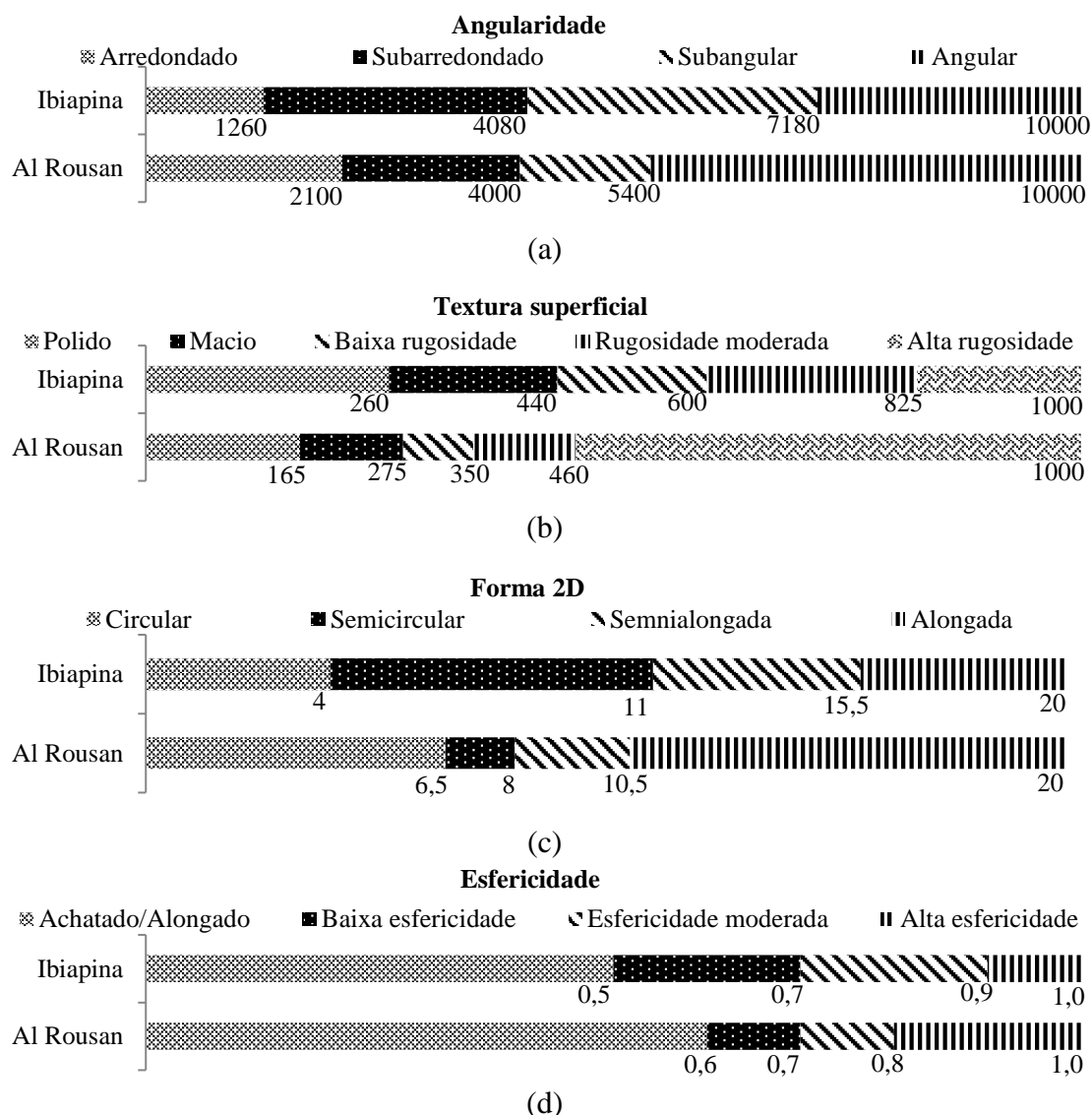
| Propriedade | 1º Quartil | 2º Quartil | 3º Quartil |
|---------------------|------------|---------------|------------|
| Angularidade | <2.420 | 2.420 – 3.418 | >3.418 |
| Textura superficial | <65 | 65 – 162 | >3.418 |

Fonte: Mahmoud *et al.* (2010).

Pesquisas no âmbito nacional, com relação às propriedades de forma de agregados normalmente usam o sistema de classificação proposto por Al Rousan (2004). No entanto, por ser um sistema de classificação baseado em propriedades de agregados americanos este pode resultar em análises errôneas quando utilizado para agregados brasileiros. Atualmente, no Brasil, existe um sistema de classificação de propriedades de forma de agregados desenvolvido por Ibiapina (2018), baseado na mesma quantidade de classes da classificação de agregados proposta de Al Rousan (2004) porém adaptados os intervalos.

A customização desenvolvida por Ibiapina (2018) utilizou um banco de dados composto por vinte agregados, com mineralogias distintas, oriundos de diferentes localidades, abrangendo oito estados brasileiros. Para cada material, foram utilizadas três frações graúdas (12,5; 9,5 e 4,75 mm) e três frações miúdas (2,36; 1,18 e 0,3 mm). A autora utilizou o método estatístico de *cluster* para calcular os valores limites para a classificação. Pôde-se concluir que dependendo da classificação adotada, um determinado agregado pode ser classificado distintamente. A Figura 2.6 apresenta os valores limites para os sistemas de classificação propostos por Ibiapina (2018) e Al Rousan (2004).

Figura 2.6 – Comparação entre os sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados propostos por Ibiapina (2018) e Al Rousan (2004): a) Angularidade; b) Textura superficial; c) Forma 2D e d) Esfericidade



Fonte: Adaptado de Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018).

2.2.3 Influência das propriedades de forma dos agregados

Castelo Branco *et al.* (2006) caracterizaram as propriedades de forma de três agregados (brita, escória CST e escória Gerdau) para uma fração graúda (passante na fração 1/2" e retida na fração 3/8", aproximadamente 56 partículas para cada agregado). A partir dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, mediana e moda), bem como da distribuição cumulativa das propriedades de forma, esses autores observaram que a utilização de resultados baseados em médias para a classificação de agregados, ao invés do uso de distribuição

cumulativa de propriedades, pode conduzir a conclusões errôneas, e até mesmo descarte de materiais.

Bessa, Castelo Branco e Soares (2011) avaliaram os processos de produção e a influência destes nas propriedades de forma de diferentes agregados. Os agregados foram classificados quanto à média pelo sistema proposto por Al Rousan (2004). No caso da angularidade observou-se uma tendência de aumento do valor a partir da redução do tamanho do agregado. Para a textura superficial, o contrário ocorreu, os valores diminuíram com a redução do tamanho dos agregados. Para a forma 2D, quanto menor o tamanho das partículas menor também foi o valor do parâmetro, ou seja, mais circular estas são.

Bessa, Castelo Branco e Soares (2013) analisaram as propriedades de forma de agregados de três fontes distintas, com diferentes Tamanhos Máximos Nominais (TMNs) e para diferentes frações de agregados com o mesmo TMN. Primeiramente, os autores compararam os materiais usando o valor médio. Em seguida, caracterizaram por TMN e, por fim, caracterizaram os agregados fração a fração. Os citados autores concluíram, com relação à média, que agregados passantes pelo mesmo processo de britagem apresentaram parâmetro de forma e angularidade similares. Já o parâmetro de textura superficial foi diferente para os três materiais, por conta da variação na composição mineralógica de cada um. Os autores ainda observaram que não existia uma tendência clara com relação às propriedades de forma e os TMNs. Quanto à avaliação realizada por fração, para a angularidade há uma tendência de aumento do valor quando o tamanho do agregado diminui, até certo ponto (para as frações 0,150 e 0,075 mm o valor diminuiu). Com relação à forma 2D, os valores tendem a diminuir a partir da redução da fração dos agregados até certo ponto (para a fração de 0,075 mm, o valor aumentou). Com relação à textura, os valores diminuíram com a redução do tamanho da fração.

Diógenes (2015), com o objetivo de avaliar como o processo de britagem influencia as propriedades de forma dos agregados, comparou três materiais oriundos de diferentes processos de britagem quanto aos ensaios tradicionais de forma e aos ensaios por meio do PDI, com a utilização do AIMS. Os valores obtidos a partir do ensaio tradicional de índice de forma e de esfericidade com o uso do AIMS apresentaram correlação de 85%. Destaca-se que o ensaio tradicional não considera o alongamento das partículas, apenas seu achatamento. Percebeu-se que à medida que o tamanho das partículas diminui, os produtos gerados por processos com menor número de estágios de britagem apresentaram partículas mais achatadas e alongadas. Já para os processos em que a fragmentação é realizada de maneira mais distribuída, com maior número de estágios de britagem, produtos mais cúbicos foram gerados.

Ainda sobre o estudo anterior, a citada autora comenta que para um mesmo material, quanto menor foi o tamanho das partículas (mais distantes do valor da abertura de saída da posição fechada do britador), menos cúbicas estas tendem a ser. Quanto à angularidade, as partículas que passaram por mais estágios tenderam a apresentar menor angularidade. A textura dos agregados mostrou-se mais relacionada à composição mineralógica do material e ao tamanho das partículas do que ao processo de britagem em si.

Diógenes (2016) avaliou as propriedades de forma de agregados utilizados em camada de lastro ferroviário em diferentes fases (proveniente da pedreira, após fase de compactação localizado logo abaixo do dormente e por fim, em uso na via permanente por cinco anos). Diante da similaridade das propriedades de forma entre os materiais, o comportamento mecânico em escala reduzida quanto à deformação permanente, ao final de 190.000 ciclos, sofreu pouca variação.

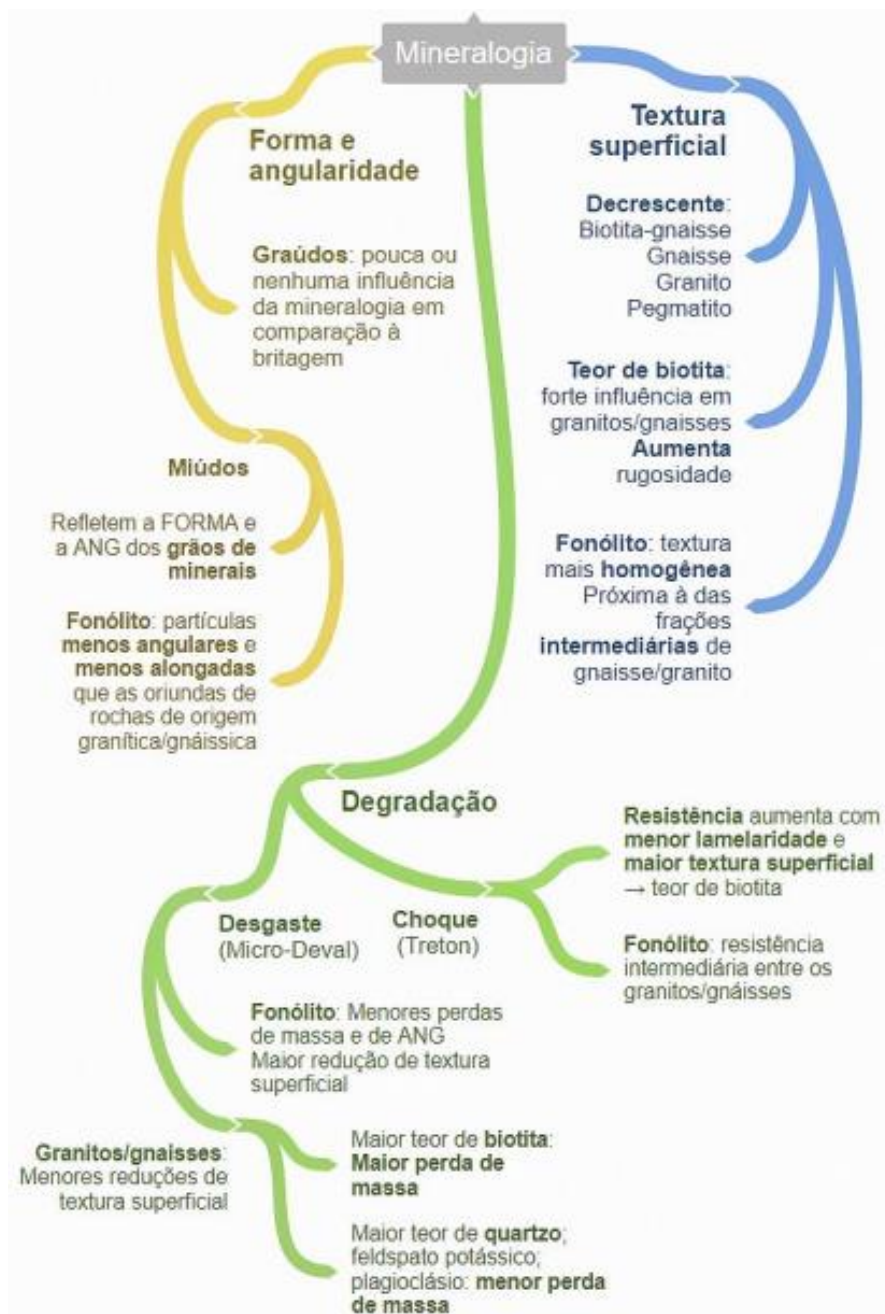
Silva (2018) e Rosa (2019) também caracterizaram agregados utilizados em camadas de lastro ferroviário. A influência dos parâmetros de forma na granulometria e no comportamento mecânico (a partir de ensaios realizados em escala real: tanque de verdadeira grandeza), bem como através da análise computacional foram analisados por esses autores.

Ibiapina (2018) avaliou o impacto na mudança das propriedades de forma de agregados, devido ao desgaste com o uso do Micro Deval, na formação do esqueleto mineral de misturas asfálticas. O esqueleto mineral foi analisado com o uso do *software Image Processing and Analysis System 2* (iPas2). Os resultados mostraram que, para avaliar a formação do esqueleto mineral das misturas asfálticas, quando o indicador for o intertravamento, as mudanças nas propriedades de forma não devem ser avaliadas isoladamente e sim em conjunto com as mudanças na granulometria e nos parâmetros de dosagem das misturas asfálticas.

Diógenes (2018) investigou as relações existentes entre as propriedades de forma do agregado, o processo de britagem, as características da rocha de origem e sua resistência à degradação com tendência à quebra, à abrasão e ao polimento (resistência à tenacidade - Treton e resistência ao desgaste - Micro Deval). Para tanto, levou em consideração características petrográficas, mineralógicas e morfológicas (antes e após a realização dos ensaios de degradação). A citada autora gerou fluxogramas tratando da relação entre britagem e propriedades de forma e entre mineralogia, propriedades de forma e resistência à degradação, bem como sugestões que auxiliam na seleção de agregados, ainda na fase de projeto, para as

inúmeras aplicações. A Figura 2.7 apresenta um exemplo de diagrama de relação entre mineralogia, propriedades de forma e resistência à degradação.

Figura 2.7 – Fluxograma da relação entre mineralogia, propriedade de forma e a resistência à degradação



Fonte: Diógenes (2018).

2.3 Materiais e Método

2.3.1 Agregados

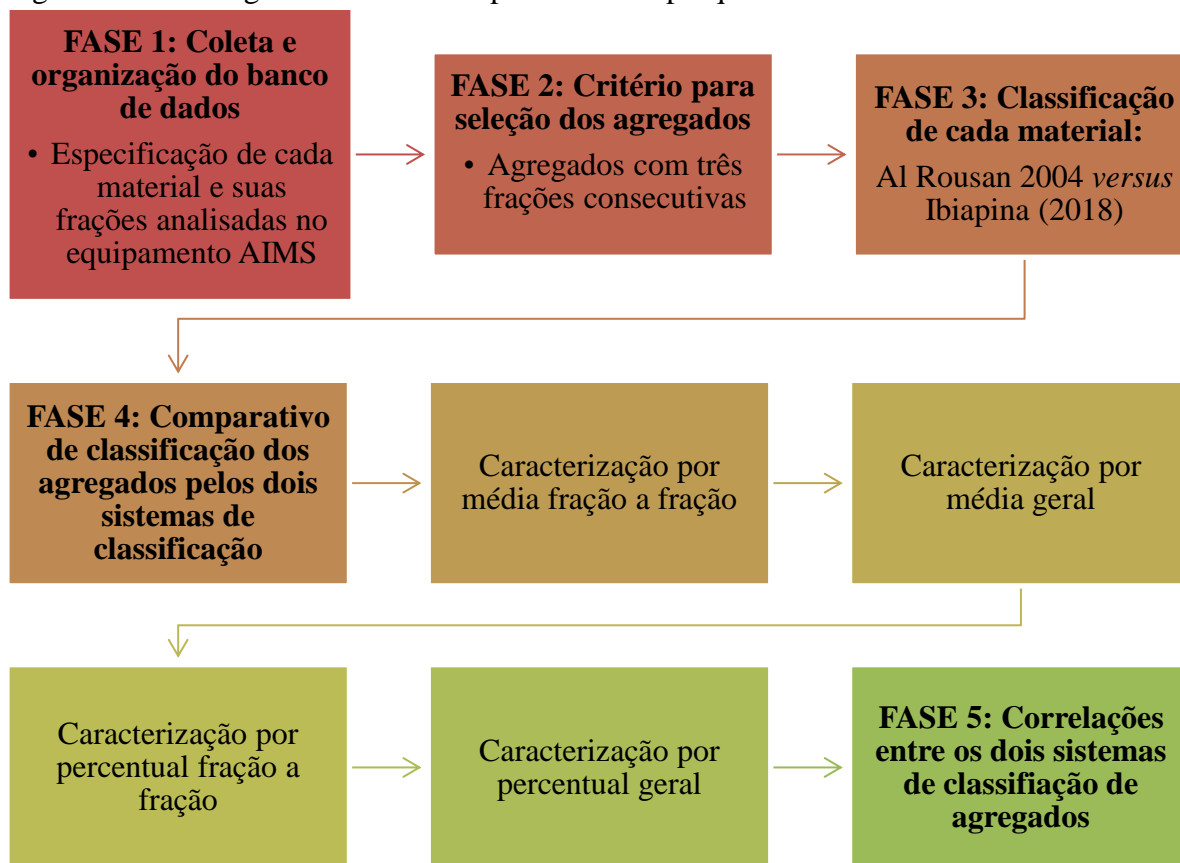
Para esta pesquisa, foi formado um banco de dados de agregados brasileiros analisados quanto à morfologia com o uso do AIMS. Vale ressaltar que no Brasil existem três equipamentos AIMS, mas os dados foram obtidos a partir de apenas dois: AIMS da Universidade Federal do Ceará (UFC) e AIMS da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sendo o terceiro pertencente ao Cenpes/Petrobras.

O banco de dados inicialmente formado contém 100 materiais oriundos do banco de dados da UFRJ (UFC em parceria com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da COPPE/UFRJ) e 100 materiais oriundos do banco de dados da UFC. Para compor a presente pesquisa, foram filtrados 149 materiais, sendo 55 materiais analisados na UFRJ e 94 na UFC. Considerou-se importante a retirada de materiais que não se enquadravam como agregados, por exemplo, bambu, madeira, esferas de vidro, casca de arroz, bem como materiais nomeados/identificados como fresado devido a possível formação de grumos. A Tabela A.1 do Apêndice A, apresenta todos os materiais, inicialmente, coletados para o estudo. Ressalta-se que os materiais que apresentam o símbolo (*) foram retirados da pesquisa conforme justificado acima.

2.3.2 Método

Neste capítulo buscou-se, através de um banco de dados de agregados brasileiros, avaliar se os sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados estabelecidos por Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018) conduzem a resultados de propriedades de forma diferentes para os mesmos agregados. Para tanto os materiais que compõem o banco de dados foram caracterizados quanto: i) a média fração a fração, (ii) a média geral, média de todos os diferentes tamanhos das partículas, (iii) ao percentual fração a fração, e (iv) a caracterização por percentual geral. A Figura 2.8 apresenta o fluxograma do método proposto para o estudo. As atividades que foram realizadas para atingir os objetivos desta pesquisa estão estruturadas em fases descritas a seguir.

Figura 2.8 – Fluxograma do método aplicado nesta pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Fase 1: o banco de dados dos materiais avaliados no AIMS (Apêndice A, Tabela A.1) foi examinado e organizado quanto ao nome da pasta de localização, ao tipo de material (quando especificado) e às frações analisadas.

Fase 2: após a organização dos dados, eliminaram-se os materiais que não se enquadram como agregados minerais e adotou-se como critério de seleção dos agregados a presença de no mínimo três frações consecutivas, por acreditar que é característica do material analisado ou característica dependente do tipo de ensaio realizado. Por exemplo, o material de número 76 (Protocolo 1 2017 Brita 1) apresenta apenas três frações consecutivas, mas acredita-se que essa é a constituição real do material. Outro exemplo, é o material de número 130 (Ibiapina Iuri Itaitinga NOVO 19,5) que apresenta somente três frações, o que é representativo para a realização do ensaio de desgaste de agregado com o uso do Micro Deval. O mesmo não pode ser visto no material de número 49 (Teste Tamile Teste 2), com análise de frações não consecutivas, o que indica que as mesmas não são as verdadeiras frações do material que poderiam ter sido analisadas no AIMS.

Fase 3: após a filtragem dos agregados para compor o banco de dados, foram desenvolvidas planilhas em *Excel* para os dois sistemas de classificação: Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018). Os dados brutos extraídos pelo AIMS para cada material foram transferidos para planilhas automatizadas para caracterização das propriedades de forma por média e por percentual, ambas divididas por fração a fração e de modo geral.

Fase 4: foram realizadas as comparações dos resultados das propriedades de forma em quatro seções. Na primeira seção, foram calculados os valores médios de cada propriedade de forma em cada fração. Em seguida, caracterizada e comparada cada fração utilizando os dois sistemas de classificação de propriedades de forma. Na segunda seção, obteve-se a média dos valores médios de cada propriedade de forma em cada fração (média geral). As classificações geradas a partir dos dois sistemas foram novamente comparadas. Na terceira etapa, calculou-se o percentual de cada propriedade de forma para cada material. E por fim, na quarta seção, realizou-se a média dos percentuais de cada propriedade de forma em cada fração, ou seja, o percentual de cada material no geral. Vale ressaltar que nas terceira e quarta seções (percentual), a caracterização das propriedades de forma manteve-se na classe de maior percentual e em seguida, cada material foi comparado utilizando os dois sistemas de classificação.

Fase 5: por fim, o banco de dados foi dividido em grupos de maior destaque de agregados com frações comuns: frações completas (25,4 a 0,075 mm), frações graúdas e miúdas (19 a 0,075 mm), frações graúdas (19 a 4,75 mm) e frações miúdas (2,36 a 0,075 mm). Para cada grupo, apenas a classe em maior percentual de classificação na fração foi analisada, sendo calculada a média representativa para cada fração diante dos dois sistemas de classificação. Em seguida, os valores médios de cada propriedade de forma foram analisados por meio de correlações entre os dois sistemas de classificação, sendo o coeficiente de determinação (R^2) caracterizado de acordo com Witczack *et al.* (2002), Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Intensidade de Correlação R^2

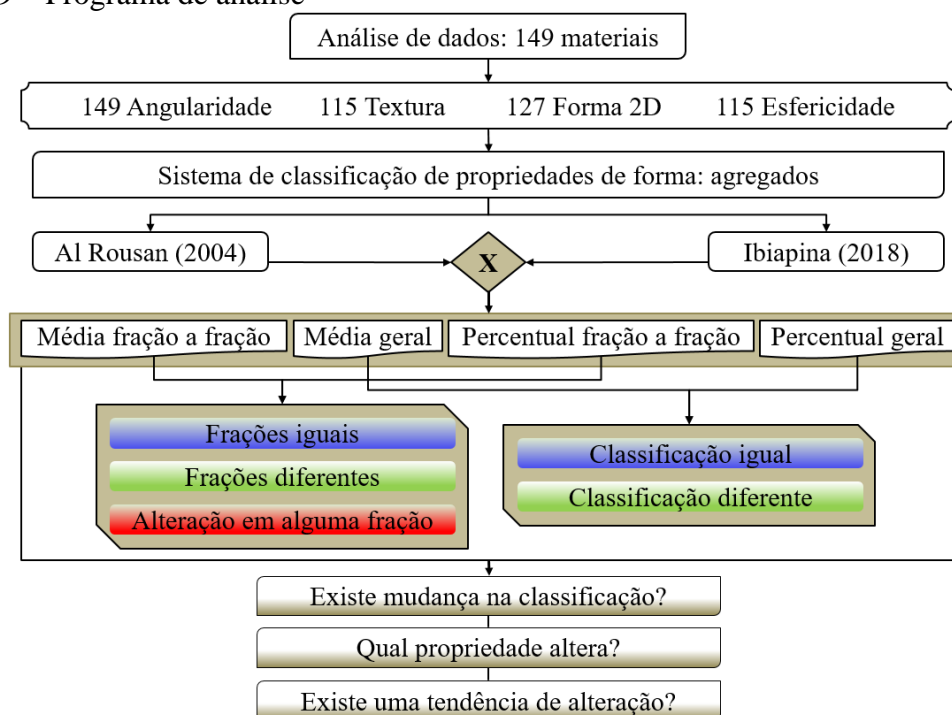
| R^2 | $0,90 \leq R^2 \leq 0,99$ | $0,70 \leq R^2 \leq 0,89$ | $0,40 \leq R^2 \leq 0,69$ | $0,20 \leq R^2 \leq 0,39$ | $R^2 \leq 0,19$ |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| Critério | Excelente | Bom | Razoável | Ruim | Muito ruim |

Fonte: Adaptado de Witczack *et al.* (2002).

2.4 Resultados e Discussões

Para este estudo, os 149 agregados extraídos do banco de dados foram caracterizados em relação às suas diversas propriedades de forma. Os resultados obtidos são em grande número, uma vez que o banco de dados proporcionou 149 análises de angularidade, 115 análises de textura, 127 análises de forma 2D e 115 análises de esfericidade. Por essa razão, optou-se por não exibir todos os resultados obtidos nesta seção, apesar de que serão feitos vários comentários a respeito destes. A Figura 2.9 mostra as análises comparativas realizadas entre os sistemas de classificação de agregados para este conjunto de dados.

Figura 2.9 – Programa de análise



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.4.1 Classificação das propriedades de forma utilizando a média fração a fração

Os resultados dos materiais analisados foram separados em três condições: todas as frações apresentaram a mesma faixa de classificação diante dos dois sistemas existentes, todas as frações apresentaram a faixa de classificação distinta pelos dois sistemas de classificação e por fim, ao menos uma fração com caracterização diferente na comparação pelos dois sistemas. Para exemplificar o processo de análise dos materiais, selecionou-se o material 5 dentre os 149 materiais. As Tabelas 2.3 e 2.4 detalham a classificação do material 5 com relação ao parâmetro de média fração a fração pelos dois sistemas de classificação de propriedades de forma,

respectivamente, Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018). Notou-se que na angularidade pelo menos uma fração (0,6 mm) apresenta diferente classificação (alteração em alguma fração); na textura todos apresentaram classificação divergente (frações diferentes); na forma 2D apenas a fração 0,15 mm permaneceu igual diante das duas classificações (alteração em alguma fração). Quanto à esfericidade, observou-se a mesma classificação quando comparado fração a fração (frações iguais).

Tabela 2.3 – Classificação Al Rousan (2004) a partir da média fração a fração (material 5)

| Fração (mm) | Angularidade | Textura | Forma 2D | Esfericidade |
|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|
| 19 | Subarredondado | Rugosidade moderada | | Esfericidade moderada |
| 12,5 | Subarredondado | Rugosidade moderada | | Esfericidade moderada |
| 9,5 | Subarredondado | Rugosidade moderada | | Esfericidade moderada |
| 4,75 | Subarredondado | Baixa rugosidade | | Esfericidade moderada |
| 2,36 | Subarredondado | | Semialongado | |
| 1,18 | Subangular | | Semialongado | |
| 0,6 | Subangular | | Semialongado | |
| 0,3 | Subangular | | Semialongado | |
| 0,15 | Subarredondado | | Semicircular | |
| 0,075 | Subarredondado | | Semialongado | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 2.4 – Classificação Ibiapina (2018) a partir da média fração a fração (material 5)

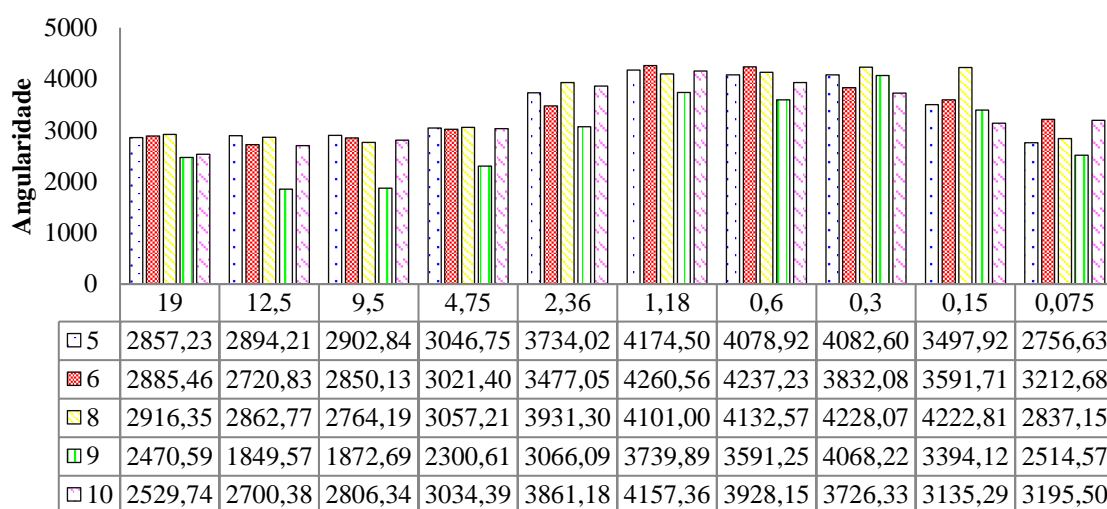
| Fração (mm) | Angularidade | Textura | Forma 2D | Esfericidade |
|--------------------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------------|
| 19 | Subarredondado | Macio | | Esfericidade moderada |
| 12,5 | Subarredondado | Macio | | Esfericidade moderada |
| 9,5 | Subarredondado | Macio | | Esfericidade moderada |
| 4,75 | Subarredondado | Macio | | Esfericidade moderada |
| 2,36 | Subarredondado | | Semicircular | |
| 1,18 | Subangular | | Semicircular | |
| 0,6 | Subarredondado | | Semicircular | |
| 0,3 | Subangular | | Semicircular | |
| 0,15 | Subarredondado | | Semicircular | |
| 0,075 | Subarredondado | | Semicircular | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Manteve-se também o procedimento de análise fração a fração com cinco materiais selecionados: 5, 6, 8, 9 e 10, mas agora através de gráficos para identificar alguma tendência de alteração por fração. Justifica-se o fato da seleção destes cinco materiais porque estes apresentam análises das mesmas frações. As Figuras de 2.10 a 2.13 mostram os valores da média fração a fração para os materiais selecionados: 5, 6, 8, 9 e 10. Para a angularidade (Figura

2.10), observam-se alterações em frações aleatórias para cada material. Para os materiais 5, 6, 8 e 10 foram observadas alterações para classes inferiores em algumas frações miúdas (1,18; 0,6 e 0,3 mm), ou seja, transferência de característica subangular (4.000 a 5.400) na classificação AL Rousan (2004) para subarredondado (1.260 a 4.080) na classificação Ibiapina (2018). Apenas no material 9, observou-se alteração para classe superior nas frações graúdas 12,5 e 9,5 mm de arredondado (menor que 2.100) pela classificação Al Rousan (2004) para subarredondado (1.260 a 4.080) pela classificação Ibiapina (2018).

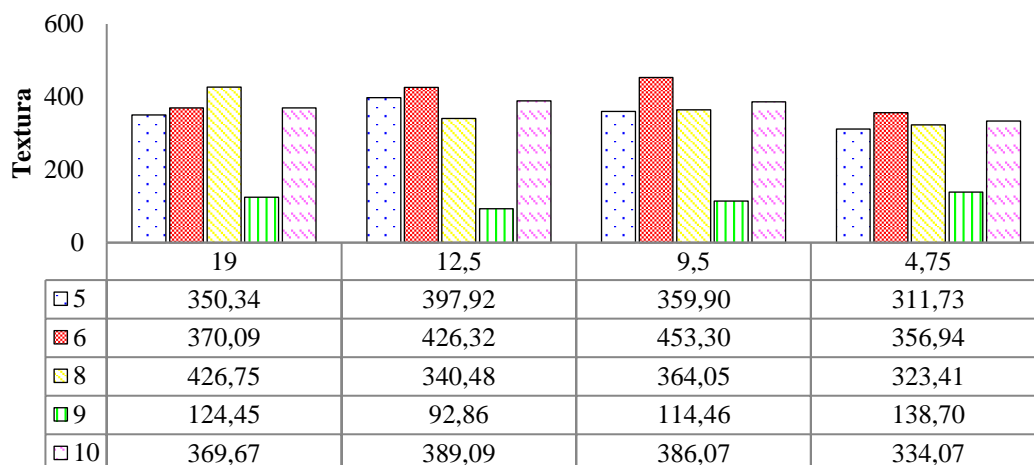
Figura 2.10 – Resultados de angularidade com relação à média fração a fração para os cinco materiais escolhidos como exemplo



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a textura (Figura 2.11), notou-se também alterações em frações aleatórias para cada material. Quando realizada a comparação das classificações pelos dois sistemas, observou-se texturas mais rugosas a partir do uso do sistema proposto por Al Rousan (2004) se comparado ao sistema proposto por Ibiapina (2018). Por exemplo, o material 5 apresentou textura com rugosidade moderada (350 a 460) nas frações 19, 12,5 e 9,5 mm pelo sistema Al Rousan (2004) enquanto que no sistema proposto por Ibiapina (2018) todas as frações foram consideradas macias (260 a 440). O material 9, diferente dos demais, apresentou características de textura considerado como polido em ambos os sistemas de classificação utilizados.

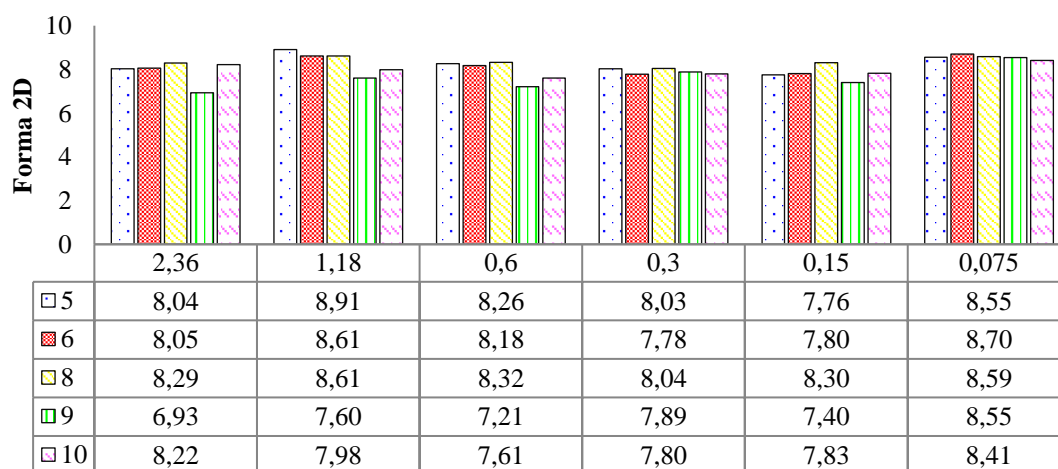
Figura 2.11 – Resultados de textura com relação à média fração a fração para os cinco materiais escolhidos como exemplo



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a forma 2D (Figura 2.12), comparada à textura, o contrário ocorreu. Observou-se que, pela classificação proposta por Al Rousan (2004), essa característica apresentou valor inferior se comparada àquela obtida pelo sistema proposto por Ibiapina (2018), ou seja, apresentou uma tendência de ser semialongado para o primeiro e semicircular quando o segundo sistema de classificação é utilizado. A partícula semicircular pode ser considerada superior se considerada a semialongada, visto que está se aproxima de um círculo e é menos propícia a sofrer quebra.

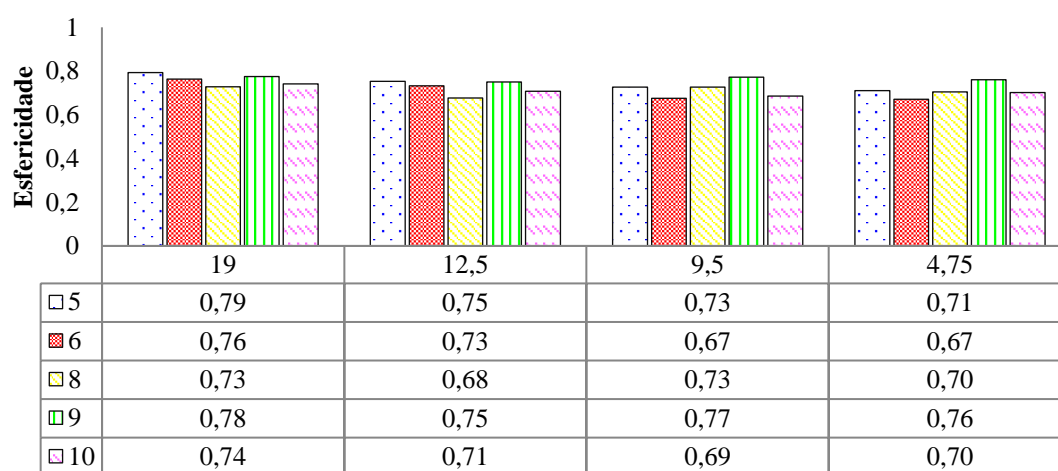
Figura 2.12 – Resultados de forma 2D com relação à média fração a fração para os cinco materiais escolhidos como exemplo



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a esfericidade (Figura 2.13), todas as frações do mesmo material apresentaram a mesma classificação quando os dois sistemas foram utilizados. Notou-se que a classificação realizada a partir da utilização de cada sistema apresentou uma redução nos valores para frações aleatórias (12,5; 4,75 mm), ou seja, o material inicia com uma fração com esfericidade moderada e na fração seguinte esta é alterada para a classificação baixa esfericidade, mas na próxima fração o material é novamente considerado com esfericidade moderada (material 8 quando ambos os sistemas são utilizados).

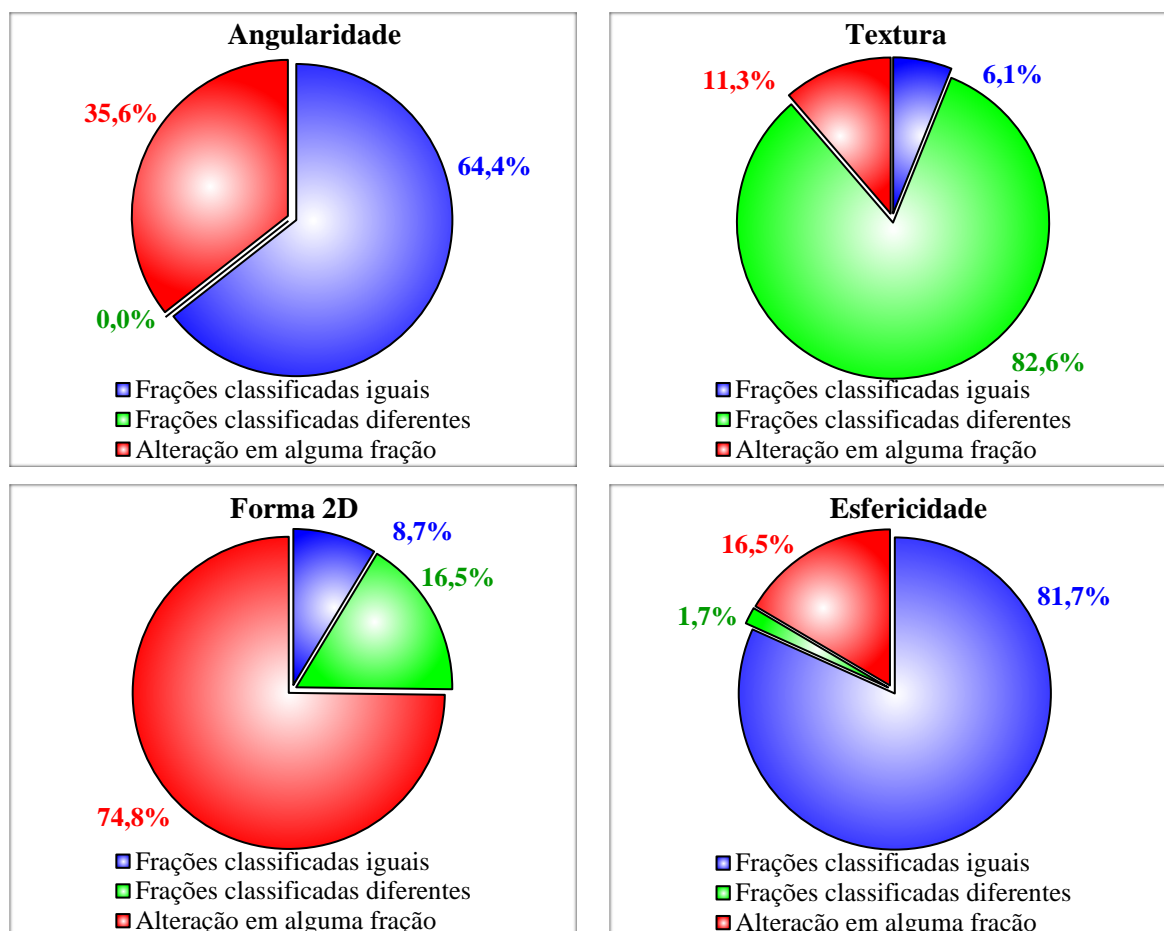
Figura 2.13 – Resultados de esfericidade com relação à média fração a fração para os cinco materiais escolhidos como exemplo



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

O procedimento de análise especificado neste item foi replicado para os demais materiais. A Figura 2.14 apresenta os percentuais nas três condições de análise para os 149 materiais. Observou-se que para angularidade e esfericidade, respectivamente, 64,4% e 81,7% dos materiais apresentaram todas as frações com características iguais quando comparados fração a fração para os dois sistemas de classificação. Por outro lado, a textura apresentou 82,6% dos materiais com todas as frações divergentes quando comparados fração a fração através dos dois sistemas de classificação. Quanto à forma 2D, destacou-se por apresentar o maior percentual na alteração de alguma fração (74,8%), ou seja, pelo menos uma fração apresentou caracterização diferente quando analisada através dos dois sistemas de classificação.

Figura 2.14 – Resultados comparativos para os dois sistemas de classificação com relação à média fração a fração de todos os materiais



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a condição de frações classificadas iguais quando comparadas pelos dois sistemas de classificação (Apêndice B), na angularidade foram enquadrados 96 materiais (64,4%) (Apêndice B, Tabela B.1). O maior percentual dos materiais (38,3%) apresentou a classificação subarredondada em todas as frações. Em 24,2% dos materiais ocorreu uma tendência de ganho de propriedade nas frações miúdas (2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15 mm), ou seja, o material manteve a característica subarredondado constante nas frações graúdas, mas nas frações miúdas apresentaram mudança para subangular e depois retornaram a subarredondado para a menor fração (0,075 mm). Na textura foram enquadrados como iguais 7 materiais (6,1%) (Apêndice B, Tabela B.2), sendo apenas um material com alta rugosidade (frações graúdas 12,5; 9,5 e 4,75 mm), e os demais considerados polidos. Para a forma 2D foram enquadrados como iguais 11 materiais (8,7%) (Apêndice B, Tabela B.3). O maior percentual dos materiais (3,1%) apresentou a classificação semicircular para a fração de 2,36 mm. Para 2,4% dos materiais todos

as frações miúdas apresentaram classificação semicircular. Ainda na forma 2D, todas as classificações pelo sistema Ibiapina (2018) permaneceram semicircular. Por fim, na esfericidade foram enquadrados 94 materiais (81,7%) (Apêndice B, Tabela B.4). Na maioria dos casos (39%), à medida que a fração diminuiu ocorreu perda da propriedade (esfericidade moderada para baixa esfericidade). Em outras situações (4,5%), ocorreu flutuação na classificação (fração 25,4 mm: baixa esfericidade; 19 mm: esfericidade moderada; 12,5 mm: baixa esfericidade e 9,5 mm: esfericidade moderada).

Para a condição de frações classificadas diferentes quando comparadas pelos dois sistemas de classificação (Apêndice C), na angularidade não existiu material enquadrado (0,0%). Já para a textura, o percentual de frações classificadas como diferentes foi o maior entre as propriedades de forma (82,6%). Foram enquadrados 95 materiais (Apêndice C, Tabela C.1), sendo que os resultados comparativos para as frações mostraram em 100% dos casos que o agregado classificado através do sistema proposto por Al Rousan (2004) resultava em características superiores se comparadas àquelas encontradas através do sistema idealizado por Ibiapina (2018). Por exemplo, a fração 25,4 mm (altera de alta para baixa rugosidade); 19 e 12,5 mm (altera de rugosidade moderada para macio); 9,5 e 4,75 mm (altera de baixa rugosidade para macio). Com relação à variação na classificação das frações para os sistemas separados, observou-se uma tendência de perda de propriedade com a redução no tamanho da fração. Para a forma 2D foram enquadrados 21 materiais (16,5%) (Apêndice C, Tabela 2). Observou-se uma constante classificação semicircular quando o sistema proposto por Ibiapina (2018) é utilizado. O maior percentual (10,2%) representa 13 materiais com todas as frações miúdas em transição de semialongado para semicircular. Na esfericidade, dois materiais (1,7%) apresentaram classificação diferente, ambos contendo apenas a fração 4,75 mm. Um material apresentou transição na comparação do sistema Al Rousan (2004) *versus* Ibiapina (2018) de alta para moderada esfericidade. Outro material apresentou transição de achatado/ alongado para baixa esfericidade. Nesse caso, não foi possível observar uma tendência de perda ou ganho de propriedade.

Para a condição de alteração em alguma fração (Apêndice D), pelo menos uma fração classificada diferente quando comparada pelos dois sistemas de classificação, na angularidade foram enquadrados 53 materiais (35,6%) (Apêndice D, Tabela D.1). Verificou-se várias situações de alteração em pelo menos uma fração, mas no geral não foi observada uma tendência clara de alteração. O maior percentual dos materiais com alteração de propriedade de subangular para subarredondado (7,4%) ocorreu na fração de 0,6 mm. Em 23% dos materiais

ocorreu superioridade de classificação quando o sistema proposto por Al Rousan (2004) foi utilizado. O restante apresentou ganho de propriedade quando o sistema proposto por Ibiapina (2018) foi utilizado. Para a textura foram enquadrados 13 materiais (11,3%) (Apêndice D, Tabela D.2). Observou-se uma tendência de superioridade para a classificação quando o sistema proposto por Al Rousan (2004) foi utilizado. Quanto às frações com alterações não se pode observar uma convergência. Para a forma 2D foram enquadrados 95 materiais (74,8%) (Apêndice D, Tabela D.3). Pôde-se observar que, para a maioria das frações, a classificação é alterada de semialongada para semicircular (68%), o que é considerado um ganho de propriedade. Vale ressaltar que as variações de forma 2D ocorreram apenas quando o sistema proposto por Al Rousan (2004) foi utilizado. Já para a classificação proposta por Ibiapina (2018), as frações de todos os materiais foram classificadas como semicirculares (100% do banco de dados com alteração em algumas frações). Por fim, na esfericidade foram enquadrados 19 materiais (16,5%) (Apêndice D, Tabela D.4). Obteve-se uma superioridade de classificação pelo sistema de classificação Ibiapina (2018) nas frações 4,75; 9,5 e 12,5 mm no total de 12,1%, porém nas demais frações a propriedade encontrada foi inferior. Observou-se uma tendência de perda de propriedade com a redução da fração quando ambos os sistemas foram utilizados.

2.4.2 Classificação das propriedades de forma utilizando a média geral

Esta seção apresenta os resultados dos materiais separados em duas condições: classificação igual e classificação diferente diante da comparação entre os dois sistemas de classificação. Para exemplificar o processo de análise dos materiais, foi mantida a caracterização com os cinco materiais já selecionados no item anterior. A Tabela 2.5 detalha a classificação dos cinco materiais com relação ao parâmetro média geral quando os dois sistemas de classificação de propriedades de forma foram utilizados, respectivamente, Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018). Destacam-se as propriedades textura e forma 2D como aquelas que apresentaram as maiores modificações. Observou-se que as propriedades de forma do material 9 não foram alteradas para os dois sistemas. Já para o material 10 apenas a textura foi modificada.

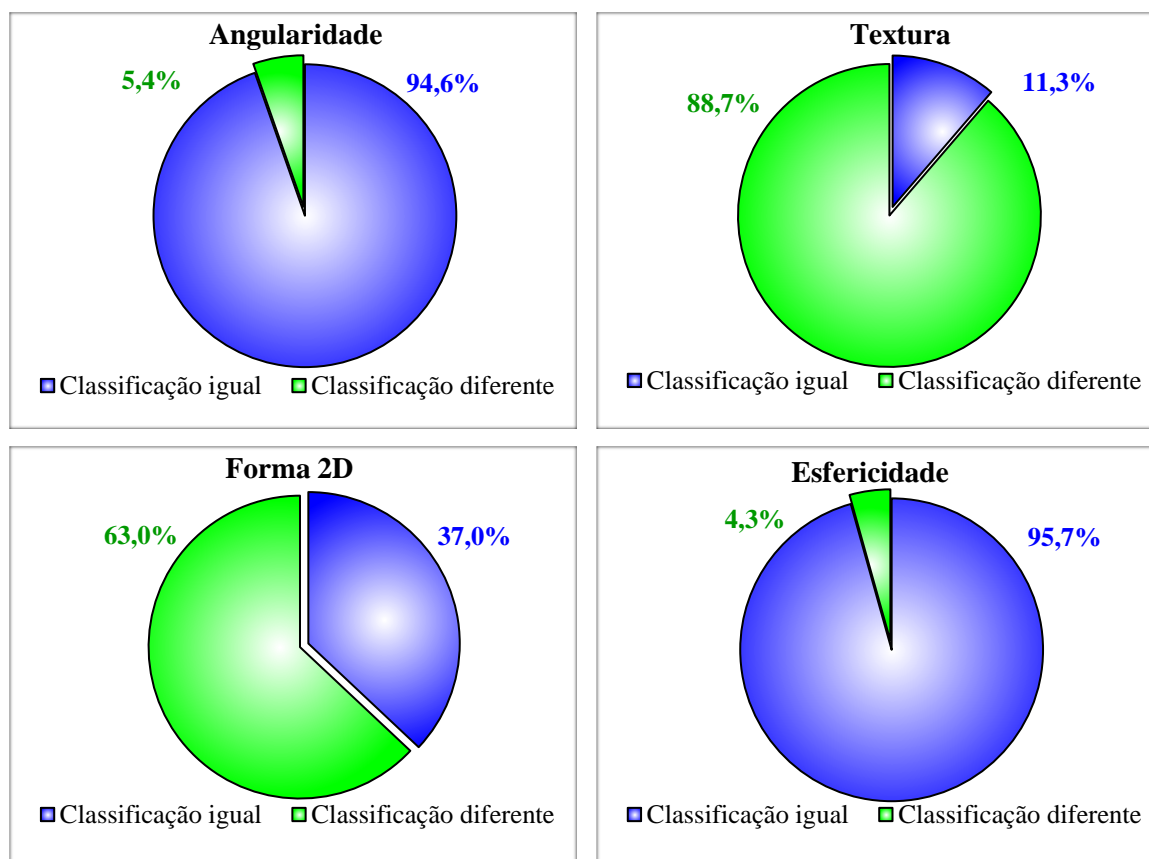
Tabela 2.5 – Classificação dos cinco materiais, selecionados como exemplo, pelo parâmetro média geral para os dois sistemas

| | Propriedade de forma | Valor médio | Classificação (Al Rousan) | Classificação (Ibiapina) |
|-------------|----------------------|-------------|----------------------------|--------------------------|
| MATERIAL 5 | Angularidade | 3.402,56 | Subarredondado | Subarredondado |
| | Textura | 354,97 | Rugosidade moderada | Macio |
| | Forma 2D | 8,26 | Semialongado | Semicircular |
| | Esfericidade | 0,75 | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada |
| | Propriedade de forma | Valores | Classificação (Al Rousan) | Classificação (Ibiapina) |
| MATERIAL 6 | Angularidade | 3.408,91 | Subarredondado | Subarredondado |
| | Textura | 401,67 | Rugosidade moderada | Macio |
| | Forma 2D | 8,19 | Semialongado | Semicircular |
| | Esfericidade | 0,71 | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada |
| | Propriedade de forma | Valores | Classificação (Al Rousan) | Classificação (Ibiapina) |
| MATERIAL 8 | Angularidade | 3.505,34 | Subarredondado | Subarredondado |
| | Textura | 363,67 | Rugosidade moderada | Macio |
| | Forma 2D | 8,36 | Semialongado | Semicircular |
| | Esfericidade | 0,71 | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada |
| | Propriedade de forma | Valores | Classificação (Al Rousan) | Classificação (Ibiapina) |
| MATERIAL 9 | Angularidade | 2.886,76 | Subarredondado | Subarredondado |
| | Textura | 117,62 | Polido | Polido |
| | Forma 2D | 7,60 | Semicircular | Semicircular |
| | Esfericidade | 0,76 | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada |
| | Propriedade de forma | Valores | Classificação (Al Rousan) | Classificação (Ibiapina) |
| MATERIAL 10 | Angularidade | 3.307,47 | Subarredondado | Subarredondado |
| | Textura | 369,73 | Rugosidade moderada | Macio |
| | Forma 2D | 7,97 | Semicircular | Semicircular |
| | Esfericidade | 0,71 | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com os resultados encontrados para os 149 materiais pôde-se calcular o percentual de cada propriedade com classificação igual e diferente. A Figura 2.15 expõe os resultados para cada propriedade de forma utilizando a média geral. As propriedades que apresentaram percentuais mais acentuados para classificação diferente estão relacionadas à textura e à forma 2D com relação à média geral. Destaca-se o percentual de 94,6% e 95,7% com classificação igual para os dois sistemas, respectivamente, para angularidade e esfericidade. A mesma tendência das propriedades de forma (igualdade, diferença e alteração) se repetiu, conforme mencionado no item 2.4.1, com relação ao percentual de média fração a fração (Figura 2.7). Esse comportamento leva a acreditar que, quando a média geral é utilizada, existe indício de que o material seja classificado com propriedades de angularidade e de esfericidade iguais independente do sistema de classificação utilizado.

Figura 2.15 – Resultados comparativos dos dois sistemas de classificação com relação à média geral de todos os materiais



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

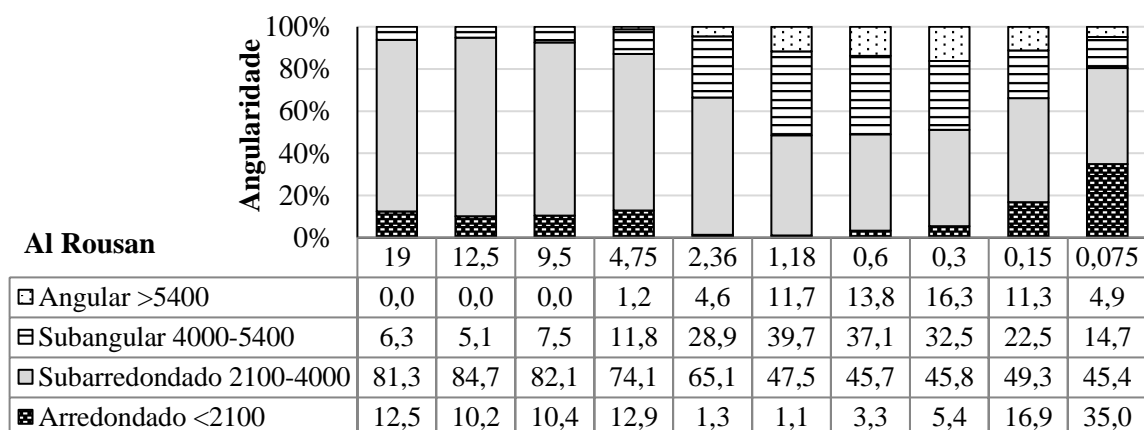
2.4.3 Classificação das propriedades de forma utilizando percentual fração a fração

Para a seção de caracterização dos materiais por percentual fração a fração mantiveram-se as condições seguintes: todas as frações apresentaram a mesma faixa de classificação quando os dois sistemas de classificação foram utilizados, todas as frações apresentaram a faixa de classificação distinta pelos dois sistemas de classificação e por fim, pelo menos uma fração com caracterização diferente foi encontrada quando os dois sistemas foram comparados. Os materiais foram classificados pela faixa que apresentou maior percentual. Todavia, observou-se classes com valores próximos e até mesmo iguais. No caso de igualdade, a classe com característica tida como inferior foi mantida. As Figuras de 2.16 a 2.19 mostram os resultados obtidos para os dois sistemas de classificação para o material 5, utilizado como exemplo de análise dentre os 149 materiais.

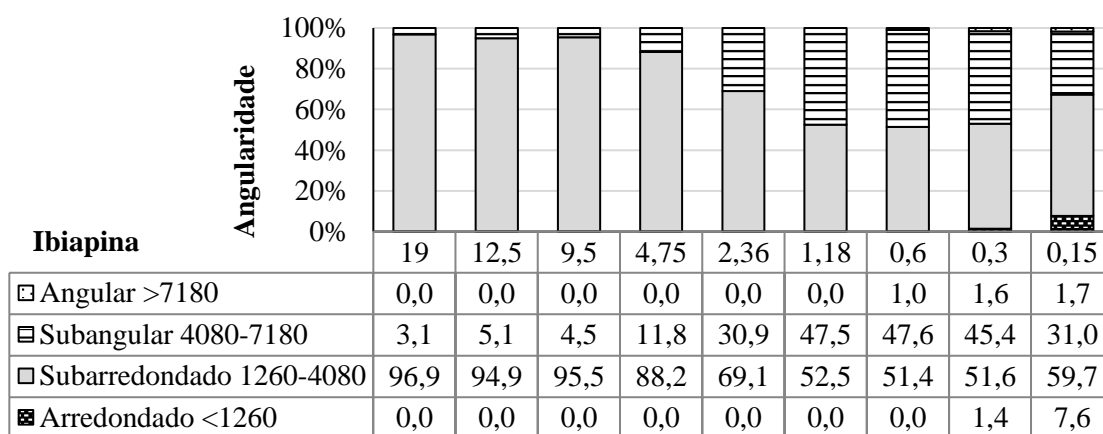
Para a angularidade (Figura 2.16), observou-se um maior percentual na classe subarredondado para os dois sistemas de classificação, bem como um acréscimo de partículas

com característica subangular para algumas frações miúdas. Na classificação Al Rousan (2004), as variações em cada fração mostraram uma tendência que à medida que o tamanho da partícula diminuiu a angularidade tendeu a aumentar (tornando-se mais angular), porém para as frações 1,15 e 0,075 mm ocorreu um acréscimo no percentual de partículas arredondadas (queda no valor de angularidade). Para a classificação Ibiapina (2018), o valor da faixa angular (> 7.180) é alto e, assim, o percentual de partículas nessa faixa é pequeno.

Figura 2.16 – Resultados de angularidade com relação ao percentual fração a fração para o material 5 escolhido



(a)



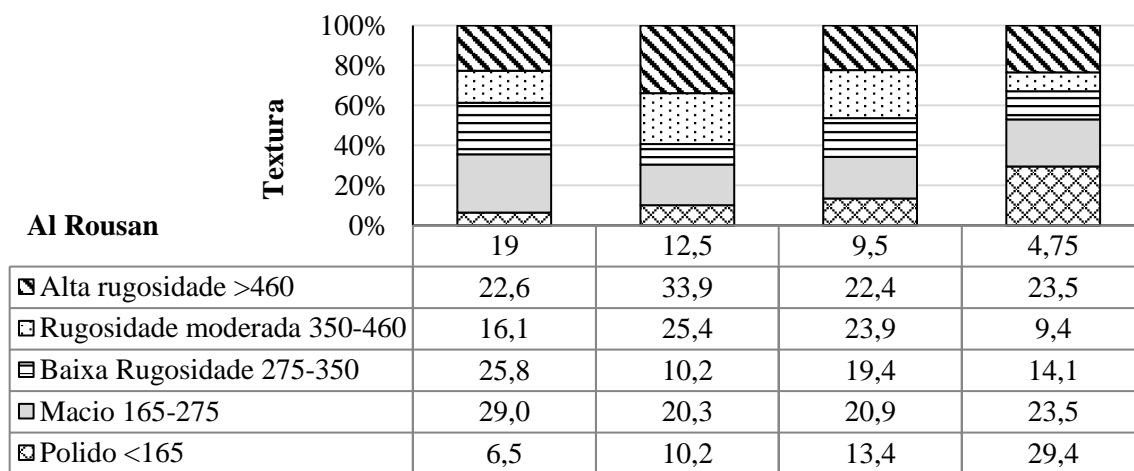
(b)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

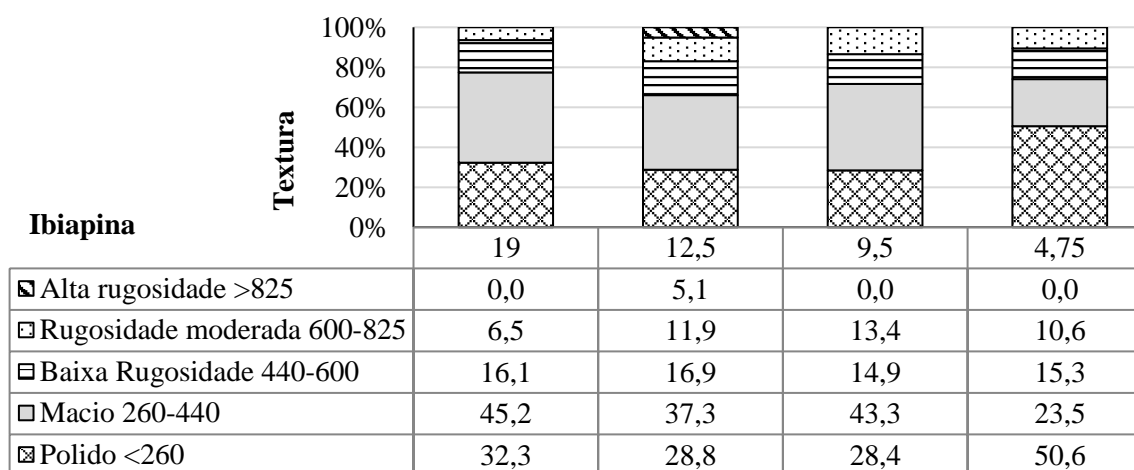
Para a textura (Figura 2.17), não foi identificada uma tendência de classificação quando o sistema proposto por Al Rousan (2004) foi utilizado. Já para a classificação proposta por Ibiapina (2018), observou-se uma redução na classificação a partir da redução no tamanho da fração. Quanto às duas classificações, observou-se a proximidade de percentuais em algumas

classes por fração e mesma classe para a primeira e última fração, respectivamente, macio e polido.

Figura 2.17 – Resultados de textura com relação ao percentual fração a fração para o material 5 escolhido



(a)

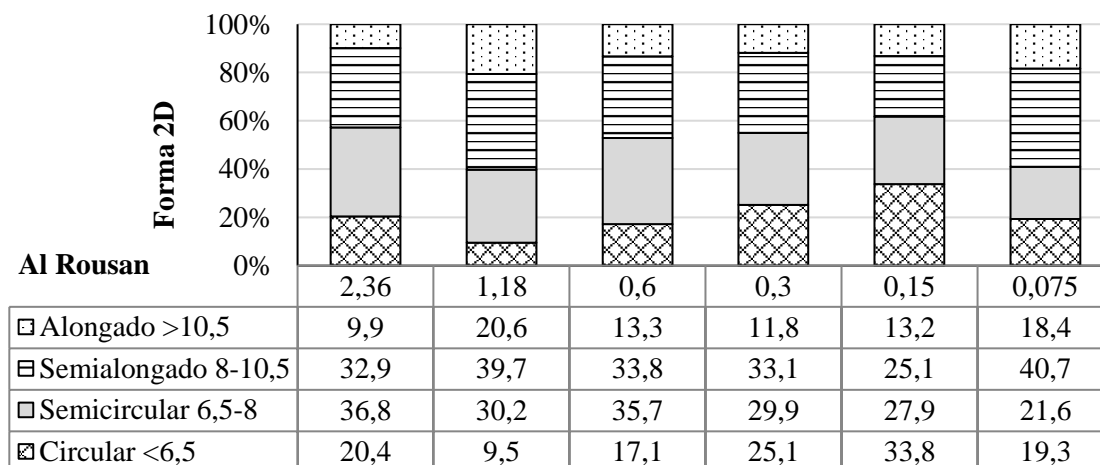


(b)

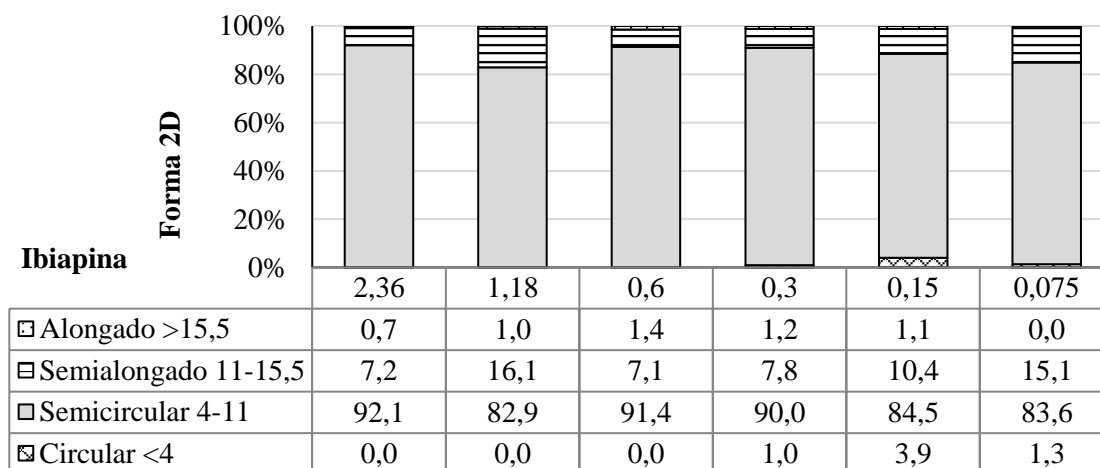
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a forma 2D (Figura 2.18), não foi identificada uma tendência de classificação pelo sistema Al Rousan (2004). Observou-se proximidade de percentuais em algumas classes por fração. Já na classificação Ibiapina (2018), pôde-se observar um elevado percentual de partículas semicirculares em todas as frações.

Figura 2.18 – Resultados de forma 2D com relação ao percentual fração a fração para o material 5 escolhido



(a)

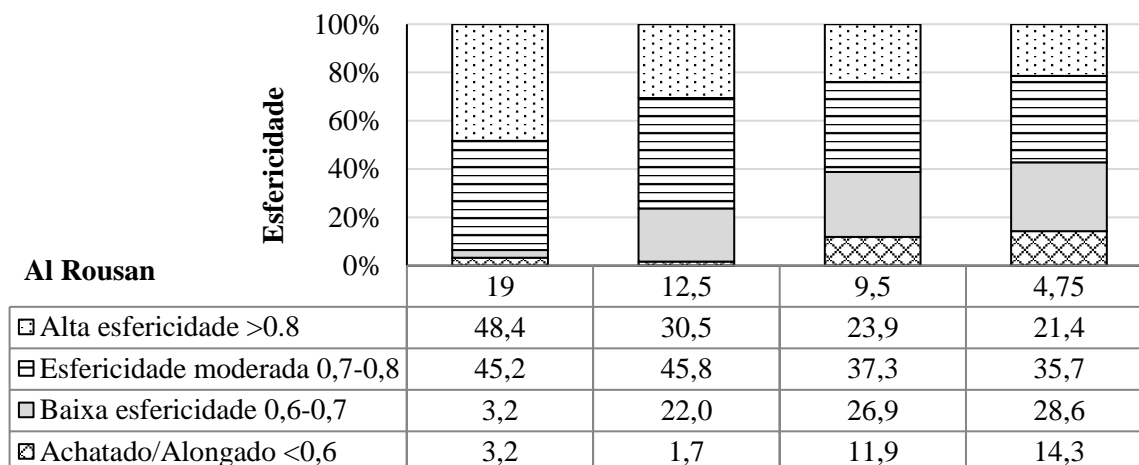


(b)

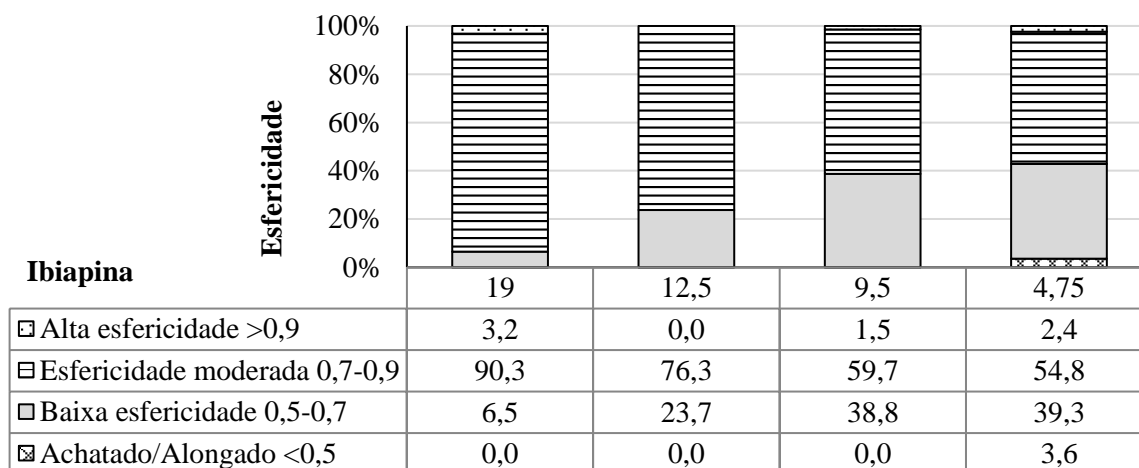
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a esfericidade (Figura 2.19), as características permaneceram iguais (esfericidade moderada) para ambos os sistemas, exceto na fração 19 mm. Os percentuais para a classificação utilizando o sistema proposto por Ibiapina (2018) como esfericidade moderada são superiores à classificação proposta por Al Rousan (2004), justificado pela ampliação do tamanho da faixa para essa classificação.

Figura 2.19 – Resultados de esfericidade com relação ao percentual fração a fração para o material 5 escolhido



(a)

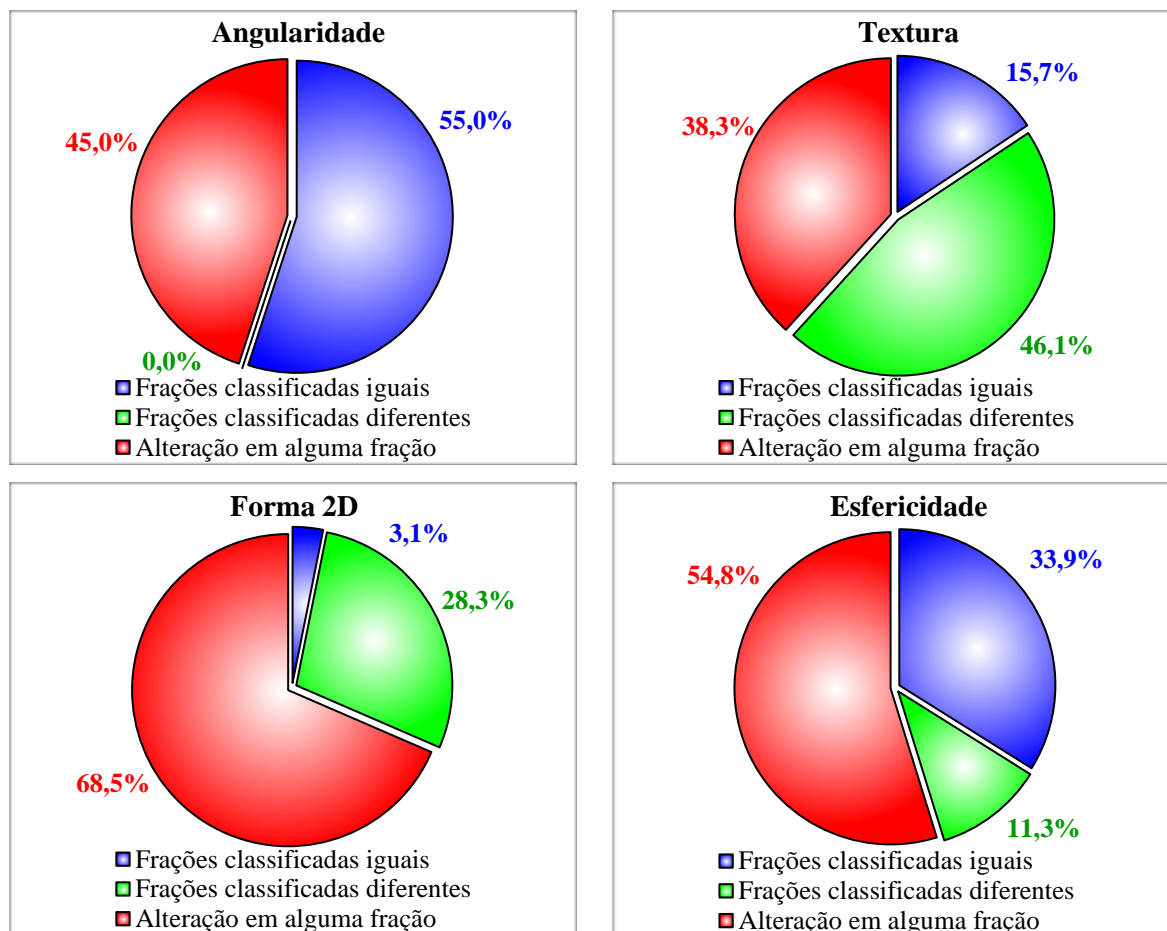


(b)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Contudo, seguindo esse raciocínio de análise para todo o banco de dados, a Figura 2.20 apresenta os resultados para cada propriedade de forma em relação ao percentual fração a fração de todos os materiais. É possível observar que esta condição apresenta maior destaque na forma 2D e esfericidade, respectivamente 68,5% e 54,8%. Na textura, 46,1% dos materiais são classificados como diferentes. Já para a angularidade, 55% dos materiais são classificados como iguais.

Figura 2.20 – Resultados comparativos dos dois sistemas de classificação com relação ao percentual fração a fração de todos os materiais



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a condição de frações classificadas iguais quando comparadas pelos dois sistemas de classificação (Apêndice E), na angularidade foram enquadrados 82 materiais (55%) (Apêndice E, Tabela E.1). O maior percentual (43,6%) foi obtido para a classe subarredondada. Pôde-se observar que 10,1% dos materiais apresentam uma tendência de ganho de propriedade nas frações miúdas (1,18; 0,6; 0,3 e 0,15 mm), ou seja, o material mantém a característica subarredondada constante, mas para as frações miúdas apresenta um ganho nessa característica (subangular) e depois retorna a subarredondado (fração 0,075 mm). Para a textura foram enquadrados 18 materiais (15,7%) (Apêndice E, Tabela E.2), sendo destaque o maior percentual (9,6%) para todas as frações com classificação polido. Observou-se apenas um material com alta rugosidade (12,5; 9,5 e 4,75 mm). Os demais foram classificados macios ou polidos, com tendência de perda de propriedade com redução da fração. Para a forma 2D foram enquadrados 4 materiais (3,1%), sendo todos com fração única (2,36 mm) classificada como semicircular.

Para a esfericidade foram enquadrados 39 materiais (33,9%) (Apêndice E, Tabela E.3). Pôde-se observar que, em alguns casos, à medida que a fração diminuiu ocorreu perda da propriedade (moderada para baixa esfericidade, em 15,7% dos casos). Em outras situações (4,3%), ocorreu variação na classificação (fração 25,4 mm: esfericidade moderada; 19; 12,5 e 9,5 mm: baixa esfericidade; 4,75 mm: esfericidade moderada; fração 25,4 mm: baixa esfericidade; 19 mm: esfericidade moderada; 12,5; 9,5 e 4,75 mm: baixa esfericidade; entre outros). Os demais casos (13,9%) representaram as características contínuas nas frações do material, esfericidade moderada ou baixa esfericidade.

Para a condição de frações classificadas diferentes (Apêndice F), na angularidade não existiu material (0,0%). Na textura foram enquadrados 53 materiais (46,1%) (Apêndice F, Tabela F.1), sendo a propriedade que apresentou o maior percentual de frações classificadas como diferentes. Assim como no parâmetro média fração a fração, 100% dos casos mostraram que o agregado classificado pelo sistema Al Rousan (2004) apresentou superioridade de caracterização em relação ao sistema Ibiapina (2018), bem como uma tendência de perda de propriedade com a redução da fração em ambos os sistemas analisados separadamente. Destacase o caso do material com frações 9,5 e 4,75 mm (alta rugosidade para polido) pela diferença de classificação em classes extremas. Para a forma 2D foram enquadrados 36 materiais (28,3%) (Apêndice F, Tabela F.2). Observou-se uma padronização de classificação semicircular pelo sistema idealizado por Ibiapina (2018), comportamento similar a análise diante do parâmetro média fração a fração. Para a esfericidade, os 11,3% de classificação diferente foram representados por 13 materiais (Apêndice F, Tabela F.3). Observou-se uma flutuação de classificação quanto a superioridade ou inferioridade entre os dois sistemas.

Para a condição de alteração em alguma fração (Apêndice G), pelo menos uma fração classificada diferente quando comparada pelos dois sistemas de classificação, na angularidade foram enquadrados 67 materiais (45%) (Apêndice G, Tabela G.1). No geral, observou-se que 1,4% dos materiais apresentaram classes superiores quando o sistema proposto por Al Rousan (2004) foi utilizado. O restante, 43,6%, mostrou ganho de propriedade quando o sistema proposto por Ibiapina (2018) foi utilizado, sendo a fração 0,075 mm aquela com maior percentual de alteração (17,4%). Para a textura foram enquadrados 44 materiais (38,3%) (Apêndice G, Tabela G.2). Observou-se uma tendência de superioridade de classificação pelo sistema de classificação Al Rousan (2004). A fração 4,75 mm apresentou uma tendência acentuada de variação das classificações de macio para polido, exceto em um caso onde o material variou de alta rugosidade para polido. A forma 2D (Apêndice G, Tabela G.3) se

destaca, dentre as outras propriedades por apresentar elevado percentual de alteração em alguma fração (68,5%). Pôde-se observar que as variações ocorreram apenas no sistema AL Rousan (2004). Já em Ibiapina (2018), as frações de todos os materiais foram classificadas como semicirculares. Dentre as variações encontradas, é possível identificar uma tendência de variação de semialongada para semicircular. Por fim, na esfericidade foram enquadrados 63 materiais (54,8%) (Apêndice G, Tabela G.4). Observou-se uma maior flutuação de classificação quando comparada com o parâmetro média fração a fração. Para esse parâmetro, percentual, não se pode identificar uma tendência de ganho/perda de propriedade com a relação à fração para cada sistema de classificação.

2.4.4 Classificação das propriedades de forma por percentual geral

Para exemplificar o processo de análise dos materiais por percentual geral, foi mantida a caracterização com os cinco materiais já selecionados anteriormente. A Tabela 2.6 detalha a classificação dos cinco materiais com relação ao parâmetro percentual geral pelos dois sistemas de classificação. Os materiais foram classificados utilizando a faixa que apresentou maior percentual. Destacam-se as propriedades de textura e forma 2D como aquelas com maiores modificações quando os dois sistemas são comparados. Para o material 9 ocorreu alteração apenas na forma 2D.

Tabela 2.6 – Classificação dos cinco materiais pelo parâmetro percentual geral para os dois sistemas

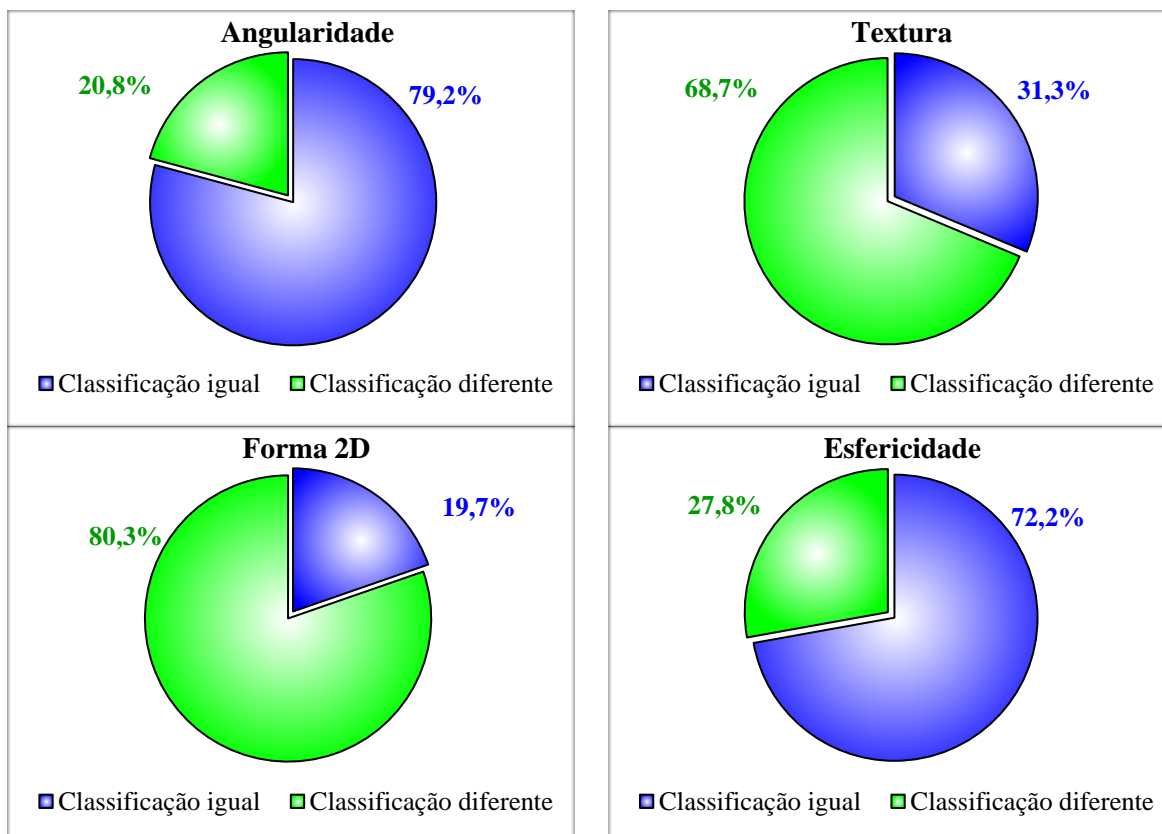
| | Propriedade de forma | Percentual Geral | Classificação (Al Rousan) | Percentual Geral | Classificação (Ibiapina) |
|-------------|----------------------|------------------|----------------------------|------------------|--------------------------|
| MATERIAL 5 | Angularidade | 52,30 | Subarredondado | 62,90 | Subarredondado |
| | Textura | 25,60 | Alta rugosidade | 36,80 | Polido |
| | Forma 2D | 33,30 | Semialongado | 87,70 | Semicircular |
| | Esfericidade | 40,70 | Esfericidade moderada | 66,00 | Esfericidade moderada |
| MATERIAL 6 | Propriedade de forma | Percentual Geral | Classificação (Al Rousan) | Percentual Geral | Classificação (Ibiapina) |
| | Angularidade | 51,40 | Angular | 61,30 | Subarredondado |
| | Textura | 32,10 | Alta rugosidade | 39,10 | Macio |
| | Forma 2D | 35,30 | Semialongado | 88,40 | Semicircular |
| MATERIAL 8 | Propriedade de forma | Percentual Geral | Classificação (Al Rousan) | Percentual Geral | Classificação (Ibiapina) |
| | Angularidade | 49,80 | Subarredondado | 59,40 | Subarredondado |
| | Textura | 49,80 | Alta rugosidade | 25,50 | Baixa rugosidade |
| | Forma 2D | 36,30 | Semialongado | 88,60 | Semicircular |
| MATERIAL 9 | Propriedade de forma | Percentual Geral | Classificação (Al Rousan) | Percentual Geral | Classificação (Ibiapina) |
| | Angularidade | 50,70 | Subarredondado | 68,50 | Subarredondado |
| | Textura | 78,20 | Polido | 94,00 | Polido |
| | Forma 2D | 33,70 | Circular | 90,70 | Semicircular |
| MATERIAL 10 | Propriedade de forma | Percentual Geral | Classificação (Al Rousan) | Percentual Geral | Classificação (Ibiapina) |
| | Angularidade | 54,20 | Subarredondado | 64,20 | Subarredondado |
| | Textura | 25,70 | Rugosidade moderada | 45,20 | Macio |
| | Forma 2D | 33,90 | Semialongado | 90,70 | Semicircular |
| MATERIAL 10 | Esfericidade | 40,70 | Esfericidade moderada | 53,20 | Esfericidade moderada |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os resultados encontrados para os materiais foram separados em duas condições: classificações igual e diferente. Para os resultados dos 149 materiais pôde-se calcular o percentual de cada propriedade com classificação igual e diferente. A Figura 2.21 expõe os resultados para cada propriedade de forma para o parâmetro percentual geral. As propriedades que apresentaram percentuais mais acentuados para classificação diferente estão relacionadas à textura e forma 2D. Destaca-se o percentual de 79% e 72% com classificação igual para os dois sistemas, respectivamente, para angularidade e esfericidade. Por outro lado, para as classificações consideradas diferentes, destacam-se a textura e a forma 2D com, respectivamente, 69% e 80%. Assim como no item 2.4.2 (parâmetro média geral), esse

comportamento leva a acreditar que um material pode ser classificado com igual propriedade de angularidade e de esfericidade quando os dois sistemas de classificação distintos são utilizados.

Figura 2.21 – Resultados comparativos dos dois sistemas de classificação com relação à percentual geral de todos os materiais



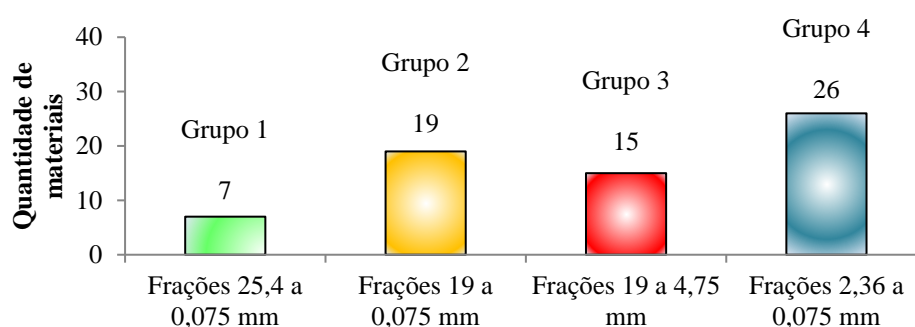
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.4.5 Correlações entre os sistemas de classificação de agregados

Para a análise de correlação entre os sistemas de classificação de agregados, os materiais do banco de dados (Apêndice A) foram filtrados em grupos de maior destaque: frações completas (Grupo 1), frações graúdas e miúdas (Grupo 2), frações graúdas (Grupo 3) e frações miúdas (Grupo 4). Ressalta-se que apenas a classe em maior percentual de classificação na fração foi analisada, como por exemplo, na angularidade em todas as frações a classe de maior percentual foi subarredondada. Para essa classe, o parâmetro de média foi calculado e representado de forma gráfica para observar a existência de correlação entre os sistemas de

classificação de propriedades de forma de agregados. A Figura 2.22 mostra a quantidade de materiais do banco de dados para cada grupo de frações comuns.

Figura 2.22 – Quantidade de materiais para cada grupo de frações iguais



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

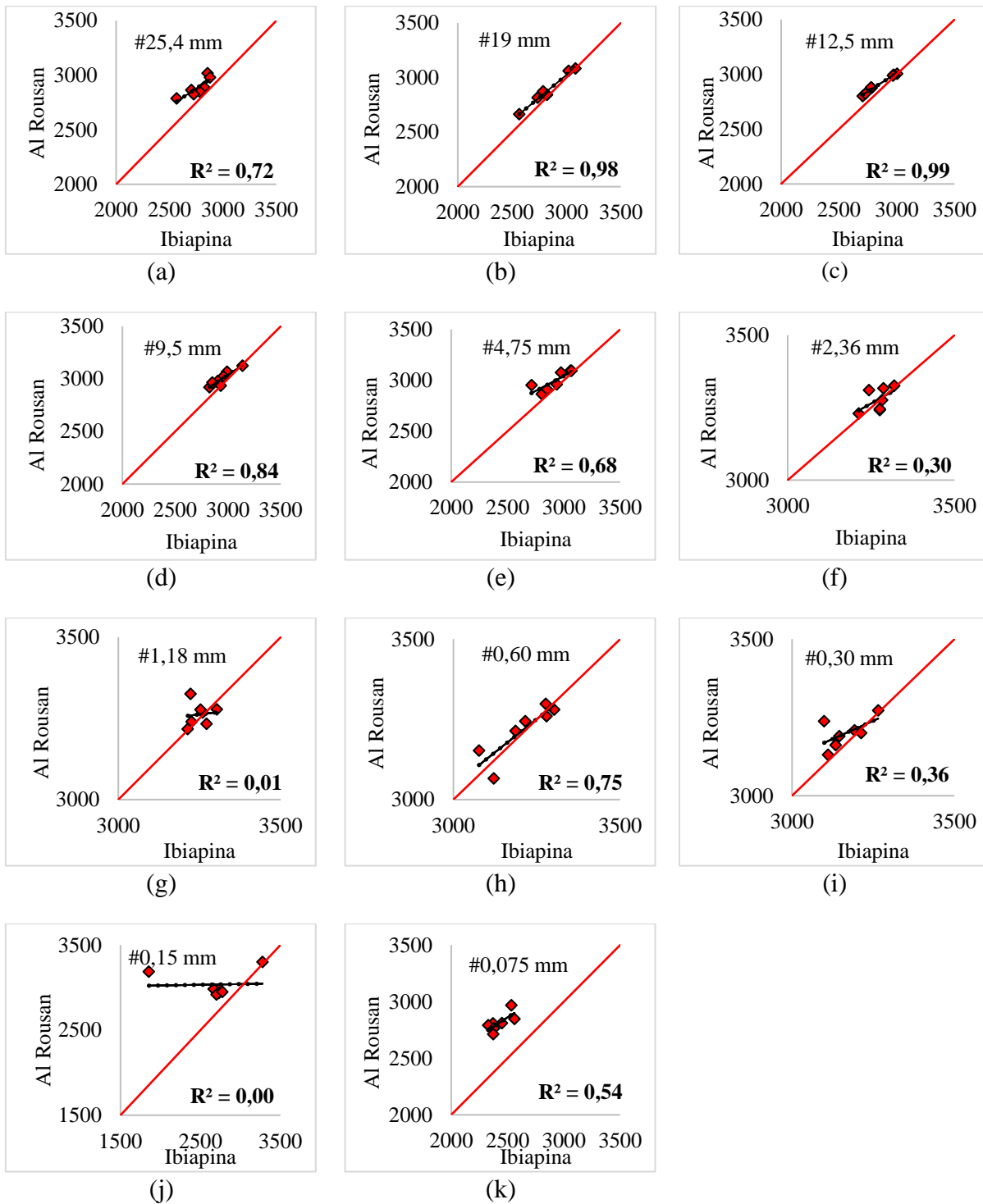
Para a angularidade todos os grupos apresentaram maior percentual de classificação na faixa subarredondada. As Figuras 2.23 a 2.26 apresentam as correlações existentes em cada fração de cada grupo. Observou-se que a maioria dos valores das médias de angularidade subarredondada se localizaram acima da linha de igualdade, o que representa ganho de propriedade pelo sistema de Al Rousan (2004) em todos os grupos.

Para o Grupo 1, a variação ocorreu de muito ruim a excelente, o que pode ser justificado pelo fato de apresentar apenas 7 pontos dispersos para correlação. Algumas frações graúdas (25,4; 19; 12,5; 9,5 mm) se destacam quanto à intensidade boa ou excelente de correlação entre os sistemas de classificação de agregados. Na fração miúda, apenas a fração 0,60 mm apresentou destaque com intensidade boa. As demais frações apresentaram intensidade razoável a muito ruim. Já para o Grupo 2, composto de 19 pontos dispersos, pôde-se observar melhor a correlação existente entre os sistemas de classificação de agregados. Todas as frações apresentaram intensidade boa ou excelente de correlação, exceto na fração 4,75 mm (razoável). As frações miúdas, 2,36 e 1,18 mm, exibiram correlações de intensidade excelente, o que contradiz as conclusões diante do Grupo 1 (7 pontos dispersos). Dessa forma, diante da análise de correlação com 19 pontos dispersos, pode-se afirmar que existe indício de um material apresentar a mesma classificação independente do sistema de classificação utilizado.

Com relação ao Grupo 3, observou-se que a média das frações de cada material para a angularidade apresentou R^2 na intensidade de correlação boa e excelente, com destaque nas frações 12,5; 9,5 e 4,75 mm (excelente). Por fim, no Grupo 4, constatou-se, também, correlações na intensidade boa ou excelente, exceto nas frações 0,30 e 0,075 mm (razoável).

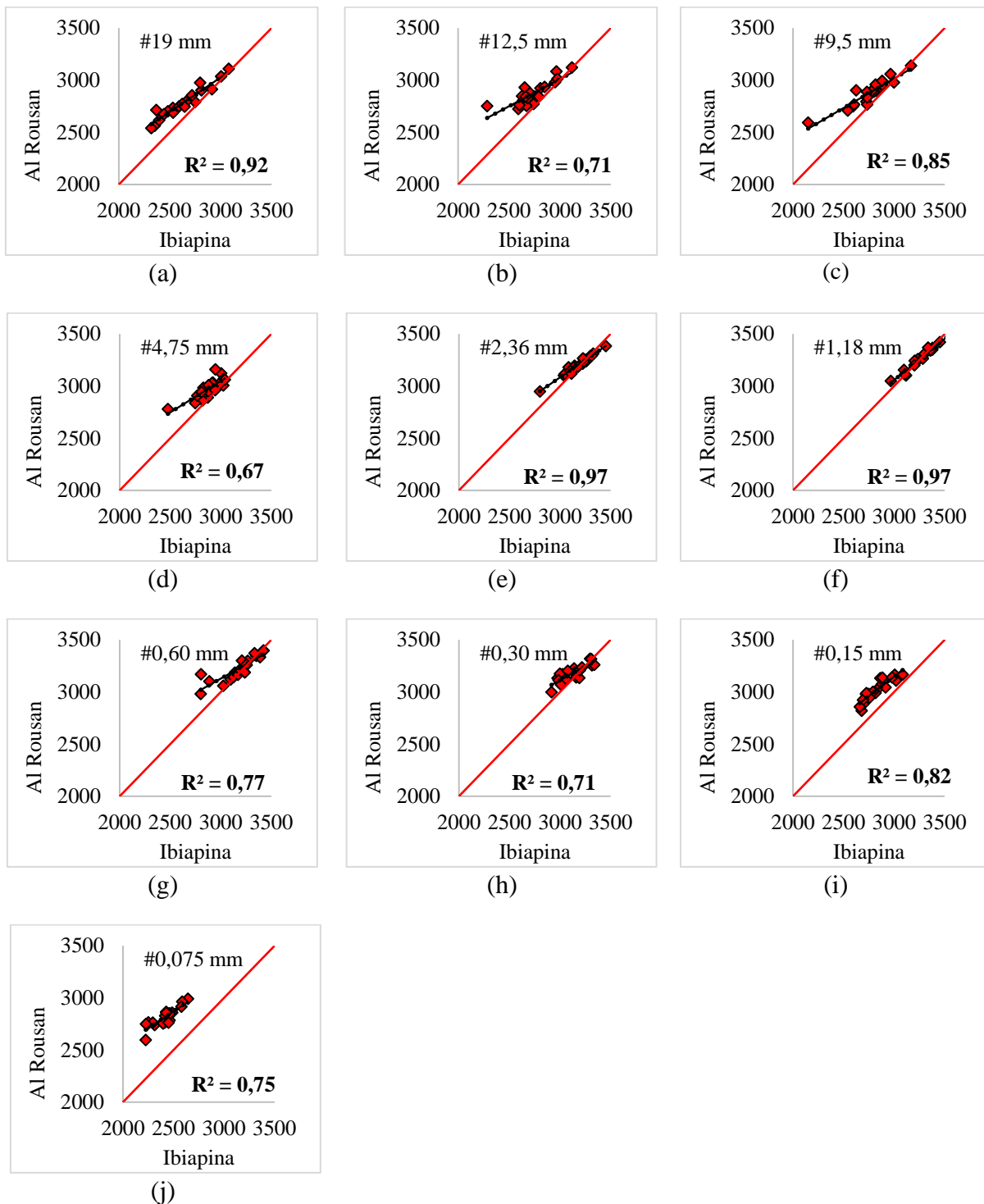
Contudo, para os dois grupos mencionados, pode-se afirmar que existem indícios de um material apresentar a mesma classificação independente do sistema de classificação utilizado.

Figura 2.23 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a angularidade subarredondada: Grupo 1 (n = 7)



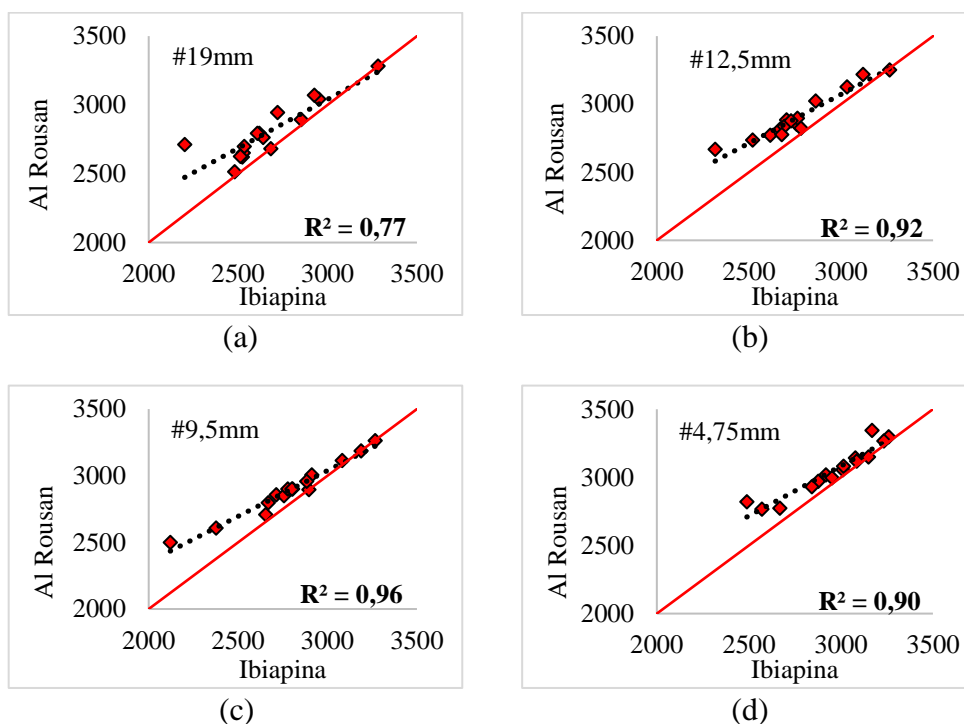
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 2.24 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a angularidade subarredondada: Grupo 2 (n = 19)



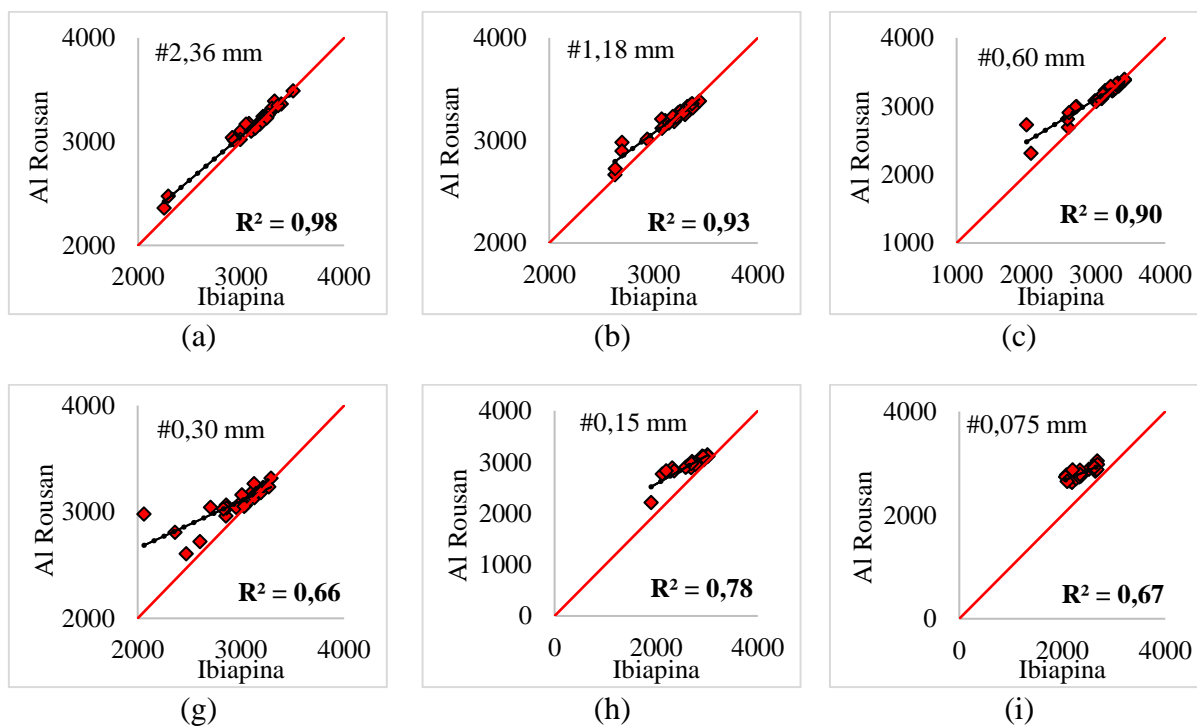
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 2.25 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a angularidade subarredondada: Grupo 3 (n = 15)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

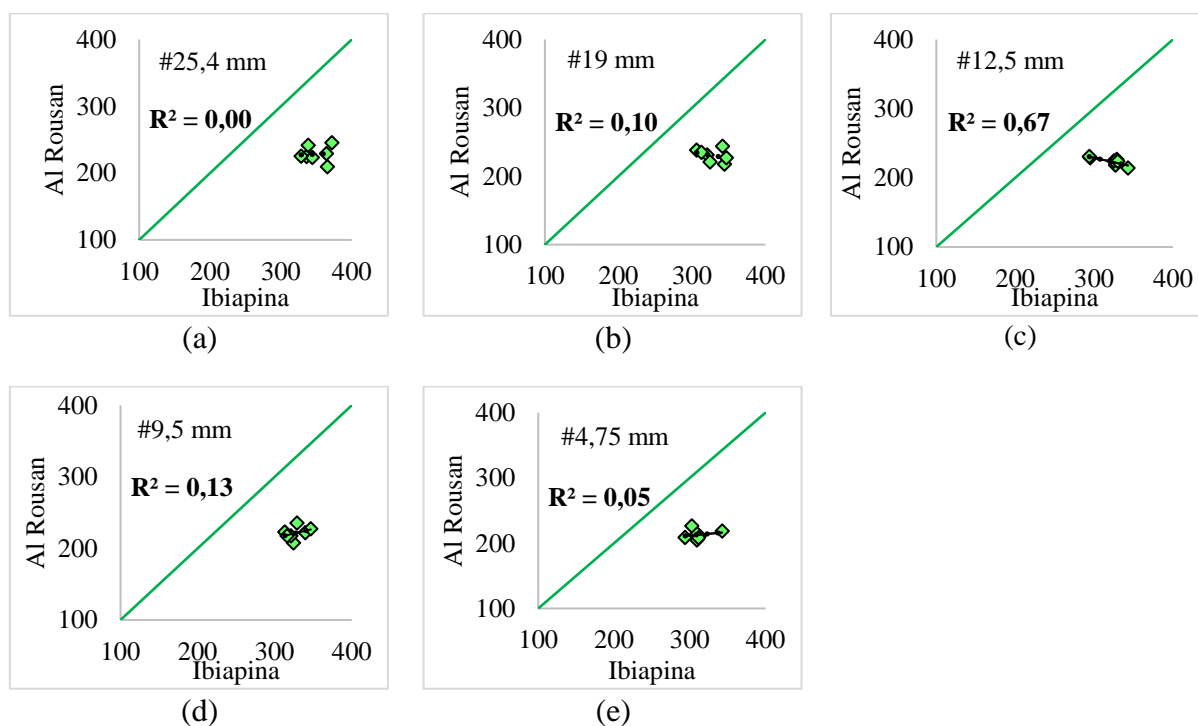
Figura 2.26 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a angularidade subarredondada: Grupo 4 (n = 26)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

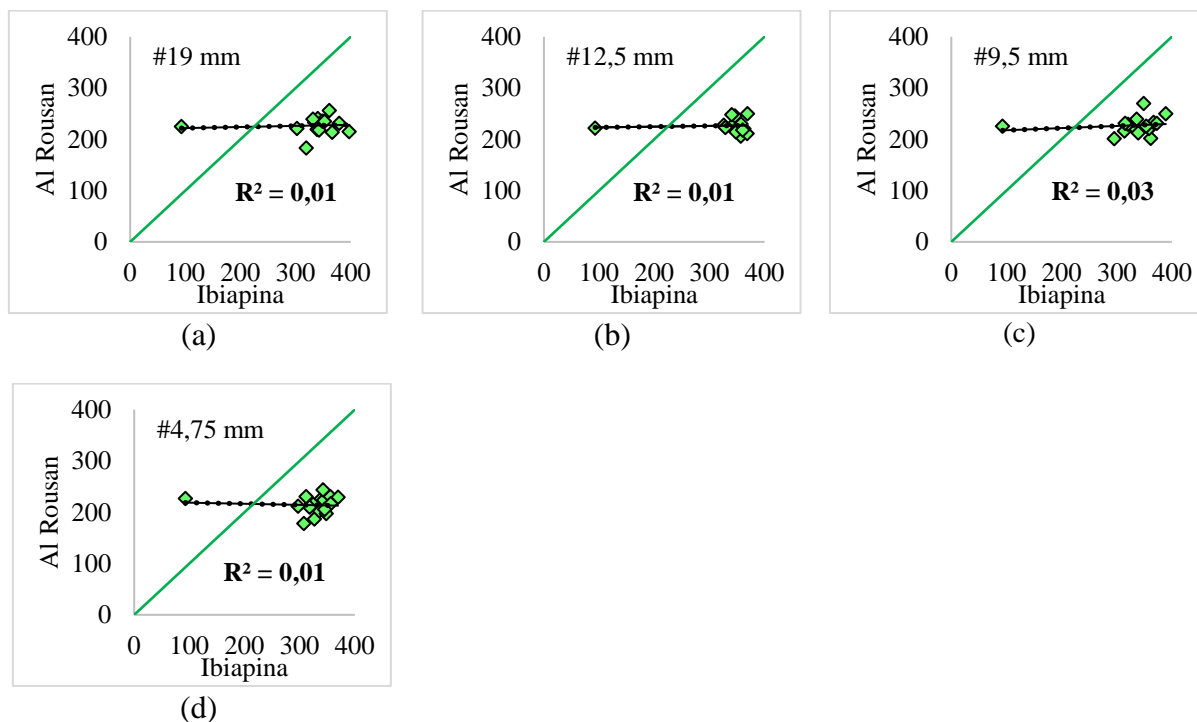
Para a textura todos os grupos apresentaram maior percentual de classificação na faixa macia. As Figuras 2.27 a 2.29 apresentam as correlações existentes em cada fração de cada grupo. Observou-se que a maioria dos valores das médias de textura macia se localizaram abaixo da linha de igualdade, o que representa perda de propriedade pelo sistema de Al Rousan (2004) em todos os grupos. No Grupo 1 apenas a fração 12,5 mm apresentou correlação na intensidade razoável. As demais frações apresentaram correlação de intensidade muito ruim. Nos Grupos 2 e 3, as correlações de intensidade muito ruim foram constatadas. Desse modo, as correlações na textura exibem forte indício de um material não apresentar a mesma classificação independente do sistema de classificação utilizado.

Figura 2.27 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a textura macia: Grupo 1 (n = 7)



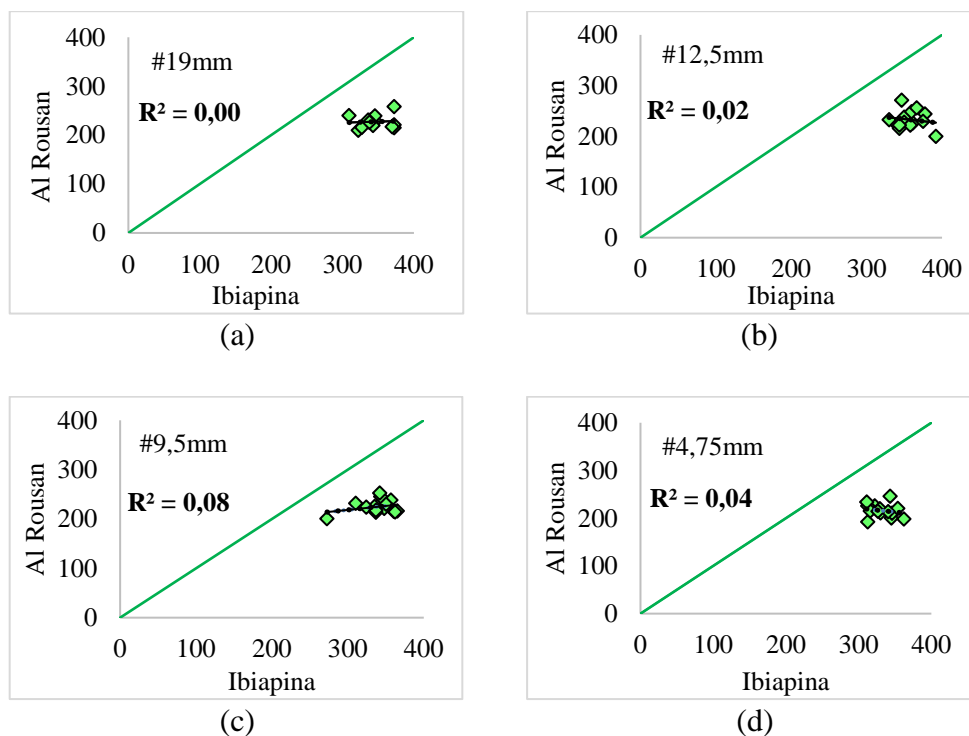
Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 2.28 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a textura macia:
Grupo 2 (n = 19)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

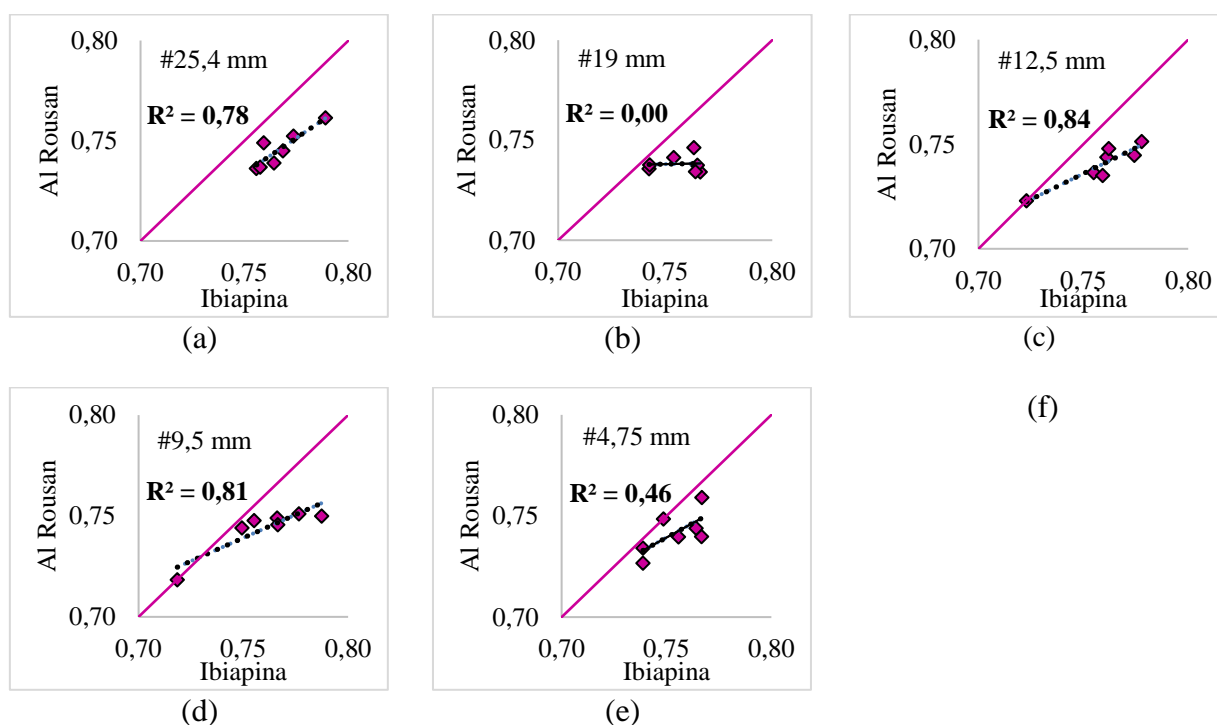
Figura 2.29 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a textura macia:
Grupo 3 (n = 15)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

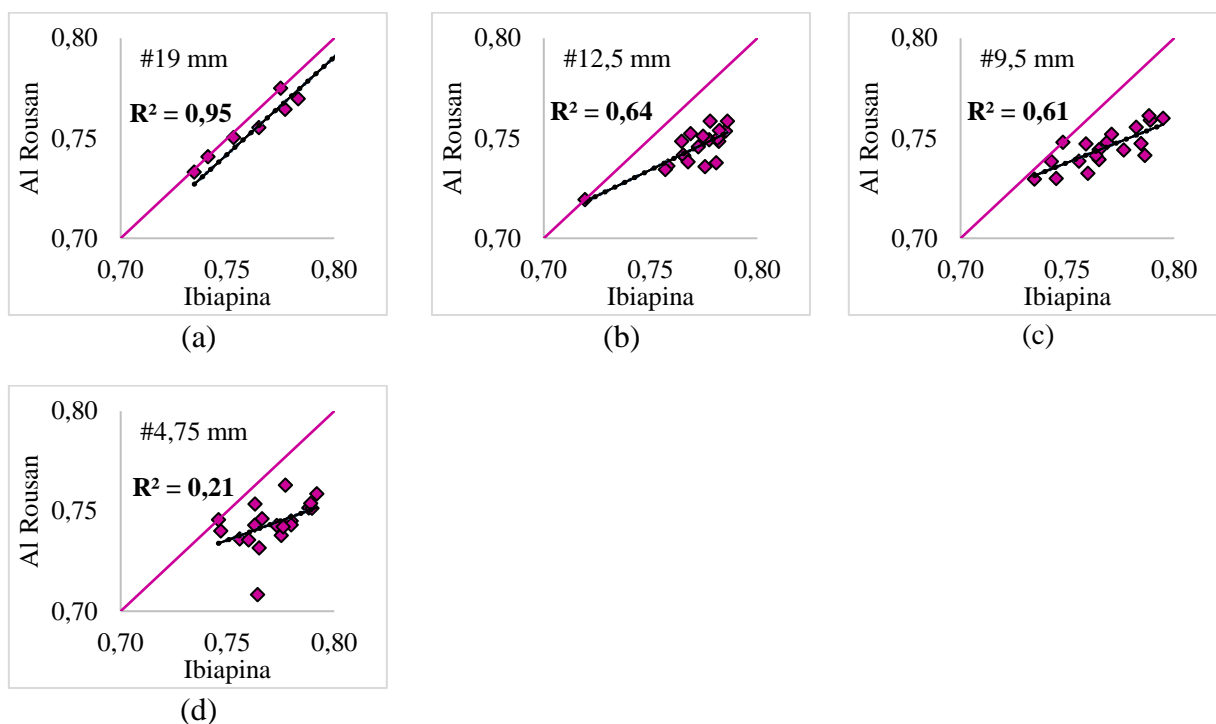
Na esfericidade todos os grupos com maior percentual de classificação se enquadram na faixa esfericidade moderada. As Figuras 2.30 a 2.32 apresentam as correlações existentes em cada fração de cada grupo. Observou-se que a maioria dos valores das médias de esfericidade moderada se localizaram abaixo da linha de igualdade, o que representa ganho de propriedade pelo sistema de Ibiapina (2018) em todos os grupos. No Grupo 1 é possível identificar correlação entre os sistemas de classificação de agregados, intensidade boa, em algumas frações (25,4; 19 e 12,5 mm). Para o Grupo 2, notou-se a intensidade excelente de correlação na fração graúda de 19 mm. Constatou-se, também, uma redução de R^2 à medida que a fração reduziu. Por fim, o Grupo 3 apresentou correlação de intensidade boa a ruim, com destaque na fração 4,75 mm com 86% de correlação (boa) entre os sistemas de classificação de agregados. No geral, esta propriedade apresenta grande variação no R^2 por frações, por exemplo na fração 19 mm (0,00; 0,95; 0,34) ou na fração 4,75 mm (0,46; 0,21; 0,86).

Figura 2.30 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a esfericidade moderada: Grupo 1 (n = 7)



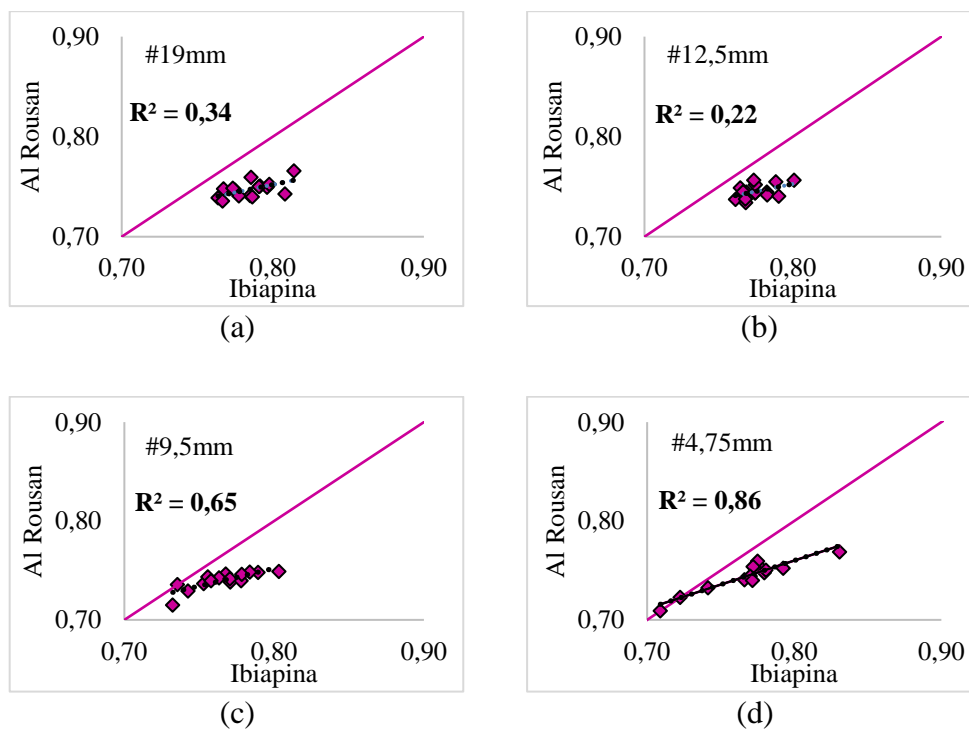
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 2.31 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a esfericidade moderada: Grupo 2 (n = 19)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

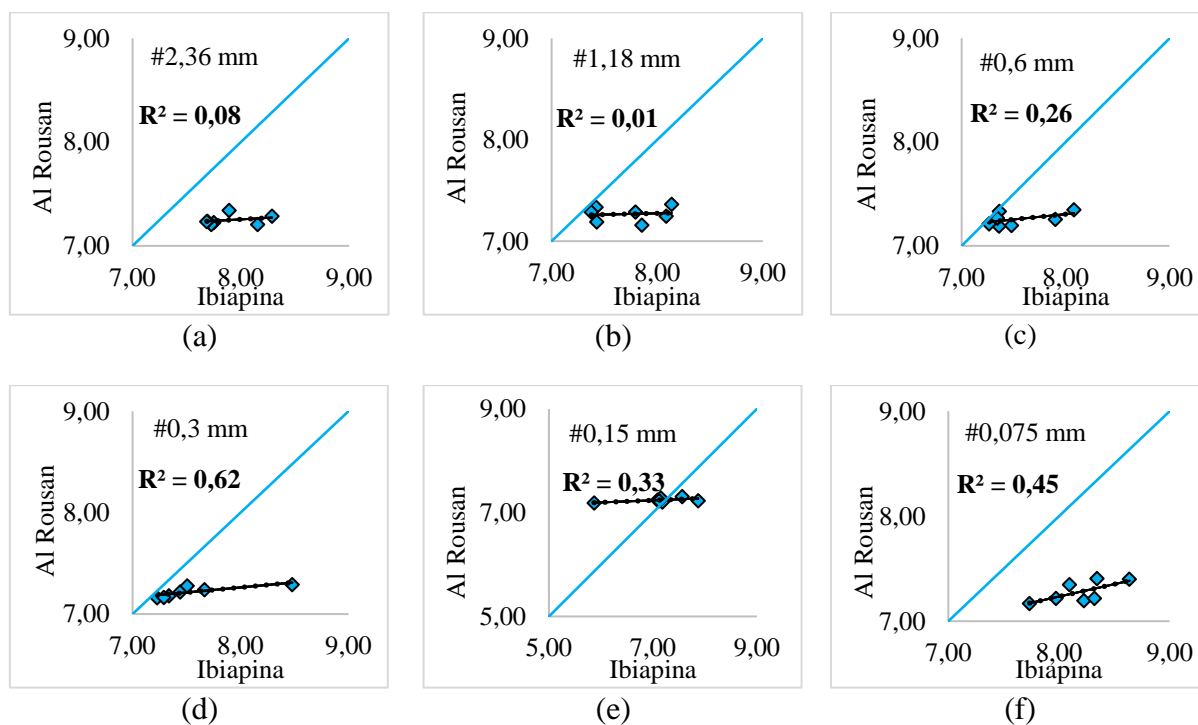
Figura 2.32 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a esfericidade moderada: Grupo 3 (n = 15)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

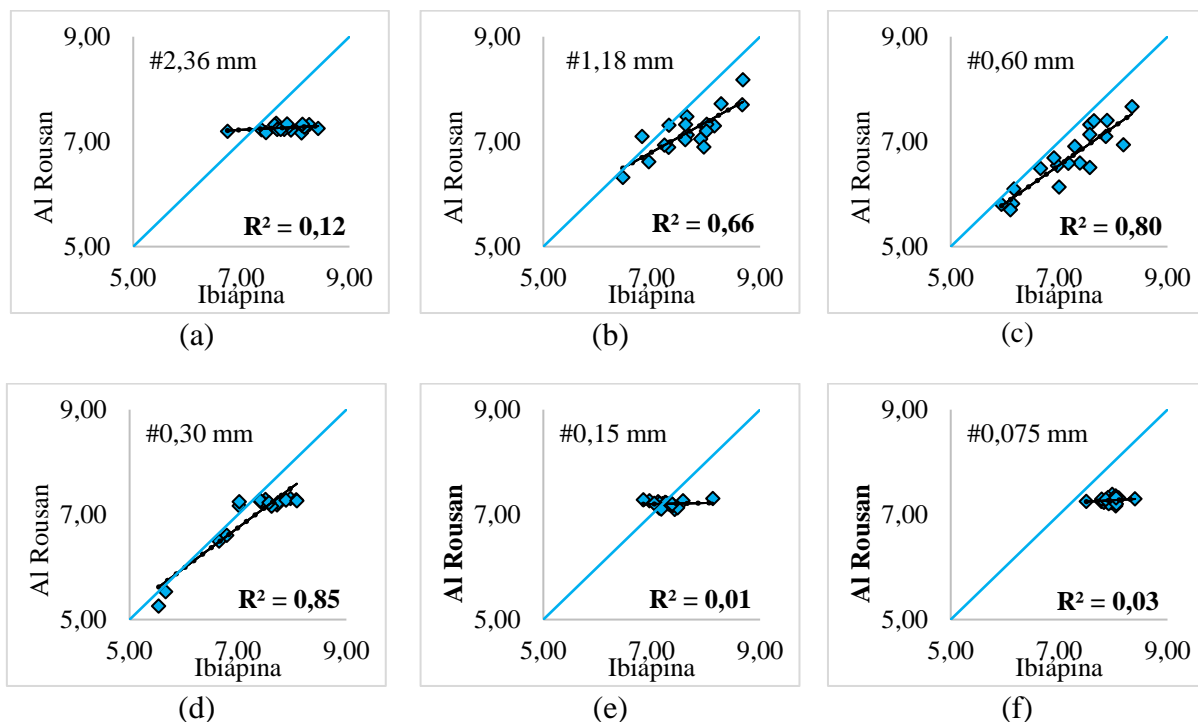
Para a forma 2D todos os grupos apresentaram maior percentual de classificação na faixa semicircular. As Figuras 2.33 a 2.35 apresentam as correlações existentes em cada fração de cada grupo. Observou-se que a maioria dos valores das médias de forma 2D semicircular se localizaram abaixo da linha de igualdade, o que representa ganho de propriedade pelo sistema de Ibiapina (2018) em todos os grupos. Nos Grupos 1 e 4, observou-se a existência de correlação na intensidade razoável a muito ruim entre os sistemas de classificação de agregados. No Grupo 2, existiu a correlação com intensidade boa em duas frações (0,60 e 0,30 mm). No geral, esta propriedade apresentou baixo indício de um material apresentar a mesma classificação independente do sistema de classificação utilizado.

Figura 2.33 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a forma 2D semicircular: Grupo 1 (n = 7)



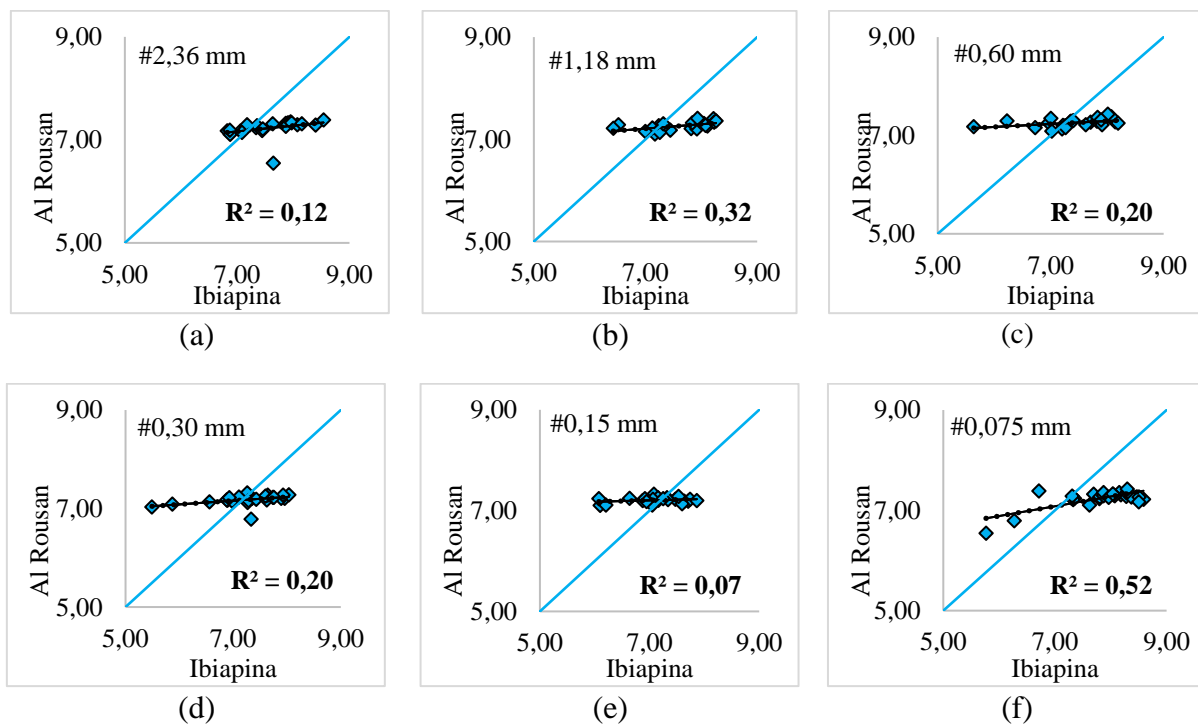
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 2.34 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a forma 2D semicircular: Grupo 2 (n = 19)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 2.35 – Correlação entre os sistemas de classificação de agregados para a forma 2D semicircular: Grupo 4 (n = 26)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

2.5 Considerações finais

Este estudo explorou a caracterização de 149 agregados (55 da UFRJ e 94 da UFC) pelos dois sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados, Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018). Foram investigadas quais propriedades e frações passaram por alteração diante da comparação pelos dois sistemas e a existência de tendência de alteração nas classificações das propriedades dos agregados.

Os resultados das análises para os parâmetros de média e de percentual fração a fração apresentaram algumas conclusões similares, destacando-se:

i. Na condição de frações iguais destacaram-se a angularidade e esfericidade. Os resultados relativos à angularidade tenderam a ter todas as frações classificadas como subarredondadas. Constatou-se a tendência de ganho desta propriedade nas frações miúdas, exceto na fração 0,075 mm. Para a esfericidade, observou-se a tendência de redução desta propriedade quando o tamanho da partícula reduziu. Com relação à textura, apenas no parâmetro de percentual fração a fração, pôde-se identificar a mesma tendência da esfericidade.

ii. Na condição de frações diferentes destacaram-se a textura e forma 2D. Na textura ocorreu uma tendência de redução desta propriedade à medida que a fração diminuiu para ambos os sistemas de classificação. Além disso, em 100% dos casos a classificação da textura pelo sistema Al Rousan (2004) se mostrou superior em relação ao sistema Ibiapina (2018). Para a forma 2D, a maior transição de classificação foi de semialongado para semicircular, sendo 100% dos casos de classificação pelo sistema Ibiapina (2018) enquadrado na classe semicircular.

iii. Para a condição de alteração em alguma fração todas as propriedades apresentaram um percentual significativo, com maior percentual para a propriedade forma 2D. Observaram-se flutuações em várias frações, sendo identificado apenas tendências de perda ou ganho de propriedade diante da comparação entre os sistemas para a angularidade e a textura. Diante do parâmetro média fração a fração, estas propriedades apresentaram uma tendência de superioridade quando classificadas por Al Rousan (2004) em relação ao sistema Ibiapina (2018). Porém, no parâmetro percentual fração a fração foi observado o inverso para a angularidade. A forma 2D apresentou, em sua maioria, a transferência da característica semialongado para semicircular e a classificação constante semicircular pelo sistema Ibiapina (2018). Na esfericidade, apenas no parâmetro média fração a fração mostrou algumas tendências. Nessa propriedade foi observado superioridade na classificação pelo sistema Ibiapina (2018), sendo destaque a transferência de classificação de achatado/alongado para

baixa esfericidade. Além disso, pôde-se identificar uma tendência de perda de propriedade com a redução de fração em ambos os sistemas de classificação.

Os resultados das análises para os parâmetros de média e de percentual geral também apresentaram conclusões similares. A angularidade e esfericidade foram destaques em maior percentual de classificação de frações iguais pelos dois sistemas. Já a textura e forma 2D foram destaques em maior percentual de classificação de frações diferentes.

Quanto às análises de correlações, a angularidade e esfericidade apresentaram mais tendências com intensidade excelente e boa entre os dois sistemas de classificação de agregados. Embora existam flutuações em frações, acredita-se que estas propriedades tendem a serem classificadas iguais pelos dois sistemas de classificação de agregados estudados. Por outro lado, na textura e forma 2D as correlações apresentaram intensidade razoável a muito ruim, o que leva a acreditar que tais propriedades tendem a serem classificadas diferentes pelos dois sistemas estudados.

No geral, conclui-se, a partir dos dados apresentados, que um material analisado pelos dois sistemas de classificação de agregados apresenta forte indício de ser classificado igual quanto à angularidade e à esfericidade. Já na textura e forma 2D os dados apresentaram indícios de um material ser classificado diferente nos dois sistemas de classificação de agregados, tendo em vista que os valores limites são bem diferentes entre os sistemas estudados. Isto fortalece a necessidade de existir um sistema de classificação próprio para agregados brasileiros.

A importância de se avaliar as propriedades de forma de um material pelos dois sistemas de classificação de agregados existentes, permitiu destacar as contribuições mais relevantes desta pesquisa elencadas a seguir:

1. Organização de um banco de dados de agregados caracterizados no AIMS, composto por 149 agregados, caracterizados por média e percentual de modo geral e fração a fração;
2. Observações de novas tendências na classificação de agregados;
3. Comprovação da necessidade de um sistema de classificação de agregados próprio para a caracterização de agregados brasileiros.

3 AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES PETROGRÁFICAS, FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DE AGREGADOS PARA LASTRO FERROVIÁRIO

3.1 Introdução

A camada de lastro é uma das camadas mais importantes da subestrutura da via férrea, na qual são usados em geral agregados oriundos de rochas de alta resistência. A degradação do lastro é uma das principais fontes de problemas da via férrea resultante da variação de forma dos grãos devido à abrasão dos cantos agudos das partículas angulares e quebras, dividindo-se em dois ou vários fragmentos.

O conhecimento das características dos agregados a serem aplicados na via permanente é fundamental para proporcionar a máxima eficiência dos veículos tratores e rebocados na via permanente. Para tal, a petrografia permite detalhar propriedades de agregados que influenciam o comportamento físico-mecânico e a durabilidade dos grãos diante das condições de uso as quais o material será solicitado. A morfologia permite representar os agregados em propriedades de forma (forma 2D, esfericidade, textura superficial e angularidade) que impactam no comportamento físico e mecânico da camada de lastro. As propriedades físicas tratam da resistência dos agregados aos efeitos diversos, como compressão, impacto, abrasão, polimento, entre outros, e podem ter influência da massa específica aparente, da porosidade e da absorção d'água, entre outros aspectos.

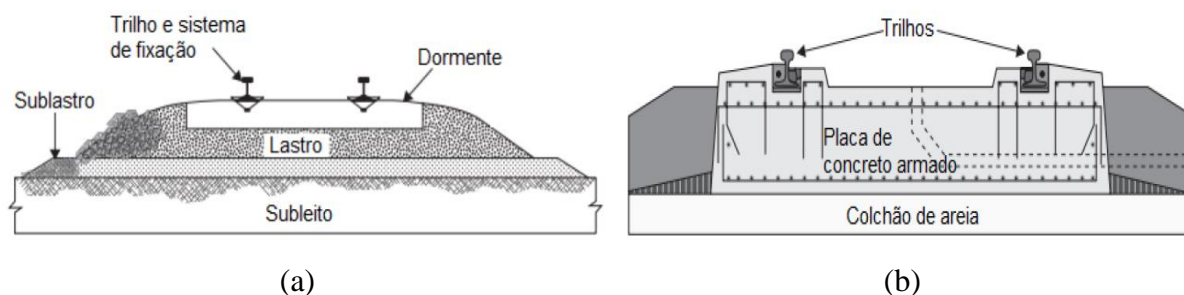
Avaliar as relações entre as propriedades de rochas e agregados auxilia na previsão do comportamento do lastro ferroviário e redução de desgastes e falhas prematuras na via permanente, bem como na necessidade de realização de intervenções frequentes de manutenção não desejadas. Assim, um dos objetivos desta tese é avaliar a relação entre as características petrográficas, físicas e morfológicas de agregados, de modo a otimizar a seleção de agregados para lastro ferroviário a partir de ensaios característicos de fácil obtenção, com variação em diferentes escalas ainda na fase de projeto. De modo específico, o estudo busca avaliar a influência da petrografia nas características físicas (índices físicos e ensaios de degradação que abordam abrasão, impacto, polimento, quebra, esmagamento e compressão) e morfológicas de agregados (angularidade, textura superficial e esfericidade e/ou forma), assim como a influência das propriedades físicas na morfologia dos agregados. Além disso, espera-se verificar as correlações das propriedades físicas e morfológicas entre si.

3.2 Revisão Bibliográfica

3.2.1 Função e componentes de vias férreas

Vias férreas são sistemas de transporte com eixos guiados responsáveis por conduzir veículos tratores (motores) e rebocados (sem motores). As ferrovias são separadas em dois sistemas: o material rodante, constituído por veículos tratores e rebocados (trens e vagões), e a via permanente. As vias permanentes ferroviárias podem ser representadas por dois grupos: vias tradicionais lastreadas (Figura 3.1a) e vias não lastreadas (Figura 3.1b), também, respectivamente, nomeadas de elástica e rígida.

Figura 3.1 – Seção transversal típica de via permanente: (a) lastreada elástica e (b) não lastreada rígida



Fonte: Adaptado de Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn (2011).

3.2.1.1 Via permanente lastreada

A via permanente lastreada é uma estrutura constituída de um conjunto de camadas e elementos que possibilitam a passagem de trens, dividida em duas partes, denominadas superestrutura e subestrutura, mas sem padronização universal em sua divisão. Por exemplo, para Selig e Waters (1994), a via elástica é dividida em superestrutura e subestrutura, sendo que a superestrutura inclui os trilhos, o sistema de fixação e os dormentes. Esta é separada da subestrutura pela interface dormente-lastro, que é a região mais importante na distribuição de esforços para as camadas mais profundas. A subestrutura é composta pelo lastro, sublastro e subleito.

Já para Nabais (2014), a infraestrutura é constituída pela plataforma (subleito) da estrada, composta de terraplenagem (aterros e cortes), sistemas de drenagem, obras de artes (pontes e viadutos) e túneis. A superestrutura é a parte da via que recebe os impactos direto da carga gerada pela composição (trens e vagões). Os principais componentes da superestrutura de

via elástica são os trilhos, os acessórios de fixação e os amortecedores, os aparelhos de mudança de via, os dormentes e as camadas granulares de lastro e sublastro).

3.2.2 Especificações do lastro

O lastro é uma camada formada unicamente por material granular obtido pela britagem de rochas. Esta matriz granular tem como função reduzir a magnitude das tensões que passam para as camadas inferiores, manter a geometria da via diante dos esforços laterais, longitudinais e verticais, facilitar a drenagem da via e os processos de manutenção, permitir o rearranjo das partículas durante as operações de nivelamento de irregularidades e de alinhamento da via.

Para que esta matriz granular desempenhe suas funções com eficiência, o conjunto de agregados deve apresentar: (i) resistência aos esforços transmitidos, (ii) elasticidade limitada para amenizar os choques, não apresentar alta rigidez para reduzir os impactos das cargas dinâmicas no desgaste dos trilho e não apresentar alta resiliência a ponto de gerar deslocamentos elásticos excessivos durante a passagem dos trens, de modo a ocasionar danos aos dormentes, às fixações e aos trilhos, (iii) dimensões que permitam a interposição entre dormentes e sublastro, (iv) resistência aos agentes atmosféricos e (v) ser constituído por material não absorvente, não poroso e que não produza pó (NABAIS, 2014).

Devido às inúmeras funções da camada de lastro ferroviário, deve-se conhecer as características dos materiais a serem aplicados nessa camada. Para fins de caracterização, cada país, empresa ou união de países especificam sua normalização com limites críticos para analisar este material. Na Tabela 3.1 são expostas e comparadas as especificações da 2758.7 (AS, 1996), EN 13450 (CEN, 2005), 80-EM-033A-58-8006 (VALEC, 2012), AREMA (2013), NBR 5564 (ABNT, 2014), ETM – 002 (DNIT, 2016). Observa-se diferenças entre parâmetros como, forma das partículas, abrasão Los Angeles, impacto Treton, entre outros.

Tabela 3.1 – Comparação entre os limites de várias normas para caracterização de lastro ferroviário

| Ensaio | Normas aplicadas | NBR 5564 (2014) | DNIT ETM-002- (2016) | VALEC (2012) | AREMA (2013) | AS 2758.7 (1996) | EN-13450 (CEN, 2005) |
|---------------------------|---|--|--|---------------------------------|---|---|--|
| Análise Petrográfica | NBR 5564 NBR 7389-2 ASTM C 294 ASTM C 295 EN 932-3 | Direciona a NBR 7389-2 | Direciona a NBR 5564 | Direciona a NBR 5564 | Direciona a ASTM C 295 | Direciona a ASTM C 294 e apresenta tabelas de análises | Direciona a EN 932-3 |
| Massa Específica Aparente | NBR 5564 NBR 7418 ASTM C127 EN 1097-6 | > 2,5 (g/m ³) | Direciona a NBR 5564, NBR 7418: > 2,5 (g/m ³) | > 2,4 (g/m ³) | > 2,3 - 2,9 (g/m ³): variação para diferentes materiais | > 2,5 (g/m ³) | Direciona a EN 1097-6 |
| Porosidade Aparente | NBR 5564 NBR 7418, AS 1141.6 EN 1097-6 | < 1,5% | Direciona a NBR 5564, NBR 7418: < 1,5% | < 1% | - | Direciona a AS 1141.6.1 | Direciona a EN 1097-6 |
| Absorção d'água | NBR 5564 NBR 7418 ASTM C127 AS 1141.6.1 EN 1097-6 | < 0,8% | Direciona a NBR 5564, NBR 7418: < 0,8% | < 1% | < 1% - 5% variação para diferentes materiais | Direciona a AS 1141.6.1 | Direciona a EN 1097-6: |
| Granulometria | NM 248 ASTM C136 EN 933-1 AS 1141.11 AS 1141.12 | Padrão A (linha) ou B (pátio): 63,6 - 12 mm | Padrão único: 63,5 - 12,7 mm | Padrão único: 63,5 - 12,7 mm | AREMA 24, 25, 3, 4A e 4: linha principal (63,5 - 4,75 mm) AREMA 5 e 57: linha de pátio (63,5 - 2,36 mm) | AS 60, AS 60 (dormentes de aço), AS 50 e AS 50 (agregado graduado): 53 - 0,075 mm | Padrão A, B, C, D, E ou F: (63 - 22,4 mm) |
| Material pulverulento | NM 46 ASTM C117 AS 114.12 | Passante na # 75µm < 1% | Direciona a NBR 5564: Passante na # 75µm < 1% | < 1% | - | Direciona a AS 114.12: Passante na # 75µm | Passante na # 0,063 mm < 1% |
| Torrões de argila | NBR 7218 ASTM C142 | < 0,5% | Direciona a NBR 5564: < 0,5% | < 0,5% | < 0,5% | - | - |

| | | | | | | | |
|------------------------------|--|-------------------------|--|-----------------------------|---|---|--|
| Partículas macias e friáveis | NBR 7218 NBR 8697 ASTM C142 | < 5% | Direciona a NBR 5564: < 0,5% | < 5% | - | - | - |
| Forma | NBR 5564 ASTM D4791 AS 1141.18 EN 933-3 EN 933-4 | < 15% não cúbicas (3:1) | Direciona a NBR 5564: < 15% não cúbicas (3:1) | < 10% planas e/ou alongadas | < 5% não cúbicas (3:1) | Partículas esmagadas < 5% | Índice de achatamento $\leq 15\%$ - 35% Índice de forma $\leq 10\%$ - 30% |
| Abrasão Los Angeles | NM 51, ASTM C131 ASTM C535 AS 1141.22 EN 1097-2 | < 30% | < 30% | < 40% | < 25% - 40% variação para diferentes materiais | < 25% - 40% | $\leq 12\%$ - 24% |
| Impacto Treton | NBR 5564 EN 1097-2 | < 25% | Direciona a NBR 5564: < 25% | < 20% | - | - | $\leq 14\%$ - 22% |
| Esmagamento | AS 1141.21 | - | - | - | - | Passante na # 26,5 mm e Retido na # 19,1 mm < 25% - 40% Passante na # 53 mm e Retido na # 37,5 mm < 6% - 12% | - |
| Compressão axial | NBR 5564 | > 100 MPa | Direciona a NBR 5564: > 100 Mpa | > 100 MPa | - | - | - |
| Micro Deval | EN 1097-1 | - | - | - | - | - | $\leq 5\%$ - 15% |
| Alteração com sulfatos | ASTM C88 EN 1367-2 | - | - | < 5% | < 5% | - | $\leq 3\%$ |
| Resistência ao gelo e degelo | EN 1367-1 | - | - | - | - | - | Direciona a EN 1367-1 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.2.3 *Análise petrográfica*

A petrografia se concentra em descrições detalhadas de rochas, principalmente, para a rocha que será exposta à ação de agentes intempéricos, tais como chuva, vento e variações de temperatura. Chrismer (1986) afirma que esse estudo é fundamental para fornecer informações sobre o desempenho de agregados aplicados em lastros ferroviários. Durante a análise petrográfica, além das propriedades individuais das rochas, como a proporção de cada mineral, estrutura granular e textura, também são investigadas as propriedades de cada um dos minerais presentes como dureza, clivagem, brilho, cor e composição química dos mesmos.

Para Watters, Klassen e Clifton (1987), o desempenho do lastro quando submetido aos esforços de cargas e às tensões químicas e físicas de um ambiente de intemperismo, depende, em grande parte, das propriedades mineralógicas, químicas, estrutura granular e textura do material. Diante da avaliação do material de lastro, os autores afirmaram que a análise petrográfica constitui o método mais adequado para monitorar a qualidade do lastro (pedreira) e as características de degradação do mesmo na via permanente. Para o material de lastro estudado, os autores detectaram elevada quantidade de mica e sulfetos, textura com baixa consolidação, alta porosidade ou friabilidade, e estruturas minerais com fraquezas como foliação, juntas e planos de estratificação. Essas características refletem uma camada de lastro ferroviário com baixa qualidade. Embora seja um processo de caracterização com grande subjetividade, este pode fornecer avaliações úteis relativas ao desempenho da via, prever qualitativamente os resultados de testes físicos, auxiliar na interpretação dos resultados oriundos dos testes físico-mecânicos e identificar potenciais deficiências em materiais destinados à utilização na camada de lastro.

Para Selig e Waters (1994), a utilização da petrografia para identificação do tipo de rocha é uma valiosa ferramenta para a avaliação do lastro. Navarro e Artur (2002) afirmam que com as características petrográficas é possível prever mudanças nas propriedades físico-mecânicas das rochas diante das variações das condições ambientes e de solicitações tais como umidade, atrito, impacto, líquidos corrosivos, entre outros, que possam comprometer a qualidade e a durabilidade da rocha. Yasar, Ranjith e Perera (2010) afirmaram que as características petrográficas, que incluem tamanho e forma do grão, densidade do empacotamento, proximidade do empacotamento, grau do intertravamento, tipo de contato e composição mineralógica, afetam as propriedades físico-mecânicas das rochas.

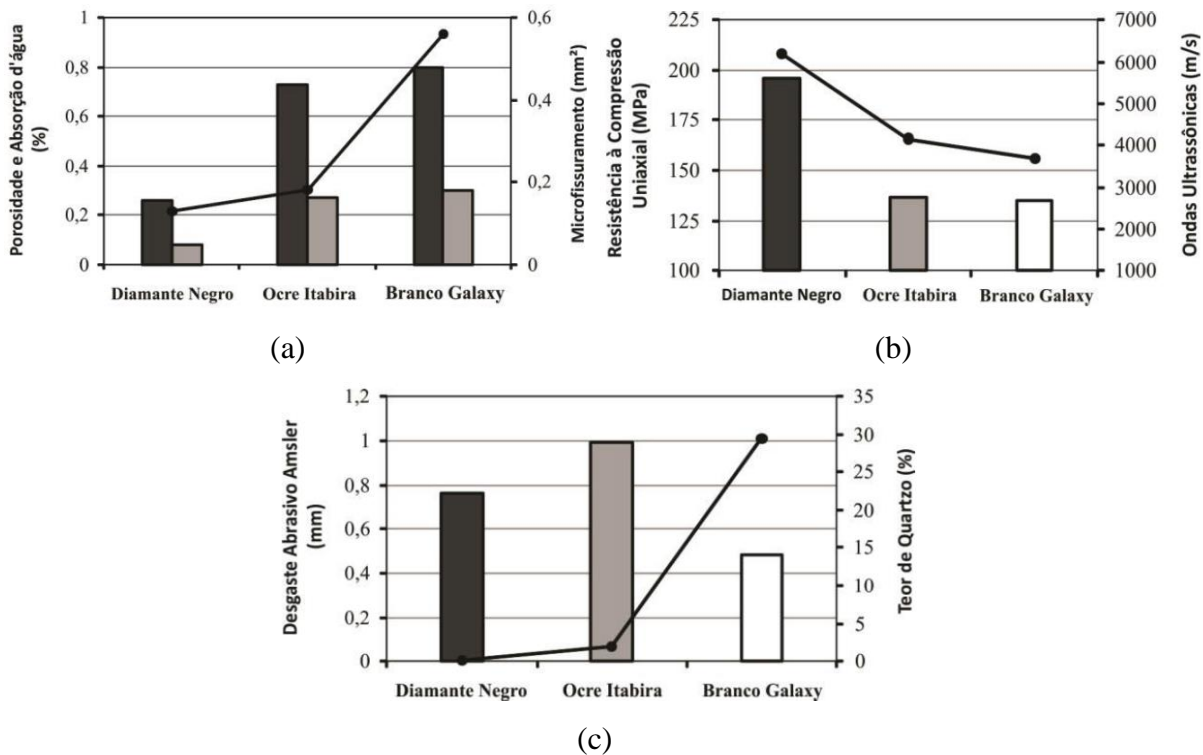
Prikryl (2001) realizou um estudo experimental com 11 rochas graníticas para avaliar a variação da qualidade das rochas diante da composição mineralógica uniforme e

distribuição diversificada no tamanho do grão mineral. Os materiais foram testados quanto às propriedades de deformação e resistência. A petrografia foi caracterizada através da análise de imagem auxiliada por computador, possibilitando determinar o tamanho, a forma e a orientação preferida da forma de grãos individuais, a distribuição do tamanho dos grãos e a composição modal. Os resultados mostraram que o tamanho do grão é o principal fator microestrutural que controla a variação de resistência em grupos de rochas intimamente relacionadas a mineralogia, mas por outro lado, a influência da porosidade não pode ser subestimada. A maior correlação ($R^2 = 0,71$) foi encontrada entre a resistência à compressão uniaxial e o tamanho médio de grão de todos os minerais formadores das rochas, sendo uma tendência logarítmica. A anisotropia de resistência das rochas é afetada pela orientação dos minerais formadores das rochas. Se a rocha mostra uma orientação aleatória dos minerais, a anisotropia da resistência permanece muito baixa (abaixo de 10%).

Keikha e Keikha (2013) caracterizaram duas rochas graníticas através da petrografia e do ensaio físico de compressão uniaxial. Com o estudo concluíram que a resistência aumenta à medida que o tamanho do grão mineral diminui, a resistência aumenta à medida que as proporções de quartzo e ortoclásio aumentam e ao contrário, a abundância de plagioclásio provoca redução na resistência do material.

Pazeto e Artur (2015) avaliaram a influência das propriedades petrográficas no comportamento tecnológico de três rochas ornamentais graníticas com distintos aspectos mineralógicos, texturais e estruturais. O estudo relacionou parâmetros petrográficos para explicar e/ou prever o comportamento físico dessas rochas diante dos índices físicos, resistência à compressão uniaxial, resistência à compressão uniaxial conjugada à congelamento e degelo, resistência à flexão pelos métodos dos 3 e 4 pontos, desgaste abrasivo Amsler, resistência ao impacto de corpo duro, propagação de ondas ultrassônicas e coeficiente de dilatação térmica linear. No geral, grande parte das correlações identificadas se mostraram diretas e evidentes. Foram observadas correlações diretas entre o grau de microfissuramento das rochas e porosidade e capacidade de absorção d'água (Figura 3.2a); teor de máficos e massa específica seca; resistência à compressão uniaxial e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Figura 3.2b); teor de quartzo e desgaste abrasivo Amsler (Figura 3.2c); teor de quartzo e dilatação térmica linear.

Figura 3.2 – Correlação entre propriedades petrográficas e tecnológicas de rochas ornamentais: a) porosidade (colunas escuras), absorção d'água (colunas claras) e grau de microfissuramento (linha cheia); b) resistência à compressão uniaxial (colunas) e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (linha cheia) e c) desgaste abrasivo Amsler (colunas) e teor de quartzo (linha cheia)



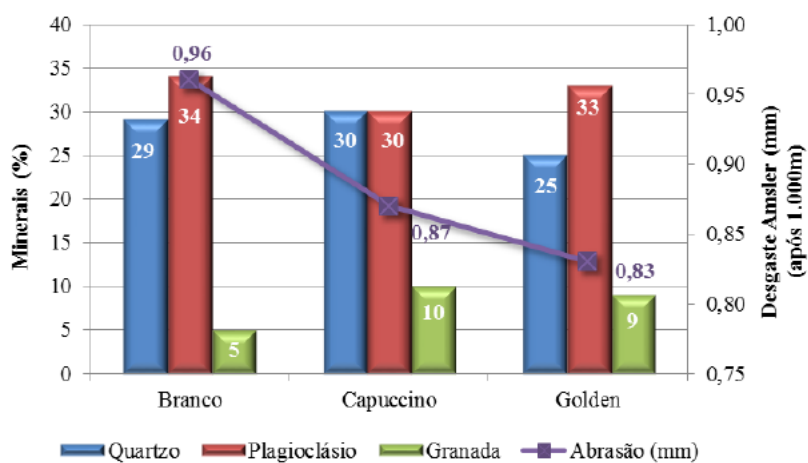
Fonte: Pazeto e Artur (2015).

Pazeto e Artur (2015) afirmaram que o tamanho dos grãos minerais influencia o comportamento tecnológico de rochas. As granulações médias/grossas favorecem a maior porosidade e capacidade de absorção d'água devido a rocha apresentar menos pontos de contato entre os minerais. No caso de granulação fina, pôde-se observar maior imbricamento mineral e baixo grau de microfissuramento, conseqüentemente, maior eficiência na avaliação da resistência da rocha. Por outro lado, a rocha com a textura classificada como porfirítica (tipo cumulativa) proporcionou menor imbricamento mineral com conseqüente redução da resistência ao impacto de corpo duro.

Leal Neto (2017) investigou três rochas ornamentais utilizando alguns ensaios realizados por Pazeto e Artur (2015) e incluiu a avaliação da resistência ao ataque químico. O estudo correlacionou os aspectos mineralógicos, texturais e estruturais com os resultados dos ensaios de caracterização tecnológica para os três pegmatitos. Os resultados do estudo corroboraram com algumas análises conduzidas por Pazeto e Artur (2015). No entanto, quanto

ao desgaste abrasivo de Amsler, pôde-se identificar uma relação intrínseca entre a composição mineralógica, no que se refere aos teores de quartzo, plagioclásio e granada (Figura 3.3). Para Leal Neto (2017), o baixo teor de granada no pegmatito Branco foi um fator determinante na baixa resistência a abrasão, apesar de apresentar o maior percentual de plagioclásio em relação às demais rochas. Com relação ao pegmatito Golden, a rocha apresentou melhor resistência abrasiva quando o menor teor de quartzo foi encontrado, o que contradiz a análise conduzida por Pazeto e Artur (2015). Para o pegmatito Golden, a resistência abrasiva foi justificada pelo percentual relativamente alto de granada (9%).

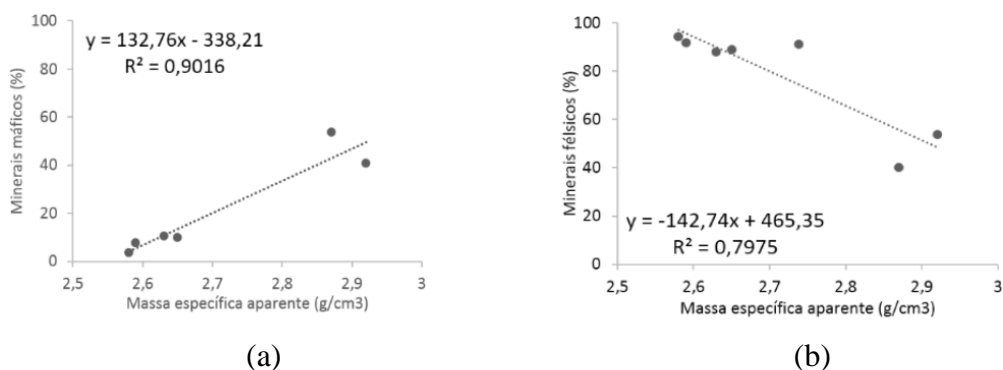
Figura 3.3 – Correlação entre a composição mineralógica e o desgaste abrasivo Amsler



Fonte: Leal Neto (2017).

Trotta (2020) investigou a petrografia de agregados graúdos, oriundos de três pedreiras comumente utilizados no sudeste do Brasil, para relacionar essa informação com aspectos físicos e morfológicos das partículas. Quanto à petrografia e aos aspectos físicos, o estudo mostrou que a mineralogia influenciou nas propriedades físicas dos agregados, de forma que, o aumento do teor de minerais máficos, tais como, biotita, anfibólio e piroxênio, aumentou a massa específica aparente (Figura 3.4a). O oposto ocorre com os minerais félsicos (Figura 3.4b). Além disso, foi observada forte correlação (acima de 0,70) negativa entre feldspato potássico e a porosidade, o que não era esperado pois o material apresentou alteração de microclinas e intenso microfraturamento nestes cristais. No entanto, a justificativa para a relação inversa foi a elevada quantidade de argilominerais preenchendo os poros e as microfraturas.

Figura 3.4 – Correlação por regressão linear entre minerais e massa específica aparente: a) minerais máficos e b) minerais félsicos



Fonte: Trotta (2020).

3.2.4 Análise morfológica

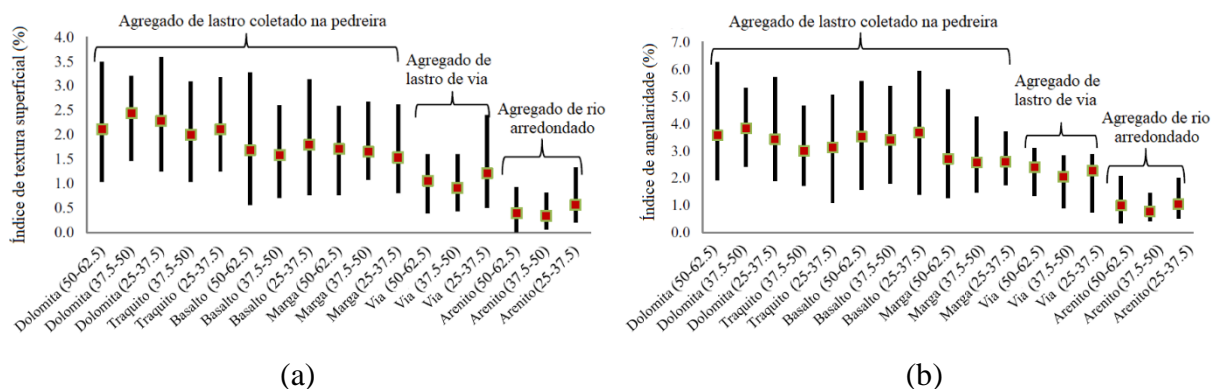
Semelhante à análise petrográfica, a análise morfológica pode ser usada para inferir sobre o desempenho do lastro. Tal análise busca compreender as características ligadas ao tamanho e às propriedades de forma (forma, esfericidade, angularidade e textura superficial). Segundo Huang (2010), as propriedades de forma dos agregados são determinantes na resistência, na trabalhabilidade e na estabilidade de lastros ferroviários. A angularidade, assim como a lamelaridade, deve ser usada para verificar a presença de partículas de agregados que possam afetar negativamente as propriedades mecânicas do lastro ferroviário. O citado autor concluiu que agregados angulares e rugosos, desejáveis para compor lastros ferroviários, possuem resistências superiores em relação a agregados macios e arredondados.

Moaveni *et al.* (2016) avaliaram o desempenho do lastro quanto a tendência à degradação, em campo e em laboratório, com foco na caracterização morfológica das partículas, feita com o uso de imagens. Os resultados mostraram que a degradação e a quebra das partículas, assim como as modificações nas propriedades de forma apresentam diferenças quando os materiais utilizados em campo (5 materiais) foram comparados com o avaliado em laboratório (1 material). O material avaliado em laboratório, submetido ao ensaio de abrasão Los Angeles (LA) com até 2.125 giros do tambor, apresentou partículas mais arredondadas quando comparado com os materiais utilizados em campo com solicitações de até 732 milhões de toneladas brutas. Os autores afirmam que o ensaio LA é recomendável para identificar a tenacidade dos agregados, no entanto para tratar de simulação da degradação do material que ocorre em campo este ensaio pode não ser totalmente representativo.

Pesquisas nacionais realizadas nos últimos anos avaliaram a influência das características morfológicas no comportamento de lastro ferroviário por meio de Processamento Digital de Imagens (PDI) com o uso do equipamento *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS). Diógenes (2016) avaliou a influência da alteração das propriedades de forma e granulometria dos agregados no comportamento mecânico do lastro em diferentes momentos do processo de uso do material: (i) oriundo da pedreira e (ii) aplicado na via permanente. Pôde-se constatar menores valores de deformação axial permanente para os materiais coletados na via permanente (1,4% para lastro situado logo abaixo do dormente e 1,0% para lastro coletado após cinco anos de uso) em relação ao material oriundo da pedreira (1,7%). Diógenes e Castelo Branco (2016) e Diógenes *et al.* (2017) avaliaram as propriedades de forma de agregados utilizados em lastro provenientes da pedreira e da via permanente caracterizados através do AIMS. Os parâmetros morfológicos (forma, angularidade e textura superficial) do material coletados na via (após cinco anos de uso) foram similares aos parâmetros encontrados para o material de origem (oriundo da pedreira). Esse resultado foi justificado pela não solicitação de carregamentos intensos, estágio de serviço efetivo (transporte efetivo de carga de 32,5 t/eixo), e sim, apenas para a construção da via totalizando aproximadamente 3 MTBT nos cinco anos de execução. Pôde-se ainda concluir que o acréscimo de lamelaridade ocorreu com a redução do tamanho da partícula.

Koohmishi e Palassi (2017) avaliaram propriedades morfológicas (angularidade e textura superficial) de quatro agregados utilizados em camadas de lastro ferroviário coletados em pedreira (basalto, dolomita, marga e traquito), agregado de lastro coletado na via permanente (condição degradada) e agregado de rio (arenito) em diferentes frações (62,5-50 mm; 50-37,5 mm; 37,5-25 mm) usando o PDI para obtenção de imagens 2D (AIMS). Investigando a influência do tamanho do agregado nas propriedades morfológicas, os citados autores concluíram que o tamanho do agregado não tem influência na textura superficial e na angularidade das partículas. A Figura 3.4 mostra as variações dos índices morfológicos em percentual com relação ao tamanho dos agregados.

Figura 3.4 – Variação dos índices morfológicos para os agregados estudados: a) índice de textura e b) índice de angularidade



Fonte: Adaptado de Koohmishi e Palassi (2017).

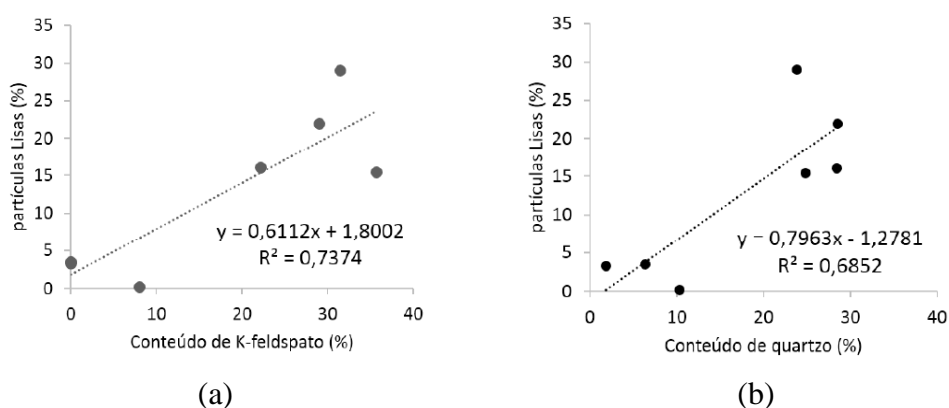
Diógenes (2018) investigou as relações entre as características da rocha de origem e resistência da mesma à degradação por impacto (resistência à tenacidade - Treton) e por abrasão, polimento e quebra (resistência ao desgaste realizado no Micro Deval - MD), além de relacionar a morfologia das partículas obtidas com o uso do AIMS antes e após a realização dos ensaios de degradação. Com o estudo, concluiu-se que o teor de biotita, em agregados de origem granítica/gnáissica forneceu às partículas maior resistência quando estas foram submetidas ao impacto, maiores perdas de massa e menores perdas de rugosidade superficial quando submetidas ao desgaste. Os agregados oriundos de rocha fonolítica, em comparação àqueles de origem granítica/gnáissica, apresentaram 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 angularidade, enquanto rochas de origem granítica/gnáissica formaram partículas com maior angularidade.

Silva (2018) avaliou a influência das propriedades de forma na granulometria e no comportamento mecânico de lastro ferroviário em diferentes cenários e escalas de ensaios. Esse autor concluiu que o comportamento mecânico da camada de lastro em escalas reduzida e real apresentam comportamentos similares. Rosa (2019) caracterizou o lastro ferroviário quanto a aspectos mecânicos associados à quebra de partículas, em escalas real e reduzida, bem como propriedades morfológicas, além da realização de modelagem com o uso do Métodos dos Elementos Discretos (MED). Com o estudo, constatou-se que lastros enquadrados na faixa AREMA N° 24 tendem a gerar menor quebra das partículas, principalmente se constituído de pelo menos 50% das partículas retidas na fração equivalente ao tamanho máximo.

Trotta (2020) avaliou a influência das características geológicas (petrográficas e mineralógicas) na variação morfológica das partículas a partir da quantificação da degradação

de agregados graúdos utilizando o PDI com o uso do AIMS. Nesse citado estudo foram analisados materiais oriundos de três pedreiras, onde uma delas, caracterizada com gnaiss migmatítico, foi subdividida em cinco litotipos. Os resultados, diante da relação entre a morfologia e a mineralogia das rochas, mostraram forte correlação (acima de 0,70) entre a proporção de feldspato potássico e a proporção de partículas de textura superficial lisa (Figura 3.5a). Quanto à proporção de quartzo, observou-se também a mesma tendência, porém com fraca correlação (Figura 3.5b). De modo contrário, rochas com proporção de máficos, principalmente anfibólios e micas, apresentaram valores de textura superficial elevados, ou seja, partículas mais rugosas. Ainda nesse contexto, o citado autor mencionou o fato da proporção de biotita se relacionar intimamente com a angularidade, onde as partículas com maiores proporções deste mineral são mais arredondadas. Por outro lado, com relação à granulação mineral das rochas (microtextura), pôde-se observar que quanto maior for a granulação maior é também a angularidade dos agregados.

Figura 3.5 – Correlação por regressão linear entre minerais e proporção de partículas com textura superficial lisa: a) feldspato potássico e b) quartzo



Fonte: Trotta (2020).

3.2.5 Análise física

O comportamento físico de agregados é identificado, principalmente, através dos índices: massa específica aparente, absorção de água e porosidade. Nas especificações que tratam de agregados para aplicação em lastro ferroviário os ensaios de abrasão LA, impacto Treton e resistência à compressão uniaxial também são considerados físicos conforme NBR 5564 (ABNT, 2014). No geral, nesses ensaios, as partículas são submetidas a níveis e combinações de forças de abrasão ou atrito, impacto e polimento por um determinado tempo

ou número de rotações, tanto no estado seco quanto no úmido, de modo a relacionar a perda de massa do material em comparação à massa original a fim de obter um critério para avaliar a degradação.

Yasar, Ranjith e Perera (2010) estudaram o comportamento físico-mecânico de três rochas sedimentares com variação na mineralogia e nas características petrográficas. As rochas foram caracterizadas pelos ensaios de compressão uniaxial, resistência à tração, módulo de elasticidade, carga pontual, densidade, porosidade, absorção de água e dureza. Os resultados mostraram uma forte correlação (acima de 89%) entre as variáveis resistência à compressão uniaxial e porosidade com as linhas de tendências representadas em função polinomial (2º grau).

Cantisani *et al.* (2013) avaliaram a relação entre as propriedades petrográficas, físicas e mecânicas de arenitos. Os autores afirmaram que a heterogeneidade de características petrográficas e mineralógicas afetam fortemente as propriedades físicas e mecânicas. Para o estudo, foram realizadas simulações em diferentes condições ambientais utilizando o teste de envelhecimento acelerado e comparadas com os casos reais com aplicação dos arenitos em pavimentos nos ambientes urbano, marinho e montanhoso. Os autores concluíram que a presença de uma alta quantidade de cimento carbonático determina uma baixa porosidade efetiva; uma prevalência de poros pequenos determina um alto valor de resistência à compressão uniaxial, enquanto uma alta quantidade de matriz de argila determina alta porosidade efetiva; prevalência de poros maiores determina uma baixa resistência à compressão uniaxial; a resistência à compressão uniaxial é afetada pela composição mineralógica e pelas características petrofísicas, enquanto a resistência à flexão é condicionada pela anisotropia do material.

Wnek *et al.* (2013) analisaram treze agregados utilizados na composição de lastro ferroviário, com diferentes mineralogias, quanto à degradação e a durabilidade por meio do ensaio de abrasão LA juntamente com o uso do PDI (E-UIAIA) para a caracterização morfológica dos materiais. Pôde-se concluir que a durabilidade de agregados mais angulares é menor devido à degradação dos mesmos. Portanto, para avaliar o mecanismo de degradação dos agregados que compõem lastros sob carregamento estático e cíclico, é importante caracterizar, com precisão, as propriedades morfológicas das partículas que compõem esta camada.

Ortiz e Mahmoud (2014) avaliaram a textura superficial de onze agregados graúdos, com mineralogias variadas, aplicados em pavimentos asfálticos. Utilizaram o AIMS para caracterizar a morfologia dos agregados antes e depois do ensaio de desgaste MD em diferentes

tempos de execução (15; 30; 45; 60; 75; 90; 105; 180 e 210 min). Para avaliar a resistência dos agregados quanto ao desgaste, com tempo de degradação de 210 minutos, os autores aprimoraram um procedimento previamente desenvolvido por Mahmoud e Masad (2007). Os autores concluíram que, após 210 minutos de abrasão, polimento e quebra, o material não passa mais por alteração significativa na sua textura superficial, ou seja, atinge a degradação final. Observaram também que agregados com diferentes mineralogias apresentam diferentes resistências ao desgaste. Mahmoud, Perales e Beshears (2016) demonstraram a eficácia do aprimoramento desenvolvido por Ortiz e Mahmoud (2014) e complementaram a análise com um método experimental idealizado para medir propriedades de atrito de agregados através do teste MD além do uso do pêndulo britânico. Os citados autores recomendaram que em estudos futuros dados mineralógicos e petrográficos fossem inseridos para auxiliar na compreensão das propriedades superficiais dos agregados.

Alves (2014) avaliou a resistência à degradação física de agregados classificados com diferentes tipos litológicos: granito; gnaisse granítico e sienito/traquito. A resistência dos agregados foi analisada com base em imagens digitais obtidas com o uso do AIMS antes e após a execução dos ensaios de abrasão LA, impacto Treton e resistência ao esmagamento. Pôde-se identificar um melhor comportamento para os sienitos/traquitos devido à sua alta resistência mecânica, possivelmente relacionada à sua textura fina e ao processo de hidrotermalismo que essa rocha sofreu, com indício de que a matriz ficou recoberta por um filme carbonático que deve ter contribuído para aumentar a sua resistência.

Moaveni *et al.* (2014a) avaliaram a degradação do lastro usando o ensaio de abrasão LA juntamente com o PDI (E-UIAIA) para analisar os efeitos da quebra das partículas na composição granulométrica, assim como nas modificações nas propriedades de forma dos grãos. Moaveni *et al.* (2014b) avaliaram a resistência de agregados quanto à abrasão, polimento e quebra usando o MD. As propriedades de forma foram obtidas com o uso de dois sistemas de PDI: E-UIAIA e AIMS. Os dois sistemas se mostraram eficientes, mas geraram classificações diferentes para a textura superficial com relação à resistência ao desgaste. Essa diferença entre as classificações foi explicada através da definição do parâmetro textura superficial e do método de PDI utilizado. Moaveni *et al.* (2016) avaliaram a degradação de materiais utilizados em lastros ferroviários através da comparação entre materiais em serviço submetidos a diferentes níveis de tráfego e um material submetido ao ensaio de abrasão LA. Os citados autores consideram a técnica abrasiva válida para classificar e avaliar a tenacidade de diferentes fontes de agregados, mas reconhecem que esta não simula, totalmente, a degradação do lastro ferroviário e os danos potenciais ocorridos em campo.

Koohmishi e Palassi (2016) avaliaram os efeitos da mineralogia, o tamanho e a forma na resistência de agregados para lastro. Realizaram testes de carga pontual (Figura 3.6a) com agregados utilizados em lastros e provenientes de quatro tipos de rochas (basalto, marga, dolomita e traquito). Os autores concluíram que à medida que o tamanho dos agregados aumenta, o índice de força de carga pontual diminui; a influência do tamanho do agregado na força atuante é variável a partir da mineralogia da rocha explorada; a forma do agregado não tem efeito considerável sobre sua força pontual; agregados com quebra em três partículas atingiram maior força pontual em relação aos agregados com quebra em duas partes (padrão de falha dominante, Figura 3.6b).

Figura 3.6 – Ruptura de agregados utilizando o teste de carga pontual: a) partícula com forma pentaedro durante o teste de carga pontual e b) agregado de basalto após o teste com quebra em três partes



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Koohmishi e Palassi (2016).

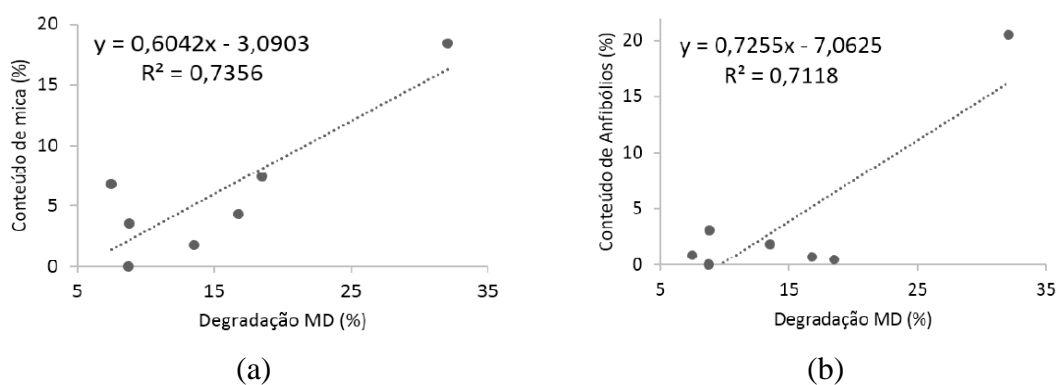
Remédio (2017) investigou as relações entre as propriedades físicas de rochas cristalinas e sua utilização como agregado para composição de lastro ferroviário. O autor avaliou as características de nove tipos de rochas cristalinas através das propriedades petrográficas e físicas em estado natural e suas evoluções por meio de ciclos de envelhecimento artificial (ciclagem de água, estufa e saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa). Esse autor realizou ensaios de compressão uniaxial, esmagamento, abrasão LA, impacto Treton e desgaste com o uso do MD. Dos materiais estudados, seis atenderam as recomendações das normas vigentes para lastro ferroviário, considerando os resultados obtidos nos ensaios complementares de alteração acelerada por saturação em água e secagem em estufa.

Guo e Jing (2017) analisaram a degradação do lastro ferroviário com utilização de imagens, geradas com o uso de scanner 3D, obtidas antes e depois da realização do teste de abrasão LA. Os materiais caracterizados, de 16 a 20 mm e 25 a 40 mm, foram identificados e digitalizados para registrar as características morfológicas iniciais. Em seguida, foram

degradados em laboratório e novamente digitalizados. Os resultados foram reportados a partir de parâmetros convencionalmente utilizados para avaliar o mecanismo de degradação do lastro: volume, área de superfície, profundidade máxima de abrasão e profundidade média de abrasão. Os autores concluíram que a abrasão gerou perda das quinas dos agregados, ou seja, alterou a angularidade dos mesmos. Além disso, comparando duas partículas de tamanhos diferentes, 16 a 20 mm e 25 a 40 mm, antes e após a degradação, observou-se a alteração na esfericidade em torno de 5,4% e 7,3%, respectivamente, ou seja, partículas de tamanhos maiores apresentaram maior degradação se comparadas às partículas de menor tamanho.

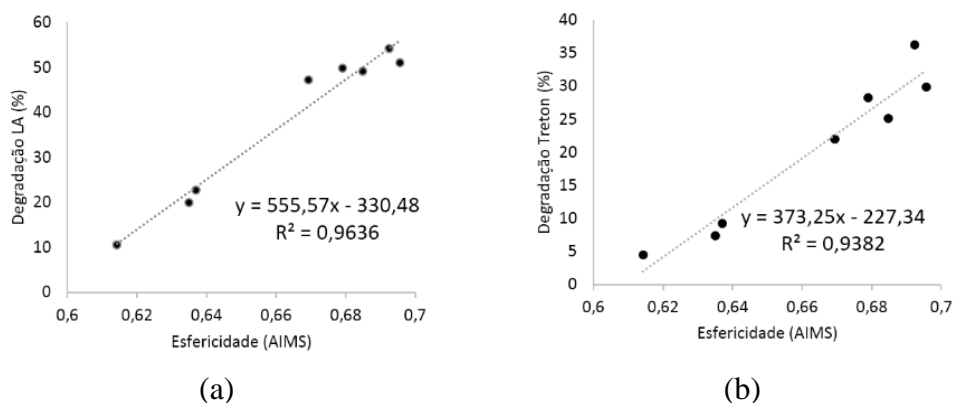
Para quantificar a degradação de agregados graúdos e avaliar as relações entre a morfologia das partículas e as características geológicas de três diferentes pedreiras, Trotta (2020) realizou ensaios de desgaste MD, abrasão LA, impacto Treton e resistência ao esmagamento, bem como caracterização morfológica das partículas com o uso do AIMS antes e após os ensaios de degradação. Para a análise da relação entre resistência das rochas e mineralogia, identificaram-se correlações fortes (superior a 0,70) com efeitos deletérios nas proporções de micas e anfibólios com relação ao ensaio de MD (Figuras 3.7a e 3.7b). Da mesma forma, estes minerais máficos contribuíram para reduzir a resistência à abrasão (LA) e ao impacto (Treton), porém com correlação mais fraca. Para a análise da relação entre resistência das rochas e morfologia das partículas, apenas a esfericidade se relacionou diretamente com os resultados dos ensaios LA e Treton (Figuras 3.8a e 3.8b). Com relação aos resultados do ensaio com o uso do MD a correlação dos mesmos com a morfologia foi considerada fraca (0,57), sendo este resultado justificado pelo mecanismo de degradação com aparecimento de fragmentos o que reflete na esfericidade das partículas.

Figura 3.7 – Correlação por regressão linear entre minerais e degradação pelo desgaste MD: a) micas e b) anfibólios



Fonte: Trotta (2020).

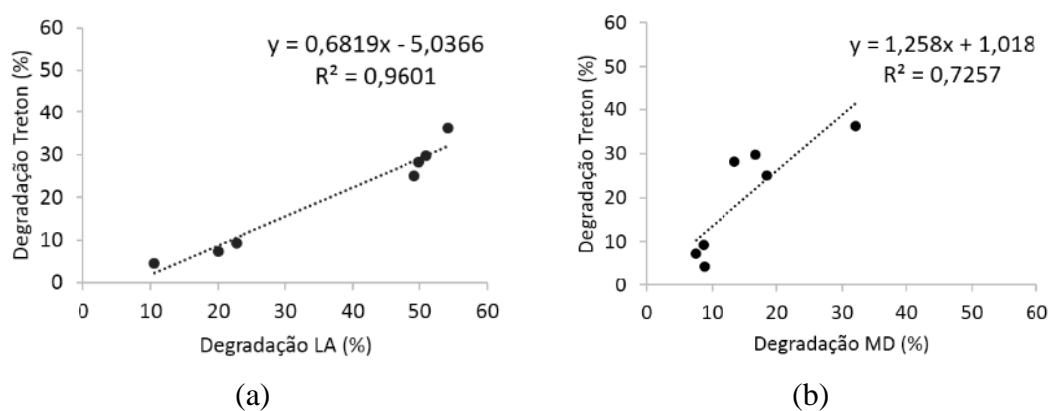
Figura 3.8 – Correlação por regressão linear entre resultados de ensaios de degradação e esfericidade: a) LA e b) Treton



Fonte: Trotta (2020).

Ainda sobre o estudo realizado por Trotta (2020), uma fase da pesquisa se concentrou em avaliar a existência de correlação entre os resultados dos diversos ensaios físicos. Os resultados mostraram que a influência da resistência é menor para o ensaio de MD em comparação aos ensaios LA e Treton, o que pode estar correlacionado ao tipo de mecanismo de degradação de cada ensaio. Pôde-se observar forte correlação (acima de 0,70) entre os resultados dos ensaios de abrasão LA e impacto Treton (Figura 3.9a), assim como entre os resultados oriundos dos ensaios de desgaste MD e impacto Treton (Figura 3.9b), embora estes provoquem mecanismos de degradação diferentes avaliam parâmetros semelhantes com relação à resistência das partículas.

Figura 3.9 – Correlação por regressão linear entre os ensaios de degradação: a) abrasão LA e impacto Treton e b) desgaste MD e impacto Treton



Fonte: Trotta (2020).

3.3 Materiais e Método

O estudo aqui descrito foi realizado com agregados produzidos em diferentes regiões do Brasil, constituídos por rochas que apresentam heterogeneidade composicional, textural e estrutural. Os materiais foram selecionados a partir de literaturas nacionais com aplicação de rochas para diversas áreas, como por exemplo, para rochas ornamentais, na construção civil, em obras ferroviárias e rodoviárias. Várias publicações de 2014 a 2020 foram inspecionadas e contabilizaram 21 rochas com caracterização petrográfica. A Tabela 3.2 fornece as classificações geológicas das rochas exploradas no presente estudo.

Tabela 3.2 – Classificação geológica das rochas

| Nº | Classificação Petrográfica | Rocha | Nº | Classificação Petrográfica | Rocha |
|----|-----------------------------------|-------|----|---|-------|
| 1 | Gnaiss migmatítico | M | 12 | Microgabro | I |
| 2 | Gnaiss | M | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | I |
| 3 | Gnaiss | M | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | I |
| 4 | Biotita gnaiss | M | 15 | Basalto | I |
| 5 | Nefelina-fonólito | I | 16 | Metacalcário | S |
| 6 | Nefelina-fonólito | I | 17 | Gnaiss migmatítico | M |
| 7 | Biotita-monzogranito/ tectonizado | I | 18 | Granito | I |
| 8 | Ortognaiss | M | 19 | Pegmatito Branco | I |
| 9 | Biotita gnaiss | M | 20 | Pegmatito Capuccino | I |
| 10 | Sienito e Traquito | I | 21 | Pegmatito Golden | I |
| 11 | Granito | I | | | |

Nota: M = Metamórfica; I = Ígnea e S = Sedimentar

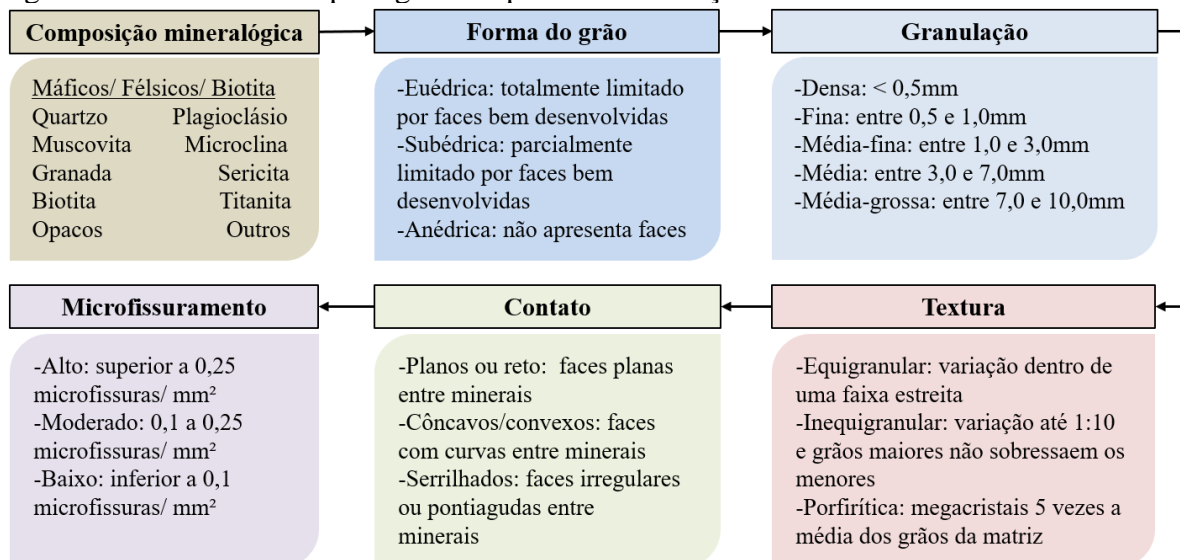
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para atingir os objetivos deste estudo, inicialmente, os materiais selecionados foram revisados quanto às características petrográficas das rochas de origem. Em seguida, foram verificados os ensaios físicos realizados de forma comum entre os materiais. Por fim, as características morfológicas, que incluem a angularidade, textura superficial e esfericidade dos agregados foram selecionadas através de um banco de dados de agregados analisados com o uso do Processamento Digital de Imagens (PDI) através do equipamento *Aggregate Imaging System* (AIMS). Este banco de dados foi obtido através das análises dos resultados dos ensaios realizados no AIMS pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC) e no AIMS pertencente à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), numa parceria da UFC o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

A análise petrográfica (caracterização microscópica extraída das literaturas nacionais) teve como base as orientações expressas por Meyer (2003). As variáveis qualitativas (Apêndice H) selecionadas foram forma do grão, granulação, textura e contato entre os minerais. Com relação às variáveis quantitativas (Apêndice H) foram selecionadas a mineralogia e o microfissuramento entre os minerais. A mineralogia foi subdividida em teor de

máficos, félsicos e biotita. As microfissuras foram analisadas e quantificadas de modo intergrãos não preenchidos. A Figura 3.10 apresenta os parâmetros petrográficos e as classificações para caracterização das rochas. Vale ressaltar que, para a obtenção de algumas variáveis da caracterização petrográfica, foi necessário analisar as fotomicrografias disponíveis nos documentos bibliográficos (Anexo A). As fotomicrografias foram avaliadas para identificar a classificação em maior percentual quando as variáveis qualitativas foram consideradas, essa sendo a mais representativa e utilizada na análise. Além disso, para materiais com caracterização heterogênea, com mais de uma lâmina, a média dos valores das lâminas caracterizadas quanto à composição mineralógica foi utilizada.

Figura 3.10 – Parâmetros petrográficos para caracterização das rochas



Fonte: Adaptado de Meyer (2003).

As pesquisas desenvolvidas na área de Geologia classificam alguns ensaios considerados físicos na área de Engenharia de Transporte Ferroviário como mecânicos, por exemplo o ensaio de resistência à compressão uniaxial. Contudo, a autora deste estudo considera que a caracterização mecânica deve contemplar variações de tensões e ciclos de carregamentos, como é o caso dos ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente, mas que não serão abordados aqui nesta pesquisa. Dessa forma, para as propriedades físicas (Apêndice I), foram selecionadas as variáveis de índices físicos (massa específica aparente, porosidade e absorção d'água) e de ensaios de degradação (abrasão LA, impacto Treton, desgaste MD em 105, 180 e 210 min, resistência ao esmagamento e resistência à compressão uniaxial) e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Para as propriedades morfológicas (Apêndice I), as variáveis selecionadas foram angularidade, textura superficial e esfericidade

na fase inicial do material, bem como antes e após a realização dos ensaios de degradação: LA, Treton, MD em três tempos de duração e esmagamento.

Diante dos materiais e variáveis selecionadas, as relações foram investigadas em três etapas:

1) Influência da petrografia no comportamento físico dos agregados: ramificada em três fases. A primeira com análise de tendência para as variáveis qualitativas petrográficas (análise gráfica visual). A segunda com análise de correlação entre as variáveis quantitativas mineralógicas e físicas e a terceira com análise de correlação para a mineralogia e microfissura de rochas com os índices físicos, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e resistência à compressão uniaxial dos agregados;

2) Influência da petrografia no comportamento morfológico de agregados: dividida em duas etapas. A primeira com análise de tendência para as variáveis qualitativas petrográficas (análise gráfica visual) e a segunda com análise de correlação entre as variáveis quantitativas mineralógicas e morfológicas;

3) Influência da propriedade física no comportamento morfológico dos agregados: inicialmente com análise de correlação entre os índices físicos e as variáveis morfológicas de origem de agregados. Em seguida, com análise de correlação entre os valores dos ensaios de degradação e seus respectivos valores das variáveis morfológicas depois dos ensaios. Por fim, com análise de correlação com as propriedades entre si.

As relações entre as propriedades multi escalas foram apresentadas em gráficos de colunas e nuvens de pontos para auxiliar na análise de tendências e correlações. As correlações entre as propriedades das rochas foram analisadas pelo método da regressão de mínimos quadrados. Foram aplicadas aproximações exponenciais, lineares, logarítmicas, polinomiais e de curva de potência, sendo a melhor equação de aproximação com maior coeficiente de determinação (R^2) determinada para cada regressão. Os valores de R^2 foram baseados no estudo de Witczack *et al.* (2002), Tabela 2.2, sendo adotado apenas os critérios bons ($0,70 \leq R^2 \leq 0,89$) e excelentes ($R^2 \geq 0,90$) para avaliar as relações entre as variáveis. Diante dos resultados obtidos, foram desenvolvidos três organogramas com as principais relações entre as propriedades e dois diagramas que auxiliam na tomada de decisões na seleção de agregados ainda em fase de projeto. Os resultados obtidos são apresentados e analisados a seguir.

3.4 Resultados e Discussões

Nesta seção, todos os resultados das relações entre as propriedades das rochas e dos agregados são listados em detalhes. Vale mencionar que a Rocha 18 (Granito) foi avaliada anteriormente quanto à influência das propriedades de forma dos agregados no comportamento físico e mecânico de lastro ferroviário pela autora deste estudo (DIÓGENES, 2016). A partir disso, a caracterização petrográfica microscópica desta rocha foi realizada e inserida ao banco de dados deste estudo (parceria com o Laboratório de Microscopia Eletrônica-UFC). Em relação à petrografia, a Tabela 3.3 apresenta a composição mineralógica da Rocha 18 para as duas lâminas avaliadas.

Tabela 3.3 – Composição mineralógica da Rocha 18

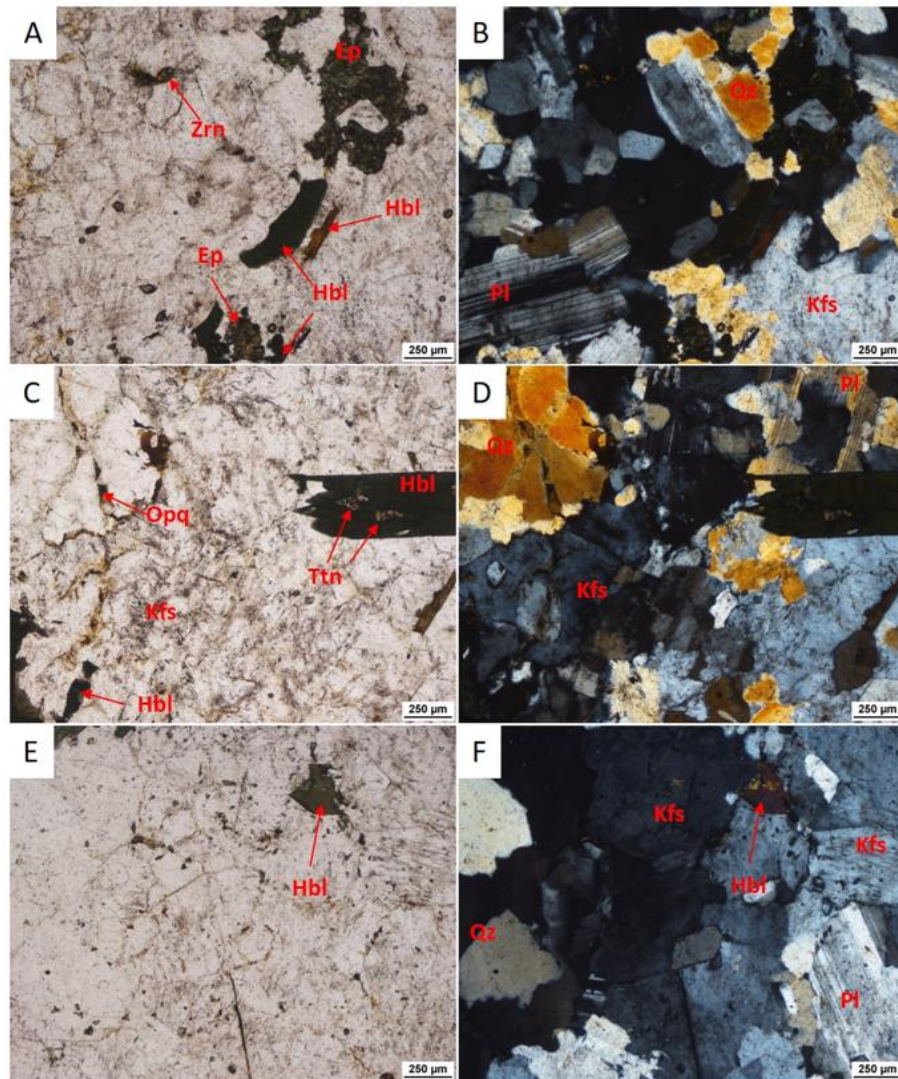
| Composição mineralógica | Lâmina 1 (%) | Composição mineralógica | Lâmina 2 (%) |
|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| Feldspato Potássico (Kfs) | 39 | Feldspato Potássico (Kfs) | 38 |
| Plagioclásio (Pl) | 28 | Plagioclásio (Pl) | 30 |
| Quartzo (Qz) | 20 | Quartzo (Qz) | 17 |
| Anfibólio (Hbl) | 8 | Anfibólio (Hbl) | 10 |
| Epidoto (Ep) | 5 | Titanita (Ttn) | Traço |
| Mineral Opaco (Opq) | Traço | Zircão (Zrn) | Traço |
| Titanita (Ttn) | Traço | - | - |
| Zircão (Zrn) | Traço | - | - |
| Total de máficos | 87,5 | Total de máficos | 87,0 |
| Total de félsicos | 12,5 | Total de félsicos | 13,0 |

Nota: Traço significa percentual inferior a 1%

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Rocha 18 Lâmina 1 (Figura 3.11), analisada em seção delgada, apresenta estrutura compacta, maciça e textura inequigranular, com granulometria variando entre 0,1 a 0,8 mm, com média entre 0,3 a 0,5 mm. Em mineralogia, a amostra exibe cristais de feldspato potássico, plagioclásio, quartzo, anfibólio (hornblenda), epidoto, titanita, zircão e opacos. Os minerais em sua maioria apresentam contatos do tipo serrilhados (80%), seguidos de côncavo-convexo (18%) e planos (2%). Em relação ao grau de alteração dos minerais, os cristais de anfibólio, feldspato potássico e plagioclásio apresentam de ausente a baixo grau e os cristais de quartzo não apresentam alteração (ausente). É uma rocha que exibe baixa quantidade de microfraturas e microfissuras, em sua maioria são fechadas e pequenas. A densidade de microfissuras varia para algumas zonas da lâmina, sendo em média 0,2 microfissura/mm² do tipo intragrão a 0,05 microfissura/mm² do tipo intergrão. O tamanho das microfissuras apresenta média de 0,2 mm. Em algumas microfraturas presentes em seção delgada são observadas algumas zonas oxidadas, derivadas de produtos de alteração provavelmente do anfibólio.

Figura 3.11 – Fotomicrografias da Rocha 18 Lâmina 1 com objetivas utilizadas: 5x (250µm): a esquerda luz natural e a direita nicóis cruzados.

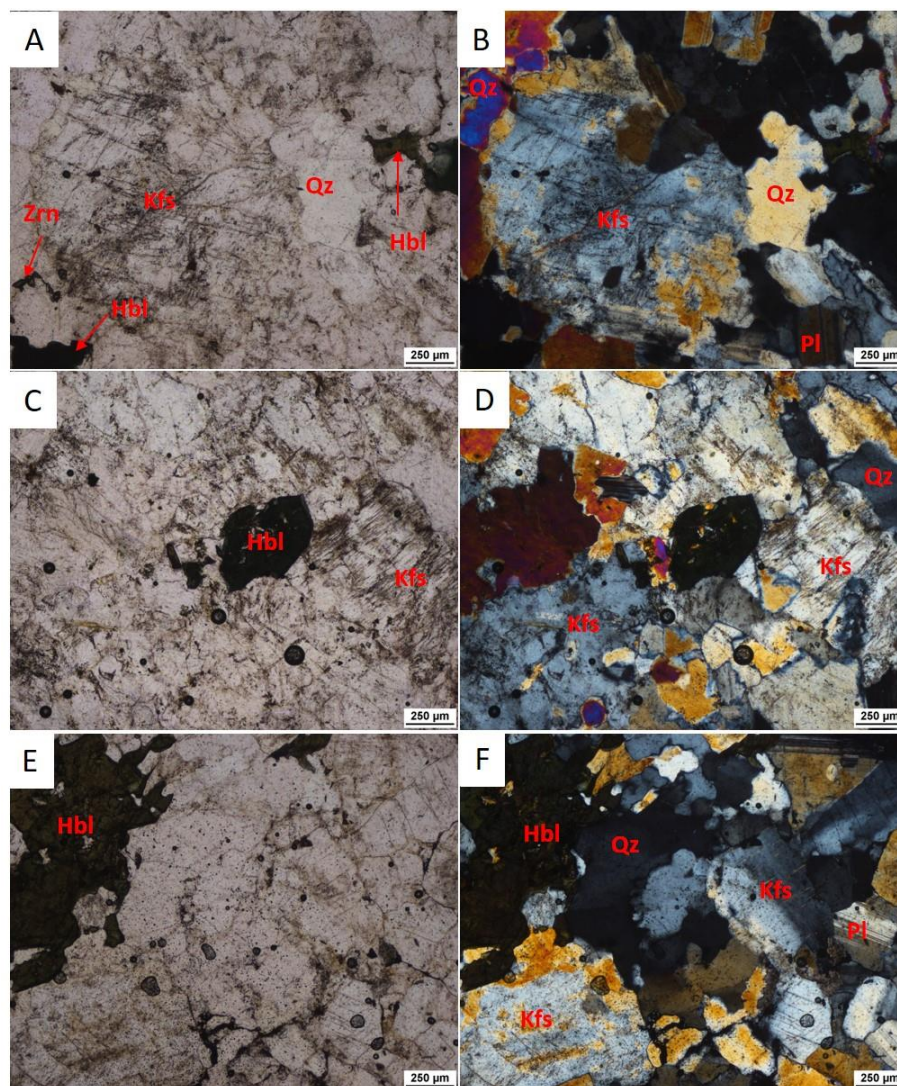


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Rocha 18 Lâmina 2, analisada em seção delgada, apresenta estrutura compacta, maciça e textura inequigranular, com granulometria variando entre 0,05 a 1,0 mm, com média entre 0,2 a 0,5 mm. Em mineralogia, a rocha exhibe cristais de feldspato potássico, plagioclásio, quartzo, anfibólio (hornblenda), zircão e titanita. Os minerais em sua maioria apresentam contatos do tipo serrilhados (70%), seguidos de côncavo-convexo (24%) e planos (6%). Em relação ao grau de alteração dos minerais, os cristais de anfibólio, feldspato potássico e plagioclásio apresentam baixo grau e os cristais de quartzo não apresentam alteração (ausente). É uma rocha que exhibe baixa quantidade de microfraturas e microfissuras, em sua maioria são fechadas e pequenas. A densidade de microfissuras varia para algumas zonas da lâmina, sendo em média 0,5 microfissura/mm² do tipo intragrão, principalmente em cristais de feldspato

potássico, e 0,07 microfissura/mm² do tipo intergrão. O tamanho das microfissuras apresenta média de 0,5 mm. Em algumas microfissuras presentes em seção delgada são observadas algumas zonas oxidadas, derivadas de produtos de alteração provavelmente do anfibólio.

Figura 3.12 – Fotomicrografias da Rocha 18 Lâmina 2 com objetivas utilizadas: 5x (250µm): a esquerda luz natural e a direita nicóis cruzados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Os resultados das relações entre as propriedades das rochas e dos agregados estão apresentados em três etapas a seguir. Primeiramente, a influência das características petrográficas no comportamento físico é analisada. Em segundo, é apresentada a influência das características petrográficas no comportamento morfológico dos agregados. Por fim, é analisada a influência das propriedades físicas na morfologia dos agregados, sendo também investigadas as tendências destas propriedades entre si. Ressalta-se que, para a realização das

análises, vários gráficos foram construídos, sendo apresentados os principais, porém os debates aqui descritos consideram todas as análises efetuadas.

3.4.1 Influência das características petrográficas no comportamento físico

A avaliação da influência da petrografia no comportamento físico dos agregados foi subdividida em três fases. Na Fase 1 foram construídos gráficos entre a mineralogia e os ensaios de degradação para identificar tendências visuais quanto às variáveis qualitativas: forma do grão, granulação, textura e contato entre os minerais. A Tabela 3.4 apresenta características das rochas utilizadas nesta fase do estudo.

Tabela 3.4 – Características petrográficas das rochas e físicas dos agregados (Fases 1 e 2)

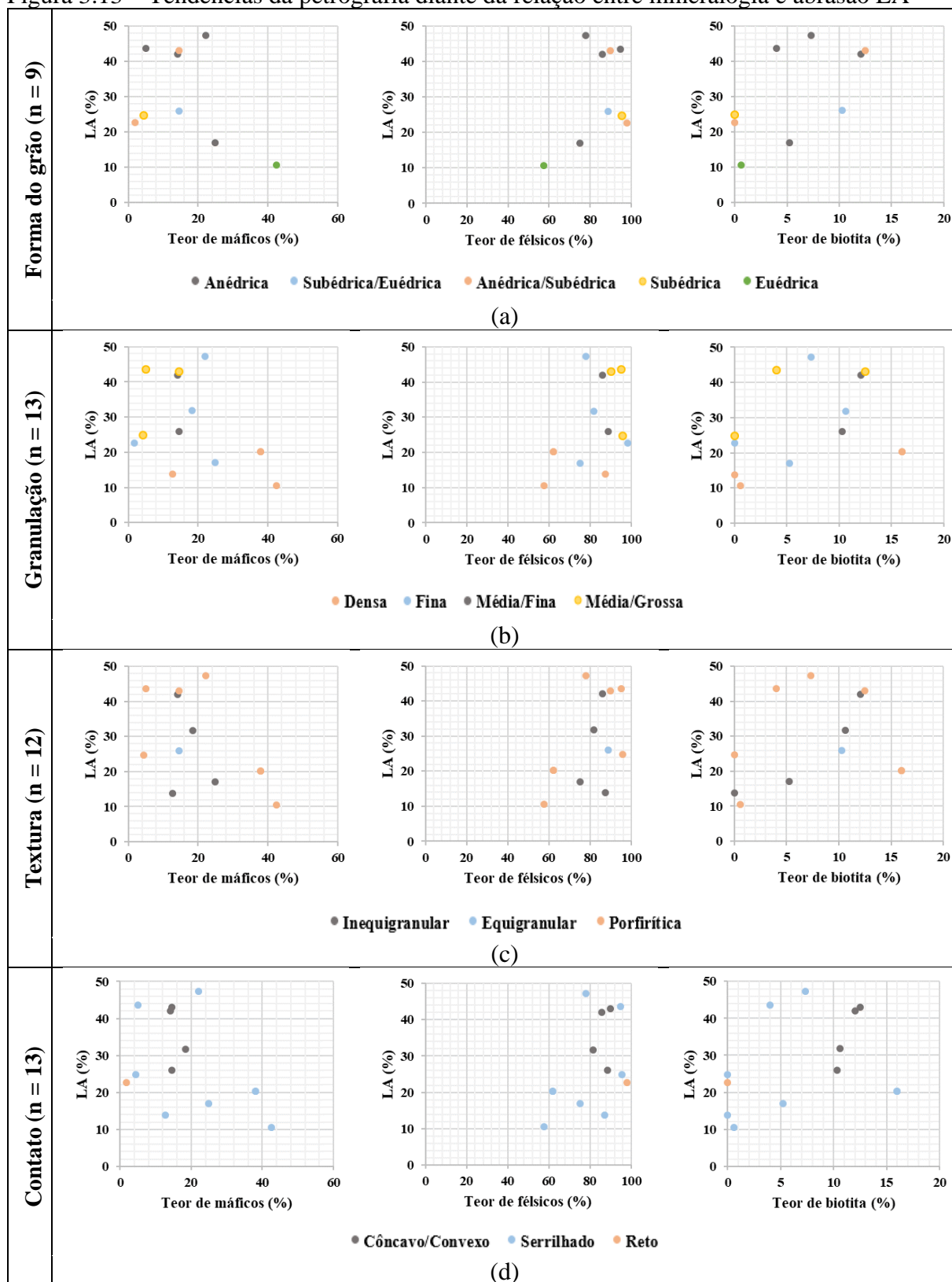
| Rochas | Forma do grão | Granulação | Textura | Contato | M (%) | F (%) | B (%) | LA (%) | T (%) | MD 105 min (%) | MD 180 min (%) | MD 210 min (%) | E (%) | C (MPa) |
|--------|--------------------|--------------|----------------|-----------------|-------|-------|-------|--------|-------|----------------|----------------|----------------|-------|---------|
| 1 | Anédrica | Média/Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 14,1 | 85,9 | 12,1 | 42,0 | 19,0 | - | - | - | - | - |
| 2 | Subédrica/Euédrica | Média/Fina | Equigranular | Côncavo/Convexo | 14,6 | 88,7 | 10,3 | 26,0 | 13,0 | - | - | - | - | - |
| 3 | Anédrica | Fina | Inequigranular | Serrilhado | 24,9 | 75,1 | 5,3 | 17,0 | 9,0 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 20,6 | 78,3 | 15,4 | | 5,0 | 9,8 | 14,4 | 19,6 | - | - |
| 5 | - | Densa | Porfírica | Serrilhado | 38,0 | 62,0 | 16,0 | 20,3 | 10,9 | 4,8 | 5,7 | 6,2 | - | - |
| 6 | - | Densa | Porfírica | Serrilhado | 38,0 | 62,0 | 16,0 | 20,3 | 5,4 | 5,8 | 8,6 | 9,7 | - | - |
| 7 | - | Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 18,4 | 81,6 | 10,6 | 31,8 | 9,2 | 9,0 | 13,3 | 14,1 | - | - |
| 8 | - | Fina | Inequigranular | Serrilhado | 19,3 | 80,7 | 14,3 | | 8,6 | 11,3 | 15,0 | 14,1 | - | - |
| 9 | Anédrica/Subédrica | Média/Grossa | Porfírica | Côncavo/Convexo | 14,5 | 90,0 | 12,5 | 43,0 | 16,9 | - | - | - | 30,5 | - |
| 10 | Subédrica | Média/Grossa | Porfírica | Serrilhado | 4,3 | 95,7 | 0,0 | 24,8 | 12,2 | - | - | - | 21,6 | - |
| 11 | Anédrica | Média/Grossa | Porfírica | Serrilhado | 5,0 | 95,0 | 4,0 | 43,6 | 18,9 | - | - | - | 31,8 | - |
| 12 | - | Fina | Equigranular | Reto | 52,0 | 48,0 | 1,0 | - | - | - | - | - | - | 196,0 |
| 13 | - | Média/Grossa | Porfírica | Côncavo/Convexo | 16,5 | 83,5 | 4,0 | - | - | - | - | - | - | 137,0 |
| 14 | - | Média/Grossa | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 7,0 | 93,0 | 1,5 | - | - | - | - | - | - | 135,0 |
| 15 | Euédrica | Densa | Porfírica | Serrilhado | 42,5 | 57,5 | 0,59 | 10,6 | 4,4 | - | - | - | 12,2 | |
| 16 | Anédrica/Subédrica | Fina | - | Reto | 1,8 | 98,2 | 0,0 | 22,7 | 9,3 | - | - | - | 22,6 | - |
| 17 | Anédrica | Fina | Porfírica | Serrilhado | 22,1 | 77,9 | 7,31 | 47,3 | 21,9 | - | - | - | 31,7 | - |
| 18 | - | Densa | Inequigranular | Serrilhado | 12,8 | 87,3 | 0,0 | 13,8 | 7,3 | - | - | - | - | - |
| 19 | Subédrica/Euédrica | Média/Grossa | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 2,0 | 98,0 | 1,0 | - | - | - | - | - | - | 55,7 |
| 20 | Anédrica/Subédrica | Média/Grossa | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 1,0 | 99,0 | 0,0 | - | - | - | - | - | - | 124,8 |
| 21 | Subédrica/Euédrica | Média/Grossa | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 1,0 | 99,0 | 0,0 | - | - | - | - | - | - | 140,3 |

Nota: M = Máficos; F = Félsicos; B = Biotita; LA = Los Angeles; T = Treton; MD = Micro Deval; E = Esmagamento e C = Compressão uniaxial

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

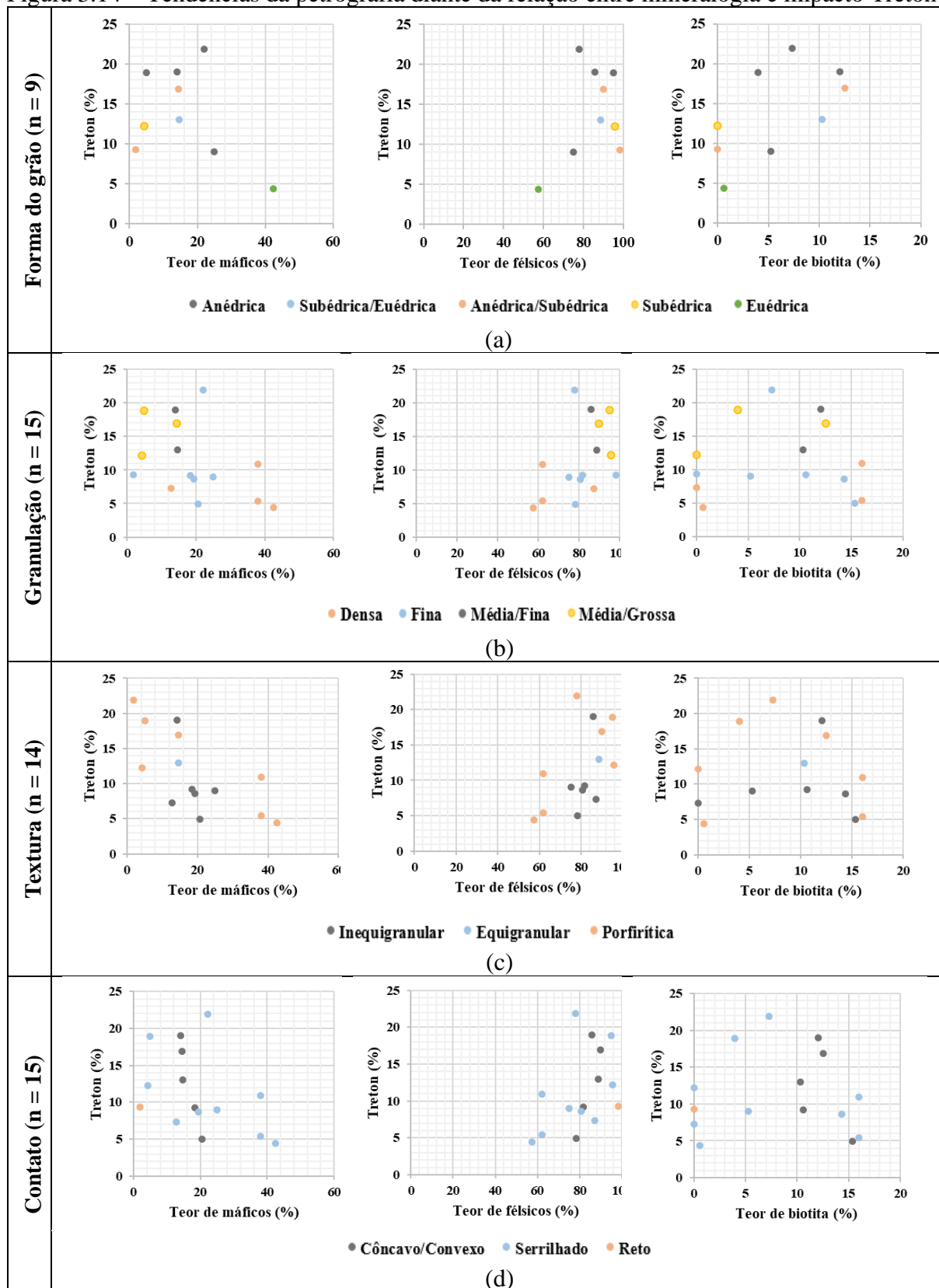
As Figuras de 3.13 a 3.15 apresentam as tendências entre as variáveis teor de máficos, félsicos e biotita com os ensaios, respectivamente, abrasão LA, impacto Treton e resistência ao esmagamento. Os resultados mostraram que as rochas com forma do grão anédrica ou anédrica/subédrica têm tendência a apresentarem maior degradação (LA: superior a 40%; Treton: superior a 15%; Esmagamento: superior a 30%). O contrário foi visto para a forma do grão euédrica (material 15). Acredita-se que o elevado percentual de minerais máficos (42,5%) contribuiu na resistência à degradação. Foi observada, também, uma tendência de maior degradação em rochas de granulação mais grossa (média/fina; média/grossa). Para as rochas com granulação densa ou fina, a resistência à degradação é maior pelo fato da estrutura mineral proporcionar um imbricamento mais intenso em relação aos demais tipos de granulação. As rochas com textura inequigranular ou porfirítica e contato côncavo/convexo ou serrilhado entre os minerais também apresentaram uma maior resistência à degradação. Nos três ensaios de degradação, o material 17 apresentou granulação fina com elevada degradação, o que pode ser influência do baixo teor de máficos e forma do grão anédrica no mesmo, embora este tenha apresentado textura porfirítica e contato serrilhado. Acredita-se, também, que o elevado percentual do mineral quartzo (28,41%) foi determinante na obtenção de baixos valores de resistência à degradação.

Figura 3.13 – Tendências da petrografia diante da relação entre mineralogia e abrasão LA



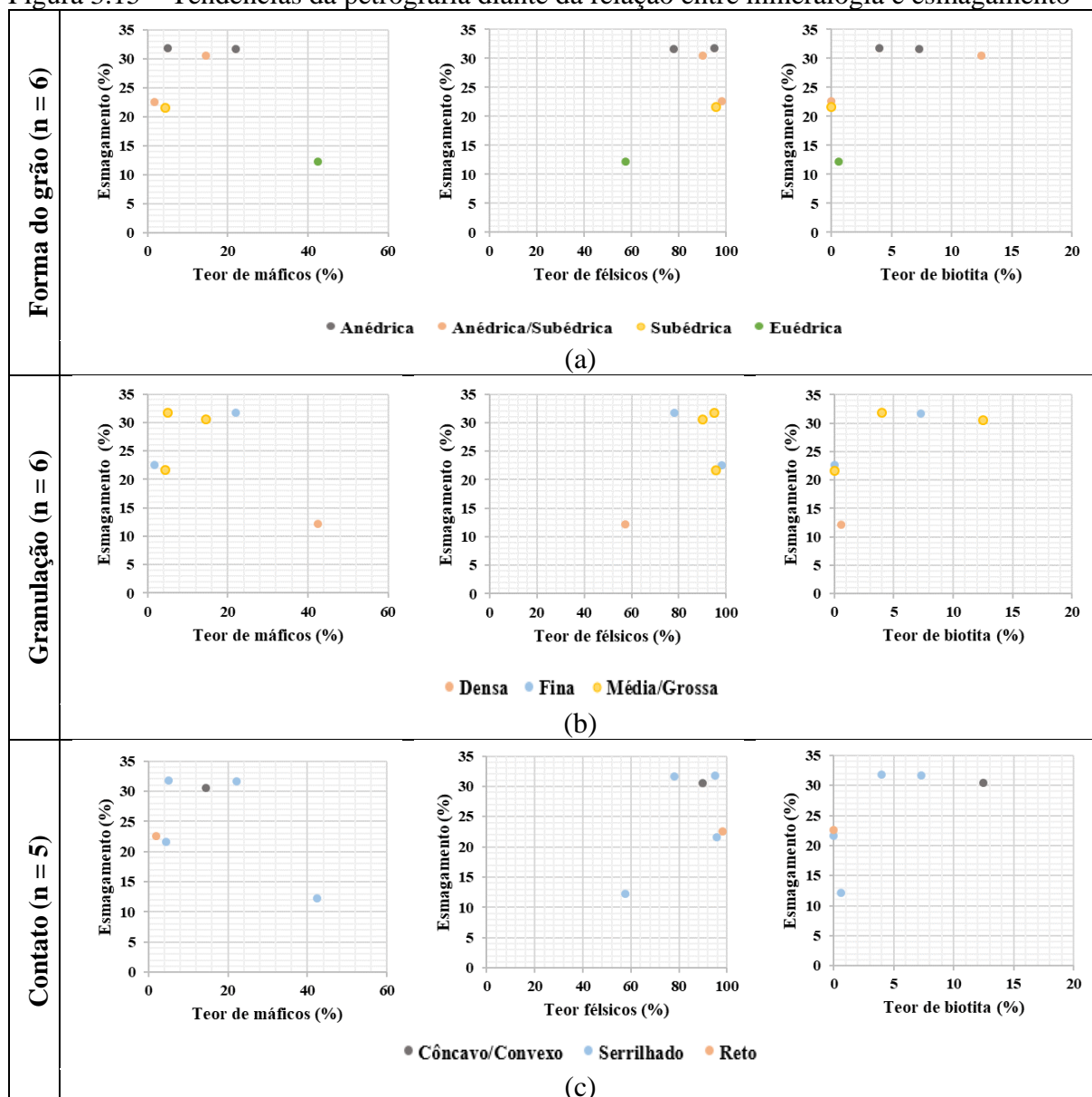
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 3.14 – Tendências da petrografia diante da relação entre mineralogia e impacto Treton



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 3.15 – Tendências da petrografia diante da relação entre mineralogia e esmagamento



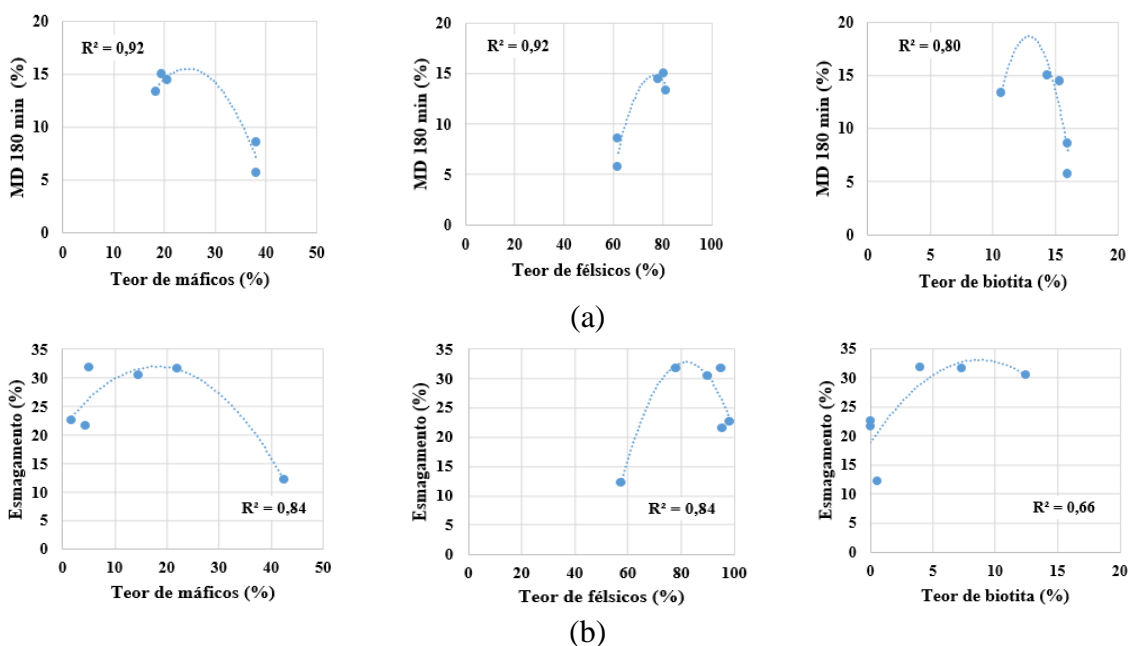
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As análises quanto aos ensaios de resistência à compressão uniaxial ($n = 6$) e desgaste MD ($n = 5$) para diferentes durações dos ensaios apresentaram tendências similares aquelas encontradas para os ensaios de degradação apresentados anteriormente. A resistência à compressão uniaxial de um material mostrou maior valor para a condição de granulação fina (200MPa), mesmo com textura equigranular e contato reto, porém com maior teor de máficos (52%). Acredita-se que o teor de félsicos como plagioclásio e quartzo, respectivamente 34% e 29%, no material 19 foi um fator que determinou a baixa resistência à compressão uniaxial. As análises de desgaste MD nos tempos de 105, 180 e 210 min apresentaram resultados similares, sendo intensificada a degradação com o aumento da duração do ensaio. As rochas de granulação densa, textura porfirítica e contato serrilhado apresentaram menor desgaste se comparadas às

rochas de granulação fina, que apresentaram textura inequigranular e contato côncavo/convexo ou serrilhado.

Seguindo com as análises realizadas, a Fase 2 apresenta a avaliação da influência das características petrográficas no comportamento degradativo dos agregados através de correlações entre as variáveis quantitativas (Tabela 3.4). As variáveis foram confrontadas com o intuito de investigar a correlação, eventualmente, existente através do indicativo de $R^2 \geq 0,70$ (WITCZACK *et al.*, 2002). Os valores de teor de máficos, félsicos e biotita foram relacionadas com os valores dos ensaios: abrasão LA, impacto Treton, desgaste MD, resistência ao esmagamento e a compressão uniaxial. Os resultados mostram a existência de correlações apenas nos resultados dos ensaios físicos de MD e esmagamento através da regressão quadrática. A Figura 3.16 ilustra algumas das correlações entre as variáveis analisadas. O valor esperado de MD (105, 180 e 210 min) mostrou funções polinomiais de 2º grau com o teor de máficos, félsicos e biotita com valores de R^2 entre 80% e 92% (Figura 3.16a), exceto na relação entre teor de biotita e desgaste MD com duração de 210 min (inferior a 40%). Quanto ao valor esperado de esmagamento (Figura 3.16b), as variáveis teor de máficos e félsicos também mostraram a existência de correlação (ambas 84%), em contrapartida o teor de biotita não apresentou correlação muito elevada (66%). Para ambos os ensaios de degradação, o aumento no teor de máficos foi benéfico para resistência à degradação, porém o inverso foi identificado para o teor de félsicos.

Figura 3.16 – Linhas de tendência polinomial de segunda ordem entre mineralogia e ensaios físicos: a) MD 180 min (n = 5) e b) esmagamento (n = 6)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Por fim, Fase 3, foram efetuadas as correlações entre as variáveis mineralógicas e os microfissuramentos intergrãos não preenchidos de rochas com os índices físicos, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e resistência à compressão uniaxial dos agregados. A Tabela 3.5 apresenta as características das rochas analisadas nesta fase do estudo.

Tabela 3.5 – Características petrográficas das rochas e físicas dos agregados (Fase 3)

| Rochas | Forma do grão | Granulação | Textura | Contatos | M (%) | B (%) | Mi (mm ²) | ρ (g/cm ³) | P (%) | A (%) | V (m/s) | C (MPa) |
|--------|--------------------|--------------|----------------|-----------------|-------|-------|-----------------------|-----------------------------|-------|-------|---------|---------|
| 1 | Anédrica | Média/Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 14,1 | 12,1 | - | 2,741 | 1,08 | 0,39 | - | - |
| 2 | Subédrica/Euédrica | Média/Fina | Equigranular | Côncavo/Convexo | 14,6 | 10,3 | - | 2,669 | 0,81 | 0,30 | - | - |
| 3 | Anédrica | Fina | Inequigranular | Serrilhado | 24,9 | 5,3 | - | 2,793 | 0,71 | 0,25 | - | - |
| 4 | - | Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 20,6 | 15,4 | - | - | - | - | - | - |
| 5 | - | Densa | Porfírica | Serrilhado | 38,0 | 16,0 | - | 2,394 | - | 1,05 | - | - |
| 6 | - | Densa | Porfírica | Serrilhado | 38,0 | 16,0 | - | 2,394 | - | 1,05 | - | - |
| 7 | - | Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 18,4 | 10,6 | - | 2,656 | - | 0,75 | - | - |
| 8 | - | Fina | Inequigranular | Serrilhado | 19,3 | 14,3 | - | - | - | - | - | - |
| 9 | Anédrica/Subédrica | Média/Grossa | Porfírica | Côncavo/Convexo | 14,5 | 12,5 | - | - | - | - | - | - |
| 10 | Subédrica | Média/Grossa | Porfírica | Serrilhado | 4,3 | 0,0 | - | - | - | - | - | - |
| 11 | Anédrica | Média/Grossa | Porfírica | Serrilhado | 5,0 | 4,0 | - | - | - | - | - | - |
| 12 | - | Fina | Equigranular | Reto | 52,0 | 1,0 | 0,13 | 3,103 | 0,26 | 0,08 | 6189 | 196,0 |
| 13 | - | Média/Grossa | Porfírica | Côncavo/Convexo | 16,5 | 4,0 | 0,18 | 2,712 | 0,73 | 0,27 | 4161 | 137,0 |
| 14 | - | Média/Grossa | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 7,0 | 1,5 | 0,56 | 2,649 | 0,80 | 0,30 | 3693 | 135,0 |
| 15 | Euédrica | Densa | Porfírica | Serrilhado | 42,5 | 0,6 | - | 2,920 | 2,51 | 0,86 | - | - |
| 16 | Anédrica/Subédrica | Fina | - | Reto | 1,8 | 0,0 | - | 2,740 | 2,22 | 0,81 | - | - |
| 17 | Anédrica | Fina | Porfírica | Serrilhado | 22,1 | 7,3 | - | 2,660 | 1,56 | 0,59 | - | - |
| 18 | - | Densa | Inequigranular | Serrilhado | 12,8 | 0,0 | 0,06 | 2,597 | 1,90 | 0,70 | - | - |
| 19 | Subédrica/Euédrica | Média/Grossa | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 2,0 | 1,0 | 0,63 | 2,617 | 1,45 | 0,56 | 2939 | 55,7 |
| 20 | Anédrica/Subédrica | Média/Grossa | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 1,0 | 0,0 | 1,11 | 2,636 | 0,84 | 0,32 | 4223 | 124,8 |
| 21 | Subédrica/Euédrica | Média/Grossa | Inequigranular | Côncavo/Convexo | 1,0 | 0,0 | 1,06 | 2,639 | 0,81 | 0,31 | 4875 | 140,3 |

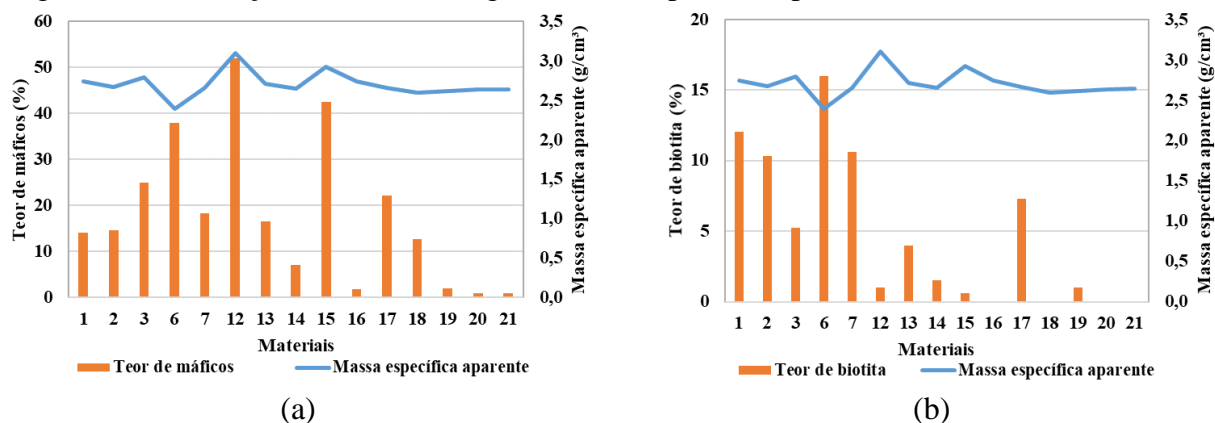
Nota: M = Máficos; B = Biotita; Mi = Microfissuramento intergrão não preenchido; ρ = Massa específica aparente; P = Porosidade; A = Absorção d'água; V = Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e C = Compressão uniaxial

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

As Figuras 3.17 e 3.18 ilustram as relações entre a mineralogia e os índices físicos. Os resultados dos ensaios de massa específica com os teores de máficos e biotita estão apresentados nas Figuras 3.17a e 3.17b. Os materiais 12 e 15 (Figura 3.17a) se destacaram com maiores valores de massa específica e teor de máficos. Em contrapartida, o material 6 (rocha vulcânica fonólito) com 38% de máficos apresentou a menor massa específica (2,394 g/m³). Nos materiais 12, 13 e 14 foi possível identificar a tendência de queda no valor da massa

específica com a redução do teor de máficos, ou seja, uma relação diretamente proporcional. Outros materiais (16, 19, 20 e 21), com teores de máficos inferiores a 5%, mostraram um valor de massa específica aparente intermediário. A Figura 3.17b mostra, também, uma aleatoriedade dos valores, o que remete a inexistência de correlação entre as variáveis teor de biotita e massa específica aparente. Os resultados indicam que a massa específica aparente é substancialmente diferente entre as rochas e que esta remete à natureza composicional e à heterogeneidade textural dos materiais.

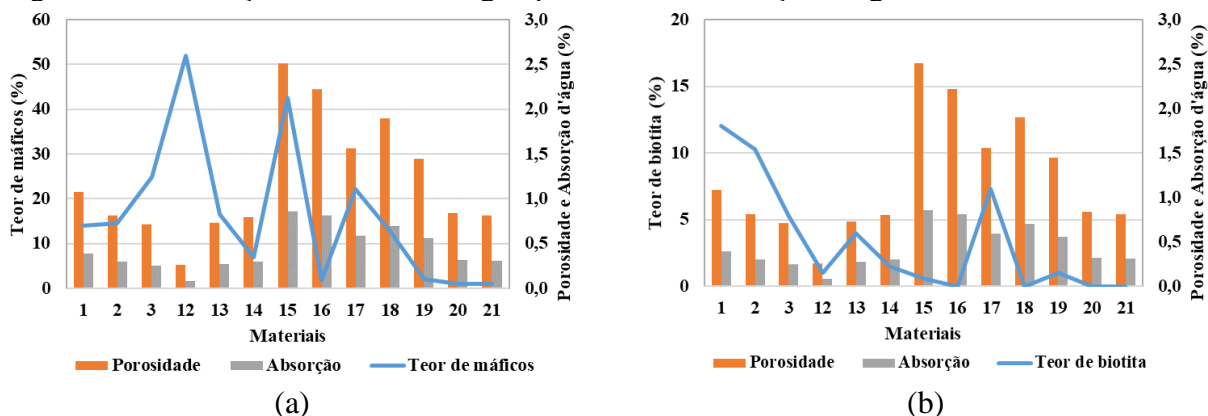
Figura 3.17 – Relação entre mineralogia e massa específica aparente



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a relação entre teor de minerais, porosidade e absorção d'água, os quatro primeiros materiais (Figura 3.18a) mostraram uma relação inversamente proporcional, ou seja, ocorreu perda de porosidade e absorção d'água com o aumento do teor de máficos. Porém, nos quatro últimos materiais esta relação foi direta. Quanto ao teor de biotita (Figura 3.18b), foi identificada uma relação direta para os oito materiais anteriormente mencionados. De posse das variáveis petrográficas qualitativas (Tabela 3.5), foi observada uma tendência de maior porosidade para as rochas com granulação densa ou fina (15, 16, 17 e 18). No entanto, também ocorreram algumas contradições, por exemplo, nos materiais 3 e 12. Este fato, assim como na massa específica aparente, está relacionado às características petrográficas e mineralógicas da rocha, além de outros fatores intrínsecos de cada tipo de material estudado.

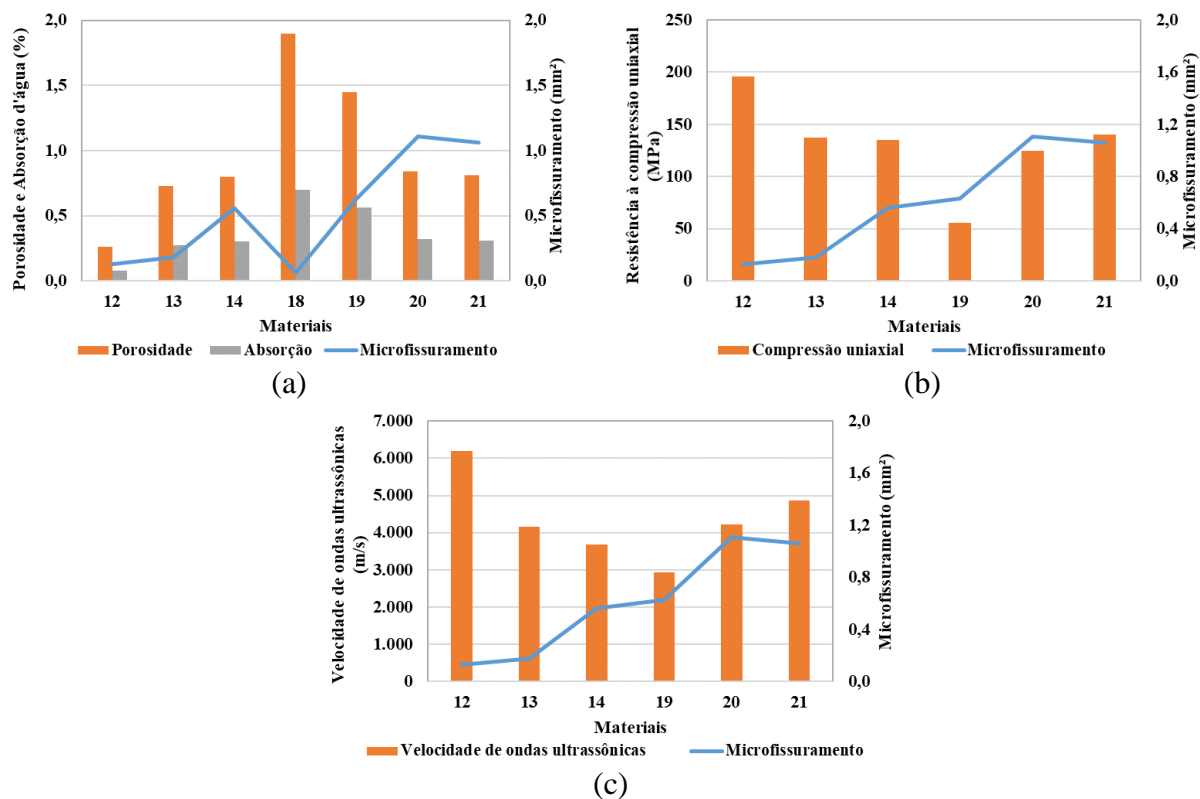
Figura 3.18 – Relação entre mineralogia, porosidade e absorção d'água



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na última análise de tendências entre a petrografia e comportamento físico, foi avaliada a influência do microfissuramento mineral no comportamento físico com as variáveis: porosidade, absorção d'água, resistência à compressão uniaxial e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Para as variáveis porosidade, absorção d'água e microfissuramento (Figura 3.19a) foi identificada uma tendência de relação direta, ainda que o material 18 exiba um comportamento diferente. O que sugere a influência da granulação da rocha (Tabela 3.5) no microfissuramento mineral. Os materiais 12 e 18 foram classificados com granulação fina e densa, respectivamente, ou seja, com maior imbricamento mineral, o que pode justificar o baixo grau de fissuras. Os demais materiais apresentaram granulação média/grossa (interface mineral mais frouxa), maior valor de microfissuramento e consequentemente, maiores valores nos índices físicos, porosidade e absorção d'água. Os dados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas das rochas também foram relacionados com valores de microfissuras, respectivamente, nas Figuras 3.19b e 3.19c. Em ambas as relações foram observadas tendências de relação inversa para os quatro primeiros materiais. O material 12 (granulação fina) foi destaque com maior resistência e velocidade diante de menor área de microfissuras, bem como menor percentual de porosidade.

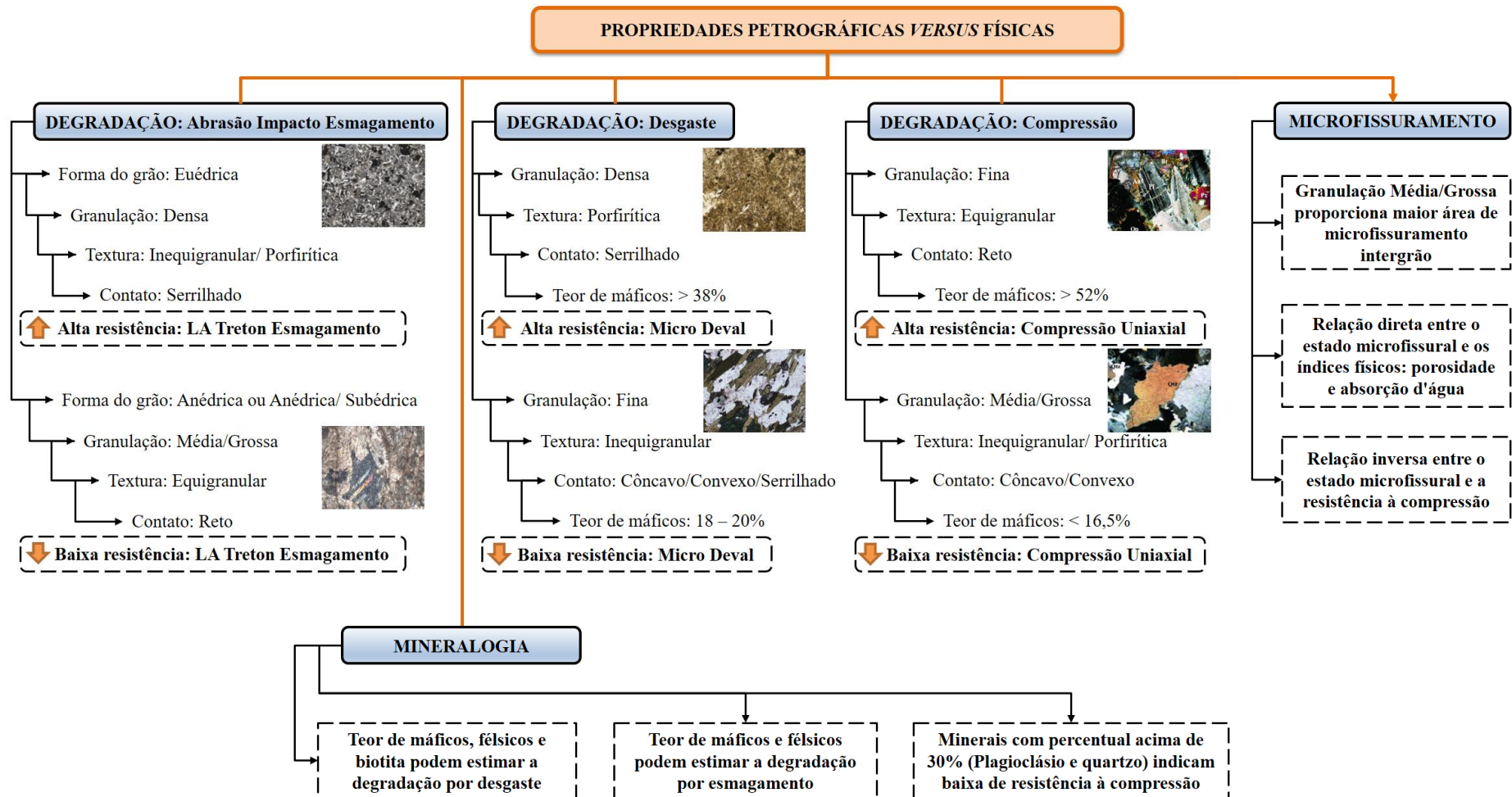
Figura 3.19 – Relação entre porosidade, absorção d'água, resistência à compressão uniaxial e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas com microfissuramento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Por fim, a Figura 3.20 apresenta um organograma com as principais relações obtidas entre as propriedades petrográficas e físicas de agregados.

Figura 3.20 – Organograma com as principais relações obtidas entre propriedades petrográficas e físicas de agregados



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.4.2 Influência das características petrográficas no comportamento morfológico

A influência das características petrográficas no comportamento morfológico dos agregados (propriedades de forma: angularidade, textura superficial e esfericidade) foi analisada em duas etapas: i) relação das propriedades petrográficas com os parâmetros morfológicos de modo a identificar tendências quanto às variáveis petrográficas qualitativas (forma do grão, granulação, textura e contato entre os minerais) e ii) correlação entre as variáveis quantitativas mineralógicas e morfológicas. No geral, as tendências e correlações foram analisadas por gráficos de nuvem de pontos, de forma semelhante ao apresentado na seção 3.4.1, Fases 1 e 2. Para facilitar as análises das tendências de forma do grão, granulação, textura e contato entre minerais, as faixas de classificação das propriedades de forma de agregados foram demarcadas de acordo com o sistema proposto por Ibiapina (2018), sistema de classificação de propriedades de forma de agregados customizado por um banco de agregados brasileiros.

3.4.2.1 Tendências entre petrografia e morfologia: Etapa 1

A Etapa 1 foi constituída pela relação entre as variáveis mineralógicas, forma do grão, granulação, textura e contato com as propriedades de forma de agregados de origem (materiais passantes pelos processos de britagem) e as propriedades de forma de agregados caracterizados antes e depois da realização dos ensaios de degradação: LA, Treton, MD (105, 180 e 210 min) e esmagamento. Com isso, muitos gráficos foram construídos para as análises de tendência, sendo expostos apenas os de maior relevância. As análises quanto ao teor de félsicos não foram apresentadas por esta ser uma variável de percentual complementar, o que resulta em tendências inversas ao teor de máficos. A Tabela 3.6 exemplifica parte das variáveis das características das rochas e das propriedades de forma de origem dos agregados, totalizando 12 materiais, porém com algumas lacunas nas variáveis qualitativas petrográficas.

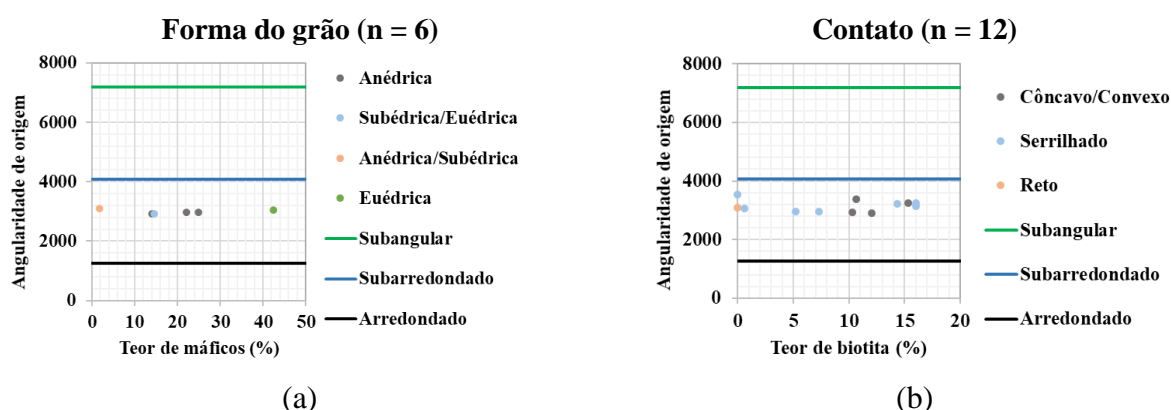
Tabela 3.6 – Características petrográficas das rochas e morfológicas de origem dos agregados

| Rochas | M (%) | F (%) | B (%) | Angularidade de origem | Textura superficial de origem | Esfericidade de origem | Forma do cristal | Granulação | Textura | Contato |
|--------|-------|-------|-------|------------------------|-------------------------------|------------------------|--------------------|------------|----------------|-----------------|
| 1 | 14,1 | 85,9 | 12,1 | 2.912,54 | 506,45 | 0,66 | Anédrica | Média/Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo |
| 2 | 14,6 | 88,7 | 10,3 | 2.927,19 | 457,84 | 0,66 | Subédrica/Euédrica | Média/Fina | Equigranular | Côncavo/Convexo |
| 3 | 24,9 | 75,1 | 5,3 | 2.959,98 | 707,63 | 0,62 | Anédrica | Fina | Inequigranular | Serrilhado |
| 4 | 20,6 | 78,3 | 15,4 | 3.260,27 | 440,42 | 0,73 | - | Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo |
| 5 | 38,0 | 62,0 | 16,0 | 3.138,35 | 365,22 | 0,69 | - | Densa | Porfírica | Serrilhado |
| 6 | 38,0 | 62,0 | 16,0 | 3.246,70 | 347,51 | 0,60 | - | Densa | Porfírica | Serrilhado |
| 7 | 18,4 | 81,6 | 10,6 | 3.369,56 | 306,51 | 0,64 | - | Fina | Inequigranular | Côncavo/Convexo |
| 8 | 19,3 | 80,7 | 14,3 | 3.232,95 | 339,13 | 0,70 | - | Fina | Inequigranular | Serrilhado |
| 15 | 42,5 | 57,5 | 0,6 | 3.057,00 | 586,00 | 0,61 | Euédrica | Densa | Porfírica | Serrilhado |
| 16 | 1,8 | 98,2 | 0,0 | 3.099,00 | 517,00 | 0,64 | Anédrica/Subédrica | Fina | - | Reto |
| 17 | 22,1 | 77,9 | 7,3 | 2.968,00 | 391,00 | 0,67 | Anédrica | Fina | Porfírica | Serrilhado |
| 18 | 12,8 | 87,3 | 0,0 | 3.533,60 | 324,40 | 0,60 | - | Densa | Inequigranular | Serrilhado |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Figura 3.21 apresenta os resultados da relação entre teor de máficos e biotita com a angularidade de origem. Os resultados de angularidade de todos os materiais apresentaram valores contidos na mesma faixa de classificação subarredondado (1.260 – 4.080). Com isso, não foram identificadas tendências quanto às variáveis petrográficas qualitativas: forma do grão, granulação, textura e contato entre os minerais.

Figura 3.21 – Análise da petrografia diante da relação entre mineralogia e angularidade de origem

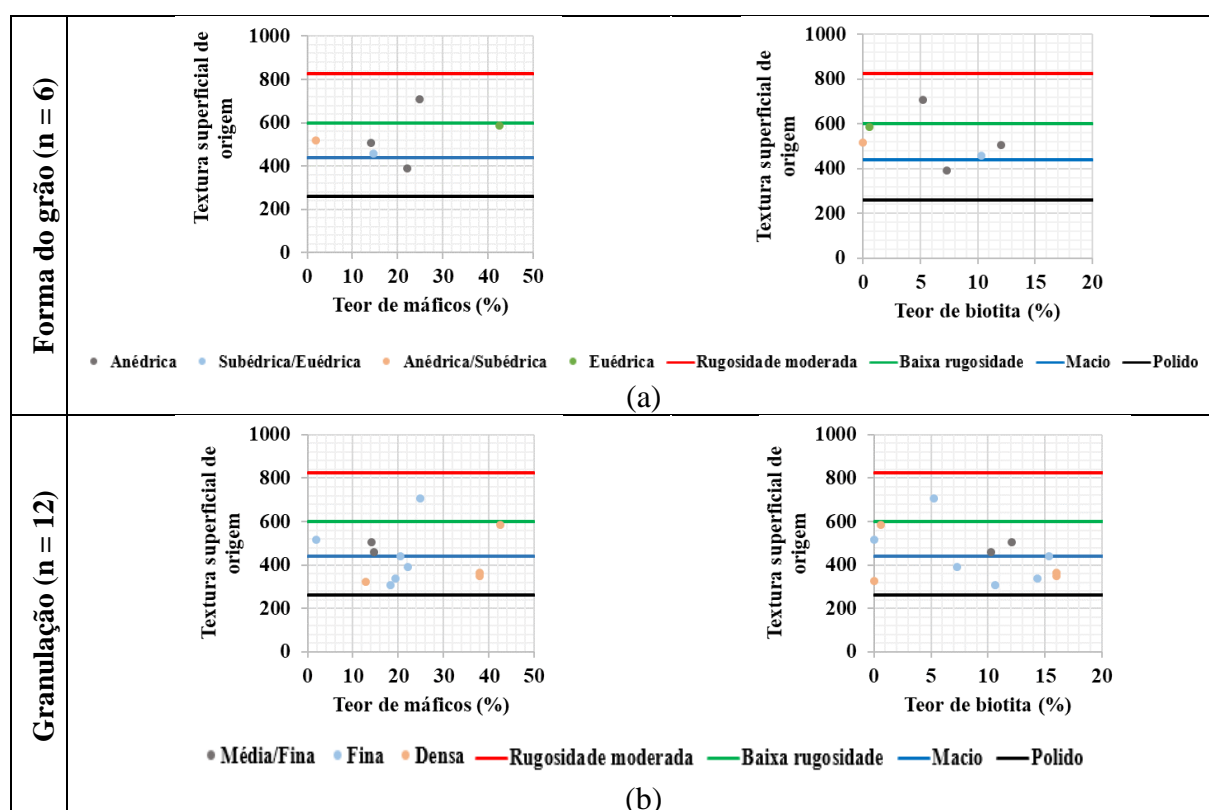


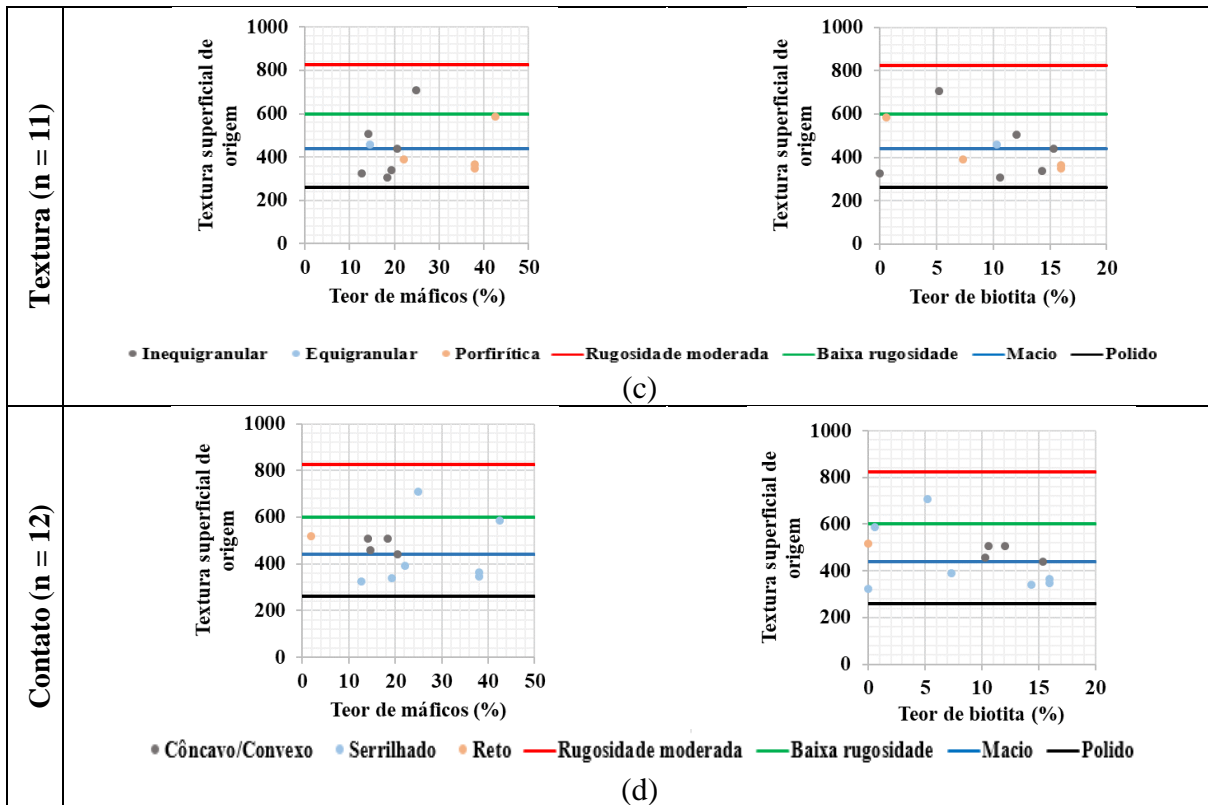
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a variável textura superficial de origem (Figura 3.22), os valores se enquadraram em diferentes faixas de classificação. Porém, para a forma do grão (Figura 3.22a) não foi possível identificar alguma tendência. Observaram-se três materiais com forma anédrica

em três diferentes faixas: macio (260 – 440), baixa rugosidade (440 – 600) e rugosidade moderada (600 – 825). Na granulação dos minerais (Figura 3.22b) foi possível identificar uma maior concentração de materiais com granulação densa ou fina na faixa de classificação macio, embora existam materiais de granulação fina em outras faixas. Na textura (Figura 3.22c) o comportamento foi similar à forma do grão, por exemplo, os materiais com textura inequigranular (pontos cinza) se enquadraram em três diferentes faixas de textura superficial, sendo difícil de identificar alguma tendência. Para o contato dos minerais (Figura 3.22d), foi observado concentração de materiais de contato serrilhado na faixa de classificação macio e de contato côncavo/convexo na faixa de classificação baixa rugosidade, mas também ocorreram, na mesma faixa de classificação, valores de baixa rugosidade para materiais com três diferentes tipos de contato. Em síntese, diante da dispersão encontrada para a classificação dos materiais, com relação às quatro variáveis petrográficas qualitativas, não foi possível identificar tendências.

Figura 3.22 – Tendências da petrografia diante da relação entre mineralogia e textura superficial de origem

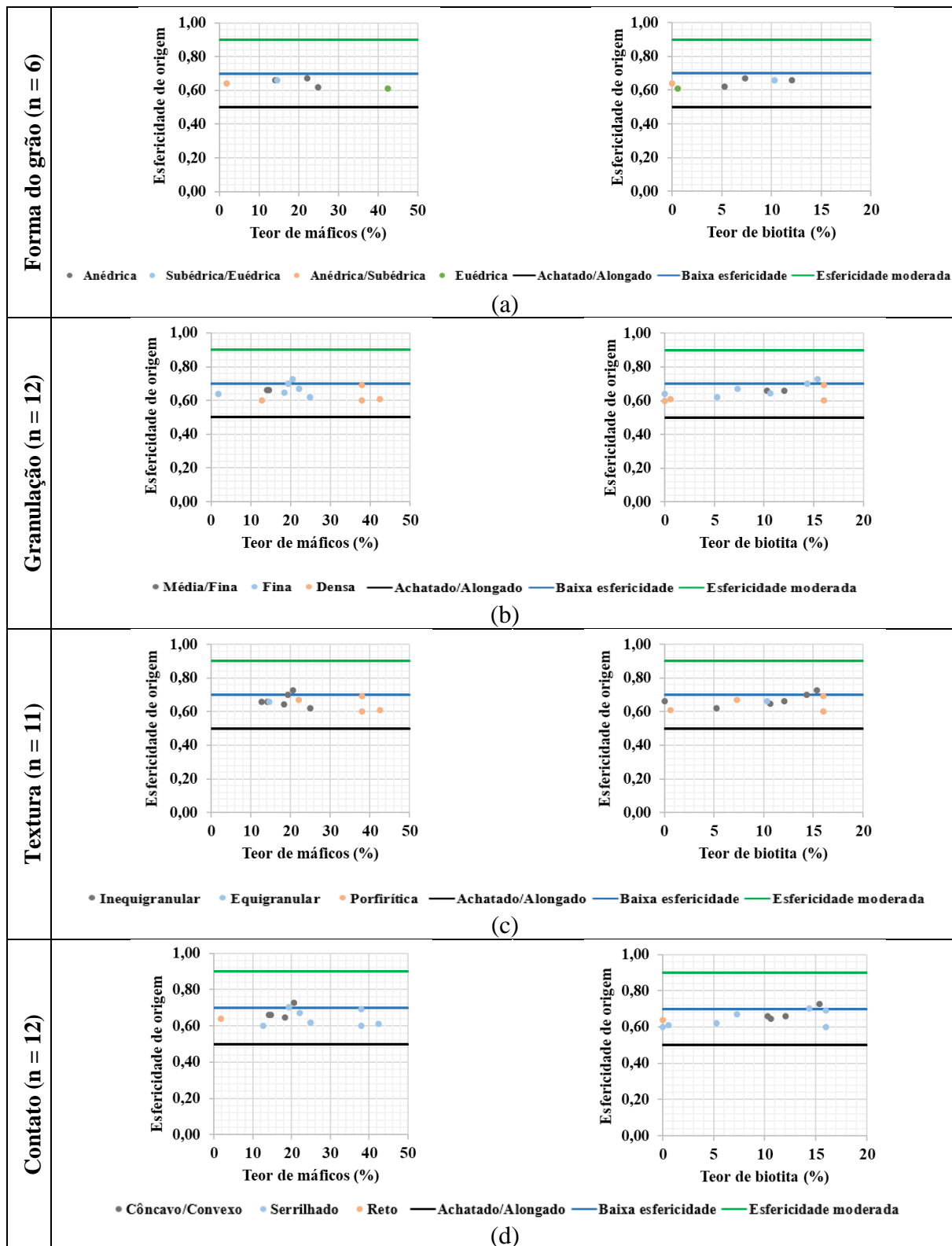




Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para a variável esfericidade de origem (Figura 3.23), com relação à forma do grão (Figura 3.23a) todos os materiais permaneceram na mesma faixa de classificação (baixa esfericidade), sendo impossível identificar alguma tendência. Com relação às variáveis granulção, textura e contato, respectivamente, Figuras 3.23b, 3.23c e 3.23d, apenas um material se enquadrou em outra faixa de classificação, no caso na faixa de esfericidade moderada (0,73) com granulção fina, textura inequigranular e contato côncavo/convexo. Os demais materiais se enquadraram na faixa de classificação baixa esfericidade com muita dispersão de classificação dos materiais, sendo impossível relatar tendências.

Figura 3.23 – Tendências da petrografia diante da relação entre mineralogia e esfericidade de origem



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

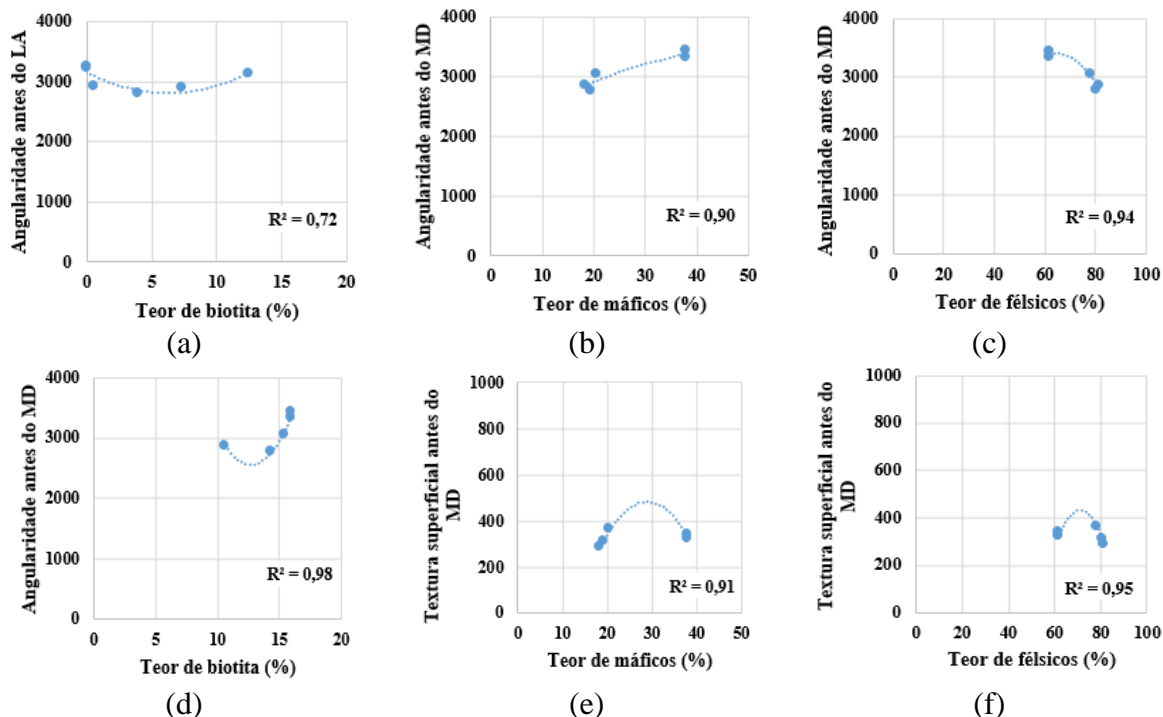
As análises seguiram com os resultados das propriedades de forma de agregados caracterizados antes e depois da realização dos ensaios LA, Treton, MD com diferentes durações e resistência ao esmagamento. No entanto, apenas as discussões foram apresentadas, pois o comportamento visual (gráficos) foi similar ao identificado nas propriedades de forma de origem dos agregados. Para a variável angularidade, antes e depois da realização de todos os ensaios de degradação, foi observada a permanência dos valores na faixa de classificação subarredondado, ou seja, sem a possibilidade de identificar alguma tendência para a forma do grão, granulação, textura e contato entre minerais. Para as demais variáveis, textura superficial e esfericidade, os valores se enquadraram em diferentes faixas de classificação, mas devido a dispersão das variáveis qualitativas também não foi possível obter tendências entre as características petrográficas e morfológicas dos agregados.

3.4.2.2 *Tendências entre petrografia e morfologia: Etapa 2*

Na Etapa 2 as variáveis teor de máficos, félsicos e biotita foram relacionadas com as variáveis morfológicas de origem, antes e depois da realização dos ensaios LA, Treton, MD em vários tempos e esmagamento. As correlações apresentadas nesta seção são as que seguiram os critérios bons e excelentes, conforme Witczack *et al.* (2002). Os resultados foram representados em gráficos de dispersão com todas as relações expressas em função polinomial de 2º grau.

Para as variáveis angularidade, textura superficial e esfericidade de origem não foram encontradas correlações conforme os critérios estabelecidos. A mesma ausência de correlação foi vista entre as variáveis morfológicas antes e depois do ensaio Treton com as variáveis petrográficas. Para o ensaio de abrasão LA apenas foi identificada uma correlação, sendo o valor esperado de angularidade antes do LA explicado pelo teor de biotita de 72% (Figura 3.24^a, n = 6). No ensaio de desgaste MD (n= 5), o valor esperado de angularidade antes do MD foi explicado pelas três variáveis petrográficas, teor de máficos (Figura 3.24b), félsicos (Figura 3.24c) e biotita (Figura 3.24d), respectivamente, em 90, 94 e 98%. Para a textura superficial antes do MD, as variáveis teor de máficos (Figura 3.24e) e félsicos (Figura 3.24f) apresentaram excelentes correlações. Já para a esfericidade, nenhuma correlação foi identificada.

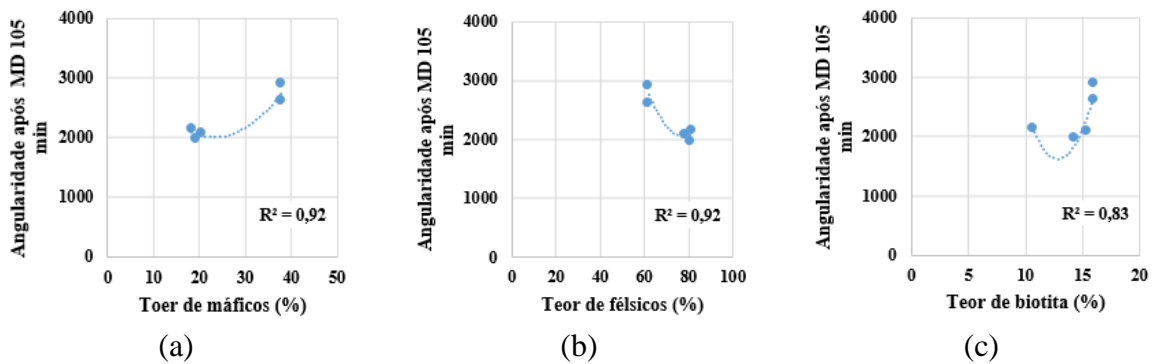
Figura 3.24 – Linha de tendência polinomial de segunda ordem entre mineralogia e morfologia dos agregados antes dos ensaios de degradação: a) teor de biotita e angularidade antes do LA; b) teor de máficos e angularidade antes do MD; c) teor de félsicos e angularidade antes do MD; d) teor de biotita e angularidade antes do MD; e) teor de máficos e textura superficial antes do MD e f) teor de félsicos e textura superficial antes do MD



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

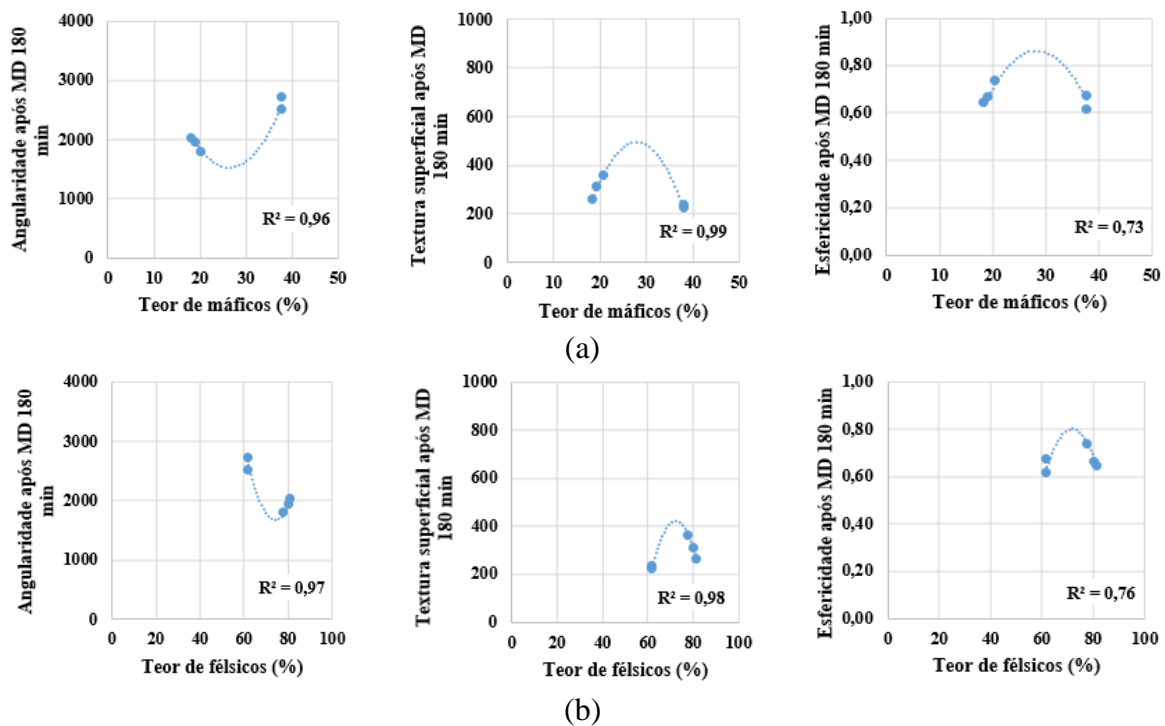
Para os ensaios de MD após 105, 180 e 210 min algumas relações foram identificadas. A Figura 3.25 apresenta linhas de tendência para ilustrar a relação entre mineralogia e angularidade após MD 105 min com correlações satisfatórias. As demais propriedades de forma, textura superficial e esfericidade, não apresentaram correlação com a mineralogia. No ensaio MD com duração de 180 min todas as características morfológicas após o ensaio mostraram relação com o teor de máficos (Figura 3.26a) e félsicos (Figura 3.26b). Para o ensaio MD 210 min, foram observadas correlação entre todas as variáveis petrográficas e morfológicas, exceto na relação entre teor de biotita e esfericidade após MD 210 min. A Figura 3.27 ilustra as linhas de tendência das relações entre a mineralogia e as variáveis morfológicas após o ensaio MD 210 min. No geral, para o ensaio de desgaste MD foi identificado aumento no valor da angularidade com o acréscimo no teor de máficos e redução no valor de angularidade com o aumento do teor de félsicos. Para a textura superficial e a esfericidade não foi identificada tendência de ganho ou perda de propriedade diante da relação com o teor de máficos e de biotita.

Figura 3.25 – Linha de tendência polinomial de segunda ordem entre mineralogia e angularidade após MD 105 min (n = 5): a) teor de máficos; b) teor de félsicos e c) teor de biotita



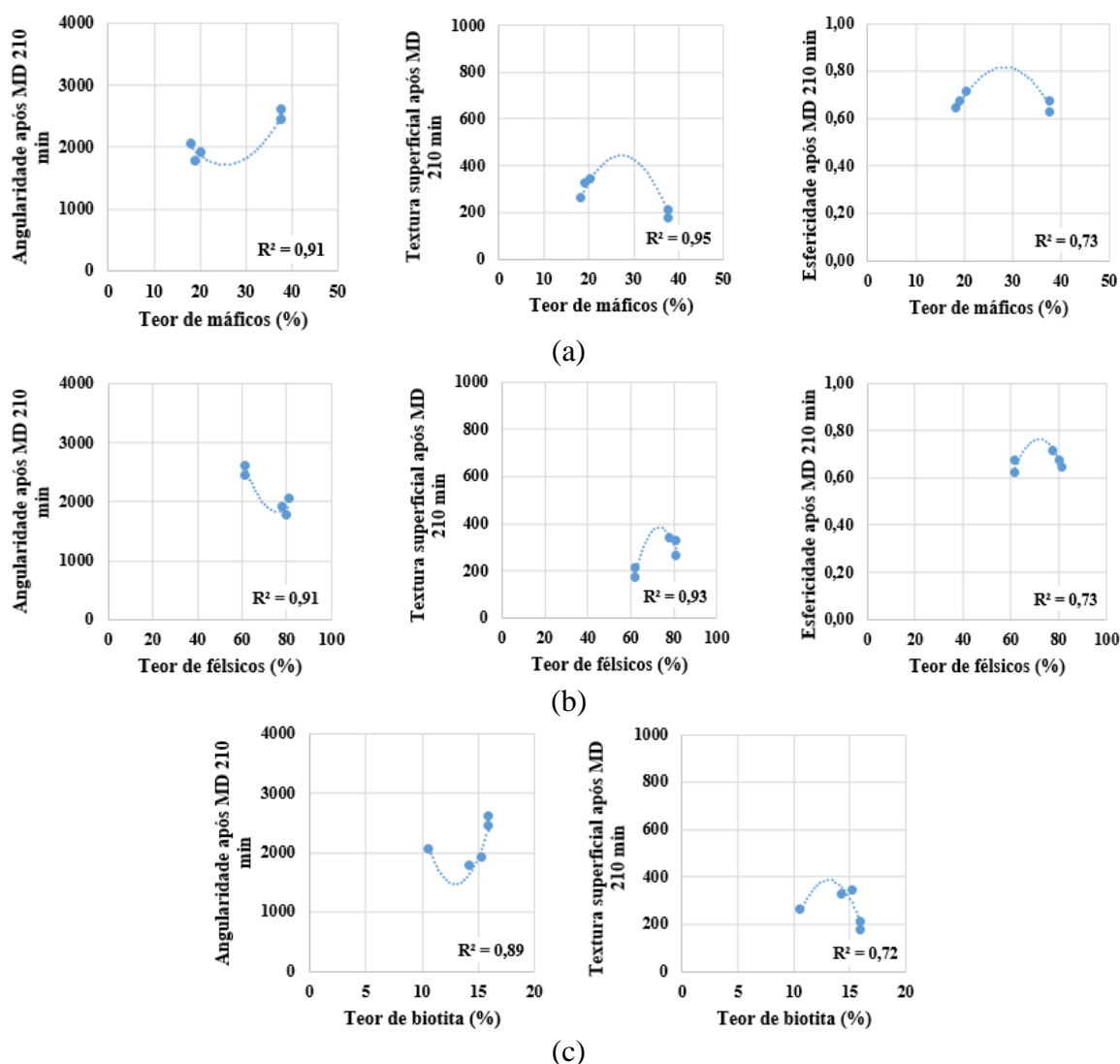
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Figura 3.26 – Linha de tendência polinomial de segunda ordem entre mineralogia e morfologia após MD 180 min (n = 5): a) teor de máficos e b) teor de félsicos



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

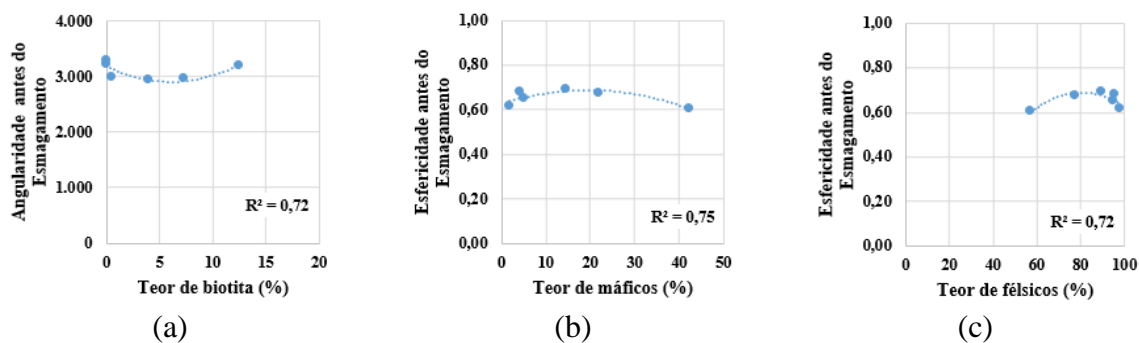
Figura 3.27 – Linha de tendência polinomial de segunda ordem entre mineralogia e morfologia após MD 210 min (n =5): a) teor de máficos; b) teor de félsicos e c) teor de biotita



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Por fim, para o ensaio de resistência ao esmagamento foram encontradas relações satisfatórias apenas para algumas variáveis morfológicas antes do ensaio. A Figura 3.28 apresenta as linhas de tendência com as relações entre as variáveis angularidade e esfericidade antes do esmagamento. O valor esperado de angularidade antes do esmagamento foi explicado pelo teor de biotita em 72% (Figura 3.28a). Para a esfericidade antes do esmagamento, o valor esperado foi explicado pelo teor de máficos e félsicos, respectivamente em 75 e 72% (Figuras 3.28b e 3.28c).

Figura 3.28 – Linha de tendência polinomial de segunda ordem entre mineralogia e morfologia antes do esmagamento (n =6): a) teor de biotita; b) teor de máficos e c) teor de félsicos

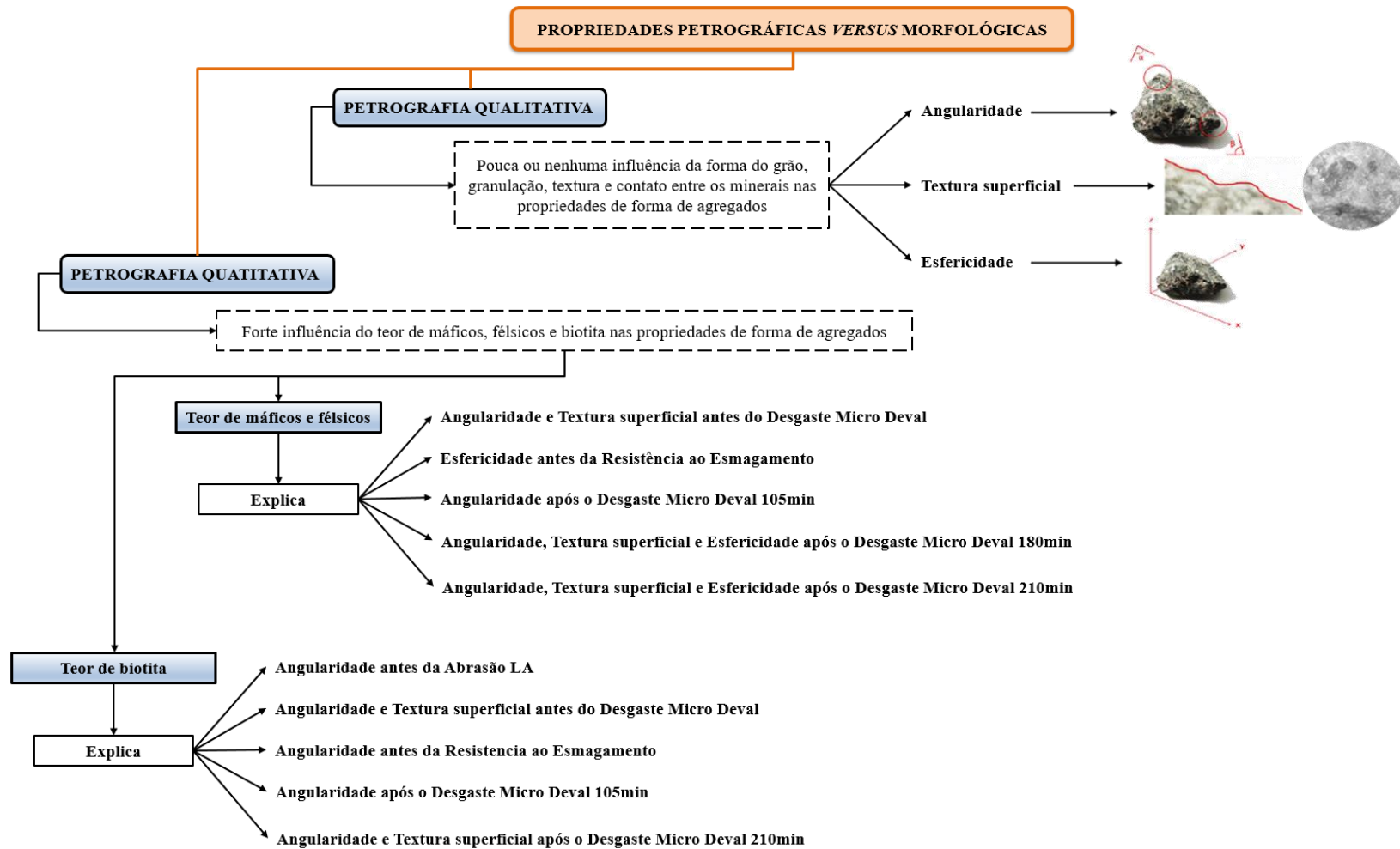


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Embora os resultados obtidos a respeito da influência da petrografia na morfologia dos agregados tenham apresentado valores de correlação bom ou excelente, a análise para identificação das tendências quanto ao teor elevado ou baixo dos minerais observados, máficos, félsicos e biotita não foi fácil de ser realizada. Isso se justifica pela linha de tendência ser uma função polinomial quadrática. Dentre os resultados apresentados, apenas a angularidade mostra uma clara tendência de aumento no valor da angularidade com o acréscimo de teor de máficos e biotita e decréscimo de teor de félsicos.

Por fim, a Figura 3.29 apresenta um organograma com as principais relações entre as propriedades petrográficas e morfológicas de agregados.

Figura 3.29 – Organograma com as principais relações obtidas entre propriedades petrográficas e morfológicas de agregados



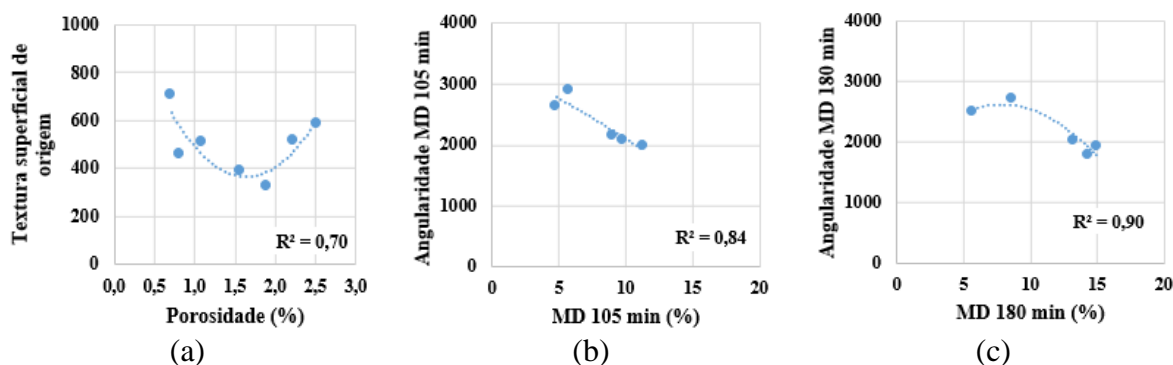
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

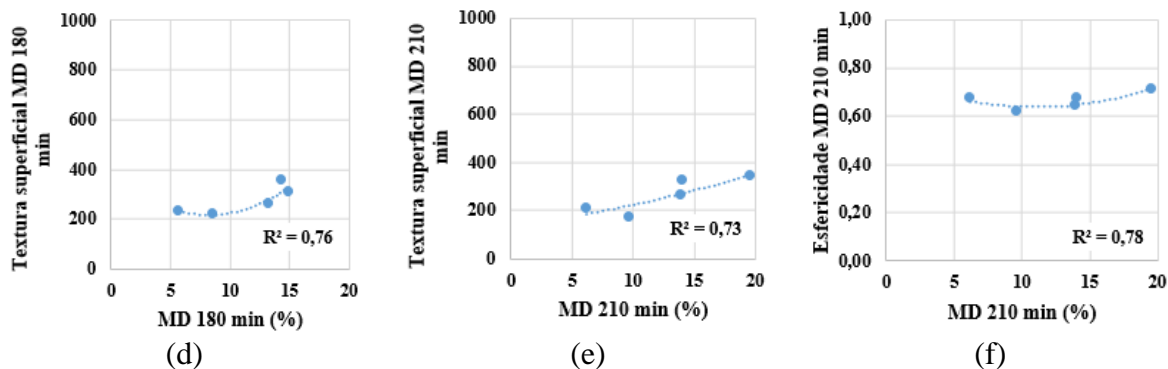
3.4.3 Influência das propriedades físicas no comportamento morfológico

A avaliação da influência das propriedades físicas no comportamento morfológico dos agregados foi analisada, inicialmente, pela relação entre os índices físicos e as variáveis morfológicas de origem. Em seguida, foi analisada a relação entre os valores dos ensaios de degradação (LA, Treton, MD e esmagamento) e seus respectivos valores das variáveis morfológicas depois da realização destes ensaios. Por último, em duas subseções deste tópico de avaliação, foram analisadas as tendências de correlação das propriedades entre si.

A Figura 3.30 apresenta os resultados das relações entre as propriedades físicas e morfológicas. Nas análises realizadas entre os índices físicos e parâmetros morfológicos de origem foi identificada correlação ($R^2 = 70\%$) apenas entre as variáveis porosidade e textura superficial de origem (Figura 3.30a, $n = 7$), sendo a linha de tendência representada pela função polinomial quadrática. Para as relações físicas de degradação e suas propriedades morfológicas depois dos ensaios, algumas tendências foram identificadas apenas com relação aos resultados do ensaio de desgaste MD ($n = 5$), sendo todas elas também representadas pela função polinomial quadrática. As conclusões a respeito deste ensaio foram: o valor esperado de angularidade MD 105 min foi explicado pelo desgaste MD 105 min em 84% (Figura 3.30b); o valor esperado de angularidade e de textura superficial MD 180 min foi explicado pelo desgaste MD 180 min, respectivamente em 90 e 76% (Figuras 3.30c e 3.30d) e, por fim, o valor esperado de textura superficial e esfericidade MD 210 min foi explicado pelo desgaste MD 210 min, respectivamente, em 73 e 78% (Figuras 3.30e e 3.30f).

Figura 3.30 – Linha de tendência polinomial de segunda ordem entre propriedades físicas e morfológicas: a) porosidade e textura superficial de origem; b) desgaste MD 105 min e angularidade MD 105 min; c) desgaste MD 180 min e angularidade MD 180 min; d) desgaste MD 180 min e textura superficial MD 180 min; e) desgaste MD 210 min e angularidade MD 210 min e f) desgaste MD 210 min e esfericidade MD 210 min





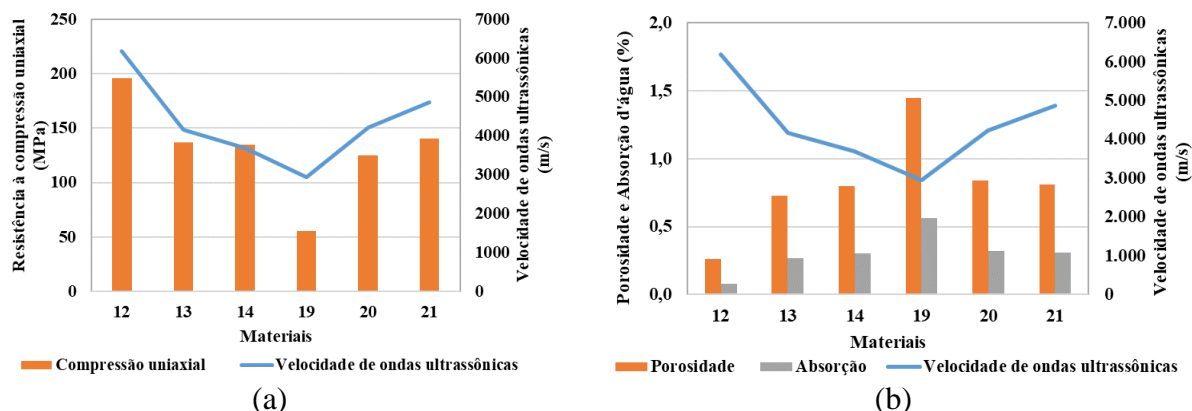
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.4.3.1 Tendências entre propriedades físicas

Esta subseção contempla as principais tendências encontradas entre as variáveis que caracterizam o comportamento físico das rochas. Ressalta-se que os resultados dos ensaios de abrasão LA e desgaste MD, nos três tempos, não foram correlacionados por conter apenas três materiais. As demais interações entre as propriedades físicas foram realizadas, sendo expostas apenas as que apresentaram correlações boa ou excelente (WITCZACK *et al.*, 2002).

A Figura 3.31 relaciona os valores de resistência à compressão uniaxial, porosidade e absorção d'água com velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é um ensaio não destrutivo que estima a integridade da rocha. Para a relação entre resistência à compressão uniaxial e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, foi constatado uma relação diretamente proporcional (Figura 3.31a). Vale mencionar que o material 12 foi o único que apresentou granulação fina (maior imbricamento mineral) e também um estado incipiente microfissural (mencionado na seção 3.4.1, Figura 3.19), o que auxilia no ganho de resistência. Quanto às variáveis porosidade e absorção d'água com velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Figura 3.31b), foi observada uma relação inversamente proporcional, ou seja, com o aumento na porosidade das rochas ocorreu a redução na velocidade. As duas análises reforçam as relações existentes entre as variáveis e corroboram com as tendências apresentadas em Leal Neto (2017), porém com apenas três rochas pegmatíticas.

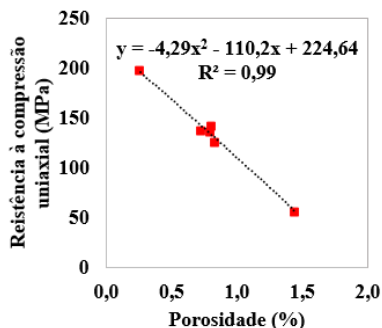
Figura 3.31 – Relação entre resistência à compressão uniaxial, porosidade, absorção d'água e velocidade de propagação de ondas ultrassônicas



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na relação dos ensaios de degradação com a porosidade e absorção d'água apenas o ensaio de resistência à compressão uniaxial apresentou correlação. A Figura 3.32 ilustra esta correlação com R^2 de 0,99 (excelente), ou seja, a variável resistência à compressão uniaxial foi explicada pela variável porosidade em 99% através da função polinomial quadrática ($n = 6$).

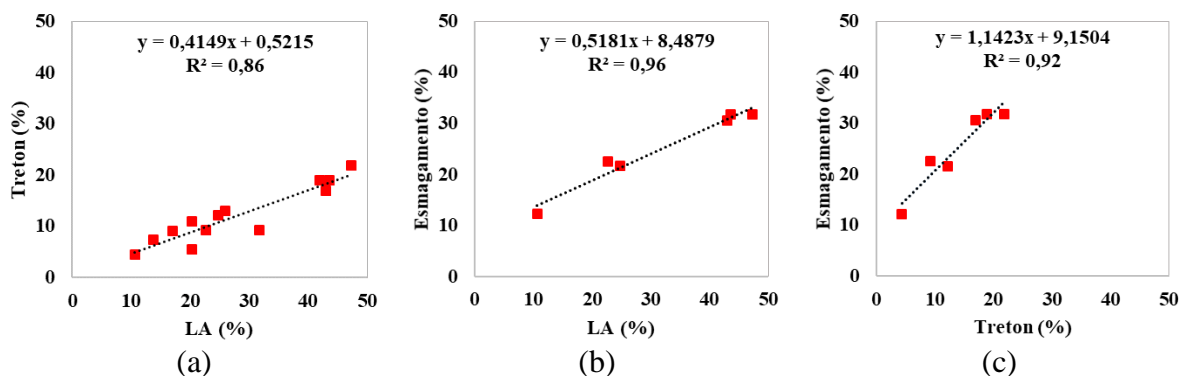
Figura 3.32 – Correlação entre resistência à compressão uniaxial e porosidade



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Como última análise, foram observadas as correlações entre os resultados dos próprios ensaios de degradação. Os resultados mostraram correlação boa ou excelente, com relação diretamente proporcional, mesmo com mecanismos degradativos diferentes entre os ensaios. A Figura 3.33a apresenta a relação entre LA e Treton, sendo a degradação por impacto Treton explicada pela degradação por abrasão LA em 86%. A Figura 3.33b apresenta a relação entre LA e esmagamento, com a resistência ao esmagamento explicada pela degradação por abrasão LA em 96% e, por fim, a Figura 3.33c apresenta a relação entre Treton e esmagamento, com a degradação a resistência ao esmagamento explicada pelo impacto Treton em 92%.

Figura 3.33 – Correlação por regressão linear entre as propriedades físicas: a) Treton e LA (n = 13); b) Esmagamento e LA (n = 6) e c) Esmagamento e Treton (n = 6)



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

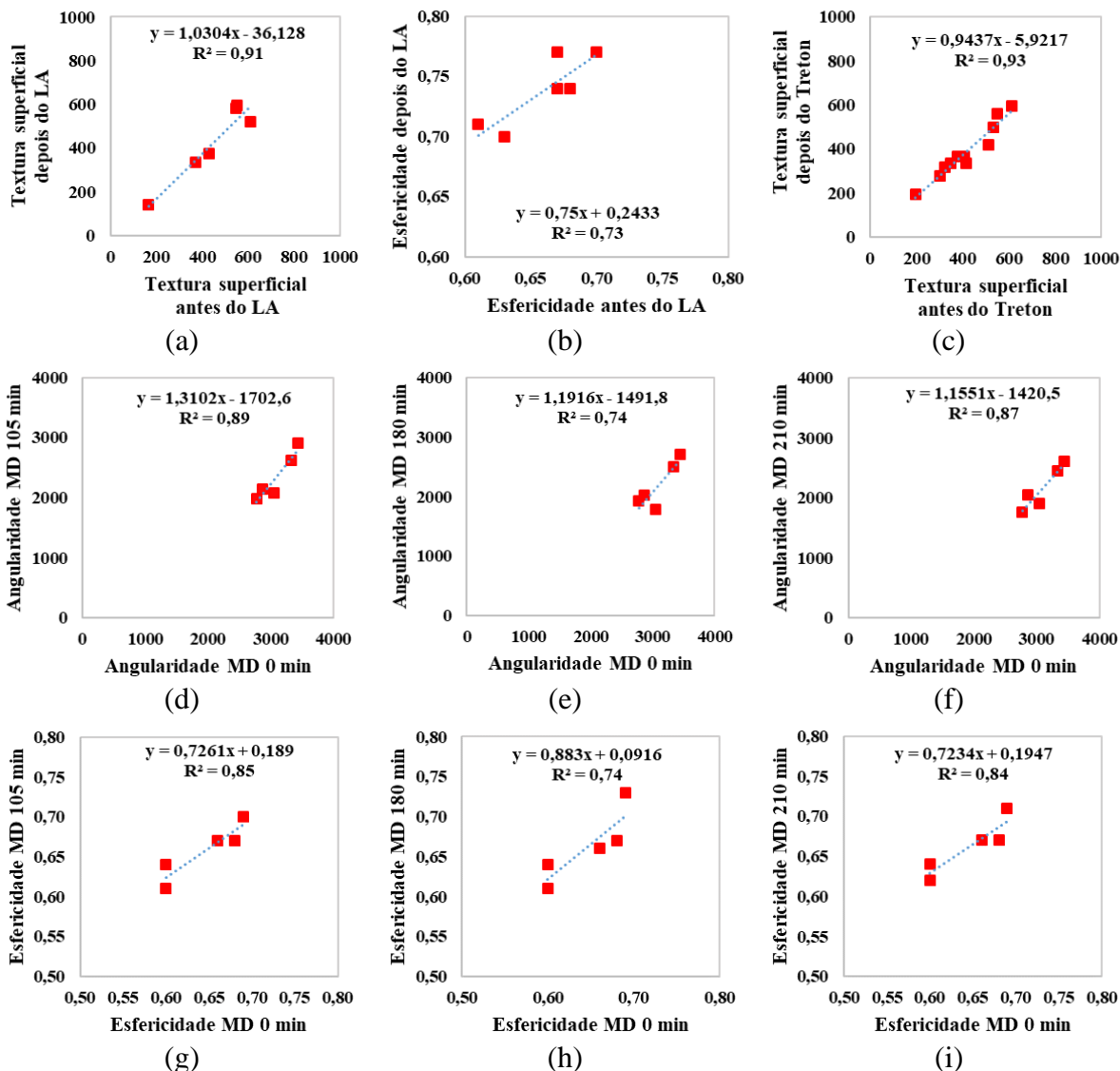
3.4.3.2 Tendências entre propriedades morfológicas

Esta subseção menciona as principais tendências encontradas entre as variáveis que caracterizam o comportamento morfológico dos agregados. A Figura 3.34 apresenta todas as correlações que atenderam aos critérios bons e excelentes.

Em todos os casos ocorreram relações diretamente proporcionais entre as variáveis. Para o ensaio de abrasão LA, os resultados mostraram que o valor de textura superficial dos agregados antes da abrasão LA explicou a textura superficial dos agregados depois da abrasão LA em 91% (Figura 3.34a, n = 6). Ainda no ensaio LA, os resultados mostraram que a esfericidade dos agregados antes do LA explicou a esfericidade dos agregados depois do LA em 73% (Figura 3.34b, n = 6). Para o ensaio de impacto Treton, os resultados mostraram que a textura superficial dos agregados antes do Treton explica a textura superficial dos agregados depois do Treton em 93% (Figura 3.34c, n = 11).

Nos ensaios de desgaste MD os resultados mostraram correlações para as propriedades de forma, angularidade e esfericidade, para os três tempos de degradação (n = 5). A angularidade MD 0 min explicou a angularidade MD 105 min em 89% (Figura 3.34d), MD 180 min em 74% (Figura 3.34e) e MD 210 min em 87% (Figura 3.34f). A esfericidade MD 0 min explicou a esfericidade MD 105 min em 85% (Figura 3.34g), MD 180 min em 74% (Figura 3.34h) e MD 210 min em 84% (Figura 3.34i).

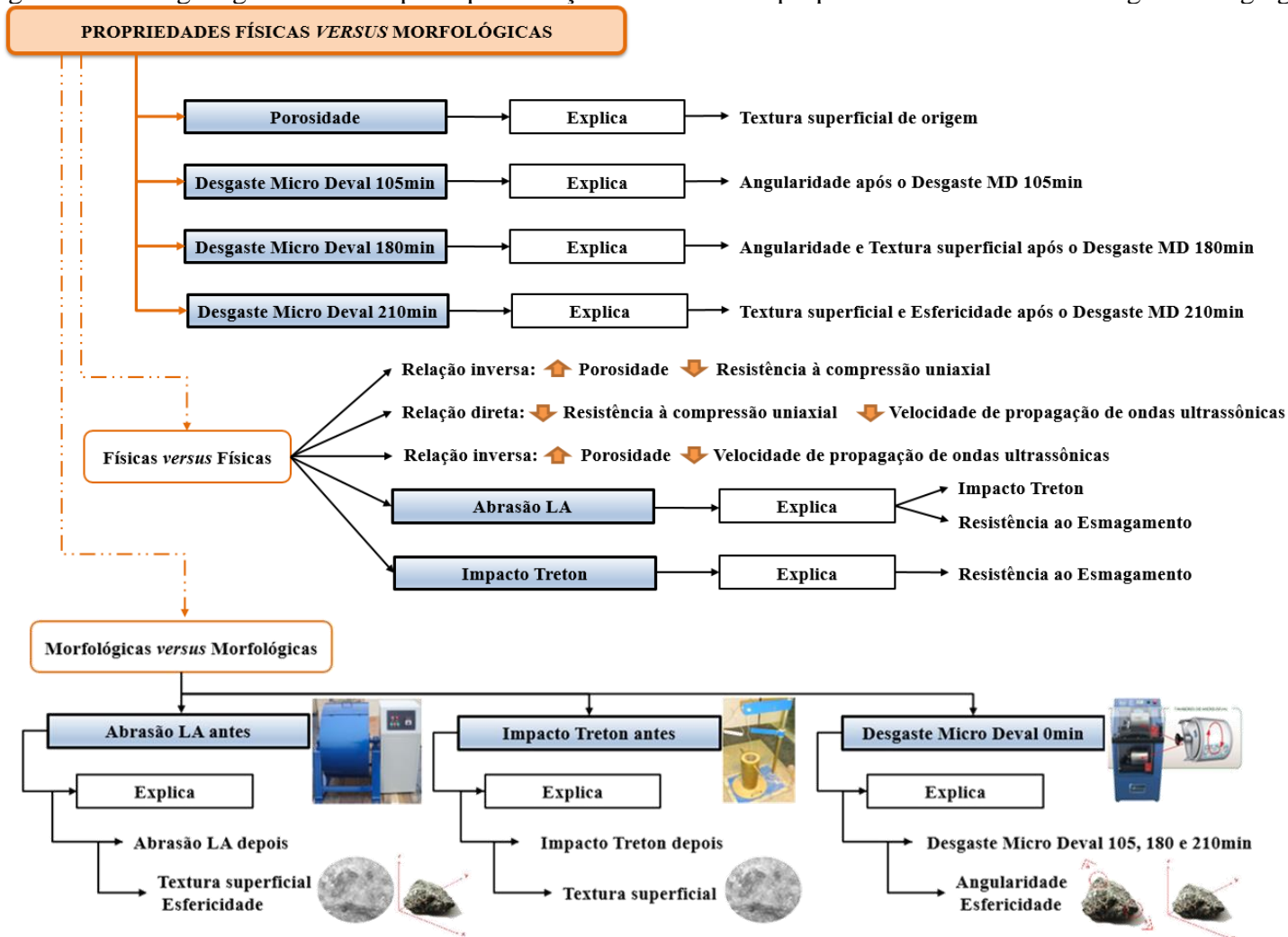
Figura 3.34 – Correlação por regressão linear entre as propriedades morfológicas: a) textura antes e depois do LA; b) esfericidade antes e depois do LA; c) textura antes e depois do Treton; d) angularidade MD 0 e 105 min; e) angularidade MD 0 e 180 min; f) angularidade MD 0 e 210 min; g) esfericidade MD 0 e 105 min; h) esfericidade MD 0 e 180 min e i) esfericidade MD 0 e 210 min



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Por fim, a Figura 3.35 apresenta um organograma com as principais relações entre as propriedades físicas e morfológicas de agregados, bem como as relações destas propriedades entre si.

Figura 3.35 – Organograma com as principais relações obtidas entre propriedades físicas e morfológicas de agregados

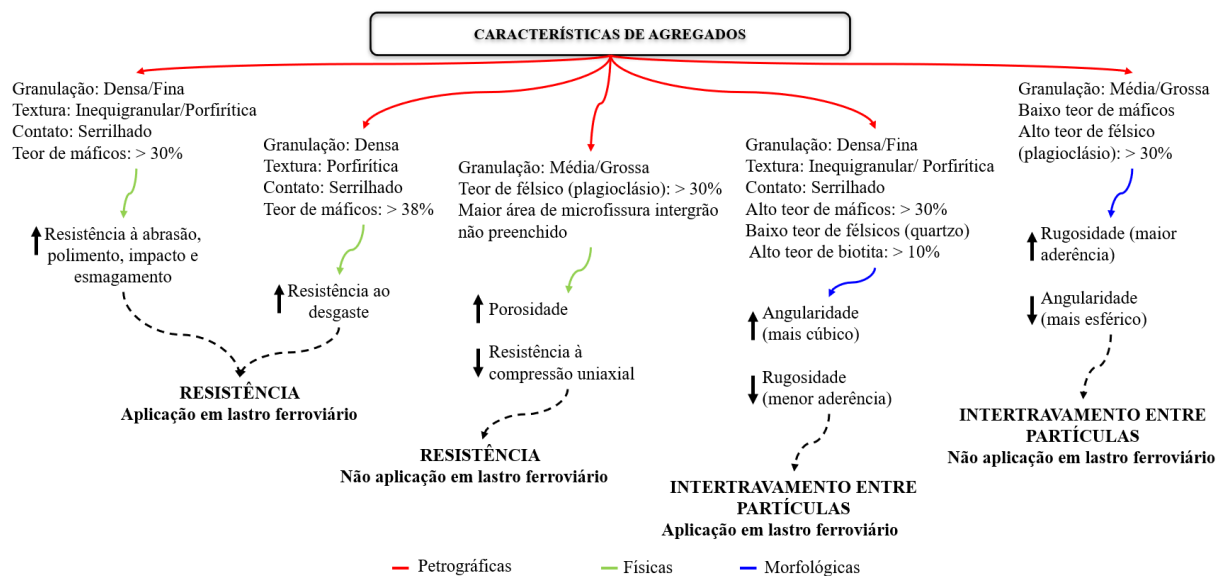


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.4.4 Protocolo para auxiliar na seleção de agregados na fase de projeto

Diante dos resultados obtidos entre as propriedades das rochas e dos agregados, foi desenvolvido um protocolo com sugestões de análise e interpretação a fim de auxiliar e direcionar, de modo prático, a seleção de agregados na fase de projeto. A Figura 3.36 apresenta um diagrama com direcionamento de aplicação de lastro ferroviário diante das propriedades petrográficas, físicas e morfológicas de agregados.

Figura 3.36 – Diagrama de aplicação de lastro ferroviário diante de propriedades petrográficas, físicas e morfológicas



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

3.5 Considerações finais

O conhecimento das características das rochas a serem aplicadas em via permanente é fundamental para proporcionar a máxima eficiência dos veículos tratores e rebocados, garantir segurança e economizar em manutenção. O presente capítulo teve como objetivo avaliar a relação entre as propriedades petrográficas, físicas e morfológicas de agregados. Para tanto, foram aplicadas relações de tendências para analisar as variáveis qualitativas (análise gráfica visual) e relações de correlação para analisar as variáveis quantitativas. Com o desenvolvimento do estudo foram identificadas algumas variáveis petrográficas que puderam ser relacionadas às variáveis físicas e morfológicas de agregados. Foram, também, detectadas características de agregados que podem contribuir para sua maior resistência à degradação. Pela observação dos aspectos analisados, os seguintes resultados podem ser apresentados a partir deste estudo:

- A petrografia é uma propriedade essencial para conhecer as características das rochas e auxiliar na inferência do comportamento de agregados, ainda na fase de projeto, para a aplicação em diversas áreas. Conclui-se que não se pode avaliar a resistência de um agregado pela influência de uma única variável petrográfica, visto que existe claramente a influência em conjunto das variáveis qualitativas: forma do grão, granulação, textura e contato entre minerais.

- Independente do mecanismo de degradação, quer seja abrasão, impacto e esmagamento, as rochas com forma do grão anédrica ou anédrica/subédricas, granulação mais grossa (média/grossa), textura equigranular e contato reto têm tendência a apresentarem maior degradação. Além disso, para o mecanismo de desgaste (abrasão, polimento e quebra), as rochas com granulação fina, textura inequigranular e contato côncavo/convexo ou serrilhado têm tendência a apresentarem maior degradação. Já com relação ao mecanismo de compressão, as rochas com granulação mais grossa, textura inequigranular ou porfirítica e contato côncavo/convexo apresentam tendência a maior degradação.

- A mineralogia (teor de máficos, félsicos e biotita) é uma forte variável quantitativa petrográfica para prever o comportamento físico e morfológico de agregados. As rochas com maior teor de máficos proporcionam maior resistência à degradação dos agregados. Em contrapartida, rochas com maior teor de félsicos resultam em menor resistência à degradação dos agregados. Com relação aos índices físicos, a mineralogia não apresentou indícios que auxiliasse na previsão do comportamento futuro, visto que os índices físicos são parâmetros que remetem à natureza composicional e à heterogeneidade textural da rocha, ou seja, são características intrínsecas de cada tipo de rocha.

- A partir do teor de máficos, félsicos e biotita é possível explicar o comportamento do agregado quanto à degradação por desgaste (MD); e o teor de máficos e félsicos explica a degradação quanto ao esmagamento.

- Em relação às propriedades de forma de agregados, antes da degradação, o teor de biotita estima a angularidade antes do LA; os três teores de minerais de rochas explicam a angularidade e a textura antes do MD; o teor de máficos e félsicos explica a esfericidade antes do esmagamento e o teor de biotita estima a angularidade antes do esmagamento.

- Em relação às propriedades de forma de agregados, após a degradação, os três teores de minerais de rochas explicam a angularidade após MD 105 min; os teores de máficos e félsicos de rochas caracterizam as três propriedades de forma de agregados após MD 180 min e os três teores de minerais de rochas explicam as três propriedades de forma de agregados após MD 210 min, exceto o teor de biotita com relação à esfericidade após MD 210 min.

- Os agregados provenientes de rochas com maiores teores de máficos e biotita contribuem para aumentar o valor da angularidade de agregados após os ensaios de desgaste MD.

- O microfissuramento intergrãos não preenchido entre os minerais da rocha pode caracterizar o estado físico do agregado através de uma relação diretamente proporcional com a porosidade e absorção d'água e uma relação inversamente proporcional com a resistência à compressão uniaxial e velocidade de ondas ultrassônicas. As rochas com granulação média/grossa (menor imbricamento entre os minerais) induzem um maior valor de microfissuramento intergrãos não preenchido entre minerais. Já no caso de rochas com granulação fina (maior imbricamento entre os minerais), o estado microfissural têm tendência de reduzir.

- Quanto à relação entre propriedades físicas e morfológicas, apenas a porosidade do agregado explica a textura superficial de origem do agregado.

- Com relação à influência entre as propriedades físicas, a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas da rocha se relaciona diretamente com a resistência à compressão uniaxial e inversamente com os índices físicos, porosidade e absorção d'água. A redução da porosidade e absorção d'água das rochas implica no aumento de resistência à compressão uniaxial. O ensaio de abrasão LA explica os ensaios de impacto Treton e resistência ao esmagamento, bem como através do ensaio de impacto Treton é possível estimar a resistência ao esmagamento.

- A influência entre as propriedades morfológicas, a textura superficial e esfericidade de agregados antes do ensaio LA explica, respectivamente, a textura superficial e esfericidade de agregados depois do ensaio LA; a textura superficial de agregados antes do ensaio Treton explica a textura superficial de agregados depois do ensaio Treton; a angularidade de agregados em 0 min de ensaio MD explica a angularidade de agregados em 105, 180 e 210 min de ensaio MD e a esfericidade de agregados em 0 min de ensaio MD explica a esfericidade de agregados em 105, 180 e 210 min de ensaio MD.

É válido mencionar que as análises realizadas apresentaram um espaço amostral inferior a 30, valor que remete a uma representatividade estatística. Ressalta-se a importância de aumentar o espaço amostral, principalmente em valores característicos intermediários, e verificar se a intensidade de correlação se mantém em condições boas ou excelentes, bem como se as linhas de tendência permanecem polinomial de 2º grau.

No entanto, em virtude dos resultados obtidos, percebe-se a importância de conhecer as características das rochas que geram os agregados. A abrangência das relações existentes entre os variados parâmetros petrográficos, físicos e morfológicos auxilia na seleção de materiais para as diversas aplicações e, além disso, as estimativas entre as relações podem reduzir o esforço laboratorial na caracterização de materiais. Contudo, as contribuições mais relevantes desta pesquisa estão elencadas a seguir:

1. Comprovação da relevância da caracterização petrográfica para estimar o comportamento físico e morfológico de agregados em suas diversas aplicações;
2. Constatação de que os parâmetros petrográficos utilizados para prever o comportamento de degradação de agregados não devem ser avaliados isoladamente;
3. Constatação de que por meio de parâmetros físicos e morfológicos é possível estimar o comportamento degradativo de agregados.

4 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES MORFOLÓGICAS DE AGREGADOS NO EMPACOTAMENTO DA MATRIZ GRANULAR DE LASTRO ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES COM MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

4.1 Introdução

O setor ferroviário apresenta forte papel no desenvolvimento dos sistemas de transportes do país. O aumento da velocidade dos trens proporciona melhoria na mobilidade de pessoas e cargas, mas por outro lado é crescente as cargas transportadas e vibrações na via férrea, sendo importante a atenção a uma das variáveis essenciais para garantir a qualidade de uma via permanente, que é a manutenção.

A estrutura ferroviária tradicional é constituída de trilhos de aço fixados de modo perpendicular a dormentes de concreto ou madeira, que se encontram assentados em uma base composta por rochas britadas conhecida como lastro. O lastro é uma camada constituída de agregados, com faixa média de tamanho de 9,5 a 63,5 mm, responsável por fornecer drenagem e suporte estrutural para os carregamentos pesados dos veículos rebocados e das locomotivas.

As etapas de transporte, lançamento na via permanente e socaria do lastro, assim como passagem de máquinas para a execução da via permanente remetem a desgastes inevitáveis dos agregados. Além disso, após a construção efetiva da via, com os ciclos de passagens de trens (velocidade do trem e frequência de carregamento), a degradação aumenta e, gradualmente, os tamanhos das partículas diminuem. Não somente essas condições de via, mas também as características das partículas, como o tipo da rocha mãe e as propriedades morfológicas (tamanho, forma, angularidade e textura superficial), e as propriedades do material presente no assentamento da matriz granular, como a distribuição do tamanho das partículas e a relação de vazios, influenciam na degradação dos agregados, que, por conseguinte afeta o comportamento da camada de lastro, tanto mecânico quanto funcional.

Por essa razão, a busca por infraestrutura ferroviária com eficiência, segurança e que demande reduzidas ações de manutenções precoces é motivo do desenvolvimento de pesquisas sobre o comportamento do lastro ferroviário. Sua análise em escala laboratorial apresenta um nível de dificuldade acentuado para obtenção de parâmetros explicativos do fenômeno. Em escala real, faz-se necessário a instrumentação de vias para a obtenção dos parâmetros explicativos, o que possui elevado custo. Com essa complexidade, o estudo do comportamento de materiais granulares também pode ser desenvolvido por diferentes métodos computacionais.

O Método dos Elementos Discretos (MED) pode ser aplicado para modelar o comportamento natural do material granular, sendo esta uma ferramenta eficiente para a obtenção de parâmetros de contato entre as partículas. Com o avanço dos estudos e da infraestrutura computacional, o MED passou a permitir análises de partículas tridimensionais de formas irregulares, bem como a inserção da consideração da quebra das partículas. Atualmente, esta é uma ferramenta que envolve propriedades físicas e mecânicas dos materiais, tais como atrito de rolamento e deslizamento, sendo possível simular diversos cenários ferroviários com modificações nas características morfológicas das partículas e identificação da estrutura que transmite melhor resistência lateral, maior resistência ao cisalhamento, maior capacidade de rigidez e menor capacidade de deformação.

Nesse contexto, partículas 3D virtuais desenvolvidas a partir de propriedades de forma de agregados 2D reais podem tornar as simulações mais realistas. O presente capítulo tem como objetivo avaliar a geração de partículas 3D virtuais desenvolvida com parâmetros de forma extraídos de agregados analisados pelo Processamento Digital de Imagens (PDI) em escala 2D com o uso do *Aggregate Imaging Measurement System* (AIMS), além de investigar a influência das propriedades morfológicas de agregados no empacotamento da matriz granular de lastro através de simulações em MED. De modo específico, buscou-se avaliar a influência dos parâmetros de esfericidade, achatamento, alongamento e relação de achatamento e alongamento na geração das partículas 3D virtuais e avaliar o empacotamento da matriz granular com partículas 3D virtuais classificadas em diferentes faixas de esfericidade.

4.2 Revisão Bibliográfica

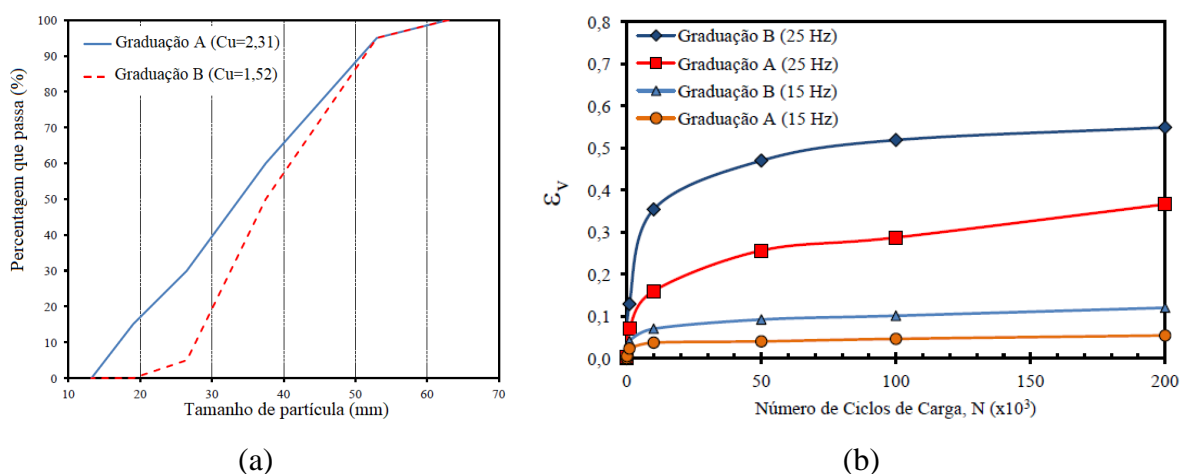
4.2.1 Desempenho da camada de lastro ferroviário: escala real e reduzida

No Brasil, algumas pesquisas foram desenvolvidas para avaliação das propriedades morfológicas dos agregados de lastro ferroviário. Algumas investigações foram direcionadas a avaliar a influência dos processos de britagem na formação da matriz granular para análise do comportamento mecânico (KLINCEVICIUS, 2011); outras foram para a influência das variações granulométricas, dentre as inúmeras faixas de classificação de agregados de lastro (NBR 5564, 2014; AREMA, 2013; AS 2758.7, 1996), na caracterização de tensão e deformação (MERHEB, 2014; VICZARRA, 2015); outras para a influência das propriedades de forma, angularidade e textura superficial de agregados, obtidas com o uso do equipamento AIMS, na formação da matriz de agregados para análise de rigidez e deformação (DIÓGENES, 2016;

DIÓGENES; MAIA; CASTELO BRANCO, 2017) e ainda outras pesquisaram a influência da variação de granulometria, carregamento, umidade e quebra de partículas no comportamento mecânico (SILVA, 2018; ROSA, 2019).

Merheb (2014) avaliou o comportamento mecânico de lastro ferroviário considerando variações granulométricas (AREMA N° 3 e N° 24), umidade, teor de finos contaminantes e carregamentos em escala reduzida e real. Os materiais, de mesma mineralogia, enquadrados na AREMA N° 3 após a realização do ensaio triaxial produziram mais fragmentos em comparação aos materiais enquadrados na AREMA N° 24. No estudo de Vizcarra (2015), as duas curvas granulométricas diferentes utilizadas para a composição do lastro, AS 2758.7 (1996) e NBR 5564 (2011), foram avaliadas, mecanicamente, em escala real. A curva enquadrada na especificação australiana (Graduação A) apresentou menor deformação permanente vertical (ϵ_v) em relação a curva com a especificação brasileira (Graduação B) (0,3 em relação a 0,5 na frequência de 25 Hz). Porém, com relação à rigidez, o módulo de resiliência permaneceu constante para ambas as granulometrias. Com relação à quebra das partículas, a curva B apresentou maior susceptibilidade. A Figura 4.1a apresenta a distribuição granulométrica do lastro nesse citado estudo e a Figura 4.1b os valores de ϵ_v para ambas as granulometrias para diferentes frequências de carregamento cíclico.

Figura 4.1 – Comportamento mecânico de dois materiais utilizados na camada de lastro: a) distribuição granulométrica e coeficiente de uniformidade e b) deformação permanente vertical (ϵ_v)

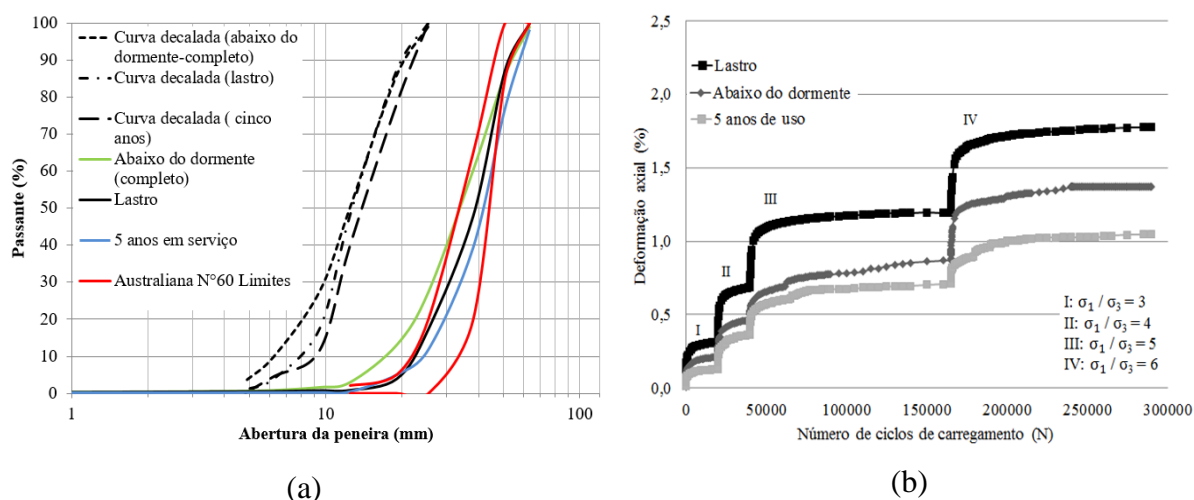


Fonte: Vizcarra (2015).

Diógenes (2016) avaliou a influência das propriedades de forma de agregados para lastro, obtidas com o uso do AIMS, no comportamento mecânico das mesmas através do uso

de ensaios triaxiais em escala reduzida (150×300 mm). A Figura 4.2 apresenta as curvas granulométricas dos materiais ensaiados (curva decalada paralela à curva real, apresenta distribuição de agregados menores) e seus respectivos valores de deformação axial específica (%) após 290.000 ciclos de aplicação de carga.

Figura 4.2 – Resultados de deformação axial para materiais utilizados em lastros ferroviários: a) curvas granulométricas decaladas e b) deformações axiais em relação aos ciclos de carregamento



Fonte: Adaptado de Diógenes (2016).

Os materiais avaliados por Diógenes (2016) foram: lastro de origem (proveniente da pedra), lastro abaixo do dormente e lastro após 5 anos de uso. Menores valores de deformação (Figura 4.2b) para os materiais coletados na via permanente foram obtidos em relação ao material coletado diretamente na pedra (1,7% comparado a 1,1% no último ciclo de carregamento). Esses resultados foram relacionados com a propriedade de forma 2D dos agregados (lastro de origem e material oriundo da via permanente foram classificados, respectivamente, como semialongado e semicircular). As solicitações dos carregamentos (vagões ou pranchas), a manutenção com inserção de pás vibrantes, a rigidez dos dormentes e o atrito entre partículas, alteraram as partículas de modo a gerar uma matriz granular com menor volume de vazios.

Silva (2018) avaliou a influência das propriedades de forma dos agregados (AIMS) no comportamento mecânico de lastro ferroviário para seis diferentes cenários em escala real ($3,10 \times 2,40 \times 2,00$ m, tanque físico instrumentado), escala reduzida (150×300 mm) e utilizou MED. O material de lastro foi enquadrado na faixa AREMA N° 24, constituído por 5 litologias

distintas. Os cenários variaram quanto ao emprego ou não de geogrelhas (geotêxtil na interface lastro-subleito), carregamentos cíclicos e umidade. Diante da instrumentação do tanque físico, foi possível obter informações acerca da quebra das partículas e sobre a variação do comportamento das tensões nos vários cenários avaliados. O citado estudo também apresentou simulação da estrutura analisada para melhor compreender o comportamento do lastro, sendo inserido a quebra das partículas na modelagem. Em relação às duas escalas, o autor concluiu que o comportamento mecânico do lastro avaliado, em escalas reduzida e real, apresentam comportamento similares, mas com diferentes valores de rigidezes e deformações conforme também observou Merheb (2014). Os resultados obtidos no tanque físico apresentaram equivalência com relação à simulação do comportamento mecânico do lastro ferroviário (tensões e deformações permanentes).

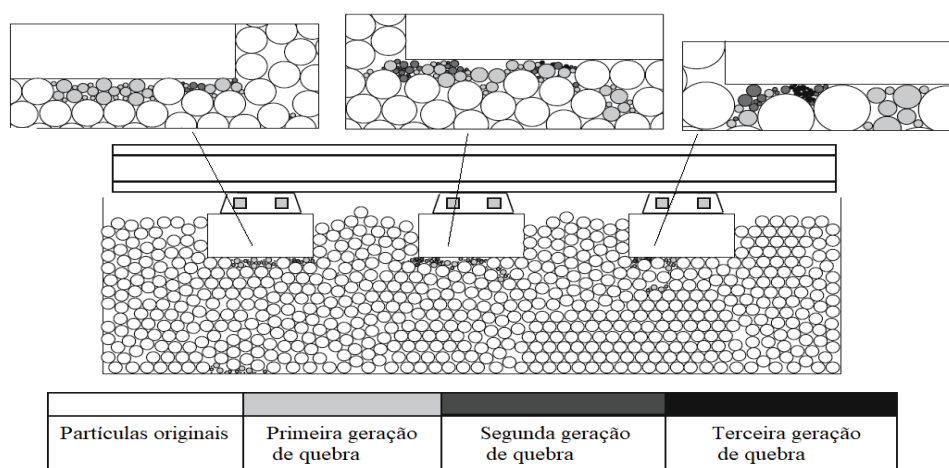
Rosa (2019) avaliou um material utilizado para a composição da camada de lastro ferroviário quanto aos aspectos mecânicos utilizando escalas real e reduzida considerando variações de litologia, granulometria, propriedades de forma, angularidade e textura (AIMS) dos agregados. Pode-se concluir que a litologia influencia as propriedades morfológicas resultantes do processo de britagem, sendo identificado, diante da redução do tamanho das partículas (25; 19; 12,5; 9,5; 6,3 e 4,75 mm), um aumento no valor de angularidade (partículas retidas na fração 4,75 mm com valor de angularidade superior a 3.000 enquanto para as partículas nas outras frações, o valor de angularidade encontrado foi inferior a 3.000). Foi possível constatar que lastros com granulometria enquadrada na faixa AREMA N° 24 possuem menor potencial de quebra das partículas (material avaliado após a realização de ensaios de deformação permanente e módulo de resiliência), quando constituídos de 50% das partículas retidas na fração de tamanho máximo.

No âmbito internacional, estudos quanto à influência das propriedades de forma de agregados de lastro no desempenho da matriz granular é aprimorado com o uso de ensaios em escala real. Muitas investigações são relacionadas à influência da forma, angularidade, tamanho máximo nominal e distribuição granulométrica. Em sua maioria, as propriedades de forma dos agregados são analisadas no equipamento de PDI nomeado *University of Illinois Aggregate Image Analyzer* (UIAIA) (TUTUMLUER; RAO; STEFANSKI, 2000; HUANG, 2010; BOLER; QUIAN; TUTUMLUER, 2014; OUHBI *et al.*, 2016; BIAN *et al.*, 2016).

4.2.2 Simulação discreta em lastro ferroviário: empacotamento e formato das partículas

Lobo-Guerrero e Vallejo (2006) estudaram o comportamento do lastro sob carga cíclica através do uso do MED com o *software* PFC^{2D}, sendo incorporado a este uma rotina de programação de quebra de partículas. O estudo se mostrou eficiente para analisar três gerações de quebra de partículas (Figura 4.3), mas com limitação de aplicação de partículas no formato esférico. Hossain *et al.* (2007) utilizaram um critério de quebra de partículas semelhante para avaliar lastro, mas o estudo também apresentou limitações por utilizar partículas no formato esférico.

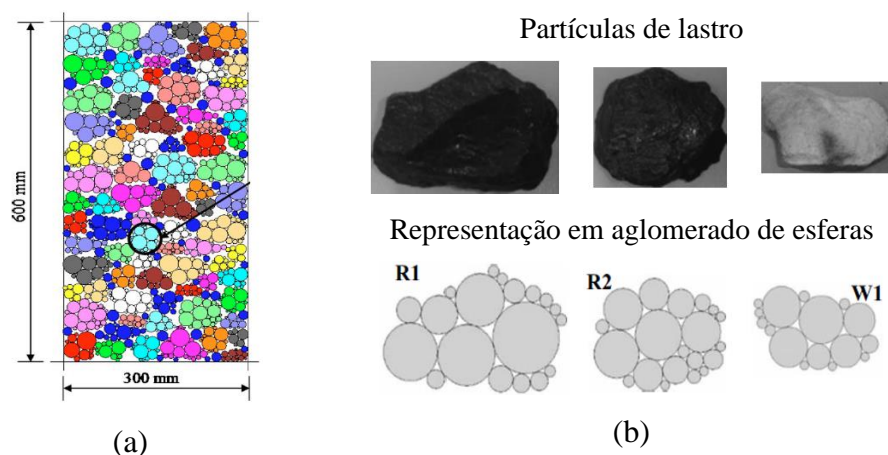
Figura 4.3 – Detalhes de quebra do lastro solicitado a 200 ciclos



Fonte: Adaptado de Lu-Guerrero e Vallejo (2006).

Indraratna, Thakur e Vinod (2010) estudaram o comportamento de lastro utilizando análise experimental e numérica. Nas simulações com MED, esses autores utilizaram o *software* PFC^{2D} com um conjunto de partículas de formato irregular, sendo as simulações feitas no ensaio biaxial cíclico (300 × 600 mm, Figura 4.4a). As partículas foram geradas a partir da união de várias partículas esféricas (Figura 4.4b). Os resultados das simulações de MED mostraram o comportamento do lastro sob carga cíclica de acordo com as observações experimentais. A distribuição da força de contato e da força de ligação desenvolvida durante o carregamento cíclico explicaram o mecanismo de quebra de partículas. A quebra da partícula se deve, principalmente, à tensão de tração desenvolvida durante o carregamento e a tendência de quebra segue a direção do movimento das partículas que compõem o lastro.

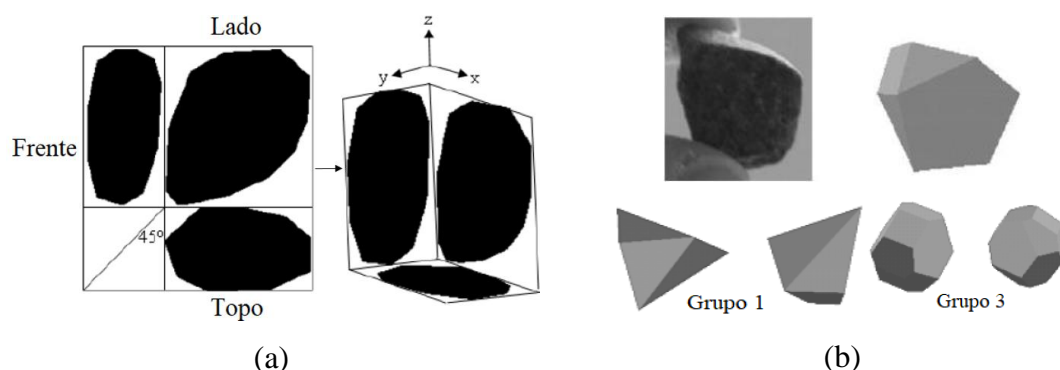
Figura 4.4 – Detalhes da simulação em MED: a) ensaio biaxial cíclico e b) conjunto esférico das partículas utilizado para simulação



Fonte: Adaptado de Indraratna, Thakur e Vinod (2010).

Huang (2010) avaliou os efeitos da morfologia dos agregados e suas características no desempenho de lastro. O citado autor desenvolveu uma metodologia combinada de imagens de agregados e modelagem em MED. As capturas morfológicas das partículas foram obtidas pelo equipamento UIAIA com imagens 2D ortogonais de cada agregado. Conhecidas as três faces de cada agregado, foram cruzadas as imagens e, assim, obtida a representação da partícula em 3D (Figura 4.5a). Várias partículas 3D foram geradas (Figura 4.5b), de modo a manter a geometria a mais diversa possível (11 grupos variados), e inseridas no *software Block3D DEM*. A metodologia foi testada para avaliar as variações granulométricas e de propriedades de forma no comportamento da camada de lastro quanto à resistência, à estabilidade lateral e ao comportamento da deformação permanente. Realizaram-se ensaios laboratoriais de cisalhamento direto em escala real, bem como ensaios de campo. Concluiu-se que a distribuição do tamanho dos agregados e a forma destes têm significativo impacto no comportamento do lastro. Partículas mais angulares apresentam maior resistência ao carregamento, bem como uma melhor estabilidade lateral quando comparadas a partículas arredondadas.

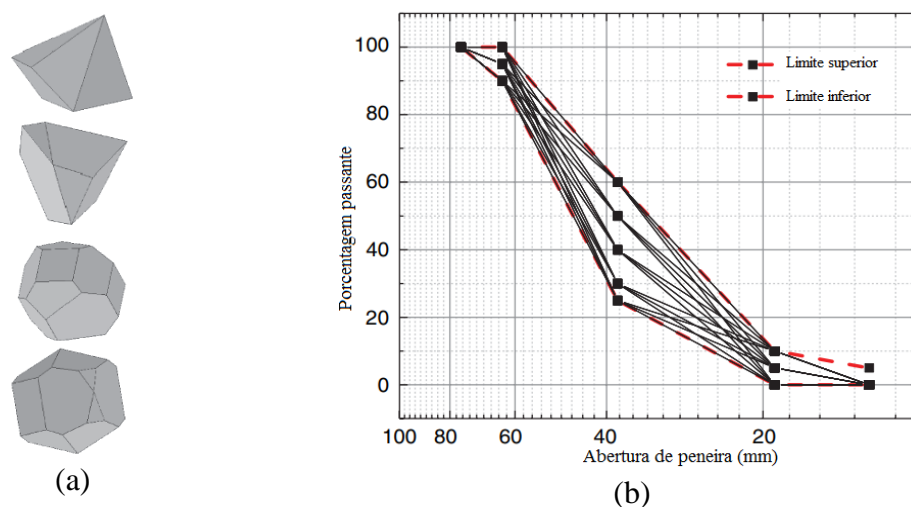
Figura 4.5 – Formação das partículas 3D: a) captura das imagens com o uso do UIAIA e b) grupos de partículas geradas no *software Block3D DEM*



Fonte: Adaptado de Huang (2010).

Boler, Qian e Tutumluer (2014) aplicaram modelagem com uso do MED com material de lastro enquadrado na faixa de graduação AREMA N° 24 para avaliar o empacotamento granular. Os autores quantificaram as mudanças na granulometria dos agregados de lastro dentro da faixa AREMA N° 24 e nas propriedades de forma das partículas, tais como número de faces degradadas ou angularidade, no empacotamento (espaço vazio, número de contatos de partículas e número de coordenadas) das partículas da matriz granular. A Figura 4.6a mostra quatro formas de partículas (poliédrico) utilizadas para a simulação através do uso do *software Block3D DEM Code*. A Figura 4.6b apresenta todas as curvas granulométricas analisadas na citada pesquisa. Os autores concluíram, por análise estatística (ANOVA e Tukey), que os materiais passantes nas peneiras 63,5 e 38,1 mm causaram um aumento significativo no número de contatos entre as partículas, o que não foi visto para aqueles retidos na peneira 19 mm. Além disso, as partículas com alta angularidade resultaram em maiores números de coordenadas, consequentemente, maiores números de contato, maior resistência ao cisalhamento e menor deformação permanente em relação às partículas arredondadas.

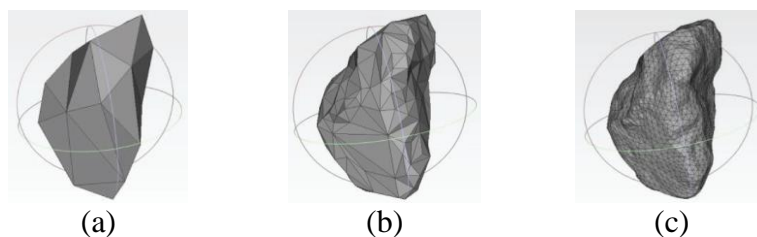
Figura 4.6 – Formato das partículas usadas para simulação em MED: a) partículas poliédricas e b) curvas granulométricas enquadradas na faixa AREMA N° 24



Fonte: Adaptado de Boler, Qian e Tutumluer (2014).

Ouhbi *et al.* (2016) caracterizaram a forma do material utilizado no lastro para entender o seu impacto sobre o desempenho mecânico. Uma fase do estudo foi analisar o desempenho mecânico do lastro (partículas representadas como poliedros irregulares) por meio de simulações numéricas (MED) com o uso do *software* LMGC90. Outra fase do estudo, consistiu em analisar o desempenho mecânico do lastro com partículas caracterizadas a partir da digitalização 3D das superfícies (3D Scan). Os citados autores desenvolveram um método baseado em uma modelagem estatística da morfologia para caracterizar e gerar um conjunto de partículas virtuais, morfologicamente representativo das partículas reais de lastro (Figura 4.7). Para validar esse banco de dados de partículas, parâmetros como área superficial, volume, raios médios e distribuições de esfericidade foram computadas e comparadas com os dados originais. Através da utilização do teste estatístico Kolmogorov-Smirnov, o trabalho apresentou resultados satisfatórios para ambas as abordagens (caracterização e geração), com valores de coeficiente de correlação entre 0,97 e 0,99. Os autores concluíram que o MED pode ser utilizado para avaliar o efeito da forma dos agregados no comportamento mecânico da camada de lastro ferroviário. A Figura 4.7 mostra a evolução da geração de uma partícula à medida que o número de faces é incrementado, de modo tal que esta fique mais próxima da partícula real.

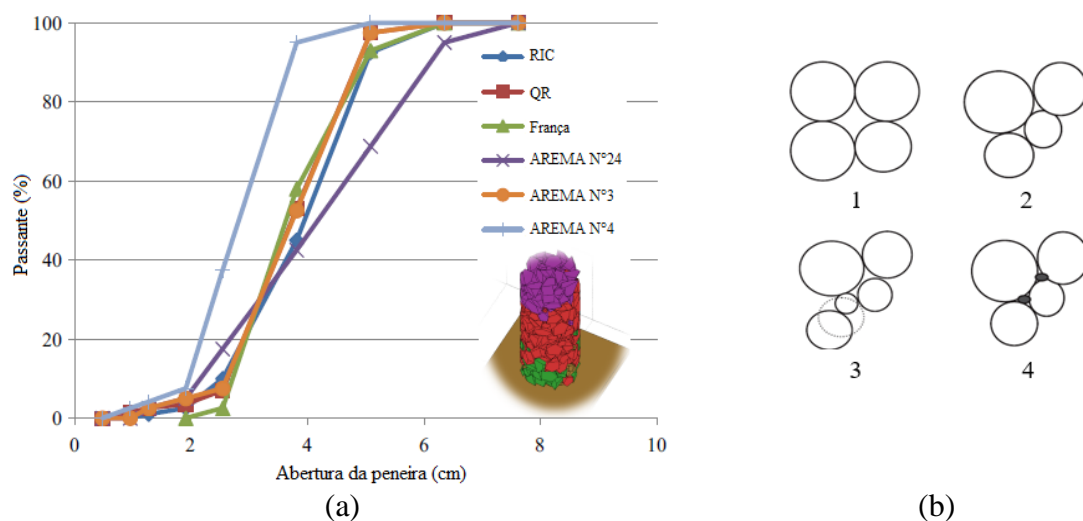
Figura 4.7 – Diferentes configurações para a geração da mesma partícula: a) 40 faces; b) 400 faces e c) 4.000 faces



Fonte: Ouhbi *et al.* (2016).

Bian *et al.* (2016) avaliaram os impactos da granulometria no espaço vazio da matriz granular do lastro e no desempenho da via permanente através de testes em laboratório e simulações numéricas em MED. A fase de modelagem para análise de espaço vazio foi realizada em amostra cilíndrica ($30,5 \times 100$ cm) com diferentes curvas granulométricas (*Rail Infrastructure Corporation* (RIC) e a *Queensland Rail* (QR), França, AREMA N° 24, N° 3 e N° 4) compostas por partículas com formatos irregulares (Figura 4.8a). Além disso, o volume de vazios foi avaliado para quatro diferentes cenários de empacotamento de partículas (Figura 4.8b). O cenário 1 representa uma graduação mais uniforme (AREMA N° 4), com geração de mais vazios. O cenário 2 representa uma graduação bem graduada, como menos vazios (AREMA N° 24, AREMA N°3 e RIC). O cenário 3 têm a presença de partículas de tamanhos menores e a redução do contato entre as partículas de tamanhos maiores (QR e França). O cenário 4 apresenta a densidade máxima, com partículas finas preenchendo os vazios proporcionados pelas partículas maiores. Os autores concluíram que partículas de lastro com tamanho em torno da metade do tamanho máximo nominal não são recomendáveis, pois reduzem os contatos entre as partículas e introduzem vazios adicionais à matriz granular (curva AREMA N° 4 com maior volume de vazios). Este fato diminui a densidade geral do lastro de modo a gerar a acomodação máxima do mesmo. A curva AREMA N° 24 em comparação a curva AREMA N° 4 apresentou menor volume de vazios (0,3463 em relação a 0,3669) devido a presença de partículas de tamanho mínimo (3,6 cm em relação a 5,6 cm).

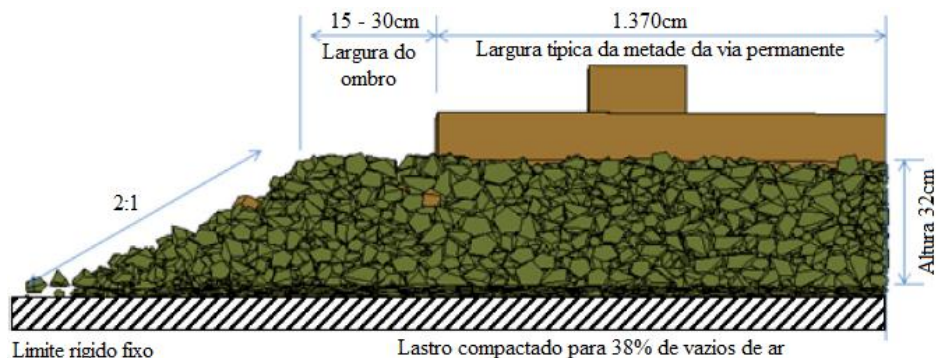
Figura 4.8 – Matriz granular de lastro ferroviário: a) curvas granulométricas e b) cenários de empacotamento constituídos de partículas esféricas



Fonte: Adaptado de Bian *et al.* (2016).

Ainda em Bian *et al.* (2016), na fase da modelagem da via (Figura 4.9), as granulometrias foram analisadas, com uma configuração validada por Huang (2010), quanto a influência das mesmas no deslocamento do lastro submetido ao ensaio de deformação permanente a 300 ciclos de carregamento. Bian *et al.* (2016) concluíram que materiais com curvas granulométricas uniformemente graduadas apresentaram maiores tendências de deformação sob atuação de cargas repetidas, mas que a existência de vazios no conjunto de agregados é fundamental para a drenagem. Os materiais com granulometrias enquadradas na faixa AREMA N° 24 (cenário 2, Figura 4.8b) apresentaram menor deformação permanente em relação àqueles enquadrados nas demais curvas avaliadas (24 mm em relação a valores superiores a 27 mm). No citado estudo, houve correspondência entre os resultados de ensaios realizados em laboratório e aqueles obtidos através da modelagem computacional.

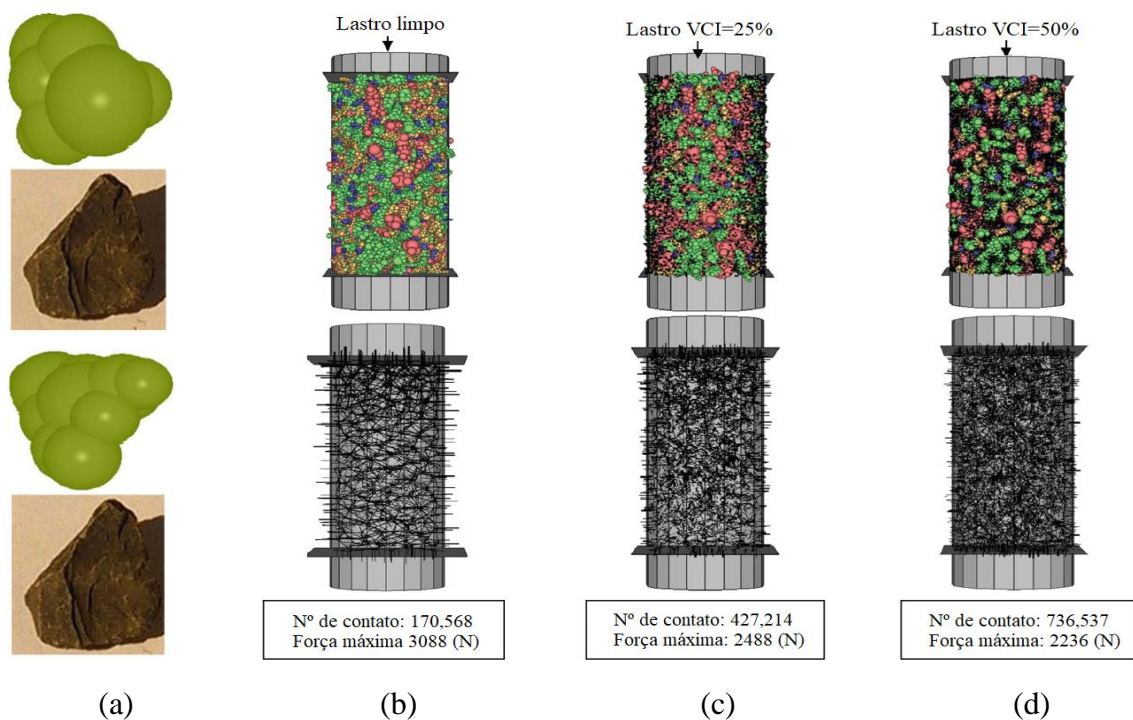
Figura 4.9 – Simulação em MED para análise de diferentes granulometrias



Fonte: Adaptado de Bian *et al.* (2016).

Ngo, Indraratna e Rujikiatkamjorn (2017) realizaram ensaios com carregamento triaxial em escala real para lastro limpo e degradado. A degradação do lastro, eventualmente também denominada “contaminação ou colmatagem”, foi definida através do uso do parâmetro Índice de Vazio Colmatado (*Void Contaminant Index – VCI*) (TENNAKOON *et al.*, 2012). A modelagem do ensaio triaxial (300 × 600 mm) foi realizada com o uso do MED com partículas de agregados em formatos de aglomerados de esferas (Figura 4.10a). As simulações mostraram que o ângulo de atrito entre as partículas diminui à medida que o grau de contaminação aumenta e que essa ferramenta em MED é essencial para obtenção de parâmetros que não podem ser facilmente identificados em laboratório como: forças de contato, orientação do contato e evolução da anisotropia de lastros limpos e contaminados. A distribuição de contato na modelagem foi avaliada em três diferentes cenários: lastro limpo (Figura 4.10b), lastro contaminado em 25% (Figura 4.10c) e lastro contaminado em 50% (Figura 4.10d). Observou-se, com o acréscimo do percentual de contaminante (que se refere às partículas de diferentes tamanhos em relação às iniciais), o aumento do número de pontos de contatos, porém uma redução da resistência (força máxima).

Figura 4.10 – Distribuições de forças de contato para materiais que compõem lastro limpo e contaminado em testes triaxiais simulados com o uso do MED: a) aglomerado de esferas; b) lastro limpo; c) VCI 25% e d) VCI 50%



Fonte: Adaptado de Ngo, Indraratna e Rujikiatkamjorn (2017).

González (2017) desenvolveu uma ferramenta de modelagem em MED para avaliação do comportamento mecânico dos materiais utilizados na camada de lastro ferroviário. Diante dos desafios encontrados no referido estudo, quanto às diferentes geometrias das partículas, foram escolhidos os métodos de aplicação de esferas com consideração de atrito superficial ao rolamento (variação de 0,0 a 1,0) para evitar rotações excessivas e formação de aglomerados de esferas. Ensaios laboratoriais foram realizados para calibrar as propriedades do material de lastro (ângulo de repouso, módulo de Young ou rigidez de contato entre partículas, coeficiente de atrito) e validar o código para a representação do comportamento do lastro, e assim reproduzir, numericamente, alguns exemplos de via permanente lastrada, pela ferramenta implementada por Irazábal, Salazar e Oñate (2015) e Irazábal, Salazar e Oñate (2017). Como resultados das análises, obtiveram-se respostas de variáveis de complexa obtenção em laboratório como: força resistente em diferentes seções do lastro, força de resistência lateral, velocidade das partículas e força de contato entre partículas.

Silva (2018) observou o desempenho do lastro construído com agregados utilizados em trechos de vias férreas no RJ através de seis cenários com diferentes configurações do pavimento ferroviário. Um modelo físico de verdadeira grandeza (tanque-teste) foi desenvolvido para análise do comportamento mecânico e das tensões e deformações permanentes resultantes das aplicações de ciclos de cargas, obtidas por instrumentação. Além disso, de posse dos parâmetros físicos (contato e morfologia dos agregados) foram desenvolvidas simulações com o uso do *software* Rocky4 com partículas poliédricas. As partículas simuladas foram previamente calibradas com a granulometria aplicada na construção das camadas do tanque e a proporção de partículas lamelares obtidas com o uso do AIMS, além da densidade do material (2,775) e seu ângulo estático de repouso (31°). Para o ângulo de atrito estático do material foi utilizado o valor de 0,3, conforme apresentado por Huang (2010). Os resultados das simulações mostraram que partículas maiores (37,5; 50 e 63 mm) sofrem maiores solicitações de carga, o que contribui para quebra e degradação destas partículas.

Rosa (2019) utilizou o mesmo tanque físico e *software* de simulação em MED avaliado por Silva (2018), mas investigou o efeito da granulometria e da litologia dos agregados no comportamento da camada de lastro ferroviário. A modelagem computacional utilizou parâmetros de quebra de partículas e mostrou que esta ferramenta é útil para obtenção de parâmetros de difícil obtenção em laboratório, como citado no estudo de González (2017). Os resultados obtidos em laboratório foram analisados juntamente com a morfologia das partículas e a modelagem do empacotamento em MED. Os resultados obtidos para as 9 curvas

granulométricas (escala reduzida) mostraram que o número de coordenação (relação entre o número de contatos total em uma simulação e o número de partículas no ambiente simulado) é um parâmetro bastante influenciado pela granulometria, com tendência de relação com os parâmetros de Coeficiente de Curvatura (CC) e Coeficiente de Não Uniformidade (CNU). O aumento do CC e do CNU proporcionou uma diminuição no número de coordenação para distribuição granulométrica da AREMA N°24. Quanto à quebra das partículas, pode-se identificar uma relação direta entre a degradação das partículas e o aumento do número de coordenação.

4.2.3 Geração de partículas 3D

Mollon e Zhao (2012) estabeleceram um processo de geração de partículas 2D proposto com base em conceitos de descritores de Fourier. Os autores mostraram que a média normalizada do espectro de Fourier para um grupo de partículas representou as características de forma dessas partículas. A normalização do espectro de Fourier para o contorno de uma partícula 2D é demarcado por uma nuvem de pontos, denominados de descritores de Fourier (Eq. 4.1).

$$D_n = \frac{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}{r_0} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde as expressões A_n , B_n e r_0 podem ser obtidas por Transformada de Fourier do contorno expresso em coordenadas polares (r , θ) e discretizadas em N pontos:

$$A_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_i \cos(i \cdot \theta_i)] \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$B_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_i (i \cdot \theta_i)] \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$r_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r_i] \quad (\text{Eq. 4.4})$$

A normalização, divisão por r_0 , garante que o modo D_0 apresente o raio médio das partículas) igual a 1. Para o modo D_1 , o centro das partículas corresponde a um deslocamento igual a 0. Dessa forma, uma determinada partícula pode ser construída a partir das duas nuvens de pontos, A_n e B_n , como uma soma de modos, como expressa a Equação 4.5.

$$r_i(\theta_i) = r_0 + \sum_{i=1}^N [A_n \cos(n\theta) + B_n \sin(n\theta)] \quad (\text{Eq. 4.5})$$

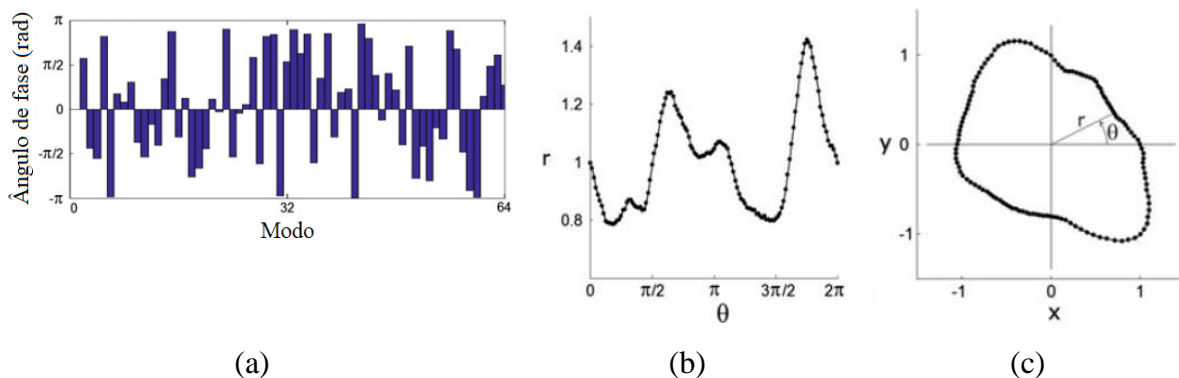
Mollon e Zhao (2012) identificaram que parte das informações no contorno inicial eram perdidas quando aplicada a Equação 4.1, sendo o parâmetro de ângulo de fase de cada modo n , expresso pela Equação 4.6, ausente nas análises. A inserção desse parâmetro permite que uma partícula aleatória com um espectro de amplitude prescrito (D_n) possa ser gerada atribuindo, aleatoriamente, uma fase ângulo δ_n para cada modo de ordem maior que 1. Cada ângulo aleatório deve seguir uma distribuição uniforme no intervalo $[-\pi; \pi]$, o que formará um contorno discretizado da partícula (Eq. 4.7 e Eq. 4.8). Os autores apresentaram vários exemplos de aplicações para a geração de contorno de partículas e mostraram que os descritores podem representar alguns parâmetros de forma (alongamento, arredondamento, circularidade e regularidade). A Figura 4.11 mostra a geração de uma partícula 2D pelo espectro de Fourier.

$$\delta_n = \tan^{-1}\left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad (\text{Eq. 4.6})$$

$$A_n = D_n \cdot \cos(\delta_n) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

$$B_n = D_n \cdot \sin(\delta_n) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Figura 4.11 – Geração de uma partícula 2D com 64 modos: a) ângulo de fase; b) discretização $r(\theta)$ e c) contorno da partícula em plano cartesiano



Fonte: Adaptado de Mollon e Zhao (2012).

Com o avanço do estudo, Mollon e Zhao (2013) apresentaram um método para gerar partículas 3D de areias usando os descritores de Fourier para aplicação em modelagem com MED mais realista. O modo de gerar os contornos 2D (MOLLON; ZHAO, 2012) foram utilizados como ponto de partida para a geração de uma partícula 3D. Os contornos 2D de uma partícula de areia e a distribuição dos ângulos de fase foram gerados para cada plano. Na

formação da partícula 3D, os contornos apresentam algumas incompatibilidades, sendo necessário fazer um processo de dimensionamento das mesmas. Esse dimensionamento suaviza os contornos sem que os espectros de Fourier originais sejam alterados. As padronizações dos mesmos são as seguintes:

$$OA_1 = OB_1 \text{ e } OA_3 = OB_3 \quad (\text{eixo } X) \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$OA_2 = OC_1 \text{ e } OA_4 = OC_3 \quad (\text{eixo } Y) \quad (\text{Eq. 4.10})$$

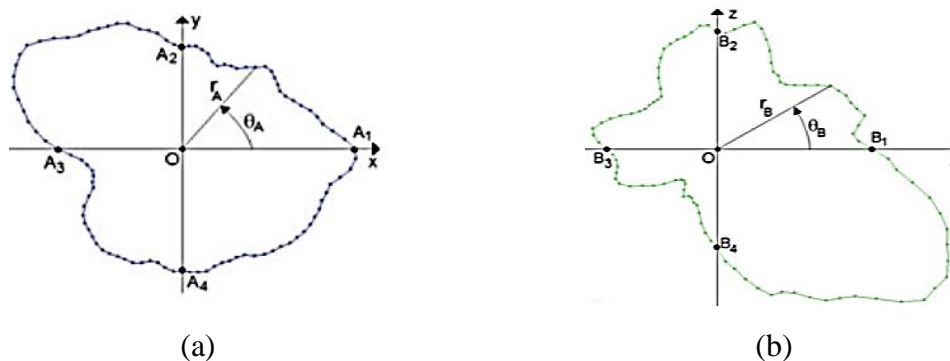
$$OB_2 = OC_2 \text{ e } OB_4 = OC_4 \quad (\text{eixo } Z) \quad (\text{Eq. 4.11})$$

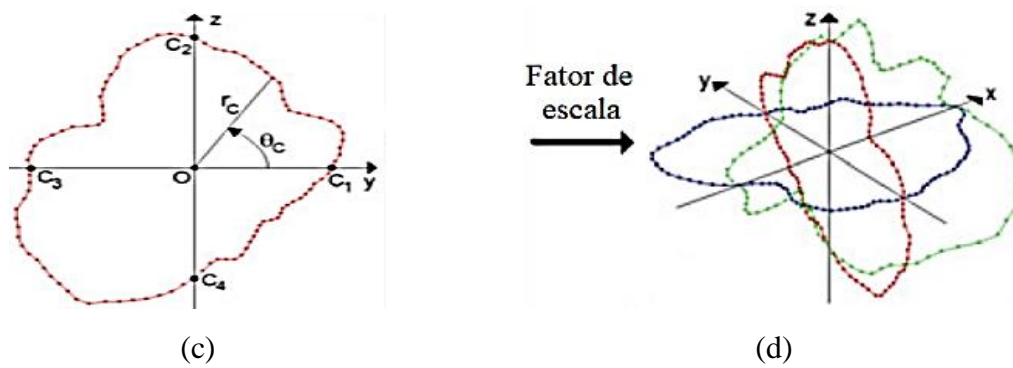
Para o eixo X (Eq. 4.9), os autores estabeleceram que os pontos de A_1 para A_4 são mantidos (Figura 4.12a), ou seja, a seção transversal xy . O contorno da seção transversal xz é isotrópico para alongar ou comprimir ($OA_1 = OB_1$). Para atingir a condição $OA_3 = OB_3$, uma pequena modificação na forma deve ser realizada, sendo que cada raio é corrigido através da multiplicação por um fator de correção δ_B que depende do ângulo θ_B (Figura 4.12b). Para os eixos Y (Eq. 4.10) e Z (Eq. 4.11), outro fator de correção similar foi aplicado (δ_C) a cada raio de contorno yz (Figura 4.12c) como uma função do ângulo θ_C . Deste modo, as Equações de 4.12 a 4.15 apresentam os fatores de correções dos pontos de C_1 a C_4 . Após a realização dos processos de dimensionamento (escalamento), os três contornos 2D tornam-se compatíveis (Figura 4.12d).

$$\delta_1 = \frac{OA_2}{OC_1} \quad (\text{Eq. 4.12}) \quad \delta_2 = \frac{OB_2}{OC_2} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

$$\delta_3 = \frac{OA_4}{OC_3} \quad (\text{Eq. 4.14}) \quad \delta_4 = \frac{OB_4}{OC_4} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Figura 4.12 – Contorno 2D com seus respectivos planos: a) plano xy ; b) plano xz ; c) plano yz e d) contorno 2D em escala para o espaço 3D

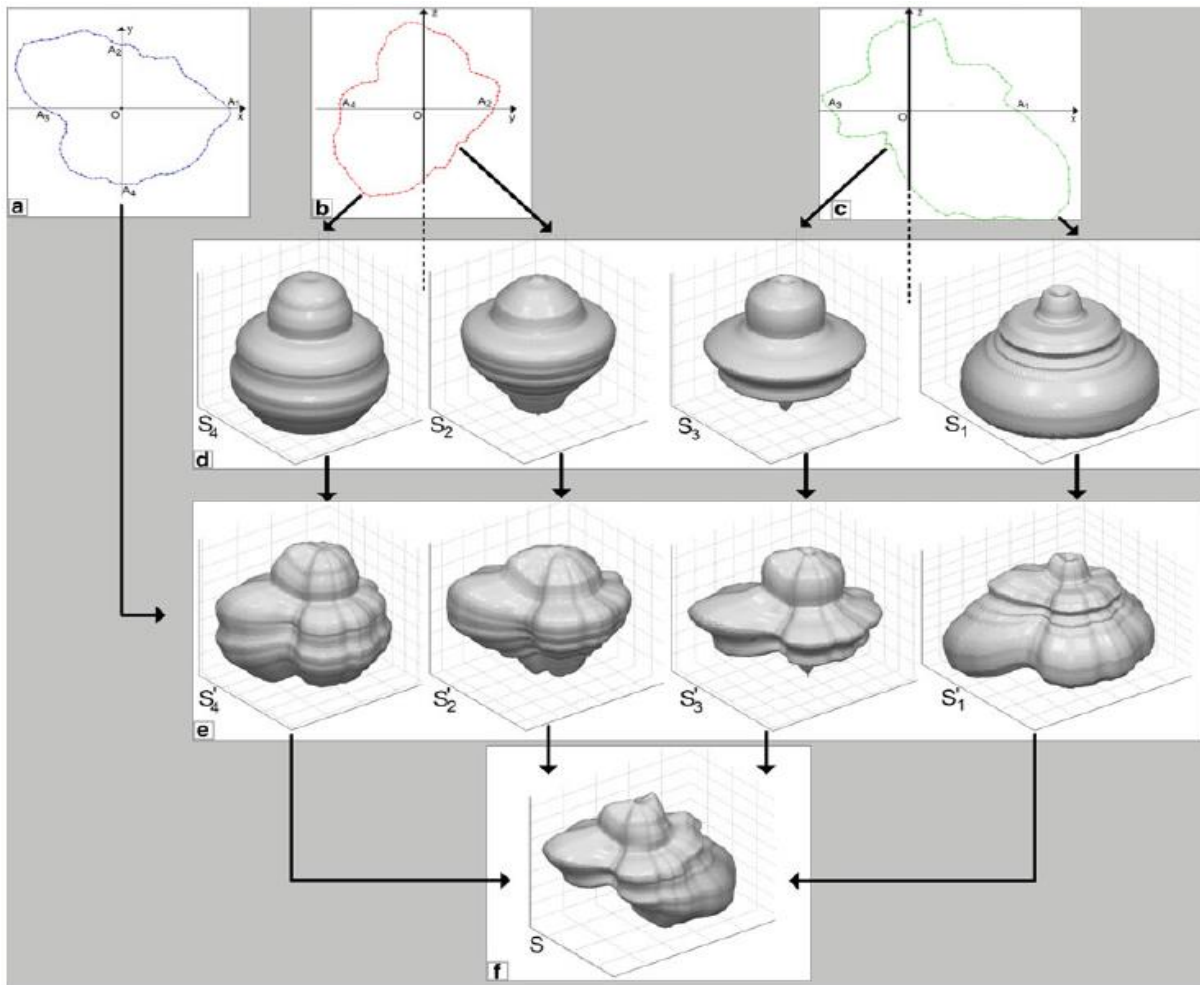




Fonte: Adaptado de Mollon e Zhao (2013).

Para a geração 3D da partícula, Mollon e Zhao (2013) consideraram as duas seções transversais nos planos verticais xz e yz (Figuras 4.12b e 4.12c). Cada seção foi dividida em duas metades com relação ao eixo z (Figuras 4.13b e 4.13c). Em seguida, a partir de cada subseção, gerou-se um sólido de revolução (S_1 a S_4) em torno do eixo z (Figura 4.13d). O segundo passo, envolve a geração de quatro novos sólidos (S_1' a S_4') derivados dos sólidos S_1 a S_4 . Nessa fase, os sólidos de revolução S_1' a S_4' (Figura 4.13e) são gerados com a interação da seção transversal horizontal, previamente definida no plano xy (Figura 4.13a). De modo simplista, ocorre uma multiplicação de cada raio por um fator de correção para corresponder a seção transversal desejada (xy), mas sem ocorrer alteração dos descritores. O último passo foi a geração da partícula sólida final S (Figura 4.13f) formada pela junção dos quatro sólidos de S_1' a S_4' . Nesse passo, os pontos de raios e ângulos, diante da transformação entre os quatro sólidos, foram obtidos e um processo de interpolação para a formação do sólido final foi aplicado.

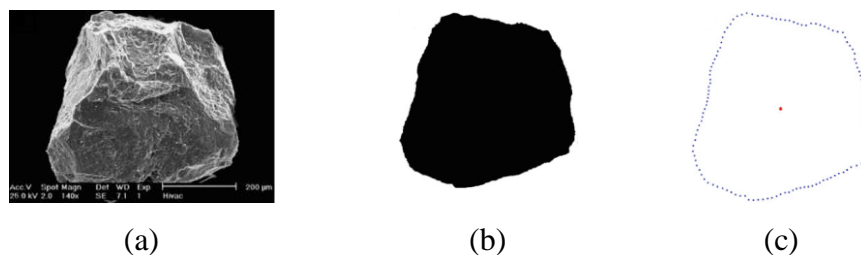
Figura 4.13 – Procedimentos para a geração da partícula 3D: a) seção xy; b) seção yz; c) seção xz; d) sólidos S_1 a S_4 ; e) sólidos S_1' a S_4' e f) sólido final



Fonte: Mollon e Zhao (2013).

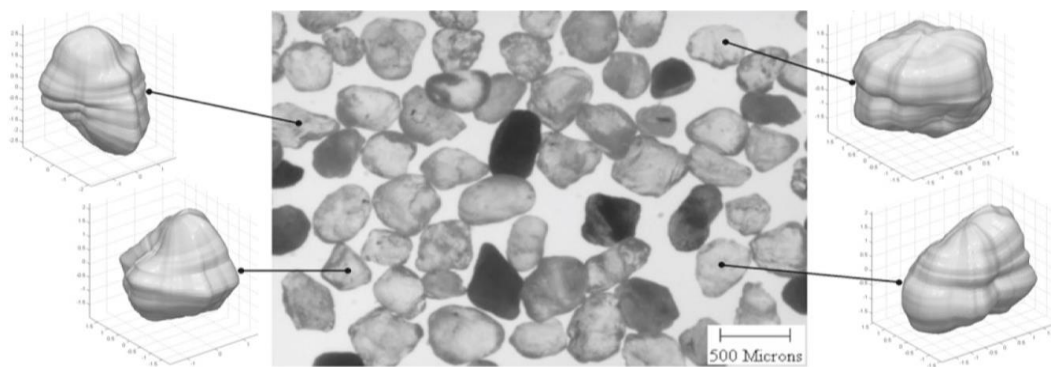
Mollon e Zhao (2013) avaliaram o método proposto com a geração 3D de seis tipos de areias, sendo necessárias correções na suavidade e no arredondamento nas seções para calibrar o modelo. Diante dos ajustes, os resultados apresentaram consistência em comparação às propriedades das areias reais, sendo o método validado para outros três tipos de areias. Para a validação, imagens das partículas de areia geradas através de um microscópio eletrônico de varredura foram obtidas, estas passaram pelo processo de discretização e formação da nuvem de pontos utilizando descritores de Fourier através de um algoritmo de programação aplicado no MATLAB (Figura 4.14). Em seguida, realizou-se o processo de dimensionamento para contornos ortogonais em 2D e de revolução para gerar a partícula 3D (Figura 4.15).

Figura 4.14 – Estágio de experimento computacional por espectro de Fourier: a) imagem digital; b) processamento de imagem e c) discretização e geração do contorno da partícula



Fonte: Mollon e Zhao (2013).

Figura 4.15 – Imagens de amostras de areia e partículas 3D geradas de modo aleatório por descritores de Fourier



Fonte: Mollon e Zhao (2013).

Ressalta-se que o estudo mencionado anteriormente apresenta três limitações: (i) a técnica de extrapolação (revolução dos perfis 2D) gera fendas ou saliências nas partículas nas direções verticais e horizontais (Figura 4.15), a qual pode conduzir a uma distribuição anisotrópica das irregularidades da forma; (ii) este método gera partículas com superfícies delimitadas por arestas vivas (“quinas”), sendo uma perda de informação para a configuração da superfície da partícula em decorrência da Equação 4.1; e (iii) os três contornos 2D eleitos podem ser muito arbitrários e afetar a morfologia 3D gerada de uma maneira pouco realista. Diante das limitações e na tentativa de gerar partículas 3D mais realistas, Mollon e Zhao (2014) alteraram o estudo com aplicação de propriedades estatísticas. Os citados autores propuseram um método baseado na teoria dos campos aleatórios junto com os descritores de forma de Fourier. O método admite uma partícula na forma tipo de “estrela”, pela fácil definição de um centro O para o qual, em qualquer direção de espaço delimitada por dois ângulos (θ, φ) , existe exatamente uma interseção com a superfície externa da partícula a uma distância deste centro (Figura 4.16a), sendo a distância determinada de raio (R). Assim, a superfície externa de uma

partícula pode ser definida, completamente, mediante uma função contínua expressa em termos de R a partir do centro O (Eq. 4.16):

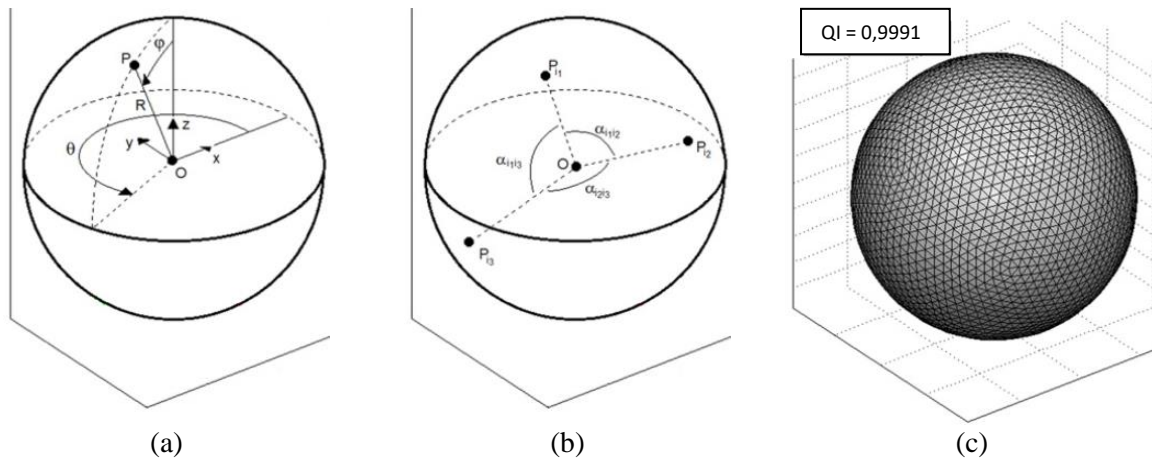
$$R(\theta, \varphi) \text{ con } 0 \leq \theta \leq 2\pi \text{ y } 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Esta função tem propriedade periódica adequada para definir uma topologia esférica, ou seja, quando R for constante implicará em uma partícula com representação de uma esfera perfeita. Por outro lado, através das propriedades matemáticas desta função é possível gerar formas aleatórias com características controladas diante de um campo aleatório definido em um domínio esférico. Assim, o valor local da função R para qualquer ponto (θ, φ) constitui uma variável aleatória, com especificações de valor médio, desvio padrão e função de densidade de probabilidade. Além disso, para qualquer par de pontos (P_{i_1}, P_{i_2}) , as duas variáveis aleatórias (R_{i_1}, R_{i_2}) estão vinculadas por um coeficiente de correlação $\rho_{i_1 i_2}$ (Eq. 4.17) que depende da posição de dois pontos (P_{i_1}, P_{i_2}) .

$$\rho_{i_1 i_2} = \rho(\theta_{i_1}, \varphi_{i_1}, \theta_{i_2}, \varphi_{i_2}) \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Para que as características da forma da partícula sejam estatisticamente isotrópicas e invariantes em relação à posição angular, é necessário que o coeficiente de correlação $\rho_{i_1 i_2}$ seja independente das posições absolutas de P_{i_1} e P_{i_2} e seja só uma função do ângulo $\alpha_{i_1, i_2} = \widehat{P_{i_1} O P_{i_2}}$ entre os dois pontos (Figura 4.16b). Esta função é chamada de função de autocorrelação $\rho(\alpha)$ e descreve a forma com que a correlação entre os raios de dois pontos evolui com sua distância angular. O campo aleatório pode ser descrito por completo mediante a função de densidade de probabilidade do raio e a função de autocorrelação que deve ser definida cuidadosamente para descrever adequadamente os padrões aleatórios das irregularidades da forma da partícula. A Figura 4.16c apresenta a discretização da superfície da esfera unitária baseada no conceito de estruturas geodésicas. A superfície externa da esfera está representada por uma coleção de 5.130 faces triangulares, delimitadas pelos segmentos que unem 2.562 pontos, com um raio constante e com aproximação de uma esfera (Quociente Isoperimétrico – QI – de 0,9991 no lugar de 1).

Figura 4.016 – Descrição da forma: a) representação esférica; b) ângulos α entre diferentes pontos e c) estrutura geodésica usada para aproximar as formas “estrela”



Fonte: Mollon e Zhao (2014).

Conforme Mollon e Zhao (2014), todas as coordenadas angulares (θ_i, φ_i) dos 2.562 pontos podem ser conhecidas, e os ângulos α_{i_1, i_2} entre qualquer par de pontos podem ser calculados utilizando geometria básica, o que conduz à seguinte matriz de ângulos (Eq. 4.18):

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_{1\ 1} & \dots & \alpha_{1\ 2562} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{2562\ 1} & \dots & \alpha_{2562\ 2562} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Dada uma função de autocorrelação $\rho(\alpha)$, é possível calcular a matriz de correlação que vincula as 2.562 variáveis aleatórias R_i (Eq. 4.19):

$$[\rho] = \rho([\alpha]) = \begin{bmatrix} \rho(\alpha_{1\ 1}) & \dots & \rho(\alpha_{1\ 2562}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(\alpha_{2562\ 1}) & \dots & \rho(\alpha_{2562\ 2562}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{1\ 1} & \dots & \rho_{1\ 2562} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{2562\ 1} & \dots & \rho_{2562\ 2562} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

A matriz de correlação é a ferramenta principal para a realização prática dos campos aleatórios na geração de partículas. Para que os 2.562 vértices sigam uma distribuição multivariada gaussiana clássica e, portanto, para que a correlação de raios R_i seja um campo aleatório discreto real, a matriz $[\rho]$ deve ser simétrica definida positiva (número real positivo), e todos os términos diagonais ρ_{ii} devem ser iguais a 1. Das duas condições, a primeira restringe fortemente a escolha da função de autocorrelação $\rho(\alpha)$, enquanto a segunda somente impõe $\rho(0) = 1$.

Ainda sobre o estudo citado, os autores aplicaram o método de estimação linear de expansão proposto por Taylor *et al.* (2006). Este método permite a geração aleatória de N

variáveis aleatórias gaussianas multivariantes $\{R\}$ definidas pelo seu vetor $N \times 1$ de valores médios $\{\mu\}$ e sua matriz de covariância (C) de $N \times N$ de término geral seguinte (Eq. 4.20):

$$C_{i_1 i_2} = \rho_{i_1 i_2} \cdot \sigma_{i_1} \cdot \sigma_{i_2} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

Sendo, σ_i o desvio padrão da variável aleatória R_i . No caso, N é igual a 2.562. Pode-se obter uma realização aleatória dada pela Equação 4.21:

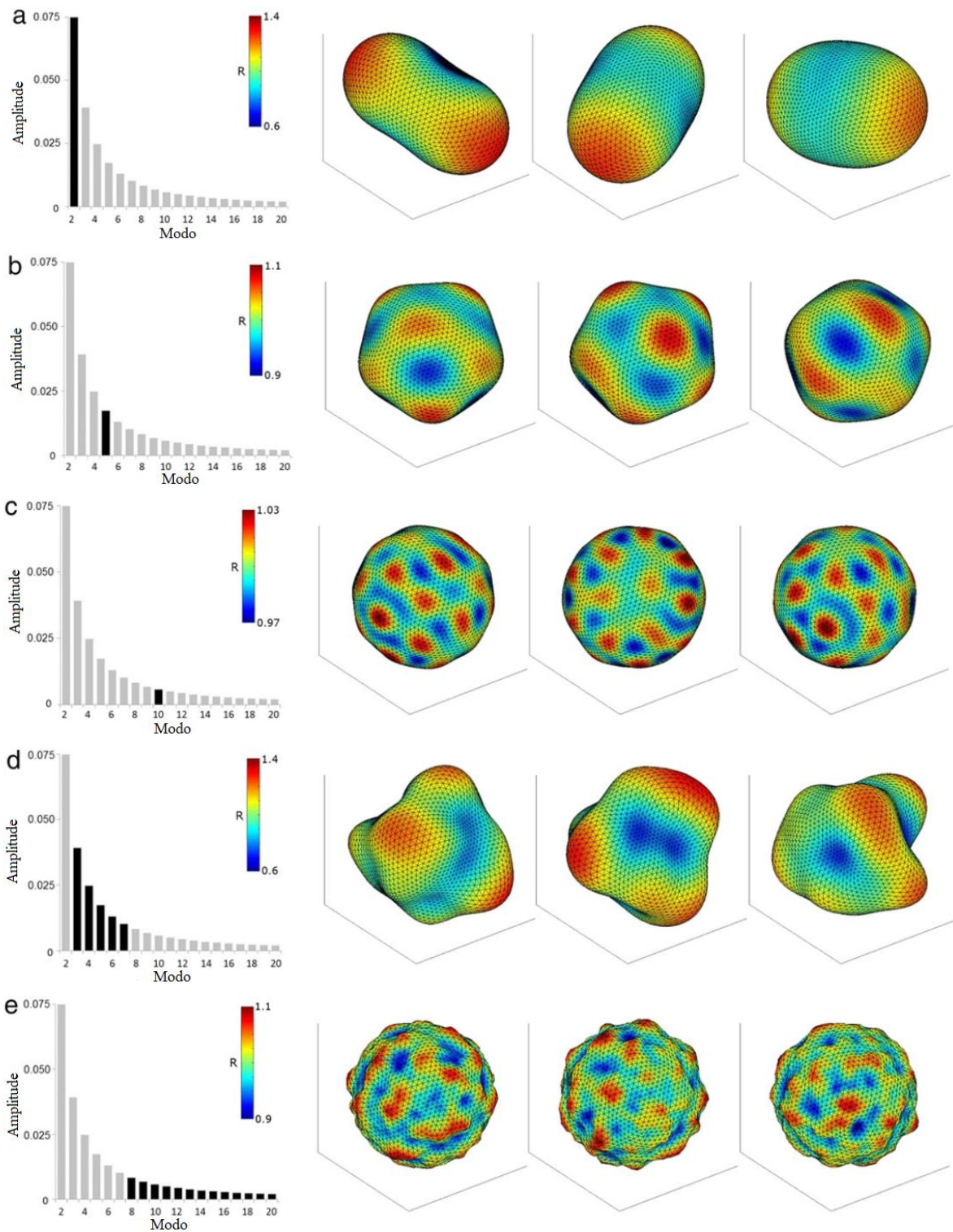
$$\{R\} = \{\mu\} + \sum_{j=1}^{2562} \varepsilon_j \cdot \sqrt{\lambda_j} \cdot \{\Phi_j\} \quad (\text{Eq. 4.21})$$

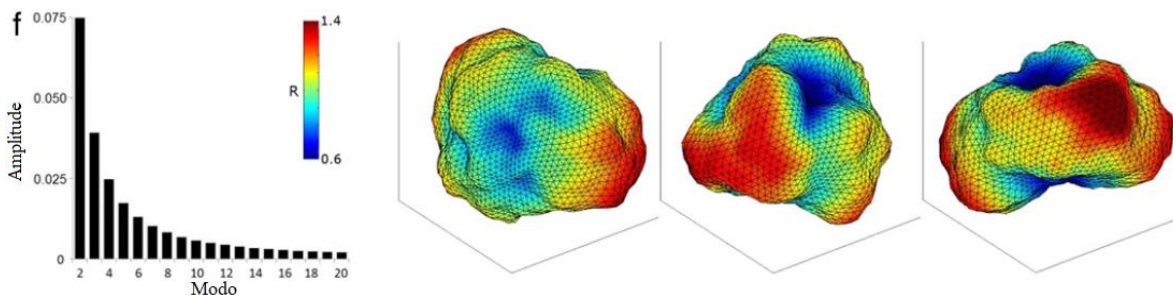
Nessa expressão, λ é o j -ésimo valor próprio da matriz de covariância (C), $\{\Phi_j\}$, é o vetor próprio correspondente, e ε_j é uma variável aleatória gaussiana com média zero e variância unitária. A Equação 4.21 permite criar uma realização aleatória de um vetor de variáveis correlacionadas R_i com as variáveis aleatórias não correlacionadas ε_j que podem ser geradas automaticamente mediante qualquer programa computacional comercial, por exemplo o MATLAB. Entretanto, esta ação requer que todos os valores próprios de C sejam positivos, que é a razão pela qual a matriz de covariância, por sua vez a matriz de correlação, deve ser simétrica definida positiva.

A Figura 4.17 apresenta um exemplo de aplicação utilizando o método descrito por Mollon e Zhao (2014). Pode-se considerar um espectro de Fourier normalizado com $D_0 = 1$, $D_1 = 0$, $D_2 = 0,075$ e com decaimento logarítmico na base 2, conforme descrito em Mollon e Zhao (2012) com um parâmetro -1,6 para modos mais altos (ex. $2^{-1.6 \log_2(k/2) + \log_2 D_2}$ para $3 \leq k \leq 64$).

Para cada linha que representa a amplitude (Figura 4.17), um ou mais modos do espectro são mantidos (apresentação na cor preta), enquanto os outros modos são definidos como zero (apresentação na cor cinza) e três partículas são geradas aleatoriamente com a parcial resultante do espectro. Para essas gerações, a Equação 4.21 foi utilizada com valores médios $\{\mu\}$ iguais a 1 para todas as variáveis aleatórias que compõem $\{R\}$. Isso é necessário para que a amplitude dos modos seja consistente, dado que os espectros de Fourier são normalizados. Se necessário, outros tamanhos de partículas podem ser obtidos após a geração das mesmas, simplesmente aplicando um fator de escala a todos os raios gerados.

Figura 4.17 – Lado esquerdo: modos considerados de um espectro de Fourier ilustrativo (em preto e cinza); Lado direito: três partículas aleatórias geradas com este espectro: a) Modo 2; b) Modo 5; c) Modo 10; d) Modos 3-7; e) Modos maiores que 8 e f) Espectro completo





Fonte: Adaptado de Mollon e Zhao (2014).

A Figura 4.17a apresenta as partículas geradas apenas pela consideração do modo D_2 , sendo partículas alongadas em uma determinada direção. Enquanto o alongamento é controlado pelo valor de D_2 por média, a aleatoriedade é preservada em termos de amplitude (em torno desta média) e direção. As Figuras 4.17b e 4.17c apresentam, respectivamente, os modos 5 e 10. Aparentemente as partículas geradas são aleatórias, mas estas exibem periodicidade e amplitude controladas em suas irregularidades de forma. A periodicidade é controlada pelo número do modo e a amplitude pelo valor do modo. As Figuras 4.17d e 4.17e consideram conjuntos diferentes de modos, seguindo a estrutura apresentada em Mollon e Zhao (2012). Os modos $D_3 - D_7$ (Figura 4.17d) fornecem controle sobre as principais irregularidades da forma sem introduzir rugosidade da superfície, enquanto os modos $D > 7$ (Figura 4.17e) fornecem controle da rugosidade da superfície sem modificar as formas esféricas globais de uma partícula. Como consequência, o controle sobre uma forma de partícula pode ser alcançado ajustando apenas três parâmetros: D_2 , D_3 (modos $D_4 - D_7$ sendo obtidos por decaimento logarítmico de D_3 com um parâmetro de -1,6), e D_8 (modos $D > 8$ obtidos por decaimento logarítmico de D_8 com um parâmetro de -1,6). Na Figura 4.17f as três partículas são geradas considerando o espectro completo, o que demonstra a capacidade do método proposto para caracterizar a complexidade das formas das partículas.

Mollon e Zhao (2014) caracterizaram 2.000 partículas e mostraram, com o método proposto, a influência dos modos D_2 , D_3 e D_8 em seis descritores de formas clássicos: planicidade, alongamento, proporção, arredondamento, esfericidade e QI. No caso de valores D_2 como 0,10-0,15, os valores médios de planicidade e alongamento são menores que 0,75 e as proporções médias menores que 0,6. No entanto, as dispersões dessas proporções aumentam com D_2 . Um aumento em D_2 também tende a diminuir a esfericidade das partículas geradas, mas tem um efeito limitado no QI e desprezível no arredondamento das partículas. A influência do parâmetro D_3 depende dos outros modos do espectro. Se todos os outros modos (D_2 e $D > 7$) estão definidos como zero, um aumento na D_3 ocasiona uma diminuição de todos os seis

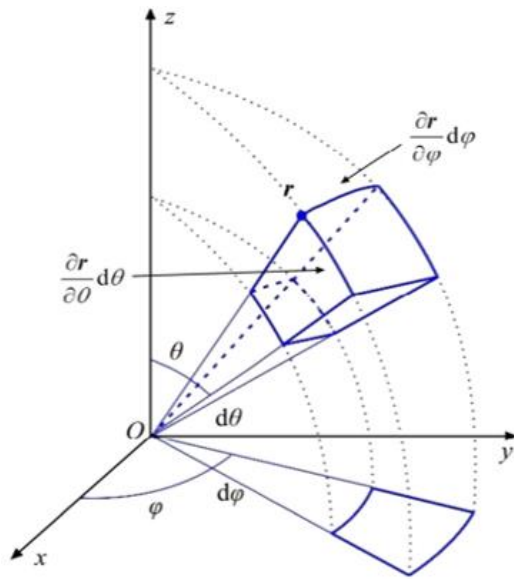
descritores de forma, especialmente o arredondamento, a esfericidade e o QI. Se os outros modos são diferentes de zero, sua influência na planicidade, no alongamento, na proporção e no arredondamento é limitada. O parâmetro D_8 não influencia em razões de dimensão principal como planicidade, alongamento e proporção, apenas controla a rugosidade da superfície e apresenta influência limitada na esfericidade. Um aumento em D_8 leva a uma forte diminuição do arredondamento das partículas e seu QI.

Os estudos anteriores se concentraram na obtenção de características de contorno externo de partículas em 2D com avanços para a obtenção do contorno externo de partículas em 3D (MOLLON; ZHAO, 2012; 2013; 2014). No entanto, estas aplicações envolvem perdas de informações devido a escolha artificial de três seções ortogonais do perfil original da superfície, o que gera inconsistência entre as partículas reconstruídas e a original, principalmente quando a partícula é irregular. Com o desenvolvimento de técnicas de digitalização 3D, a determinação dos contornos externos das partículas se tornou mais conveniente.

Shi *et al.* (2017) desenvolveram caracterização e reconstrução aleatória da micromorfologia das partículas 3D com aplicação de análise harmônica esférica. As harmônicas esféricas são um conjunto completo de funções ortogonais definidas na superfície de uma esfera. As informações relacionadas aos contornos externos das partículas foram obtidas por técnicas de digitalização 3D. De início, as imagens das partículas foram processadas por meio de técnicas de imagiologia, como segmentação e binários, baseadas na eliminação de ruído (remoção de pontos desconectados), com o reconhecimento dos limites e a parametrização esférica, resultando em um conjunto de matrizes 3D utilizando coordenadas de cada *pixel*. A triangulação de Delaunay é usada para obter a malha dos contornos externos das partículas.

Conforme este estudo citado anteriormente, para uma partícula 3D arbitrária, assume-se que o centroide está na origem das coordenadas. Os pontos no contorno externo da partícula podem ser obtidos por coordenadas esféricas como mostrado na Figura 4.18. A distância entre o centroide e um ponto na superfície pode ser descrita como $r(\theta, \varphi)$, associada com as coordenadas esféricas correspondentes (θ, φ) , onde $0 \leq \theta \leq \pi$ e $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Todos os pontos na superfície das coordenadas esféricas podem ser transformados em coordenadas cartesianas (Eq. 4.22).

Figura 4.18 – Diagrama ilustrativo de pirâmide retangular infinitesimal em um sistema de coordenadas esféricas.



$$\begin{aligned}x_{ij} &= R_{ij} \sin \theta_i \cos \varphi_j \\y_{ij} &= R_{ij} \sin \theta_i \sin \varphi_j \\z_{ij} &= R_{ij} \sin \theta_i\end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.22})$$

Fonte: Shi *et al.* (2017).

As equações acima (Eq. 4.22) são viáveis para as partículas do tipo "estrela", onde cada conjunto de (θ, φ) corresponderia a apenas um valor de raio polar, o que torna o resultado único. Então, a função coordenada completa de qualquer ponto na superfície da partícula pode ser expressa como uma expansão das seguintes séries harmônicas esféricas (Eq. 4.23):

$$r(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n a_n^m Y_n^m(\theta, \varphi) \quad (\text{Eq. 4.23})$$

Sendo, $r(\theta, \varphi)$ um conjunto de raios polares para (θ, φ) ; $Y_n^m(\theta, \varphi)$ a função harmônica esférica apresentada na Equação 4.24; e a_n^m os correspondentes coeficientes harmônicos esféricos cujos valores devem ser calculados.

$$Y_n^m(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos(\theta)) e^{im\varphi} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

Combinando as Equações 4.23 e 4.24, obtém-se:

$$r(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n a_n^m \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos(\theta)) e^{im\varphi} \quad (\text{Eq. 4.25})$$

Sendo, $P_n^m(x)$ a função de Legendre associada; n um número inteiro entre 0 e infinito; m um número inteiro entre 0 e n .

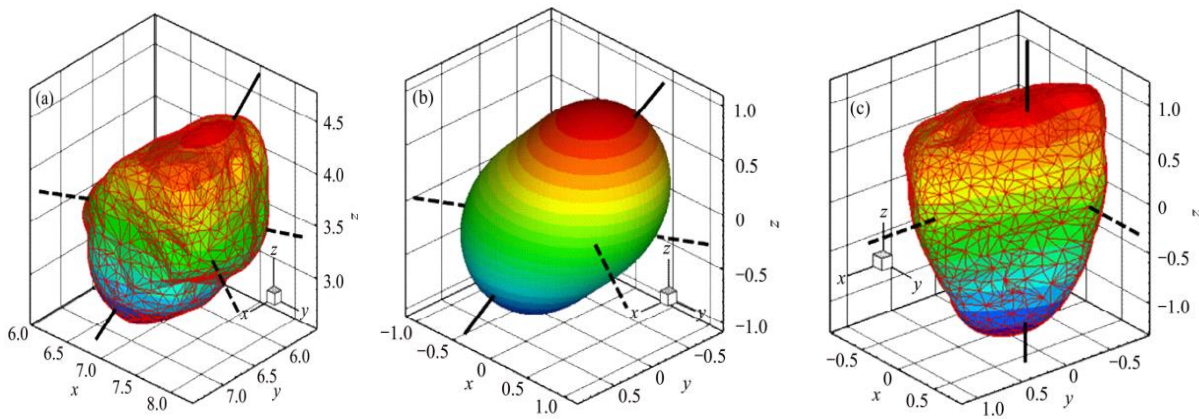
Tomando os pontos de superfície parametrizados $r(\theta, \varphi)$, como a entrada no lado esquerdo da Equação 4.26, pode-se estendê-la a uma matriz, conforme Equação 4.26:

$$\begin{bmatrix} Y_1^1 & Y_1^2 & \dots & Y_1^{(n+1)^2} \\ Y_2^1 & Y_2^2 & \dots & Y_2^{(n+1)^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_i^1 & Y_i^2 & \dots & Y_i^{(n+1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^1 \\ a^2 \\ \vdots \\ a^{(n+1)^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_i \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 4.26})$$

Sendo, n a ordem utilizada nas funções harmônicas esféricas; o vetor linha $Y_i = [Y_i^1 \ Y_i^2 \ \dots \ Y_i^{(n+1)^2}]$ é uma sequência harmônica esférica do ponto i . O vetor coluna dos coeficientes a_n^m tem $(n + 1)^2$ coeficientes desconhecidos no total, se n for conhecido. O vetor coluna dos coeficientes pode ser calculado resolvendo a i -ésima equação linear. Então, os pontos do contorno devem ser maiores que $(n + 1)^2$. Logo, a Equação 4.26 pode ser usada para alcançar a solução ótima; a_n^m pode ser utilizado como o descritor característico para a reconstrução da micromorfologia de partículas baseado na Equação 4.23. O método dos mínimos quadrados pode ser aplicado para solucionar estas equações.

Shi *et al.* (2017) estabeleceram, na geração aleatória das partículas reconstruídas, a aplicação de um método estatístico com as partículas reais ao invés de explorar as partículas uma a uma. Dessa forma, uma quantidade elevada de partículas reconstruídas pode ser obtida a partir de um número limitado de partículas de amostras digitalizadas. A distribuição normal pode ser aplicada aos descritores harmônicos esféricos para derivar as principais variáveis estatísticas para a reconstrução morfológica. A Figura 4.19a mostra uma partícula com o seu contorno externo em malha usando o método Delaunay e com coordenadas aleatórias. A fim de melhorar a análise estatística das superfícies das partículas, cada centroide deslocado para a origem das coordenadas esféricas e os vértices das superfícies originais devem ser rotacionados para coincidir com as direções principais (linha contínua) determinadas pelo elipsóide obtido pela sua reconstrução de primeira ordem. A partícula mostrada na Figura 4.19b é rotacionada para ficar paralela aos eixos de coordenadas globais e é mostrada na forma rotacionada na Figura 4.19c. Como consequência da similaridade das partículas, o raio da partícula não pode ser alterado. Este processo é chamado de padronização de partículas. Finalmente, os coeficientes harmônicos esféricos das partículas padronizadas podem ser calculados depois que o processo padronizado é repetido com base na análise esférica da função harmônica.

Figura 4.19 – Processo de padronização: a) partícula arbitrária em uma direção aleatória; b) elipsoide de primeiro grau com centroide deslocado à origem das coordenadas esféricas, eixo longo e curto indicados e c) vértices de superfícies rotados paralelos aos eixos de coordenadas globais segundo o elipsoide de primeiro grau.



Fonte: Shi *et al.* (2017).

A variância da média e do desvio padrão dos coeficientes harmônicos esféricos pode ser analisada estatisticamente com base nos descritores harmônicos esféricos de um número limitado de uma amostra de partículas digitalizadas. Os coeficientes harmônicos esféricos padronizados podem produzir uma variedade de partículas reconstruídas aleatoriamente, considerando um coeficiente relacionado, e as partículas de reconstrução aleatórias geradas têm as mesmas características das partículas padronizadas. O coeficiente harmônico esférico alterado pode ser expresso da seguinte forma (Eq. 4.27):

$$a_n^m = \overline{a_n^m} + \sigma_n^m \cdot \xi \quad (\text{Eq. 4.27})$$

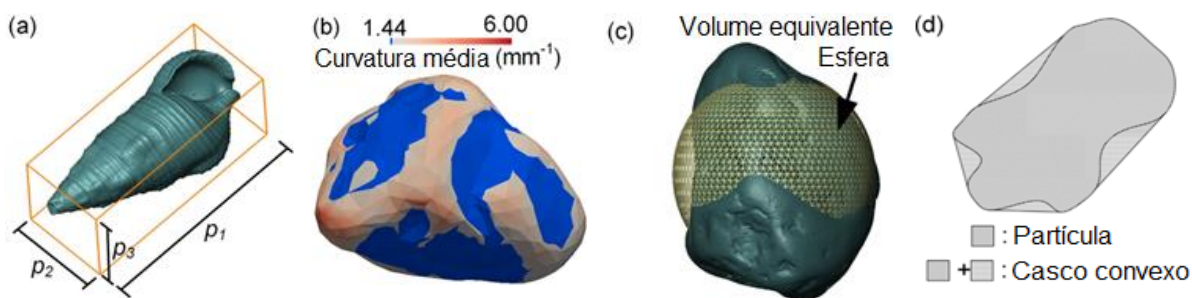
Sendo, $\overline{a_n^m}$ a expectativa de coeficientes harmônicos esféricos de partículas padronizadas; σ_n^m o desvio padrão mencionado acima, e $\xi \in [-3, 3]$ o coeficiente de variação que satisfaz as necessidades da distribuição normal. Partículas aleatoriamente reconstruídas podem ser geradas pelo controle da mudança em ξ , o que leva ao aparecimento de partículas de reconstrução geradas com características relevantes.

Shi *et al.* (2017) analisaram quatro tipos de partículas e os resultados mostraram que os contornos externos das partículas se tornam mais próximos do valor teórico à medida que n aumenta. A superfície pareceu suave em números de pedidos de reconstrução baixos. Como o número de ordem de reconstrução harmônica esférico aumenta, os detalhes sobre as superfícies das partículas, gradualmente, se tornaram discerníveis. Quando n atingiu 10, os

erros relativos à área e volume oscilam em torno de 5%, conforme indicado pela comparação entre os valores detectado e teórico, indicando que os valores foram similares.

Wei, Wang e Zhao (2018) desenvolveram um método de geração de partículas com harmônicas esféricas, mas aplicaram uma operação inversa, ou seja, construíram matrizes de coeficientes harmônicos esféricos para uma partícula com características conhecidas. Os citados autores se basearam no método de quantificação de seis parâmetros de forma de partículas proposto por Zhao e Wang (2016) para quantificar a forma, arredondamento e compacidade. A forma é representada pela relação das dimensões das partículas (Figura 4.20a) de modo a identificar o Índice de Alongamento (IA), o Índice de Planicidade (IP) e a Razão de aspecto Característica (RC), valor médio dos índices anteriores. O arredondamento é quantificado com a distribuição da curvatura local na superfície da partícula com 1.280 elementos triangulares. Zhao e Wang (2016) mostraram que a rugosidade da superfície é efetivamente removida e os cantos das partículas são devidamente identificados com esse nível de simplificação da superfície. O índice de arredondamento da curvatura média (R_M) é avaliado nos cantos pela curvatura média local ponderada pela área (Figura 4.20b). A compacidade representa a esfericidade e a convexidade. A esfericidade compara a área da superfície de uma partícula e sua esfera equivalente ao volume (Figura 4.20c). A convexidade reflete a proximidade com que uma partícula representa um casco convexo (Figura 4.20d).

Figura 4.20 – Ilustração dos parâmetros de forma: a) proporções ($IA = p_2/p_1$, $IP = p_3/p_2$, $RC = (IA + IP)/2$); b) índice de arredondamento da curvatura média (R_M); c) esfericidade e d) convexidade



Fonte: Adaptado de Zhao e Wang (2016).

A parametrização de superfície decompõe uma superfície de partícula 3D em três direções ortogonais, assim como permite estabelecer uma ligação entre coeficientes harmônicos esféricos e parâmetros clássicos de forma (ZHAO; WEI; WANG, 2017). Este é um método utilizado para criar um mapeamento contínuo e uniforme da superfície da partícula para uma

esfera unitária. A parametrização esférica resulta em um mapeamento objetivo entre cada ponto em uma superfície e um par de coordenadas esféricas (Eq. 4.28):

$$\mathbf{v}(\theta, \phi) = (x(\theta, \phi), y(\theta, \phi), z(\theta, \phi))^T \quad (\text{Eq. 4.28})$$

Onde, $(x(\theta, \phi), y(\theta, \phi), z(\theta, \phi))^T$ são as coordenadas cartesianas de um vértice, enquanto $\theta \in [0, \pi]$ e $\phi \in [0, 2\pi]$ são as coordenadas latitudinais e longitudinais, respectivamente.

A coordenação dos vértices na superfície de uma partícula pode ser representada por expansão harmônica esférica (Eq. 4.29):

$$\begin{pmatrix} x(\theta, \phi) \\ y(\theta, \phi) \\ z(\theta, \phi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{l=0}^{l_{max}} \sum_{m=-l}^l c_{x,l}^m Y_l^m(\theta, \phi) \\ \sum_{l=0}^{l_{max}} \sum_{m=-l}^l c_{y,l}^m Y_l^m(\theta, \phi) \\ \sum_{l=0}^{l_{max}} \sum_{m=-l}^l c_{z,l}^m Y_l^m(\theta, \phi) \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4.29})$$

Onde, Y_l^m e $(c_{x,l}^m, c_{y,l}^m, c_{z,l}^m)$ são os harmônicos esféricos e os coeficientes de grau l e ordem m , respectivamente. A definição de Y_l^m segue Press *et al.* (1992) e l_{max} é o grau máximo usado para reconstruir uma superfície de partícula. Para o caso do grau harmônico esférico (l) igual a 1, por exemplo, a superfície da partícula será caracterizada pela (Eq. 4.30):

$$\begin{pmatrix} x(\theta, \phi) \\ y(\theta, \phi) \\ z(\theta, \phi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{x,l}^{-l} & c_{x,l}^{-l+1} & \dots & c_{x,l}^l \\ c_{y,l}^{-l} & c_{y,l}^{-l+1} & \dots & c_{y,l}^l \\ c_{z,l}^{-l} & c_{z,l}^{-l+1} & \dots & c_{z,l}^l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_l^{-l}(\theta, \phi) \\ Y_l^{-l+1}(\theta, \phi) \\ \vdots \\ Y_l^l(\theta, \phi) \end{pmatrix} = \mathbf{C}_l Y_l(\theta, \phi) \quad (\text{Eq. 4.30})$$

Onde, \mathbf{C}_l é uma matriz dimensional $3 \times (2l + 1)$ incluindo os coeficientes harmônicos esféricos de grau l e \mathbf{C}_0 influencia apenas a posição das partículas, o que não é considerado no estudo de Zhao, Wei e Wang (2017). À medida que l aumenta, \mathbf{C}_l contribui para características de forma mais realistas. Especificamente, \mathbf{C}_1 determina um elipsóide, chamado de Elipsóide de Primeiro Grau (EPG).

Wei, Wang e Zhao (2018) se basearam no estudo conduzido por Zhao, Wei e Wang (2017), que definiram dois tipos de fatores invariantes à rotação a partir dos coeficientes harmônicos esféricos, ou seja, descritores esféricos e seus principais componentes. Estes fatores são influenciados apenas pelo formato das partículas, não pela posição e rotação das partículas. Zhao, Wei e Wang (2017) analisaram 80 partículas de areia e mostraram que os descritores

esféricos tendem a diminuir linearmente com o aumento de l em uma escala log-log. Os descritores esféricos são normalizados por d_1 para eliminar a influência do tamanho das partículas. Os valores médios dos descritores esféricos estão representados nas Equações 4.31 e 4.32:

$$d_l = d_2 \cdot \left(\frac{2}{l}\right)^\alpha \quad \text{para } l \in [2, 8] \quad (\text{Eq. 4.31})$$

$$d_l = d_2 \cdot \left(\frac{9}{l}\right)^\beta \quad \text{for } l \in [9, 15] \quad (\text{Eq. 4.32})$$

Os valores ajustados de α e β são 1,387 e 1,426, respectivamente. Zhao, Wei e Wang (2017) mostraram que as principais características da forma (por exemplo, forma, arredondamento e compacidade) são devidamente caracterizadas com n de até oito. As Equações 4.31 e 4.32 controlam diferentes escalas de forma (arredondamento e rugosidade), embora uma única função também possa se encaixar nos descritores. Tais correlações valem para as 40 partículas escolhidas aleatoriamente com α e β , respectivamente [1,320, 1,448] e [1,190, 1,672]. Os citados autores mostraram que existem correlações semelhantes para partículas de areia mais irregulares (formas distintas). Além disso, prevê-se que as correlações também existam para outros tipos de partículas com diferentes valores de α e β . Com isso, as partículas são alinhadas girando todas as partículas de acordo com a EPG, tornando p_1 , p_2 e p_3 correspondentes aos eixos x , y e z , respectivamente. Portanto, os descritores esféricos são decompostos como $d_{i,l} = \sum_{m=-l}^l c_{i,l}^m c_{i,l}^{m*}$ para i em (x, y, z) .

Diante do estudo de Zhao, Wei e Wang (2017), Wei, Wang e Zhao (2018) propuseram um método simples para construir matrizes de coeficiente harmônico esférico usando quatro fatores: duas proporções, por exemplo, RC e IA , d_{2-8}/d_1 e d_{9-15}/d_1 . As matrizes de coeficiente harmônico esférico foram construídas em duas etapas. Primeiro, gerou-se o EPG com a maior dimensão principal de comprimento de unidade e proporções especificadas. Segundo, as matrizes de coeficiente harmônico esférico com l entre 2 e 8 (ex., $C_2 - C_8$) e entre 9 e 15 (ex., $C_9 - C_{15}$) foram construídos a partir do valor de d_{2-8}/d_1 e d_{9-15}/d_1 , respectivamente.

Na primeira etapa, a forma de um EPG relacionou os valores de IA , IP e uma dimensão principal da unidade. Suas principais dimensões ($p_1 \geq p_2 \geq p_3$) são $p_1 = 1$, $p_2 = IA$ e $p_3 = IA \times IP$. A matriz de coeficientes do EPG, \mathbf{C}_1 , é construída como (Eq. 4.33):

$$\mathbf{C}_1 = -\sqrt{\frac{\pi}{6}} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ IA \times i & 0 & IA \times i \\ 0 & \sqrt{2}IA \times IP & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 4.33})$$

Onde, i é a unidade imaginária e as EPGs geradas têm três dimensões principais, p_1 , p_2 e p_3 , correspondentes aos eixos x , y e z , respectivamente.

Na segunda etapa, os valores de d_l para l entre 2 e 8 são determinados a partir do valor especificado de d_{2-8}/d_1 de acordo com a Equação 4.31 e o valor de d_1 definido na primeira etapa. Assumiu-se que os descritores esféricos têm decomposições equivalentes em três eixos de coordenação, ex., $d_{x,l} = d_{y,l} = d_{z,l}$ para obter equilíbrio nas decomposições da distância quadrática média da superfície da partícula em três eixos de coordenação. Portanto, os coeficientes de $l > 1$ têm influência limitada na forma das partículas.

Os coeficientes harmônicos esféricos de \mathbf{C}_l são números complexos que precisam satisfazer $c_n^{-m} = (-1)^m c_n^{m*}$ para tornar as coordenadas dos vértices números reais. Para satisfazer esse requisito, o formato de \mathbf{C}_l é assumido como (Eq. 4.34):

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_l &= \begin{pmatrix} c_{x,l}^{-l} & \dots & c_{x,l}^{-l+1} & \dots & c_{x,l}^l \\ c_{y,l}^{-l} & \dots & c_{y,l}^{-l+1} & \dots & c_{y,l}^l \\ c_{z,l}^{-l} & \dots & c_{z,l}^{-l+1} & \dots & c_{z,l}^l \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} k_x(\alpha_{2l} - \alpha_{2l+1}i) & \dots & k_x\alpha_1 & \dots & k_x(\alpha_{2l} + \alpha_{2l+1}i) \\ k_x(\beta_{2l} - \beta_{2l+1}i) & \dots & c_{y,l}^{-l+1} & \dots & k_x(\beta_{2l} + \beta_{2l+1}i) \\ k_x(\varepsilon_{2l} - \varepsilon_{2l+1}i) & \dots & c_{z,l}^{-l+1} & \dots & k_x(\varepsilon_{2l} + \varepsilon_{2l+1}i) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4.34})$$

Onde, $(\alpha_i, \beta_i, \varepsilon_i)$ para $i \in [1, 2l + 1]$ são números reais entre 0 e 1, gerados aleatoriamente com uma distribuição uniforme. k_x , k_y and k_z são três fatores normalizadores. Os valores de k_x , k_y e k_z são determinados a partir dos valores de $d_{x,l}$, $d_{y,l}$ e $d_{z,l}$, por exemplo, Equação 4.35:

$$k_x = \sqrt{d_{x,l}^2 / (\alpha_1^2 + 2 \sum_{i=2}^{2l+1} \alpha_i^2)} \quad (\text{Eq. 4.35})$$

Este procedimento é repetido para l entre 2 e 8. Até agora, as matrizes de coeficientes para graus harmônicos esféricos entre 2 e 8 são construídas a partir de um valor especificado de d_{2-8}/d_1 . Da mesma forma, as matrizes de coeficientes de graus harmônicos esféricos entre 9 e 15 são determinadas a partir de d_{9-15}/d_1 .

4.2.4 Caracterização do empacotamento de agregados

O empacotamento de partículas é uma temática estudada na literatura técnica que apresenta aplicabilidade em diferentes campos da engenharia, por exemplo nas engenharias

agronômica, biomédica, mecânica e civil. Com o olhar voltado para a engenharia civil, a compreensão do empacotamento de agregados traz contribuição para algumas subáreas de estudo, como materiais de construção e estruturas, geotecnia e pavimentação.

Kwan e Mora (2001) avaliaram o efeito dos parâmetros de forma no empacotamento de partículas no concreto. O estudo correlacionou a densidade de empacotamento com os parâmetros de forma concluindo que o fator de forma e a razão de convexidade são os parâmetros mais importantes que afetam o empacotamento de um agregado. Suh *et al.* (2017) quantificaram os parâmetros de forma (esfericidade, alongamento, esbeltez e circularidade) em areais para cálculos de forma volumétrica e de angularidade. Diante de correlações excelentes (acima de 0,90), os autores concluíram que a angularidade da partícula influencia fortemente na densidade de empacotamento das areias.

Valera *et al.* (2015) apresentaram um algoritmo de avanço frontal para obter empacotamento altamente denso com partículas esféricas. Morales *et al.* (2015) apresentaram contribuições no algoritmo de avanço frontal para gerar empacotamentos mais densos com partículas com tamanhos e formas variados (poliedros regulares).

Morfa *et al.* (2018) apresentaram um algoritmo de avanço frontal para gerar empacotamento com elevado índice de vazios e com indicação de curvas de distribuição do tamanho das partículas. Morfa *et al.* (2018) propuseram um método de caracterização de empacotamento de partículas que considera fatores como dimensão e forma das partículas, preenchimento de vazios, homogeneidade, conectividade e isotropia. A metodologia permite caracterizar a forma e o tamanho das partículas, incluindo dimensões equivalentes e distribuição de tamanhos. Os autores apresentam a uniformidade de centros nas partículas (homogeneidade), baseada no estudo de He, Ekere e Cai (2001). Em suma, o estudo de Morfa *et al.* (2018) utiliza um sistema integral e sistêmico para caracterização e avaliação de um conjunto de partículas, baseado na lógica *fuzzy* que unifica todos os descritores em um único número.

Recarey *et al.* (2019) apresentaram um estudo de várias contribuições teóricas para estabelecer uma metodologia de empacotamento de partículas. Esses autores estabeleceram um novo método de empacotamento de partículas com base no método construtivo frontal de avanço e aplicação do método estatístico de Monte Carlo para a geração de dimensões de partículas e assim obtiveram partículas virtuais com diferentes formas geométricas. A primeira fase da metodologia realiza a geração das partículas com uso de métodos geométricos (frontal de avanço) e compactação com métodos dinâmicos de modo opcional. A segunda etapa consiste na avaliação e caracterização dos empacotamentos obtidos (preenchimento de vazios,

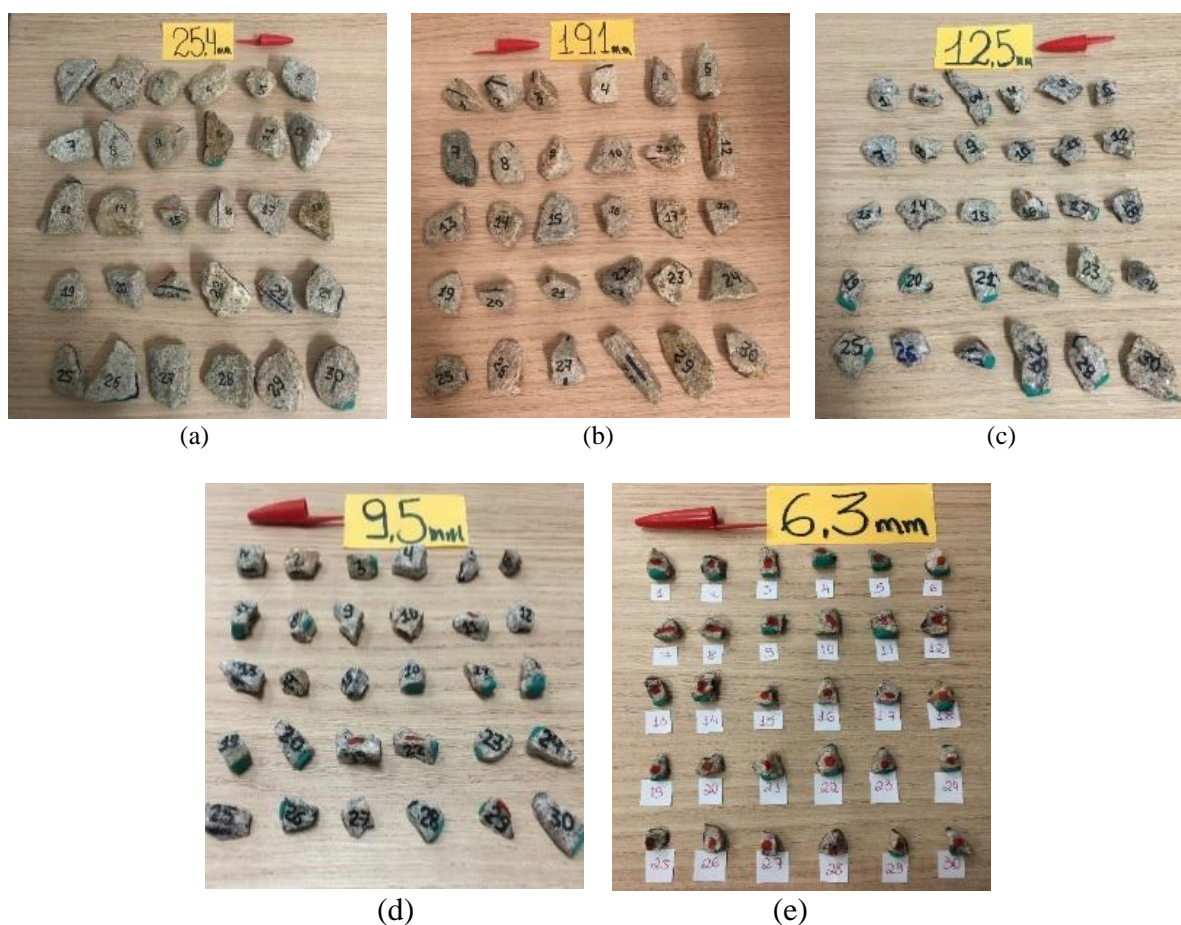
homogeneidade, conectividade e isotropia). Alguns exemplos de aplicações do novo método foram apresentados com os seguintes parâmetros de entrada: geometria delimitada (cilindro, cubo, silo), raio das partículas ou distribuição do tamanho das partículas (intervalo de dimensões) e volume da geometria. Quanto aos resultados do empacotamento os parâmetros foram: número de partículas, fração de volume, número de coordenadas e tempo de simulação.

4.3 Materiais e Método

4.3.1 Materiais

Os agregados utilizados no estudo foram obtidos no canteiro de obras ferroviárias da empresa Transnordestina Logística S/A, que é responsável pela construção de uma malha ferroviária com 1.753 km de extensão interligando Eliseu Martins, no sertão do Piauí, aos portos de Pecém, no Ceará, e Suape, em Pernambuco. O material de lastro de origem granítica (Rocha 18 analisada no capítulo 3), foi separado contabilizando 30 partículas para análise em cada peneira com as seguintes aberturas: 25,4; 19,1; 12,5; 9,5 e 6,3 mm (Figura 4.21).

Figura 4.21 – Agregados utilizados em lastro ferroviário avaliados no presente estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3.2 Método

A caracterização morfológica dos agregados coletados foi obtida com o uso do equipamento AIMS (subitem 2.2.1.1, Figura 2.2) com dados de saída referentes as dimensões

das partículas, índices de forma, esfericidade, angularidade e textura superficial, bem como relações de forma das partículas. Cada agregado foi analisado em três diferentes posições (ortogonais), de modo a obter três imagens, caracterizadas nas dimensões: maior, intermediária e menor. Em alguns casos, foi necessário a aplicação de massa de modelar para que o agregado permanecesse com orientação perpendicular aos demais planos de análise. A Figura 4.22 apresenta as posições dos agregados (plano maior, intermediário e menor) para análise e exemplos de suas respectivas imagens 2D reais obtidas no AIMS (partículas 10 e 26 na fração 25,4 mm).

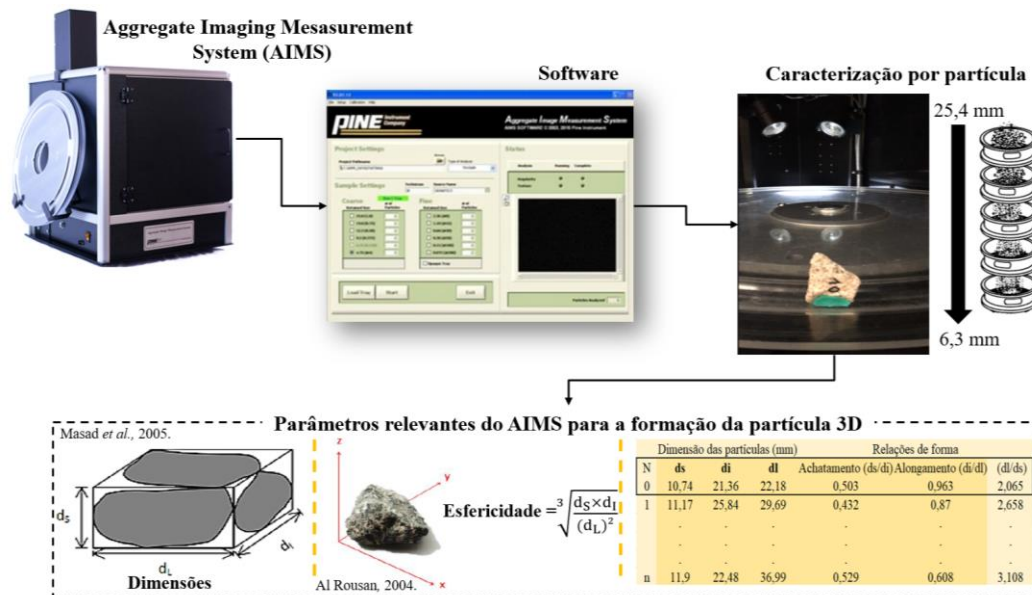
Figura 4.22 – Análise e obtenção das imagens 2D na fração 25,4 mm: exemplo das partículas de número 10 e 26



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Diante da caracterização morfológica (2D reais), a geração das partículas 3D virtuais foi realizada de três diferentes modos: i) a partir de uma imagem 2D real (Grupo 1, plano maior); ii) a partir de duas imagens 2D reais (Grupo 2, plano maior e intermediário) e iii) a partir de três imagens 2D reais (Grupo 3, plano maior, intermediário e menor). Para os três diferentes modos, os parâmetros aplicados foram: esfericidade e relações de forma dos agregados, achatamento (ds/dl), alongamento (dl/dL) e a relação entre achatamento e alongamento (dL/ds). A Figura 4.23 apresenta a esquematização de operação do equipamento AIMS e os parâmetros relevantes da caracterização morfológica dos agregados 2D reais para a formação das partículas 3D virtuais.

Figura 4.23 – Esquema de operação do equipamento AIMS e parâmetros relevantes para a formação das partículas 3D

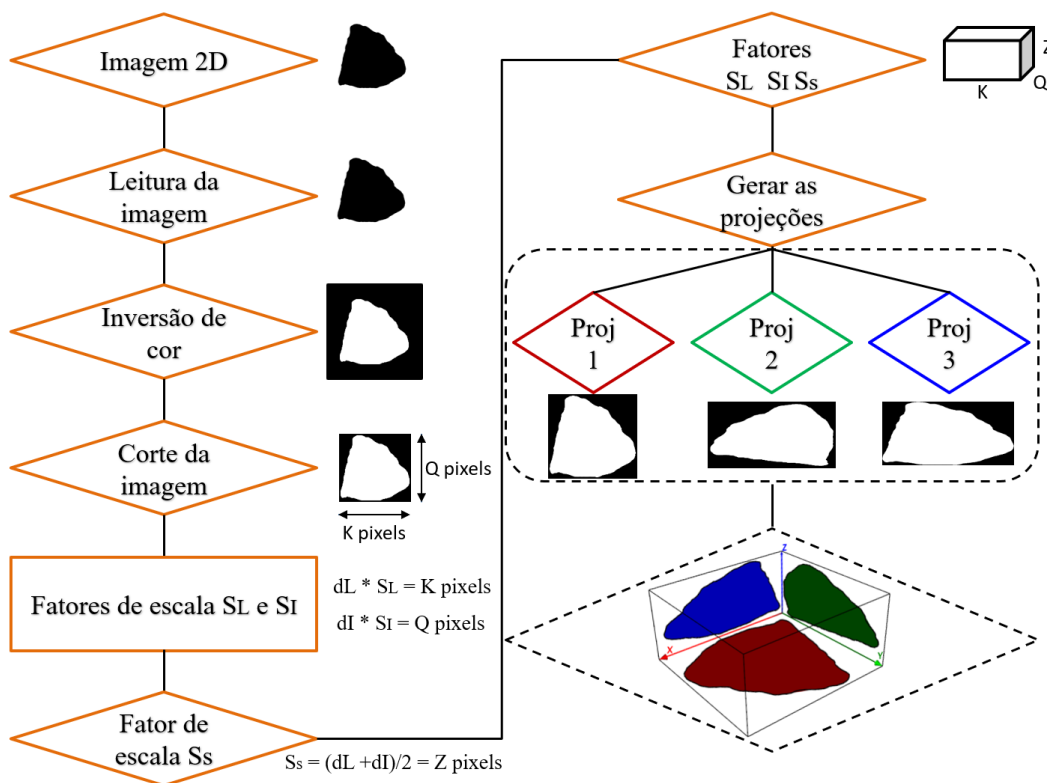


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3.2.1 Projeções das partículas 3D virtuais

As imagens 2D reais extraídas pelo AIMS foram analisadas, bem como os dados de dimensões, esfericidade e relações de forma dos agregados. Estes dados foram extraídos do equipamento AIMS para uma planilha Excel e para pastas com imagens 2D reais referentes a cada agregado graúdo analisado em sua respectiva peneira (25,4; 19,0; 12,5; 9,5 e 6,3 mm). A Figura 4.24 apresenta o procedimento realizado para a obtenção das três projeções representativas de um agregado. Tal procedimento foi aplicado para todos os agregados graúdos analisadas no AIMS. A ferramenta de *software* utilizada para análise de imagens foi a *Insight Toolkit* (ITK), que apresenta um sistema de código aberto.

Figura 4.24 – Esquemática para a elaboração das projeções das partículas 3D virtuais



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com o uso do *software* ITK a leitura da imagem 2D real foi realizada e verificada a condição da escala de cinza, sendo necessário realizar a inversão das escalas de cores, ou seja, a imagem 2D real do agregado de cor original preta foi alterada para branca, exigido pela ferramenta ITK que assim identifica o objeto de interesse. Em seguida, conhecida a imagem 2D real do agregado (cor branca), foi realizado o corte de modo tangencial à forma do agregado para a área branca se enquadrar nos tamanhos representativos do agregado.

O próximo passo consistiu no estabelecimento da relação de dimensões reais em milímetros com as dimensões da imagem 2D real em *pixels*, onde a partir deste ponto foram empregados os algoritmos na linguagem de programação Python. Para esse passo, foram calculados fatores de escala para as três dimensões, por exemplo, a maior dimensão (dL) multiplicada por um fator de escala (SL) sendo igual a dimensão maior (k) em *pixels* na imagem 2D real. O mesmo esquema foi aplicado na dimensão intermediária, (dI) multiplicada por um fator de escala (SI), sendo igual a dimensão intermediária (Q) em *pixels*. Para a dimensão menor (ds), o fator de escala (Ss) foi adotado como a média dos fatores de escala anteriormente definidos. De posse dos fatores de escala para cada projeção (SL ; SI e Ss), iniciou-se a geração das três projeções para formar a partícula 3D virtual.

Para a geração das projeções foram aplicados os princípios do estudo estabelecido por Mollon e Zhao (2013), descrito no item 4.2.3. É importante mencionar que os eixos principais das imagens foram alinhados aos eixos de coordenadas (Figura 4.12), conforme descrito nas Equações de 4.9 a 4.11.

Para a geração das partículas 3D virtuais do Grupo 1, a imagem 2D real extraída do agregado foi representativa apenas para a projeção 1 da partícula virtual 3D (Proj 1 - plano xy), sendo necessário outras duas para a formação da partícula 3D virtual. Para a geração das outras duas projeções foram essenciais as relações de forma. A partir da Proj 1 (imagem 2D real no plano xy), as demais projeções foram desenvolvidas. A Proj 1 foi rebatida a 90° para o plano yz de modo a formar a projeção 2 (Proj 2 - plano yz), ou seja, com dimensões representadas por d_i e d_L . No entanto, a dimensão d_L passou por escalonamento (redução) de modo a atingir a dimensão d_s representativa da partícula. Para a projeção 3 (Proj 3 - plano xz), o procedimento foi repetido. A Proj 1 foi rebatida a 90° para o plano xz de modo a formar a Proj 3. Nesse caso a dimensão d_i passou por escalonamento (redução) de modo a atingir a dimensão d_s representativa da partícula.

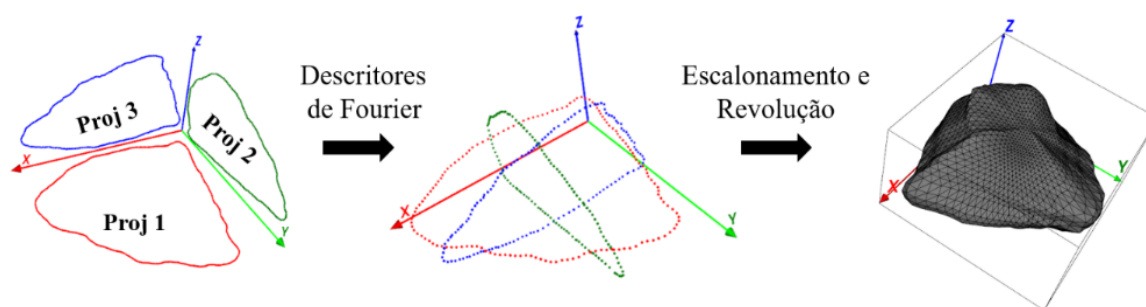
Para a geração das partículas 3D do Grupo 2, as imagens 2D reais extraídas do material representaram duas projeções da partícula, sendo necessário mais uma projeção para a formação da partícula 3D. Assim, a Proj 1 (plano xy) e a Proj 2 (plano yz) foram representadas, respectivamente, pelas imagens 2D reais maior e intermediária, enquanto a Proj 3 – plano xz) foi gerada pela Proj 1 rebatida a 90° para o plano xz, com a dimensão d_i escalonada (redução) de modo a atingir a dimensão d_s representativa da partícula. Tal procedimento foi replicado para todas as partículas. Já para a geração das partículas 3D do Grupo 3, as três imagens 2D extraídas do material completaram as três projeções para a formação das partículas 3D.

4.3.2.2 Formação das partículas 3D virtuais por descritores de Fourier

Embora existam técnicas de geração de partículas 3D mais avançadas, a técnica por descritores de Fourier (MOLLON; ZHAO, 2013) foi aplicada pelo fato de o grupo de pesquisa ter acesso um banco de dados de agregados caracterizados utilizando dois dos equipamentos AIMS existentes no país e, assim, possuir o experimento computacional (imagem digital e processamento da imagem) que auxiliará na geração das partículas 3D virtuais para o presente estudo e para possíveis análises futuras.

Para a geração das partículas 3D virtuais foram empregados os algoritmos na linguagem de programação Python para o procedimento experimental a fim de obter os descritores de Fourier de cada projeção, em seguida, foram realizados os processos de dimensionamento (escalonamento) e revolução. A Figura 4.25 apresenta o procedimento realizado para a obtenção de uma partícula 3D virtual. Para a visualização das partículas 3D, foi utilizado a ferramenta *Visualization Toolkit* (VTK), que é um *software* livre, do tipo código aberto, para computação gráfica 3D.

Figura 4.25 – Esquemática para a elaboração da partícula 3D virtual



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3.2.3 Validação das partículas: 2D versus 3D

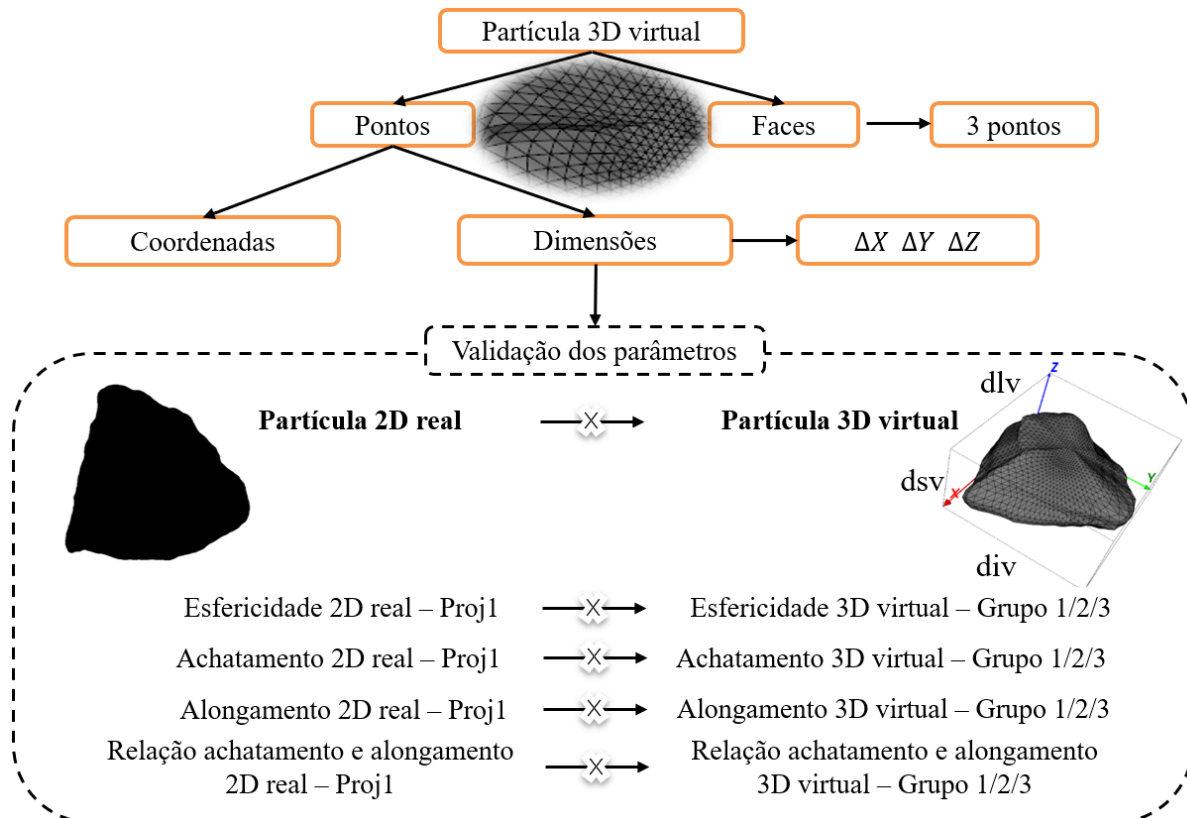
Após a geração das partículas 3D virtuais, foi realizada a validação quanto aos quatro parâmetros de forma: esfericidade e relação de forma indicadores dos agregados, como achatamento (ds/dl), alongamento (dl/dL) e a relação entre achatamento e alongamento (dL/ds), Figura 4.23. Para a esfericidade foram realizados os cálculos de acordo com a Equação 2.1(Capítulo 2). O processo de validação foi constituído de análises com regressões estatísticas e testes para comprovar que o modelo aplicado era estatisticamente apropriado e significativo para os quatro parâmetros e para os três grupos de partículas geradas.

Inicialmente, foi realizado o modelo de Regressão Linear Simples (RLS) e análise de variância ANOVA através do Teste F para identificar a significância global do modelo. Em seguida, foram analisados os resíduos da regressão quanto à homocedasticidade, independência e normalidade. O diagnóstico da homocedasticidade (homogeneidade de variância) foi identificado pela observação gráfica da relação entre resíduos e valores ajustados (parâmetros 3D virtuais previstos). O diagnóstico de independência foi analisado pelo teste Durbin-Watson para identificar se os resíduos são independentes. Para esse teste, Field (2009) afirma que valores menores do que 1 ou maiores do que 3 mostram dependência. Dessa forma, aplicou-se

uma regra mais conservadora com a variação entre 1,5 e 2,5 resultando em independência dos resíduos. O diagnóstico de normalidade foi analisado pelo teste Kolmogorov-Smirnov (Correlação de Significância de Lilliefors) para identificar se os resíduos são normalmente distribuídos.

É válido mencionar que os parâmetros 2D reais aplicados para comparar com os parâmetros 3D virtuais foram as caracterizações extraídas do AIMS para o agregado posicionado no plano da maior dimensão, plano xy, ou seja, sempre os parâmetros 2D reais referentes a Proj 1. O fato é que, para a geração das partículas 3D virtuais a Proj 1 é real, não passou por ajustes de dimensões e é a projeção padrão para rebater 90° quando for necessário desenvolver as demais projeções (Grupo 1 rebate nas Proj 2 e 3 e no Grupo 2 rebate na Proj 3). O fluxograma do procedimento utilizado para a validação da geração da partícula 3D virtual está apresentado na Figura 4.26.

Figura 4.26 – Esquemática para a validação da partícula 3D



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.3.2.4 Banco de partículas 3D

Cada grupo de partículas passou por uma organização de classes com base na propriedade de esfericidade. As partículas foram separadas a partir do sistema de classificação de propriedades de forma de agregados caracterizados com uso do PDI proposto por Ibiapina (2018) (Tabela 4.1). Ressalta-se que as demais propriedades de forma, forma 2D, angularidade e textura superficial, não foram inseridas para a formação das partículas 3D por limitações de parâmetros extraídos do AIMS e complexidade de implementação na codificação.

Tabela 4.1 – Valores limites para classificação da propriedade esfericidade de agregados

| Propriedade | Valores limites | | | |
|--------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------|
| | Esf < 0,5 | $0,5 \leq \text{Esf} < 0,7$ | $0,7 \leq \text{Esf} \leq 0,9$ | Esf > 0,9 |
| Esfericidade | Achatado/Alongado | Baixa esfericidade | Esfericidade moderada | Alta esfericidade |

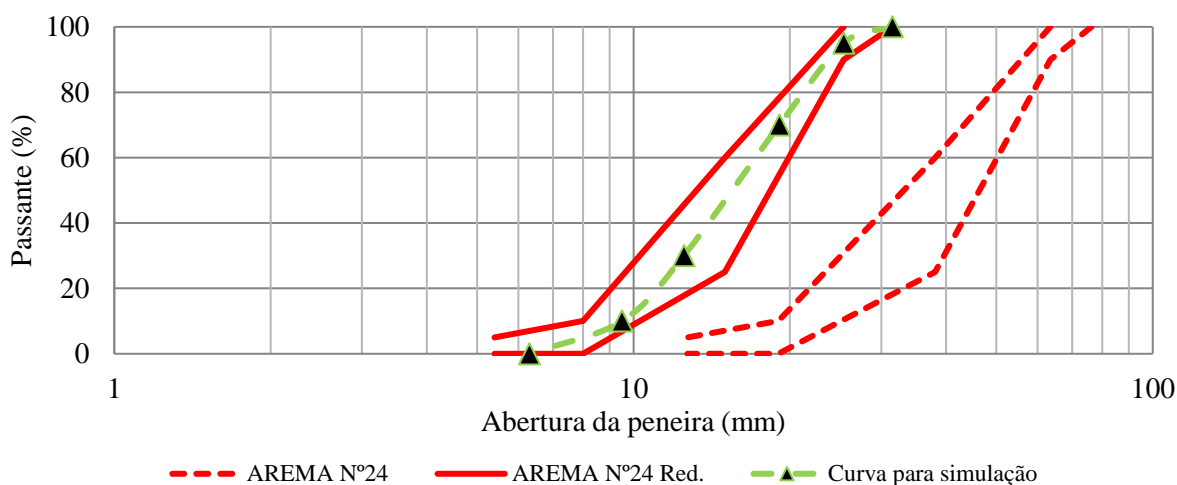
Fonte: Adaptado de Ibiapina (2018).

4.3.2.5 Simulações de empacotamento da matriz granular

A partir de um banco de dados de partículas 3D geradas por partículas de tamanhos retidos nas frações 25,4; 19,1; 12,5; 9,5 e 6,3 mm, o processo de empacotamento foi realizado em escala reduzida para atender a relação entre tamanho máximo da partícula e diâmetro do corpo de prova de 1:5, baseada em Lekarp e Isacsson (2001) e devido a limitação do AIMS com relação a caracterização de todos os tamanhos de partículas aplicadas em lastro, por exemplo, 37,5; 50 e 63,5 mm. Dessa forma, para avaliar o empacotamento, optou-se pelo molde usual em ensaio triaxial (escala reduzida) na geometria cilíndrica de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, com partículas ensaiadas de no máximo 31,5 mm (retidas na fração 25,4 mm).

Para este corpo de prova nas dimensões 150 × 300 mm (escala reduzida), a distribuição granulométrica para lastro ferroviário selecionada para o presente estudo, AREMA N° 24, foi submetida ao processo de decalagem (AREMA N° 24 Red.), ou seja, o percentual retido nas peneiras da granulometria real foi mantido para as peneiras de menor tamanho, de modo a formar uma distribuição granulométrica decalada por translação da distribuição granulométrica real. A Figura 4.27 apresenta as distribuições granulométricas reais e reduzidas e a curva granulométrica a ser ensaiada nas simulações de empacotamento da matriz granular.

Figura 4.27 – Distribuições granulométricas AREMA N° 24 reais e reduzidas e curva granulométrica para simulação de empacotamento



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A metodologia para o empacotamento da matriz granular seguiu o estudo conduzido por Morfa *et al.* (2018). As simulações foram realizadas através do uso do *software* CIMNE GiD. Ressalta-se que, para iniciar a fase de empacotamento, as partículas 3D virtuais foram discretizadas de modo a reduzir os números de faces, mas as propriedades de forma das mesmas não foram modificadas. Isso é justificável para reduzir o esforço computacional na obtenção dos parâmetros de empacotamento da matriz granular. Em suma, os parâmetros de entrada para as simulações foram: granulometria (AREMA N° 24), propriedades de forma (esfericidade) e molde cilíndrico com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Os parâmetros de saída foram volume do cilindro (V_{cil}), número de partículas (N_{part}), volume de ocupação das partículas (V_{part}), fração de volume (F_v), porosidade (n) e índice de vazios (e).

A fração de volume (F_v) é uma caracterização do grau de ocupação sólida de um molde geométrico para aferir o empacotamento de partículas. Este parâmetro é a razão entre o volume de ocupação das partículas e o volume da geometria simulada ($F_v = V_{part} / V_{cil}$). A porosidade (n) mede o grau de ocupação do espaço e é definida como a razão entre o volume do espaço vazio e o volume total de referência da geometria simulada ($n = (V_{cil} - V_{part}) / V_{cil}$). O índice de vazios (e) é um parâmetro relativo ao vazio geométrico de um molde simulado e é definido como a razão entre o volume do espaço vazio e o volume de ocupação das partículas ($e = (V_{cil} - V_{part}) / V_{part}$).

Foram realizadas 15 caracterizações de empacotamento para cada esfericidade selecionada com partículas 3D virtuais alocadas aleatoriamente, a fim de melhorar a

representatividade estatística. Em seguida, os parâmetros e a influência na matriz granular foram comparados.

Para avaliar a representatividade dos resultados de empacotamento foram realizados testes estatísticos paramétricos ou não paramétricos no nível de significância de 5% (ferramentas SPSS e Excel). Inicialmente, foi realizado o teste da aderência à normalidade para analisar se a amostra tem uma distribuição normal a partir do teste Kolmogorv-Smirnov (Correlação de Significância de Lilliefors). Em caso positivo de aderência à normalidade, os testes paramétricos foram aplicados. No caso negativo, os testes não paramétricos foram realizados. As explicações e comentários a respeito dos testes aplicados foram detalhados na seção a seguir.

Ressalta-se que as etapas de projeção de partículas 3D virtuais, geração das partículas 3D e simulações de empacotamentos foram realizadas numa parceria entre a UFC e a Faculdade de Tecnologia / UnB (Laboratório de Infraestrutura Rodoviária (INFRALAB) em parceria com o Centro Internacional para Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE)).

4.4 Resultados e Discussões

Para este estudo, 150 agregados foram caracterizados com o uso do AIMS em três diferentes posições (planos xy, yz e xz), sendo extraídos os parâmetros 2D reais de esfericidade e relações de forma dos agregados: achatamento (ds/dl), alongamento (dl/dL) e a relação entre achatamento e alongamento (dL/ds). Os parâmetros 2D reais, extraídos do plano xy - Proj 1 (Apêndice J), foram comparados aos parâmetros extraídos das partículas 3D virtuais geradas para os Grupos 1, 2 e 3 (Apêndice J). Os resultados de validação das partículas 3D virtuais estão apresentados a seguir. Ressalta-se que gráficos e tabelas em maiores detalhes estatísticos estão inseridos em Apêndices, ao final desse documento.

Vale mencionar que existiu a tentativa de inserção do parâmetro angularidade na geração de partículas 3D virtuais. No entanto, a imagem 2D gerada pelo AIMS é uma matriz de *pixels*, com coordenadas identificadas, a qual o método do gradiente (Capítulo 2) calcula o índice de angularidade a cada ponto do contorno da imagem, ou seja, a cada *pixel* (em torno de 1.000 *pixels*). Para a partícula 3D virtual, foi realizado o cálculo da angularidade na imagem gerada pelo corte no plano xy, apresentando apenas 128 pontos para o contorno da imagem. Tal simplificação do contorno eliminou as irregularidades existentes, sendo o método do gradiente ineficiente para calcular o índice de angularidade. Em vários casos, pôde-se identificar segmentos retos quando na imagem 2D apresentavam segmentos irregulares de *pixels*. Além disso, diante da complexidade computacional e por razões práticas de tempo, a malha de geração da partícula 3D virtual intercepta os planos em apenas 64 pontos, o que também contribuiu para a perda de informações de irregularidades. Em termo de valores, os resultados de angularidade 3D virtual (0 a 20) apresentaram valores bem diferentes dos resultados de angularidade 2D real (1.000 a 5.000). Por tais motivos, esse parâmetro não foi inserido nas análises de geração de partículas 3D virtuais.

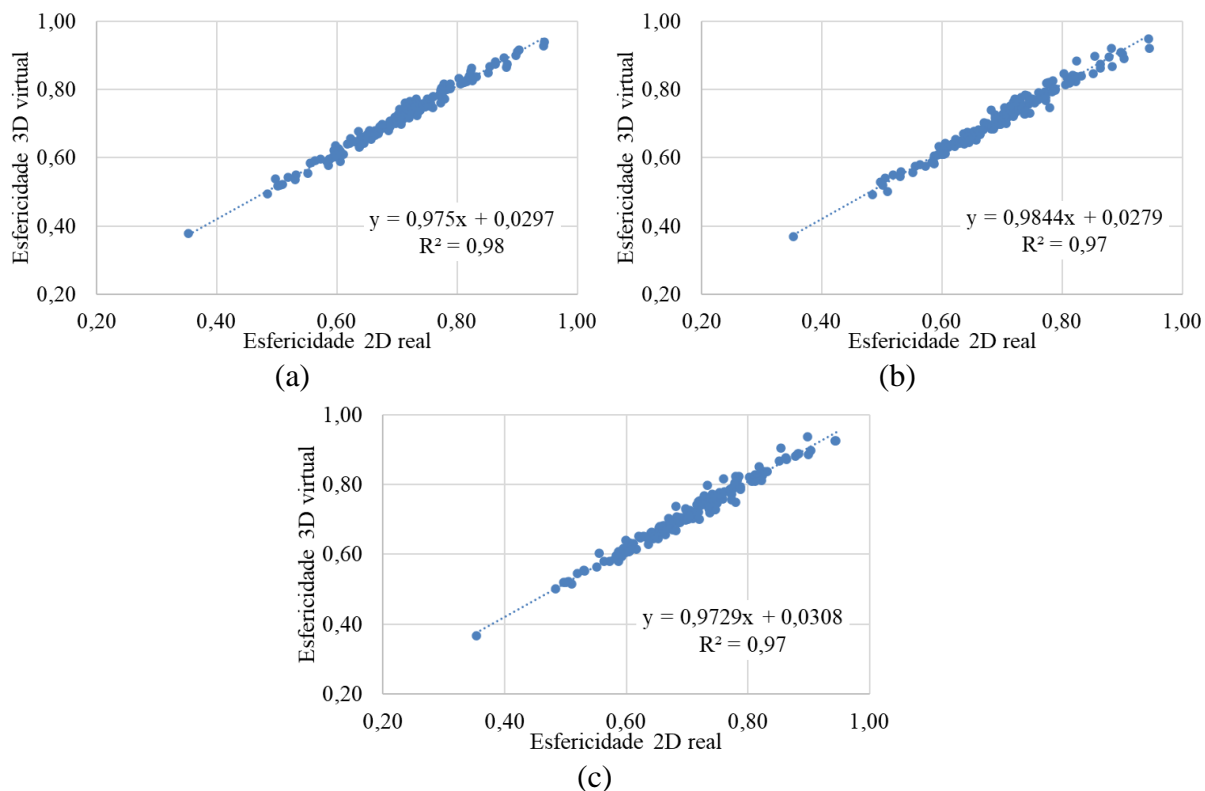
4.4.1 Validação das partículas: 2D real versus 3D virtual

4.4.1.1 Esfericidade

Os resultados referentes ao parâmetro esfericidade para os Grupos 1, 2 e 3 estão apresentados na Figura 4.28. Observa-se a dispersão dos dados e o valor de R^2 para os três grupos diante da RLS. Os três modelos lineares explicam a relação entre as variáveis em intensidade de correlação excelente (WITCZACK *et al.*, 2002, Tabela 2.2). É possível observar

que o modelo mais explicativo é o do Grupo 1, cujo modelo linear explica 98% da variância da esfericidade 3D virtual a partir da esfericidade 2D real.

Figura 4.28 – Análise de dispersão da esfericidade para: a) Grupo 1; b) Grupo 2; e c) Grupo 3



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para os modelos de RLS acima, a análise de variância foi investigada. Os modelos foram analisados quanto a significância usando ANOVA, Teste F. A Tabela 4.2 apresenta as informações resultantes da estatística de regressão da esfericidade para os três grupos. Ao considerar o nível de significância de 0,05, pode-se dizer que a variável independente (esfericidade 2D real) descreve bem a variável dependente (esfericidade 3D virtual), pois o valor F de significação (P-valor) é menor que 0,05 para os Grupos 1, 2 e 3, ou seja, os modelos são estatisticamente significativos.

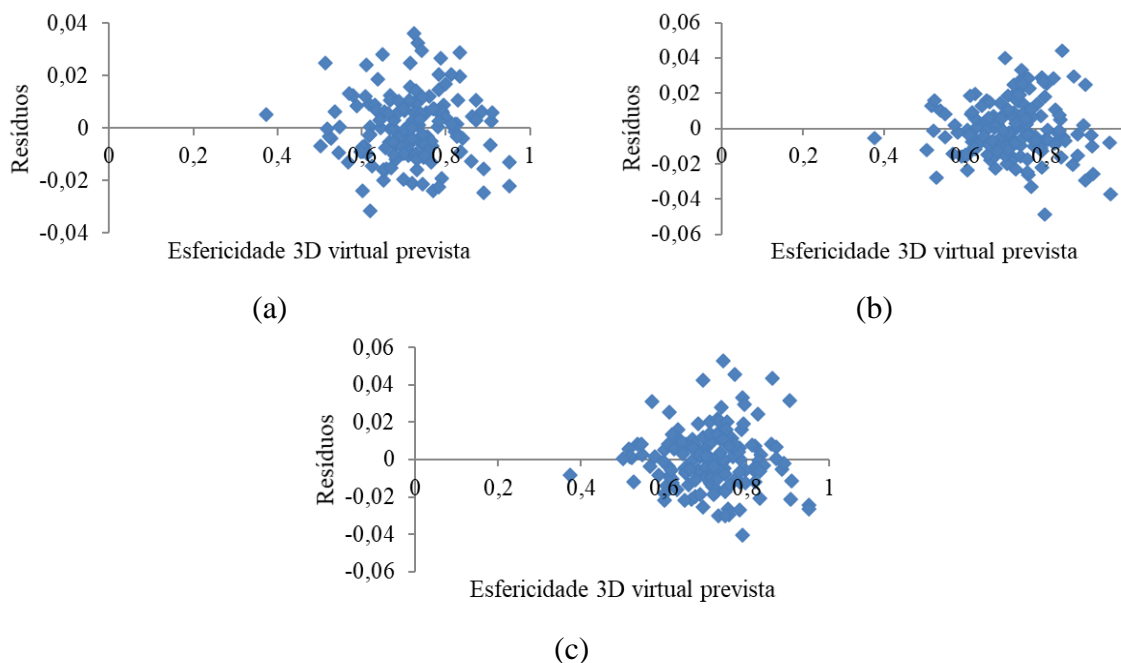
Tabela 4.2 – Estatística de regressão para esfericidade dos Grupos 1, 2 e 3

| Grupos | R ² | R ² ajustado | Observações | P-valor |
|--------|----------------|-------------------------|-------------|---------|
| 1 | 0,983 | 0,983 | 150 | <0,0001 |
| 2 | 0,974 | 0,974 | 150 | <0,0001 |
| 3 | 0,974 | 0,973 | 150 | <0,0001 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Embora os modelos de RLS tenham se mostrado significativos (em nível de confiança de 95% a esfericidade 2D real tem correlação com a esfericidade 3D virtual), avaliou-se os resíduos das regressões quanto a homocedasticidade, independência e normalidade. A Figura 4.29 apresenta a relação entre os resíduos e o valor ajustado (esfericidade 3D virtual prevista) nos Grupos 1, 2 e 3. Com essa relação é possível identificar que a variância é constante (o erro é homocedástico) nos três grupos, visto que os pontos estão aleatoriamente distribuídos em torno do 0, sem nenhum comportamento ou tendência (ex. parábola ou funil).

Figura 4.29 – Diagnóstico de homocedasticidade da esfericidade para: a) Grupo 1; b) Grupo 2 e c) Grupo 3



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos diagnósticos de independência e normalidade dos resíduos da esfericidade para os três grupos. Para o diagnóstico de independência, os valores dos três grupos estiveram contidos no intervalo de 1,5 a 2,5, sendo assim, confirmada a independência dos resíduos dos Grupos 1, 2 e 3. O teste Kolmogorov-Smirnov apresentou valores superiores a 0,05 para os três grupos, ou seja, pode-se afirmar, com nível de confiança de 95%, que os resíduos dos Grupos 1, 2 e 3 são normalmente distribuídos.

Tabela 4.3 – Análise de resíduos da esfericidade para os Grupos 1, 2 e 3

| Grupos/Análises | Diagnóstico de independência | Diagnóstico de normalidade |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| Teste | Estatística de Durbin-Watson | Kolmogorv-Smirnov (P-valor) |
| Grupo 1 | 2,025 | 0,200 |
| Grupo 2 | 2,080 | 0,081 |
| Grupo 3 | 2,087 | 0,098 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

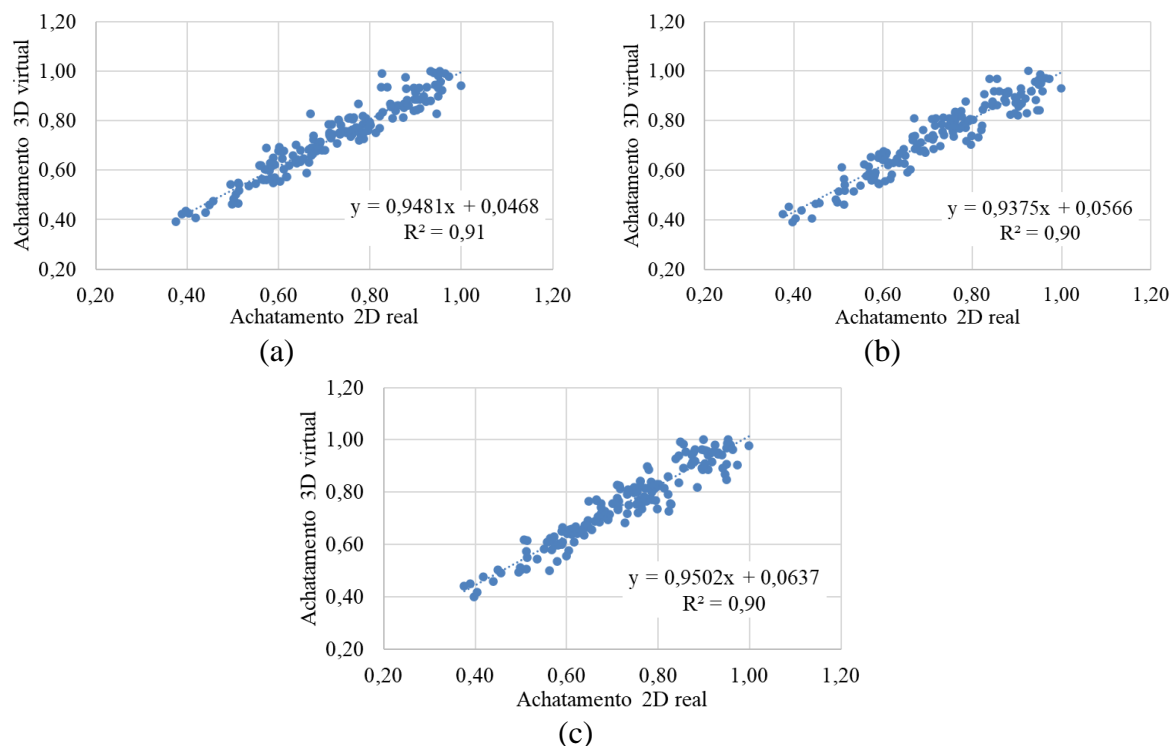
Em síntese, as análises de variância e de resíduos para a esfericidade mostraram que os modelos de RLS são significativos e apropriados para explicar a relação entre esfericidade 2D real e esfericidade 3D virtual. Com as análises realizadas, é possível apontar que o Grupo 1 explica melhor a variância da esfericidade 3D virtual a partir da esfericidade 2D real, visto que existe uma relação estatisticamente significativa e o valor de R^2 é o maior, em relação aos Grupos 2 e 3. Além disso, levando em consideração o tempo de execução para realizar a caracterização dos agregados com o uso do AIMS, a geração das partículas 3D virtuais a partir de uma imagem 2D real seria uma prática mais rápida. Porém, é válido mencionar que a relação entre as partículas 3D virtuais e 2D reais pertencentes aos Grupos 2 e 3 também apresentaram modelos significativos e com excelentes correlações considerando o critério de Witczack *et al.*, 2002, Tabela 2.2.

Os resultados obtidos na estatística de regressão para o parâmetro esfericidade estão apresentados no Apêndice K para os três grupos. Foram apresentados gráficos e tabelas com os resultados detalhados dos testes realizados no *IBM SPSS Statistics 25*.

4.4.1.2 Achatamento (ds/dl)

Diante da relação entre a dimensão menor e intermediária de uma partícula, pôde-se calcular o parâmetro achatamento. Para a análise do achatamento, a dispersão dos dados e o valor de R^2 foram avaliados e estão apresentados na Figura 4.30 para os Grupos 1, 2 e 3. É possível observar que o modelo mais explicativo é o do Grupo 1, cujo modelo linear explica 91% da variância do achatamento 3D virtual a partir do achatamento 2D real.

Figura 4.30 – Análise de dispersão do achatamento para: a) Grupo1; b) Grupo 2 e c) Grupo 3



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para as RLS acima, avaliou-se a variância dos modelos quanto a significância usando ANOVA, Teste F. A Tabela 4.4 apresenta as informações resultantes da estatística de regressão do achatamento para os três grupos. Ao considerar o nível de significância de 0,05, pode-se dizer que a variável independente (achatamento 2D real) descreve bem a variável dependente (achatamento 3D virtual), pois o valor F de significação (P-valor) é menor que 0,05 para os Grupos 1, 2 e 3, ou seja, os modelos são estatisticamente significativos.

Tabela 4.4 – Estatística de regressão para achatamento dos Grupos 1, 2 e 3

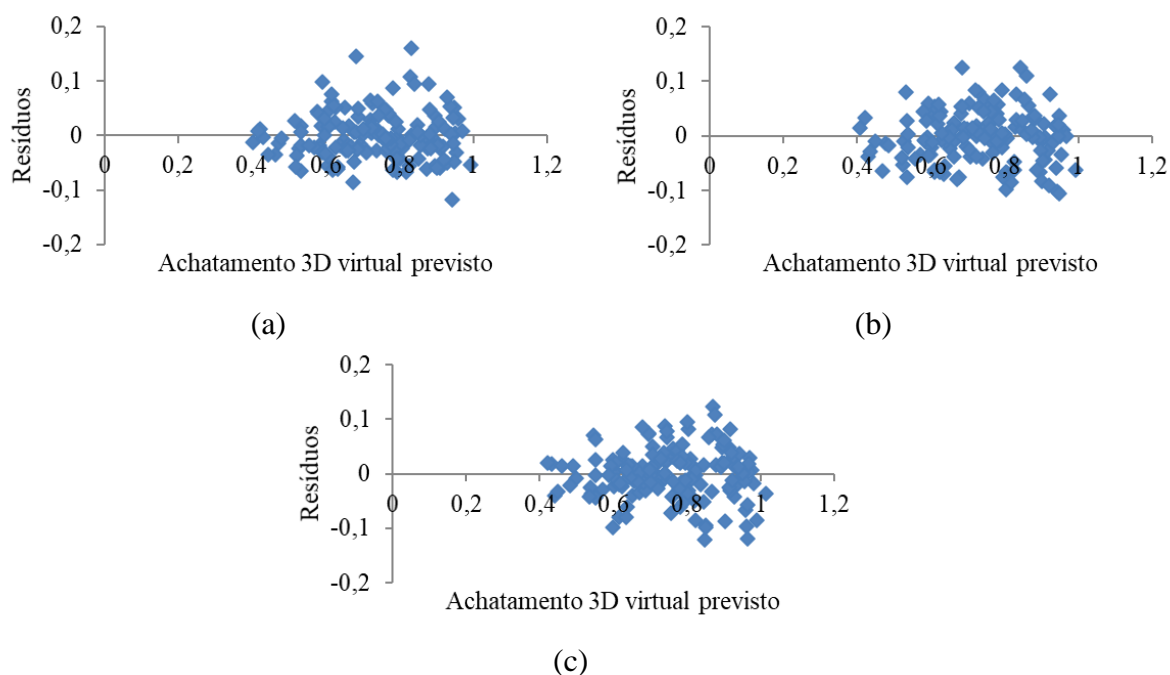
| Grupos | R ² | R ² ajustado | Observações | P-valor |
|--------|----------------|-------------------------|-------------|---------|
| 1 | 0,912 | 0,911 | 150 | <0,0001 |
| 2 | 0,898 | 0,897 | 150 | <0,0001 |
| 3 | 0,904 | 0,903 | 150 | <0,0001 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Após identificar que os modelos de RLS foram significativos, as análises de resíduos foram realizadas para diagnosticar a homocedasticidade, independência e normalidade. Para o diagnóstico de homocedasticidade, a Figura 4.31 apresenta a relação entre os resíduos e o valor ajustado (achatamento 3D virtual previsto) nos Grupos 1, 2 e 3. É possível

identificar homogeneidade de variância nos resíduos dos três grupos, visto que os pontos estão aleatoriamente distribuídos em torno do 0, sem nenhum comportamento ou tendência.

Figura 4.31 – Diagnóstico de homocedasticidade do achatamento para: a) Grupo 1; b) Grupo 2 e c) Grupo 3



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para complementar a análise dos resíduos, o diagnóstico de independência e normalidade foram calculados (Tabela 4.5). Nota-se que os valores dos testes Durbin-Watson estão contidos no intervalo de 1,5 a 2,5 e os valores dos testes de Kolmogorv-Smirnov são superiores a 0,05 para os três grupos. Assim, pode-se afirmar com 95% de confiança que os resíduos são independentes e normalmente distribuídos.

Tabela 4.5 – Análise de resíduos do achatamento para os Grupos 1, 2 e 3

| Grupos/Análises | Diagnóstico de independência | Diagnóstico de normalidade |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| Teste | Estatística de Durbin-Watson | Kolmogorv-Smirnov (P-valor) |
| Grupo 1 | 1,933 | 0,066 |
| Grupo 2 | 1,924 | 0,200 |
| Grupo 3 | 2,160 | 0,200 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

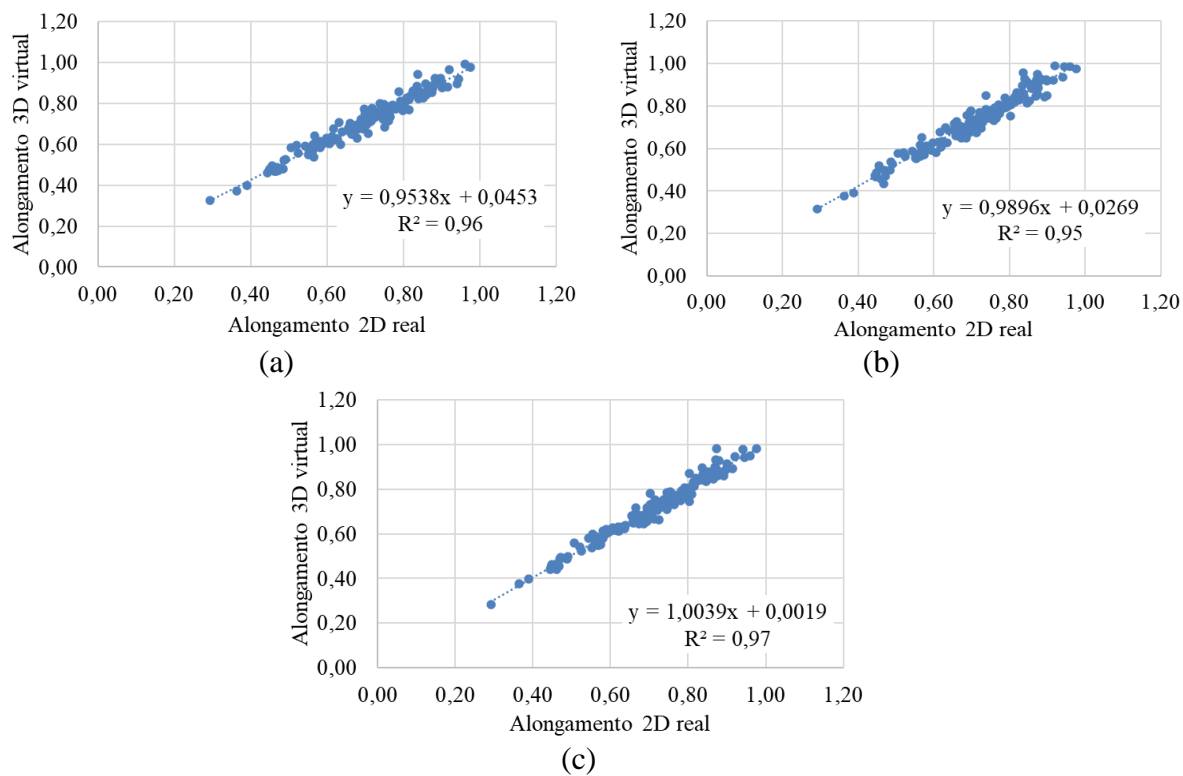
Em resumo, as análises de variância e de resíduos para o achatamento mostraram que os modelos de RLS são significativos e apropriados para explicar a relação entre achatamento 2D real e achatamento 3D virtual. Com as análises realizadas, é possível apontar que o Grupo 1 explica melhor a variância do achatamento 3D virtual a partir do achatamento 2D real, visto que existe uma relação estatisticamente significativa e o valor de R^2 é o maior, em relação aos Grupos 2 e 3. Além disso, o tempo para ensaio dos agregados no AIMS para a geração das partículas 3D virtuais a partir de uma imagem 2D real seria mais rápida. Porém, é válido mencionar que a relação entre as partículas 3D virtuais e 2D reais pertencentes aos Grupos 2 e 3 também apresentaram modelos significativos e de excelentes correlações segundo Witzack *et al.*, 2002, Tabela 2.2.

Os resultados obtidos na estatística de regressão para o parâmetro achatamento estão apresentados no Apêndice L para os três grupos. Foram apresentados gráficos e tabelas com os resultados detalhados dos testes realizados no *IBM SPSS Statistics 25*.

4.4.1.3 Alongamento (d_i/d_L)

Considerando a relação entre as dimensões intermediária e maior de uma partícula, o parâmetro alongamento foi calculado. A Figura 4.32 apresenta os resultados de alongamento para os Grupos 1, 2 e 3 através de gráficos de dispersão dos dados e valor R^2 . É possível observar que o modelo mais explicativo é o do Grupo 1, cujo modelo linear explica 96% da variância do alongamento 3D virtual a partir do alongamento 2D real.

Figura 4.32– Análise de dispersão do alongamento das partículas na peneira 6,35 mm para: a) Grupo1; b) Grupo 2 e c) Grupo 3



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para os modelos de RLS acima, a análise de variância foi examinada. Tais modelos foram analisados quanto a significância usando ANOVA, Teste F. A Tabela de 4.6 apresenta as informações resultantes da estatística de regressão do alongamento para os três grupos. Ao considerar o nível de significância de 0,05, pode-se dizer que a variável independente (alongamento 2D real) descreve bem a variável dependente (alongamento 3D virtual), pois o valor F de significação (P-valor) é menor que 0,05 para os Grupos 1, 2 e 3, ou seja, os modelos são estatisticamente significativos.

Tabela 4.6 – Estatística de regressão para alongamento dos Grupos 1, 2 e 3

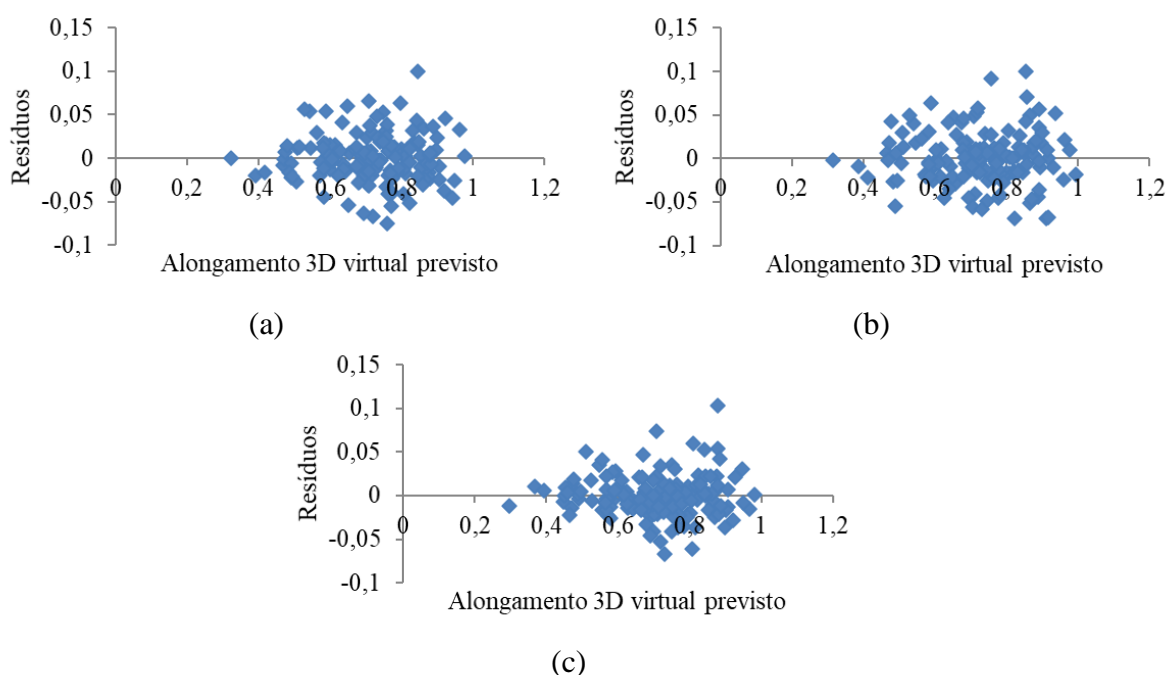
| Grupos | R ² | R ² ajustado | Observações | P-valor |
|--------|----------------|-------------------------|-------------|---------|
| 1 | 0,958 | 0,958 | 150 | <0,0001 |
| 2 | 0,950 | 0,950 | 150 | <0,0001 |
| 3 | 0,968 | 0,968 | 150 | <0,0001 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Mesmo todos os modelos de RLS apresentando significância (em nível de confiança de 95% que o alongamento 2D real tem correlação com o alongamento 3D virtual), os resíduos

das regressões foram investigados quanto a independência, homoscedasticidade e normalidade. A Figura 4.33 apresenta a relação entre os resíduos e o valor ajustado (alongamento 3D virtual prevista) nos Grupos 1, 2 e 3, sendo possível identificar que a variância é constante (o erro é homocedástico).

Figura 4.33 – Diagnóstico de homocedasticidade do alongamento para: a) Grupo 1; b) Grupo 2 e c) Grupo 3



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Tabela 4.7 apresenta os resultados dos diagnósticos de independência e normalidade dos resíduos do alongamento para os três grupos. Para o diagnóstico de independência, os valores dos três grupos estiveram contidos no intervalo de 1,5 a 2,5, ou seja, é confirmada a independência dos resíduos dos Grupos 1, 2 e 3. Por outro lado, para o teste Kolmogorov-Smirnov os valores mostraram que os resíduos não são normalmente distribuídos nos Grupos 2 e 3. Já para o Grupo 1, esse teste apresentou um valor exatamente igual ao nível de significância (0,05), podendo afirmar com 95% de confiança que os resíduos são normalmente distribuídos.

Tabela 4.7 – Análise de resíduos do alongamento para os Grupos 1, 2 e 3

| Grupos/Análises | Diagnóstico de independência | Diagnóstico de normalidade |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| Teste | Estatística de Durbin-Watson | Kolmogorv-Smirnov (P-valor) |
| Grupo 1 | 1,782 | 0,051 |
| Grupo 2 | 1,977 | 0,015 |
| Grupo 3 | 1,994 | 0,00 |

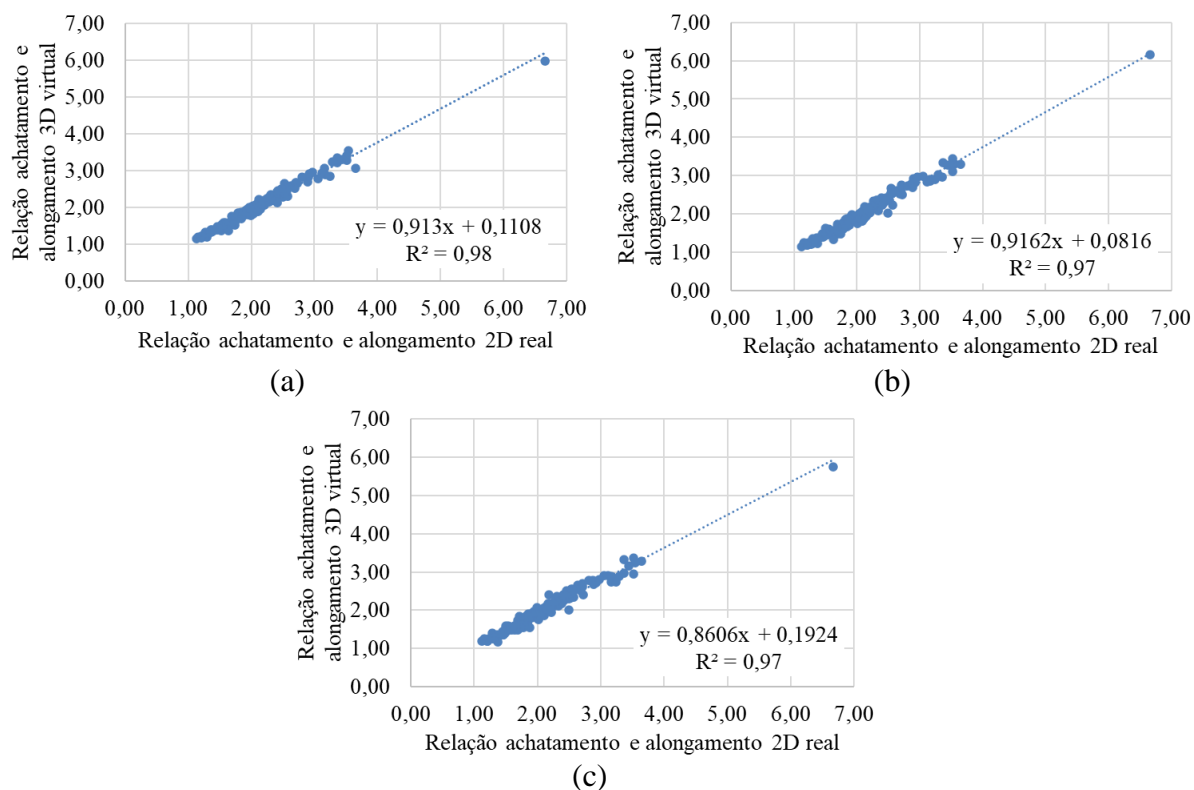
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os resultados obtidos na estatística de regressão para o parâmetro alongamento estão apresentados no Apêndice M para os três grupos. Foram apresentados gráficos e tabelas com os resultados detalhados dos testes realizados no *IBM SPSS Statistics 25*. Em suma, as análises de variância e de resíduos para alongamento mostraram que o modelo de RLS é significativo e apropriado para explicar a relação alongamento 2D real e alongamento 3D virtual apenas do Grupo 1 (intensidade de correlação excelente segundo Witczack *et al.*, 2002, Tabela 2.2).

4.4.1.4 Relação entre achatamento e alongamento (dL/ds)

Para a última relação de forma das partículas, com as dimensões maior e menor foi calculado a relação entre achatamento e alongamento. A Figura 4.34 apresenta os resultados com dispersão dos dados e valor R^2 da relação achatamento e alongamento para os Grupos 1, 2 e 3. Nota-se que o modelo mais explicativo é o do Grupo 1, cujo modelo linear explica 98% da variância da relação achatamento e alongamento 3D virtual a partir da relação achatamento e alongamento achatamento 2D real.

Figura 4.34 – Análise de dispersão da relação achatamento e alongamento para: a) Grupo 1; b) Grupo 2 e c) Grupo 3



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Para as RLS acima, observou-se o resultado F de significação (P-valor) diante do Teste F. A Tabela 4.8 apresenta as informações resultantes da estatística de regressão da relação achatamento e alongamento para os três grupos. Ao considerar o nível de significância de 0,05, pode-se dizer que a variável independente (relação achatamento e alongamento 2D real) descreve bem a variável dependente (relação achatamento e alongamento 3D virtual), pois o valor F de significação (P-valor) é menor que 0,05 para os Grupos 1, 2 e 3, ou seja, os modelos são estatisticamente significativos.

Tabela 4.8 – Estatística de regressão para relação achatamento e alongamento dos Grupos 1, 2 e 3

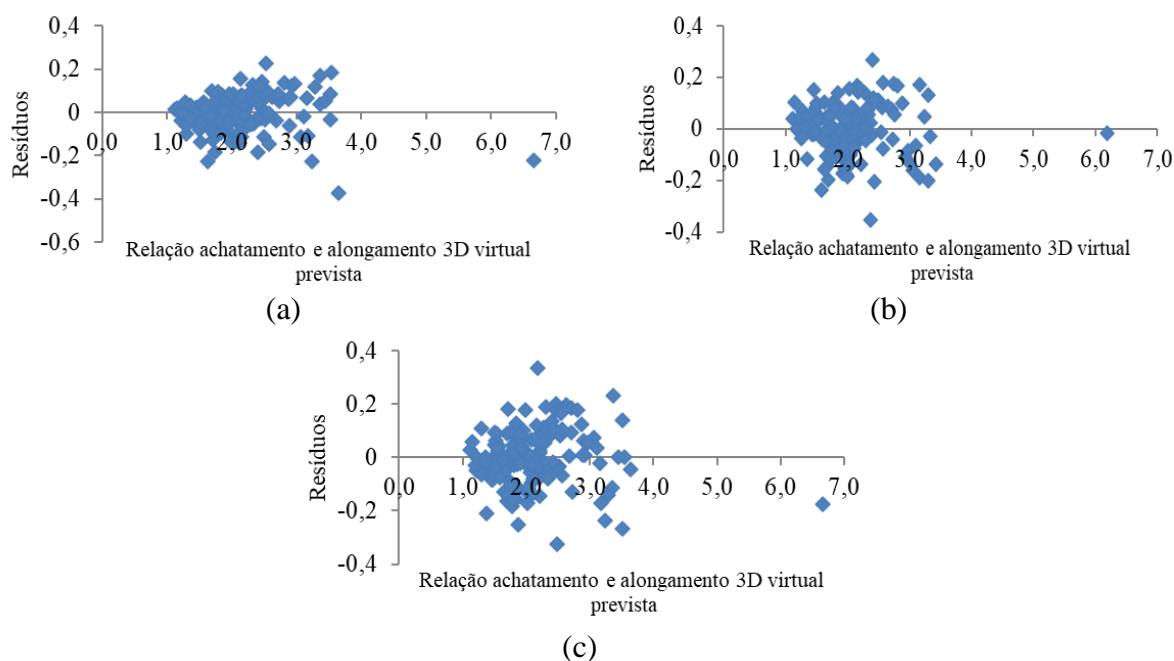
| Grupos | R ² | R ² ajustado | Observações | P-valor |
|--------|----------------|-------------------------|-------------|---------|
| 1 | 0,979 | 0,979 | 150 | <0,0001 |
| 2 | 0,975 | 0,974 | 150 | <0,0001 |
| 3 | 0,967 | 0,967 | 150 | <0,0001 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Embora os modelos de RLS tenham se mostrado significativos (em nível de confiança de 95% a relação achatamento e alongamento 2D real tem correlação com a relação achatamento e alongamento 3D virtual), avaliaram-se os resíduos das regressões quanto a homocedasticidade, independência e normalidade. A Figura 4.35 apresenta a relação entre os resíduos e o valor ajustado (relação achatamento e alongamento 3D virtual prevista) nos Grupos 1, 2 e 3. Pode-se identificar que a variância é constante (erro é homocedástico), visto que os pontos estão aleatoriamente distribuídos em torno do 0, sem nenhum comportamento claramente definido.

Figura 4.35 – Diagnóstico de homocedasticidade da relação achatamento e alongamento para:

a) Grupo 1; b) Grupo 2 e c) Grupo 3



Fonte: Elaborado pela autora (2021).

A Tabela 4.9 apresenta os resultados dos diagnósticos de independência e normalidade dos resíduos para a relação achatamento e alongamento dos Grupos 1, 2 e 3. Observa-se que os valores dos testes Durbin-Watson estão contidos no intervalo de 1,5 a 2,5 para os três grupos, ou seja, os resíduos são independentes. Para os testes de Kolmogorv-Smirnov, os valores dos três grupos são superiores a 0,05, ou seja, pode-se afirmar com nível de confiança de 95% que os resíduos são normalizados.

Tabela 4.9 – Análise de resíduos da relação achatamento e alongamento para os Grupos 1, 2 e 3

| Grupos/Análises | Diagnóstico de independência | Diagnóstico de normalidade |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Teste | Estatística de Durbin-Watson) | Kolmogorv-Smirnov (P-valor) |
| Grupo 1 | 2,139 | 0,200 |
| Grupo 2 | 2,097 | 0,200 |
| Grupo 3 | 2,045 | 0,200 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Em suma, as análises de variância e de resíduos para a relação achatamento e alongamento mostraram que os modelos de RLS são significativos e apropriados para explicar relação achatamento e alongamento 2D real e relação achatamento e alongamento 3D virtual. Com as análises realizadas, é possível apontar que o Grupo 1 explica melhor a variância da relação achatamento e alongamento 3D virtual a partir da relação achatamento e alongamento 2D real, visto que existe uma relação estatisticamente significativa e o valor de R^2 é o maior, em relação aos Grupos 2 e 3. Além do mais, assim como mencionado nos parâmetros esfericidade e achatamento, o tempo para ensaio dos agregados no AIMS para a geração das partículas 3D virtuais a partir de uma imagem 2D real seria mais rápida. Porém, é válido mencionar que a relação entre as partículas 3D virtuais e 2D reais pertencentes aos Grupos 2 e 3 também apresentaram modelos significativos e de excelentes correlações conforme Witczack *et al.*, 2002, Tabela 2.2.

Os resultados obtidos na estatística de regressão para o parâmetro relação achatamento e alongamento estão apresentados no Apêndice N para os três grupos. Foram apresentados gráficos e tabelas com os resultados detalhados dos testes realizados no *IBM SPSS Statistics 25*.

4.4.2 Banco de partículas: 2D versus 3D

Na Tabela 4.10 estão apresentados os quantitativos de agregados e das partículas 3D virtuais classificadas quanto a esfericidade. A esfericidade foi classificada de acordo com o sistema de classificação de propriedades de forma de agregados caracterizados com uso do PDI proposto por Ibiapina (2018) (Tabela 4.1, subitem 4.3.2.4). Observa-se maior variação nas classificações de baixa esfericidade e esfericidade moderada na comparação do quantitativo real e virtual para os três grupos.


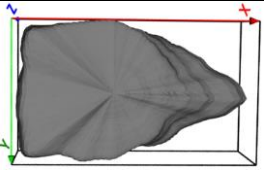
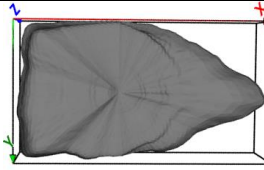
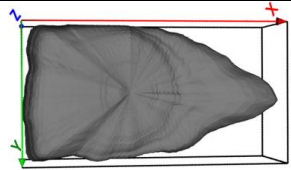

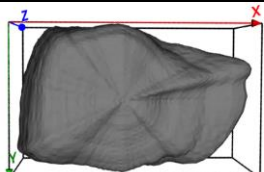
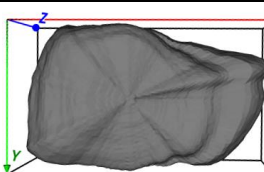
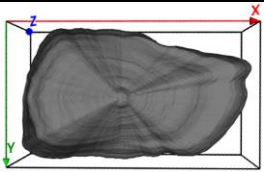

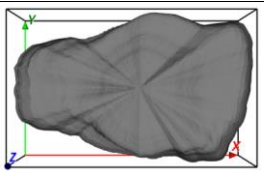
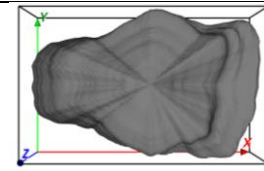
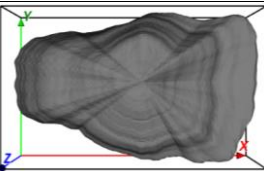
Tabela 4.10 – Número de partículas enquadradas nas classificações da propriedade de esfericidade (Ibiapina, 2018)


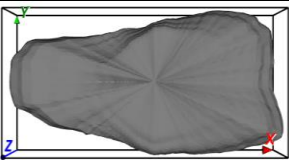
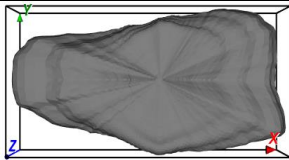
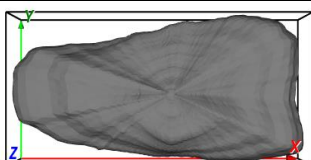

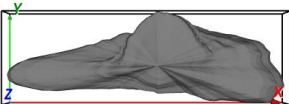
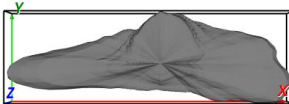


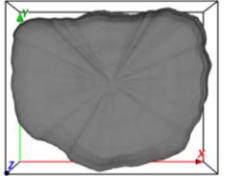
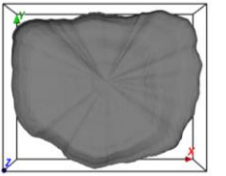
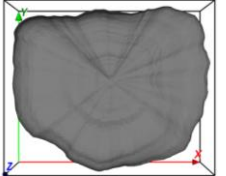

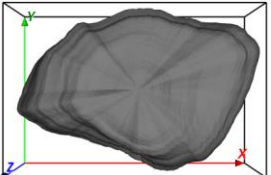
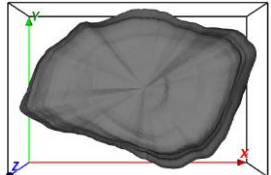
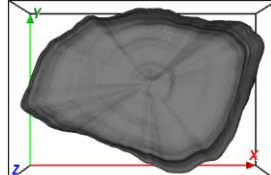
| Parâmetro/Grupo | | 2D real | 3D virtual | | |
|-----------------|-----------------------|---------|------------|---------|---------|
| | | | Grupo 1 | Grupo 2 | Grupo 3 |
| Esfericidade | Achatado/ Alongado | 3 | 2 | 2 | 1 |
| | Baixa esfericidade | 66 | 60 | 58 | 58 |
| | Esfericidade moderada | 78 | 84 | 85 | 87 |
| | Alta esfericidade | 3 | 4 | 5 | 4 |


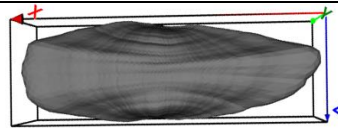
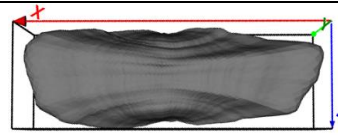
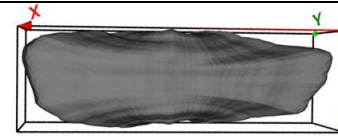

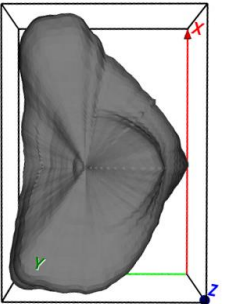
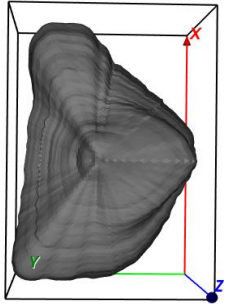
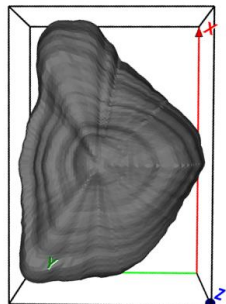

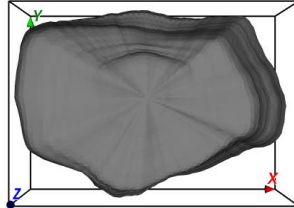
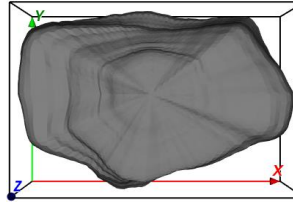
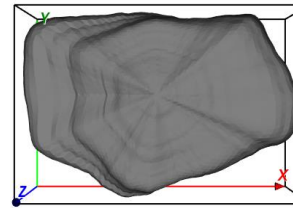
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os resultados do banco de partículas 3D virtuais são em grande número, e, como exemplo, foram selecionados dois agregados por peneira para apresentar uma partícula 3D virtual com classificação de esfericidade igual para os três grupos e uma partícula 3D virtual com classificação de esfericidade diferente em pelo menos um dos grupos. Na Tabela 4.11 estão apresentados alguns resultados dos agregados e das partículas 3D virtuais quanto a classificação de esfericidade, bem como o comparativo entre os agregados reais e as partículas 3D virtuais geradas.

Tabela 4.11 – Resultados das formações das partículas 3D virtuais e comparativos entre agregados reais e partículas 3D virtuais geradas na peneira:
a) 6,35 mm; b) 9,5 mm; c) 12,5 mm; d) 19 mm e e) 25,4 mm

| Peneira | Nº | Agregado real | Partícula Grupo 1 | Partícula Grupo 2 | Partícula Grupo3 |
|---------|-------------------------------|--|---|--|--|
| 6,35 | 16 |  |  |  |  |
| | Esfericidade Classificação | 0,573 Baixa esfericidade | 0,597 Baixa esfericidade | 0,576 Baixa esfericidade | 0,58 Baixa esfericidade |
| 9,5 | 27 |  |  |  |  |
| | Esfericidade Classificação | 0,697 Baixa esfericidade | 0,719 Esfericidade moderada | 0,699 Baixa esfericidade | 0,708 Esfericidade moderada |
| 9,5 | 20 |  |  |  |  |
| | Esfericidade Classificação | 0,654 Baixa esfericidade | 0,678 Baixa esfericidade | 0,672 Baixa esfericidade | 0,674 Baixa esfericidade |

| | | | | | |
|------|---------------|--|---|--|--|
| 9,5 | 30 |  |  |  |  |
| | Esfericidade | 0,497 | 0,539 | 0,53 | 0,52 |
| | Classificação | Achatado/Alongado | Baixa esfericidade | Baixa esfericidade | Baixa esfericidade |
| | 3 |  |  |  |  |
| | Esfericidade | 0,353 | 0,379 | 0,37 | 0,366 |
| | Classificação | Achatado/Alongado | | | |
| 12,5 | 21 |  |  |  |  |
| | Esfericidade | 0,699 | 0,712 | 0,714 | 0,725 |
| | Classificação | Baixa esfericidade | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada |
| 19 | 13 |  |  |  |  |
| | Esfericidade | 0,709 | 0,711 | 0,718 | 0,702 |
| | Classificação | Esfericidade moderada | | | |

| | | | | | |
|------|----|--|---|--|--|
| 19 | 28 |  |  |  |  |
| | | 0,484 | 0,495 | 0,492 | 0,502 |
| | | Achatado/Alongado | Achatado/Alongado | Achatado/Alongado | Baixa esfericidade |
| 25,4 | 10 |  |  |  |  |
| | | 0,732 | 0,773 | 0,777 | 0,754 |
| | | Esfericidade moderada | | | |
| | 2 |  |  |  |  |
| | | 0,688 | 0,708 | 0,716 | 0,702 |
| | | Baixa esfericidade | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada | Esfericidade moderada |


Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.4.3 Simulações de empacotamento da matriz granular

As análises estatísticas (variância e resíduos) realizadas para validar as partículas 3D virtuais mostraram que apenas o Grupo 1 está bem representado, sendo as simulações de empacotamento realizadas apenas com este grupo. Tendo em vista a quantidade de partículas enquadradas nas classificações da propriedade esfericidade, as simulações foram realizadas somente com partículas 3D virtuais enquadradas em baixa esfericidade e esfericidade moderada. Para as classificações achatado/ alongado e alta esfericidade não existiram partículas 3D virtuais retidas em todas as peneiras para formar a curva granulométrica das simulações de empacotamento.


Os resultados das simulações de empacotamentos com partículas 3D virtuais de baixa esfericidade e esfericidade moderadas estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 4.12 e 4.13. No Apêndice O estão apresentadas as partículas 3D virtuais identificadas conforme exposto no Apêndice J para o Grupo 1 e o quantitativo das partículas 3D virtuais em cada peneira para todas as simulações de empacotamento realizadas.

Tabela 4.12 – Resultados das simulações de empacotamento com partículas 3D virtuais de baixa esfericidade

| Molde cilíndrico | Repetições | N_{part} | V_{part} (mm ³) | F_v | n | e |
|--|------------|-------------|-------------------------------|-------|------|-------------|
|  $V_{cil} = 5301437,6029 \text{ mm}^3$ | 1 | 5082 | 1883914,7 | 0,36 | 0,64 | 1,81 |
| | 2 | 5092 | 1859620,5 | 0,35 | 0,65 | 1,85 |
| | 3 | 5326 | 1870878,2 | 0,35 | 0,65 | 1,83 |
| | 4 | 5128 | 1870039,2 | 0,35 | 0,65 | 1,83 |
| | 5 | 4994 | 1872595,3 | 0,35 | 0,65 | 1,83 |
| | 6 | 5111 | 1866498,8 | 0,35 | 0,65 | 1,84 |
| | 7 | 5072 | 1856500,1 | 0,35 | 0,65 | 1,86 |
| | 8 | 4909 | 1872197,6 | 0,35 | 0,65 | 1,83 |
| | 9 | 5210 | 1871154,6 | 0,35 | 0,65 | 1,83 |
| | 10 | 5093 | 1852161,6 | 0,35 | 0,65 | 1,86 |
| | 11 | 5083 | 1879194,4 | 0,35 | 0,65 | 1,82 |
| | 12 | 5109 | 1861848,9 | 0,35 | 0,65 | 1,85 |
| | 13 | 5137 | 1868033,0 | 0,35 | 0,65 | 1,84 |
| | 14 | 5144 | 1860648,5 | 0,35 | 0,65 | 1,85 |
| | 15 | 5065 | 1855963,1 | 0,35 | 0,65 | 1,86 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 4.13– Resultados das simulações de empacotamento com partículas 3D virtuais de esfericidade moderada

| Molde cilíndrico | Repetições | N_{part} | V_{part} (mm ³) | F_v | n | e |
|---|------------|-------------|-------------------------------|-------|------|-------------|
|  <p>$V_{cil} = 5301437,6029$ mm³</p> | 1 | 3716 | 1865864,4 | 0,35 | 0,65 | 1,84 |
| | 2 | 3562 | 1895227,4 | 0,36 | 0,64 | 1,80 |
| | 3 | 3519 | 1833697,1 | 0,35 | 0,65 | 1,89 |
| | 4 | 3623 | 1854843,1 | 0,35 | 0,65 | 1,86 |
| | 5 | 3532 | 1855895,6 | 0,35 | 0,65 | 1,86 |
| | 6 | 3611 | 1886294,2 | 0,36 | 0,64 | 1,81 |
| | 7 | 3729 | 1876685,5 | 0,35 | 0,65 | 1,82 |
| | 8 | 3566 | 1859775,2 | 0,35 | 0,65 | 1,85 |
| | 9 | 3588 | 1854812,2 | 0,35 | 0,65 | 1,86 |
| | 10 | 3596 | 1864774,1 | 0,35 | 0,65 | 1,84 |
| | 11 | 3702 | 1873412,2 | 0,35 | 0,65 | 1,83 |
| | 12 | 3697 | 1876850,8 | 0,35 | 0,65 | 1,82 |
| | 13 | 3583 | 1873695,3 | 0,35 | 0,65 | 1,83 |
| | 14 | 3628 | 1850360,8 | 0,35 | 0,65 | 1,87 |
| | 15 | 3556 | 1857472,8 | 0,35 | 0,65 | 1,85 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Os resultados das simulações de empacotamento para partículas 3D virtuais de baixa esfericidade e esfericidade moderada mostraram pouca variação nos parâmetros F_v e n diante das 15 repetições (F_v : 0,35 - 0,36; n : 0,64 - 0,65). A baixa modificação nos parâmetros F_v e n era esperada nas simulações realizadas para cada classe de esfericidade, fato justificado por ocorrer apenas variações aleatórias das partículas 3D virtuais, posições e orientações para uma mesma curva granulométrica. Além disso, os resultados mostraram que o N_{part} não tem relação com o e , por exemplo, N_{part} maior não implica em e menor (ex. repetição 1 comparada a 2, Tabela 4.12/ ex. repetição 2 comparada a 8, Tabela 4.13). Assim, observou-se um comportamento aleatório na análise destes parâmetros.

Diante desta aleatoriedade, para melhor análise dos parâmetros N_{part} e e , foram contabilizadas as partículas 3D virtuais por peneiras para as duas classes de esfericidade selecionadas. O intuito foi observar a existência ou não de tendência entre peneiras. As Tabelas 4.22 e 4.23, respectivamente, baixa esfericidade e esfericidade moderada, apresentam o quantitativo e percentual amostral de partículas 3D virtuais por peneiras. Ao comparar as repetições 1, 3 e 15 da simulação de partículas de baixa esfericidade (Tabela 4.14, respectivamente, valores de e menor, intermediário e maior) não foi identificada uma relação

entre os parâmetros considerando o percentual de partículas por peneiras. Assim, pode-se concluir que não há influência do tamanho das partículas em maior percentual amostral (aleatoriedade dos dados). Ao comparar as repetições 2, 3 e 8 da simulação de partículas de esfericidade moderada (Tabela 4.15, respectivamente, valores de e menor, maior e intermediário), foi identificado a mesma condição (ausência de tendência). Assim, acredita-se que não houve influência morfológica das partículas (baixa esfericidade e esfericidade moderada), no lançamento das partículas no cilindro e, conseqüentemente, na formação do arranjo da matriz granular (posição/orientação das partículas), visto que a curva granulométrica é igual para todas as repetições, apenas os quantitativos de partículas por peneira que se alteraram (Apêndice O).

Tabela 4.14 – Quantitativo e percentual amostral de partículas 3D virtuais de baixa esfericidade por peneiras

| Peneira (mm) | 6,35 | | 9,5 | | 12,5 | | 19,0 | | 25,4 | | Total de partículas | e | |
|--------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|-----|---------------------|-------------|-------------|
| | Nº | % | Nº | % | Nº | % | Nº | % | Nº | % | | | |
| 1 | 538 | 10,6 | 1025 | 20,2 | 1969 | 38,7 | 1291 | 25,4 | 259 | 5,1 | 5082 | 1,81 | |
| 2 | 518 | 10,2 | 999 | 19,6 | 2037 | 40,0 | 1278 | 25,1 | 260 | 5,1 | 5092 | 1,85 | |
| 3 | 548 | 10,3 | 1106 | 20,8 | 2173 | 40,8 | 1245 | 23,4 | 254 | 4,8 | 5326 | 1,83 | |
| 4 | 520 | 10,1 | 1022 | 19,9 | 2078 | 40,5 | 1247 | 24,3 | 261 | 5,1 | 5128 | 1,83 | |
| 5 | 497 | 10,0 | 918 | 18,4 | 2036 | 40,8 | 1289 | 25,8 | 254 | 5,1 | 4994 | 1,83 | |
| 6 | 524 | 10,3 | 1017 | 19,9 | 2107 | 41,2 | 1196 | 23,4 | 267 | 5,2 | 5111 | 1,84 | |
| 7 | 539 | 10,6 | 1034 | 20,4 | 1956 | 38,6 | 1272 | 25,1 | 271 | 5,3 | 5072 | 1,86 | |
| Repetições | 8 | 505 | 10,3 | 954 | 19,4 | 1927 | 39,3 | 1242 | 25,3 | 281 | 5,7 | 4909 | 1,83 |
| | 9 | 545 | 10,5 | 1016 | 19,5 | 2055 | 39,4 | 1353 | 26,0 | 241 | 4,6 | 5210 | 1,83 |
| | 10 | 502 | 9,9 | 1030 | 20,2 | 2025 | 39,8 | 1283 | 25,2 | 253 | 5,0 | 5093 | 1,86 |
| | 11 | 510 | 10,0 | 1038 | 20,4 | 2038 | 40,1 | 1225 | 24,1 | 272 | 5,4 | 5083 | 1,82 |
| | 12 | 501 | 9,8 | 1048 | 20,5 | 2024 | 39,6 | 1295 | 25,3 | 241 | 4,7 | 5109 | 1,85 |
| | 13 | 541 | 10,5 | 1032 | 20,1 | 2050 | 39,9 | 1249 | 24,3 | 265 | 5,2 | 5137 | 1,84 |
| | 14 | 494 | 9,6 | 1030 | 20,0 | 2060 | 40,0 | 1334 | 25,9 | 226 | 4,4 | 5144 | 1,85 |
| | 15 | 512 | 10,1 | 1027 | 20,3 | 2013 | 39,7 | 1251 | 24,7 | 262 | 5,2 | 5065 | 1,86 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 4.15 – Quantitativo e percentual amostral de partículas 3D virtuais de esfericidade moderada por peneiras

| Peneira (mm) | 6,35 | | 9,5 | | 12,5 | | 19,0 | | 25,4 | | Total de partículas | <i>e</i> | |
|--------------|------|-----|-------------|-----|-------------|------|-------------|-----|-------------|-----|---------------------|----------|-------------|
| | Nº | % | Nº | % | Nº | % | Nº | % | Nº | % | | | |
| | 1 | 391 | 10,5 | 796 | 21,4 | 1401 | 37,7 | 959 | 25,8 | 169 | 4,5 | 3716 | 1,84 |
| | 2 | 355 | 10,0 | 698 | 19,6 | 1400 | 39,3 | 922 | 25,9 | 187 | 5,2 | 3562 | 1,80 |
| | 3 | 320 | 9,1 | 728 | 20,7 | 1394 | 39,6 | 908 | 25,8 | 169 | 4,8 | 3519 | 1,89 |
| | 4 | 336 | 9,3 | 795 | 21,9 | 1448 | 40,0 | 855 | 23,6 | 189 | 5,2 | 3623 | 1,86 |
| | 5 | 356 | 10,1 | 700 | 19,8 | 1382 | 39,1 | 921 | 26,1 | 173 | 4,9 | 3532 | 1,86 |
| | 6 | 363 | 10,1 | 694 | 19,2 | 1488 | 41,2 | 871 | 24,1 | 195 | 5,4 | 3611 | 1,81 |
| | 7 | 381 | 10,2 | 783 | 21,0 | 1473 | 39,5 | 933 | 25,0 | 159 | 4,3 | 3729 | 1,82 |
| Repetições | 8 | 377 | 10,6 | 702 | 19,7 | 1422 | 39,9 | 875 | 24,5 | 190 | 5,3 | 3566 | 1,85 |
| | 9 | 338 | 9,4 | 727 | 20,3 | 1443 | 40,2 | 884 | 24,6 | 196 | 5,5 | 3588 | 1,86 |
| | 10 | 362 | 10,1 | 705 | 19,6 | 1447 | 40,2 | 895 | 24,9 | 187 | 5,2 | 3596 | 1,84 |
| | 11 | 371 | 10,0 | 749 | 20,2 | 1519 | 41,0 | 883 | 23,9 | 180 | 4,9 | 3702 | 1,83 |
| | 12 | 365 | 9,9 | 717 | 19,4 | 1567 | 42,4 | 873 | 23,6 | 175 | 4,7 | 3697 | 1,82 |
| | 13 | 342 | 9,5 | 724 | 20,2 | 1437 | 40,1 | 901 | 25,1 | 179 | 5,0 | 3583 | 1,83 |
| | 14 | 354 | 9,8 | 748 | 20,6 | 1466 | 40,4 | 864 | 23,8 | 196 | 5,4 | 3628 | 1,87 |
| | 15 | 340 | 9,6 | 697 | 19,6 | 1445 | 40,6 | 905 | 25,4 | 169 | 4,8 | 3556 | 1,85 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Na comparação dos empacotamentos de partículas 3D virtuais (baixa esfericidade *versus* esfericidade moderada) foram observados maiores valores de *e* para a matriz granular formada por partículas de esfericidade moderada ($e = 1,86$ *versus* $e = 1,89$). Tal comportamento pode ser justificado pelas partículas 3D virtuais exibirem um contorno mais próximo de uma esfera perfeita, o que proporciona maior volume do espaço vazio. No entanto, testes estatísticos foram realizados para melhor interpretação do parâmetro *e*.

Diante das 15 repetições de empacotamento para cada esfericidade analisada, os testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) mostraram que a distribuição da amostra quanto ao *e* foi igual a distribuição normal (hipótese nula aceita com nível de confiança de 95%) no empacotamento com partículas de baixa esfericidade (valor $p = 0,129$, Tabela 4.16) e de esfericidade moderada (valor $p = 0,200$, Tabela 4.17). A partir desta evidência, os testes paramétricos foram aplicados para avaliar se o fenômeno *e* do empacotamento com partículas de baixa esfericidade é semelhante ou não ao empacotamento com partículas de esfericidade moderada.

Tabela 4.16 – Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov para o parâmetro e no empacotamento com partículas de baixa esfericidade

| | Testes de Normalidade | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|----|--------------|--------------|----|-------|
| | Kolmogorov-Smirnov | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Índice de vazios (e) | 0,195 | 15 | 0,129 | 0,923 | 15 | 0,210 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 4.17 – Teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov para o parâmetro e no empacotamento com partículas de esfericidade moderada

| | Testes de Normalidade | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|----|--------------|--------------|----|-------|
| | Kolmogorov-Smirnov | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Índice de vazios (e) | 0,104 | 15 | 0,200 | 0,982 | 15 | 0,980 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Conforme a normalidade nas repetições de empacotamento com partículas de baixa esfericidade e esfericidade moderada, o teste t para duas amostras independentes foi aplicado. Para tal, as premissas deste teste foram certificadas: i) os agregados foram separados aleatoriamente para gerar as partículas 3D virtuais e realizar o empacotamento, ii) as duas amostras são independentes, embora pertençam a mesma população foram alocadas aleatoriamente e iii) homogeneidade de variância foi analisada pelo teste de Levene, ou seja, verificado se a variância do e no empacotamento com partículas de baixa esfericidade é igual ou não a variância do e no empacotamento com partículas de esfericidade moderada. O resultado do teste de Levene mostrou que existe evidência de igualdade entre as variâncias do e nos empacotamentos comparados (hipótese nula aceita com nível de confiança de 95%), ou seja, as amostras apresentaram homocedasticidade (Tabela 4.18, valor $p = 0,106$ com base em média, pois e apresenta normalidade).

Tabela 4.18 – Teste de homogeneidade de variância para o parâmetro e no empacotamento com partículas de esfericidade baixa e moderada

| Teste de Homogeneidade de Variância | | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----|--------|--------------|
| | | Estatística de Levene | df1 | df2 | Sig. |
| Com base em média | | 2,798 | 1 | 28 | 0,106 |
| Índice de vazios (e) | Com base em mediana | 2,602 | 1 | 28 | 0,118 |
| | Com base em mediana e com df ajustado | 2,602 | 1 | 22,367 | 0,121 |
| | Com base em média aparada | 2,781 | 1 | 28 | 0,107 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Com todas as premissas atendidas, o teste t foi realizado. O resultado mostrou que existe evidência suficiente para afirmar que a média do e no empacotamento com partículas de baixa esfericidade é semelhante à média do e no empacotamento com partículas de esfericidade moderada (hipótese nula aceita, nível de confiança de 95%, valor $p = 0,72$, tabela 4.19). Dessa forma, os empacotamentos apresentaram semelhança quanto ao parâmetro e analisado.

Tabela 4.19 – Teste t para duas amostras independentes com o parâmetro e no empacotamento com partículas de esfericidade baixa e moderada

| | e (baixa esfericidade) | e (esfericidade moderada) |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Média | 1,83933 | 1,84200 |
| Variância | 0,00024 | 0,00059 |
| Observações | 15,00000 | 15,00000 |
| Variância agrupada | 0,00041 | |
| Hipótese da diferença de média | 0,00000 | |
| Gl | 28,00000 | |
| Stat t | -0,35983 | |
| P(T<=t) uni-caudal | 0,36084 | |
| t crítico uni-caudal | 1,70113 | |
| P(T<=t) bi-caudal | 0,72167 | |
| t crítico bi-caudal | 2,04841 | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

4.5 Considerações finais

Este capítulo explorou a caracterização de 150 agregados quanto as propriedades de forma obtidas pelo PDI através do equipamento AIMS e ao sistema de classificação de propriedades de forma de agregados conforme Ibiapina (2018). Foram analisados os parâmetros de esfericidade e relações de forma de agregados 2D reais para criar um banco de partículas 3D virtuais por três diferentes formações (uma, duas e três imagens 2D reais - AIMS). Além disso, analisou-se a influência da morfologia das partículas 3D virtuais no empacotamento da matriz granular de lastro. Como conclusões pode-se destacar:

- Na condição de geração de partículas 3D virtuais desenvolvidas a partir de uma imagem 2D real (Grupos 1), pode-se obter intensidade de correlação excelente para os quatro parâmetros analisados, esfericidade ($R^2=0,98$), achatamento ($R^2=0,91$), alongamento ($R^2=0,96$) e relação achatamento e alongamento ($R^2=0,98$). Para os quatro parâmetros analisados é possível afirmar com 95% de confiança que as variáveis 2D reais descrevem bem as variáveis 3D virtuais na representação de modelos lineares.

- Nas condições de geração de partículas 3D virtuais com duas imagens reais (Grupo 2) e três imagens reais (Grupo 3), as intensidades de correlação para os quatro parâmetros também foram excelentes, mas quanto à análise de resíduos não apresentou normalidade no parâmetro de alongamento. Dessa forma, a RLS não é um modelo de regressão que explica a relação entre o alongamento 2D real e alongamento 3D virtual e não faria sentido aplicar a regressão polinomial (2º grau) ou outras regressões. Por exemplo, na consideração de uma regressão quadrática ($a > 0$) não faria sentido afirmar que com o aumento do alongamento 2D real o alongamento 3D virtual reduz.

- Diante das análises de variância e resíduos realizadas nos três grupos, conclui-se que as partículas 3D virtuais são bem representadas pela formação de uma imagem 2D real. Isso é satisfatório por motivos de análises laboratoriais com relação a tempo de caracterização de agregado em relação a obtenção de duas ou três imagens.

- As simulações de empacotamento de partículas 3D virtuais com esfericidade baixa e moderada apresentaram indícios, com 95% de confiança, de semelhança diante da análise do parâmetro índice de vazios (e). Embora exista uma diferença considerável no número de partículas (N_{part}) dos dois grupos de esfericidade (baixa e moderada), o N_{part} não apresentou relevância em relação ao e . Diante das análises por testes e comparações, conclui-se que a formação da matriz granular é afetada pela alocação aleatória das partículas 3D virtuais, posições e orientações para uma mesma curva granulométrica. Ainda nesse contexto, acredita-

se que a morfologia das partículas tem influência nas análises de parâmetros como força máxima (N), número de contato e de coordenação, sendo necessário simulações com carregamento cíclico para avaliar deformações permanentes e espaços vazios para curvas granulométricas semelhantes. Além disso, realizar simulações com partículas 3D virtuais em todas as classes de esfericidade, também achatado/alongado e alta esfericidade, pode gerar análises mais robustas quanto ao fenômeno de intertravamento/empacotamento da matriz granular de agregados. A presente pesquisa não realizou tais simulações, mesmo sem carregamentos cíclicos, por ausência de agregados com as classificações de esfericidade mencionada para construir a curva granulométrica desejada.

No geral, o desenvolvimento de um banco de partículas 3D virtuais que representam os agregados reais caracterizados pelo PDI fortalece novas pesquisas em várias áreas de estudo com aplicação de agregados, como por exemplo, a área ferroviária. Nessa área será possível analisar o conjunto granular da camada de lastro (intertravamento e empacotamento), auxiliar na seleção de agregados para um melhor desempenho na via, reduzir desgastes e falhas dos elementos constituintes da via, assim como, o número de intervenções de manutenção. Será possível obter parâmetros de difícil obtenção em laboratório e em campo através das simulações numéricas com partículas irregulares próximas às reais.

Diante da importância de desenvolver um banco de partículas 3D virtuais, as contribuições mais relevantes desta etapa da pesquisa estão elencadas a seguir:

1. Formação de partículas 3D virtuais através da teoria dos descritores de Fourier 2D a partir de imagens geradas com o uso do AIMS;
2. Comprovação da eficiência em gerar um banco de partículas 3D virtuais com os parâmetros de esfericidade, achatamento, alongamento e relação achatamento e alongamento compatíveis com as reais;
3. Construção de uma biblioteca de partículas 3D virtuais para desenvolvimento de análises computacionais.
4. Simulação de um fenômeno ferroviário com partículas 3D virtuais relevante para avaliar o empacotamento granular através do parâmetro índice de vazios.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa teve como objetivo geral a proposição de um protocolo para contribuir na seleção de agregados, ainda na etapa de projeto, com características petrográficas, físicas e morfológicas para a produção de obras de infraestruturas de transportes, em destaque as obras ferroviárias lastradas. Para tanto, os seguintes objetivos específicos foram alcançados: avaliar os sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados estabelecidos por Al Rousan (2004) e Ibiapina (2018); avaliar as relações entre propriedades petrográficas, físicas e morfológicas de agregados; analisar a geração de partículas 3D virtuais desenvolvida com parâmetros de forma extraídos de agregados caracterizados pelo PDI em escala 2D com o uso do AIMS; analisar a influência de diferentes propriedades morfológicas de agregados no empacotamento da matriz granular de lastros ferroviários através de simulações com MED.

Para a análise dos dois sistemas de classificação de propriedades de forma de agregados, foram caracterizados 149 agregados e comparados quanto a classificação por média e percentual (ambos, fração a fração e geral). A textura superficial e a forma 2D apresentaram maiores índices de classificação distintos entre os dois sistemas, enquanto que a angularidade e a esfericidade mostraram fortes indícios (correlação boa e excelente, $R^2 \geq 0,70$) de igualdade entre os dois sistemas. Nesse contexto, a depender do sistema de classificação de agregados escolhido, pode-se ocorrer a rejeição de um material de modo equivocado, ainda na fase de projeto, dependendo das propriedades aceitáveis para sua aplicação. Entretanto, a classificação de Ibiapina (2018) é mais indicada para o cenário nacional, pois esta foi proposta através de um banco de dados de agregados brasileiros.

A avaliação da relação entre as propriedades petrográficas, físicas e morfológicas de agregados foi realizada a partir de variáveis qualitativas e quantitativas. Aplicaram-se relações de tendências para analisar as variáveis qualitativas (visual) e relações de correlação para analisar as variáveis quantitativas. Nesse contexto, as rochas com forma do grão anédrica ou anédrica/subédricas, granulação mais grossa (média/grossa), textura equigranular e contato reto apresentaram tendências de maior degradação (abrasão, impacto e esmagamento). As rochas com granulação fina, textura inequigranular e contato côncavo/convexo ou serrilhado apresentaram tendências de maior desgaste (abrasão, polimento e quebra). As rochas com granulação mais grossa, textura inequigranular ou porfirítica e contato côncavo/convexo apresentaram tendências de maior degradação a compressão.

Na abordagem da mineralogia em relação ao comportamento físico e morfológico, concluiu-se que diante dos teores de minerais nas rochas (máficos, félsico e biotita) é possível estimar o comportamento do agregado quanto ao processo degradativo e ao comportamento morfológico do mesmo. Essas constatações podem ajudar no processo de seleção de materiais, ainda em fase de projeto, para enquadramento nas normas diante dos limites especificados para cada ensaio físico.

Na avaliação da relação entre as propriedades petrográficas, observou-se que rochas com granulação média/grossa proporcionam um maior valor de microfissuramento intergrão não preenchido entre minerais e para rochas com granulação fina, esse estado microfissural reduz. Na avaliação da relação entre as propriedades físicas, constatou-se que a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas da rocha se relaciona diretamente com a resistência à compressão uniaxial e inversamente com os índices físicos, porosidade e absorção d'água; a redução da porosidade e absorção d'água das rochas estima o aumento de resistência à compressão uniaxial; o ensaio degradativo de abrasão LA explica o ensaio de impacto Treton e resistência ao esmagamento e o ensaio impacto Treton explica a resistência ao esmagamento. Na avaliação da relação entre as propriedades morfológicas, foi possível identificar estimativas de propriedades de forma de agregados antes e depois da realização do mesmo ensaio degradativo, o que pode auxiliar na previsão da resistência à degradação e na previsão do comportamento do agregado diante da aplicação requerida.

Para gerar um banco de partículas 3D virtuais através de imagens 2D, obtidas com o uso do AIMS, foi possível inserir parâmetros de esfericidade, achatamento, alongamento e relação achatamento e alongamento e obter intensidade de correlação excelente ($R^2 \geq 0,90$) para todos os parâmetros. Concluiu-se que para os quatro parâmetros analisados é possível afirmar, com 95% de confiança, que as variáveis 2D reais descrevem bem as variáveis 3D virtuais na representação de modelos lineares. Entretanto, nas análises de variância e resíduos realizadas, conclui-se que as partículas 3D virtuais são bem representadas (95% de confiança) apenas pela formação de uma imagem 2D real (Grupo 1).

A análise da influência de diferentes propriedades morfológicas de agregados no empacotamento da matriz granular de lastro ferroviário foi realizada utilizando-se a mesma curva granulométrica para dois grupos de esfericidade: baixa e moderada classificadas segundo Ibiapina (2018). Foram simuladas 15 repetições de empacotamento para geração de uma representatividade estatística e aplicação de testes de hipótese de modo a verificar a igualdade das médias dos índices de vazios (e) resultantes das simulações. Nesse contexto, concluiu-se

que existe evidência suficiente (95% de confiança) para afirmar que a média do e no empacotamento com partículas de baixa esfericidade é semelhante à média do e no empacotamento com partículas de esfericidade moderada, sendo a formação da matriz granular afetada pela aleatoriedade no lançamento das partículas 3D virtuais, com modificações em posições e orientações das mesmas.

Para trabalhos futuros de pesquisa, seguem algumas sugestões:

1. Calibrar os valores limites do sistema de classificação desenvolvido por Ibiapina (2018) através da análise estatística de MANOVA com experimento misto (cruzado e hierárquico);
2. Avaliar rochas e agregados provenientes de outras regiões do Brasil para enriquecer o banco de dados com maior diversidade geológica e investigar as relações entre as propriedades petrográficas, físicas e morfológicas;
3. Complementar a sugestão anterior, separar o banco de dados por grupo de petrografias (variáveis qualitativas) semelhantes e reavaliar as relações entre as propriedades;
4. Avaliar a geração das partículas 3D virtuais por duas e três imagens 2D, obtidas com o uso do AIMS, e comparar com as partículas 3D geradas pelas imagens extraídas de um scanner 3D;
5. Criar um banco de dados de partículas 3D virtuais de tamanhos reais maiores do que 25,4 mm e com todas as classes de classificação de esfericidade para amplas aplicações;
6. Realizar simulações de empacotamento de matriz granular de lastro em escala real com parâmetros reais de via férrea para avaliar a influência do tamanho e morfologia das partículas.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2016) Standard method of test for determining aggregate shape properties by means of digital image analysis, Washington, D. C., TP81-10.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2005) NBR 7211: Agregados para concreto_ Especificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- _____. (2006) NBR 7809: Definições: Determinação do Índice de Forma do Agregado. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- _____. (2014) NBR 5564: Via Férrea – Lastro-Padrão. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AL-ROUSAN, T. M. (2004) Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system. Tese de Doutorado. TAMU, College Station, Texas, Estados Unidos.
- ALVES, V. A. H. S. (2014) Avaliação da resistência à degradação mecânica de agregados da região metropolitana do Rio de Janeiro por técnicas digitais de imagens. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2010) ASTM D4791: Standard Test Methods for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken.
- _____. (2013) ASTM D5821: Standard Test Methods for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. West Conshohocken.
- _____. (2017) ASTM C1252-17: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading). West Conshohocken.
- ANOCHIE-BOATENG, J. K.; KOMBA, J. J.; MVELASE, G. M. (2011) Advanced and automated laser-based technique to evaluate aggregates. IRF International Road Congress: Innovation in Road Infrastructure, Moscow, Rússia, pp. 22-24.
- AREMA (2013) Manual for railway engineering. Lanham: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, AREMA.
- AS 2758.7 (1996) Aggregates and rock for engineering purposes, Part 7: Railway ballast.
- BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2011) Avaliação do Processo de Produção de Agregados por Meio da Utilização do Processamento Digital de Imagens. In: XXV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Belo Horizonte, MG.
- BESSA, I. S. (2012) Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations. *Construction and building materials*, v.37, p. 370-378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.051>.
- BESSA, I. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. (2014) Aggregate shape properties and their influence on the behavior of hot-mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 15, p. 385-405. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.883323>
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2010) Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA. 504p.
- BIAN, X.; HUANG, H.; TUTUMLUER, E.; GAO, Y. (2016) “Critical particle size” and ballast gradation studied by Discrete Element Modeling. *Transportation Geotechnics*, p. 38-44

- BRIGGS, C.; EVERTSSON, C. (1998) Shape Potential of Rock. *Minerals Engineering*, 11(2), p. 125-132. DOI: 10.1016/S0892-6875(97)00145-3
- BOLER, H.; QIAN, Y.; TUTUMLUER, E. (2014) Influence if size and shape properties of railroad ballast on aggregate packing: statistical analysis. *Transportation Research Record*, Washington, D. C., 2448, p. 94-104. DOI: <https://doi.org/10.3141/2448-12>
- BOWMAN, E. T.; SOGA, K.; DRUMMOND, T. W. (2000) Particle shape characterization using fourier analysis. Relatório Técnico, Cambridge University Engineering Department – CUED/D-Soils/TR315. Disponível em: <http://www-civ.eng.cam.ac.uk/geotech_new>. Acesso em: 10 mar. 2019.
- CANTISANI, E.; GARZONIO, C. A.; RICCI, M.; VETTORI, S. (2013) Relationships between the petrographical, physical and mechanical properties of some Italian sandstones. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 60, p. 321-332. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.042>
- CASTELO BRANCO, V. T. F.; MASAD, E.; LITTLE, D. N.; SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G. (2006) Caracterização de forma, angularidade e textura de agregado de brita granítica e escórias de aciaria usando o *Aggregate Imaging System* (AIMS). In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, Brasília. Anais...
- CHANDAN, C.; SIVAKUMAR, K.; MASAD, E.; FLETCHER, T. (2004) Application of imaging techniques to geometry analysis of aggregate particles. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(1), p. 75-82. DOI: [dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:1\(75\)](dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:1(75))
- CHRISMER, S. M. (1986) Considerations of factors affecting ballast performance. *Bulletin 704 of the American Railway Engineering Association*, 87, p. 118-150.
- CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique* 29(1), p. 47–65. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. (1994) DNER-ME 086: Agregado – Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro.
- DIÓGENES, L. M. (2015) Avaliação da influência da britagem nas propriedades de forma de agregados por meio do processamento digital de imagens. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.
- DIÓGENES, D. F. (2016) Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do processamento digital de imagens. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- DIÓGENES, D. F.; CASTELO BRANCO, V. T. F. (2016) Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do Processamento Digital de Imagens. ANPET (Ed), XXX. ANPET, RJ.
- DIÓGENES, D. F.; MAIA, R. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. (2017) Evaluation of the ballast aggregates shape properties using digital image processing techniques. *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields –Loizos et al. (Eds)*. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-29595-7.
- DIÓGENES, L. M. (2018) Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (2016) ETM – 002: Lastro Padrão de Brita.
- _____. (2020) DNIT 425- ME: Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio.
- _____. (2020) DNIT 432- ME: Agregados - Determinação das propriedades de forma por meio do Processamento Digital de Imagens (PDI) - Método de ensaio.
- EN 13450 (2005) Aggregates for railway ballast.
- FIELD, A. Descobrimo a estatística usando o SPSS. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- GONZÁLEZ, J. I (2017) Numerical analysis of railway ballast behavior using the Discrete Element Method. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- GUO, Y. L; JING, G. O. (2017) Ballast degradation analysis by Los Angeles Abrasion test and image analysis method. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields – Loizos et al. (Eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-29595-7.
- GOST 7392 (2002) Crushed stone of solid rocks for railway ballast – Specifications. Russian Federation.
- HE, D.; EKERE N. N.; CAI, L. (2001) New statistic techniques for structure evaluation of particle packing. Materials Science and Engineering: A 298:209–215. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)01284-3
- HOSSAIN, Z.; INDRARATNA, B.; DARVE, F.; THAKUR, P. K. (2007) DEM analysis of angular ballast breakage under cyclic loading. Geomech. and Geoen, p. 175–181. DOI: <https://doi.org/10.1080/17486020701474962>
- HUANG, H. (2010) Discrete element modeling of railroad ballast using imaging based aggregate morphology characterization. Tese de Doutorado. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois. EUA.
- HUANG, H.; TUTUMLUER, E. (2011) Discrete element modeling for fouled railroad ballast. Journal of Journal of Construction and Building Materials, 25 (2011), p. 3306-3312. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.019.
- IBIAPINA, D. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; RODRIGUES, C. B.; BESSA, I. S. (2017) Avaliação da relação entre angularidade de agregados e parâmetros do esqueleto mineral de misturas asfálticas. In: 19º Congresso Ibero Latino Americano Del Asfalto, Medellin. Anais... Medellin: CILA, poster 317.
- IBIAPINA, D. S. (2018) Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens para a seleção de materiais brasileiros. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- IBIAPINA, D. S.; DIOGENES, L. M.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; FREITAS, S. M.; MOTTA, L. M. G. (2018) Proposição de um sistema de classificação das propriedades de forma de agregados caracterizados com o uso do processamento digital de imagens a partir de materiais oriundos do Brasil. Transportes, 26(4). DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v26i4.1510>
- IBIAPINA, D. S.; DIOGENES, L. M.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; FREITAS, S. M.; MOTTA, L. M. G.; DIÓGENES, D. F. (2020) Análise estatística da qualidade das medidas das propriedades de forma de agregados com o uso do Processamento Digital de Imagens (PDI). Transportes, 28(5). DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i1.1865>

- INDRARATNA, B.; THAKUR, P.; VINOD, J. (2010) Experimental and numerical study of railway ballast behavior under cyclic loading. *International Journal of Geomechanics*, 10(4), p. 136-144. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000055)
- INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C. (2011) *Advanced rail geotechnology ballasted track*. Taylor & Francis Group, London, UK.
- J. IRAZÁBAL, J.; SALAZAR, F.; OÑATE, E. (2015) Numerical modelling of railway ballast behavior using the Discrete Element Method (DEM) and spherical particles. IV International Conference on Particle-Based Methods (Particles 2015). Barcelona.
- J. IRAZÁBAL, J.; SALAZAR, F.; OÑATE, E. (2017) Shape characterization of railway ballast stones for discrete element calculations. V International Conference on Particle-Based Methods (Particles 2017). Hannover.
- KEIKHA, T.; KEYKHA, H. A. (2013) Correlation between mineralogical characteristics and engineering properties of granitic rocks. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18(5), p. 4055-4065.
- KLINCEVICIUS, M. G. Y. (2011) *Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- KOOHMISHI, M.; PALASSI, M. (2016) Evaluation of the strength of railway ballast using point load test for various size fractions and particle shapes. *Rock Mech Rock Eng.* 49(7), p. 2655–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0914-3>
- KOOHMISHI, M.; PALASSI, M. (2017) Evaluation of morphological properties of railway ballast particles by image processing method. *Transportation Geotechnics*. 12, p. 15-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.07.001>
- KWAN, A. K. H.; MORA, C. F. (2001) Effects of various shape parameters on packing of aggregate particles. *Magazine of Concrete Research*, 53(2), p. 91-100. DOI: <https://doi.org/10.1680/macrc.2001.53.2.91>
- LEAL NETO, A. (2017) *Caracterização tecnológica de rochas ornamentais pegmatíticas do Seridó Oriental Paraibano-Pedra Lavrada/PB*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- LEKARP, F.; ISACSSON, U. (2001) The effects of grading scale on repeated load triaxial test results. *International Journal of Pavement Engineering*, 2(2), p. 85-101. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298430108901719>
- LOBO-GUERRERO, S.; VALLEJO, L. E. (2006) Discrete-element method analysis of rail track ballast degradation during cyclic loading. *Granular Matter*, 8, p. 195–204. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-006-0006-2>
- MAHMOUD, E.; MASAD, E. (2007) Experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(11), p. 977–985. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:11\(977\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:11(977))
- MAHMOUD, E. M.; GATES, L.; MASAD, E. A.; ERDOGAN, S.; GARBOCZI, E. (2010) Comprehensive evaluation of AIMS texture, angularity, and dimension measurements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(4), p. 369-379. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000033](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000033)
- MAHMOUD, S. M. N. (2017) *Effect of particle size distribution and packing characteristics on railroad ballast shear strength: A numerical study using the Discrete Element Method*. Dissertação de Mestrado. Boise State University. Idaho. EUA.
- MAHMOUD, E.; PERALES, G.; BESHEARS, S. (2016) Accelerated laboratory testing of aggregate friction properties. *Transportation Geotechnics*, 9, p. 49-56. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.07.002>

- MASAD, E.; OLCOTT, D.; WHITE, T.; TASHMAN, L. (2001) Correlation of Fine Aggregate Imaging Shape Indices with Asphalt Mixture Performance. In: Transportation Research Record 1757. Journal of the 'Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., p. 148-156, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/1757-17>
- MASAD, E. (2003) The development of a computer controlled image analysis system for measuring aggregate shape properties. National Cooperative Highway Research Program NCHRP-IDEA Project 77 Final Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- MASAD, E. A. (2005) Aggregate Imaging System (AIMS): Basics and applications. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. Project P Cooperation with the Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Report nº FHWA/TX-05/5-1707-01-1. Disponível em: <<http://tti.tamu.edu/documents/5-1707-01-1.pdf>>. Acesso em: 07 out. 2019.
- MASAD, E. A.; AL-ROUSAN, T.; BUTTON, J.; LITTLE, D.; TUTUMLUER, E. (2005). Test methods for characterizing aggregate shape, texture and angularity. Report NCHRP –555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, D. C.
- MASAD, E. A.; AL ROUSAN, T.; BATHINA, M.; MCGAHAN, J.; SPIEGELMAN, C. (2007) Analysis of aggregate shape characteristics and its relationship to hot mix asphalt performance. Road Materials and Pavement Design, 8, p. 317-350. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2007.9690077>
- MERHEB, A. H. M. (2014). Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- MEYER, A.P. (2003) Influência da petrografia no comportamento tecnológico de rochas ornamentais do Complexo Socorro (SP) e maciço Pedra Branca (MG). Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- MOAVENI, M.; QIAN, Y.; BOLER, H.; MISHRA, D.; TUTUMLUER, E. (2014a) Investigation of ballast degradation and fouling trends using image analysis. Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Stirlingshire, Scotland.
- MOAVENI, M.; MAHMOUD, E; ORTIZ, E. M; TUTUMLUER, E.; BESHEARS, S. (2014b) Use of advanced aggregate imaging systems to evaluate aggregate resistance to breakage, abrasion, and polishing. Transportation Research Record, Washington, D. C., 2401, p. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.3141/2401-01>
- MOAVENI, M; QIAN, Y; QAMHIA, I. I.A.; TUTUMLUER, E.; BASYE, C.; LI, D. (2016) Morphological characterization of railroad ballast degradation trends in the field and laboratory. Transportation Research Record, Washington, D. C., 2545, p. 89-99. DOI: <https://doi.org/10.3141/2545-10>
- MOAVENI, M.; WANG, S.; HART, J. M.; TUTUMLUER, E.; AHUJA, N. (2013) Evaluation of Aggregate Size and Shape by Means of Segmentation Techniques and Aggregate Image Processing Algorithms. Transportation Research Record, Washington, D. C., 2335, p. 50-59. DOI: <https://doi.org/10.3141/2335-06>
- MOLLON, G.; ZHAO, J. (2012) Fourier–Voronoi-based generation of realistic samples for discrete modelling of granular materials. Granular Matter, 14, p. 621–638. DOI:10.1007/s10035-012-0356-x
- MOLLON, G.; ZHAO, J. (2013) Generating realistic 3D sand particles using Fourier Descriptors. Granular Matter, 15, p. 95–108. DOI: DOI 10.1007/s10035-012-0380-x

- MOLLON, G.; ZHAO, J. (2014) 3D generation of realistic granular samples based on random fields theory and Fourier shape descriptors, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 279, p. 46–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2014.06.022>
- MORALES, I. P.; FARIAS, M. M.; VALERA, R. R.; MORFA, C. R.; CARVAJAL, H. E. M. (2015) Contributions to the generalization of advancing front particle packing algorithms. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 107(12), p. 993-1008. DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.5192>
- MORFA, C. R.; MORALES, I. P.; FARIAS, M. M.; NAVARRA, E. O. I.; VALERA, R. R.; CASANÑAS, H. D. (2018) General advancing front packing algorithm for the discrete element method. *Computational Particle Mechanics*, 5, p. 13-33. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-016-0144-1>
- MORFA, C. R.; CORTÉS, L. A.; FARIAS, M. M.; MORALES, I. P.; VALERA, R. R.; ONATE, E. (2018) Systemic characterization and evaluation of particle packings as initial sets for discrete element simulations. *Computational Particle Mechanics*, 5, p. 319-334. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40571-017-0171-6>
- NABAIS, R. J. S. (2014) *Manual básico de engenharia ferroviária*. São Paulo: Oficina de Textos.
- NAVARRO, F. C.; ARTUR, A. C. (2002) Caracterização petrográfica como ferramenta para a previsão do comportamento físico e mecânica de granitos ornamentais: uma discussão. III SRONE. Recife-PE.
- NGO, N. T.; INDRARATNA, B.; RUJIKIATKAMJORN, C. (2017) Micromechanics-based investigation of fouled ballast using large-scale triaxial tests and discrete element modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(2). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001587](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001587)
- OÑATE, E.; ZÁRATE, F.; ARRUFAT, F.; MIQUEL, J.; UBACH, P.A. (2013) Modelling and analysis of cement and concrete samples under mechanical testing with Discrete Element Method. International Report. CIMNE.
- ORTIZ, E.; MAHMOUD, E. (2014) Experimental procedure for evaluation of coarse aggregate polishing resistance. *Transportation Geotechnics*, 1(3), p. 106-118. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.06.001>
- OUHBI, N.; VOIVRET, C.; PERRIN, G.; ROUX, J. N. (2016) Railway ballast: grain shape characterization to study its influence on the mechanical behavior. *Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics*, 143, p. 1120-1127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.150>
- PAZETO, A. A.; ARTUR, A. C. (2015) Correlação entre comportamento tecnológico e propriedades petrográficas das rochas ornamentais silicáticas Branco Galaxy, Ocre Itabira e Diamante Negro. São Paulo, UNESP, *Geociências*, 34(4), p. 828-847.
- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. (1992) *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, 2nd edition Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- PRIKRYL, R. (2001) Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 38, p. 671-682. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00031-4)
- QIAN, Y.; BOLER, H.; MOAVENI, M.; TUTUMLUER, E.; HASHASH, Y. M. A.; GHABOUSSI, J. (2017) Degradation-related changes in ballast gradation and aggregate particle morphology. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(8). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001706)

- RE CAREY, C.; PÉREZ, I.; ROSELLÓ, R.; MUNIZ, M.; HERNÁNDEZ, E.; GIRALDO, R.; OÑATE, E. (2019) Advances in particle packing algorithms for generating the medium in the Discrete Element Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 354, p. 336-362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.011>
- REMÉDIO, M. J. (2017) Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade-trecho Campinas/São Paulo. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- ROSA, A. F. (2019) Efeito da granulometria e da litologia no comportamento de lastro ferroviário em laboratório e por análise computacional. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- SELIG, E. T.; BOUCHER, D. L. (1990) Abrasion Tests for Railroad Ballast. *Geotechnical Testing Journal*, 13(4), p. 301–311. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ10173J>
- SELIG, E. T.; WATERS, J. M. (1994) *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford Publications.
- SILVA, F. H. P. (2018) Estudo do comportamento de um lastro ferroviário sob carga repetida em modelo físico de verdadeira grandeza. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- SHI, C.; SHEN, J.; XU, W.; WANG, R. (2017) Micromorphological characterization and random reconstruction of 3D particles based on spherical harmonic analysis. *J. Cent. South Univ.* 24, p. 1197–1206. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-017-3523-8>
- SILVA, F. D. O. (2016) Avaliação da cor e taxa de exalação de radônio em rochas graníticas entre ciclos de envelhecimento acelerado. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- SUH, H. S.; KIM, K. Y.; LEE, J.; YUN, T. S. (2006) Quantification of bulk form and angularity of particle with correlation of shear strength and packing density in sands. *Engineering Geology*, 220, p. 256-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.02.015>
- TAYLOR, M. A.; GARBOCZI, E. J.; ERDOGAN, S. T.; FOWLER, D. W. (2006) Some properties of irregular 3-D particles. *Powder Technology*, 162(1), p. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.10.013>
- TENNAKOON, N.; INDRARATNA, B.; RUJIKIATKAMJORN, C.; NIMBALKAR, S.; NEVILLE, T. (2012) The role of ballast fouling characteristics on the drainage capacity of rail substructure. *Geotechnical Testing Journal* 35(4), p. 629-640. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ104107>
- TROTTA, R. P. C. (2020) Quantificação da degradação mecânica e avaliação da heterogeneidade de agregados por Processamento Digital de Imagem (PDI). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- TUTUMLUER, E., RAO, C. e STEFANSKI, J. A. (2000) Video image analysis of aggregates (Report No. FHWA-IL-UI-278). Urbana: Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign.
- VALEC 80-EM-033A-58-8006 (2012) Pedra britada para lastro. VALEC Engenharia, Construção e Ferrovias S.A. Brasília, DF, Brasil.

- VALERA, R. R.; MORALES, I. P.; VANMAERCKE, S.; MORFA, C. R.; CORTÉS, L. A.; CASAÑAS, H. D (2015) Modified algorithm for generating high volume fraction sphere packings. *Computational Particle Mechanics*, 2, p. 161-172. DOI: 10.1007/s40571-015-0045-8
- VIZCARRA, G. O. C (2015) Efeito da granulometria no comportamento mecânico de lastro ferroviário. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- WANG, L.; LANE, D. S.; LU, Y.; DRUTA, C. (2009) Portable image analysis system for characterizing aggregate morphology. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2104, p. 3-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2104-01>
- WATTERS, B. R.; KLASSEN, M. J.; CLIFTON, A. W. (1987). Evaluation of ballast materials using petrographic criteria. *Transportation Research Record*, Washington, D. C., 1131, INSS: 0361-1981.
- WEI, D.; WANG, J.; ZHAO, B. (2018) A simple method for particle shape generation with spherical harmonics. *Powder Technology.*, 330, p. 284-291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.006>
- WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T. EI-BASYOUNY, M. VOM QUINTUS, H. (2002). Simple performance test for superpave mix design. *Transportation Research Board*, Washington, D. C., NCHRP Report 465, INSS: 0077-5614.
- WNEK, M. A.; TUTUMLUER, E.; MOAVENI, M.; GEHRINGER, E. (2013) Investigation of aggregate properties influencing railroad ballast performance. *Transportation Research Board*, Washington, D. C., 2374(1), p. 180-189. DOI: <https://doi.org/10.3141/2374-21>
- YASAR, E.; RANJITH, P. G.; PERERA, M. S. A. (2010) Physico-mechanical behaviour of southeastern Melbourne sedimentary rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47(3), p. 481-487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.12.002>
- ZELELEW, H.; ALMUNTASHRI, A.; AGAIAN, S.; PAPAGIANNAKIS, A. T. (2013) An improved image processing technique for asphalt concrete X-ray CT images. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), p. 341-359. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.794370>
- ZHAO, B.; WANG, J. (2016) 3D quantitative shape analysis on form, roundness, and compactness with μ CT, *Powder Technology*, 291, p. 262–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.029>
- ZHAO, B.; WEI, D.; WANG, J. (2017) Particle shape quantification using rotation-invariant spherical harmonic analysis. *Géotechnique Letters*, 7 (2), p. 190-196. DOI: <https://doi.org/10.1680/jgele.17.00011>
- ZHU, H. P.; ZHOU, Z. Y.; YANG, R. Y.; YU, A. B. (2007) Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 62(13), p. 3378-3396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.089>

| Materiais | Pasta no banco de dados | Peneiras (mm) | | | | | | | | | | |
|-----------|--|---------------|----|------|-----|------|--------------|------|-----|-----|------|-------|
| | | Fração graúda | | | | | Fração miúda | | | | | |
| | | 25,4 | 19 | 12,5 | 9,5 | 4,75 | 2,36 | 1,18 | 0,6 | 0,3 | 0,15 | 0,075 |
| 48 | Roberto | | | | | x | x | x | x | x | | x |
| 49* | Teste Tamile Teste2 | | x | | | | x | | | | x | |
| 50 | UEM RCD-2 | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 51 | UFPA_JM Minério de ferro | | | | | | | | x | x | x | x |
| 52 | UFPA_JM Seixo rolado | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 53 | LAMSA Brita 1 2016 Petra | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 54 | LAMSA Brita 2 2016 Petra | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 55 | LAMSA Brita 1 | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 56 | LAMSA Brita 0 | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 57* | IBP Mancha de areia Areia 50-80 | | | | | | | | | x | x | |
| 58* | IBP Mancha de areia Areia 50-100 | | | | | | | | | | x | |
| 59* | IBP Mancha de areia Areia 80-100 | | | | | | | | | | x | |
| 60* | IBP Mancha de areia Areia Danziger 50-80 | | | | | | | | | x | x | |
| 61* | IBP Mancha de areia Areia Danziger 50-100 | | | | | | | | | | x | |
| 62* | IBP Mancha de areia Areia Danziger 80-100 | | | | | | | | | | x | |
| 63* | IBP Mancha de areia Esferas de vidro 70-80 | | | | | | | | | x | x | |
| 64* | IBP Mancha de areia Esferas de vidro 60-70 | | | | | | | | | x | x | |
| 65* | IBP Mancha de areia Esferas de vidro 60-80 | | | | | | | | | x | x | |
| 66* | IBP Mancha de areia PDP 50-80 | | | | | | | | | x | x | |
| 67* | IBP Mancha de areia PDP 50-100 | | | | | | | | | | x | |
| 68* | IBP Mancha de areia PDP 80-100 | | | | | | | | | | x | |
| 69 | Protocolo1 2016 Areia FSM | | | | | | x | x | x | x | x | |
| 70 | Protocolo 2 2016 Brita FTESM | x | x | x | x | | x | | | | | |
| 71 | Protocolo 3 2016 Pó de pedra | | | | | | x | x | x | x | x | x |

| Materiais | Pasta no banco de dados | Peneiras (mm) | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------------------------|---------------|----|------|-----|------|--------------|------|-----|-----|------|-------|
| | | Fração graúda | | | | | Fração miúda | | | | | |
| | | 25,4 | 19 | 12,5 | 9,5 | 4,75 | 2,36 | 1,18 | 0,6 | 0,3 | 0,15 | 0,075 |
| 96 | Protocolo 21 2017 Brita Natural | | x | x | x | x | | | | | | |
| 97* | Protocolo 22 2017 Brita 3/4 | | | x | x | | | | | | | |
| 98 | Protocolo 23 2017 Areia | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 99* | Protocolo 24 2017 Brita 25 | x | | | | | | | | | | |
| 100 | Daianne Lastro | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 101 | Daianne LAD TD | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 102 | Daianne LAD TE | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 103 | Daianne LAD Centro | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 104 | Daianne DTU | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 105 | Lara OCS B-impacto | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 106 | Lara Britacet A-Cônico | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 107 | Lara OCS B-Mandíbula | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 108 | Lara Pyla C-Cônico | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 109 | Lara Itatiba D-Cônico | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 110 | Aecio Profa Jamilla UFES LDA | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 111 | Aecio Profa Jamilla UFES LDB | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 112 | Aecio Profa Jamilla UFES LDC | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 113 | Amanda Pyla | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 114 | Daianne Juliete Amostra 1 cerâmica | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 115 | Daianne Juliete Amostra 2 cerâmica | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 116 | Davidson e Daniel Britacet | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 117 | Davidson e Daniel Britap | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 118 | Davidson e Daniel Natural | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 119 | Davidson e Daniel OCS média | | | | | | x | x | x | x | x | x |

| Materiais | Pasta no banco de dados | Peneiras (mm) | | | | | | | | | | |
|-----------|--|---------------|----|------|-----|------|--------------|------|-----|-----|------|-------|
| | | Fração graúda | | | | | Fração miúda | | | | | |
| | | 25,4 | 19 | 12,5 | 9,5 | 4,75 | 2,36 | 1,18 | 0,6 | 0,3 | 0,15 | 0,075 |
| 120 | Davidson e Daniel OCS seca | | | | | | | x | x | x | x | x |
| 121 | Davidson e Daniel Pedraleza | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 122 | Davidson e Daniel Pyla | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 123 | Davidson e Daniel Tecbrita | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 124* | Fresado Iran Meia source (2) | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 125 | Ibiapina source (1) | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 126 | Ibiapina Iuri Itaitinga ITA 9,5 | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 127 | Ibiapina Iuri Itaitinga ITA 19 | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 128 | Ibiapina Iuri Itaitinga ITA 25 | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 129* | Ibiapina Iuri Itaitinga NOVO 9,5 | | | | x | x | | | | | | |
| 130 | Ibiapina Dani Iuri Itaitinga NOVO 19,5 | | | x | x | x | | | | | | |
| 131 | Ibiapina Iuri Itaitinga Itapodepedra | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 132 | Ibiapina Iuri OCS 4,75 | | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 133 | Ibiapina Iuri OCS 9,5 | | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 134 | Ibiapina Iuri OCS 12,5 | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 135 | Ibiapina Iuri OCS 19 | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 136 | Ibiapina Iuri OCS 25 | x | x | x | | | | | | | | |
| 137 | Ibiapina Iuri OCS AF | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 138 | Ibiapina Iuri OCS AG | | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 139 | Ibiapina Iuri Pyla 9,5 | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 140 | Ibiapina Iuri Pyla 12,5 source (1) | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 141 | Ibiapina Iuri Pyla 19 | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 142 | Ibiapina Iuri Pyla 25 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 143 | Ibiapina Iuri Pylapopedra | | | | | | x | x | x | x | x | x |

| Materiais | Pasta no banco de dados | Peneiras (mm) | | | | | | | | | | |
|-----------|---|---------------|----|------|-----|------|--------------|------|-----|-----|------|-------|
| | | Fração graúda | | | | | Fração miúda | | | | | |
| | | 25,4 | 19 | 12,5 | 9,5 | 4,75 | 2,36 | 1,18 | 0,6 | 0,3 | 0,15 | 0,075 |
| 168 | Mestrado Victor Brita 1" | | x | x | x | x | | | | | | |
| 169 | Mestrado Victor Brita 19 | | | x | x | x | | | | | | |
| 170 | Mestrado Victor Po de pedra | | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 171 | Prof. Marcio Muniz UNB caneta azul source (1) | | x | x | x | x | x | | | | | |
| 172 | Prof. Marcio Muniz UNB caneta vermelha source (1 e 2) | x | x | x | x | x | x | | | | | |
| 173 | Regilene Agregado natural | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 174 | Regilene Areia Davi | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 175 | Regilene Cinza 1 | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| 176 | Regilene Resíduo Davi | | | | | | x | x | x | x | x | x |
| 177 | SBZR | | | x | x | x | x | | | | | |
| 178 | Stefanie Escoria | | | | | | | | x | x | x | x |
| 179 | Suyanne Pyla | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 180 | Wilton 3-8 | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 181 | Wilton Marshall | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 182 | Wilton SUPERPAVE | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 183 | Wilton Vibratório | | | | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 184 | Agosto 2018 Caio Itatiba | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 185 | Agosto 2018 Caio Leticia Instalado | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 186 | Agosto 2018 Caio Rede OCS | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 187 | Agosto 2018 Caio Rede Pyla | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 188 | Agosto 2018 Caio Rede UFES | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 189 | Agosto 2018 Caio UFES | | | | x | x | x | x | x | | | |
| 190 | Agosto 2018 Felipe Amancio Escória | | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 191* | Agosto 2018 Lorrann AM-AL AM-1 todos | | | | | x | x | x | x | x | x | x |

| Materiais | Pasta no banco de dados | Peneiras (mm) | | | | | | | | | | |
|-----------|---|---------------|----|------|-----|------|--------------|------|-----|-----|------|-------|
| | | Fração graúda | | | | | Fração miúda | | | | | |
| | | 25,4 | 19 | 12,5 | 9,5 | 4,75 | 2,36 | 1,18 | 0,6 | 0,3 | 0,15 | 0,075 |
| 192* | Agosto 2018 Lorrán AM-AL AM-2 todos | | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 193* | Agosto 2018 Lorrán AM-AL AM-3 todos | | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 194* | Agosto 2018 Lorrán AM-DL AM-1 todos | | | | | x | x | x | x | | | x |
| 195* | Agosto 2018 Lorrán AM-DL AM-3 todos | | | | | x | | | | | | x |
| 196 | Agosto 2018 Michel A.G Votorantim e apodi britacet | | x | x | x | x | | | | | | |
| 197 | Agosto 2018 Michel A.G.PP Votorantim-britacet | | | | | | x | x | x | x | x | |
| 198 | Protocolo 5 2016 Brita 1 (miúdo) | | | | | | | x | x | x | x | x |
| 199 | Agosto 2018 Michel AMAN Apodi | | | | | x | x | x | x | x | x | |
| 200 | Agosto 2018 Michel AMAN Votorantim | | | | | | x | x | x | x | x | |

NOTA: (*) indica a eliminação desse material do estudo

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO POR MÉDIA FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE FRACÕES CLASSIFICADAS IGUAIS

Tabela B.1: Detalhes da angularidade com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| ANGULARIDADE | Nº | % |
|--|-----------|-------------|
| Todas as frações subarredondadas | 57 | 38,3 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 12,5 e 9,5mm (arredondada) | 1 | 0,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 4,75mm (subangular) | 1 | 0,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 2,36; 1,18; 0,6 e 0,3mm (subangular) | 3 | 2,0 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 2,36; 1,18 e 0,6mm (subangular) | 1 | 0,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 2,36mm (subangular) | 2 | 1,3 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15mm (subangular) | 2 | 1,3 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 1,18; 0,6 e 0,3mm (subangular) | 4 | 2,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 1,18 e 0,6mm (subangular) | 5 | 3,4 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 1,18 e 0,3mm (subangular) | 1 | 0,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 1,18mm (subangular) | 4 | 2,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 0,6 e 0,3mm (subangular) | 3 | 2,0 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 0,6 e 0,15mm (subangular) | 1 | 0,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 0,6mm (subangular) | 2 | 1,3 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 0,3mm (subangular) | 8 | 5,4 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 0,15mm (arredondada) | 1 | 0,7 |
| Total | 96 | 64,4 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela B.2: Detalhes de textura com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| TEXTURA | Nº | % |
|---|----------|------------|
| Todas as frações polidas | 2 | 1,7 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm: alta rugosidade | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm: polido | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm: polido | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm: polido | 1 | 0,9 |
| Total | 7 | 6,1 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela B.3: Detalhes de forma 2D com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| FORMA 2D | Nº | % |
|--|-----------|------------|
| Todas as frações semicircular | 3 | 2,4 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 150mm: semicircular | 3 | 2,4 |
| Fração 2,36mm: semicircular | 4 | 3,1 |
| Frações 1,18; 0,6 e 0,3mm: semicircular | 1 | 0,8 |
| Total | 11 | 8,7 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela B.4: Detalhes de esfericidade com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| ESFERICIDADE | Nº | % |
|---|-----------|-------------|
| Fração 25,4mm: baixa esfericidade; 19mm: esfericidade moderada; 12,5mm: baixa esfericidade e 9,5mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm: baixa esfericidade; 19mm: esfericidade moderada; 12,5; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm: esfericidade moderada; 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Frações 25,4 e 19mm: esfericidade moderada; 12,5mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm: esfericidade moderada; 19 e 12,5mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Frações 19 e 12,5mm: esfericidade moderada; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 10 | 8,7 |
| Fração 19mm: esfericidade moderada; 12,5; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 7 | 6,1 |
| Fração 19mm: esfericidade moderada; 12,5mm: baixa esfericidade; 9,5 e 4,75mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm: esfericidade moderada; 9,5mm: baixa esfericidade; 4,75mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm: esfericidade moderada; 12,5 e 9,5mm: baixa esfericidade; 4,75mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm: esfericidade moderada; 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Fração 19mm: esfericidade moderada; 12,5 e 9,5mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm: esfericidade moderada | 6 | 5,2 |
| Frações 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Frações 12,5 e 9,5mm: esfericidade moderada; 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Fração 12,5mm: esfericidade moderada; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 12 | 10,4 |
| Frações 12,5 e 4,75mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm: esfericidade moderada | 7 | 6,1 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 6 | 5,2 |
| Fração 9,5mm: esfericidade moderada e 4,75mm: baixa esfericidade | 6 | 5,2 |
| Frações 9,5 e 4,75mm: esfericidade moderada | 4 | 3,5 |
| Frações 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 7 | 6,1 |
| Fração 4,75mm: esfericidade moderada | 3 | 2,6 |
| Fração 4,75mm: baixa esfericidade | 7 | 6,1 |
| Total | 94 | 81,7 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO POR MÉDIA FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE FRACÕES CLASSIFICADAS DIFERENTES

Tabela C.1: Detalhes de textura com classificação diferente (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| TEXTURA | Nº | % |
|---|----|-----|
| Fração 25,4mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5 e 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 25,4 e 19mm (rugosidade moderada para macio); 12,5 e 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm (baixa rugosidade para macio); 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm (macio para polido) | 2 | 1,7 |
| Frações 25,4; 19 e 12,5mm (baixa rugosidade para macio); 9,5 e 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 25,4; 19 e 12,5mm (baixa rugosidade para macio); 9,5mm (rugosidade moderada para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 25,4 e 19mm (baixa rugosidade para macio); 12,5 e 9,5mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 25,4; 19 e 12,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) | 1 | 0,9 |
| Frações 25,4; 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 2 | 1,7 |
| Frações 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) | 2 | 1,7 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 6 | 5,2 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 3 | 2,6 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada); 4,75mm (alta rugosidade para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 9,5 e 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5 e 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (baixa rugosidade para macia); 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (rugosidade moderada para macio); 12,5 e 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (rugosidade moderada para macio); 12,5mm (baixa rugosidade para macio); 9,5mm (rugosidade moderada para macio) 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (macio para polido); 12,5 e 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |

| | | |
|--|---|-----|
| Fração 19mm (alta rugosidade para rugosidade moderada); 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (baixa rugosidade para macio); 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (rugosidade moderada para macio); 12,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade); 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade); 12,5; 9,5 e 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade) 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 5 | 4,3 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 2 | 1,7 |
| Frações 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade) | 2 | 1,7 |
| Frações 12,5 e 9,5mm (macio para polido); 4,75mm (baixa rugosidade para macia) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macia) | 3 | 2,6 |
| Frações 12,5 e 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 2 | 1,7 |
| Frações 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 2 | 1,7 |
| Frações 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 9,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (macio para polido); 9,5 e 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 4 | 3,5 |
| Fração 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5 e 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade); 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (alta rugosidade para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (rugosidade moderada para macia); 4,75mm (macia para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 4 | 3,5 |
| Fração 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 2 | 1,7 |
| Fração 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |

| | | |
|---|-----------|-------------|
| Fração 4,75mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm (alta rugosidade para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade) | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm (macio para polido) | 3 | 2,6 |
| Total | 95 | 82,6 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela C.2: Detalhes de forma 2D com classificação diferente (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| FORMA 2D | Nº | % |
|---|-----------|-------------|
| Todas as frações (circular para semicircular) | 2 | 1,6 |
| Todas as frações (semialongado para semicircular) | 13 | 10,2 |
| Fração 2,36mm (semiaongado para semicircular) | 6 | 4,7 |
| Total | 21 | 16,5 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE D – CARACTERIZAÇÃO POR MÉDIA FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE ALTERAÇÃO EM ALGUMA FRAÇÃO

Tabela D.1: Detalhes de angularidade com alteração em alguma fração (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| ANGULARIDADE | Nº | % |
|---|-----------|-------------|
| Frações 19; 12,5 e 0,6mm (frações graúdas ³ e fração miúda ²) | 1 | 0,7 |
| Frações 12,5; 9,5 e 0,3mm (frações graúdas ¹ e fração miúda ²) | 1 | 0,7 |
| Frações 12,5 e 9,5mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 12,5 e 4,75mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Fração 12,5mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 4,75; 2,36 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 2,36 e 0,075mm (2,36 ² e 0,075 ¹) | 1 | 0,7 |
| Fração 2,36mm ² | 7 | 4,7 |
| Frações 1,18 e 0,6mm ² | 1 | 0,7 |
| Fração 1,18mm ² | 4 | 2,7 |
| Frações 0,6; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 0,6 e 0,3mm ² | 1 | 0,7 |
| Frações 0,6 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Fração 0,6mm ² | 11 | 7,4 |
| Fração 0,3mm ² | 8 | 5,4 |
| Frações 0,15 e 0,75mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Fração 0,15mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Fração 0,075mm ¹ | 10 | 6,7 |
| Total | 53 | 35,6 |

¹ Alteração com ganho de propriedade: Arredondado para Subarredondado

² Alteração com perda de propriedade: Subangular para Subarredondado

³ Alteração com perda de propriedade: Angular para Subangular

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.2: Detalhes de textura com alteração em alguma fração (comparação Al Rousan, 2004 versus Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| TEXTURA | Nº | % |
|--|-----------|-------------|
| Frações 25,4; 19; 12,5 e 9,5mm (25,4 e 19mm ¹ e 12,5 e 9,5mm ²) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (19 e 12,5mm ³ e 9,5mm ¹) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 4,75mm(19 e 12,5mm ² e 4,75mm ⁴) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (12,5 e 9,5mm ² e 4,75mm ¹) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm ² | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5 e 9,5mm ⁴ | 2 | 1,7 |
| Fração 12,5mm ⁴ | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm ² | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm ⁴ | 2 | 1,7 |
| Total | 13 | 11,3 |

¹ Alteração com perda de propriedade: Rugosidade Moderada para Macio

² Alteração com perda de propriedade: Baixa Rugosidade para Macio

³ Alteração com perda de propriedade: Alta Rugosidade para Baixa Rugosidade

⁴ Alteração com perda de propriedade: Macio para Polido

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.3: Detalhes de forma 2D com alteração em alguma fração (comparação Al Rousan, 2004 versus Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| FORMA 2D | Nº | % |
|---|-----------|----------|
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,15 e 0,075mm ¹ | 3 | 2,4 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,075mm ¹ | 16 | 12,6 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,3; 0,15 e 0,075mm ¹ | 3 | 2,4 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6 e 0,075mm ¹ | 7 | 5,5 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,3 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,15 e 0,075mm ¹ | 3 | 2,4 |
| Frações 2,36; 0,3; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6 e 0,3mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18 e 0,075mm ¹ | 8 | 6,3 |
| Frações 2,36; 0,3 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,6 e 0,075mm ¹ | 2 | 1,6 |
| Frações 2,36; 1,18 e 0,6mm ² | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18 e 0,15mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36 e 0,15mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36 e 0,075mm ¹ | 2 | 1,6 |
| Frações 1,18; 0,3; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3 e 0,075mm (1,18; 0,6 e 0,3mm ¹ e 0,075mm ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3 e 0,075mm ¹ | 3 | 2,4 |
| Frações 1,18; 0,6 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |

| | | |
|--|-----------|-------------|
| Frações 1,18; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18 e 0,6mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18 e 0,3mm ² | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18 e 0,075mm ¹ | 3 | 2,4 |
| Frações 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (0,6; 0,3 e 0,15mm ² e 0,075mm ¹) | 1 | 0,8 |
| Frações 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 0,3; 0,15 e 0,075mm (0,3 e 0,075mm ¹ e 0,15mm ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 0,3 e 0,075mm (0,3mm ² e 0,075mm ¹) | 1 | 0,8 |
| Frações 0,3 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Fração 0,15mm ² | 1 | 0,8 |
| Fração 0,075mm ¹ | 23 | 18,1 |
| Total | 95 | 74,8 |

¹ Alteração com ganho de propriedade: Semialongado para Semicircular

² Alteração com perda de propriedade: Circular para Semicircular

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela D.4: Detalhes de esfericidade com alteração em alguma fração (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para média fração a fração

| ESFERICIDADE | Nº | % |
|---------------------------------------|-----------|-------------|
| Fração 25,4mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 9,5 e 4,75mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm ¹ | 2 | 1,7 |
| Fração 12,5mm ² | 2 | 1,7 |
| Fração 9,5mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm ² | 3 | 2,6 |
| Fração 4,75mm ² | 9 | 7,8 |
| Total | 19 | 16,5 |

¹ Alteração com perda de propriedade: Alta esfericidade para Esfericidade moderada

² Alteração com ganho de propriedade: Achatado/Alongado para Baixa esfericidade

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE E – CARACTERIZAÇÃO POR PERCENTUAL FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE FRACÕES CLASSIFICADAS IGUAIS

Tabela E.1: Detalhes de angularidade com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| ANGULARIDADE | Nº | % |
|--|----|------|
| Todas as frações subarredondadas | 65 | 43,6 |
| 25,4 e 19,5mm subarredondado; 12,5 e 9,5mm arredondado | 1 | 0,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 4,75mm (subangular) | 1 | 0,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 1,18; 0,6 e 0,3mm (subangular) | 1 | 0,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto as frações 1,18 e 0,6mm (subangular) | 2 | 1,3 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 1,18mm (subangular) | 2 | 1,3 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 0,6mm (subangular) | 4 | 2,7 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 0,3mm (subangular) | 5 | 3,4 |
| Todas as frações subarredondadas, exceto a fração 0,15mm (arredondada) | 1 | 0,7 |
| Total | 82 | 55 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela E.2: Detalhes de textura com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| TEXTURA | Nº | % |
|--|----|------|
| Todas as frações polido | 11 | 9,6 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm: macio e 4,75mm: polido | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm: alta rugosidade | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm: macio e 4,75mm: polido | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm: macio | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75 m: polido | 3 | 2,6 |
| Total | 18 | 15,7 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela E.3: Detalhes de esfericidade com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| ESFERICIDADE | Nº | % |
|---|-----------|-------------|
| Fração 25,4mm: esfericidade moderada; 19; 12,5 e 9,5mm: baixa esfericidade; 4,75mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm: baixa esfericidade; 19mm: esfericidade moderada; 12,5; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm: esfericidade moderada; 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Frações 25,4 e 19mm: esfericidade moderada; 12,5mm: baixa esfericidade; 9,5mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Frações 25,4 e 19mm: esfericidade moderada; 12,5mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm: esfericidade moderada; 19 e 12,5mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm: esfericidade moderada; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Fração 19mm: esfericidade moderada; 12,5mm: baixa esfericidade; 9,5mm: esfericidade moderada e 4,75mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm: esfericidade moderada; 9,5mm: baixa esfericidade; 4,75mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm: esfericidade moderada; 4,75mm: baixa esfericidade | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm: esfericidade moderada; 12,5mm: baixa esfericidade | 3 | 2,6 |
| Frações 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5 e 9,5mm: esfericidade moderada; 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Fração 12,5mm: esfericidade moderada; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 3 | 2,6 |
| Frações 12,5 e 4,75mm: esfericidade moderada | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm: esfericidade moderada | 3 | 2,6 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Fração 9,5mm: esfericidade moderada e 4,75mm: baixa esfericidade | 3 | 2,6 |
| Frações 9,5 e 4,75mm: baixa esfericidade | 3 | 2,6 |
| Fração 4,75mm: esfericidade moderada | 4 | 3,5 |
| Fração 4,75mm: baixa esfericidade | 2 | 1,7 |
| Total | 39 | 33,9 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE F – CARACTERIZAÇÃO POR PERCENTUAL FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE FRACÕES CLASSIFICADAS DIFERENTES

Tabela F.1: Detalhes de textura com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| TEXTURA | Nº | % |
|---|----|-----|
| Frações 25,4; 19 e 12,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) | 1 | 0,9 |
| Frações 25,4; 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 25,4 e 19mm (macio para polido); 12,5 e 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm (alta rugosidade para macio); 19; 12,5 e 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm (rugosidade moderada para macio); 19 e 12,5mm (baixa rugosidade para macio); 9,5 e 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada); 4,75mm (alta rugosidade para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (alta rugosidade para macio); 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (alta rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (alta rugosidade para macio); 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade) e 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75 mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 12,5 mm (rugosidade moderada para macio); 9,5 mm (alta rugosidade para polido); 4,75mm (baixa rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (alta rugosidade para macio); 12,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (alta rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (rugosidade moderada para macio); 12,5mm (baixa rugosidade para macio); 9,5 e 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (alta rugosidade para rugosidade moderada); 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 12,5mm (alta rugosidade para macio); 9,5mm (alta rugosidade para polido); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 12,5; 9,5 e 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 12,5mm (alta rugosidade para macio); 9,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) 4,75mm (alta rugosidade para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (alta rugosidade para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (alta rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |

| | | |
|--|-----------|-------------|
| Frações 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5 e 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (rugosidade moderada para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5 e 9,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (baixa rugosidade para macia) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (alta rugosidade para macio); 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade) e 4,75mm (alta rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (alta rugosidade para macio); 9,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) e 4,75mm (alta rugosidade para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm (rugosidade moderada para macio); 9,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada); 4,75mm (alta rugosidade para baixa rugosidade) | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 2 | 1,7 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (alta rugosidade para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (alta rugosidade para rugosidade moderada); 4,75mm (alta rugosidade para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (alta rugosidade para baixa rugosidade); 4,75mm (alta rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (alta rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (alta rugosidade para macio); 4,75mm (alta rugosidade para polido) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm (baixa rugosidade para macio); 4,75mm (macio para polido) | 3 | 2,6 |
| Fração 4,75mm (alta rugosidade para rugosidade moderada) | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm (alta rugosidade para baixa rugosidade) | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm (alta rugosidade para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm (rugosidade moderada para macio) | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm (macio para polido) | 2 | 1,7 |
| Total | 53 | 46,1 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela F.2: Detalhes de forma 2D com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| FORMA 2D | Nº | % |
|--|-----------|-------------|
| Todas as frações (circular para semicircular) | 2 | 1,6 |
| Todas as frações (semialongado para semicircular) | 9 | 7,1 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3mm (semialongado para semicircular); 0,15mm (circular para semicircular); 0,075mm (semialongado para semicircular) | 8 | 6,3 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15mm (circular para semicircular); 0,075mm (semialongado para semicircular) | 3 | 2,4 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3mm (circular para semicircular); 0,075mm (circular para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36 e 1,18mm (semialongado para semicircular); 0,6 e 0,3mm (circular para semicircular); 0,15 e 0,075mm (semialongado para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36 e 1,18mm (semialongado para semicircular); 0,6 mm (circular para semicircular); 0,3; 0,15 e 0,075mm (semialongado para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3mm (semialongado para semicircular); 0,15mm (circular para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Fração 2,36mm (circular para semicircular); 1,18 e 0,6mm (semialongado para semicircular); 0,3 e 0,15mm (circular para semicircular); 0,075mm (semialongado para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Fração 2,36mm (semialongado para semicircular) | 5 | 3,9 |
| Fração 2,36mm (circular para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Fração 1,18mm (semialongado para semicircular); 0,6mm (circular para semicircular); 0,3; 0,15 e 0,075mm (semialongado para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Fração 1,18mm (semialongado para semicircular); 0,6 e 0,3mm (circular para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Frações 0,6; 0,3 e 0,15mm (circular para semicircular); 0,075mm (semialongado para semicircular) | 1 | 0,8 |
| Total | 36 | 28,3 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela F.3: Detalhes de esfericidade com classificação igual (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| ESFERICIDADE | Nº | % |
|---|-----------|-------------|
| Fração 25,4mm (alta esfericidade para esfericidade moderada); 19; 12,5; 9,5; 4,75mm (achatado/alongado para baixa esfericidade) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm (baixa esfericidade para esfericidade moderada); 12,5; 9,5; 4,75mm (achatado/alongado para baixa esfericidade) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm (achatado/alongado para baixa esfericidade) | 2 | 1,7 |
| Frações 9,5 e 4,75mm (alta esfericidade para esfericidade moderada) | 2 | 1,7 |
| Fração 9,5mm (alta esfericidade para esfericidade moderada); 4,75mm (baixa esfericidade para esfericidade moderada) | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm (alta esfericidade para esfericidade moderada) | 1 | 0,9 |
| Fração 4,75mm (esfericidade moderada para baixa esfericidade) | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm (achatado/alongado para baixa esfericidade) | 3 | 2,6 |
| Total | 13 | 11,3 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE G – CARACTERIZAÇÃO POR PERCENTUAL FRAÇÃO A FRAÇÃO NA CONDIÇÃO DE ALTERAÇÃO EM ALGUMA FRAÇÃO

Tabela G.1: Detalhes de angularidade com alteração em alguma fração (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| ANGULARIDADE | Nº | % |
|--|-----------|-----------|
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 12,5 e 9,5mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 12,5 e 4,75mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 9,5 e 4,75mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 4,75; 2,36mm e 0,075mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Frações 4,75; 0,6 e 0,3mm ³ | 1 | 0,7 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6mm e 0,075mm (2,36; 1,18; 0,6 ³ e 0,075 ¹) | 1 | 0,7 |
| Frações 2,36mm e 0,075mm (2,36 ² e 0,075 ¹) | 3 | 2,0 |
| Frações 2,36 e 1,18mm ² | 1 | 0,7 |
| Frações 2,36; 0,6mm e 0,075mm (2,36; 0,6 ² e 0,075 ¹) | 1 | 0,7 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3mm ² | 1 | 0,7 |
| Frações 1,18 e 0,6mm ² | 2 | 1,3 |
| Frações 1,18 e 0,0,15mm ² | 1 | 0,7 |
| Fração 1,18mm ² | 3 | 2,0 |
| Frações 0,6; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,7 |
| Fração 0,6mm e 0,075mm (0,6 ² e 0,075 ¹) | 1 | 0,7 |
| Fração 0,6mm ² | 5 | 3,4 |
| Fração 0,3mm e 0,075mm (0,3 ² e 0,075 ¹) | 3 | 2,0 |
| Fração 0,3mm ² | 5 | 3,4 |
| Frações 0,15 e 0,75mm ¹ | 4 | 2,7 |
| Fração 0,15mm ² | 1 | 0,7 |
| Fração 0,15mm ¹ | 2 | 1,3 |
| Fração 0,075mm ¹ | 26 | 17,4 |
| Total | 67 | 45 |

¹ Alteração com ganho de propriedade: Arredondado para Subarredondado

² Alteração com ganho de propriedade: Subarredondado para Subangular

³ Alteração com perda de propriedade: Angular para Subangular

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela G.2: Detalhes de textura com alteração em alguma fração (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| TEXTURA | Nº | % |
|---|----|-----|
| Frações 25,4; 19; e 9,5mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm e 19mm (25,4 ² e 19 ³) | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm e 9,5mm (25,4 ⁴ e 9,5 ¹) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5; 9,5 e 4,75mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm ¹ | 1 | 0,9 |

| | | |
|--|-----------|-------------|
| Frações 19 e 12,5mm ⁵ | 1 | 0,9 |
| Frações 19 e 4,75mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm; 12,5 e 9,5mm (19 ⁶ ; 12,5 e 9,5 ³) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5mm e 4,75mm (19; 12,5 ³ e 4,75 ¹) | 2 | 1,7 |
| Frações 19; 12,5mm e 9,5mm (19; 12,5 ⁵ e 9,5 ⁷) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5mm e 9,5mm (19; 12,5 ³ e 9,5 ¹) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm; 12,5mm e 4,75mm (19 ⁹ ; 12,5 ³ e 4,75 ¹) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm; 12,5mm e 9,5mm (19 ¹ ; 12,5 ⁸ e 9,5 ¹) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm; 12,5mm e 9,5mm (19 ³ ; 12,5 ² e 9,5 ³) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm e 9,5mm (19 ¹ e 9,5 ¹⁰) | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm ⁵ | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5 e 4,75mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm; 9,5mm e 4,75mm (12,5 ⁹ ; 9,5 ¹⁰ e 4,75 ¹) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5; 9,5mm e 4,75mm (12,5; 9,5 ⁹ e 4,75 ¹⁰) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm e 9,5mm (12,5 ⁹ e 9,5 ³) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm e 9,5mm (12,5 ³ e 9,5 ²) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm e 9,5mm (12,5 ² e 9,5 ³) | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm e 4,75mm (12,5 ² e 4,75 ¹) | 3 | 2,6 |
| Fração 12,5 e 9,5mm ³ | 2 | 1,7 |
| Fração 12,5 e 9,5mm ¹ | 2 | 1,7 |
| Fração 12,5mm ³ | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm ¹ | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm e 4,75mm (9,5 ² e 4,75 ¹) | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm ³ | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm ² | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm ⁶ | 1 | 0,9 |
| Fração 9,5mm ¹ | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm ¹ | 5 | 4,3 |
| Total | 44 | 38,3 |

¹ Alteração com perda de propriedade: Macio para Polido

² Alteração com perda de propriedade: Baixa rugosidade para Macio

³ Alteração com perda de propriedade: Rugosidade moderada para Macio

⁴ Alteração com perda de propriedade: Alta rugosidade para Baixa rugosidade

⁵ Alteração com perda de propriedade: Alta rugosidade para Rugosidade moderada

⁶ Alteração com perda de propriedade: Baixa rugosidade para Polido

⁷ Alteração com perda de propriedade: Alta rugosidade para Polido

⁸ Alteração com perda de propriedade: Rugosidade moderada para Polido

⁹ Alteração com perda de propriedade: Alta rugosidade para Macio

¹⁰ Alteração com perda de propriedade: Alta rugosidade para Polido

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela G.3: Detalhes de forma 2D com alteração em alguma fração (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| FORMA 2D | Nº | % |
|---|----|-----|
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15mm ² | 2 | 1,6 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,075mm ¹ | 7 | 5,5 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,3; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,3 e 0,075mm ¹ | 2 | 1,6 |
| Frações 2,36; 0,6; 0,3 e 0,15mm ² | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,6; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18 e 0,15mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,3 e 0,15mm ² | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36 e 0,15mm ² | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,15 e 0,075mm (2,36; 1,18; 0,6 e 0,15 ² e 0,075 ¹) | 2 | 1,6 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,15 e 0,075mm (2,36; 1,18; 0,6 e 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 2 | 1,6 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15mm (2,36; 1,18; 0,3 e 0,15 ¹ e 0,6 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15mm (2,36; 1,18; 0,6 e 0,3 ¹ e 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6; 0,3 e 0,075mm (2,36; 1,18; 0,6 e 0,075 ¹ e 0,3 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,3; 0,15 e 0,075mm (2,36; 1,18 e 0,075 ¹ e 0,3; 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,15 e 0,075mm (2,36; 1,18 e 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 3 | 2,4 |
| Frações 2,36; 1,18; 0,6 e 0,075mm (2,36; 1,18 e 0,6 ¹ e 0,075 ³) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (2,36; 0,3 e 0,075 ¹ e 0,6; 0,15 ²) | 2 | 1,6 |
| Frações 2,36; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (2,36; 0,6 e 0,075 ¹ e 0,3; 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (2,36; 0,6; 0,3 e 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,3; 0,15 e 0,075mm (2,36; 0,15 e 0,075 ¹ e 0,3 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,3; 0,15 e 0,075mm (2,36; 0,3 e 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 3 | 2,4 |
| Frações 2,36; 0,3; 0,15 e 0,075mm (2,36; 0,15 ² e 0,3; 0,075 ¹) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,3; 0,15 e 0,075mm (2,36; 0,075 ¹ e 0,3; 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 1,18 e 0,075mm (2,36 e 0,075 ¹ e 1,18 ³) | 1 | 0,8 |
| Frações 2,36; 0,15 e 0,075mm (2,36 e 0,15 ² e 0,075 ¹) | 2 | 1,6 |
| Frações 2,36; 0,15 e 0,075mm (2,36 e 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 3 | 2,4 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3 e 0,15mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3 e 0,075mm ¹ | 4 | 3,1 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6 e 0,3mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,3 e 0,15mm ² | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18 e 0,6mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (1,18; 0,6 e 0,3 ¹ e 0,15; 0,075 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (1,18; 0,6; 0,3 e 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (1,18; 0,6 e 0,075 ¹ e 0,3; 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,3; 0,15 e 0,075mm (1,18; 0,3 e 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6 e 0,075mm (1,18 e 0,075 ¹ e 0,6 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,6 e 0,15mm (1,18 e 0,6 ¹ e 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,3 e 0,15mm (1,18 e 0,3 ¹ e 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 1,18; 0,15 e 0,075mm (1,18 e 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 2 | 1,6 |

| | | |
|---|-----------|-------------|
| Frações 1,18 e 0,075mm (1,18 ² e 0,075 ¹) | 1 | 0,8 |
| Frações 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm ² | 1 | 0,8 |
| Frações 0,6; 0,15 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 0,6; 0,3 e 0,15mm ² | 2 | 1,6 |
| Frações 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (0,6; 0,3 e 0,15 ² e 0,075 ¹) | 2 | 1,6 |
| Frações 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075mm (0,6; 0,15 ² e 0,3; 0,075 ¹) | 1 | 0,8 |
| Frações 0,6; 0,15 e 0,075mm (0,6; 0,075 ¹ e 0,15 ²) | 1 | 0,8 |
| Frações 0,6 e 0,075mm (0,6 ² e 0,075 ¹) | 2 | 1,6 |
| Frações 0,3 e 0,15mm ² | 1 | 0,8 |
| Frações 0,3 e 0,075mm ¹ | 1 | 0,8 |
| Frações 0,3; 0,15 e 0,075mm (0,3 e 0,15 ² e 0,075 ¹) | 2 | 1,6 |
| Frações 0,3; 0,15 e 0,075mm (0,3 e 0,15 ² e 0,075 ³) | 2 | 1,6 |
| Frações 0,3 e 0,075mm (0,3 ² e 0,075 ¹) | 1 | 0,8 |
| Frações 0,15 e 0,075mm (0,15 ² e 0,075 ¹) | 2 | 1,6 |
| Fração 0,075mm ¹ | 2 | 1,6 |
| Total | 87 | 68,5 |

¹ Alteração com ganho de propriedade: Semialongado para Semicircular

² Alteração com perda de propriedade: Circular para Semicircular

³ Alteração com ganho de propriedade: Alongado para Semicircular

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela G.4: Detalhes de esfericidade com alteração em alguma fração (comparação Al Rousan, 2004 *versus* Ibiapina, 2018) para percentual fração a fração

| ESFERICIDADE | Nº | % |
|---|-----------|-------------|
| Fração 25,4mm; 9,5mm e 4,75mm (25,4 ¹ ; 9,5 ² e 4,75 ³) | 1 | 0,9 |
| Fração 25,4mm e 9,5mm (25,4 ⁴ e 9,5 ²) | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 9,5 e 4,75mm ⁴ | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 9,5 e 4,75mm ³ | 1 | 0,9 |
| Frações 19; 12,5 e 9,5mm ³ | 1 | 0,9 |
| Frações 19mm e 9,5mm (19 ⁴ e 9,5 ¹) | 1 | 0,9 |
| Frações 19mm e 4,75mm (19 ⁴ e 4,75 ³) | 2 | 1,7 |
| Fração 19mm ⁴ | 4 | 3,5 |
| Fração 19mm ⁵ | 1 | 0,9 |
| Fração 19mm ¹ | 2 | 1,7 |
| Frações 12,5mm e 4,75mm (12,5 ¹ e 4,75 ²) | 1 | 0,9 |
| Frações 12,5mm e 4,75mm (12,5 ² e 4,75 ³) | 2 | 1,7 |
| Frações 12,5 e 4,75mm ³ | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm ⁴ | 1 | 0,9 |
| Fração 12,5mm ³ | 3 | 2,6 |
| Fração 12,5mm ² | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5mm e 4,75mm (9,5 ³ e 4,75 ²) | 1 | 0,9 |
| Frações 9,5 e 4,75mm ³ | 6 | 5,2 |
| Fração 9,5mm ¹ | 3 | 2,6 |
| Fração 9,5mm ² | 2 | 1,7 |
| Fração 9,5mm ³ | 2 | 1,7 |
| Fração 4,75mm ³ | 16 | 13,9 |
| Fração 4,75mm ² | 3 | 2,6 |
| Fração 4,75mm ¹ | 6 | 5,2 |
| Total | 63 | 54,8 |

¹ Alteração com ganho de propriedade: Baixa esfericidade para Esfericidade moderada

² Alteração com perda de propriedade: Esfericidade moderada para Baixa esfericidade

³ Alteração com ganho de propriedade: Achatado/Alongado para Baixa esfericidade

⁴ Alteração com perda de propriedade: Alta esfericidade para Esfericidade moderada

⁵ Alteração com perda de propriedade: Alta esfericidade para Baixa esfericidade

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE H – DADOS PETROGRÁFICOS

Tabela H.1 – Agregados com caracterização petrográfica da forma do grão o e suas classificações por média

| | Variáveis | Forma do grão | | | | | |
|------------------|--------------|---|---------------------|---------------------|---------------------|-------|---------------------|
| | Materiais/Ls | L 1 | L 2 | L 3 | L 4 | MÉDIA | |
| ROCHAS FILTRADAS | 1 | Gnaiss migmatítico | Anédrica/Subédrica | Anédrica | | | Anédrica |
| | 2 | Gnaiss | Anédrica/Subédrica | Subédrica/Euédrlica | Subédrica/Euédrlica | | Subédrica/Euédrlica |
| | 3 | Gnaiss | Anédrica | Anédrica | | | Anédrica |
| | 4 | Biotita gnaiss | | | | | |
| | 5 | Nefelina-fonólito | | | | | |
| | 6 | Nefelina-fonólito | | | | | |
| | 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | | | | | |
| | 8 | Ortognaiss | | | | | |
| | 9 | Biotita gnaiss | Anédrica/Subédrica | Subédrica | | | Anédrica/Subédrica |
| | 10 | Sienito e Traquito | Anédrica | Subédrica | Subédrica | | Subédrica |
| | 11 | Granito | Anédrica | | | | Anédrica |
| | 12 | Microgabro | | | | | |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | | | | | |
| | 14 | Granito Pegmatóide com granada e silimanita | | | | | |
| | 15 | Basalto | Euédrica | | | | Euédrica |
| | 16 | Metacalcário | Anédrica/Subédrica | | | | Anédrica/Subédrica |
| | 17 | Gnaiss migmatítico | Anédrica | | | | Anédrica |
| | 18 | Granito | | | | | |
| | 19 | Pegmatito Branco | Subédrica/Euédrlica | | | | Subédrica/Euédrlica |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | Anédrica/Subédrica | | | | Anédrica/Subédrica |
| | 21 | Pegmatito Golden | Subédrica/Euédrlica | | | | Subédrica/Euédrlica |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela H.2 – Agregados com caracterização petrográfica de granulação e suas classificações por média

| | Variáveis | Granulação | | | | | |
|------------------|--------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| | Materiais/Ls | L 1 | L 2 | L 3 | L 4 | MÉDIA | |
| ROCHAS FILTRADAS | 1 | Gnaiss migmatítico | Média/Fina | Média/Fina | | | Média/Fina |
| | 2 | Gnaiss | Média/Fina | Média/Fina | Média/Fina | | Média/Fina |
| | 3 | Gnaiss | Média/Fina | Fina | | | Fina |
| | 4 | Biotita gnaiss | Fina | Fina | Fina | Média-grossa | Fina |
| | 5 | Nefelina-fonólito | Densa | | | | Densa |
| | 6 | Nefelina-fonólito | Densa | | | | Densa |
| | 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | Fina | Fina | Fina | Média-fina | Fina |
| | 8 | Ortognaiss | Fina | Média-Fina | Fina | | Fina |
| | 9 | Biotita gnaiss | Média/Fina | Média/Grossa | | | Média/Grossa |
| | 10 | Sienito e Traquito | Média/Grossa | Média/Fina | Média/Grossa | | Média/Grossa |
| | 11 | Granito | Média/Grossa | | | | Média/Grossa |
| | 12 | Microgabro | Fina | | | | Fina |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | Média/Grossa | | | | Média/Grossa |
| | 14 | Granito Pegmatóide com granada e silimanita | Média/Grossa | | | | Média/Grossa |
| | 15 | Basalto | Densa | | | | Densa |
| | 16 | Metacalcário | Fina | | | | Fina |
| | 17 | Gnaiss migmatítico | Fina | | | | Fina |
| | 18 | Granito | Densa | Densa | | | Densa |
| | 19 | Pegmatito Branco | Média/Grossa | | | | Média/Grossa |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | Média/Grossa | | | | Média/Grossa |
| | 21 | Pegmatito Golden | Média/Grossa | | | | Média/Grossa |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela H.3 – Materiais com caracterização petrográfica de textura e suas classificações por média

| | Variáveis | Textura | | | | | |
|------------------|--------------|---|----------------|----------------------|----------------|----------------|-----------------------|
| | Materiais/Ls | L 1 | L 2 | L 3 | L 4 | MÉDIA | |
| ROCHAS FILTRADAS | 1 | Gnaiss migmatítico | Inequigranular | Inequigranular | | | Inequigranular |
| | 2 | Gnaiss | Inequigranular | Equigranular | Equigranular | | Equigranular |
| | 3 | Gnaiss | Inequigranular | Equigranular | | | Inequigranular |
| | 4 | Biotita gnaiss | Inequigranular | Inequigranular | Inequigranular | | Inequigranular |
| | 5 | Nefelina-fonólito | Porfírica | | | | Porfírica |
| | 6 | Nefelina-fonólito | Porfírica | | | | Porfírica |
| | 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | Inequigranular | Inequigranular | Inequigranular | Inequigranular | Inequigranular |
| | 8 | Ortognaiss | Inequigranular | Inequigranular | Inequigranular | | Inequigranular |
| | 9 | Biotita gnaiss | Porfírica | Equigranular | | | Porfírica |
| | 10 | Sienito e Traquito | Porfírica | Porfírica/Traquitica | Equigranular | | Porfírica |
| | 11 | Granito | Porfírica | | | | Porfírica |
| | 12 | Microgabro | Equigranular | | | | Equigranular |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | Porfírica | | | | Porfírica |
| | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | Inequigranular | | | | Inequigranular |
| | 15 | Basalto | Porfírica | | | | Porfírica |
| | 16 | Metacalcário | | | | | |
| | 17 | Gnaiss migmatítico | Porfírica | | | | Porfírica |
| | 18 | Granito | Inequigranular | Inequigranular | | | Inequigranular |
| | 19 | Pegmatito Branco | Inequigranular | | | | Inequigranular |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | Inequigranular | | | | Inequigranular |
| | 21 | Pegmatito Golden | Inequigranular | | | | Inequigranular |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela H.4 – Materiais com caracterização petrográfica de contato e suas classificações por média

| | Variáveis | Contato | | | | | |
|------------------|--------------|---|-----------------|----------------------------|-----------------|------------|------------------------|
| | Materiais/Ls | L 1 | L 2 | L 3 | L 4 | MÉDIA | |
| ROCHAS FILTRADAS | 1 | Gnaiss migmatítico | Côncavo/Convexo | Côncavo/Convexo | | | Côncavo/Convexo |
| | 2 | Gnaiss | Retos | Côncavo/Convexo | Côncavo/Convexo | | Côncavo/Convexo |
| | 3 | Gnaiss | Serrilhado | Serrilhado | | | Serrilhado |
| | 4 | Biotita gnaiss | Côncavo/Convexo | Côncavo/Convexo | Reto | | Côncavo/Convexo |
| | 5 | Nefelina-fonólito | Serrilhado | | | | Serrilhado |
| | 6 | Nefelina-fonólito | Serrilhado | | | | Serrilhado |
| | 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | Reto | Côncavo/Convexo/Serrilhado | Côncavo/Convexo | Serrilhado | Côncavo/Convexo |
| | 8 | Ortognaiss | Serrilhado | Côncavo/Convexo | Serrilhado | | Serrilhado |
| | 9 | Biotita gnaiss | Côncavo/Convexo | Côncavo/Convexo | | | Côncavo/Convexo |
| | 10 | Sienito e Traquito | Serrilhado | Reto/Serrilhado | Reto | | Serrilhado |
| | 11 | Granito | Reto/Serrilhado | | | | Serrilhado |
| | 12 | Microgabro | Reto | | | | Reto |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | Côncavo/Convexo | | | | Côncavo/Convexo |
| | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | Côncavo/Convexo | | | | Côncavo/Convexo |
| | 15 | Basalto | Serrilhado | | | | Serrilhado |
| | 16 | Metacalcário | Reto | | | | Reto |
| | 17 | Gnaiss migmatítico | Serrilhado | | | | Serrilhado |
| | 18 | Granito | Serrilhado | Serrilhado | | | Serrilhado |
| | 19 | Pegmatito Branco | Côncavo/Convexo | | | | Côncavo/Convexo |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | Côncavo/Convexo | | | | Côncavo/Convexo |
| | 21 | Pegmatito Golden | Côncavo/Convexo | | | | Côncavo/Convexo |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela H.5 – Materiais com caracterização petrográfica de microfissuramento e composição mineralógica com suas classificações por média

| | Variáveis | Microfissuramento (Microfissuras/mm ²) | | Máficos (%) | | | | | Félsicos | | | | | Biotita | | | | |
|----|---|--|-----------------------|-------------|------|------|-----|-------------|----------|------|------|------|--------------|---------|------|------|-----|-------------|
| | Materiais/Ls | Classificação | Micro/mm ² | L 1 | L 2 | L 3 | L 4 | MÉDIA | L 1 | L 2 | L 3 | L 4 | MÉDIA | L 1 | L 2 | L 3 | L 4 | MÉDIA |
| 1 | Gnaiss migmatítico | | | 24,4 | 3,8 | | | 14,1 | 75,6 | 96,2 | | | 85,9 | 20,6 | 3,5 | | | 12,1 |
| 2 | Gnaiss | | | 27,1 | 3,0 | 13,8 | | 14,6 | 82,9 | 97,0 | 86,2 | | 88,7 | 20,4 | 1,1 | 9,4 | | 10,3 |
| 3 | Gnaiss | | | 9,8 | 40,0 | | | 24,9 | 90,2 | 60,0 | | | 75,1 | 5,5 | 5,0 | | | 5,3 |
| 4 | Biotita gnaiss | | | 46,0 | 27,0 | 8,5 | 0,8 | 20,6 | 54,0 | 73,0 | 87,0 | 99,2 | 78,3 | 30,0 | 25,0 | 6,0 | 0,4 | 15,4 |
| 5 | Nefelina-fonólito | | | 38,0 | | | | 38,0 | 62,0 | | | | 62,0 | 16,0 | | | | 16,0 |
| 6 | Nefelina-fonólito | | | 38,0 | | | | 38,0 | 62,0 | | | | 62,0 | 16,0 | | | | 16,0 |
| 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | | | 56,0 | 7,0 | 10,0 | 0,5 | 18,4 | 44,0 | 93,0 | 90,0 | 99,5 | 81,6 | 27,0 | 7,0 | 8,0 | 0,5 | 10,6 |
| 8 | Ortognaiss | | | 11,0 | 7,0 | 40,0 | | 19,3 | 89,0 | 93,0 | 60,0 | | 80,7 | 8,0 | 5,0 | 30,0 | | 14,3 |
| 9 | Biotita gnaiss | | | 17,0 | 12,0 | | | 14,5 | 83,0 | 97,0 | | | 90,0 | 15,0 | 10,0 | | | 12,5 |
| 10 | Sienito e Traquito | | | 1,0 | 1,0 | 11,0 | | 4,3 | 99,0 | 99,0 | 89,0 | | 95,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | 0,0 |
| 11 | Granito | | | 5,0 | | | | 5,0 | 95,0 | | | | 95,0 | 4,0 | | | | 4,0 |
| 12 | Microgabro | Moderada | 0,13 | 52,0 | | | | 52,0 | 48,0 | | | | 48,0 | 1,0 | | | | 1,0 |
| 13 | Hornblenda sienito com quartzo | Moderada | 0,18 | 16,5 | | | | 16,5 | 83,5 | | | | 83,5 | 4,0 | | | | 4,0 |
| 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | Alta | 0,56 | 7,0 | | | | 7,0 | 93,0 | | | | 93,0 | 1,5 | | | | 1,5 |
| 15 | Basalto | | | 42,5 | | | | 42,5 | 57,5 | | | | 57,5 | 0,6 | | | | 0,6 |
| 16 | Metacalcário | | | 1,8 | | | | 1,8 | 98,2 | | | | 98,17 | 0,0 | | | | 0,0 |
| 17 | Gnaiss migmatítico | | | 22,1 | | | | 22,1 | 77,9 | | | | 77,91 | 7,3 | | | | 7,3 |
| 18 | Granito | Baixo | 0,06 | 13,0 | 12,5 | | | 12,8 | 87,0 | 87,5 | | | 87,3 | 0,0 | 0,0 | | | 0,0 |
| 19 | Pegmatito Branco | Alta | 0,63 | 2,0 | | | | 2,0 | 98,0 | | | | 98,0 | 1,0 | | | | 1,0 |
| 20 | Pegmatito Capuccino | Alta | 1,11 | 1,0 | | | | 1,0 | 99,0 | | | | 99,0 | 0,0 | | | | 0,0 |
| 21 | Pegmatito Golden | Alta | 1,06 | 1,0 | | | | 1,0 | 99,0 | | | | 99,0 | 0,0 | | | | 0,0 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE I – DADOS FÍSICOS E MORFOLÓGICOS

Tabela I.1 – Agregados com caracterização física

| | Variáveis | Característica físicas | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------|--|----------------|--------------|------------------|------|------|---------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|---|
| | Materiais/Ls | Massa específica aparente (g/cm³) | Porosidade (%) | Absorção (%) | Índice de vazios | CNU | CC | ALA (%) | Treton (%) | Micro Deval 105 min (%) | Micro Deval 180 min (%) | Micro Deval 210 min (%) | Esmagamento (%) | Compressão uniaxial (Mpa) | Velocidade de ondas ultrassônicas (m/s) |
| MATERIAIS FILTRADOS | 1 | Gnaiss migmatítico | 2,74 | 1,08 | 0,39 | 0,69 | 2,02 | 0,82 | 42,00 | 19,00 | | | | | |
| | 2 | Gnaiss | 2,67 | 0,81 | 0,30 | 0,70 | 1,99 | 0,81 | 26,00 | 13,00 | | | | | |
| | 3 | Gnaiss | 2,79 | 0,71 | 0,25 | 0,73 | 2,04 | 0,85 | 17,00 | 9,00 | | | | | |
| | 4 | Biotita gnaiss | | | | | | | | 4,96 | 9,80 | 14,40 | 19,60 | | |
| | 5 | Nefelina-fonólito | 2,39 | | 1,05 | | | | 20,26 | 10,91 | 4,80 | 5,70 | 6,20 | | |
| | 6 | Nefelina-fonólito | 2,39 | | 1,05 | | | | 20,26 | 5,41 | 5,80 | 8,60 | 9,70 | | |
| | 7 | Biotita-monzogranito/ tectonizado | 2,66 | | 0,75 | | | | 31,78 | 9,22 | 9,00 | 13,30 | 14,00 | | |
| | 8 | Ortognaiss | | | | | | | | 8,62 | 11,30 | 15,00 | 14,10 | | |
| | 9 | Biotita gnaiss | | | | | | | 43,00 | 16,90 | | | | 30,50 | |
| | 10 | Sienito e Traquito | | | | | | | 24,80 | 12,20 | | | | 21,60 | |
| | 11 | Granito | | | | | | | 43,60 | 18,90 | | | | 31,80 | |
| | 12 | Microgabro | 3,10 | 0,26 | 0,08 | | | | | | | | | 196,00 | 6189,00 |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | 2,71 | 0,73 | 0,27 | | | | | | | | | 137,00 | 4161,00 |
| | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | 2,65 | 0,80 | 0,30 | | | | | | | | | 135,00 | 3693,00 |
| | 15 | Basalto | 2,92 | 2,51 | 0,86 | | | | 10,60 | 4,40 | | | | 12,20 | |
| | 16 | Metacalcário | 2,74 | 2,22 | 0,81 | | | | 22,70 | 9,30 | | | | 22,60 | |

| MATERIAIS FILTRADOS | Variáveis | Características físicas | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------|--------------|------------------|------|------|---------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|---|
| | Materiais/Ls | Massa específica aparente (g/cm³) | Porosidade (%) | Absorção (%) | Índice de vazios | CNU | CC | ALA (%) | Treton (%) | Micro Deval 105 min (%) | Micro Deval 180 min (%) | Micro Deval 210 min (%) | Esmagamento (%) | Compressão uniaxial (Mpa) | Velocidade de ondas ultrassônicas (m/s) |
| 17 | Gnaise migmatítico | 2,66 | 1,56 | 0,59 | | | | 47,30 | 21,90 | | | | 31,70 | | |
| 18 | Granito | 2,60 | 1,90 | 0,70 | | 1,90 | 1,00 | 13,80 | 7,30 | | | | | | |
| 19 | Pegmatito Branco | 2,62 | 1,45 | 0,56 | | | | | | | | | | 55,70 | 2939,00 |
| 20 | Pegmatito Capuccino | 2,64 | 0,84 | 0,32 | | | | | | | | | | 124,80 | 4223,00 |
| 21 | Pegmatito Golden | 2,64 | 0,81 | 0,31 | | | | | | | | | | 140,30 | 4875,00 |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela I.2 – Agregados com caracterização morfológica de origem

| MATERIAIS FILTRADOS | Variáveis | Propriedades de forma | | |
|---------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------|---------------------|
| | Materiais/Ls | Angularidade origem | Textura origem | Esfericidade origem |
| 1 | Gnaise migmatítico | 2912,54 | 506,45 | 0,66 |
| 2 | Gnaise | 2927,19 | 457,84 | 0,66 |
| 3 | Gnaise | 2959,98 | 707,63 | 0,62 |
| 4 | Biotita gnaise | 3260,27 | 440,42 | 0,73 |
| 5 | Nefelina-fonólito | 3138,35 | 365,22 | 0,69 |
| 6 | Nefelina-fonólito | 3246,70 | 347,51 | 0,60 |
| 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | 3369,56 | 306,51 | 0,64 |
| 8 | Ortognaise | 3232,95 | 339,13 | 0,70 |
| 9 | Biotita gnaise | | | |

| | Variáveis | Propriedades de forma | | | |
|---------------------|--------------------|---|----------------|---------------------|------|
| | Materiais/Ls | Angularidade origem | Textura origem | Esfericidade origem | |
| MATERIAIS FILTRADOS | Sienito e Traquito | | | | |
| | 11 | Granito | | | |
| | 12 | Microgabro | | | |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | | | |
| | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | | | |
| | 15 | Basalto | 3057,00 | 586,00 | 0,61 |
| | 16 | Metacalcário | 3099,00 | 517,00 | 0,64 |
| | 17 | Gnaisse migmatítico | 2968,00 | 391,00 | 0,67 |
| | 18 | Granito | 3533,60 | 324,40 | 0,60 |
| | 19 | Pegmatito Branco | | | |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | | | |
| 21 | Pegmatito Golden | | | | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela I.3 – Agregados com caracterização morfológica antes e depois do ensaio de abrasão LA

| | Variáveis | Propriedades de forma | | | | | | |
|---------------------|--------------|---|-------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|------|
| | Materiais/Ls | Angularidade origem LA | Textura origem LA | Esfericidade origem LA | Angularidade depois do LA | Textura depois do LA | Esfericidade depois do LA | |
| MATERIAIS FILTRADOS | 1 | Gnaiss migmatítico | | | | | | |
| | 2 | Gnaiss | | | | | | |
| | 3 | Gnaiss | | | | | | |
| | 4 | Biotita gnaiss | | | | | | |
| | 5 | Nefelina-fonólito | | | | | | |
| | 6 | Nefelina-fonólito | | | | | | |
| | 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | | | | | | |
| | 8 | Ortognaiss | | | | | | |
| | 9 | Biotita gnaiss | 3135,10 | 612,45 | 0,70 | 2666,42 | 520,03 | 0,77 |
| | 10 | Sienito e Traquito | 3245,35 | 166,30 | 0,68 | 2827,75 | 139,60 | 0,74 |
| | 11 | Granito | 2817,60 | 373,05 | 0,67 | 2425,63 | 334,03 | 0,77 |
| | 12 | Microgabro | | | | | | |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | | | | | | |
| | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | | | | | | |
| | 15 | Basalto | 2932,25 | 551,50 | 0,63 | 2588,42 | 594,87 | 0,70 |
| | 16 | Metacalcário | 3233,75 | 546,50 | 0,61 | 2548,50 | 581,50 | 0,71 |
| | 17 | Gnaiss migmatítico | 2897,25 | 429,00 | 0,67 | 2799,08 | 373,37 | 0,74 |
| | 18 | Granito | | | | | | |
| | 19 | Pegmatito Branco | | | | | | |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | | | | | | |
| | 21 | Pegmatito Golden | | | | | | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela I.4 – Agregados com caracterização morfológica antes e depois do ensaio de impacto Treton

| | Variáveis | Propriedades de forma | | | | | | |
|---------------------|--------------|---|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------|
| | Materiais/Ls | Angularidade origem Treton | Textura origem Treton | Esfericidade origem Treton | Angularidade depois do Treton | Textura depois do Treton | Esfericidade depois do Treton | |
| MATERIAIS FILTRADOS | 1 | Gnaiss migmatítico | | | | | | |
| | 2 | Gnaiss | | | | | | |
| | 3 | Gnaiss | | | | | | |
| | 4 | Biotita gnaiss | 2536,29 | 513,18 | 0,75 | 2740,64 | 420,05 | 0,68 |
| | 5 | Nefelina-fonólito | 3041,42 | 416,51 | 0,72 | 3002,60 | 333,17 | 0,69 |
| | 6 | Nefelina-fonólito | 3242,44 | 348,63 | 0,63 | 3103,16 | 332,44 | 0,69 |
| | 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | 2572,26 | 302,62 | 0,74 | 2716,38 | 275,75 | 0,70 |
| | 8 | Ortognaiss | 2413,11 | 324,80 | 0,79 | 2469,46 | 315,43 | 0,72 |
| | 9 | Biotita gnaiss | 2716,60 | 613,90 | 0,70 | 3205,05 | 595,67 | 0,76 |
| | 10 | Sienito e Traquito | 2865,50 | 195,90 | 0,76 | 3386,07 | 193,57 | 0,74 |
| | 11 | Granito | 2460,50 | 376,40 | 0,80 | 3293,00 | 364,90 | 0,72 |
| | 12 | Microgabro | | | | | | |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | | | | | | |
| | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | | | | | | |
| | 15 | Basalto | 2864,00 | 548,00 | 0,72 | 3015,00 | 559,00 | 0,66 |
| | 16 | Metacalcário | 3015,00 | 531,00 | 0,72 | 2890,40 | 497,40 | 0,71 |
| | 17 | Gnaiss migmatítico | 2613,00 | 405,00 | 0,73 | 3111,00 | 366,00 | 0,69 |
| | 18 | Granito | | | | | | |
| | 19 | Pegmatito Branco | | | | | | |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | | | | | | |
| | 21 | Pegmatito Golden | | | | | | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela I.5 – Agregados com caracterização morfológica antes e depois do ensaio de desgaste MD

| | Variáveis | | Propriedades de forma | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------|---|------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | Materiais/Ls | | Angularidade origem MD 0 min | Textura origem D 0 min | Esfericidade origem MD 0 min | Angularidade MD 105 min | Textura MD 105 min | Esfericidade MD 105 min | Angularidade MD 180 min | Textura MD 180 min | Esfericidade MD 180 min | Angularidade MD 210 min | Textura MD 210 min | Esfericidade MD 210 min |
| MATERIAIS FILTRADOS | 1 | Gnaiss migmatítico | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | Gnaiss | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | Gnaiss | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | Biotita gnaiss | 3048,10 | 363,79 | 0,69 | 2083,53 | 339,44 | 0,70 | 1785,34 | 354,99 | 0,73 | 1904,28 | 338,00 | 0,71 |
| | 5 | Nefelina-fonólito | 3332,32 | 322,46 | 0,68 | 2625,05 | 354,88 | 0,67 | 2505,64 | 231,42 | 0,67 | 2439,57 | 206,20 | 0,67 |
| | 6 | Nefelina-fonólito | 3437,06 | 339,97 | 0,60 | 2905,08 | 214,32 | 0,61 | 2714,05 | 221,08 | 0,61 | 2599,44 | 170,02 | 0,62 |
| | 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | 2866,43 | 289,27 | 0,60 | 2148,89 | 257,19 | 0,64 | 2023,65 | 257,99 | 0,64 | 2047,24 | 260,24 | 0,64 |
| | 8 | Ortognaisse | 2774,73 | 308,64 | 0,66 | 1977,94 | 325,08 | 0,67 | 1932,80 | 307,40 | 0,66 | 1762,73 | 322,10 | 0,67 |
| | 9 | Biotita gnaiss | | | | | | | | | | | | |
| | 10 | Sienito e Traquito | | | | | | | | | | | | |
| | 11 | Granito | | | | | | | | | | | | |
| | 12 | Microgabro | | | | | | | | | | | | |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | | | | | | | | | | | | |
| | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | | | | | | | | | | | | |
| | 15 | Basalto | | | | | | | | | | | | |
| | 16 | Metacalcário | | | | | | | | | | | | |
| | 17 | Gnaiss migmatítico | | | | | | | | | | | | |
| | 18 | Granito | | | | | | | | | | | | |
| | 19 | Pegmatito Branco | | | | | | | | | | | | |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | | | | | | | | | | | | |
| | 21 | Pegmatito Golden | | | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela I.6 – Agregados com caracterização morfológica antes e depois do ensaio de Esmagamento

| | Variáveis | Propriedades de forma | | | | | | |
|---------------------|--------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------|
| | Materiais/Ls | Angularidade origem Esmagamento | Textura origem Esmagamento | Esfericidade origem Esmagamento | Angularidade depois Esmagamento | Textura depois Esmagamento | Esfericidade depois Esmagamento | |
| MATERIAIS FILTRADOS | 1 | Gnaiss migmatítico | | | | | | |
| | 2 | Gnaiss | | | | | | |
| | 3 | Gnaiss | | | | | | |
| | 4 | Biotita gnaiss | | | | | | |
| | 5 | Nefelina-fonólito | | | | | | |
| | 6 | Nefelina-fonólito | | | | | | |
| | 7 | Biotita-monzogranito/tectonizado | | | | | | |
| | 8 | Ortognaiss | | | | | | |
| | 9 | Biotita gnaiss | 3200,70 | 579,70 | 0,69 | 3251,23 | 564,75 | 0,76 |
| | 10 | Sienito e Traquito | 3277,90 | 161,20 | 0,68 | 3261,73 | 154,90 | 0,75 |
| | 11 | Granito | 2933,00 | 377,70 | 0,65 | 3208,77 | 320,35 | 0,76 |
| | 12 | Microgabro | | | | | | |
| | 13 | Hornblenda sienito com quartzo | | | | | | |
| | 14 | Granito Pegmatoide com granada e silimanita | | | | | | |
| | 15 | Basalto | 2985,50 | 621,00 | 0,61 | 3007,75 | 626,67 | 0,71 |
| | 16 | Metacalcário | 3229,50 | 549,00 | 0,62 | 3000,50 | 566,67 | 0,72 |
| | 17 | Gnaiss migmatítico | 2954,00 | 390,00 | 0,68 | 3147,50 | 373,33 | 0,74 |
| | 18 | Granito | | | | | | |
| | 19 | Pegmatito Branco | | | | | | |
| | 20 | Pegmatito Capuccino | | | | | | |
| | 21 | Pegmatito Golden | | | | | | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE J – PARÂMETROS 2D REAIS E 3D VIRTUAIS

Tabela J.1: Parâmetros 2D reais (Proj 1 – plano xy)

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 6,35 | 1 | 7,35 | 9,2 | 17,55 | 0,799 | 0,524 | 2,389 | 0,603 |
| 6,35 | 2 | 6,73 | 9,85 | 13,97 | 0,683 | 0,705 | 2,075 | 0,698 |
| 6,35 | 3 | 5,46 | 7,67 | 17,28 | 0,711 | 0,444 | 3,168 | 0,519 |
| 6,35 | 4 | 6,6 | 9,9 | 13,27 | 0,666 | 0,746 | 2,011 | 0,719 |
| 6,35 | 5 | 5,09 | 8,64 | 12,56 | 0,589 | 0,688 | 2,469 | 0,653 |
| 6,35 | 6 | 6,25 | 9,01 | 14,48 | 0,694 | 0,622 | 2,315 | 0,645 |
| 6,35 | 7 | 5,18 | 10,2 | 12,9 | 0,507 | 0,791 | 2,492 | 0,682 |
| 6,35 | 8 | 7,59 | 10,67 | 12,4 | 0,712 | 0,86 | 1,633 | 0,808 |
| 6,35 | 9 | 5,43 | 9,22 | 11,65 | 0,589 | 0,791 | 2,145 | 0,717 |
| 6,35 | 10 | 8,28 | 9,21 | 14,41 | 0,899 | 0,639 | 1,741 | 0,716 |
| 6,35 | 11 | 6,88 | 10,17 | 15,23 | 0,676 | 0,668 | 2,215 | 0,67 |
| 6,35 | 12 | 5,9 | 9,28 | 15,97 | 0,636 | 0,581 | 2,707 | 0,599 |
| 6,35 | 13 | 4,68 | 7,69 | 16,45 | 0,608 | 0,467 | 3,516 | 0,51 |
| 6,35 | 14 | 7,11 | 9,71 | 15,67 | 0,733 | 0,62 | 2,203 | 0,655 |
| 6,35 | 15 | 6,29 | 6,91 | 10,95 | 0,91 | 0,631 | 1,741 | 0,713 |
| 6,35 | 16 | 4,62 | 8,11 | 14,13 | 0,57 | 0,574 | 3,055 | 0,573 |
| 6,35 | 17 | 5,4 | 9,14 | 11,38 | 0,591 | 0,803 | 2,106 | 0,725 |
| 6,35 | 18 | 8,14 | 8,95 | 15,77 | 0,909 | 0,568 | 1,938 | 0,664 |
| 6,35 | 19 | 4,82 | 7,23 | 13,12 | 0,666 | 0,551 | 2,725 | 0,587 |
| 6,35 | 20 | 5,02 | 10,01 | 12,12 | 0,501 | 0,826 | 2,416 | 0,699 |
| 6,35 | 21 | 7,18 | 10,86 | 12,98 | 0,662 | 0,837 | 1,807 | 0,774 |
| 6,35 | 22 | 5,83 | 9,45 | 15,32 | 0,617 | 0,617 | 2,629 | 0,617 |
| 6,35 | 23 | 6,74 | 8,92 | 11,73 | 0,756 | 0,76 | 1,740 | 0,759 |
| 6,35 | 24 | 5,69 | 7,15 | 12,58 | 0,796 | 0,568 | 2,211 | 0,636 |
| 6,35 | 25 | 5,53 | 8,88 | 10,18 | 0,623 | 0,872 | 1,842 | 0,78 |
| 6,35 | 26 | 6,03 | 8,44 | 12,54 | 0,714 | 0,673 | 2,081 | 0,686 |
| 6,35 | 27 | 6,41 | 6,65 | 11,21 | 0,964 | 0,593 | 1,749 | 0,697 |
| 6,35 | 28 | 8,5 | 10,32 | 10,97 | 0,824 | 0,941 | 1,290 | 0,9 |
| 6,35 | 29 | 5,71 | 7,02 | 12,93 | 0,813 | 0,543 | 2,266 | 0,621 |
| 6,35 | 30 | 5,43 | 6,91 | 13,28 | 0,787 | 0,52 | 2,443 | 0,597 |
| 9,5 | 1 | 10,15 | 12,83 | 19,01 | 0,791 | 0,675 | 1,873 | 0,712 |
| 9,5 | 2 | 7,66 | 12,01 | 18,87 | 0,638 | 0,636 | 2,463 | 0,637 |
| 9,5 | 3 | 9,4 | 10,24 | 17,4 | 0,918 | 0,589 | 1,850 | 0,683 |
| 9,5 | 4 | 9,83 | 12,88 | 19,12 | 0,763 | 0,674 | 1,946 | 0,702 |
| 9,5 | 5 | 8,71 | 10,52 | 14,89 | 0,827 | 0,707 | 1,711 | 0,745 |
| 9,5 | 6 | 8,45 | 11,77 | 15,53 | 0,718 | 0,758 | 1,837 | 0,744 |
| 9,5 | 7 | 8,69 | 11,08 | 17,66 | 0,785 | 0,627 | 2,031 | 0,676 |
| 9,5 | 8 | 8,09 | 12,5 | 15,57 | 0,647 | 0,803 | 1,925 | 0,747 |
| 9,5 | 9 | 8,46 | 12,92 | 22,94 | 0,655 | 0,563 | 2,710 | 0,592 |
| 9,5 | 10 | 7,57 | 13,41 | 19,03 | 0,564 | 0,705 | 2,515 | 0,654 |
| 9,5 | 11 | 9,09 | 11,92 | 19,27 | 0,762 | 0,619 | 2,120 | 0,663 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 9,5 | 12 | 9,3 | 12,78 | 14,52 | 0,728 | 0,88 | 1,561 | 0,826 |
| 9,5 | 13 | 9,37 | 10,46 | 23,42 | 0,896 | 0,447 | 2,499 | 0,563 |
| 9,5 | 14 | 9,13 | 10,81 | 13,37 | 0,845 | 0,809 | 1,464 | 0,82 |
| 9,5 | 15 | 9,16 | 10,21 | 11,68 | 0,897 | 0,874 | 1,275 | 0,882 |
| 9,5 | 16 | 11,24 | 12,39 | 15,54 | 0,908 | 0,797 | 1,382 | 0,832 |
| 9,5 | 17 | 7,19 | 12,55 | 18,49 | 0,573 | 0,679 | 2,570 | 0,642 |
| 9,5 | 18 | 9,27 | 12,6 | 18,18 | 0,735 | 0,693 | 1,962 | 0,707 |
| 9,5 | 19 | 8,88 | 11,86 | 17,61 | 0,748 | 0,673 | 1,984 | 0,698 |
| 9,5 | 20 | 9,1 | 11,6 | 19,44 | 0,785 | 0,597 | 2,136 | 0,654 |
| 9,5 | 21 | 10,5 | 11,27 | 23,13 | 0,932 | 0,487 | 2,203 | 0,605 |
| 9,5 | 22 | 6,88 | 10,06 | 21,45 | 0,684 | 0,469 | 3,116 | 0,532 |
| 9,5 | 23 | 7,12 | 11,8 | 18,01 | 0,604 | 0,655 | 2,529 | 0,638 |
| 9,5 | 24 | 9,35 | 9,8 | 21,28 | 0,954 | 0,461 | 2,275 | 0,587 |
| 9,5 | 25 | 6,52 | 11,69 | 21,14 | 0,558 | 0,553 | 3,243 | 0,555 |
| 9,5 | 26 | 9,13 | 11,4 | 16,25 | 0,801 | 0,702 | 1,780 | 0,733 |
| 9,5 | 27 | 7,67 | 11,12 | 13,29 | 0,69 | 0,837 | 1,733 | 0,785 |
| 9,5 | 28 | 8,19 | 10,51 | 15,11 | 0,779 | 0,696 | 1,844 | 0,722 |
| 9,5 | 29 | 8,02 | 8,48 | 16,76 | 0,946 | 0,506 | 2,090 | 0,623 |
| 9,5 | 30 | 6,52 | 10,68 | 23,8 | 0,611 | 0,449 | 3,648 | 0,497 |
| 12,5 | 1 | 16,43 | 17,75 | 19,91 | 0,925 | 0,892 | 1,212 | 0,903 |
| 12,5 | 2 | 12,33 | 15,5 | 22,04 | 0,795 | 0,703 | 1,788 | 0,733 |
| 12,5 | 3 | 7,75 | 15,09 | 51,64 | 0,514 | 0,292 | 6,661 | 0,353 |
| 12,5 | 4 | 11,14 | 17,15 | 20,27 | 0,649 | 0,846 | 1,820 | 0,775 |
| 12,5 | 5 | 8,36 | 21,08 | 28,11 | 0,397 | 0,75 | 3,362 | 0,606 |
| 12,5 | 6 | 12,08 | 15,94 | 20,44 | 0,758 | 0,78 | 1,691 | 0,773 |
| 12,5 | 7 | 14,9 | 18,68 | 22,82 | 0,798 | 0,819 | 1,532 | 0,812 |
| 12,5 | 8 | 9,07 | 16,01 | 18,41 | 0,567 | 0,87 | 2,029 | 0,754 |
| 12,5 | 9 | 9,52 | 16,4 | 21,98 | 0,58 | 0,746 | 2,309 | 0,686 |
| 12,5 | 10 | 10,35 | 14,45 | 20,7 | 0,716 | 0,698 | 2,000 | 0,704 |
| 12,5 | 11 | 10,14 | 19,82 | 21,55 | 0,512 | 0,92 | 2,125 | 0,756 |
| 12,5 | 12 | 14,46 | 17,46 | 21,71 | 0,828 | 0,804 | 1,501 | 0,812 |
| 12,5 | 13 | 8,89 | 12,52 | 18,44 | 0,71 | 0,679 | 2,074 | 0,689 |
| 12,5 | 14 | 12,41 | 19,4 | 28,88 | 0,64 | 0,672 | 2,328 | 0,661 |
| 12,5 | 15 | 11,07 | 14,21 | 24,47 | 0,779 | 0,581 | 2,211 | 0,64 |
| 12,5 | 16 | 14,45 | 16,79 | 24,5 | 0,861 | 0,685 | 1,696 | 0,739 |
| 12,5 | 17 | 8,43 | 11,83 | 24,44 | 0,713 | 0,484 | 2,899 | 0,551 |
| 12,5 | 18 | 9,02 | 17,61 | 18,35 | 0,512 | 0,96 | 2,034 | 0,778 |
| 12,5 | 19 | 12,36 | 12,9 | 22,44 | 0,958 | 0,575 | 1,815 | 0,682 |
| 12,5 | 20 | 10,24 | 12,46 | 18,88 | 0,822 | 0,66 | 1,843 | 0,71 |
| 12,5 | 21 | 8,35 | 16,26 | 19,94 | 0,514 | 0,815 | 2,387 | 0,699 |
| 12,5 | 22 | 9,08 | 13,53 | 28,69 | 0,671 | 0,472 | 3,161 | 0,53 |
| 12,5 | 23 | 10,57 | 15,67 | 25,62 | 0,675 | 0,612 | 2,424 | 0,632 |
| 12,5 | 24 | 10,94 | 16,19 | 17,99 | 0,676 | 0,9 | 1,644 | 0,818 |
| 12,5 | 25 | 7,83 | 19,36 | 22,5 | 0,404 | 0,86 | 2,874 | 0,669 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dI/ds | Esfericidade |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 12,5 | 26 | 14,58 | 14,98 | 22,52 | 0,973 | 0,665 | 1,545 | 0,755 |
| 12,5 | 27 | 11,58 | 14,94 | 17,63 | 0,775 | 0,847 | 1,522 | 0,823 |
| 12,5 | 28 | 9,71 | 15,67 | 34,36 | 0,619 | 0,456 | 3,540 | 0,505 |
| 12,5 | 29 | 10,86 | 19,32 | 23,73 | 0,562 | 0,814 | 2,185 | 0,72 |
| 12,5 | 30 | 10,31 | 22,99 | 30,14 | 0,449 | 0,763 | 2,922 | 0,639 |
| 19 | 1 | 22,01 | 25,93 | 30,26 | 0,849 | 0,857 | 1,375 | 0,854 |
| 19 | 2 | 20,81 | 27,36 | 37,73 | 0,761 | 0,725 | 1,813 | 0,737 |
| 19 | 3 | 20,18 | 21,23 | 28,78 | 0,95 | 0,738 | 1,426 | 0,803 |
| 19 | 4 | 18,92 | 24,55 | 31,85 | 0,771 | 0,771 | 1,684 | 0,771 |
| 19 | 5 | 14,23 | 22,52 | 39,95 | 0,632 | 0,564 | 2,807 | 0,586 |
| 19 | 6 | 19,64 | 22,48 | 45,81 | 0,874 | 0,491 | 2,333 | 0,595 |
| 19 | 7 | 18,46 | 23,47 | 41,75 | 0,786 | 0,562 | 2,262 | 0,629 |
| 19 | 8 | 14,27 | 24,55 | 32,68 | 0,581 | 0,751 | 2,290 | 0,69 |
| 19 | 9 | 17,66 | 22,94 | 37,83 | 0,77 | 0,606 | 2,142 | 0,657 |
| 19 | 10 | 14,93 | 29,97 | 38,03 | 0,498 | 0,788 | 2,547 | 0,676 |
| 19 | 11 | 20,09 | 22,41 | 31,23 | 0,896 | 0,718 | 1,555 | 0,773 |
| 19 | 12 | 18,87 | 19,82 | 54,52 | 0,952 | 0,364 | 2,889 | 0,501 |
| 19 | 13 | 20,15 | 24,56 | 37,25 | 0,821 | 0,659 | 1,848 | 0,709 |
| 19 | 14 | 14,62 | 26,57 | 31,96 | 0,55 | 0,831 | 2,186 | 0,724 |
| 19 | 15 | 14,34 | 31,37 | 38,5 | 0,457 | 0,815 | 2,684 | 0,672 |
| 19 | 16 | 13,6 | 22,27 | 30,49 | 0,611 | 0,73 | 2,242 | 0,688 |
| 19 | 17 | 10,26 | 26,38 | 34,47 | 0,389 | 0,765 | 3,359 | 0,611 |
| 19 | 18 | 13,54 | 25,32 | 29,31 | 0,535 | 0,864 | 2,164 | 0,736 |
| 19 | 19 | 13,37 | 22,29 | 26,58 | 0,6 | 0,839 | 1,989 | 0,75 |
| 19 | 20 | 18,78 | 24,65 | 27,38 | 0,762 | 0,9 | 1,458 | 0,852 |
| 19 | 21 | 18,36 | 19,54 | 27,33 | 0,94 | 0,715 | 1,489 | 0,783 |
| 19 | 22 | 16,16 | 26,66 | 34,08 | 0,606 | 0,782 | 2,110 | 0,718 |
| 19 | 23 | 13,41 | 30,5 | 34,05 | 0,44 | 0,896 | 2,539 | 0,707 |
| 19 | 24 | 12,85 | 25,98 | 30,92 | 0,495 | 0,84 | 2,406 | 0,704 |
| 19 | 25 | 9,72 | 23,25 | 31,97 | 0,418 | 0,727 | 3,289 | 0,605 |
| 19 | 26 | 9,9 | 26,35 | 34,81 | 0,376 | 0,757 | 3,516 | 0,599 |
| 19 | 27 | 19,99 | 21,46 | 30,09 | 0,932 | 0,713 | 1,505 | 0,78 |
| 19 | 28 | 15,78 | 21,12 | 54,29 | 0,747 | 0,389 | 3,441 | 0,484 |
| 19 | 29 | 18,33 | 26,53 | 47,09 | 0,691 | 0,563 | 2,569 | 0,603 |
| 19 | 30 | 13,51 | 23,52 | 40,09 | 0,574 | 0,587 | 2,968 | 0,583 |
| 25,4 | 1 | 27,11 | 35,5 | 51,16 | 0,764 | 0,694 | 1,887 | 0,716 |
| 25,4 | 2 | 30,39 | 40,32 | 61,31 | 0,754 | 0,658 | 2,018 | 0,688 |
| 25,4 | 3 | 23,56 | 33,61 | 44,74 | 0,701 | 0,751 | 1,899 | 0,734 |
| 25,4 | 4 | 24,53 | 28,03 | 49,99 | 0,875 | 0,561 | 2,038 | 0,65 |
| 25,4 | 5 | 31 | 32,92 | 34,85 | 0,942 | 0,945 | 1,124 | 0,944 |
| 25,4 | 6 | 29,45 | 34,41 | 52,23 | 0,856 | 0,659 | 1,774 | 0,719 |
| 25,4 | 7 | 32,42 | 35,91 | 47,17 | 0,903 | 0,761 | 1,455 | 0,806 |
| 25,4 | 8 | 31,19 | 36,47 | 52,75 | 0,855 | 0,691 | 1,691 | 0,742 |
| 25,4 | 9 | 32,45 | 37,22 | 49,67 | 0,872 | 0,749 | 1,531 | 0,788 |
| 25,4 | 10 | 25,65 | 30,61 | 44,75 | 0,838 | 0,684 | 1,745 | 0,732 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 25,4 | 11 | 29,57 | 33,41 | 34,22 | 0,885 | 0,976 | 1,157 | 0,945 |
| 25,4 | 12 | 29,3 | 33,38 | 50,3 | 0,878 | 0,664 | 1,717 | 0,728 |
| 25,4 | 13 | 32 | 42,51 | 58,74 | 0,753 | 0,724 | 1,836 | 0,733 |
| 25,4 | 14 | 36,26 | 41,23 | 47,04 | 0,88 | 0,876 | 1,297 | 0,878 |
| 25,4 | 15 | 29,3 | 30,88 | 35,34 | 0,949 | 0,874 | 1,206 | 0,898 |
| 25,4 | 16 | 27,55 | 30,55 | 43,69 | 0,902 | 0,699 | 1,586 | 0,761 |
| 25,4 | 17 | 26,21 | 33,75 | 46,81 | 0,777 | 0,721 | 1,786 | 0,739 |
| 25,4 | 18 | 25,25 | 34,49 | 45,82 | 0,732 | 0,753 | 1,815 | 0,746 |
| 25,4 | 19 | 27,77 | 30,1 | 36,04 | 0,922 | 0,835 | 1,298 | 0,863 |
| 25,4 | 20 | 27,38 | 31,08 | 41,67 | 0,881 | 0,746 | 1,522 | 0,788 |
| 25,4 | 21 | 29,42 | 31 | 36,39 | 0,949 | 0,852 | 1,237 | 0,883 |
| 25,4 | 22 | 39,15 | 39,18 | 53,1 | 0,999 | 0,738 | 1,356 | 0,816 |
| 25,4 | 23 | 22,47 | 33,44 | 43,25 | 0,672 | 0,773 | 1,925 | 0,738 |
| 25,4 | 24 | 33,28 | 39,36 | 45,07 | 0,846 | 0,873 | 1,354 | 0,864 |
| 25,4 | 25 | 19,57 | 32,57 | 40,83 | 0,601 | 0,798 | 2,086 | 0,726 |
| 25,4 | 26 | 29,52 | 44,12 | 48,21 | 0,669 | 0,915 | 1,633 | 0,824 |
| 25,4 | 27 | 27,72 | 37,64 | 54,25 | 0,736 | 0,694 | 1,957 | 0,708 |
| 25,4 | 28 | 26,7 | 45,19 | 51,21 | 0,591 | 0,882 | 1,918 | 0,772 |
| 25,4 | 29 | 27,6 | 42,62 | 51,73 | 0,648 | 0,824 | 1,874 | 0,76 |
| 25,4 | 30 | 23,39 | 40,13 | 56,73 | 0,583 | 0,707 | 2,425 | 0,663 |

NOTA: Achatamento (ds/dI), Alongamento (dI/dL) e Relação entre achatamento e alongamento (dL/ds)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela J.2: Parâmetros 3D virtuais referentes ao Grupo 1

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 6,35 | 1 | 0,81 | 1,02 | 1,83 | 0,794 | 0,557 | 2,259 | 0,627 |
| 6,35 | 2 | 0,82 | 1,21 | 1,7 | 0,678 | 0,712 | 2,073 | 0,7 |
| 6,35 | 3 | 0,66 | 0,88 | 1,91 | 0,75 | 0,461 | 2,894 | 0,542 |
| 6,35 | 4 | 0,87 | 1,38 | 1,75 | 0,63 | 0,789 | 2,011 | 0,732 |
| 6,35 | 5 | 0,71 | 1,29 | 1,78 | 0,55 | 0,725 | 2,507 | 0,661 |
| 6,35 | 6 | 0,77 | 1,13 | 1,81 | 0,681 | 0,624 | 2,351 | 0,643 |
| 6,35 | 7 | 0,73 | 1,45 | 1,79 | 0,503 | 0,81 | 2,452 | 0,691 |
| 6,35 | 8 | 1,23 | 1,66 | 1,93 | 0,741 | 0,86 | 1,569 | 0,818 |
| 6,35 | 9 | 0,87 | 1,34 | 1,7 | 0,649 | 0,788 | 1,954 | 0,739 |
| 6,35 | 10 | 1,07 | 1,17 | 1,77 | 0,915 | 0,661 | 1,654 | 0,737 |
| 6,35 | 11 | 0,81 | 1,12 | 1,71 | 0,723 | 0,655 | 2,111 | 0,677 |
| 6,35 | 12 | 0,68 | 1,06 | 1,81 | 0,642 | 0,586 | 2,662 | 0,604 |
| 6,35 | 13 | 0,59 | 0,91 | 1,94 | 0,648 | 0,469 | 3,288 | 0,523 |
| 6,35 | 14 | 0,82 | 1,09 | 1,73 | 0,752 | 0,63 | 2,11 | 0,668 |
| 6,35 | 15 | 1,15 | 1,3 | 1,84 | 0,885 | 0,707 | 1,6 | 0,761 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 6,35 | 16 | 0,61 | 1,01 | 1,7 | 0,604 | 0,594 | 2,787 | 0,597 |
| 6,35 | 17 | 0,89 | 1,43 | 1,8 | 0,622 | 0,794 | 2,022 | 0,732 |
| 6,35 | 18 | 1,01 | 1,19 | 1,97 | 0,849 | 0,604 | 1,95 | 0,677 |
| 6,35 | 19 | 0,74 | 1,08 | 1,96 | 0,685 | 0,551 | 2,649 | 0,593 |
| 6,35 | 20 | 0,8 | 1,65 | 1,94 | 0,485 | 0,851 | 2,425 | 0,705 |
| 6,35 | 21 | 0,97 | 1,65 | 1,75 | 0,588 | 0,943 | 1,804 | 0,805 |
| 6,35 | 22 | 0,74 | 1,29 | 1,91 | 0,574 | 0,675 | 2,581 | 0,64 |
| 6,35 | 23 | 1,08 | 1,33 | 1,86 | 0,812 | 0,715 | 1,722 | 0,746 |
| 6,35 | 24 | 0,88 | 1,16 | 1,81 | 0,759 | 0,641 | 2,057 | 0,678 |
| 6,35 | 25 | 0,88 | 1,42 | 1,65 | 0,62 | 0,861 | 1,875 | 0,771 |
| 6,35 | 26 | 0,83 | 1,14 | 1,68 | 0,728 | 0,679 | 2,024 | 0,695 |
| 6,35 | 27 | 1,05 | 1,06 | 1,73 | 0,991 | 0,613 | 1,648 | 0,719 |
| 6,35 | 28 | 1,47 | 1,57 | 1,75 | 0,936 | 0,897 | 1,19 | 0,91 |
| 6,35 | 29 | 0,81 | 1,08 | 1,82 | 0,75 | 0,593 | 2,247 | 0,642 |
| 6,35 | 30 | 0,8 | 1,1 | 1,85 | 0,727 | 0,595 | 2,312 | 0,636 |
| 9,5 | 1 | 1,01 | 1,25 | 1,8 | 0,808 | 0,694 | 1,782 | 0,73 |
| 9,5 | 2 | 0,71 | 1,01 | 1,69 | 0,703 | 0,598 | 2,38 | 0,631 |
| 9,5 | 3 | 1,05 | 1,17 | 1,94 | 0,897 | 0,603 | 1,848 | 0,689 |
| 9,5 | 4 | 0,96 | 1,19 | 1,73 | 0,807 | 0,688 | 1,802 | 0,725 |
| 9,5 | 5 | 1,1 | 1,11 | 1,7 | 0,991 | 0,653 | 1,545 | 0,75 |
| 9,5 | 6 | 1,03 | 1,38 | 1,83 | 0,746 | 0,754 | 1,777 | 0,752 |
| 9,5 | 7 | 0,94 | 1,15 | 1,83 | 0,817 | 0,628 | 1,947 | 0,686 |
| 9,5 | 8 | 1,02 | 1,59 | 1,96 | 0,642 | 0,811 | 1,922 | 0,75 |
| 9,5 | 9 | 0,7 | 1,08 | 1,87 | 0,648 | 0,578 | 2,671 | 0,6 |
| 9,5 | 10 | 0,8 | 1,42 | 1,9 | 0,563 | 0,747 | 2,375 | 0,68 |
| 9,5 | 11 | 0,96 | 1,19 | 1,91 | 0,807 | 0,623 | 1,99 | 0,679 |
| 9,5 | 12 | 1,22 | 1,72 | 1,93 | 0,709 | 0,891 | 1,582 | 0,826 |
| 9,5 | 13 | 0,83 | 0,89 | 1,89 | 0,933 | 0,471 | 2,277 | 0,591 |
| 9,5 | 14 | 1,24 | 1,43 | 1,73 | 0,867 | 0,827 | 1,395 | 0,84 |
| 9,5 | 15 | 1,25 | 1,41 | 1,65 | 0,887 | 0,855 | 1,32 | 0,865 |
| 9,5 | 16 | 1,36 | 1,46 | 1,84 | 0,932 | 0,793 | 1,353 | 0,837 |
| 9,5 | 17 | 0,84 | 1,22 | 1,94 | 0,689 | 0,629 | 2,31 | 0,648 |
| 9,5 | 18 | 0,87 | 1,17 | 1,73 | 0,744 | 0,676 | 1,989 | 0,698 |
| 9,5 | 19 | 0,96 | 1,28 | 1,87 | 0,75 | 0,684 | 1,948 | 0,706 |
| 9,5 | 20 | 0,91 | 1,16 | 1,84 | 0,784 | 0,63 | 2,022 | 0,678 |
| 9,5 | 21 | 0,88 | 1 | 1,92 | 0,88 | 0,521 | 2,182 | 0,62 |
| 9,5 | 22 | 0,65 | 0,93 | 1,91 | 0,699 | 0,487 | 2,938 | 0,549 |
| 9,5 | 23 | 0,65 | 1,17 | 1,72 | 0,556 | 0,68 | 2,646 | 0,636 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 9,5 | 24 | 0,87 | 0,91 | 1,94 | 0,956 | 0,469 | 2,23 | 0,595 |
| 9,5 | 25 | 0,65 | 1,05 | 1,85 | 0,619 | 0,568 | 2,846 | 0,584 |
| 9,5 | 26 | 1,04 | 1,33 | 1,84 | 0,782 | 0,723 | 1,769 | 0,742 |
| 9,5 | 27 | 1,07 | 1,52 | 1,77 | 0,704 | 0,859 | 1,654 | 0,804 |
| 9,5 | 28 | 1,03 | 1,38 | 1,78 | 0,746 | 0,775 | 1,728 | 0,766 |
| 9,5 | 29 | 0,86 | 1,04 | 1,78 | 0,827 | 0,584 | 2,07 | 0,656 |
| 9,5 | 30 | 0,61 | 0,9 | 1,87 | 0,678 | 0,481 | 3,066 | 0,539 |
| 12,5 | 1 | 1,45 | 1,55 | 1,71 | 0,935 | 0,906 | 1,179 | 0,916 |
| 12,5 | 2 | 0,93 | 1,19 | 1,71 | 0,782 | 0,696 | 1,839 | 0,723 |
| 12,5 | 3 | 0,31 | 0,6 | 1,85 | 0,517 | 0,324 | 5,968 | 0,379 |
| 12,5 | 4 | 0,91 | 1,34 | 1,57 | 0,679 | 0,854 | 1,725 | 0,791 |
| 12,5 | 5 | 0,57 | 1,31 | 1,91 | 0,435 | 0,686 | 3,351 | 0,589 |
| 12,5 | 6 | 0,98 | 1,33 | 1,72 | 0,737 | 0,773 | 1,755 | 0,761 |
| 12,5 | 7 | 1,16 | 1,47 | 1,75 | 0,789 | 0,84 | 1,509 | 0,823 |
| 12,5 | 8 | 0,87 | 1,55 | 1,78 | 0,561 | 0,871 | 2,046 | 0,752 |
| 12,5 | 9 | 0,8 | 1,34 | 1,85 | 0,597 | 0,724 | 2,312 | 0,679 |
| 12,5 | 10 | 0,91 | 1,16 | 1,64 | 0,784 | 0,707 | 1,802 | 0,732 |
| 12,5 | 11 | 0,86 | 1,84 | 1,9 | 0,467 | 0,968 | 2,209 | 0,76 |
| 12,5 | 12 | 1,2 | 1,44 | 1,77 | 0,833 | 0,814 | 1,475 | 0,82 |
| 12,5 | 13 | 0,87 | 1,11 | 1,65 | 0,784 | 0,673 | 1,897 | 0,708 |
| 12,5 | 14 | 0,84 | 1,34 | 1,94 | 0,627 | 0,691 | 2,31 | 0,669 |
| 12,5 | 15 | 0,91 | 1,2 | 1,95 | 0,758 | 0,615 | 2,143 | 0,66 |
| 12,5 | 16 | 1,11 | 1,29 | 1,88 | 0,86 | 0,686 | 1,694 | 0,74 |
| 12,5 | 17 | 0,7 | 0,95 | 1,98 | 0,737 | 0,48 | 2,829 | 0,554 |
| 12,5 | 18 | 0,84 | 1,53 | 1,54 | 0,549 | 0,994 | 1,833 | 0,815 |
| 12,5 | 19 | 1,09 | 1,18 | 1,97 | 0,924 | 0,599 | 1,807 | 0,692 |
| 12,5 | 20 | 0,97 | 1,26 | 1,79 | 0,77 | 0,704 | 1,845 | 0,725 |
| 12,5 | 21 | 0,8 | 1,48 | 1,81 | 0,541 | 0,818 | 2,262 | 0,712 |
| 12,5 | 22 | 0,62 | 0,9 | 1,9 | 0,689 | 0,474 | 3,065 | 0,537 |
| 12,5 | 23 | 0,77 | 1,16 | 1,82 | 0,664 | 0,637 | 2,364 | 0,646 |
| 12,5 | 24 | 1,07 | 1,45 | 1,65 | 0,738 | 0,879 | 1,542 | 0,829 |
| 12,5 | 25 | 0,63 | 1,48 | 1,76 | 0,426 | 0,841 | 2,794 | 0,67 |
| 12,5 | 26 | 1,26 | 1,29 | 1,92 | 0,977 | 0,672 | 1,524 | 0,761 |
| 12,5 | 27 | 1,26 | 1,45 | 1,72 | 0,869 | 0,843 | 1,365 | 0,852 |
| 12,5 | 28 | 0,51 | 0,89 | 1,8 | 0,573 | 0,494 | 3,529 | 0,519 |
| 12,5 | 29 | 0,85 | 1,37 | 1,78 | 0,62 | 0,77 | 2,094 | 0,716 |
| 12,5 | 30 | 0,62 | 1,35 | 1,8 | 0,459 | 0,75 | 2,903 | 0,637 |
| 19 | 1 | 1,27 | 1,57 | 1,75 | 0,809 | 0,897 | 1,378 | 0,867 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 19 | 2 | 1,05 | 1,41 | 1,92 | 0,745 | 0,734 | 1,829 | 0,738 |
| 19 | 3 | 1,24 | 1,38 | 1,72 | 0,899 | 0,802 | 1,387 | 0,833 |
| 19 | 4 | 1,05 | 1,38 | 1,74 | 0,761 | 0,793 | 1,657 | 0,782 |
| 19 | 5 | 0,64 | 0,97 | 1,8 | 0,66 | 0,539 | 2,812 | 0,577 |
| 19 | 6 | 0,79 | 0,91 | 1,73 | 0,868 | 0,526 | 2,19 | 0,622 |
| 19 | 7 | 0,84 | 1,12 | 1,87 | 0,75 | 0,599 | 2,226 | 0,646 |
| 19 | 8 | 0,83 | 1,32 | 1,78 | 0,629 | 0,742 | 2,145 | 0,702 |
| 19 | 9 | 0,88 | 1,14 | 1,89 | 0,772 | 0,603 | 2,148 | 0,655 |
| 19 | 10 | 0,74 | 1,6 | 1,86 | 0,462 | 0,86 | 2,514 | 0,699 |
| 19 | 11 | 1,21 | 1,44 | 1,85 | 0,84 | 0,778 | 1,529 | 0,798 |
| 19 | 12 | 0,7 | 0,7 | 1,88 | 1 | 0,372 | 2,686 | 0,518 |
| 19 | 13 | 1,03 | 1,26 | 1,9 | 0,817 | 0,663 | 1,845 | 0,711 |
| 19 | 14 | 0,87 | 1,59 | 1,86 | 0,547 | 0,855 | 2,138 | 0,737 |
| 19 | 15 | 0,69 | 1,45 | 1,74 | 0,476 | 0,833 | 2,522 | 0,691 |
| 19 | 16 | 0,84 | 1,39 | 1,88 | 0,604 | 0,739 | 2,238 | 0,691 |
| 19 | 17 | 0,61 | 1,44 | 1,96 | 0,424 | 0,735 | 3,213 | 0,611 |
| 19 | 18 | 0,81 | 1,51 | 1,75 | 0,536 | 0,863 | 2,16 | 0,736 |
| 19 | 19 | 0,99 | 1,46 | 1,77 | 0,678 | 0,825 | 1,788 | 0,773 |
| 19 | 20 | 1,35 | 1,77 | 1,98 | 0,763 | 0,894 | 1,467 | 0,848 |
| 19 | 21 | 1,28 | 1,29 | 1,8 | 0,992 | 0,717 | 1,406 | 0,799 |
| 19 | 22 | 0,96 | 1,42 | 1,82 | 0,676 | 0,78 | 1,896 | 0,744 |
| 19 | 23 | 0,72 | 1,68 | 1,82 | 0,429 | 0,923 | 2,528 | 0,715 |
| 19 | 24 | 0,8 | 1,47 | 1,7 | 0,544 | 0,865 | 2,125 | 0,741 |
| 19 | 25 | 0,6 | 1,47 | 1,94 | 0,408 | 0,758 | 3,233 | 0,617 |
| 19 | 26 | 0,54 | 1,38 | 1,84 | 0,391 | 0,75 | 3,407 | 0,604 |
| 19 | 27 | 1,36 | 1,36 | 1,91 | 1 | 0,712 | 1,404 | 0,797 |
| 19 | 28 | 0,56 | 0,74 | 1,85 | 0,757 | 0,4 | 3,304 | 0,495 |
| 19 | 29 | 0,75 | 1,05 | 1,84 | 0,714 | 0,571 | 2,453 | 0,615 |
| 19 | 30 | 0,65 | 1,16 | 1,92 | 0,56 | 0,604 | 2,954 | 0,589 |
| 25,4 | 1 | 0,86 | 1,06 | 1,57 | 0,811 | 0,675 | 1,826 | 0,718 |
| 25,4 | 2 | 0,99 | 1,31 | 1,91 | 0,756 | 0,686 | 1,929 | 0,708 |
| 25,4 | 3 | 0,96 | 1,41 | 1,83 | 0,681 | 0,77 | 1,906 | 0,739 |
| 25,4 | 4 | 0,99 | 1,16 | 1,96 | 0,853 | 0,592 | 1,98 | 0,669 |
| 25,4 | 5 | 1,65 | 1,75 | 1,9 | 0,943 | 0,921 | 1,152 | 0,928 |
| 25,4 | 6 | 1,05 | 1,25 | 1,88 | 0,84 | 0,665 | 1,79 | 0,719 |
| 25,4 | 7 | 1,23 | 1,39 | 1,77 | 0,885 | 0,785 | 1,439 | 0,817 |
| 25,4 | 8 | 1,09 | 1,27 | 1,78 | 0,858 | 0,713 | 1,633 | 0,759 |
| 25,4 | 9 | 1,25 | 1,54 | 1,93 | 0,812 | 0,798 | 1,544 | 0,802 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 25,4 | 10 | 1,15 | 1,23 | 1,75 | 0,935 | 0,703 | 1,522 | 0,773 |
| 25,4 | 11 | 1,56 | 1,81 | 1,85 | 0,862 | 0,978 | 1,186 | 0,938 |
| 25,4 | 12 | 1,11 | 1,14 | 1,75 | 0,974 | 0,651 | 1,577 | 0,745 |
| 25,4 | 13 | 1,1 | 1,36 | 1,86 | 0,809 | 0,731 | 1,691 | 0,756 |
| 25,4 | 14 | 1,29 | 1,39 | 1,59 | 0,928 | 0,874 | 1,233 | 0,892 |
| 25,4 | 15 | 1,54 | 1,65 | 1,87 | 0,933 | 0,882 | 1,214 | 0,899 |
| 25,4 | 16 | 1,13 | 1,34 | 1,79 | 0,843 | 0,749 | 1,584 | 0,779 |
| 25,4 | 17 | 0,98 | 1,36 | 1,8 | 0,721 | 0,756 | 1,837 | 0,744 |
| 25,4 | 18 | 1,02 | 1,27 | 1,76 | 0,803 | 0,722 | 1,725 | 0,748 |
| 25,4 | 19 | 1,28 | 1,46 | 1,65 | 0,877 | 0,885 | 1,289 | 0,882 |
| 25,4 | 20 | 1,3 | 1,47 | 1,88 | 0,884 | 0,782 | 1,446 | 0,815 |
| 25,4 | 21 | 1,5 | 1,53 | 1,85 | 0,98 | 0,827 | 1,233 | 0,875 |
| 25,4 | 22 | 1,28 | 1,36 | 1,77 | 0,941 | 0,768 | 1,383 | 0,822 |
| 25,4 | 23 | 1 | 1,52 | 1,94 | 0,658 | 0,784 | 1,94 | 0,739 |
| 25,4 | 24 | 1,31 | 1,53 | 1,73 | 0,856 | 0,884 | 1,321 | 0,875 |
| 25,4 | 25 | 0,95 | 1,37 | 1,79 | 0,693 | 0,765 | 1,884 | 0,741 |
| 25,4 | 26 | 1,15 | 1,39 | 1,58 | 0,827 | 0,88 | 1,374 | 0,862 |
| 25,4 | 27 | 1 | 1,28 | 1,85 | 0,781 | 0,692 | 1,85 | 0,72 |
| 25,4 | 28 | 0,95 | 1,67 | 1,81 | 0,569 | 0,923 | 1,905 | 0,785 |
| 25,4 | 29 | 1 | 1,58 | 1,83 | 0,633 | 0,863 | 1,83 | 0,778 |
| 25,4 | 30 | 0,81 | 1,43 | 1,98 | 0,566 | 0,722 | 2,444 | 0,666 |

NOTA: Achatamento (ds/dI), Alongamento (dI/dL) e Relação entre achatamento e alongamento (dL/ds)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela J.3: Parâmetros 3D virtuais referentes ao Grupo 2

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 6,35 | 1 | 0,76 | 1,03 | 1,83 | 0,738 | 0,563 | 2,408 | 0,616 |
| 6,35 | 2 | 0,84 | 1,24 | 1,72 | 0,677 | 0,721 | 2,048 | 0,706 |
| 6,35 | 3 | 0,69 | 0,93 | 1,97 | 0,742 | 0,472 | 2,855 | 0,549 |
| 6,35 | 4 | 1 | 1,36 | 1,75 | 0,735 | 0,777 | 1,750 | 0,763 |
| 6,35 | 5 | 0,71 | 1,3 | 1,72 | 0,546 | 0,756 | 2,423 | 0,678 |
| 6,35 | 6 | 0,75 | 1,12 | 1,77 | 0,67 | 0,633 | 2,360 | 0,645 |
| 6,35 | 7 | 0,87 | 1,42 | 1,75 | 0,613 | 0,811 | 2,011 | 0,739 |
| 6,35 | 8 | 1,25 | 1,73 | 1,93 | 0,723 | 0,896 | 1,544 | 0,834 |
| 6,35 | 9 | 0,89 | 1,37 | 1,73 | 0,65 | 0,792 | 1,944 | 0,741 |
| 6,35 | 10 | 1,05 | 1,18 | 1,72 | 0,89 | 0,686 | 1,638 | 0,748 |
| 6,35 | 11 | 0,85 | 1,23 | 1,74 | 0,691 | 0,707 | 2,047 | 0,702 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 6,35 | 12 | 0,68 | 1,08 | 1,8 | 0,63 | 0,6 | 2,647 | 0,61 |
| 6,35 | 13 | 0,55 | 0,82 | 1,89 | 0,671 | 0,434 | 3,436 | 0,502 |
| 6,35 | 14 | 0,8 | 1,06 | 1,73 | 0,755 | 0,613 | 2,162 | 0,657 |
| 6,35 | 15 | 1,11 | 1,28 | 1,83 | 0,867 | 0,699 | 1,649 | 0,751 |
| 6,35 | 16 | 0,56 | 0,95 | 1,67 | 0,589 | 0,569 | 2,982 | 0,576 |
| 6,35 | 17 | 0,97 | 1,46 | 1,81 | 0,664 | 0,807 | 1,866 | 0,756 |
| 6,35 | 18 | 0,96 | 1,06 | 1,84 | 0,906 | 0,576 | 1,917 | 0,67 |
| 6,35 | 19 | 0,78 | 1,08 | 1,95 | 0,722 | 0,554 | 2,500 | 0,605 |
| 6,35 | 20 | 0,82 | 1,59 | 1,92 | 0,516 | 0,828 | 2,341 | 0,707 |
| 6,35 | 21 | 1,03 | 1,71 | 1,79 | 0,602 | 0,955 | 1,738 | 0,819 |
| 6,35 | 22 | 0,73 | 1,29 | 1,9 | 0,566 | 0,679 | 2,603 | 0,639 |
| 6,35 | 23 | 1,13 | 1,5 | 1,93 | 0,753 | 0,777 | 1,708 | 0,769 |
| 6,35 | 24 | 0,81 | 1,15 | 1,76 | 0,704 | 0,653 | 2,173 | 0,67 |
| 6,35 | 25 | 1,01 | 1,6 | 1,73 | 0,631 | 0,925 | 1,713 | 0,814 |
| 6,35 | 26 | 0,88 | 1,2 | 1,76 | 0,733 | 0,682 | 2,000 | 0,699 |
| 6,35 | 27 | 1,02 | 1,05 | 1,77 | 0,971 | 0,593 | 1,735 | 0,699 |
| 6,35 | 28 | 1,43 | 1,69 | 1,81 | 0,846 | 0,934 | 1,266 | 0,904 |
| 6,35 | 29 | 0,77 | 1,05 | 1,79 | 0,733 | 0,587 | 2,325 | 0,632 |
| 6,35 | 30 | 0,79 | 1,1 | 1,89 | 0,718 | 0,582 | 2,392 | 0,624 |
| 9,5 | 1 | 1,03 | 1,29 | 1,85 | 0,798 | 0,697 | 1,796 | 0,73 |
| 9,5 | 2 | 0,74 | 1,11 | 1,77 | 0,667 | 0,627 | 2,392 | 0,64 |
| 9,5 | 3 | 1,05 | 1,18 | 1,94 | 0,89 | 0,608 | 1,848 | 0,69 |
| 9,5 | 4 | 0,98 | 1,26 | 1,79 | 0,778 | 0,704 | 1,827 | 0,728 |
| 9,5 | 5 | 1,19 | 1,31 | 1,84 | 0,908 | 0,712 | 1,546 | 0,772 |
| 9,5 | 6 | 1,15 | 1,42 | 1,94 | 0,81 | 0,732 | 1,687 | 0,757 |
| 9,5 | 7 | 1 | 1,14 | 1,82 | 0,877 | 0,626 | 1,820 | 0,701 |
| 9,5 | 8 | 0,92 | 1,34 | 1,78 | 0,687 | 0,753 | 1,935 | 0,73 |
| 9,5 | 9 | 0,71 | 1,2 | 1,95 | 0,592 | 0,615 | 2,746 | 0,607 |
| 9,5 | 10 | 0,8 | 1,39 | 1,89 | 0,576 | 0,735 | 2,362 | 0,678 |
| 9,5 | 11 | 0,93 | 1,12 | 1,85 | 0,83 | 0,605 | 1,989 | 0,673 |
| 9,5 | 12 | 1,22 | 1,75 | 1,91 | 0,697 | 0,916 | 1,566 | 0,836 |
| 9,5 | 13 | 0,76 | 0,85 | 1,82 | 0,894 | 0,467 | 2,395 | 0,58 |
| 9,5 | 14 | 1,22 | 1,42 | 1,71 | 0,859 | 0,83 | 1,402 | 0,84 |
| 9,5 | 15 | 1,42 | 1,63 | 1,72 | 0,871 | 0,948 | 1,211 | 0,921 |
| 9,5 | 16 | 1,33 | 1,43 | 1,79 | 0,93 | 0,799 | 1,346 | 0,84 |
| 9,5 | 17 | 0,87 | 1,33 | 1,94 | 0,654 | 0,686 | 2,230 | 0,675 |
| 9,5 | 18 | 0,95 | 1,17 | 1,74 | 0,812 | 0,672 | 1,832 | 0,716 |
| 9,5 | 19 | 0,98 | 1,21 | 1,87 | 0,81 | 0,647 | 1,908 | 0,697 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 9,5 | 20 | 0,91 | 1,18 | 1,88 | 0,771 | 0,628 | 2,066 | 0,672 |
| 9,5 | 21 | 0,92 | 1 | 1,86 | 0,92 | 0,538 | 2,022 | 0,643 |
| 9,5 | 22 | 0,69 | 0,97 | 1,95 | 0,711 | 0,497 | 2,826 | 0,56 |
| 9,5 | 23 | 0,73 | 1,31 | 1,83 | 0,557 | 0,716 | 2,507 | 0,659 |
| 9,5 | 24 | 0,78 | 0,82 | 1,8 | 0,951 | 0,456 | 2,308 | 0,582 |
| 9,5 | 25 | 0,65 | 1,04 | 1,88 | 0,625 | 0,553 | 2,892 | 0,576 |
| 9,5 | 26 | 1,06 | 1,32 | 1,83 | 0,803 | 0,721 | 1,726 | 0,748 |
| 9,5 | 27 | 1,16 | 1,52 | 1,77 | 0,763 | 0,859 | 1,526 | 0,826 |
| 9,5 | 28 | 1,09 | 1,4 | 1,82 | 0,779 | 0,769 | 1,670 | 0,772 |
| 9,5 | 29 | 0,85 | 1,01 | 1,75 | 0,842 | 0,577 | 2,059 | 0,654 |
| 9,5 | 30 | 0,56 | 0,9 | 1,84 | 0,622 | 0,489 | 3,286 | 0,53 |
| 12,5 | 1 | 1,38 | 1,38 | 1,64 | 1 | 0,841 | 1,188 | 0,891 |
| 12,5 | 2 | 1,04 | 1,29 | 1,77 | 0,806 | 0,729 | 1,702 | 0,754 |
| 12,5 | 3 | 0,3 | 0,58 | 1,85 | 0,517 | 0,314 | 6,167 | 0,37 |
| 12,5 | 4 | 0,98 | 1,49 | 1,63 | 0,658 | 0,914 | 1,663 | 0,819 |
| 12,5 | 5 | 0,57 | 1,46 | 1,9 | 0,39 | 0,768 | 3,333 | 0,613 |
| 12,5 | 6 | 1,06 | 1,44 | 1,84 | 0,736 | 0,783 | 1,736 | 0,767 |
| 12,5 | 7 | 1,16 | 1,57 | 1,82 | 0,739 | 0,863 | 1,569 | 0,819 |
| 12,5 | 8 | 0,93 | 1,51 | 1,79 | 0,616 | 0,844 | 1,925 | 0,76 |
| 12,5 | 9 | 0,82 | 1,45 | 1,93 | 0,566 | 0,751 | 2,354 | 0,683 |
| 12,5 | 10 | 0,92 | 1,18 | 1,68 | 0,78 | 0,702 | 1,826 | 0,727 |
| 12,5 | 11 | 0,86 | 1,86 | 1,88 | 0,462 | 0,989 | 2,186 | 0,768 |
| 12,5 | 12 | 1,19 | 1,38 | 1,71 | 0,862 | 0,807 | 1,437 | 0,825 |
| 12,5 | 13 | 0,92 | 1,14 | 1,66 | 0,807 | 0,687 | 1,804 | 0,725 |
| 12,5 | 14 | 0,9 | 1,35 | 1,96 | 0,667 | 0,689 | 2,178 | 0,681 |
| 12,5 | 15 | 0,9 | 1,15 | 1,88 | 0,783 | 0,612 | 2,089 | 0,664 |
| 12,5 | 16 | 1,04 | 1,13 | 1,74 | 0,92 | 0,649 | 1,673 | 0,729 |
| 12,5 | 17 | 0,68 | 0,99 | 1,98 | 0,687 | 0,5 | 2,912 | 0,556 |
| 12,5 | 18 | 0,87 | 1,54 | 1,56 | 0,565 | 0,987 | 1,793 | 0,82 |
| 12,5 | 19 | 1,03 | 1,12 | 1,9 | 0,92 | 0,589 | 1,845 | 0,684 |
| 12,5 | 20 | 0,99 | 1,27 | 1,75 | 0,78 | 0,726 | 1,768 | 0,743 |
| 12,5 | 21 | 0,79 | 1,46 | 1,78 | 0,541 | 0,82 | 2,253 | 0,714 |
| 12,5 | 22 | 0,65 | 0,88 | 1,88 | 0,739 | 0,468 | 2,892 | 0,545 |
| 12,5 | 23 | 0,81 | 1,17 | 1,86 | 0,692 | 0,629 | 2,296 | 0,649 |
| 12,5 | 24 | 1,1 | 1,56 | 1,7 | 0,705 | 0,918 | 1,545 | 0,841 |
| 12,5 | 25 | 0,67 | 1,65 | 1,87 | 0,406 | 0,882 | 2,791 | 0,681 |
| 12,5 | 26 | 1,25 | 1,29 | 1,9 | 0,969 | 0,679 | 1,520 | 0,764 |
| 12,5 | 27 | 1,21 | 1,44 | 1,77 | 0,84 | 0,814 | 1,463 | 0,822 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 12,5 | 28 | 0,57 | 0,98 | 1,88 | 0,582 | 0,521 | 3,298 | 0,541 |
| 12,5 | 29 | 0,87 | 1,51 | 1,85 | 0,576 | 0,816 | 2,126 | 0,727 |
| 12,5 | 30 | 0,65 | 1,4 | 1,83 | 0,464 | 0,765 | 2,815 | 0,648 |
| 19 | 1 | 1,38 | 1,5 | 1,69 | 0,92 | 0,888 | 1,225 | 0,898 |
| 19 | 2 | 1,04 | 1,3 | 1,87 | 0,8 | 0,695 | 1,798 | 0,729 |
| 19 | 3 | 1,28 | 1,52 | 1,79 | 0,842 | 0,849 | 1,398 | 0,847 |
| 19 | 4 | 1,13 | 1,47 | 1,82 | 0,769 | 0,808 | 1,611 | 0,794 |
| 19 | 5 | 0,66 | 1,02 | 1,81 | 0,647 | 0,564 | 2,742 | 0,59 |
| 19 | 6 | 0,83 | 0,91 | 1,73 | 0,912 | 0,526 | 2,084 | 0,632 |
| 19 | 7 | 0,87 | 1,09 | 1,89 | 0,798 | 0,577 | 2,172 | 0,643 |
| 19 | 8 | 0,83 | 1,43 | 1,84 | 0,58 | 0,777 | 2,217 | 0,705 |
| 19 | 9 | 0,91 | 1,11 | 1,91 | 0,82 | 0,581 | 2,099 | 0,652 |
| 19 | 10 | 0,71 | 1,51 | 1,8 | 0,47 | 0,839 | 2,535 | 0,692 |
| 19 | 11 | 1,12 | 1,35 | 1,8 | 0,83 | 0,75 | 1,607 | 0,776 |
| 19 | 12 | 0,7 | 0,71 | 1,88 | 0,986 | 0,378 | 2,686 | 0,52 |
| 19 | 13 | 1 | 1,31 | 1,88 | 0,763 | 0,697 | 1,880 | 0,718 |
| 19 | 14 | 0,85 | 1,58 | 1,84 | 0,538 | 0,859 | 2,165 | 0,735 |
| 19 | 15 | 0,7 | 1,5 | 1,77 | 0,467 | 0,847 | 2,529 | 0,695 |
| 19 | 16 | 0,9 | 1,42 | 1,96 | 0,634 | 0,724 | 2,178 | 0,693 |
| 19 | 17 | 0,64 | 1,41 | 1,9 | 0,454 | 0,742 | 2,969 | 0,63 |
| 19 | 18 | 0,81 | 1,57 | 1,74 | 0,516 | 0,902 | 2,148 | 0,749 |
| 19 | 19 | 0,98 | 1,53 | 1,8 | 0,641 | 0,85 | 1,837 | 0,773 |
| 19 | 20 | 1,33 | 1,59 | 1,87 | 0,836 | 0,85 | 1,406 | 0,846 |
| 19 | 21 | 1,29 | 1,35 | 1,87 | 0,956 | 0,722 | 1,450 | 0,793 |
| 19 | 22 | 0,98 | 1,48 | 1,84 | 0,662 | 0,804 | 1,878 | 0,754 |
| 19 | 23 | 0,68 | 1,68 | 1,82 | 0,405 | 0,923 | 2,676 | 0,701 |
| 19 | 24 | 0,75 | 1,56 | 1,68 | 0,481 | 0,929 | 2,240 | 0,746 |
| 19 | 25 | 0,64 | 1,46 | 1,94 | 0,438 | 0,753 | 3,031 | 0,629 |
| 19 | 26 | 0,6 | 1,42 | 1,86 | 0,423 | 0,763 | 3,100 | 0,627 |
| 19 | 27 | 1,14 | 1,24 | 1,84 | 0,919 | 0,674 | 1,614 | 0,747 |
| 19 | 28 | 0,57 | 0,73 | 1,87 | 0,781 | 0,39 | 3,281 | 0,492 |
| 19 | 29 | 0,74 | 1,09 | 1,88 | 0,679 | 0,58 | 2,541 | 0,611 |
| 19 | 30 | 0,66 | 1,18 | 1,96 | 0,559 | 0,602 | 2,970 | 0,587 |
| 25,4 | 1 | 1 | 1,23 | 1,7 | 0,813 | 0,724 | 1,700 | 0,752 |
| 25,4 | 2 | 1,01 | 1,3 | 1,89 | 0,777 | 0,688 | 1,871 | 0,716 |
| 25,4 | 3 | 1,02 | 1,4 | 1,83 | 0,729 | 0,765 | 1,794 | 0,753 |
| 25,4 | 4 | 0,97 | 1,11 | 1,93 | 0,874 | 0,575 | 1,990 | 0,661 |
| 25,4 | 5 | 1,65 | 1,87 | 1,9 | 0,882 | 0,984 | 1,152 | 0,949 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 25,4 | 6 | 1,06 | 1,23 | 1,87 | 0,862 | 0,658 | 1,764 | 0,72 |
| 25,4 | 7 | 1,27 | 1,48 | 1,87 | 0,858 | 0,791 | 1,472 | 0,813 |
| 25,4 | 8 | 1,25 | 1,29 | 1,84 | 0,969 | 0,701 | 1,472 | 0,781 |
| 25,4 | 9 | 1,15 | 1,3 | 1,7 | 0,885 | 0,765 | 1,478 | 0,803 |
| 25,4 | 10 | 1,22 | 1,26 | 1,81 | 0,968 | 0,696 | 1,484 | 0,777 |
| 25,4 | 11 | 1,55 | 1,88 | 1,93 | 0,824 | 0,974 | 1,245 | 0,921 |
| 25,4 | 12 | 1,13 | 1,24 | 1,81 | 0,911 | 0,685 | 1,602 | 0,753 |
| 25,4 | 13 | 1,09 | 1,35 | 1,85 | 0,807 | 0,73 | 1,697 | 0,755 |
| 25,4 | 14 | 1,39 | 1,52 | 1,72 | 0,914 | 0,884 | 1,237 | 0,894 |
| 25,4 | 15 | 1,59 | 1,68 | 1,89 | 0,946 | 0,889 | 1,189 | 0,908 |
| 25,4 | 16 | 1,14 | 1,39 | 1,79 | 0,82 | 0,777 | 1,570 | 0,791 |
| 25,4 | 17 | 1,14 | 1,4 | 1,82 | 0,814 | 0,769 | 1,596 | 0,784 |
| 25,4 | 18 | 1,11 | 1,41 | 1,84 | 0,787 | 0,766 | 1,658 | 0,773 |
| 25,4 | 19 | 1,22 | 1,47 | 1,64 | 0,83 | 0,896 | 1,344 | 0,874 |
| 25,4 | 20 | 1,27 | 1,38 | 1,86 | 0,92 | 0,742 | 1,465 | 0,797 |
| 25,4 | 21 | 1,44 | 1,49 | 1,81 | 0,966 | 0,823 | 1,257 | 0,868 |
| 25,4 | 22 | 1,32 | 1,42 | 1,81 | 0,93 | 0,785 | 1,371 | 0,83 |
| 25,4 | 23 | 1,02 | 1,49 | 1,95 | 0,685 | 0,764 | 1,912 | 0,737 |
| 25,4 | 24 | 1,3 | 1,48 | 1,73 | 0,878 | 0,855 | 1,331 | 0,863 |
| 25,4 | 25 | 1,03 | 1,52 | 1,86 | 0,678 | 0,817 | 1,806 | 0,768 |
| 25,4 | 26 | 1,24 | 1,53 | 1,66 | 0,81 | 0,922 | 1,339 | 0,883 |
| 25,4 | 27 | 0,98 | 1,32 | 1,83 | 0,742 | 0,721 | 1,867 | 0,728 |
| 25,4 | 28 | 0,93 | 1,71 | 1,84 | 0,544 | 0,929 | 1,978 | 0,777 |
| 25,4 | 29 | 0,97 | 1,55 | 1,82 | 0,626 | 0,852 | 1,876 | 0,769 |
| 25,4 | 30 | 0,81 | 1,37 | 1,93 | 0,591 | 0,71 | 2,383 | 0,668 |

NOTA: Achatamento (ds/dI), Alongamento (dI/dL) e Relação entre achatamento e alongamento (dL/ds)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 4: Parâmetros 3D virtuais referentes ao Grupo 3

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 6,35 | 1 | 0,78 | 0,95 | 1,82 | 0,821 | 0,522 | 2,333 | 0,607 |
| 6,35 | 2 | 0,93 | 1,28 | 1,75 | 0,727 | 0,731 | 1,882 | 0,73 |
| 6,35 | 3 | 0,71 | 0,86 | 1,95 | 0,826 | 0,441 | 2,746 | 0,544 |
| 6,35 | 4 | 1 | 1,3 | 1,75 | 0,769 | 0,743 | 1,750 | 0,752 |
| 6,35 | 5 | 0,69 | 1,15 | 1,72 | 0,6 | 0,669 | 2,493 | 0,645 |
| 6,35 | 6 | 0,78 | 1,09 | 1,78 | 0,716 | 0,612 | 2,282 | 0,645 |
| 6,35 | 7 | 0,87 | 1,41 | 1,75 | 0,617 | 0,806 | 2,011 | 0,737 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 6,35 | 8 | 1,21 | 1,65 | 1,93 | 0,733 | 0,855 | 1,595 | 0,812 |
| 6,35 | 9 | 0,87 | 1,34 | 1,73 | 0,649 | 0,775 | 1,989 | 0,73 |
| 6,35 | 10 | 1,11 | 1,11 | 1,74 | 1 | 0,638 | 1,568 | 0,741 |
| 6,35 | 11 | 0,87 | 1,15 | 1,7 | 0,757 | 0,676 | 1,954 | 0,702 |
| 6,35 | 12 | 0,7 | 1,06 | 1,83 | 0,66 | 0,579 | 2,614 | 0,605 |
| 6,35 | 13 | 0,56 | 0,86 | 1,88 | 0,651 | 0,457 | 3,357 | 0,515 |
| 6,35 | 14 | 0,87 | 1,1 | 1,75 | 0,791 | 0,629 | 2,011 | 0,679 |
| 6,35 | 15 | 1,02 | 1,15 | 1,82 | 0,887 | 0,632 | 1,784 | 0,707 |
| 6,35 | 16 | 0,58 | 0,95 | 1,68 | 0,611 | 0,565 | 2,897 | 0,58 |
| 6,35 | 17 | 0,97 | 1,46 | 1,81 | 0,664 | 0,807 | 1,866 | 0,756 |
| 6,35 | 18 | 0,95 | 1,01 | 1,84 | 0,941 | 0,549 | 1,937 | 0,657 |
| 6,35 | 19 | 0,81 | 1,05 | 1,95 | 0,771 | 0,538 | 2,407 | 0,607 |
| 6,35 | 20 | 0,82 | 1,63 | 1,94 | 0,503 | 0,84 | 2,366 | 0,708 |
| 6,35 | 21 | 1,02 | 1,48 | 1,75 | 0,689 | 0,846 | 1,716 | 0,79 |
| 6,35 | 22 | 0,72 | 1,18 | 1,91 | 0,61 | 0,618 | 2,653 | 0,615 |
| 6,35 | 23 | 1,06 | 1,47 | 1,89 | 0,721 | 0,778 | 1,783 | 0,758 |
| 6,35 | 24 | 0,83 | 1 | 1,76 | 0,83 | 0,568 | 2,120 | 0,645 |
| 6,35 | 25 | 1,04 | 1,62 | 1,74 | 0,642 | 0,931 | 1,673 | 0,823 |
| 6,35 | 26 | 0,91 | 1,19 | 1,76 | 0,765 | 0,676 | 1,934 | 0,704 |
| 6,35 | 27 | 1,04 | 1,08 | 1,78 | 0,963 | 0,607 | 1,712 | 0,708 |
| 6,35 | 28 | 1,22 | 1,68 | 1,72 | 0,726 | 0,977 | 1,410 | 0,885 |
| 6,35 | 29 | 0,84 | 1,03 | 1,77 | 0,816 | 0,582 | 2,107 | 0,651 |
| 6,35 | 30 | 0,77 | 1 | 1,85 | 0,77 | 0,541 | 2,403 | 0,608 |
| 9,5 | 1 | 1 | 1,23 | 1,86 | 0,813 | 0,661 | 1,860 | 0,708 |
| 9,5 | 2 | 0,7 | 1,1 | 1,76 | 0,636 | 0,625 | 2,514 | 0,629 |
| 9,5 | 3 | 1,11 | 1,21 | 1,95 | 0,917 | 0,621 | 1,757 | 0,707 |
| 9,5 | 4 | 0,9 | 1,2 | 1,77 | 0,75 | 0,678 | 1,967 | 0,701 |
| 9,5 | 5 | 0,99 | 1,31 | 1,83 | 0,756 | 0,716 | 1,848 | 0,729 |
| 9,5 | 6 | 1,17 | 1,44 | 1,94 | 0,812 | 0,742 | 1,658 | 0,765 |
| 9,5 | 7 | 0,98 | 1,17 | 1,87 | 0,838 | 0,626 | 1,908 | 0,69 |
| 9,5 | 8 | 0,92 | 1,33 | 1,78 | 0,692 | 0,747 | 1,935 | 0,728 |
| 9,5 | 9 | 0,72 | 1,1 | 1,95 | 0,655 | 0,564 | 2,708 | 0,593 |
| 9,5 | 10 | 0,8 | 1,28 | 1,86 | 0,625 | 0,688 | 2,325 | 0,666 |
| 9,5 | 11 | 0,95 | 1,13 | 1,84 | 0,841 | 0,614 | 1,937 | 0,682 |
| 9,5 | 12 | 1,21 | 1,77 | 1,91 | 0,684 | 0,927 | 1,579 | 0,837 |
| 9,5 | 13 | 0,79 | 0,82 | 1,82 | 0,963 | 0,451 | 2,304 | 0,58 |
| 9,5 | 14 | 1,25 | 1,33 | 1,71 | 0,94 | 0,778 | 1,368 | 0,828 |
| 9,5 | 15 | 1,32 | 1,49 | 1,68 | 0,886 | 0,887 | 1,273 | 0,887 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 9,5 | 16 | 1,34 | 1,4 | 1,79 | 0,957 | 0,782 | 1,336 | 0,837 |
| 9,5 | 17 | 0,83 | 1,32 | 1,94 | 0,629 | 0,68 | 2,337 | 0,663 |
| 9,5 | 18 | 0,93 | 1,15 | 1,75 | 0,809 | 0,657 | 1,882 | 0,704 |
| 9,5 | 19 | 0,98 | 1,2 | 1,86 | 0,817 | 0,645 | 1,898 | 0,698 |
| 9,5 | 20 | 0,94 | 1,14 | 1,87 | 0,825 | 0,61 | 1,989 | 0,674 |
| 9,5 | 21 | 0,86 | 0,91 | 1,87 | 0,945 | 0,487 | 2,174 | 0,607 |
| 9,5 | 22 | 0,67 | 0,95 | 1,95 | 0,705 | 0,487 | 2,910 | 0,551 |
| 9,5 | 23 | 0,71 | 1,23 | 1,81 | 0,577 | 0,68 | 2,549 | 0,644 |
| 9,5 | 24 | 0,8 | 0,8 | 1,81 | 1 | 0,442 | 2,262 | 0,58 |
| 9,5 | 25 | 0,67 | 1,1 | 1,84 | 0,609 | 0,598 | 2,746 | 0,602 |
| 9,5 | 26 | 1,18 | 1,42 | 1,82 | 0,831 | 0,78 | 1,542 | 0,797 |
| 9,5 | 27 | 1,07 | 1,53 | 1,71 | 0,699 | 0,895 | 1,598 | 0,824 |
| 9,5 | 28 | 1,09 | 1,23 | 1,77 | 0,886 | 0,695 | 1,624 | 0,754 |
| 9,5 | 29 | 0,85 | 0,98 | 1,75 | 0,867 | 0,56 | 2,059 | 0,648 |
| 9,5 | 30 | 0,56 | 0,85 | 1,84 | 0,659 | 0,462 | 3,286 | 0,52 |
| 12,5 | 1 | 1,39 | 1,42 | 1,65 | 0,979 | 0,861 | 1,187 | 0,898 |
| 12,5 | 2 | 1 | 1,3 | 1,78 | 0,769 | 0,73 | 1,780 | 0,743 |
| 12,5 | 3 | 0,32 | 0,52 | 1,84 | 0,615 | 0,283 | 5,750 | 0,366 |
| 12,5 | 4 | 0,93 | 1,4 | 1,64 | 0,664 | 0,854 | 1,763 | 0,785 |
| 12,5 | 5 | 0,57 | 1,42 | 1,89 | 0,401 | 0,751 | 3,316 | 0,61 |
| 12,5 | 6 | 1,06 | 1,38 | 1,84 | 0,768 | 0,75 | 1,736 | 0,756 |
| 12,5 | 7 | 1,15 | 1,56 | 1,84 | 0,737 | 0,848 | 1,600 | 0,809 |
| 12,5 | 8 | 0,92 | 1,59 | 1,77 | 0,579 | 0,898 | 1,924 | 0,776 |
| 12,5 | 9 | 0,81 | 1,51 | 1,92 | 0,536 | 0,786 | 2,370 | 0,692 |
| 12,5 | 10 | 1,02 | 1,24 | 1,82 | 0,823 | 0,681 | 1,784 | 0,725 |
| 12,5 | 11 | 0,9 | 1,78 | 1,88 | 0,506 | 0,947 | 2,089 | 0,768 |
| 12,5 | 12 | 1,15 | 1,53 | 1,76 | 0,752 | 0,869 | 1,530 | 0,828 |
| 12,5 | 13 | 0,87 | 1,12 | 1,67 | 0,777 | 0,671 | 1,920 | 0,704 |
| 12,5 | 14 | 0,91 | 1,35 | 1,97 | 0,674 | 0,685 | 2,165 | 0,682 |
| 12,5 | 15 | 0,89 | 1,15 | 1,88 | 0,774 | 0,612 | 2,112 | 0,662 |
| 12,5 | 16 | 1,07 | 1,12 | 1,74 | 0,955 | 0,644 | 1,626 | 0,734 |
| 12,5 | 17 | 0,72 | 0,97 | 1,98 | 0,742 | 0,49 | 2,750 | 0,563 |
| 12,5 | 18 | 0,88 | 1,53 | 1,61 | 0,575 | 0,95 | 1,830 | 0,804 |
| 12,5 | 19 | 1,03 | 1,05 | 1,9 | 0,981 | 0,553 | 1,845 | 0,669 |
| 12,5 | 20 | 0,99 | 1,15 | 1,75 | 0,861 | 0,657 | 1,768 | 0,719 |
| 12,5 | 21 | 0,82 | 1,49 | 1,79 | 0,55 | 0,832 | 2,183 | 0,725 |
| 12,5 | 22 | 0,65 | 0,93 | 1,88 | 0,699 | 0,495 | 2,892 | 0,555 |
| 12,5 | 23 | 0,81 | 1,13 | 1,83 | 0,717 | 0,617 | 2,259 | 0,649 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 12,5 | 24 | 1,15 | 1,55 | 1,7 | 0,742 | 0,912 | 1,478 | 0,851 |
| 12,5 | 25 | 0,67 | 1,61 | 1,87 | 0,416 | 0,861 | 2,791 | 0,676 |
| 12,5 | 26 | 1,23 | 1,36 | 1,9 | 0,904 | 0,716 | 1,545 | 0,774 |
| 12,5 | 27 | 1,13 | 1,48 | 1,77 | 0,764 | 0,836 | 1,566 | 0,811 |
| 12,5 | 28 | 0,58 | 0,87 | 1,88 | 0,667 | 0,463 | 3,241 | 0,523 |
| 12,5 | 29 | 0,76 | 1,52 | 1,83 | 0,5 | 0,831 | 2,408 | 0,701 |
| 12,5 | 30 | 0,67 | 1,33 | 1,82 | 0,504 | 0,731 | 2,716 | 0,646 |
| 19 | 1 | 1,45 | 1,46 | 1,69 | 0,993 | 0,864 | 1,166 | 0,905 |
| 19 | 2 | 1,06 | 1,26 | 1,9 | 0,841 | 0,663 | 1,792 | 0,718 |
| 19 | 3 | 1,31 | 1,35 | 1,79 | 0,97 | 0,754 | 1,366 | 0,82 |
| 19 | 4 | 1,15 | 1,41 | 1,83 | 0,816 | 0,77 | 1,591 | 0,785 |
| 19 | 5 | 0,65 | 1 | 1,81 | 0,65 | 0,552 | 2,785 | 0,583 |
| 19 | 6 | 0,82 | 0,87 | 1,74 | 0,943 | 0,5 | 2,122 | 0,618 |
| 19 | 7 | 0,88 | 1,1 | 1,87 | 0,8 | 0,588 | 2,125 | 0,652 |
| 19 | 8 | 0,83 | 1,39 | 1,84 | 0,597 | 0,755 | 2,217 | 0,698 |
| 19 | 9 | 0,94 | 1,2 | 1,91 | 0,783 | 0,628 | 2,032 | 0,676 |
| 19 | 10 | 0,71 | 1,39 | 1,81 | 0,511 | 0,768 | 2,549 | 0,67 |
| 19 | 11 | 1,15 | 1,29 | 1,8 | 0,891 | 0,717 | 1,565 | 0,771 |
| 19 | 12 | 0,7 | 0,71 | 1,88 | 0,986 | 0,378 | 2,686 | 0,52 |
| 19 | 13 | 0,99 | 1,25 | 1,89 | 0,792 | 0,661 | 1,909 | 0,702 |
| 19 | 14 | 0,91 | 1,56 | 1,85 | 0,583 | 0,843 | 2,033 | 0,746 |
| 19 | 15 | 0,71 | 1,45 | 1,78 | 0,49 | 0,815 | 2,507 | 0,687 |
| 19 | 16 | 0,9 | 1,41 | 1,96 | 0,638 | 0,719 | 2,178 | 0,691 |
| 19 | 17 | 0,64 | 1,42 | 1,9 | 0,451 | 0,747 | 2,969 | 0,631 |
| 19 | 18 | 0,8 | 1,47 | 1,74 | 0,544 | 0,845 | 2,175 | 0,73 |
| 19 | 19 | 0,86 | 1,55 | 1,79 | 0,555 | 0,866 | 2,081 | 0,747 |
| 19 | 20 | 1,37 | 1,67 | 1,87 | 0,82 | 0,893 | 1,365 | 0,868 |
| 19 | 21 | 1,33 | 1,41 | 1,87 | 0,943 | 0,754 | 1,406 | 0,812 |
| 19 | 22 | 0,97 | 1,48 | 1,87 | 0,655 | 0,791 | 1,928 | 0,743 |
| 19 | 23 | 0,74 | 1,61 | 1,82 | 0,46 | 0,885 | 2,459 | 0,711 |
| 19 | 24 | 0,7 | 1,42 | 1,68 | 0,493 | 0,845 | 2,400 | 0,706 |
| 19 | 25 | 0,67 | 1,41 | 1,93 | 0,475 | 0,731 | 2,881 | 0,633 |
| 19 | 26 | 0,63 | 1,43 | 1,86 | 0,441 | 0,769 | 2,952 | 0,639 |
| 19 | 27 | 1,17 | 1,23 | 1,85 | 0,951 | 0,665 | 1,581 | 0,749 |
| 19 | 28 | 0,59 | 0,74 | 1,86 | 0,797 | 0,398 | 3,153 | 0,502 |
| 19 | 29 | 0,75 | 1,08 | 1,88 | 0,694 | 0,574 | 2,507 | 0,612 |
| 19 | 30 | 0,7 | 1,17 | 1,96 | 0,598 | 0,597 | 2,800 | 0,597 |
| 25,4 | 1 | 0,89 | 1,21 | 1,69 | 0,736 | 0,716 | 1,899 | 0,722 |

| Peneira | Nº | ds | dI | dL | ds/dI | dI/dL | dL/ds | Esfericidade |
|---------|----|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|
| 25,4 | 2 | 1 | 1,25 | 1,9 | 0,8 | 0,658 | 1,900 | 0,702 |
| 25,4 | 3 | 1,03 | 1,36 | 1,86 | 0,757 | 0,731 | 1,806 | 0,74 |
| 25,4 | 4 | 0,98 | 1,07 | 1,92 | 0,916 | 0,557 | 1,959 | 0,658 |
| 25,4 | 5 | 1,59 | 1,78 | 1,89 | 0,893 | 0,942 | 1,189 | 0,925 |
| 25,4 | 6 | 1,08 | 1,21 | 1,87 | 0,893 | 0,647 | 1,731 | 0,72 |
| 25,4 | 7 | 1,3 | 1,43 | 1,87 | 0,909 | 0,765 | 1,438 | 0,81 |
| 25,4 | 8 | 1,24 | 1,26 | 1,84 | 0,984 | 0,685 | 1,484 | 0,773 |
| 25,4 | 9 | 1,14 | 1,26 | 1,7 | 0,905 | 0,741 | 1,491 | 0,792 |
| 25,4 | 10 | 1,14 | 1,23 | 1,81 | 0,927 | 0,68 | 1,588 | 0,754 |
| 25,4 | 11 | 1,38 | 1,69 | 1,72 | 0,817 | 0,983 | 1,246 | 0,924 |
| 25,4 | 12 | 1,18 | 1,24 | 1,8 | 0,952 | 0,689 | 1,525 | 0,767 |
| 25,4 | 13 | 1,03 | 1,37 | 1,85 | 0,752 | 0,741 | 1,796 | 0,744 |
| 25,4 | 14 | 1,36 | 1,48 | 1,72 | 0,919 | 0,86 | 1,265 | 0,88 |
| 25,4 | 15 | 1,5 | 1,77 | 1,8 | 0,847 | 0,983 | 1,200 | 0,936 |
| 25,4 | 16 | 1,2 | 1,25 | 1,78 | 0,96 | 0,702 | 1,483 | 0,779 |
| 25,4 | 17 | 1,15 | 1,28 | 1,81 | 0,898 | 0,707 | 1,574 | 0,766 |
| 25,4 | 18 | 1,04 | 1,45 | 1,84 | 0,717 | 0,788 | 1,769 | 0,764 |
| 25,4 | 19 | 1,42 | 1,49 | 1,77 | 0,953 | 0,842 | 1,246 | 0,877 |
| 25,4 | 20 | 1,27 | 1,32 | 1,86 | 0,962 | 0,71 | 1,465 | 0,785 |
| 25,4 | 21 | 1,38 | 1,52 | 1,73 | 0,908 | 0,879 | 1,254 | 0,888 |
| 25,4 | 22 | 1,3 | 1,33 | 1,77 | 0,977 | 0,751 | 1,362 | 0,82 |
| 25,4 | 23 | 1,03 | 1,5 | 1,95 | 0,687 | 0,769 | 1,893 | 0,741 |
| 25,4 | 24 | 1,22 | 1,46 | 1,64 | 0,836 | 0,89 | 1,344 | 0,872 |
| 25,4 | 25 | 0,98 | 1,53 | 1,92 | 0,641 | 0,797 | 1,959 | 0,741 |
| 25,4 | 26 | 1,11 | 1,57 | 1,76 | 0,707 | 0,892 | 1,586 | 0,826 |
| 25,4 | 27 | 0,96 | 1,28 | 1,83 | 0,75 | 0,699 | 1,906 | 0,716 |
| 25,4 | 28 | 0,98 | 1,61 | 1,84 | 0,609 | 0,875 | 1,878 | 0,775 |
| 25,4 | 29 | 1,18 | 1,54 | 1,83 | 0,766 | 0,842 | 1,551 | 0,816 |
| 25,4 | 30 | 0,81 | 1,35 | 1,93 | 0,6 | 0,699 | 2,383 | 0,665 |

NOTA: Achatamento (ds/dI), Alongamento (dI/dL) e Relação entre achatamento e alongamento (dL/ds)

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE K – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO ESFERICIDADE

Tabela K.1: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 1

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,992 ^a | ,983 | ,983 | ,01263 | ,983 | 8699,302 | 1 | 148 | ,000 | 2,025 |

a. Preditores: (Constante), Esfericidade_2D_real

b. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.2: Análise de variância ANOVA – Grupo 1

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 1,388 | 1 | 1,388 | 8699,302 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,024 | 148 | ,000 | | |
| | Total | 1,412 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Esfericidade_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.3: Coeficientes do modelo – Grupo 1

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,030 | ,007 | | 3,993 | ,000 |
| | Esfericidade_2D_real | ,975 | ,010 | ,992 | 93,270 | ,000 |

a. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.4: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 1

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|-------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,048 | 150 | ,200* | ,988 | 150 | ,213 |
| Standardized Residual | ,048 | 150 | ,200* | ,988 | 150 | ,213 |

*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.5: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 2

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,987 ^a | ,974 | ,974 | ,01606 | ,974 | 5487,998 | 1 | 148 | ,000 | 2,080 |

a. Preditores: (Constante), Esfericidade_2D_real

b. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.6: Análise de variância ANOVA – Grupo 2

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 1,415 | 1 | 1,415 | 5487,998 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,038 | 148 | ,000 | | |
| | Total | 1,453 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Esfericidade_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.7: Coeficientes do modelo – Grupo 2

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,028 | ,009 | | 2,958 | ,004 |
| | Esfericidade_2D_real | ,984 | ,013 | ,987 | 74,081 | ,000 |

a. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.8: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 2

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,069 | 150 | ,081 | ,991 | 150 | ,443 |
| Standardized Residual | ,069 | 150 | ,081 | ,991 | 150 | ,443 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.9: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 3

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,987 ^a | ,974 | ,973 | ,01592 | ,974 | 5453,782 | 1 | 148 | ,000 | 2,087 |

a. Preditores: (Constante), Esfericidade_2D_real

b. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.10: Análise de variância ANOVA – Grupo 3

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 1,382 | 1 | 1,382 | 5453,782 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,038 | 148 | ,000 | | |
| | Total | 1,420 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Esfericidade_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.11: Coeficientes do modelo – Grupo 3

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,031 | ,009 | | 3,294 | ,001 |
| | Esfericidade_2D_real | ,973 | ,013 | ,987 | 73,850 | ,000 |

a. Variável Dependente: Esfericidade_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela K.12: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 3

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,067 | 150 | ,098 | ,980 | 150 | ,026 |
| Standardized Residual | ,067 | 150 | ,098 | ,980 | 150 | ,026 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE L – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO ACHATAMENTO

Tabela L.1: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 1

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,955 ^a | ,912 | ,911 | ,04389 | ,912 | 1530,405 | 1 | 148 | ,000 | 1,933 |

a. Preditores: (Constante), Achatamento_2D_real

b. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.2: Análise de variância ANOVA – Grupo 1

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 2,947 | 1 | 2,947 | 1530,405 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,285 | 148 | ,002 | | |
| | Total | 3,233 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Achatamento_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.3: Coeficientes do modelo – Grupo 1

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,048 | ,018 | | 2,656 | ,009 |
| | Achatamento_2D_real | ,947 | ,024 | ,955 | 39,120 | ,000 |

a. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.4: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 1

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,070 | 150 | ,066 | ,969 | 150 | ,002 |
| Standardized Residual | ,070 | 150 | ,066 | ,969 | 150 | ,002 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.5: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 2

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,948 ^a | ,898 | ,897 | ,04706 | ,898 | 1300,151 | 1 | 148 | ,000 | 1,924 |

a. Preditores: (Constante), Achatamento_2D_real

b. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.6: Análise de variância ANOVA – Grupo 2

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 2,880 | 1 | 2,880 | 1300,151 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,328 | 148 | ,002 | | |
| | Total | 3,207 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Achatamento_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.7: Coeficientes do modelo – Grupo 2

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,058 | ,019 | | 3,013 | ,003 |
| | Achatamento_2D_real | ,936 | ,026 | ,948 | 36,058 | ,000 |

a. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.8: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 2

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|-------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,064 | 150 | ,200* | ,992 | 150 | ,555 |
| Standardized Residual | ,064 | 150 | ,200* | ,992 | 150 | ,555 |

*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.9: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 3

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,951 _a | ,904 | ,903 | ,04613 | ,904 | 1392,399 | 1 | 148 | ,000 | 2,160 |

a. Preditores: (Constante), Achatamento_2D_real

b. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.10: Análise de variância ANOVA – Grupo 3

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 2,963 | 1 | 2,963 | 1392,399 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,315 | 148 | ,002 | | |
| | Total | 3,277 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Achatamento_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.11: Coeficientes do modelo – Grupo 3

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,065 | ,019 | | 3,432 | ,001 |
| | Achatamento_2D_real | ,949 | ,025 | ,951 | 37,315 | ,000 |

a. Variável Dependente: Achatamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela L.12: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 3

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|-------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,043 | 150 | ,200* | ,992 | 150 | ,569 |
| Standardized Residual | ,043 | 150 | ,200* | ,992 | 150 | ,569 |

*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE M – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO ALONGAMENTO

Tabela M.1: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 1

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,979 ^a | ,958 | ,958 | ,02716 | ,958 | 3392,785 | 1 | 148 | ,000 | 1,782 |

a. Preditores: (Constante), Alongamento_2D_real

b. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 2: Análise de variância ANOVA – Grupo 1

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 2,503 | 1 | 2,503 | 3392,785 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,109 | 148 | ,001 | | |
| | Total | 2,613 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Alongamento_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 3: Coeficientes do modelo – Grupo 1

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,046 | ,012 | | 3,888 | ,000 |
| | Alongamento_2D_real | ,953 | ,016 | ,979 | 58,248 | ,000 |

a. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 4: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 1

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,073 | 150 | ,051 | ,981 | 150 | ,041 |
| Standardized Residual | ,073 | 150 | ,051 | ,981 | 150 | ,041 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 5: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 2

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,975 ^a | ,950 | ,950 | ,03072 | ,950 | 2840,806 | 1 | 148 | ,000 | 1,977 |

a. Preditores: (Constante), Alongamento_2D_real

b. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 6: Análise de variância ANOVA – Grupo 2

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 2,680 | 1 | 2,680 | 2840,806 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,140 | 148 | ,001 | | |
| | Total | 2,820 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Alongamento_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 7: Coeficientes do modelo – Grupo 2

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,030 | ,013 | | 2,232 | ,027 |
| | Alongamento_2D_real | ,986 | ,018 | ,975 | 53,299 | ,000 |

a. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 8: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 2

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,082 | 150 | ,015 | ,981 | 150 | ,035 |
| Standardized Residual | ,082 | 150 | ,015 | ,981 | 150 | ,035 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 9: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 3

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,984 ^a | ,968 | ,968 | ,02468 | ,968 | 4543,436 | 1 | 148 | ,000 | 1,994 |

a. Preditores: (Constante), Alongamento_2D_real

b. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 10: Análise de variância ANOVA – Grupo 3

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 2,767 | 1 | 2,767 | 4543,436 | ,000 ^b |
| | Resíduo | ,090 | 148 | ,001 | | |
| | Total | 2,857 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Alongamento_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 11: Coeficientes do modelo – Grupo 3

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,004 | ,011 | | ,364 | ,717 |
| | Alongamento_2D_real | 1,002 | ,015 | ,984 | 67,405 | ,000 |

a. Variável Dependente: Alongamento_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 12: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 3

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,139 | 150 | ,000 | ,952 | 150 | ,000 |
| Standardized Residual | ,139 | 150 | ,000 | ,952 | 150 | ,000 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

APÊNDICE N – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO RELAÇÃO ACHATAMENTO E ALONGAMENTO

Tabela 1: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 1

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,990 ^a | ,979 | ,979 | ,08966 | ,979 | 7027,955 | 1 | 148 | ,000 | 2,139 |

a. Preditores: (Constante), Relação_achat_e_along_2D_real

b. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 2: Análise de variância ANOVA – Grupo 1

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 56,493 | 1 | 56,493 | 7027,955 | ,000 ^b |
| | Resíduo | 1,190 | 148 | ,008 | | |
| | Total | 57,683 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Relação_achat_e_along_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 3: Coeficientes do modelo – Grupo 1

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,111 | ,024 | | 4,552 | ,000 |
| | Relação_achat_e_along_2D_real | ,913 | ,011 | ,990 | 83,833 | ,000 |

a. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 4: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 1

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|-------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,058 | 150 | ,200* | ,970 | 150 | ,003 |
| Standardized Residual | ,058 | 150 | ,200* | ,970 | 150 | ,003 |

*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 5: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 2

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,987 ^a | ,975 | ,974 | ,10023 | ,975 | 5662,193 | 1 | 148 | ,000 | 2,097 |

a. Preditores: (Constante), Relação_achat_e_along_2D_real

b. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 6: Análise de variância ANOVA – Grupo 2

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 56,887 | 1 | 56,887 | 5662,193 | ,000 ^b |
| | Resíduo | 1,487 | 148 | ,010 | | |
| | Total | 58,374 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Relação_achat_e_along_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 7: Coeficientes do modelo – Grupo 2

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,082 | ,027 | | 3,002 | ,003 |
| | Relação_achat_e_along_2D_real | ,916 | ,012 | ,987 | 75,248 | ,000 |

a. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 8: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 2

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|-------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,056 | 150 | ,200* | ,987 | 150 | ,180 |
| Standardized Residual | ,056 | 150 | ,200* | ,987 | 150 | ,180 |

*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 9: Resumo do modelo em Regressão Linear Simples – Grupo 3

| Resumo do modelo ^b | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
| Modelo | R | R ² | R ² ajustado | Erro padrão da estimativa | Estatísticas de mudança | | | | | Durbin-Watson |
| | | | | | Mudança de R ² | Mudança F | df1 | df2 | Sig. Mudança F | |
| 1 | ,984 _a | ,967 | ,967 | ,10702 | ,967 | 4381,836 | 1 | 148 | ,000 | 2,045 |

a. Preditores: (Constante), Relação_achat_e_along_2D_real

b. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 10: Análise de variância ANOVA – Grupo 3

| ANOVA ^a | | | | | | |
|--------------------|-----------|--------------------|-----|----------------|----------|-------------------|
| Modelo | | Soma dos Quadrados | df | Quadrado Médio | Z | Sig. |
| 1 | Regressão | 50,191 | 1 | 50,191 | 4381,836 | ,000 ^b |
| | Resíduo | 1,695 | 148 | ,011 | | |
| | Total | 51,886 | 149 | | | |

a. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

b. Preditores: (Constante), Relação_achat_e_along_2D_real

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 11: Coeficientes do modelo – Grupo 3

| Coeficientes ^a | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|--------|------|
| Modelo | | Coeficientes não padronizados | | Coeficientes padronizados | t | Sig. |
| | | B | Erro Erro | Beta | | |
| 1 | (Constante) | ,192 | ,029 | | 6,624 | ,000 |
| | Relação_achat_e_along_2D_real | ,861 | ,013 | ,984 | 66,195 | ,000 |

a. Variável Dependente: Relação_achat_e_along_3D_virtual

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Tabela 12: Resultados dos testes de normalidade – Grupo 3

| Testes de Normalidade | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----|-------|--------------|-----|------|
| | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
| | Estatística | df | Sig. | Estatística | df | Sig. |
| Unstandardized Residual | ,051 | 150 | ,200* | ,993 | 150 | ,736 |
| Standardized Residual | ,051 | 150 | ,200* | ,993 | 150 | ,736 |

*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

| Peneira (mm) | | Nº da partícula (Nª de repetições) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|------|------------------------------------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|--|
| Repetição 15 | 6,35 | 1 (36) | 3 (11) | 5 (36) | 6 (31) | 7 (41) | 11 (30) | 12 (33) | 13 (12) | 14 (31) | 16 (45) | 18 (8) | 19 (9) | 22 (36) | 24 (30) | 26 (45) | 29 (46) | 30 (32) | |
| | 9,5 | 2 (86) | 3 (31) | 7 (29) | 9 (117) | 10 (33) | 11 (44) | 13 (89) | 17 (55) | 18 (36) | 20 (32) | 21 (21) | 22 (34) | 23 (123) | 24 (128) | 25 (39) | 29 (38) | 30 (92) | |
| | 12,5 | 5 (168) | 9 (111) | 14 (169) | 15 (53) | 17 (109) | 19 (104) | 22 (147) | 23 (170) | 25 (186) | 28 (620) | 30 (176) | | | | | | | |
| | 19,0 | 5 (113) | 6 (75) | 7 (99) | 9 (57) | 10 (84) | 12 (162) | 15 (103) | 16 (43) | 17 (184) | 25 (70) | 26 (79) | 29 (65) | 30 (117) | | | | | |
| | 25,4 | 4 (118) | 30 (144) | | | | | | | | | | | | | | | | |

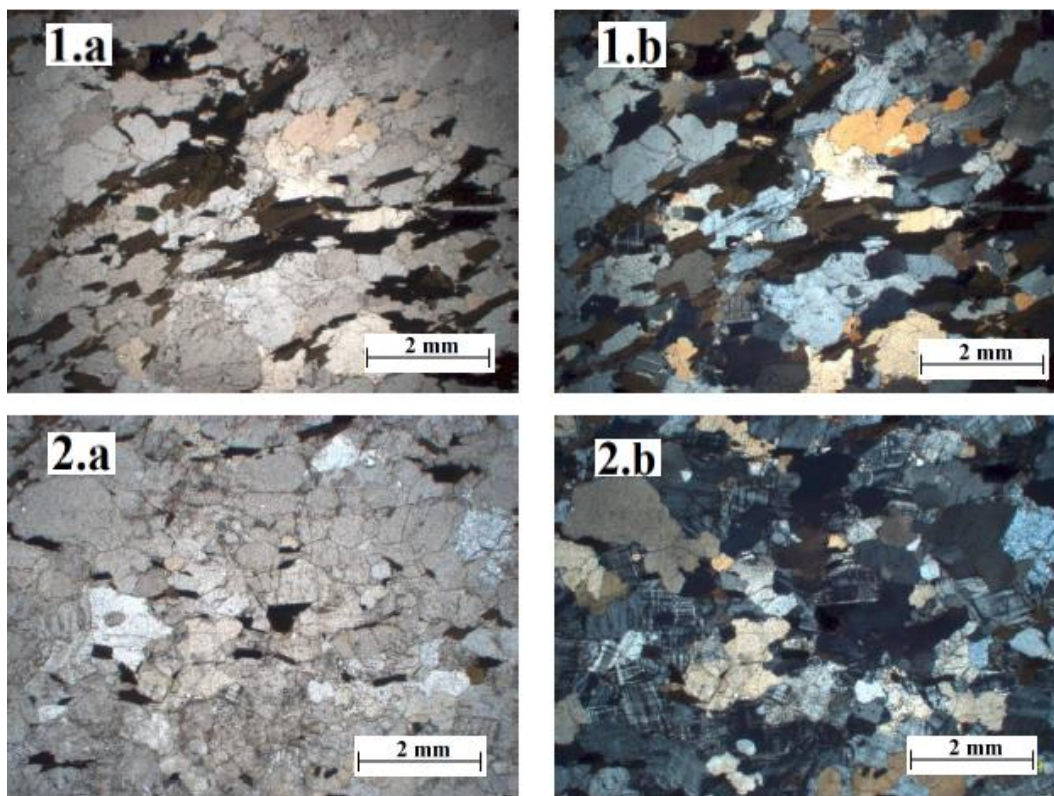
Fonte: Elaborado pela autora (2021).

| Peneira (mm) | | Nº da partícula (Nº de repetições) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------|------------------------------------|---------|---------|--------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|--|
| Repetição 13 | 6,35 | 2 (52) | 4 (52) | 8 (34) | 9 (17) | 10 (19) | 15 (17) | 17 (12) | 20 (24) | 21 (28) | 23 (29) | 25 (31) | 27 (27) | | | | | | |
| | 9,5 | 1 (74) | 4 (84) | 5 (94) | 6 (75) | 8 (36) | 12 (41) | 14 (24) | 15 (48) | 16 (28) | 19 (60) | 26 (50) | 27 (24) | 28 (86) | | | | | |
| | 12,5 | 2 (148) | 4 (182) | 6 (107) | 7 (76) | 8 (77) | 10 (112) | 11 (63) | 12 (59) | 13 (109) | 16 (85) | 18 (75) | 20 (129) | 21 (53) | 24 (51) | 26 (29) | 27 (27) | 29 (55) | |
| | 19,0 | 1 (40) | 2 (24) | 3 (30) | 4 (38) | 8 (66) | 11 (50) | 13 (66) | 14 (42) | 18 (77) | 19 (56) | 20 (29) | 21 (35) | 22 (68) | 23 (95) | 24 (81) | 29 (104) | | |
| | 25,4 | 1 (8) | 2 (9) | 3 (11) | 6 (7) | 7 (4) | 8 (11) | 9 (4) | 10 (9) | 12 (9) | 13 (6) | 14 (11) | 15 (3) | 16 (5) | 17 (2) | 18 (4) | 19 (3) | 20 (9) | |
| | 21 (6) | 22 (5) | 23 (3) | 24 (4) | 25 (7) | 26 (26) | 27 (4) | 28 (6) | 29 (3) | | | | | | | | | | |
| Repetição 14 | 6,35 | 2 (50) | 4 (40) | 8 (21) | 9 (23) | 10 (15) | 15 (16) | 17 (15) | 20 (17) | 21 (41) | 23 (46) | 25 (31) | 27 (39) | | | | | | |
| | 9,5 | 1 (81) | 4 (85) | 5 (86) | 6 (70) | 8 (28) | 12 (43) | 14 (25) | 15 (46) | 16 (40) | 19 (66) | 26 (61) | 27 (32) | 28 (85) | | | | | |
| | 12,5 | 2 (132) | 4 (195) | 6 (112) | 7 (68) | 8 (99) | 10 (112) | 11 (69) | 12 (36) | 13 (117) | 16 (86) | 18 (73) | 20 (158) | 21 (64) | 24 (55) | 26 (25) | 27 (21) | 29 (44) | |
| | 19,0 | 1 (46) | 2 (20) | 3 (25) | 4 (38) | 8 (54) | 11 (39) | 13 (51) | 14 (59) | 18 (78) | 19 (44) | 20 (36) | 21 (26) | 22 (73) | 23 (81) | 24 (84) | 29 (110) | | |
| | 25,4 | 1 (18) | 2 (5) | 3 (7) | 6 (7) | 7 (8) | 8 (7) | 9 (4) | 10 (11) | 12 (8) | 13 (3) | 14 (11) | 15 (2) | 16 (4) | 17 (6) | 18 (4) | 19 (7) | 20 (13) | |
| | 21 (6) | 22 (5) | 23 (3) | 24 (5) | 25 (9) | 26 (28) | 27 (4) | 28 (6) | 29 (5) | | | | | | | | | | |
| Repetição 15 | 6,35 | 2 (39) | 4 (49) | 8 (25) | 9 (22) | 10 (18) | 15 (11) | 17 (21) | 20 (35) | 21 (31) | 23 (40) | 25 (19) | 27 (30) | | | | | | |
| | 9,5 | 1 (62) | 4 (71) | 5 (101) | 6 (69) | 8 (46) | 12 (42) | 14 (26) | 15 (50) | 16 (38) | 19 (52) | 26 (47) | 27 (23) | 28 (70) | | | | | |
| | 12,5 | 2 (135) | 4 (214) | 6 (100) | 7 (80) | 8 (98) | 10 (107) | 11 (50) | 12 (58) | 13 (108) | 16 (83) | 18 (69) | 20 (128) | 21 (54) | 24 (56) | 26 (27) | 27 (18) | 29 (60) | |
| | 19,0 | 1 (54) | 2 (22) | 3 (21) | 4 (51) | 8 (72) | 11 (40) | 13 (61) | 14 (45) | 18 (71) | 19 (62) | 20 (46) | 21 (28) | 22 (67) | 23 (80) | 24 (89) | 29 (96) | | |
| | 25,4 | 1 (10) | 2 (8) | 3 (6) | 6 (1) | 7 (4) | 8 (4) | 9 (7) | 10 (5) | 12 (6) | 13 (10) | 14 (12) | 15 (2) | 16 (3) | 17 (9) | 18 (9) | 19 (5) | 20 (12) | |
| | 21 (4) | 22 (4) | 23 (1) | 24 (6) | 25 (6) | 26 (19) | 27 (6) | 28 (2) | 29 (8) | | | | | | | | | | |

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

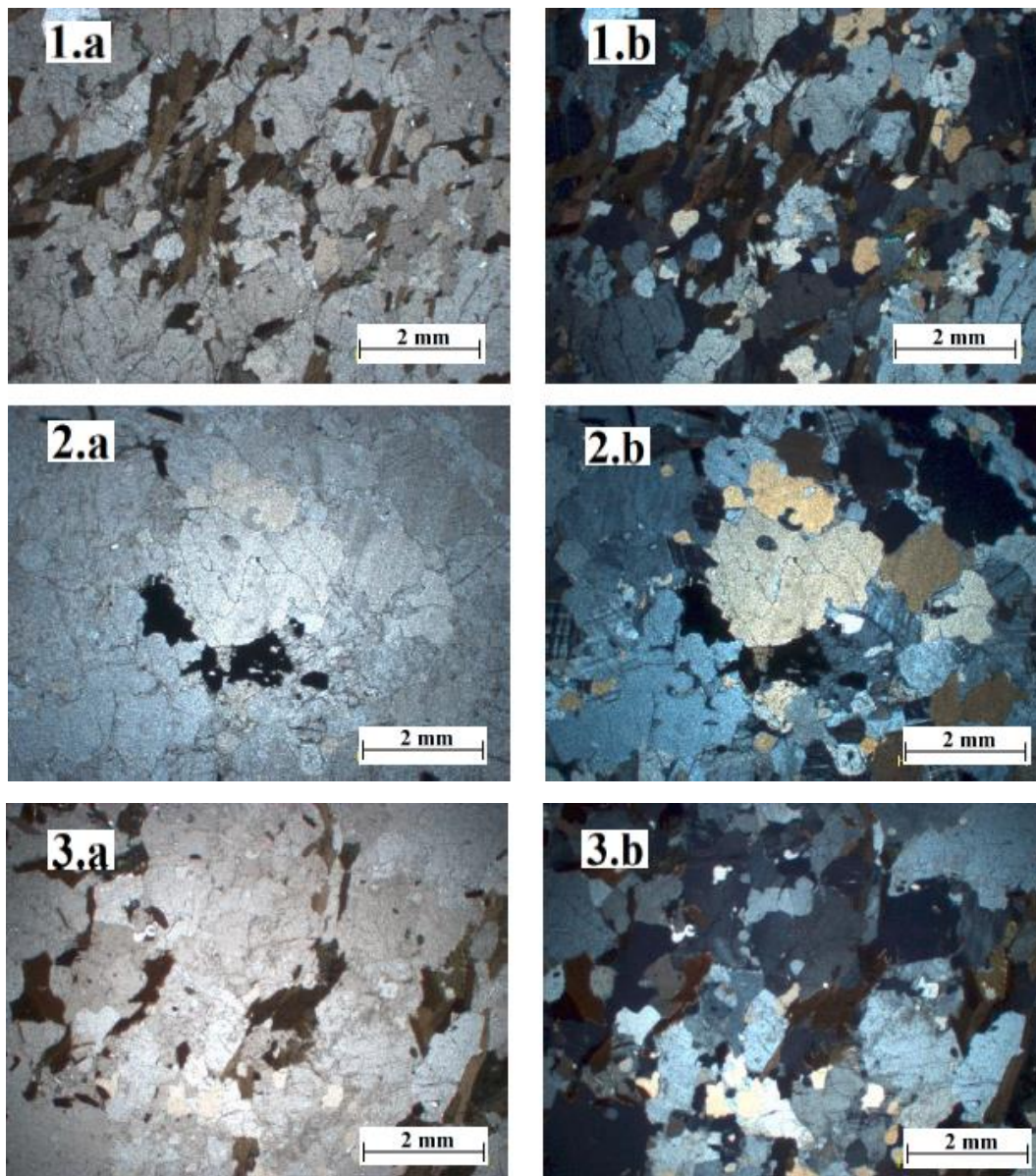
ANEXO A – FOTOMICROGRAFIAS DAS ROCHAS APLICADAS NO ESTUDO

Figura 1 – Imagens representativas das lâminas petrográficas da Rocha 1: (1.a) Rocha 1 Lâmina 1, Nicóis descruzados; (1.b) Nicóis cruzados; (2.a) Rocha 1 Lâmina 2, Nicóis descruzados; (2.b) Nicóis Cruzados



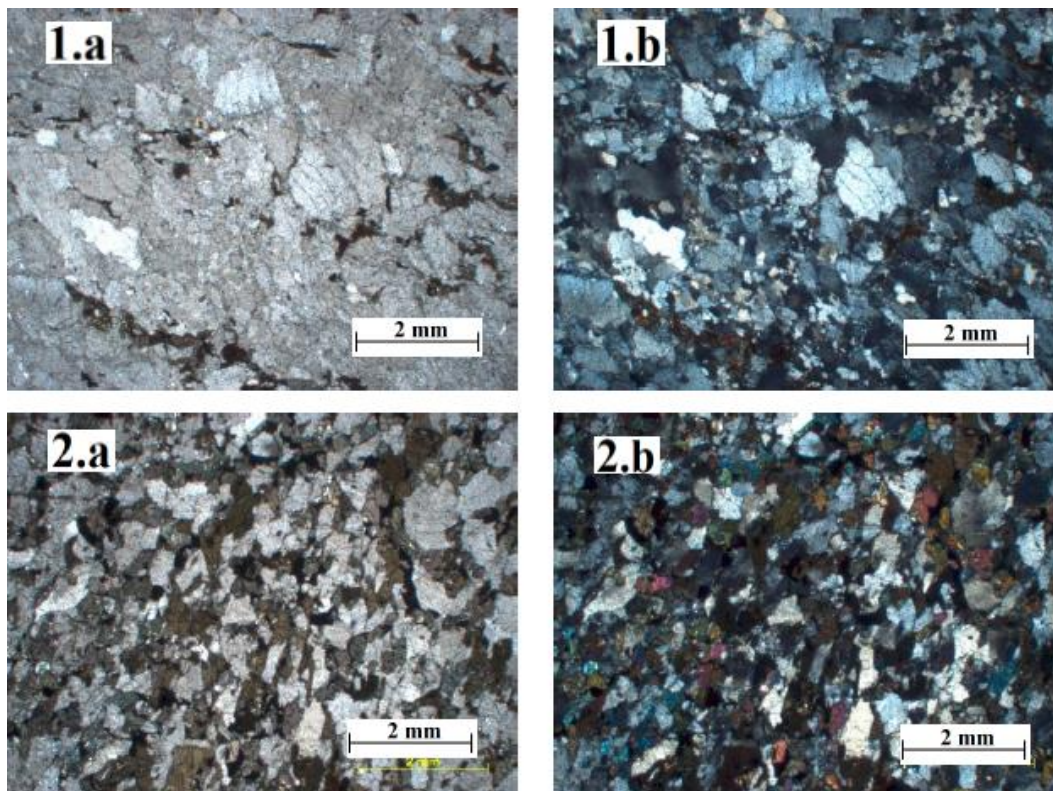
Fonte: Rosa, 2019.

Figura 2 – Imagens representativas das lâminas petrográficas da Rocha 2: (1.a) Rocha 2 Lâmina 1, Nicóis descruzados; (1.b) Nicóis cruzados; (2.a) Rocha 2 Lâmina 2, Nicóis descruzados; (2.b) Nicóis cruzados; (3.a) Rocha 2 Lâmina 3, Nicóis descruzados; (3.b) Nicóis cruzados



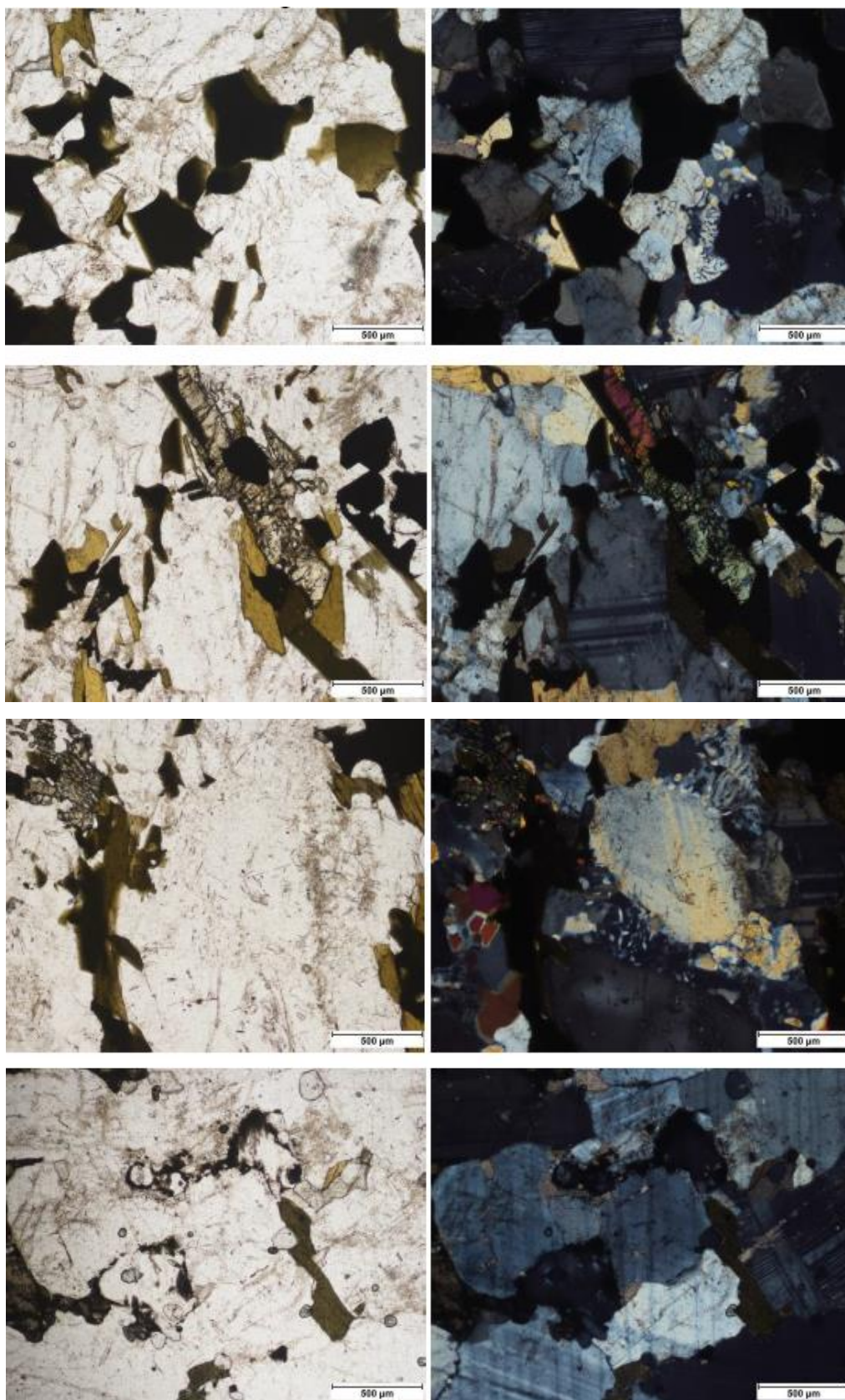
Fonte: Rosa, 2019.

Figura 3 – Imagens representativas das lâminas petrográficas da Rocha 3: (1.a) Rocha 3 Lâmina 1, Nicóis descruzados; (1.b) Nicóis cruzados; (2.a) Rocha 3 Lâmina 2, Nicóis descruzados; (2.b) Nicóis cruzados



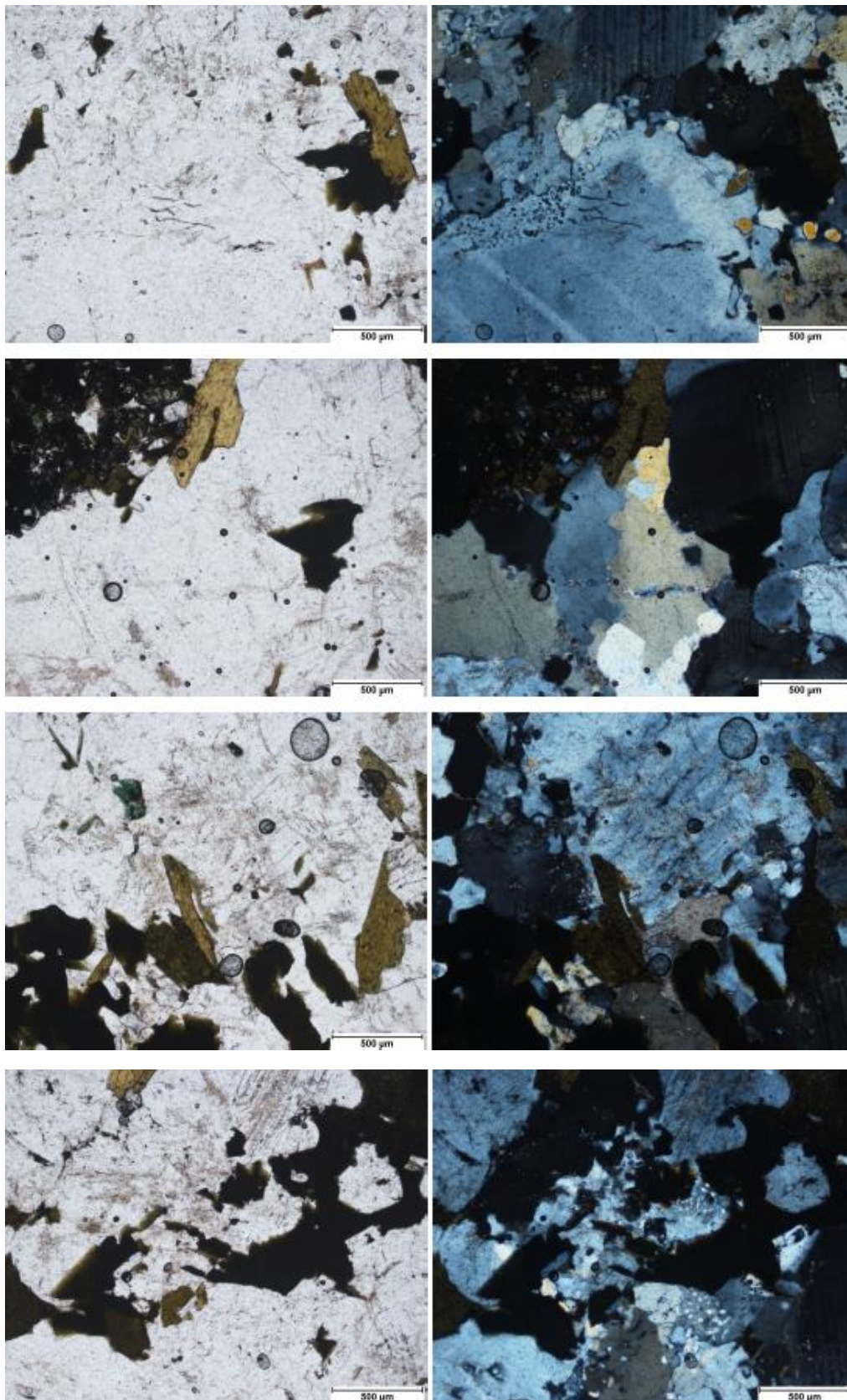
Fonte: Rosa, 2019.

Figura 4 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 4 Lâmina 1



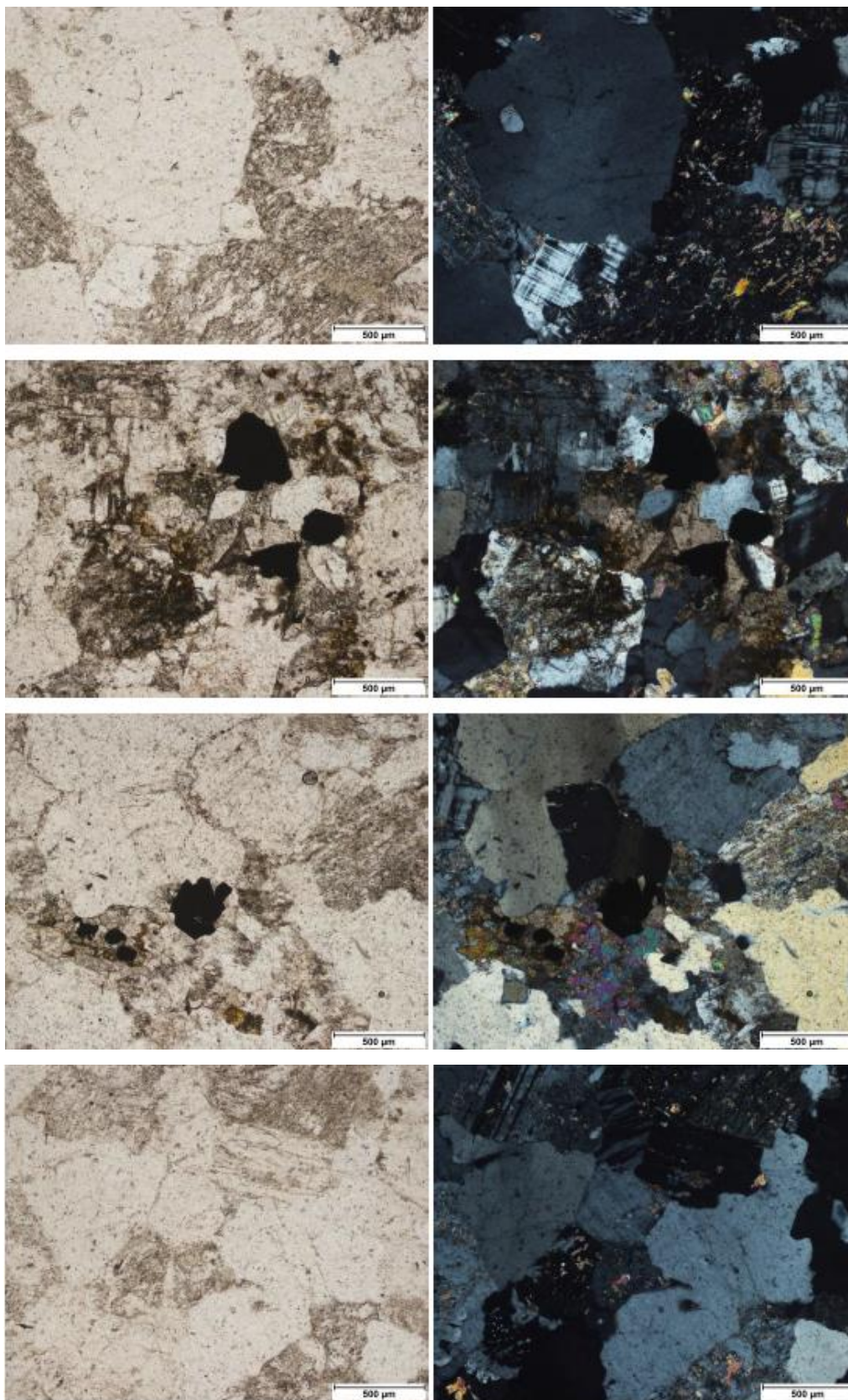
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 5 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 4 Lâmina 2



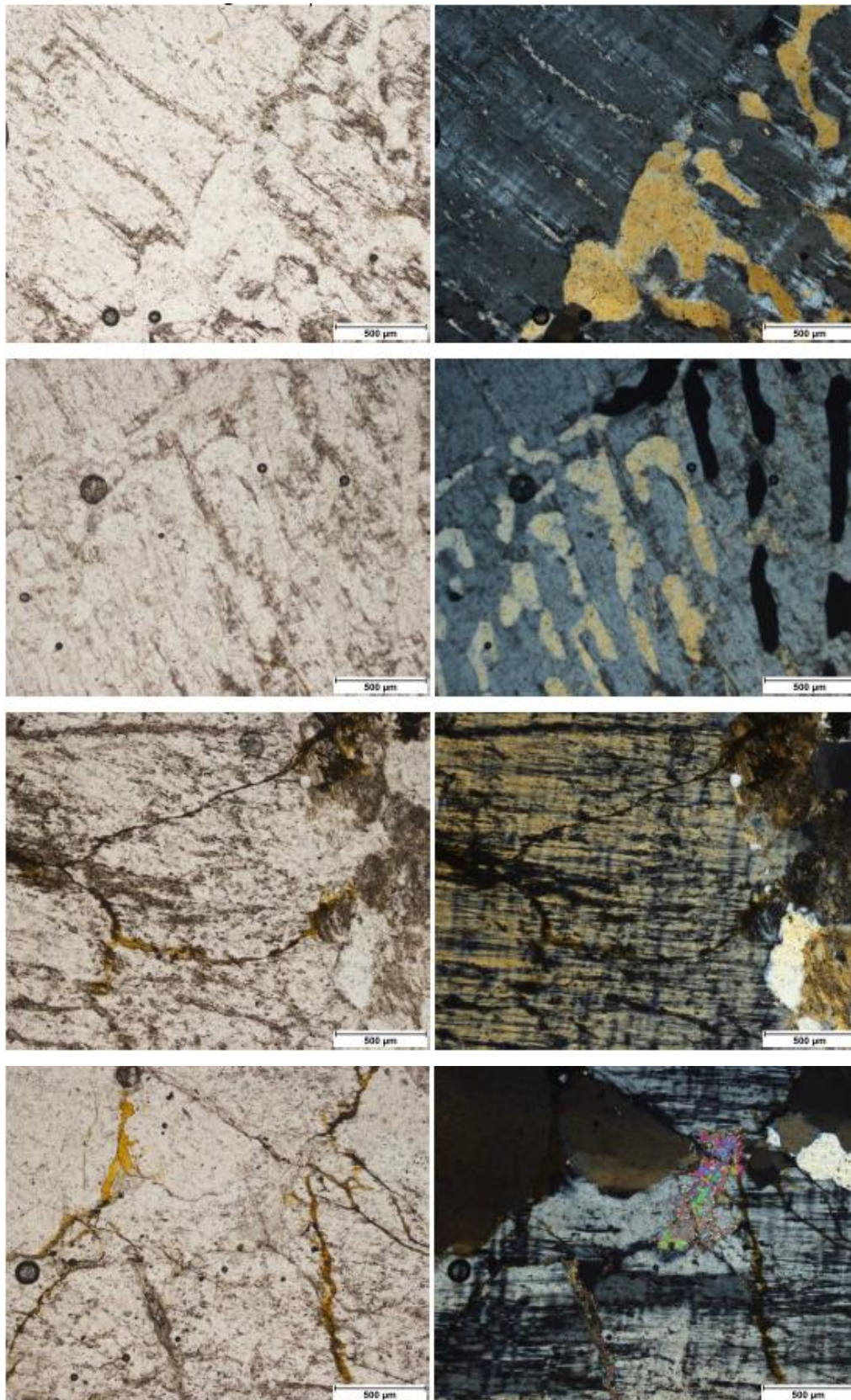
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 6 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 4 Lâmina 3



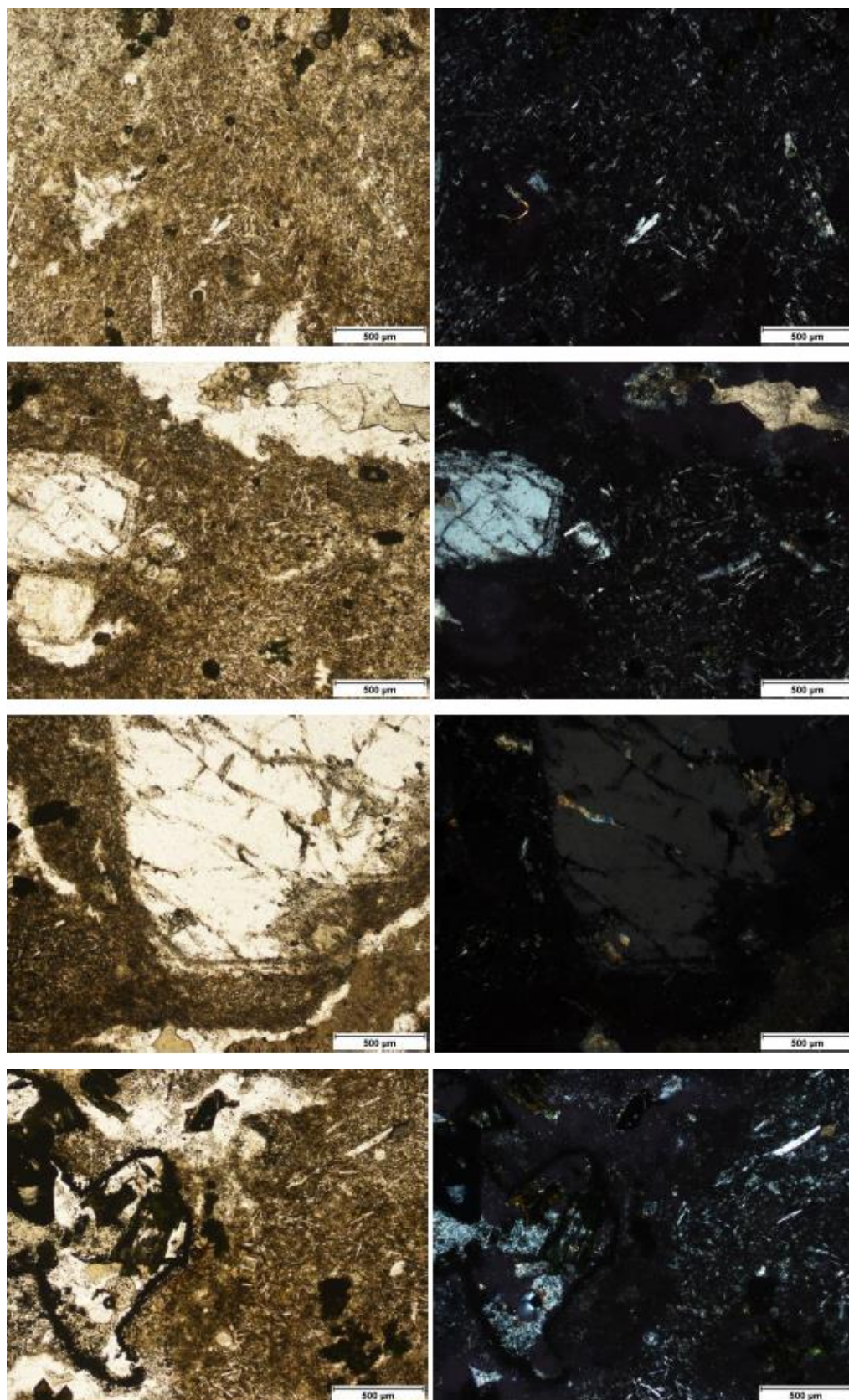
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 7 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 4 Lâmina 4



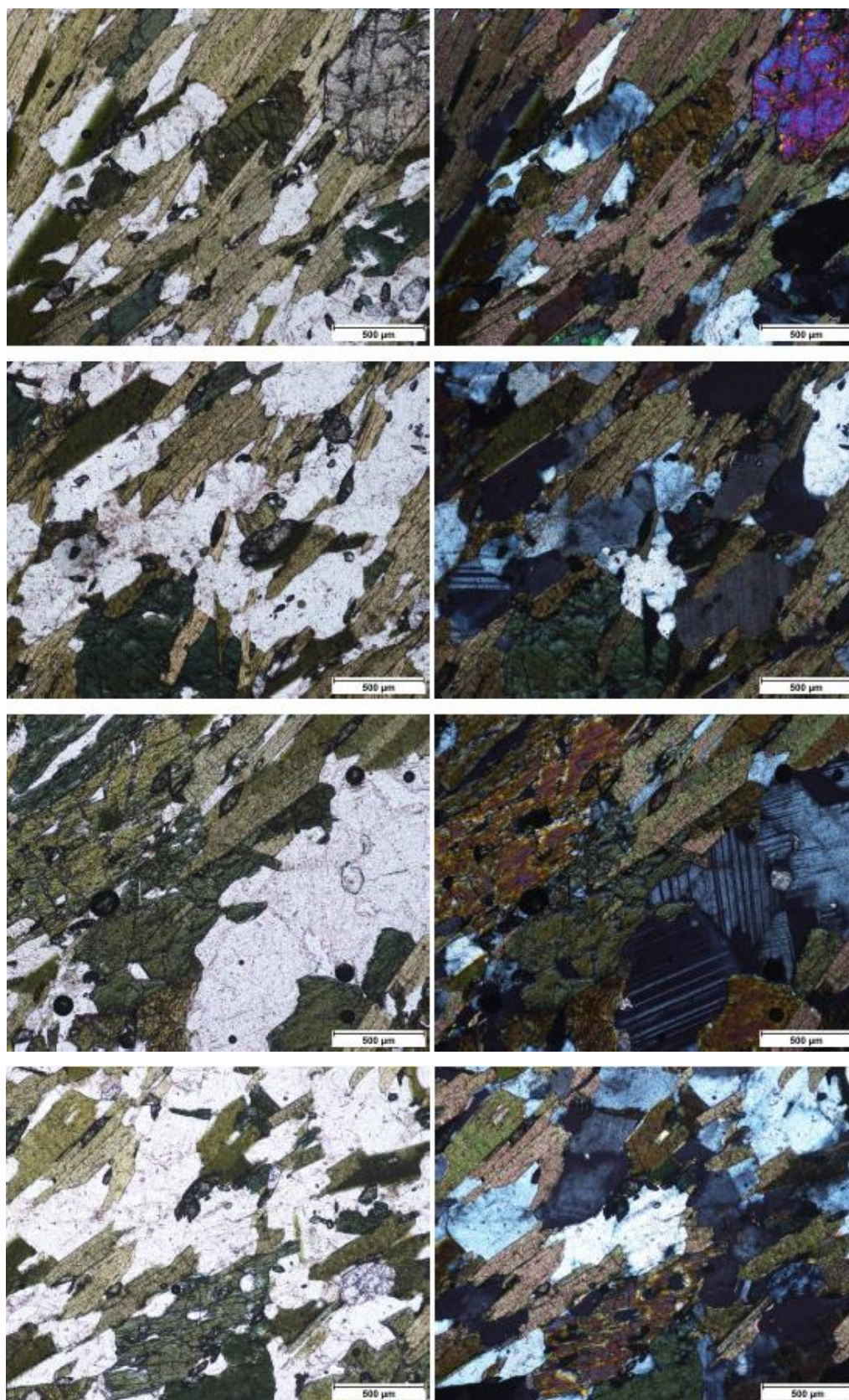
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 8 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rochas 5 e 6 – Lâmina única



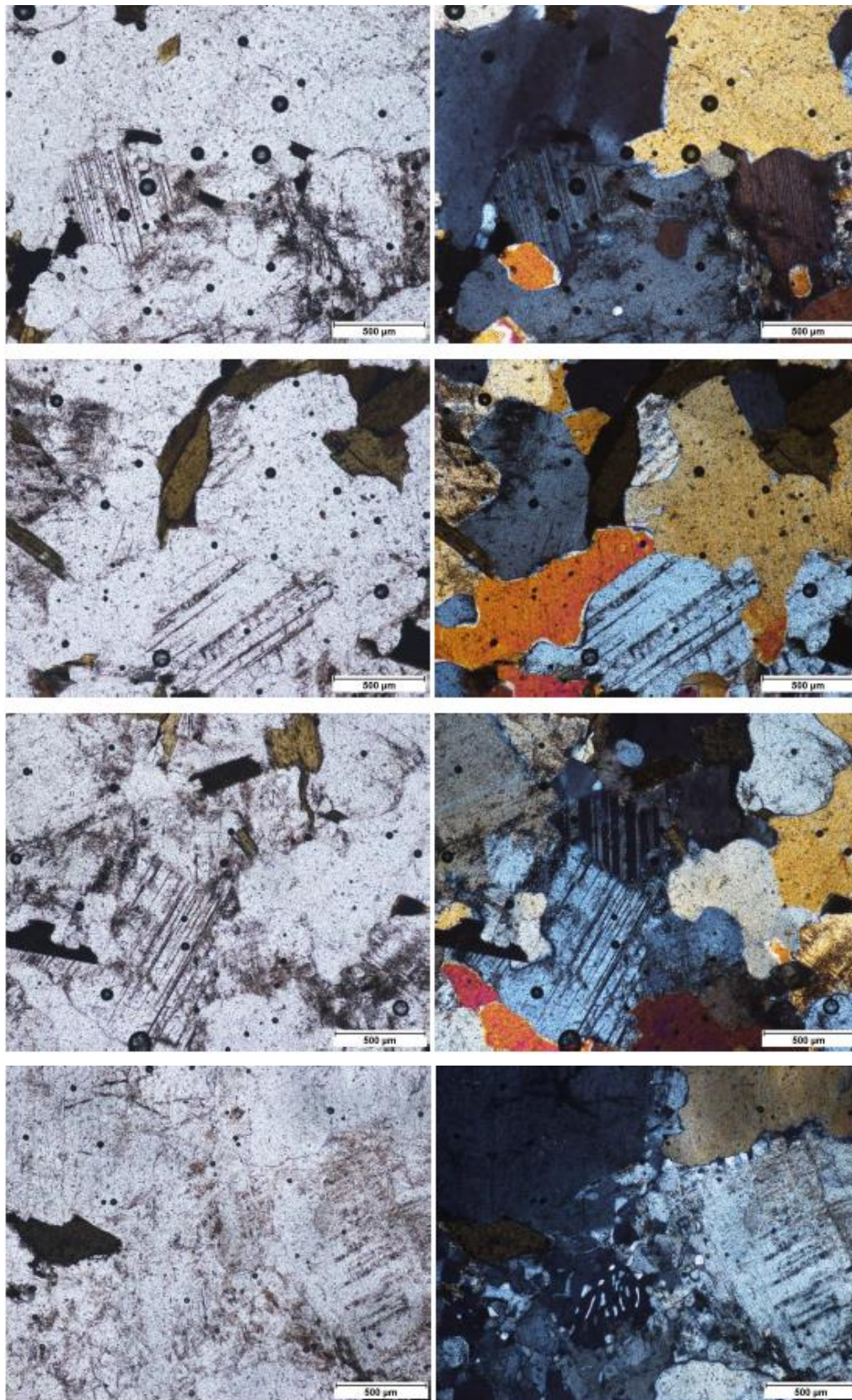
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 9 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 7 Lâmina 1



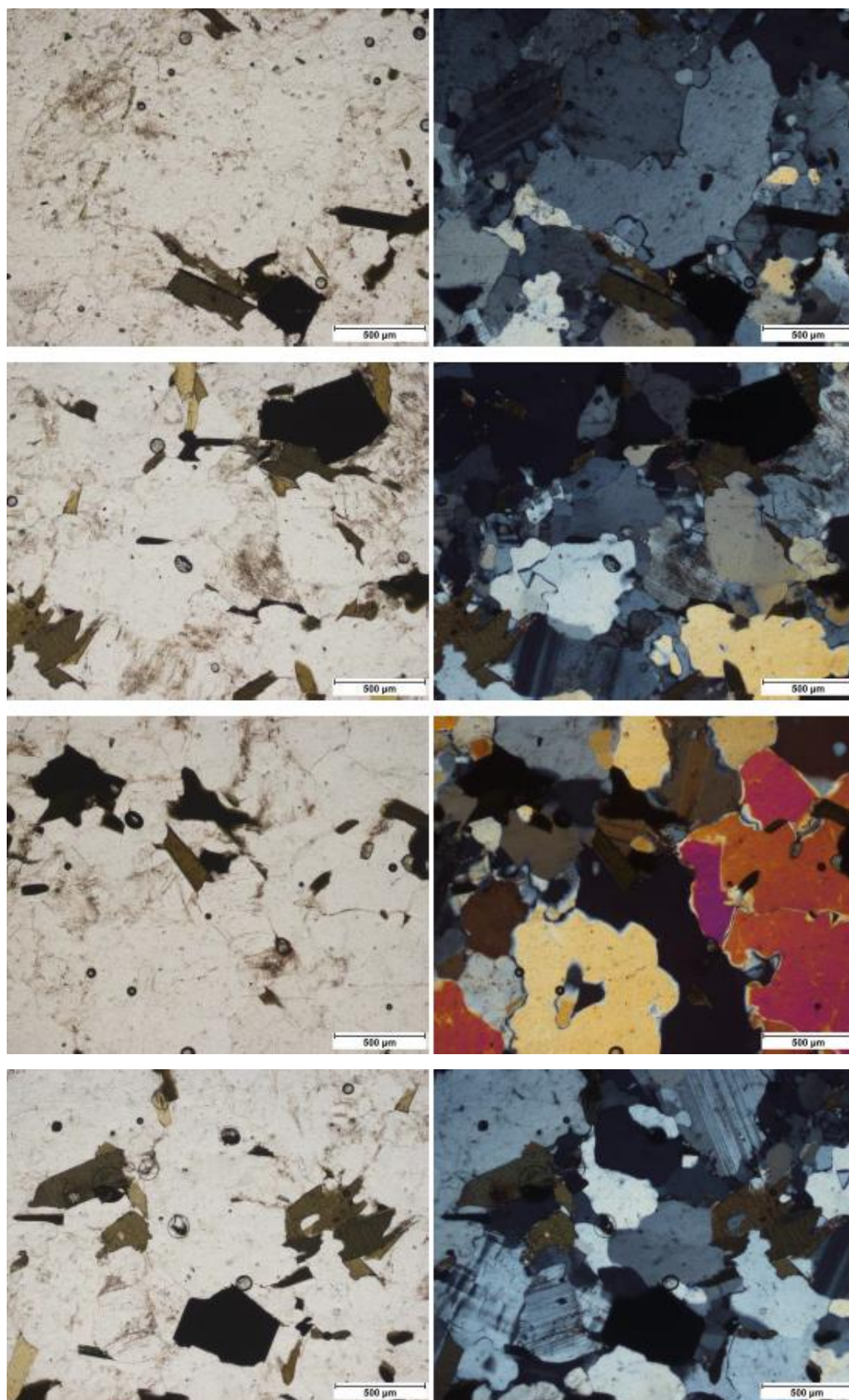
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 10 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 7 Lâmina 2



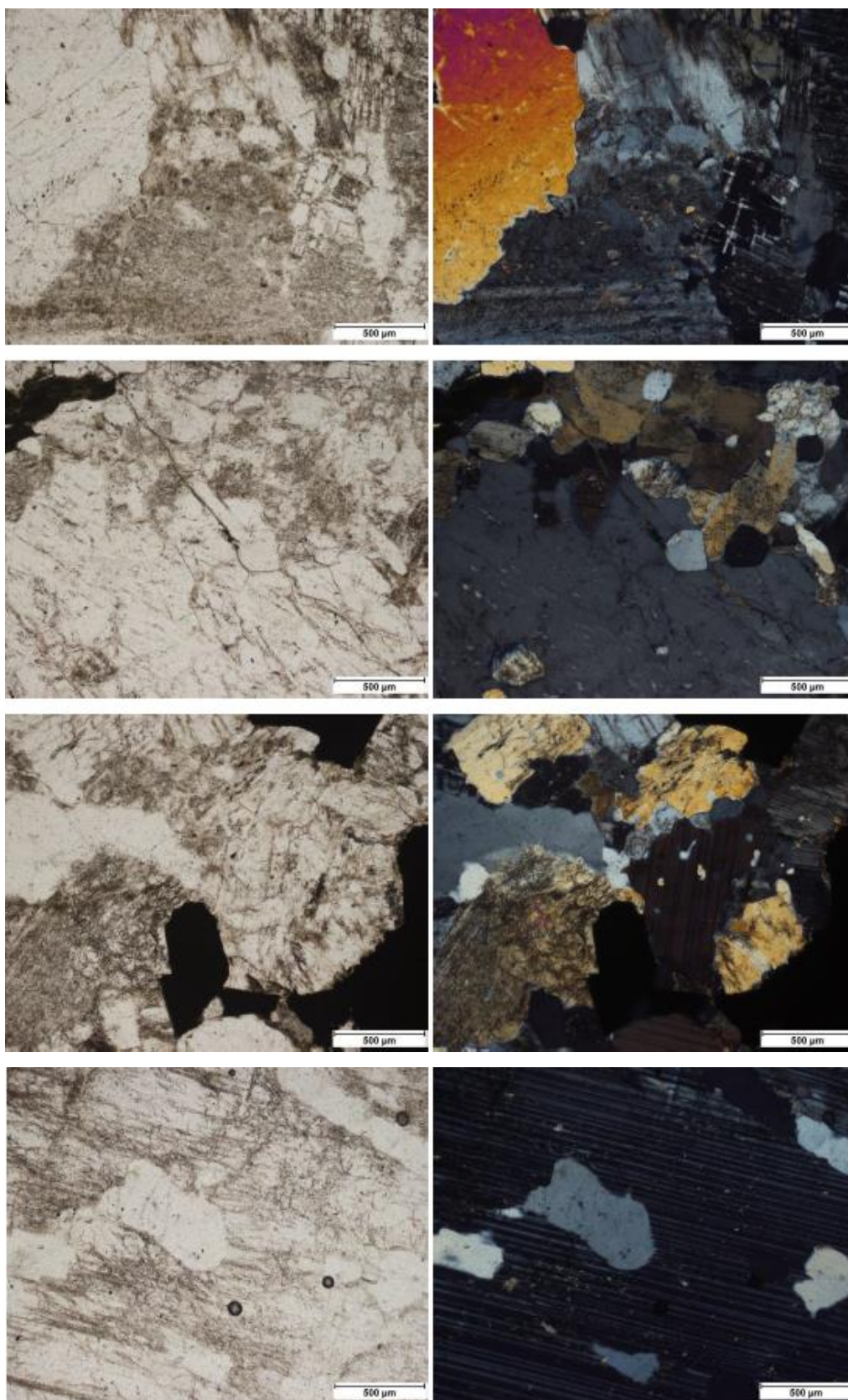
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 11 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 7 Lâmina 3



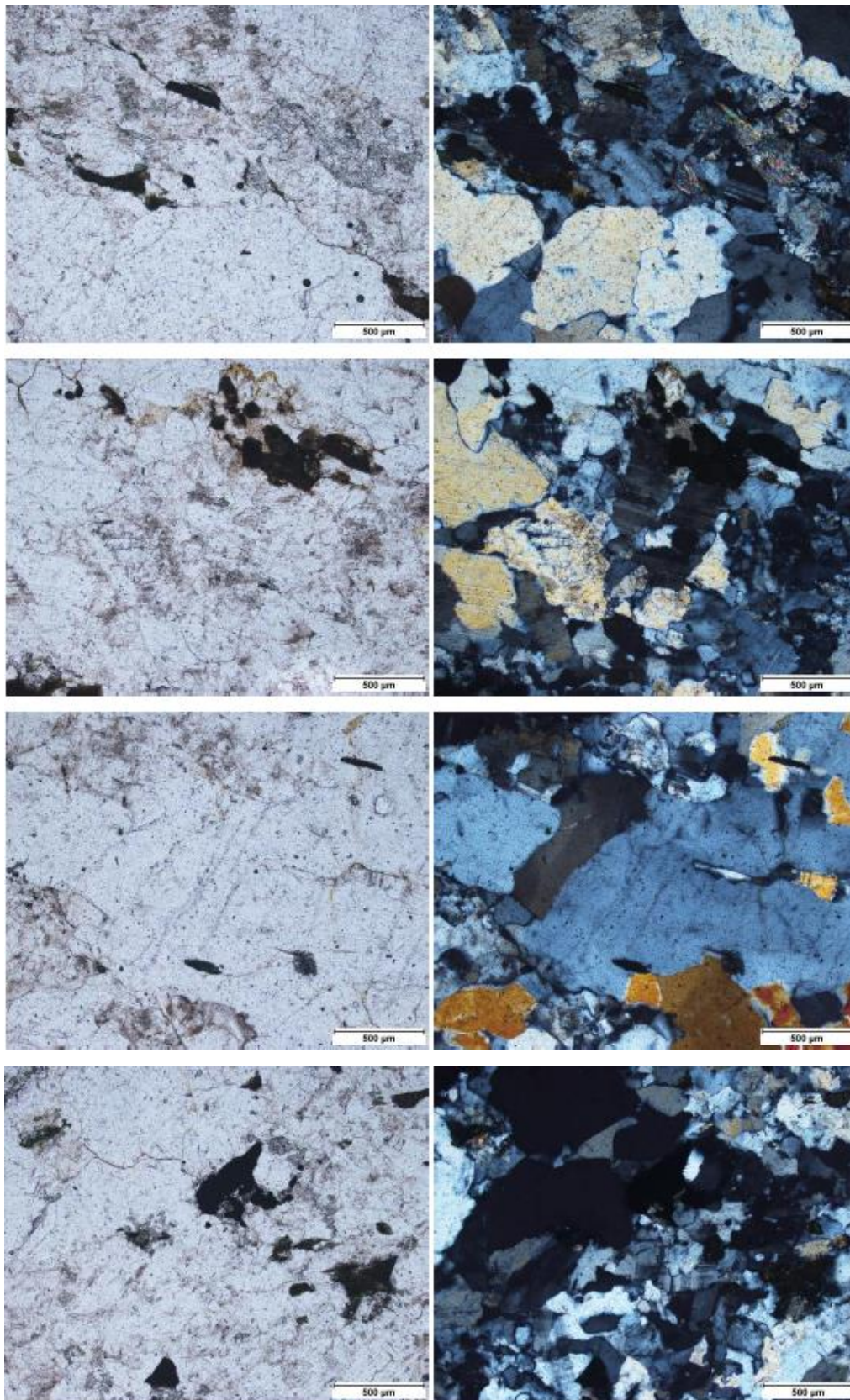
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 12 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 7 Lâmina 4



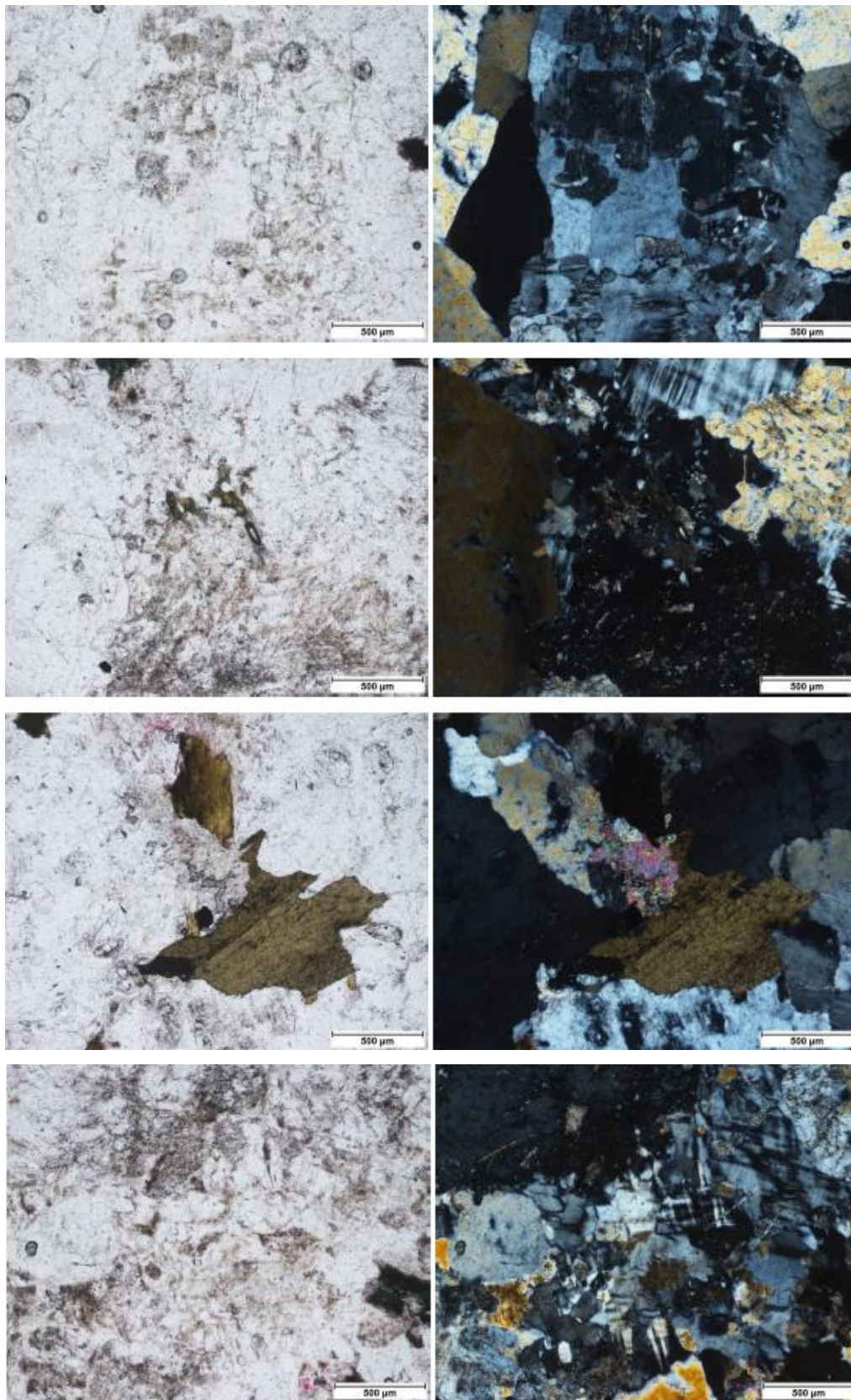
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 13 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 8 Lâmina 1



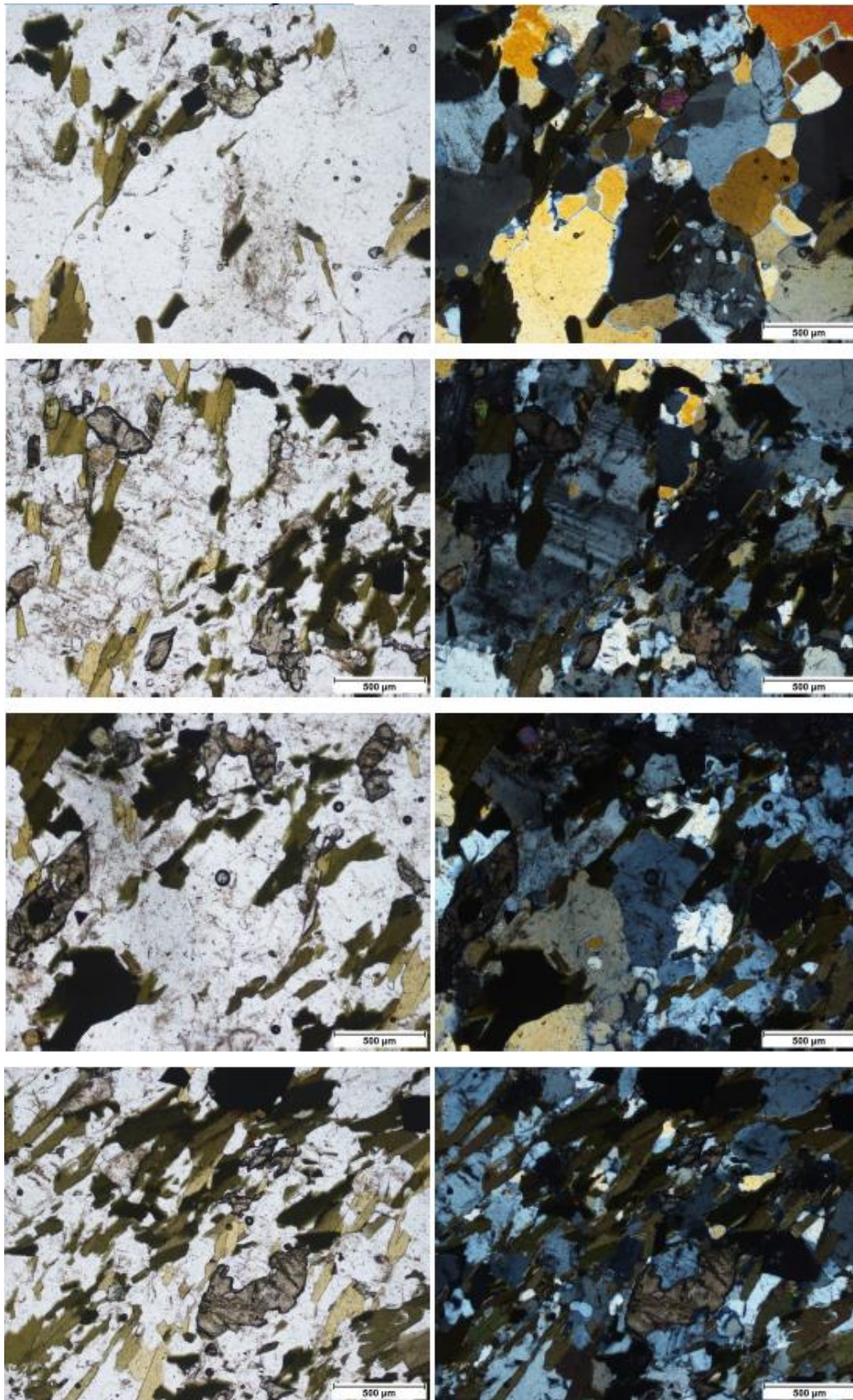
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 14 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 8 Lâmina 2



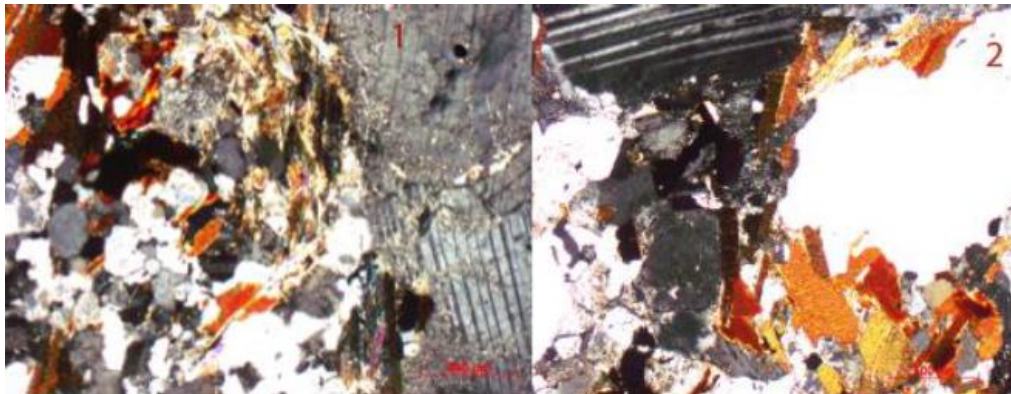
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 15 – Fotomicrografias à luz natural polarizada (esquerda) e à luz ortoscópica (direita) – Rocha 8 Lâmina 3



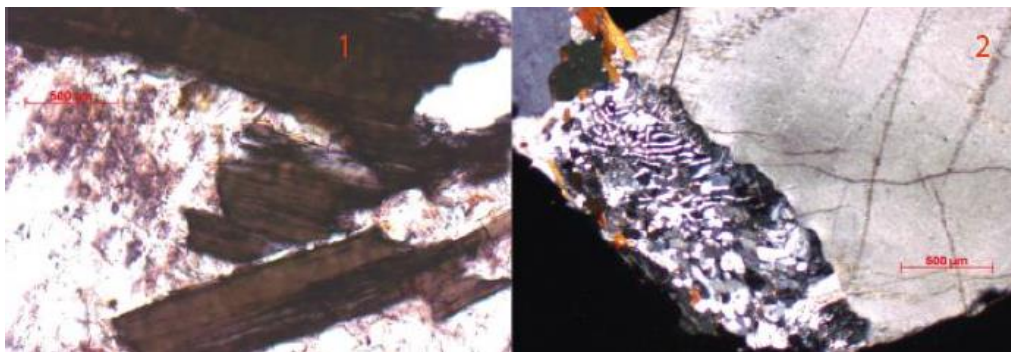
Fonte: Diógenes, 2018.

Figura 16 – Fotos de lâmina delgada representando a biotita gnaisse da pedreira Cispel – Rocha 9 Lâmina 1



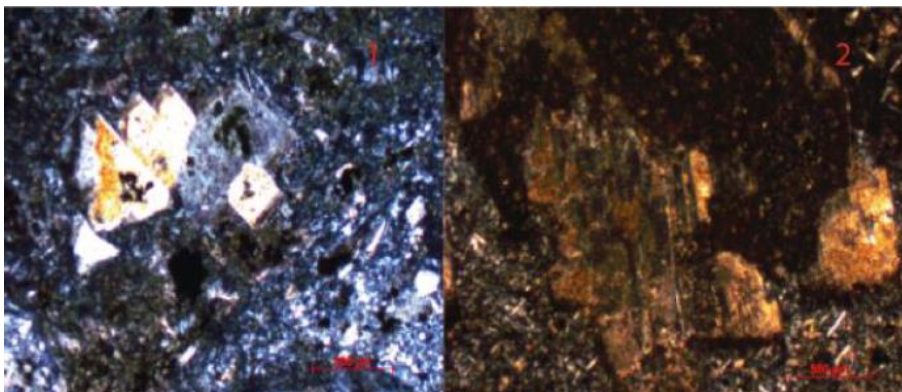
Fonte: Alves, 2014.

Figura 17 – Fotos de lâmina delgada representando a biotita gnaisse da pedreira Cispel – (1) Sericita cobrindo um feldspato – (2) fraturas em um feldspato, crescimento mirmequitico e Rocha 9 Lâmina 2



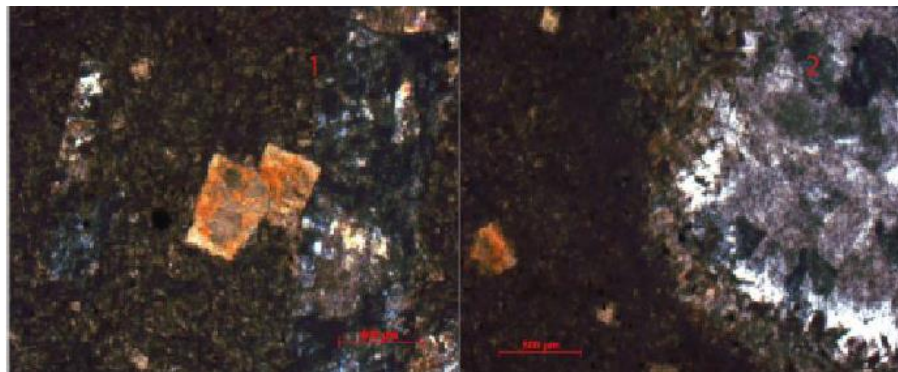
Fonte: Alves, 2014.

Figura 18 – Fotos de lâmina delgada representando o traquito da pedreira Vigné. (1) Cristais de nefelina no centro da foto, (2) Sem Nicóis cruzados, a aparência muito alterada devido ao carbonato que cobre todos os minerais da lâmina – Rocha 10 Lâmina 1



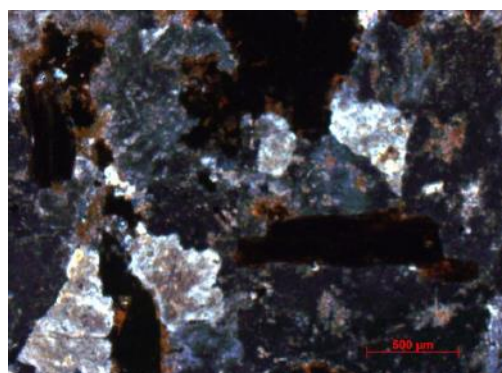
Fonte: Alves, 2014.

Figura 19 – Fotos de lâmina delgada representando o traquito da pedreira Vigné. (1) Cristais de nefelina no centro da foto; (2) Aparência muito alterada de um feldspato devido ao carbonato que cobre todos os minerais da lâmina – Rocha 10 Lâmina 2



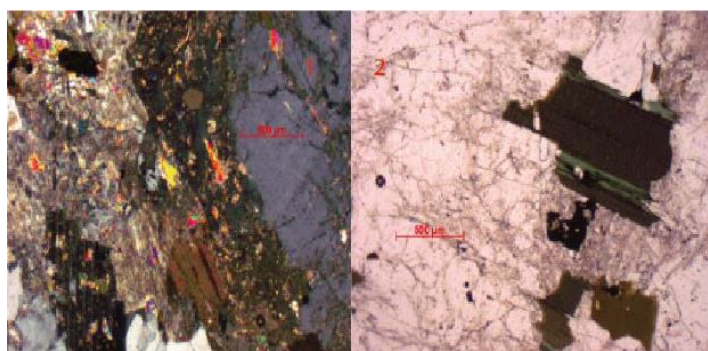
Fonte: Alves, 2014.

Figura 20 – Foto de lâmina delgada confeccionada nessa pesquisa representando o sienito da pedreira Vigné – Rocha 10 Lâmina 3



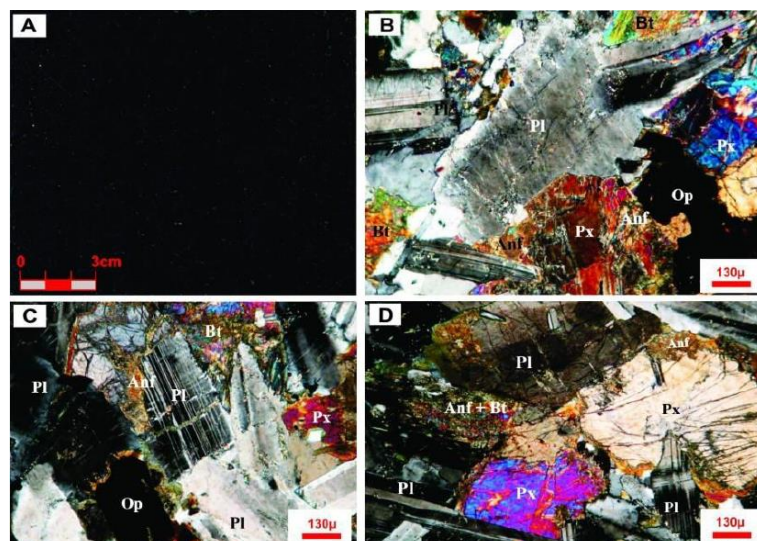
Fonte: Alves, 2014.

Figura 21– Fotos de lâmina delgada representando o granito da pedreira Lafarge. A esquerda sericitas cobrindo os K-feldspatos, plagioclásios e quartzos; a direita cristal de biotita apresentando alteração para clorita e muitas fraturas nos outros minerais incolores presentes na lâmina – Rocha 11 Lâmina única



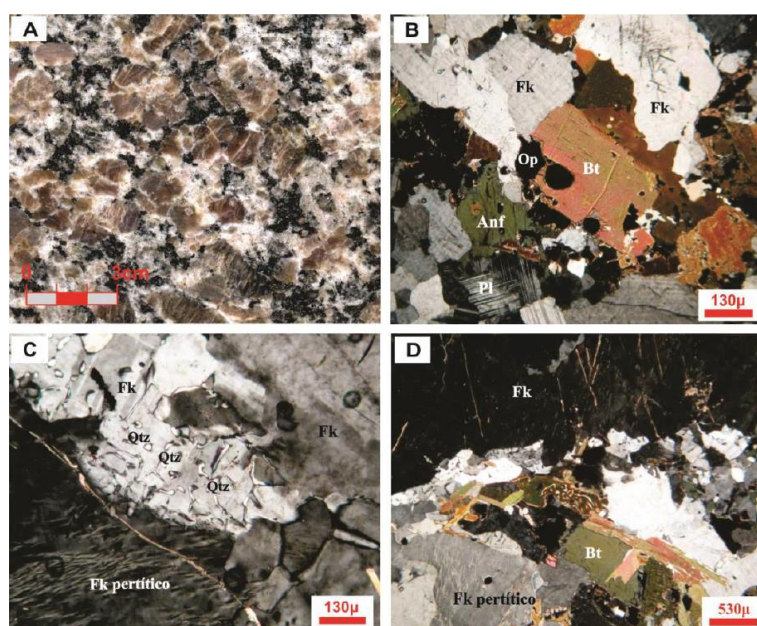
Fonte: Alves, 2014.

Figura 22 – Aspectos petrográficos da Rocha 12: (A) Macroscópico; (B) Microscópico, textura local subofítica; (C) Microscópico, microfissura em cristal de plagioclásio preenchida por anfibólio; (D) Microscópico, alteração hidrotermal em cristais de piroxênio.



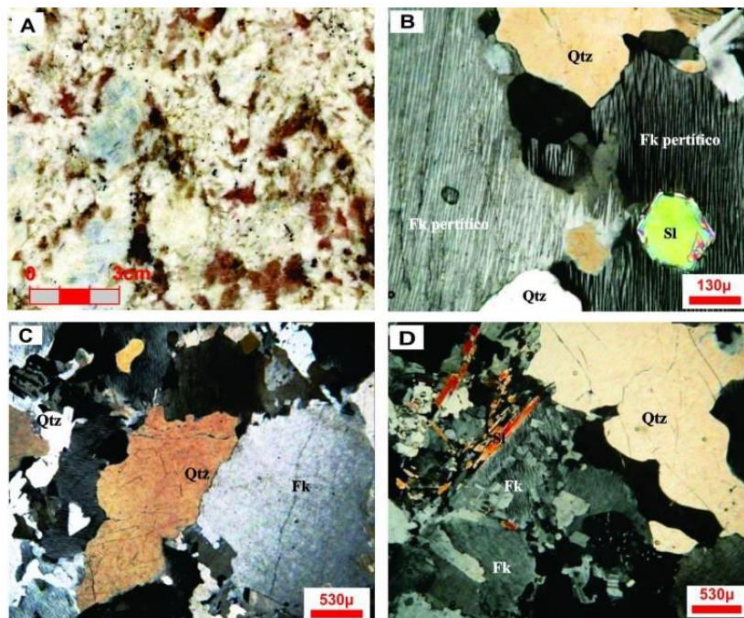
Fonte: Pazeto e Artur (2015).

Figura 23 – Aspectos petrográficos da Rocha 13: (A) Macroscópico; (B) Microscópicos, aspecto textural da rocha e plagioclásio com geminação polissintética; (C) Microscópicos, pertitas em cristal de ortoclásio e textura gráfica; (D) Microscópicos, pertitas em cristal de ortoclásio.



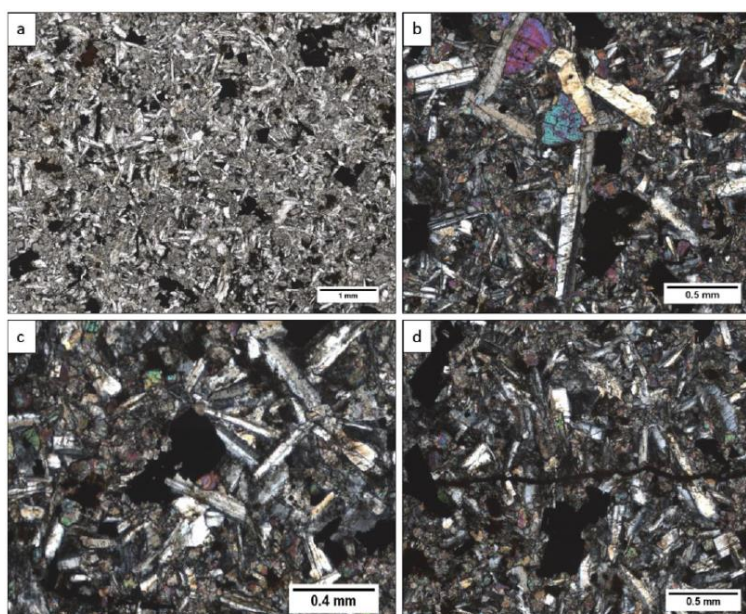
Fonte: Pazeto e Artur (2015).

Figura 24 – Aspectos petrográficos da Rocha 14: (A) Macroscópico; (B) Microscópicos, feldspato potássico mesoperitítico com inclusão de sillimanita; (C) Microscópicos, contatos interminerais; (D) Microscópicos, cristais de sillimanita fobrolítica.



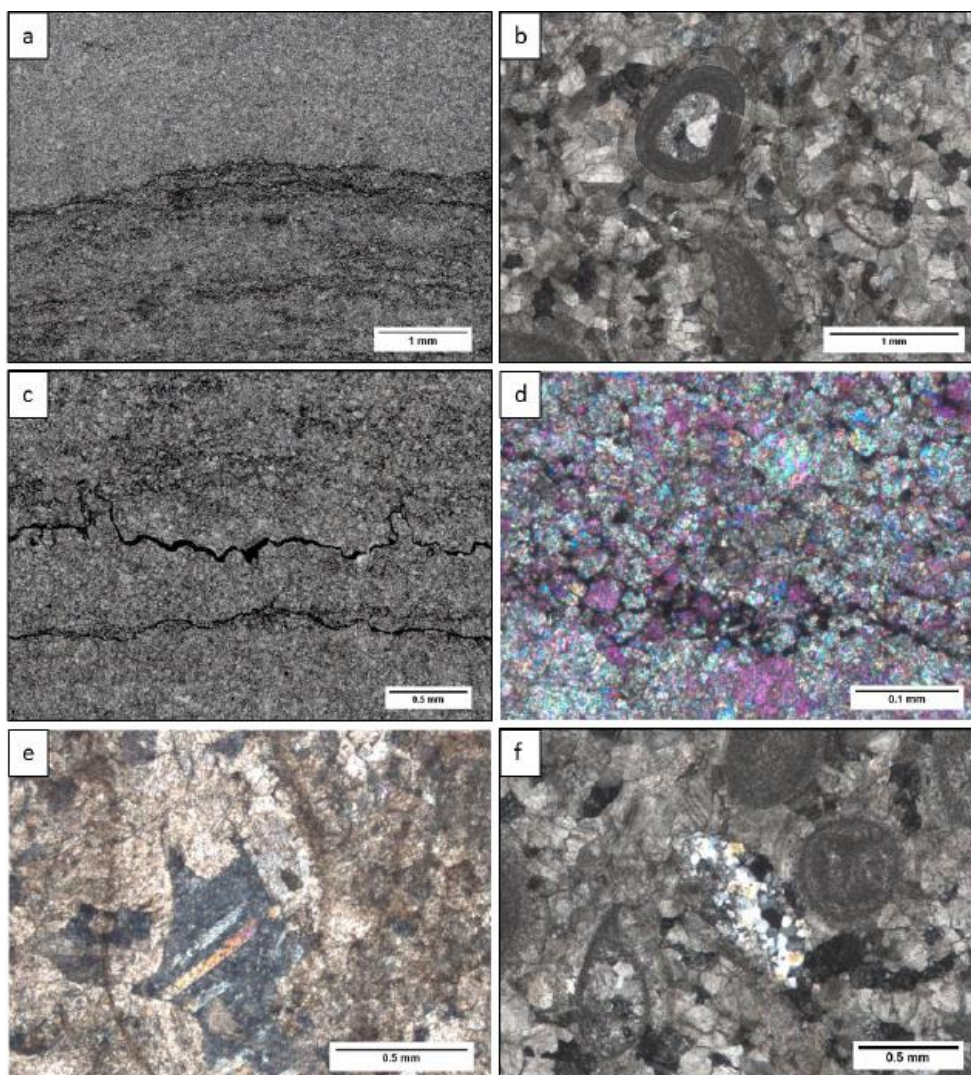
Fonte: Pazeto e Artur (2015).

Figura 25 – Aspectos petrográficos da Rocha 15: (a) Textura microporfirítica intergranular composta por “ripas” de plagioclásio (branco), opacos (preto) e máficos (esverdeados); (b) Raros microfenocristais de plagioclásio e clinopiroxênio; (c) Intercrescimento ofítico materializando a força de cristalização dos plagioclásios; (d) Microfratura com indícios de propagação aleatória não controlada por limites físicos ou químicos.



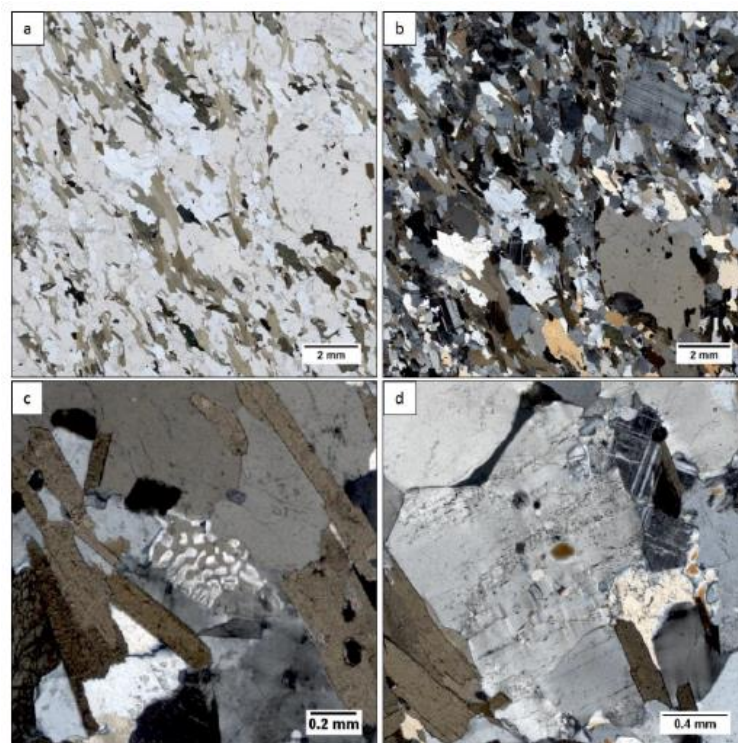
Fonte: Trotta (2020).

Figura 26 – Aspectos petrográficos da Rocha 16: (a) Textura afanítica e estrutura sedimentar de acamamento preservada independentemente do nível de metamorfismo e diagênese; (b) Textura fanerítica cristalina fina destacando os cristais de calcita e dolomita neoformados substituindo e obliterando a textura original (c) Estilólito formado por dissolução química induzida por pressão vertical; (d) Textura microcristalina destacando cristais de dolomita (rosa) e calcita; (e) Cristal único de calcita com maclas de clivagem substituindo o núcleo micrítico de um grão aloquímico e dolomitas ao redor; (f) Poro preenchido por quartzo microcristalino no metacalcário granular.



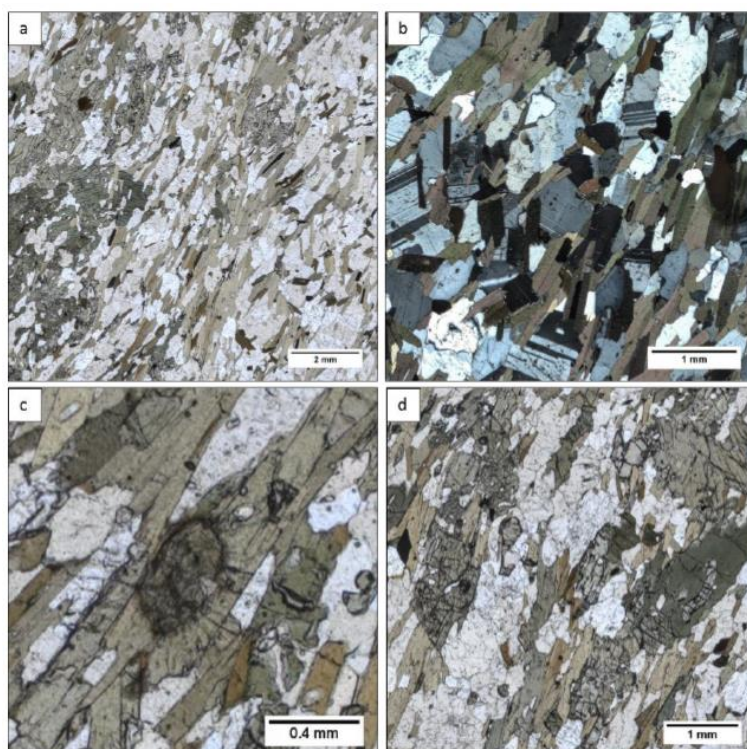
Fonte: Trotta (2020).

Figura 27 – Aspectos petrográficos da Rocha 17 Parte 1-Paleossoma: (a) Anisotropia causada pela orientação preferencial de minerais sob condições metamórficas; (b) Pórfiros de quartzo e plagioclásio em textura inequigranular; (c) Mirmequita; (d) Deformação em cristal de microclina.



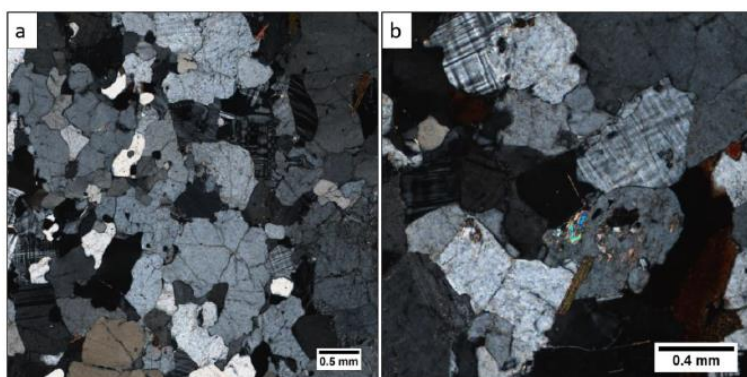
Fonte: Trotta (2020).

Figura 28 – Aspectos petrográficos da Rocha 17 Parte 2-Melanossoma: (a) Textura nematoblástica na qual os minerais inequigranulares de biotita e outros máficos se orientam segundo direção perpendicular ao vetor de compressão da rocha; (b) Textura localmente granoblástica com contatos irregulares e entre minerais félsicos entre micas isoladas; (c) Mineral metamíctico induzindo microfraturamento radial na rocha através de minerais hospedeiros; (d) Descontinuidades relacionadas à clivagem intrínseca das fases minerais do grupo dos anfibólios.



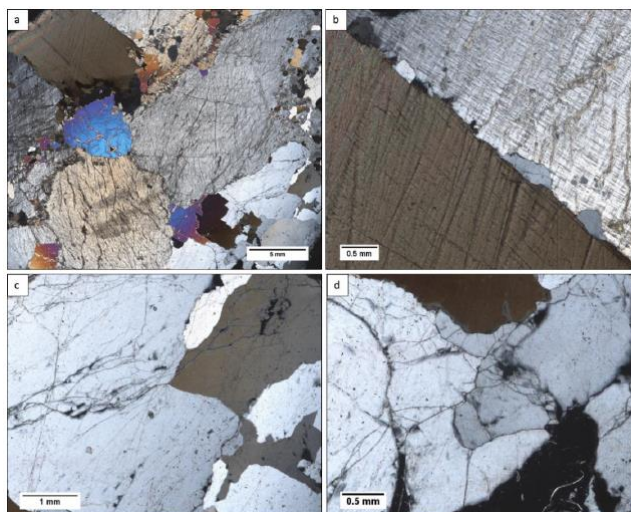
Fonte: Trotta (2020).

Figura 29 – Aspectos petrográficos da Rocha 17 Parte 3-Leucossoma: (a) Composição quartzo-feldspática com textura inequigranular, contatos sinuosos e retilíneos; (b) Sericitização seletiva sobre feldspatos, principalmente plagioclásios mais cálcicos.



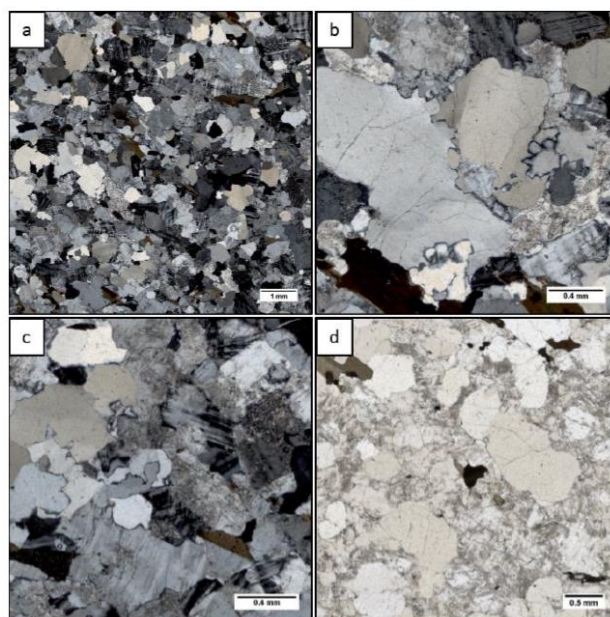
Fonte: Trotta (2020).

Figura 30 – Aspectos petrográficos da Rocha 17 Parte 4-Pegmatito: (a) Textura fanerítica inequigranular do pegmatito, com destaque para as dimensões centimétricas dos cristais de biotita, microclina, quartzo e plagioclásio; (b) Plagiocásios exsolvidos da microclina (porção superior) e alojados no contato desta com a biotita (inferior); (c) e (d) Descontinuidades intracristalina e intercristalina associadas à pontos tríplices de concentração de tensões de cristalização.



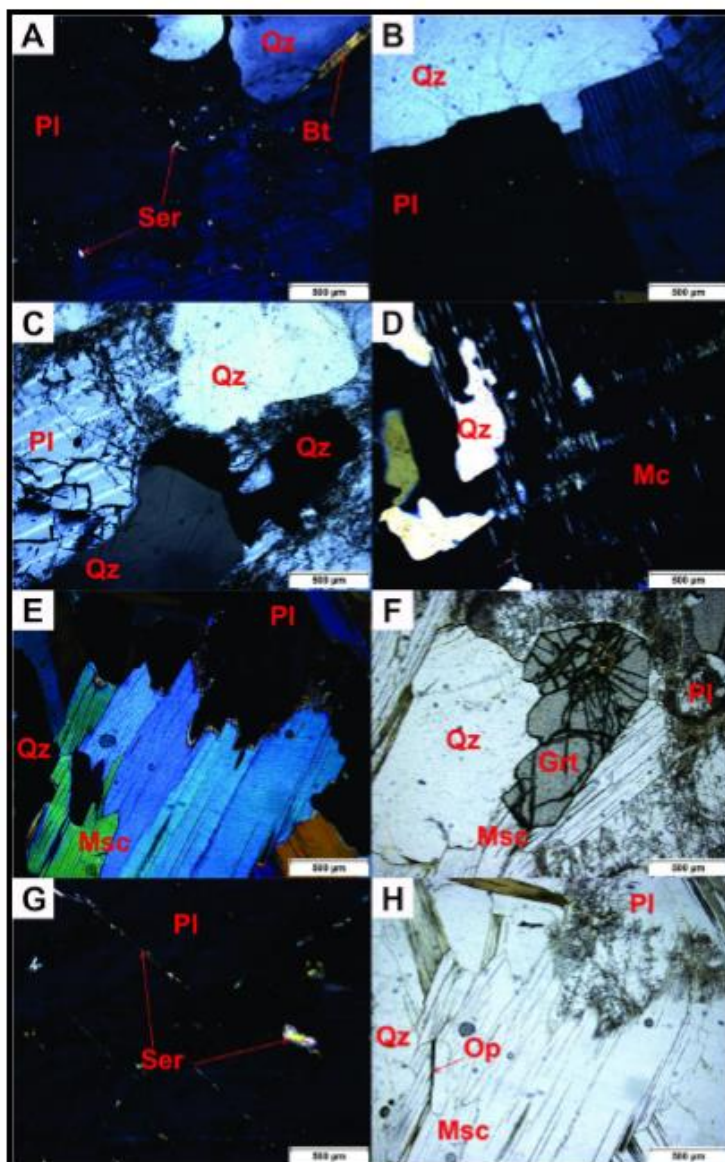
Fonte: Trotta (2020).

Figura 31 – Aspectos petrográficos da Rocha 17 Parte 5-Granotoide: (a) Homogeneidade e textura equigranular xenomórfica (anédrica) e biotitas isoladas; (b) Contatos lobulados e denteados, principalmente entre quartzos; (c) Alteração seletiva sobre feldspatos; (d) Alteração seletiva claramente controlada pela mineralogia.



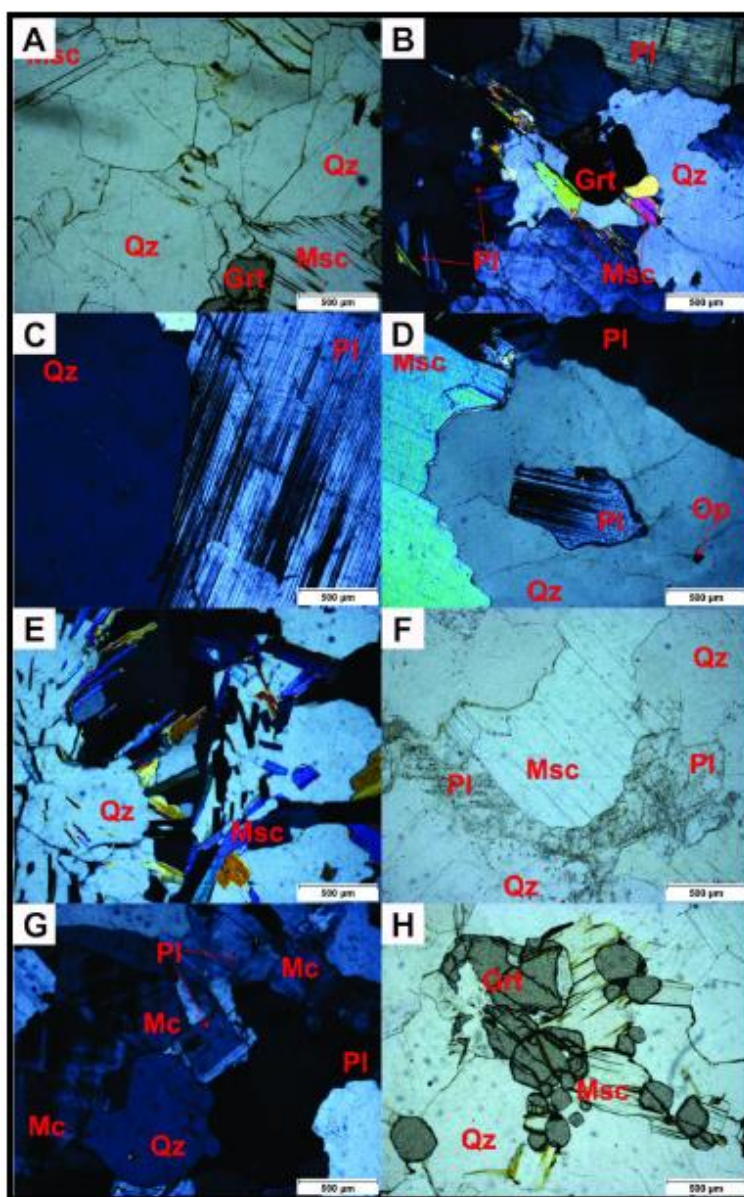
Fonte: Trotta (2020).

Figura 32 – Fotomicrografias da Rocha 19: (A) Cristal de plagioclásio (Pl) com intercrescimento, de sericita (Ser), associado a quartzo (Qz) e biotita (Bt), a luz ortoscópica; (B) Contato plano entre o plagioclásio (Pl) e o quartzo (Qz); (C) Contato côncavo/convexo entre o plagioclásio (Pl) e o quartzo (Qz), a luz ortoscópica; (D) Quartzo (Qz) intercrescido em microclina (Mc), a luz ortoscópica; (E) Muscovita associada a quartzo (Qz) e plagioclásio (Pl), a luz ortoscópica; (F) Granada associada a muscovita (Msc), ao quartzo (Qz) e plagioclásio (Pl), a luz natural; (G) Sericita (Ser) preenchendo microfissuras em plagioclásio (Pl), a luz ortoscópica; (H) Mineral opaco (Op) associado a muscovita (Msc), a luz natural.



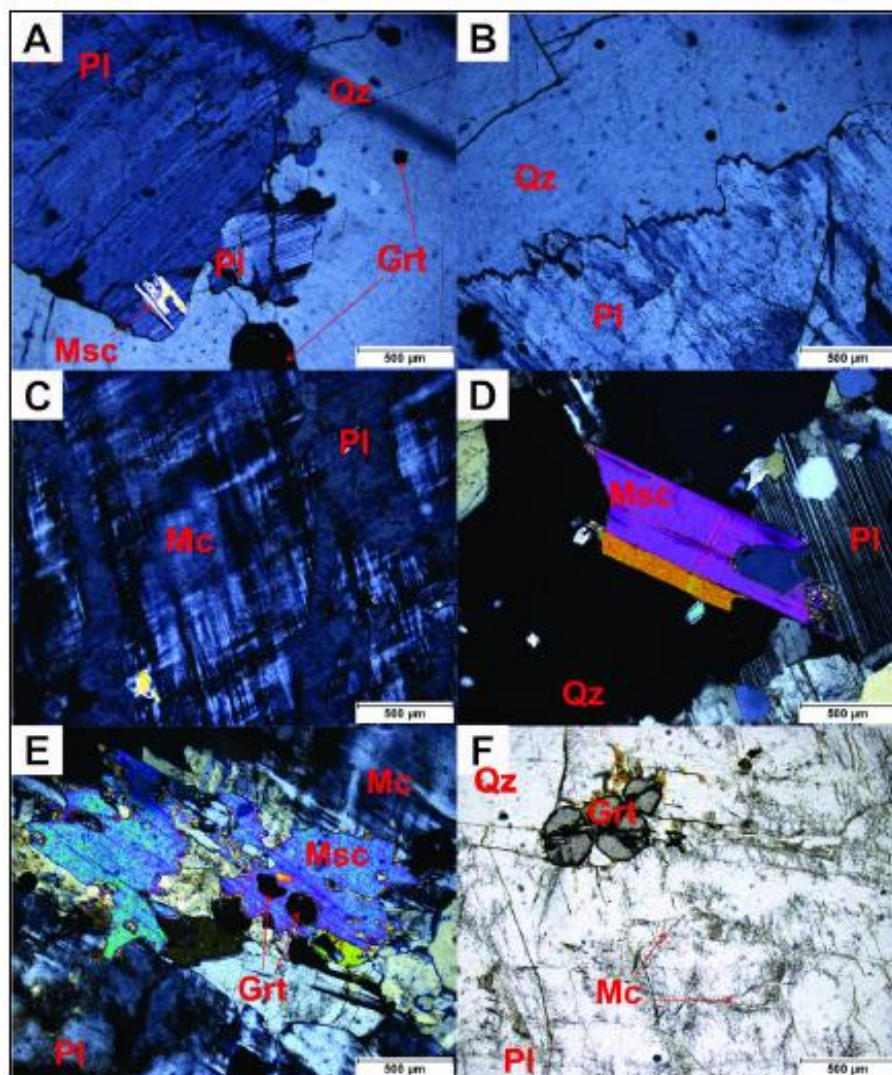
Fonte: Leal Neto (2017).

Figura 33 – Fotomicrografias da Rocha 20: (A) Minerais de quartzo (Qz), muscovita (Msc) e granada (Grt) exibindo textura inequigranular, a luz natural; (B) Minerais de quartzo (Qz), muscovita (Msc) e granada (Grt), a luz ortoscópica, com presença de plagioclásio (Pl); (C) Contato entre cristais de quartzo (Qz) e plagioclásio (Pl), apresentando fraturas, a luz ortoscópica; (D) Plagioclásio (Pl) intercrescido no quartzo (Qz), o qual apresenta contato côncavo/convexo com a muscovita (Msc), a luz ortoscópica; (E) Demonstra muscovitas (Msc) dispersas em lâmina, associado ao quartzo (Qz), a luz ortoscópica; (F) Muscovita (Msc) está associada ao plagioclásio (Pl), a luz natural; (G) Presença de microclina (Mc) associada ao plagioclásio (Pl); (H) Granadas (Grt) associadas a muscovita (Msc).



Fonte: Leal Neto (2017).

Figura 34 – Fotomicrografias da Rocha 21: (A) Cristais de plagioclásio (Pl) e quartzo (Qz), com contatos côncavo/convexo e fraturas intergrãos e intragrãos, luz ortoscópica; (B) Contato serrilhado entre o plagioclásio (Pl) e o quartzo (Qz), luz ortoscópica; (C) Textura pertítica em um mega cristal de microclina (Mc) gerando plagioclásio (Pl), luz ortoscópica; (D) Muscovita (Msc) mantendo contato plano com o plagioclásio (Pl) e o quartzo (Qz), luz ortoscópica; (E) Muscovita (Msc) demonstrando um aspecto de alteração, com contatos côncavo/convexo com a microclina (Mc) e a granada (Grt), luz ortoscópica; (F) Grãos de granada (Grt) fraturadas em contato com a plagioclásio (Pl) e o quartzo (Qz), luz natural.



Fonte: Leal Neto (2017).