

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

CECÍLIA BALDUÍNO DA SILVA

**PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESÍDUO PROVENIENTE DO
PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO**

**Belo Horizonte
Fevereiro de 2020**

Cecília Balduino da Silva

**PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO RESÍDUO PROVENIENTE DO
PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na linha de pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

Belo Horizonte
Fevereiro de 2020

S586p Silva, Cecília Balduino da.
Produção de rocha artificial utilizando resíduo proveniente do
processamento de minério de ferro / Cecília Balduino da Silva. –
2020.
105 f. : il.

Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2020.
Bibliografia.

1. Resíduos. 2. Minério de ferro. 3. Rocha artificial. I. Paiva, Paulo
Renato Perdigão de. II. Título.

CDD: 620.118



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“PRODUÇÃO DE ROCHA ARTIFICIAL UTILIZANDO
RESÍDUO PROVENIENTE DE PROCESSAMENTO DE
MINÉRIO DE FERRO”

Autora: Cecília Balduino da Silva

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof.^a Dr.^a Luciana Boaventura Palhares
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof.^a Dr.^a Gabriela Cordeiro Silva
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUCMINAS

Belo Horizonte, 19 de Fevereiro de 2020.

A Deus, pela sua criatividade e sopro de vida, que servem de subsídio e sustento para que brote em mim fôlegos de coragem, de forma que eu possa questionar realidades e propor, sempre que possível, um mundo novo de possibilidades. À minha família, por seu amor inquestionável. Mamãe, com seu cuidado e dedicação, deram-me a esperança para seguir adiante. Papai, com a sua presença constante, transmitiram-me a segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada. Aos meus irmãos, amigos, e, em especial, ao meu querido orientador, Paulo, por acreditar no meu potencial e não medir esforços para me dar alicerce para vencer essa etapa.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre a me iluminar, dando-me saúde e força para superar as dificuldades.

Ao CEFET-MG, seu corpo docente, direção, administração e colaboradores, que oportunizaram a abertura dessa janela onde, hoje, vislumbro um horizonte superior.

Ao meu orientador, Paulo, pelo suporte, amizade, correções e incentivos.

Aos meus pais e irmãos, pelo amor incondicional.

À minha companheira, Tamires, por sempre se fazer presente.

E a todos que, direta ou indiretamente, fazem e já fizeram parte da minha formação enquanto ser humano e profissional, o meu muito obrigada!

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo produzir rocha artificial utilizando resíduo proveniente do beneficiamento do minério de ferro, advindo do rompimento da barragem de Fundão (Bento Rodrigues, distrito de Mariana/MG), para uso como material de revestimento. Para tanto, realizou-se o peneiramento a úmido para obtenção das matérias-primas dentro de faixas granulométricas pré-determinadas. Em seguida, as amostras foram submetidas a ensaios de caracterização física, química, morfológica e mineralógica (difração de raios X associada ao método Rietveld). Para produção da rocha artificial foram utilizadas combinações de 70% (p/p) de resíduo e 30% (p/p) das resinas poliéster insaturada e epóxi, separadamente. Os corpos de prova foram submetidos ao processamento de vibração a vácuo. Avaliou-se as propriedades mecânicas de resistência à flexão, à compressão e ao impacto de corpo duro. As propriedades físicas foram avaliadas pelos ensaios de absorção de água, porosidade e densidade aparente. Analisou-se também a microestrutura e a resistência ao ataque químico das peças produzidas. Os resultados de caracterização química para as amostras do resíduo indicaram presença majoritária de SiO_2 e Fe_2O_3 . A caracterização mineralógica apontou a predominância das fases quartzo, hematita, goethita e caulinita, nessa ordem. O ensaio de lixiviação provou que esse tipo de resíduo é classificado como inerte. Obteve-se uma rocha artificial com absorção de água e porosidade aparente inferiores a 0,4 e 1,0%, respectivamente. Os maiores valores de resistência à flexão e à compressão alcançados foram iguais a 46,2 e 115,2 MPa, nessa ordem. O ensaio de resistência ao ataque químico mostrou que houve pequena perda de massa apenas para algumas das amostras imersas em solução aquosa de KOH (30 g/L) por 96 horas. De forma geral, a utilização do resíduo de minério de ferro na produção de rocha artificial para revestimento é uma alternativa interessante de reutilização.

Palavras-chave: Resíduo; Minério de Ferro; Rocha Artificial.

ARTIFICIAL STONE PRODUCTION USING WASTE FROM IRON ORE PROCESSING

ABSTRACT

The present work aims to produce artificial stone using waste from iron ore processing, resulting from the rupture of Fundão's dam (Bento Rodrigues, Mariana district/MG), to be use as a coating material. Wet sieving was performed to obtain the raw material within predetermined size ranges. Then, the samples were submitted to physical, chemical, morphological and mineralogical characterization tests (X-ray diffraction associated with the Rietveld method). For the production of artificial stone, combinations of 70% (w/w) of waste and 30% (w/w) of unsaturated polyester and epoxy resins used separately. The samples were submitted to vacuum vibration processing. The mechanical properties of flexural, compressive strength and hard body impact were evaluated. The physical properties were obtained by water absorption, porosity and bulk density tests. The microstructure and resistance to chemical attack were also analyzed. The chemical characterization of the waste samples indicated a major presence of SiO_2 and Fe_2O_3 . The mineralogical characterization indicated the predominance of quartz, hematite, goethite and kaolinite phases, in this order. The leaching test proved that this type of waste is classified as inert. An artificial stone was obtained with water absorption and apparent porosity of less than 0.4 and 1.0%, respectively. The highest values of flexural and compressive strength achieved were equal to 46.2 and 115.2 MPa, in that order. The chemical attack resistance test showed that there was small loss of mass only for some of the samples immersed in aqueous KOH solution (30 g/L) for 96 hours. In general, the use of iron ore waste in the production of artificial stone for coating is an interesting alternative for reuse.

Keywords: Waste; Iron Ore; Artificial Stone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das exportações brasileiras por bem mineral	20
Figura 2 – Fluxograma típico do processamento de minério de ferro	22
Figura 3 – Esquema de geração dos resíduos (lama e arenoso) da Samarco	25
Figura 4 – Projeção da produção de resíduo de minério de ferro no Brasil até 2030	26
Figura 5 – Principais destinos de resíduos de mineração no estado de Minas Gerais	27
Figura 6 – Principais destinações externas dos resíduos de mineração no estado de Minas Gerais	27
Figura 7 – Fases de um compósito	32
Figura 8 – Exemplos de micrografia de alguns materiais compósitos: (a) polipropileno com 30% de celulose de bagaço de cana-de-açúcar, (b) carbetto de tungstênio em matriz de cobalto, (c) fibras de vibro unidirecionais em matriz de poliéster e (d) concreto endurecido	33
Figura 9 – Estrutura molecular de um poliéster insaturado	35
Figura 10 – Processo de cura da resina de poliéster insaturado	36
Figura 11 – Estrutura molecular da resina epóxi	38
Figura 12 – Exemplos de rochas artificiais comercializadas no mercado	39
Figura 13 – Esquema da metodologia adotada para realização do trabalho	45
Figura 14 – Trecho do Rio Doce onde foram coletadas as amostras	46
Figura 15 – Aparato responsável pelo procedimento de vibração a vácuo	52
Figura 16 – Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro	55
Figura 17 – Curvas de distribuição granulométrica para as frações: AG, AM, AF e SA	59
Figura 18 – Imagens obtidas no MEV para a amostra AM	62
Figura 19 – Imagens obtidas no MEV para a amostra AF	62
Figura 20 – Imagens obtidas no MEV para a amostra AG	63
Figura 21 – Imagens obtidas no MEV para a amostra SA	63
Figura 22 – Difratoograma mostrando os resultados do refinamento para a amostra AG	64
Figura 23 – Difratoograma mostrando os resultados do refinamento para a amostra AM	65

Figura 24 – Difractograma mostrando os resultados do refinamento para a amostra AF	66
Figura 25 – Difractograma mostrando os resultados do refinamento para a amostra SA	67
Figura 26 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AG: (a) vista superior e (b) vista interna	70
Figura 27 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AM: (a) vista superior e (b) vista interna	70
Figura 28 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AF: (a) vista superior e (b) vista interna	71
Figura 29 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra SA: (a) vista superior e (b) vista interna	71
Figura 30 – Resultados de absorção de água: (1) sem VV e (2) com VV	73
Figura 31 – Resultados de porosidade aparente: (1) sem VV e (2) com VV	73
Figura 32 – Resultados de resistência à flexão: (1) sem VV e (2) com VV	75
Figura 33 – Resultados de resistência à compressão: (1) sem VV e (2) com VV	77
Figura 34 – Resultados obtidos para altura média de ruptura dos corpos de prova da rocha artificial: (1) sem VV e (2) com VV	80
Figura 35 – Imagens (MEV) de superfícies polidas das amostras: (a) PAG1, (b) PAG2, (c) EAG1 e (d) EAG2	83
Figura 36 – Imagens (MEV) de superfícies polidas das amostras: (a) PAM1, (b) PAM2, (c) EAM1 e (d) EAM2	84
Figura 37 – Imagens (MEV) de superfícies polidas das amostras: (a) PAF1, (b) PAF2, (c) EAF1 e (d) EAF2	85
Figura 38 – Imagens (MEV) de superfícies polidas das amostras: (a) PSA1, (b) PSA2, (c) ESA1 e (d) ESA2	86
Figura 39 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AG após ataque químico	87
Figura 40 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AM após ataque químico	88
Figura 41 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AF após ataque químico	88
Figura 42 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra SA após ataque químico	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composições químicas de diferentes amostras de resíduo de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero	24
Tabela 2 – Propriedades da resina poliéster	37
Tabela 3 – Variação de preços encontrados para rochas naturais e artificiais	41
Tabela 4 – Especificações técnicas da resina poliéster Centerpol® 626	47
Tabela 5 – Especificações técnicas da resina epóxi Araldite® LY 1564 BR	47
Tabela 6 – Combinação de composições utilizadas na preparação da rocha artificial com e sem vibração a vácuo	50
Tabela 7 – Substâncias químicas e suas respectivas concentrações e tempo de exposição utilizados no ataque químico	56
Tabela 8 – Resultados da análise granulométrica a úmido	58
Tabela 9 – Resultados do ensaio de granulometria a laser para as frações AG, AM, AF e SA	59
Tabela 10 – Composição química semiquantativa por FRX	61
Tabela 11 – Composição mineralógica das amostras obtidas por DRX e refinamento Rietveld	68
Tabela 12 – Resultados do ensaio de lixiviação do precipitado	69
Tabela 13 – Resultados de densidade aparente dos corpos de prova elaborados com a amostra AG	74
Tabela 14 – Resultados de densidade aparente dos corpos de prova elaborados com a amostra AM	74
Tabela 15 – Resultados de densidade aparente dos corpos de prova elaborados com a amostra AF	74
Tabela 16 – Resultados de densidade aparente dos corpos de prova elaborados com a amostra SA	74
Tabela 17 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova elaborados com a amostra AG	78
Tabela 18 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova elaborados com a amostra AM	78
Tabela 19 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova elaborados com a amostra AF	79

Tabela 20 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova elaborados com a amostra SA	79
Tabela 21 – Resistência ao impacto de corpo duro dos corpos de prova elaborados com a amostra AG	81
Tabela 22 – Resistência ao impacto de corpo duro dos corpos de prova elaborados com a amostra AM	81
Tabela 23 – Resistência ao impacto de corpo duro dos corpos de prova elaborados com a amostra AF	81
Tabela 24 – Resistência ao impacto de corpo duro dos corpos de prova elaborados com a amostra SA	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- °C – Graus Celsius
- ± – Mais ou menos
- θ – Theta
- $\sigma_{flexão}$ – Tensão de flexão
- μm – Micrômetros
- A – Área da secção transversal
- AA – Índice de absorção de água (%)
- ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AF – Areia Fina
- AG – Amostra Geral
- AM – Areia Média
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- b – Espessura do corpo de prova em milímetros
- C – Metade do valor da espessura
- cm – Centímetro
- cP – Centipoise
- D₁₀ – Diâmetro a 10%
- D₅₀ – Diâmetro a 50%
- D₉₀ – Diâmetro a 90%
- DA – Densidade aparente
- D_{médio} – Diâmetro médio
- DRX – Difração de Raios X
- EAF – Corpo de prova feito com Areia Fina e resina epóxi
- EAG – Corpo de prova feito com Amostra Geral e resina epóxi
- EAM – Corpo de prova feito com Areia Média e resina epóxi
- ER – Corpo de prova feito somente com resina epóxi
- ESA – Corpo de prova feito com Silte-Argila e resina epóxi
- F – Força atingida no ensaio
- FRX – Fluorescência de Raios X
- g – Aceleração da gravidade

- g – Grama
- g/cm³ – Grama por centímetro cúbico
- g/L – Grama por litro
- g/mol – Grama por mol
- GPa – Giga Pascal
- h – Altura de ruptura
- h – Hora
- h³ – Altura do corpo de prova ao cubo
- I_{CG} – Momento de inércia em relação ao centro de gravidade
- J – Joule
- Kg/m³ – Quilograma por metro cúbico
- kV – Quilovolt
- L – Distância entre os apoios
- m – Massa
- m – Metro
- m² – Metro quadrado
- m³ – Metro cúbico
- M_f – Momento fletor
- mA – Miliampére
- min – Minuto
- mL – Mililitro
- mm – Milímetro
- MEK – Metil Etil Cetona
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- MG – Minas Gerais
- MPa – Mega Pascal
- N – Newtons
- NBR – Norma Técnica Brasileira
- NRM – Norma Reguladora de Mineração
- P – Carga de ruptura
- Pa – Pascal
- PA – Porosidade aparente (%)
- PAF – Corpo de prova feito com Areia Fina e resina poliéster
- PAG – Corpo de prova feito com Amostra Geral e resina poliéster

- PAM – Corpo de prova feito com Areia Média e resina poliéster
- pH – Potencial de hidrogênio
- P_i – Peso da peça submersa
- PIB – Produto Interno Bruto
- p/p – Peso por peso
- PR – Corpo de prova feito somente com resina poliéster
- P_s – Peso da peça seca
- PSA – Corpo de prova feito com Silte-Argila e resina poliéster
- PVC – Policloreto de vinila
- P_u – Peso da peça saturada em água, úmida
- RC – Resistência à compressão uniaxial
- ROM – Run-of-mine
- SA – Silte-Argila
- S. A. – Sistema Autônomo
- UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
- USD ou US\$ – United States Dollar (dólar americano)
- VV – Vibração a vácuo
- v/v – Volume por volume
- W – Energia de ruptura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Minério de Ferro	19
3.2 Principais Métodos de Processamento de Minério de Ferro	21
3.3 Resíduo Gerado nas Etapas de Processamento do Minério de Ferro e sua Disposição em Barragens	23
3.4 Reutilização do Resíduo de Minério de Ferro	29
3.5 Materiais Compósitos	31
3.6 Compósitos de Matriz Polimérica	33
3.6.1 Matriz de resina poliéster insaturada	35
3.6.2 Matriz de resina epóxi	37
3.7 Rocha Artificial	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 Materiais	46
4.2 Caracterização das Amostras do Resíduo de Mineração de Ferro	48
4.2.1 Peneiramento a úmido	48
4.2.2 Distribuição do tamanho de partículas por difração a laser	48
4.2.3 Fluorescência de raios X (FRX)	48
4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	49
4.2.5 Difração de raios X (DRX) e quantificação das fases pelo Método de Rietveld	49
4.2.6 Ensaio de lixiviação	49
4.3 Produção e Composição da Rocha Artificial	50
4.4 Propriedades Físicas, Mecânicas e Estruturais da Rocha Artificial	52
4.4.1 Ensaio de absorção de água, densidade e porosidade aparente	52
4.4.2 Resistência à flexão	53
4.4.3 Resistência à compressão	54
4.4.4 Resistência ao impacto de corpo duro	55
4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	56

4.4.6 Resistência ao ataque químico	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 Caracterização do Resíduo de Minério de Ferro	58
5.1.1 Peneiramento a úmido	58
5.1.2 Distribuição do tamanho de partículas por difração a laser	59
5.1.3 Composição química semiquantitativa por fluorescência de raios X (FRX)	60
5.1.4 Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	61
5.1.5 Determinação e quantificação das fases por difração de raios X e refinamento Rietveld	64
5.1.6 Teste de lixiviação	69
5.2 Caracterização Física e Mecânica da Rocha Artificial	69
5.2.1 Aspectos visuais	69
5.2.2 Absorção de água, porosidade e densidade aparente	72
5.2.3 Resistência à flexão de três pontos	75
5.2.4 Resistência à compressão e módulo de elasticidade	77
5.2.5 Ensaio de impacto de corpo duro	79
5.3 Análise Microestrutural Interna da Rocha Artificial	82
5.4 Resistência ao Ataque Químico da Rocha Artificial	87
6 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO

A indústria da mineração desempenha um papel fundamental na geração de rendimentos econômicos para um país, mediante a exploração de recursos naturais. O Brasil registra décadas de realização de atividade de extração e beneficiamento de minério de ferro. A prática minerária do ferro configura-se como a mais importante atividade econômica do setor mineral, devido aos grandes volumes comercialização do mineral ferro (WOLFF; COSTA, 2008; MME, 2009).

A colaboração proveniente da exportação e importação do minério de ferro representa grande importância no contexto econômico mundial. O Brasil está inserido no grupo dos cinco países detentores das maiores reservas desse minério, indicando a relevância da produção mineral brasileira do ferro. O aço é o principal subproduto obtido a partir do beneficiamento do ferro e é aplicado em diferentes setores, tais quais na indústria de equipamentos e máquinas e na construção civil (FERNANDES; ARAÚJO, 2016).

Segundo publicado pelo último Anuário Mineral Brasileiro (BRASIL, 2019), a produção mineral de ferro em 2017 atingiu um total de 453,7 milhões de toneladas, com um teor médio de 63,72% de ferro, rendendo um saldo comercial de 63,18 bilhões de reais. Dessa forma, fica entendido que o Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo. Entretanto, a extração deste minério gera um grande volume de resíduos sólidos, tornando a indústria extrativa mineral brasileira cada vez mais dependente de barragens para sua destinação final (GUEDES; SCHNEIDER, 2017).

Avalia-se que as barragens de resíduos aumentam proporcionalmente em escala e número. Estatisticamente, estima-se que a cada 30 anos, cavas de mineração e barragens de resíduos ampliam dez vezes em volume e dobram em profundidade ou altura, o que eleva a probabilidade de ruptura dos reservatórios de resíduos e agrava a proporção do dano. Este fato possibilita o entendimento de que o risco de acontecer o rompimento tende a expandir 20 vezes a cada 30 anos, de acordo com as projeções de crescimento da demanda mundial por minérios (FRANÇA, 2009).

A exemplo disso, destaca-se o abrupto rompimento da barragem de resíduos de minério de ferro de Fundão, na unidade de Germano, localizada em Mariana (MG), operada pela Samarco (IBAMA, 2015). Outro exemplo mais recente foi o

rompimento de uma barragem controlada pela Vale S.A., localizada no ribeirão Ferro-Carvão, na região do Córrego do Feijão, município de Brumadinho (MG), que resultou em um dos maiores desastres humanitário e ambiental com resíduos de mineração no Brasil. O desastre industrial é considerado como o segundo maior do século e o maior acidente de trabalho do Brasil (BBC NEWS, 2019).

Segundo o Ipea (2012), a contribuição média da substância ferro para a geração de resíduos advindos da atividade minerária no Brasil está projetada em 41,38% entre os anos de 2010 e 2030. Gomes e Pereira (2002) citam em seu estudo que nos sistemas de lavra e beneficiamento do minério de ferro são gerados e eliminados volumes de resíduos sólidos na ordem de 40% do total mineral produzido. Entretanto, essa taxa sofrerá variações de acordo com o teor de ferro existente nas jazidas e com as exigências do mercado.

Portanto, fomentar pesquisas de desenvolvimento tecnológico que objetivem direcionar o resíduo advindo do processamento do minério de ferro, que seria descartado em barragens, a fim de reaproveitá-lo e aplicá-lo em cadeias produtivas, gerando bens com valor econômico agregado, é de extrema importância.

Uma nova variável estratégica e mercadológica que vem se posicionando de forma aparentemente crescente e apreciável é o material rochoso artificial. Rochas artificiais são classificadas como materiais compósitos, uma vez que para sua elaboração podem ser utilizados diferentes tipos de cargas minerais (com variadas granulometrias) e um componente aglomerante, usualmente uma resina polimérica (ABIROCHAS, 2018).

As rochas artificiais ou sintéticas apresentam-se, no plano internacional, como uma forte concorrente dos produtos de revestimento, como as rochas ornamentais. Pois, o referido material imita com perfeição o padrão estético dos materiais rochosos naturais, possuindo designs diversificados (AMN, 2019a).

A produção de rocha artificial pode possibilitar ao Brasil, país consumidor de rochas ornamentais, formas para reduzir o volume de resíduo de minério de ferro eliminado diariamente, além da possibilidade de inclusão de um novo produto no catálogo da indústria de construção civil.

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma rota de reaproveitamento do resíduo sólido proveniente do processamento de minério de ferro, advindo do rompimento da barragem de Fundão (Mariana – MG), na produção de rocha artificial, para uso como material de revestimento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Produzir rocha artificial utilizando como carga mineral resíduo advindo do processamento de minério de ferro, para uso como material de revestimento.

2.2 Objetivos Específicos

- Classificar e separar o resíduo quanto ao tamanho das partículas, utilizando peneiramento a úmido.
- Identificar e quantificar as fases mineralógicas presentes no resíduo por faixa granulométrica, pelo método de Rietveld;
- Produzir rochas artificiais, a partir de frações granulométricas obtidas durante a etapa de separação do resíduo, resinas poliéster e epóxi, utilizando ou não o mecanismo de vibração a vácuo;
- Avaliar as propriedades físicas: porosidade, absorção de água e densidade aparente da rocha artificial;
- Avaliar as propriedades mecânicas: resistência à flexão, à compressão e ao impacto de corpo duro da rocha artificial;
- Avaliar a resistência ao ataque químico da rocha artificial;
- Atavés da análise dos resultados obtidos, avaliar a viabilidade de utilização da rocha artificial produzida como material de revestimento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de Ferro

O elemento químico ferro (Fe) é a quarta substância mais abundantemente encontrada na crosta terrestre, apresentando-se como componente em grande parte das classes minerais. Estima-se que mais de 400 minerais apontam a existência de teores de Fe em sua constituição, cujas concentrações variam entre 1 e 70%. Fato que pode estar associado à sua alta capacidade de oxidação, de acordo com o ambiente em que o mesmo esteja inserido (TAKEHARA *et al.*, 2009).

A definição do termo “minério de ferro” está associada ao conceito de um material natural que possui diferentes teores de Fe, que seja capaz de ser minerado e processado, possui proporções minerais contaminantes, como alumínio (Al), fósforo (P), silício (Si), magnésio (Mg) e carbonato de cálcio (CaCO₃) (PORTES, 2013).

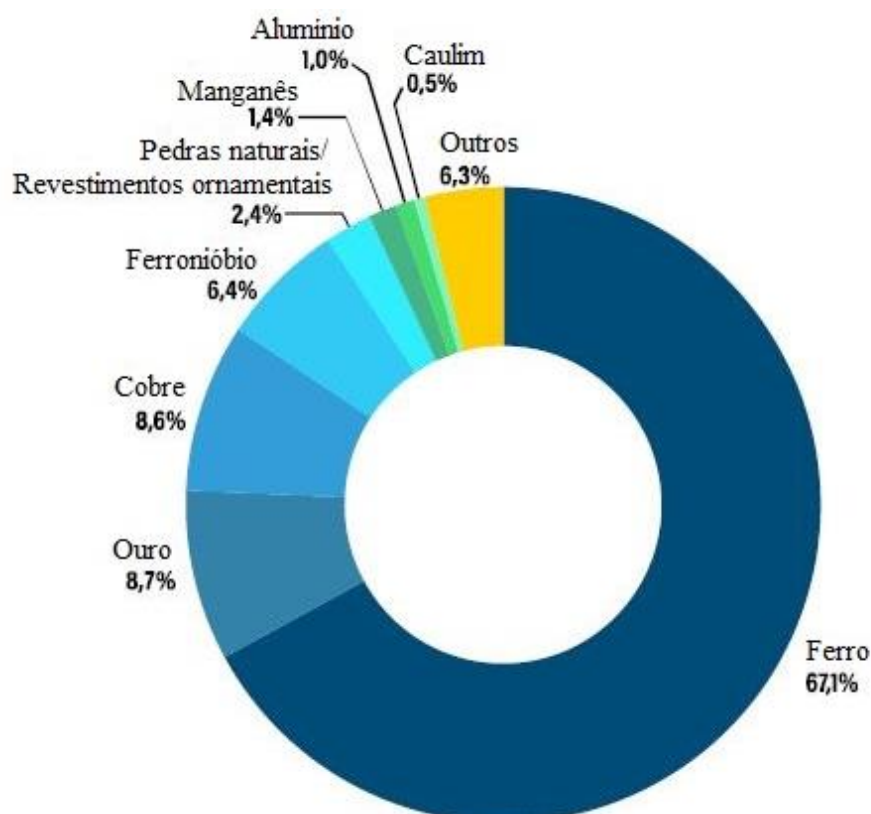
O território brasileiro, devido a sua vasta extensão e por se encontrar amplamente localizado dentro da faixa de clima tropical, tem como resultado de sua formação rochosa uma quantidade expressiva de depósitos de minerais, mediante a deposição de camadas espessas de coberturas intemperizadas que, por sua vez, deram origem às volumosas jazidas de minério de ferro (POSSA; NASCIMENTO, 2010).

Dessa forma, o Brasil categoriza-se como detentor de um dos maiores depósitos de minério de ferro do mundo. De acordo com a última edição do Sumário Mineral, o Brasil ocupa a segunda posição no ranking mundial de reserva de minério de ferro lavrável, estando atrás somente da Austrália. As próximas colocações são assumidas pela Rússia, China e Índia, respectivamente. O Brasil é o segundo maior produtor desse minério no mundo, sendo responsável por cerca de 19% da produção total no ano de 2019 (AMN, 2019b).

Ressalta-se que, de acordo com o último levantamento realizado, a mineração no Brasil foi a atividade responsável por cerca de 1,4% do PIB nacional referente ao segmento da indústria extrativa, sendo capaz de proporcionar a geração de produtos que são amplamente utilizados em diversos ramos industriais, tais como siderúrgicas, petroquímicas, metalúrgicas, fertilizantes, entre outros (IBRAM, 2019).

O minério de ferro representa a maior parcela de bem mineral produzido e exportado, como demonstrado pela Figura 1. Entretanto, para extraí-lo, um grande volume de resíduos é gerado e, conseqüentemente, a disposição destes torna-se um problema para a indústria mineral (IBRAM, 2016).

Figura 1 – Distribuição das exportações brasileiras por bem mineral



Fonte: Adaptado de AMN (2019a).

Segundo Silva (2007), a mineração do ferro causa impacto ambiental significativo, uma vez que altera acentuadamente a área minerada e as regiões vizinhas onde são depositados os resíduos. Com o decorrer dos anos, torna-se maior a necessidade de lavrar minérios de ferro cada vez mais pobres e em maiores profundidades, o que reflete na geração de um maior volume de resíduos descartados em barragens. Por sua vez, o aumento do volume de resíduos estabelece a condição de que as barragens de resíduos ganhem maiores dimensões, tornando-as mais vulneráveis a um possível rompimento (FIGUEIREDO, 2007).

Um exemplo de tragédia envolvendo barragens foi o rompimento da barragem da Samarco, em Mariana. A barragem de Fundão, propriedade de domínio da Vale

S. A. e BHP Billiton rompeu-se no dia 5 de novembro de 2015, desencadeando o vazamento de um volume de 35 milhões de m³ de resíduos de minério de ferro. Trazendo ao óbito 17 vítimas e deixando duas pessoas desaparecidas. 35 cidades foram afetadas em Minas Gerais e 4 no Espírito Santo. 11 toneladas de peixes foram mortas. 1265 foi o número de desabrigados que tiveram que ser realocados. E cerca de 1,5 mil hectares de vegetação foram destruídos pela lama entre as cidades de Mariana (MG) e Linhares (ES) (G1, 2015).

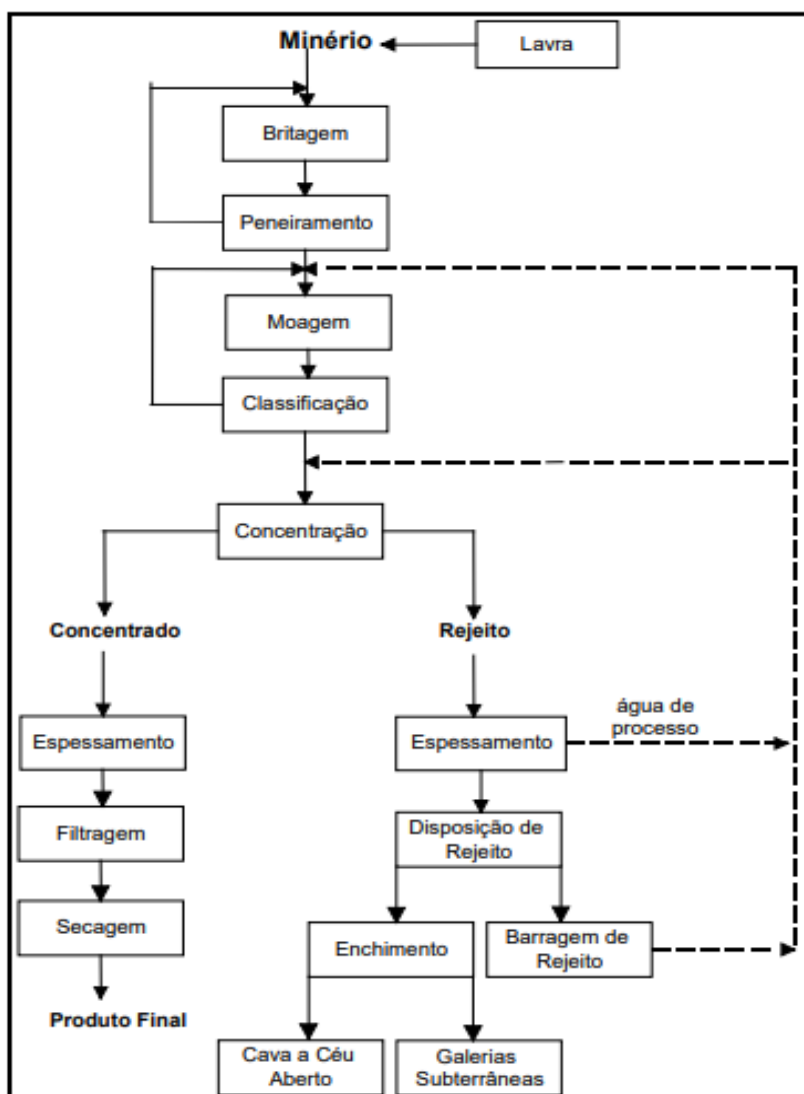
3.2 Principais Métodos de Processamento de Minério de Ferro

Os minerais de ferro mais explorados no Brasil são a hematita (o principal mineral de ferro) e o itabirito, que são rochas ferríferas compostas de hematita (Fe_2O_3) e quartzo (SiO_2) (IBRAM, 2016). Além destes, a magnetita (Fe_3O_4), a goethita (FeOOH) e a siderita (FeCO_3) são outros minerais que contêm ferro com concentrações consideráveis em suas composições. Sabe-se também que o minério de ferro é constituído tanto por esses minerais de ferro, que apresentam valor econômico agregado, quanto de outros minerais, que não apresentam valor econômico para a mineração de ferro. Portanto, devido a presença desses minerais é necessário realizar a etapa de tratamento (beneficiamento/processamento) dos minérios de ferro para retirada desses minerais não úteis (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO, 2001).

Segundo a Norma Reguladora de Mineração, NRM-18 – Beneficiamento (DNPM, 2002), entende-se por tratamento (beneficiamento/processamento) de minérios os processos que visam a cominuição, concentração ou purificação dos minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais, Figura 2.

De acordo com Gomes (2009), no Brasil, uma ampla parcela do produto advindo do beneficiamento do minério de ferro é obtida unicamente pelas etapas de britagem, peneiramento e classificação. O estágio de moagem por vezes é necessário, para liberar o minério ou reduzir sua granulometria para a próxima fase do processo. E normalmente, quanto maior for o percentual de finos presente, maior será a quantidade de contaminantes existentes, como sílica, alumina, entre outros.

Figura 2 – Fluxograma típico do processamento de minério de ferro



Fonte: Luz et al. (2010).

Elevados volumes de água são utilizados na etapa de beneficiamento do minério de ferro. Conforme CNI e IBRAM (2012), uma vazão de 0,18 a 1,0 m³/ton. de água é consumida para cada unidade mineral de ferro produzida. Todo esse recurso hídrico destina-se à lavagem e retirada de impurezas, de forma que o resíduo desse processo se apresenta na conformação de lama (PORTES, 2013).

Observa-se pela Figura 2 que o minério bruto, denominado ROM (“run-of-mine”), proveniente da etapa de lavra, passa por um somatório de operações unitárias, sendo elas:

- I. Cominuição: britagem e moagem;
- II. Peneiramento e classificação;

- III. Concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação, entre outros;
- IV. Desaguamento: espessamento e filtração;
- V. Secagem: secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado;
- VI. Deposição do resíduo.

A grande quantidade de resíduo gerado durante o processo de beneficiamento encontra-se na forma de particulados com granulometrias finas, dispersas e com pouca capacidade de sedimentação. Além disso, os resíduos podem conter em sua composição sais, compostos orgânicos sintéticos e reagentes, quando o processo de beneficiamento utilizado for flotação. Estes componentes são potenciais causadores de danos à fauna e flora, quando descartados indevidamente, sem tratamento prévio, no meio ambiente (FENG *et al.*, 2004; PAL *et al.*, 2010; LIPHADZI; VERMAAK, 2017).

Portanto, nota-se que os efluentes originados na etapa de tratamento de minério de ferro não podem ser descartados em afluentes hídricos, como lagos e rios. Torna-se, então, necessário dar um direcionamento correto para esses resíduos. A deposição do mesmo é realizada de algumas formas, tais como acondicionamento em cavas a céu aberto, galerias subterrâneas ou contidas em barragens (forma mais adotada) (SAMPAIO *et al.*, 2010).

3.3 Resíduo Gerado nas Etapas de Processamento do Minério de Ferro e sua Disposição em Barragens

O resíduo sólido de atividade minerária ou resíduo de mineração é concebido como a fração do minério desprovida de mineral útil ou sem valor econômico, proveniente do processo de beneficiamento de minério. O resíduo pode apresentar características variáveis, dependendo do tipo de minério processado e do método de beneficiamento empregado (SOARES, 2010).

O beneficiamento físico do minério de ferro, que se dá por meio de processos de concentração, separação e flotação, é responsável por gerar uma elevada quantidade de resíduos que contêm diferentes minerais em sua composição. Normalmente, os minerais associados aos resíduos da mineração de ferro são caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), goethita ($\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$), hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e quartzo (SiO_2), sendo que os minerais de ferro apresentam um

teor de ferro aproximadamente de 45% em peso. Esse percentual de ferro contido no resíduo deve-se ao fato de que as tecnologias disponíveis para o beneficiamento possuem algumas limitações, principalmente quando o minério se encontra em tamanhos extremamente finos (WOLFF; COSTA, 2008; LI *et al.*, 2010).

Segundo Yang *et al.* (2014) os principais constituintes químicos do resíduo de minério de ferro são os óxidos de silício (SiO_2), de ferro (Fe), de alumínio (Al_2O_3), de cálcio (CaO), de enxofre (S), de manganês (Mn) e por fosfatos (PO_4^{3-}). As características químicas dos resíduos podem variar conforme a eficiência do processo de beneficiamento, o local e as substâncias químicas envolvidas no processo de extração (ARAÚJO, 2006). Nessa perspectiva, a Tabela 1 apresenta resultados de análises químicas obtidos por diferentes autores encontrados na literatura que estudaram amostras de resíduo de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero (MG).

Tabela 1 – Composições químicas de diferentes amostras de resíduo de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero

Compostos	Massa (%)					
	Oliveira (2006)	Gomes (2009)	Guimarães (2011)	Guimarães <i>et al.</i> (2012)	Andrade (2014)	Peixoto <i>et al.</i> (2016)
SiO_2	27,61	62,70	6,36	24,06	44,47	7,12
Al_2O_3	7,09	0,61	7,23	6,41	5,49	-
CaO	-	-	-	5,79	-	-
Fe_2O_3	42,03	24,97	52,46	43,83	49,49	92,32
SO_3	-	-	-	-	-	0,41
Mn	-	-	0,216	1,552	-	-
Outros	0,069	0,016	0,224	0,075	0,55	0,15
Perda ao fogo	3,91	0,94	9,37	3,61	-	7,8

Fonte: Adaptado de Bezerra (2017).

Geralmente, o resíduo gerado está na forma de lama, que se caracteriza por ser muito abrasiva, com viscosidade elevada e percentual de sólidos variando entre 15 e 55%. O uso de espessadores convencionais, de modo geral, condiciona a obtenção de lamas com percentual de sólidos no intervalo de 40 a 50%. De acordo

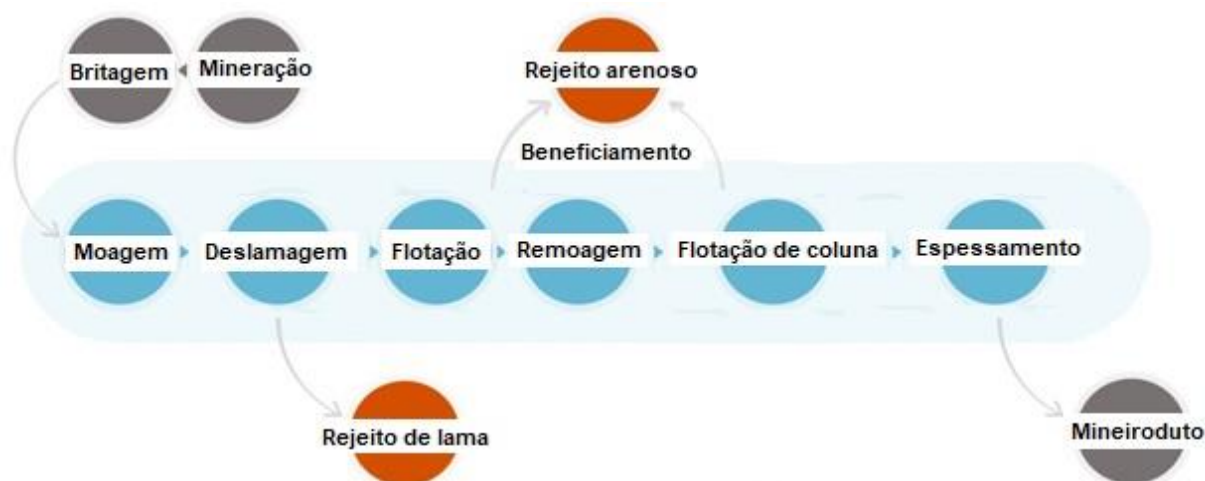
com sua granulometria, o resíduo é tido com um material fino, variando de colóides a areia (SOARES, 2010; PEIXOTO *et al.*, 2016).

Na indústria minerária é comum classificar o resíduo pela faixa de tamanho do grão. Assim, quando o diâmetro da partícula é maior que 50 μm , estes são tratados como resíduos grosseiros ou granulares. Quando o diâmetro está entre 10 μm e 50 μm , são chamados de resíduos finos. Quando o diâmetro é inferior a 10 μm , o resíduo é conhecido como ultrafino ou lama (WOLFF; COSTA, 2008).

Dependendo da natureza do minério e da forma como o beneficiamento foi realizado, o resíduo de mineração do ferro pode exibir diferentes aspectos morfológicos. Apresentando-se, por exemplo, como um material arenoso (granular) e não plástico, ou como um material de granulometria fina (lama) e de alta plasticidade (PINTO, 2013). De acordo com Araújo (2006), a dimensão do grão pertencente ao resíduo situa-se normalmente na faixa de areias finas e silte.

Na planta de beneficiamento da Samarco Mineração S. A., os resíduos finos (lama), entre 10 e 15 μm , são gerados após a etapa de deslamagem do minério de ferro, que ocorre na fase de concentração. O objetivo da deslamagem é eliminar partículas de granulometria inferior a 5 μm , evitando que estas cheguem à etapa de flotação (PORTES, 2013). O resíduo proveniente do circuito de flotação é composto principalmente por partículas de quartzo, arenosas e relativamente grosseiras. Na etapa final, as lamas juntamente com o resíduo arenoso são encaminhadas para a barragem de resíduos, onde ocorre a decantação (OLIVEIRA *et al.*, 2019). A Figura 3 mostra o esquema de geração dos resíduos (lama e arenoso) da Samarco.

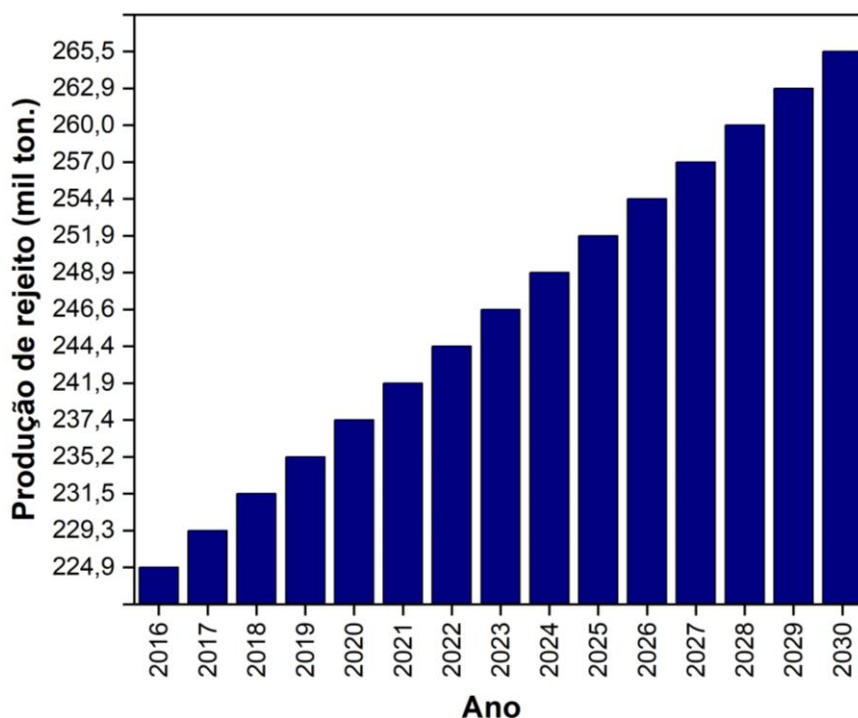
Figura 3 – Esquema de geração dos resíduos (lama e arenoso) da Samarco



Fonte: Adaptado de Samarco (2019).

Silva *et al.* (2012) realizou um levantamento estatístico (Figura 4) relacionado à projeção da produção de resíduos de minério de ferro no Brasil até 2030. Esse levantamento transparece a importância do estudo de caracterização e de reaproveitamento deste material, visto que seu descarte inadequado traz inúmeras consequências negativas para o meio ambiente.

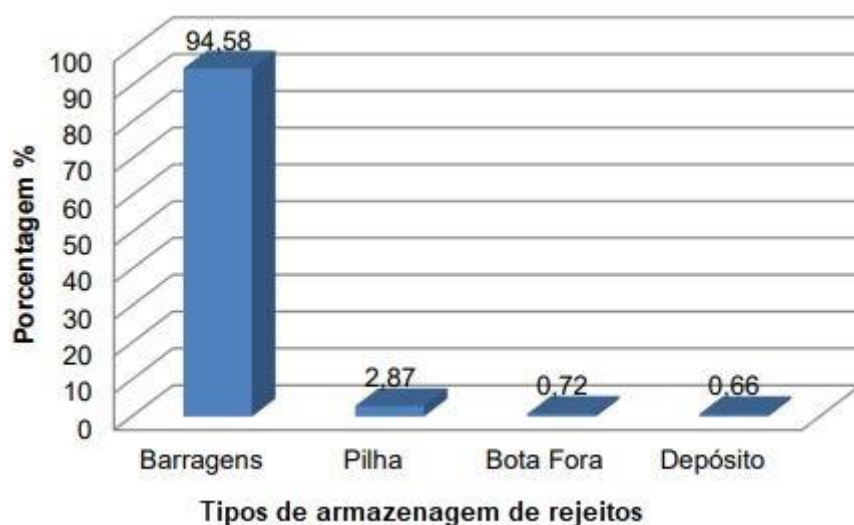
Figura 4 – Projeção da produção de resíduo de minério de ferro no Brasil até 2030



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2012).

Atualmente, a tecnologia mais utilizada para disposição de resíduos na forma de lama é o seu lançamento em barragens, como pode ser visto na Figura 5. A construção destas estruturas de contenção pode se dar pelo uso tradicional (terra compacta) ou pelo reaproveitamento do próprio material resultante do beneficiamento ou do estéril. Outra forma de destinação dada ao resíduo gerado nas etapas de beneficiamento é o seu encaminhamento a fins externos à indústria de mineração, como mostra a Figura 6.

Figura 5 – Principais destinos de resíduos de mineração no estado de Minas Gerais



Fonte: Adaptado de FEAM (2018).

Figura 6 – Principais destinações externas dos resíduos de mineração no estado de Minas Gerais



Fonte: Adaptado de FEAM (2018).

A crescente geração de resíduos tem proporcionado um aumento considerável na demanda por implantação de edificações armazenadoras, tornando a barragem de resíduo uma das principais obras associadas às plantas de mineração. Em concomitância, nota-se também a necessidade do aumento das dimensões dessas barragens. Não obstante, se a obra não for realizada dentro da margem de segurança, a negligência pode ser um agravante na modificação da estrutura, fato este que, conseqüentemente, aumenta a probabilidade de um

possível rompimento, devido ao aumento do volume de resíduos (SOARES, 2010; CHIGANNE *et al.*, 2014).

A implantação e edificação de barragens devem estar em concordância com as exigências de proteção ambiental e de segurança, que compreende entre vários outros fatores, a recuperação da água refugada no processo de beneficiamento e reinserção da mesma nos circuitos da mina e na planta de concentração. No Brasil, o dimensionamento e funcionamento da barragem para disposição do resíduo em polpa e a recuperação de água clarificada seguem os ditames e especificações normatizadas e reguladas pelas Leis Federais nº 12.334/2010 e 12.305/2010 (BRASIL, 2010) e Normas ABNT/NBR 13028/2017 e 13029/2017 (ABNT, 2017).

Desde o século XVII, quando se iniciaram as atividades minerárias no Brasil, trágicas eventualidades relacionadas a essa prática, sobretudo o rompimento de barragens de resíduo, vêm ocorrendo. Mortes, destruição da flora (camada de lama depositada impede que o solo seja fértil), desabituação e extinção da fauna, contaminação de bacias hidrográficas, soterramento e destruição de áreas povoadas são catástrofes registradas, decorrentes desse tipo de ruptura, uma vez que a lama contida no reservatório se espalha com elevada velocidade e turbulência por uma vasta extensão de área. Sabe-se que o tempo de recuperação de áreas atingidas por este resíduo é estimado em décadas. À vista disso, medidas corretivas devem ser tomadas, com o propósito de minimizar os danos causados (LACAZ *et al.*, 2017).

Dentre os acidentes ocorridos por rompimento de barragens, pode-se citar o rompimento da barragem de Fundão, pertencente ao complexo minerário de Germano, no município de Mariana/MG. A barragem continha em sua totalidade 50 milhões de m³ de resíduos de minério de ferro. Dos 50 milhões de m³ de resíduos de minério de ferro contidos na Barragem do Fundão, 34 milhões foram lançados ao meio ambiente e 16 milhões foram carregados em direção ao litoral do estado do Espírito Santo, ao longo do Rio Doce (BRASIL, 2015). Este desastre foi classificado como de nível IV, que significa desastre de grande porte e é considerado como nível máximo. Os desastres deste nível se caracterizam pela grande importância e magnitude dos danos provocados e do alto prejuízo, tanto econômico como ambiental (BRASIL, 2015).

Um acidente ocorrido recentemente que também pode ser citado foi o rompimento da barragem da Vale no Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG). Que gerou como impacto ambiental o espalhamento de 13 milhões de metros cúbicos de

resíduo de minério de ferro por Brumadinho e a lama percorreu 98 quilômetros de distância da barragem rompida, alcançando o Rio Paraopeba. Além disso, 2,7 milhões de metros quadrados de cobertura vegetal foram atingidos. Até agora, com a identificação, o número oficial de mortos na tragédia é igual a 255, sendo que 15 pessoas ainda são dadas como desaparecidas (G1, 2019; FOLHA DE S. PAULO, 2019).

Portanto, fica entendido que existe uma necessidade cada vez maior de elaboração de projetos que visem o desenvolvimento de produtos que tenham como objetivo agregar valor ao resíduo de minério de ferro descartado em barragens.

3.4 Reutilização do Resíduo de Minério de Ferro

A quantidade elevada de resíduo gerado pelo processo de beneficiamento mineral do ferro ainda está longe de ser utilizada em sua totalidade como produto ou sub-produto, entretanto, alternativas tecnológicas de reaproveitamento dessa carga mineral vêm sendo desenvolvidas, com o intuito de possivelmente reduzir os impactos ambientais decorrentes dessa atividade industrial.

Algumas razões podem ser associadas à justificativa de se utilizar a lama de barragens de mineração para produção de materiais compósitos, dentre elas ressaltam-se: a minimização dos custos de descarte (disposição), diminuição da área reservada para descarte (permitindo que o espaço de terra polpado sirva para outras atividades) e retorno financeiro oriundo da venda do resíduo e/ou do produto derivado (uma vez que a lama pode substituir alguns recursos naturais escassos ou caros) (ZIMMER, 2010; DEY *et al.* 2012).

Muitos pesquisadores vêm desenvolvendo diferentes produtos a base de resíduo de mineração de ferro. Entre eles pode-se citar:

- 1- Bastos *et al.* (2016) utilizou o resíduo de mineração de ferro de barragens como material de estrada e constatou que o seu uso é viável como camadas de pavimentação de estradas, uma vez que seja quimicamente estabilizado;
- 2- Kuranchie *et al.* (2015) utilizou o resíduo como agregado no concreto e verificou que o mesmo pode ser usado em substituição completa aos agregados convencionais. O resíduo ainda proporcionou uma melhora de

11,56% na resistência à compressão quando comparado ao concreto tradicional;

- 3- Yao *et al.* (2015) produziram telhas com uma camada vitro-cerâmica a partir de resíduo de mineração de ferro e matérias-primas comerciais, a fim de caracterizar as propriedades de absorção de micro-ondas sobre o substrato cerâmico, e comprovaram que o mesmo foi ótimo para solucionar a poluição eletromagnética de forma rentável e sustentável;
- 4- Fontes *et al.* (2016) avaliou a viabilidade técnica do uso do resíduo como material de construção, para argamassas de assentamento e revestimento, que apresentaram maior densidade e melhores propriedades mecânicas que os convencionais;
- 5- Osinubi *et al.* (2015), estudaram o efeito do uso do resíduo sobre o cimento de argila preta tropical modificada e entenderam pelos resultados dos testes ensaiados que as propriedades do solo modificado melhoraram, quando tratados com misturas de cimento-resíduo de minério de ferro;
- 6- Costa *et al.* (2014) produziram um trabalho no qual foi utilizado resíduo de sinter feed, oriundo de atividades mineradoras de ferro, como agregado, a fim de produzir concreto para fabricação de peças pré-fabricadas, piso intertravado, para pavimentação, obtendo resultados positivos e otimistas quanto ao seu uso;
- 7- Sant'Ana Filho (2013) desenvolveu um projeto cujo objetivo foi avaliar a possibilidade da utilização de lama de barragem de atividade mineradora de ferro para produção de blocos intertravados, chegando à conclusão de que o material produzido apresentou resultados de propriedade mecânica dentro da norma e obteve um percentual de poros reduzido, o que pode aumentar a vida útil dos pavimentos quando empregados.
- 8- Tavares e Lameiras (2013) obteve pigmentos de óxido de ferro oriundos da lama proveniente do beneficiamento mineral do minério de ferro itabirítico para a produção de tintas. As tintas apresentaram características de cobertura, viscosidade, secagem, aderência, acabamento e tingimento equivalentes às disponíveis no mercado.

Segundo Carvalho *et al.* (2018b), um grupo de pesquisadores da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) estão desenvolvendo

uma tecnologia capaz de transformar resíduos de mineração de ferro em produtos que podem alimentar a indústria de chips de computador.

Ressalta-se ainda que não foram encontrados trabalhos na literatura (teses e artigos) referentes à reutilização do resíduo advindo do processamento do minério de ferro, em específico, como carga mineral na produção de rocha artificial para utilização como material compósito em revestimentos.

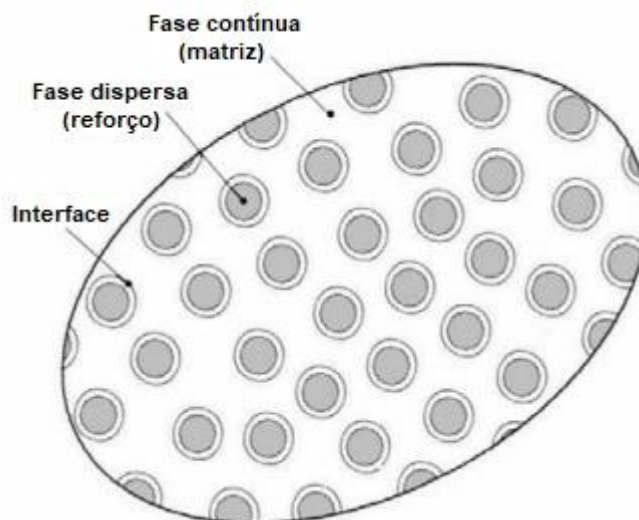
3.5 Materiais Compósitos

Uma definição geral adotada para materiais compósitos é a de que esta classe é formada por uma combinação de dois ou mais, macro ou micro, constituintes que se diferem na morfologia e na composição química, e são insolúveis entre si (SMITH, 1998). De outra forma, entende-se que um compósito pode ser qualquer material multifásico que apresente uma proporção significativa das propriedades atribuídas a todas as fases dos constituintes existentes na mistura, de modo que a combinação resultante apresente propriedades superiores à de cada componente individual (CALLISTER, 2012).

Um dos componentes ou fase da combinação, considerado descontínuo, proporciona a principal resistência ao esforço do material compósito final, este é conhecido como reforço. O outro, contínuo, é um caminho de deslocamento desse esforço, chamado de matriz. Interações interfaciais satisfatórias entre os componentes têm influência dominante nas propriedades mecânicas dos compósitos (MANO, 1991). A força da ligação adesiva na interface é um fator importante para uma boa interação. Dessa forma, pelo molhamento de contato ocorre a aproximação matriz/reforço, promovendo um empacotamento mais eficaz (MILLER *et al.*, 1988). A Figura 7 exibe fases de um compósito.

As propriedades dos compósitos dependem tanto das características da matriz quanto do reforço (como sua distribuição, quantidade, tamanho e forma). Quanto ao tipo de agentes de reforço, encontram-se os fibrosos (fibras longas ou curtas), os particulados (partículas dispersas ou grandes), os estruturais (laminados) e os nanocompósitos (constituído por nanopartículas). Já os agentes de matriz podem ser cerâmicos, metálicos ou poliméricos (CUPERTINO, 2009).

Figura 7 – Fases de um compósito



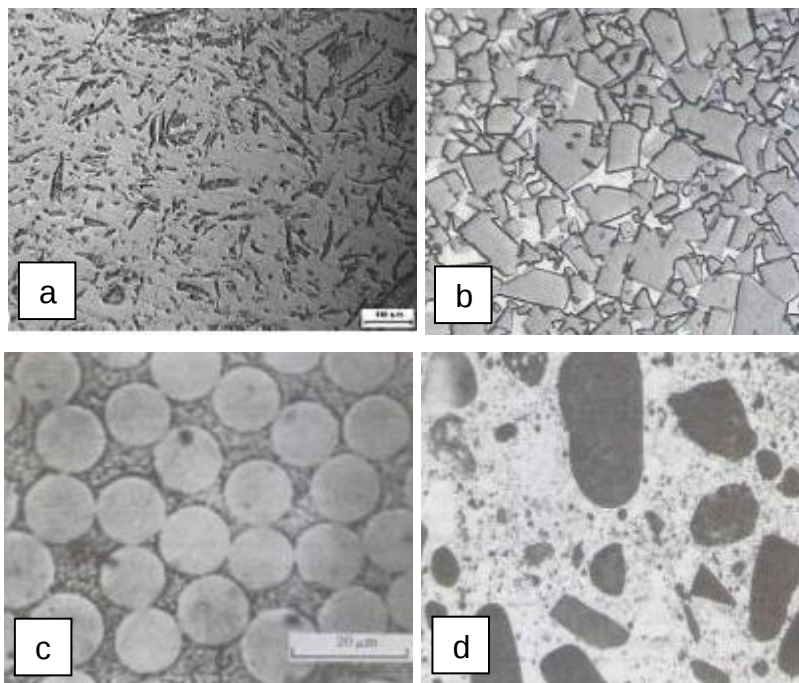
Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai (2006).

A interface de contato entre matriz e reforço é responsável pela transferência de carga entre essas duas fases, determinando as propriedades mecânicas do material final. Os mecanismos de adesão entre os componentes de um compósito podem ser: adesão mecânica, interdifusão, atração eletrostática, ligação química, adsorção e molhamento. A ligação química e a adsorção são as formas mais comuns de obter reforço. Uma vez que há pouca afinidade entre a carga e o polímero, agentes de acoplamento são utilizados afim de que a superfície da carga seja modificada (RABELLO, 2007).

A resistência e rigidez é proveniente do reforço, podendo ser formado por partículas ou fibras. Assim, quanto maior a quantidade de reforço utilizada, maior a resistência e rigidez do material compósito. Quando a fase dispersa é composta por partículas, esta é chamada de carga. As matrizes mais comumente utilizadas são as poliméricas, uma vez que são de fácil manipulação (REDDY, 2004). A Figura 8 mostra exemplos de micrografia para quatro diferentes tipos de compósitos.

A escolha correta da classe de material usada como reforço é muito importante, pois interferirá tanto nas propriedades finais do compósito como também influenciará no custo do produto resultante. É comum utilizar mais de um tipo de reforço, afim de se obter propriedades únicas e/ou de reduzir custos, gerando uma combinação híbrida (SANTOS; MELO, 2009).

Figura 8 – Exemplos de micrografia de alguns materiais compósitos: (a) polipropileno com 30% de celulose de bagaço de cana-de-açúcar, (b) carbetto de tungstênio em matriz de cobalto, (c) fibras de vibro unidirecionais em matriz de poliéster e (d) concreto endurecido



Fonte: Luz *et al.* (2006), Callister (2012) e Smith (1998).

3.6 Compósitos de Matriz Polimérica

Os materiais usualmente utilizados como matrizes de compósitos são os polímeros, especificamente as resinas. A matriz polimérica pode ser dividida em: termoplástica (que podem ser conformada, moldada ou reciclada em temperatura controlada) e termorrígida ou termofixa (cuja forma não pode ser modificada e não permite reciclagem após a cura) (MACÊDO NETO, 2016).

No processamento de compósitos, as matrizes termorrígidas são usadas com mais frequência, uma vez que são fáceis de manusear, proporcionam boa molhabilidade aos reforços, estão disponíveis de forma variada no mercado, possuem propriedades interessantes e custo relativamente baixo (MOTA, 2016).

Segundo Silva e Figueiredo (2010), as resinas termorrígidas originam-se de oligômeros de peso molecular baixo, cuja estrutura química pode ser representada por pequenas unidades repetidas (denominadas mero), que tendem a se apresentar na forma de um líquido de média ou baixa viscosidade, cuja reação de reticulação

ocorre pela adição de um agente de cura (como um endurecedor ou um iniciado) ou pelo aumento da temperatura.

As resinas são classificadas de acordo com sua origem, podendo ser denominadas como naturais, semi-sintéticas e sintéticas. As resinas naturais são oriundas de fontes animais, vegetais ou minerais. As semi-sintéticas são obtidas de produtos naturais que sofreram alguma modificação química, como a poliuretana derivada de nitrato de celulose e óleo de mamona. Já as resinas sintéticas são estruturadas a partir de reações de adição e condensação polimérica, como a resina poliéster e a resina epóxi (MILANESE *et al.*, 2012).

As resinas poliméricas mais baratas utilizadas são as de poliéster e as de éster vinílicas, principalmente como compósitos reforçados com fibras de vidro. Já as resinas epóxi são geralmente mais caras, também utilizadas extensivamente em aplicações comerciais, possuem propriedades mecânicas e resistência à umidade superiores (CALLISTER, 2012).

Para que uma resina possa ser utilizada na composição de materiais compósitos é necessário que ela apresente determinadas características, como: boa resistência à degradação ambiental, tenacidade adequada e boas propriedades mecânicas e adesivas (LAPIQUE; REDFORD, 2002).

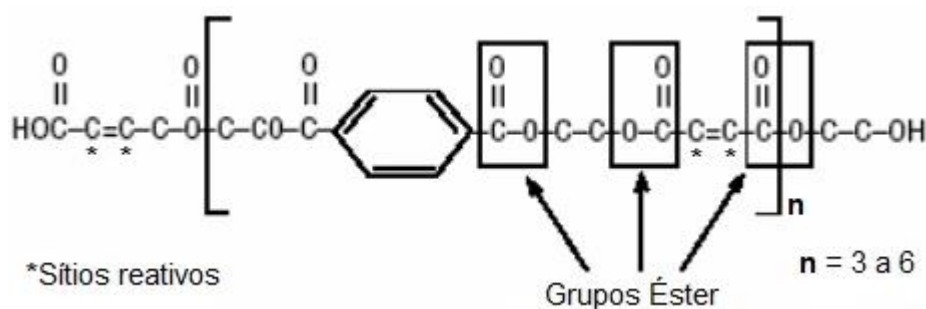
Um aspecto importante que uma matriz resinosa deve apresentar é a capacidade de absorver energia e minimizar as concentrações de tensão, através do fornecimento de tenacidade à fratura ou ductilidade, aumentando a resistência a falhas por impacto e a durabilidade do compósito. O comportamento termo-mecânico esperado para compósitos é dependente da resistência das resinas ao calor. Dessa forma, é desejável que a resina da matriz ofereça características ótimas ao compósito, dentro da faixa de temperatura suportada pela resina (PILATO; MICHNO, 1994).

Atualmente, compósitos de matriz polimérica são aplicados, por exemplo, em bases de instrumentos de precisão, estruturas de máquinas, postos de combustível, elementos decorativos de pias, pisos e paredes, entre outros (PANZERA; RUBIO, 2006).

3.6.1 Matriz de resina poliéster insaturada

A resina poliéster é elaborada a partir da reação de polimerização por condensação de um álcool e um ácido dicarboxílico, resultando na formação dos produtos poliéster (molécula de extensa cadeia linear) e água. A resina pode ser classificada em saturada e insaturada, dependendo dos constituintes empregados (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Se um ou mais dos reagentes principais contém insaturação, a resina resultante será insaturada. A insaturação do poliéster tem sua origem relacionada ao ácido carboxílico, assim como seus isômeros. A definição de insaturado é proveniente da existência de duplas ligações na estrutura da cadeia molecular (CHACÓN, 2008). A Figura 9 apresenta a estrutura molecular de um poliéster insaturado.

Figura 9 – Estrutura molecular de um poliéster insaturado



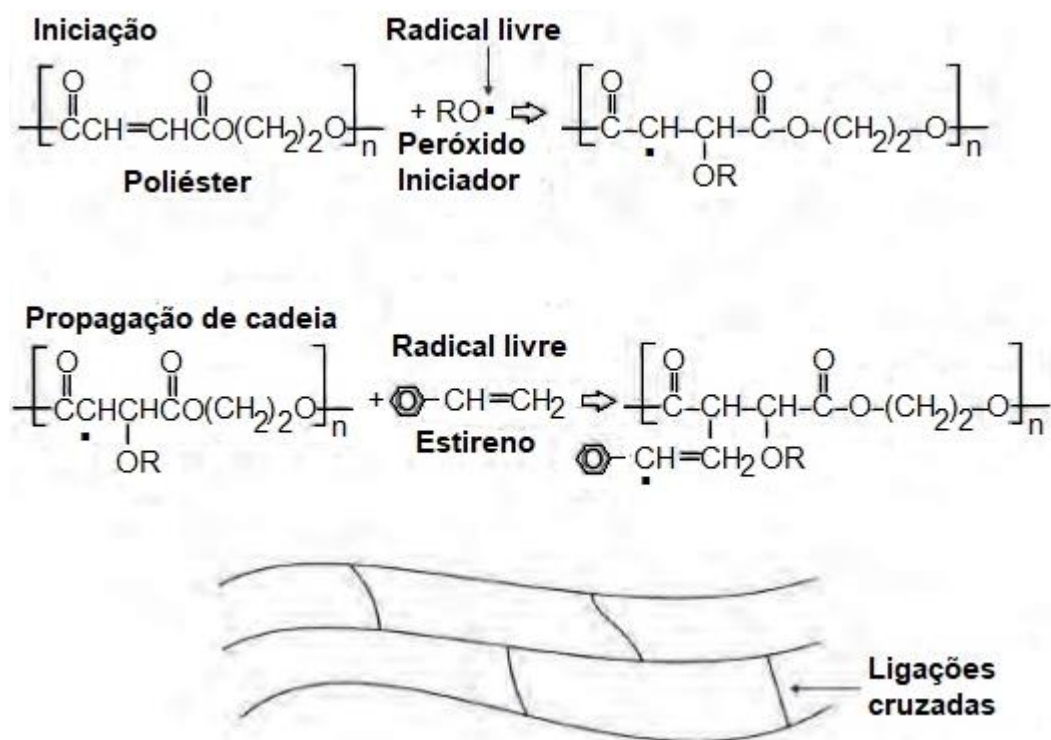
Fonte: Adaptado de Sobrinho (2005).

Grande parte das resinas poliéster são líquidos claros viscosos, consistindo em soluções de poliéster adicionados a um monômero, geralmente o estireno. A inserção do monômero de estireno auxiliam na produção de uma resina com uma melhor trabalhabilidade, pois reduzem sua viscosidade (MARGOLIS, 1986). As reações de *cross-linking* (ou ligações cruzadas) entre a resina poliéster insaturada e o monômero de estireno conferem a conexão entre as cadeias poliméricas, gerando uma rede tridimensional responsável pela conversão da resina de um líquido viscoso para um sólido termorrígido (CAO; LEE, 2003).

As resinas poliéster mais comuns também podem ter suas ligações cruzadas iniciadas por radicais livres, usualmente por um peróxido orgânico (catalisador MEK). A quantidade de catalisador utilizado interferirá na iniciação das ligações cruzadas, que por sua vez refletirá na cura da resina, podendo ocorrer tanto em temperatura

ambiente quanto em temperaturas elevadas, com e sem pressão (SANTOS; MELO, 2009). Uma representação esquemática do processo de cura da resina poliéster insaturada está apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Processo de cura da resina de poliéster insaturado



Fonte: Levy Neto e Pardini (2006).

Diferentes tipos de resinas poliéster insaturada estão disponíveis no mercado, dentre elas: a ortoftálica, a tereftálica, isoftálica e a bisfenólica. A ortoftálica é a mais comum, pois é a mais barata e atende bem necessidades de uso básico. Em geral, as resinas de poliéster ortoftálicas possuem como vantagens: boa estabilidade dimensional, resistência a ambientes quimicamente agressivos, excelentes propriedades elétricas, cura a frio, fácil pigmentação e podem ser conformadas em moldes simples e baratos (GALVÃO, 2011). A Tabela 2 mostra algumas propriedades da resina poliéster.

Tabela 2 – Propriedades da resina poliéster

Propriedade	Valor
Densidade	1100 a 1400 kg/m ³
Módulo de elasticidade	2100 a 4400 Mpa
Resistência a tração	34 a 100 Mpa
Alongamento	2%

Fonte: Macêdo Neto (2016).

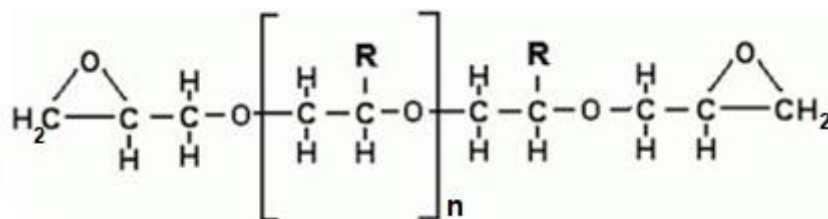
A literatura afirma que o uso de baixos teores residuais de monômero de estireno podem resultar quando altas porcentagens de peróxidos orgânicos forem inseridas junto às resinas poliéster curadas a temperatura ambiente. Entretanto, o uso de uma quantidade elevada de catalisador poderá reduzir o tempo de gel da resina. Um longo tempo de gel é importante para que haja um bom preenchimento do molde e uma boa molhabilidade do reforço. Ressalta-se também que o catalisador MEK só poderá ser usado sozinho quando a temperatura do sistema for superior a 60°C (CAO; LEE, 2003).

Cargas minerais são comumente introduzidas nas resinas de poliéster insaturado com o objetivo de compensar contrações de polimerização durante o processo de moldagem. No entanto, apesar de tais cargas reduzirem a contração do sistema, a reação exotérmica poderá diminuir, já que a carga é um constituinte não reativo, causando um aumento da quantidade de resíduo de estireno (HANEMANN *et al.*, 2010).

3.6.2 Matriz de resina epóxi

O termo epóxi associa-se ao grupamento químico cíclico constituído de um átomo de oxigênio ligado a dois carbonos. Resinas epóxi são formadas por extensas cadeias moleculares, com grupos reativos epóxi invés de grupos éster. A inexistência de grupos éster proporciona à resina epóxi boa resistência ao contato com água, pois o grupo éster são suscetíveis à sorção de água. Uma das vantagens da resina epóxi quando comparada as demais é a sua baixa contração durante o processo de polimerização, diminuindo a formação de tensões internas (SOLOMONS; FRYHLE, 2009). A Figura 11 ilustra a estrutura molecular da resina epóxi.

Figura 11 – Estrutura molecular da resina epóxi



Fonte: Adaptado de Cook *et al.* (1999).

De acordo com Levy Neto e Pardini (2006), as resinas epóxi são definidas como polímeros que apresentam ao menos dois grupos terminais epóxi por molécula. Normalmente, as resinas epóxi têm como precursores o bisfenol-A e a epicloridrina, cuja reação resulta no diglicidil éter do bisfenol A. Tal resina tem sido amplamente usada como matéria-prima para a produção de adesivos, recobrimentos protetivos, compósitos estruturais, equipamentos na indústria química, encapsulados eletrônicos e laminados elétricos (MUKHERJEE, 2012).

Resinas epóxi são do tipo termorrígidas de baixo peso molecular apresentam algumas vantagens, como: resistência química e à abrasão, elevada resistência mecânica, processo de cura sem liberação de voláteis, boas propriedades de adesão, baixa absorção de água, estabilidade dimensional, resistência a temperaturas até 220°C e baixa viscosidade. Entretanto, são comercialmente mais onerosas, cerca de quatro vezes o valor das resinas poliéster (ALMEIDA, 2012).

O processo de cura das resinas epóxi baseiam-se na adição de um agente endurecedor apropriado. Exemplos de agentes endurecedores são as aminas alifáticas, as aromáticas e as poliamidas. Os endurecedores são responsáveis pelo tipo de reação de cura que ocorrerá na resina, bem como influenciam na cinética de cura, o ciclo de processamento (viscosidade em função do tempo), a geleificação e nas propriedades do material final (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

As propriedades da resina epóxi após a cura dependem da estequiometria formada pela interação química entre epóxi e endurecedor. Dessa forma, é necessário que ambos os componentes sejam dosados em proporções corretas, para que nenhum percentual desses reagentes permaneça sem reagir depois que a cura da resina se completar. Além disso, a relação epóxi/endurecedor, após a cura, interferirá no módulo de elasticidade, na transição vítrea, na deformação de ruptura, e nas resistências mecânicas à tração e à compressão (MUKHERJEE, 2012).

3.7 Rocha Artificial

A terminologia rocha artificial (sintética) surgiu em 1940, a fim de definir um material manufaturado a partir de agregados minerais em adição às resinas poliméricas e catalisador. Quando foi criada, a rocha artificial era produzida por meio de uma mistura utilizando resina poliéster insaturada e agregado de mármore moído, por isso ela também é conhecida como mármore artificial (MARTINS, 2016).

Pó de mármore, carbonato de cálcio de rochas calcárias, granito, areia de quartzo, cristais de vidro, sílica, entre outros, são, geralmente, as cargas minerais mais utilizadas para esse processo de fabricação. A exemplo disso, a Figura 12 esboça variados tipos de rocha artificial comercializadas no mercado. Vale lembrar que cada tipo de agregado ou mistura de agregados que for utilizado, oferecerá propriedades químicas, físicas, mecânicas e visuais, únicas e diferenciadas, caracterizando a grande diversidade de produtos e preços referentes a esse gênero de produto (RIBEIRO *et al.*, 2014b).

Figura 12 – Exemplos de rochas artificiais comercializadas no mercado



Fonte: Fasten Group (2020).

A carga mineral inserida nesse processo é, na verdade, uma mistura contendo uma faixa granulométrica com tamanhos de partículas variados, que vão desde particulados bem finos até os mais grossos. Essa heterogeneidade tem como propósito proporcionar à peça uma redução de empenamento, absorção de água, contração e volume de poros, bem como o aumento da resistência mecânica (MARTINS, 2016).

A densidade ou empacotamento das misturas de carga mineral e resina variam de forma proporcional e direta ao percentual de matérias-primas que foram

destinadas à sua elaboração. Pois, entende-se que os corpos de prova feitos a partir de uma mistura entre resina e diferentes frações granulométricas (menores e maiores) apresentam densidades maiores que a das amostras preparadas a partir de uma mistura de resina e frações granulométricas puras. O que traz como significado que a mistura de diferentes frações granulométricas promove a ocupação de partículas menores em interstícios criados pela adesão de partículas maiores (RIBEIRO *et al.*, 2014b; AGUIAR, 2016).

A homogeneidade da mistura de carga mineral e agente aglutinante, bem como a conformação da peça é alcançada a partir do uso de uma técnica de vibração a vácuo. Após a conformação, o bloco é submetido a um procedimento de cura, retificação, corte ou serragem e polimento, de acordo com as especificidades de uso e demandas solicitadas pelo mercado (CARVALHO *et al.*, 2018a).

A rocha artificial, produzida industrialmente, é um produto maciço, com boa resistência ao intemperismo e ao lascamento, que não mancha. Essas características se devem ao fato de que a resina usada em sua composição se ocupa de não somente garantir a aderência entre as partículas da carga mineral, como também se responsabiliza por penetrar nos interstícios, suprimindo a porosidade. Dessa forma, possíveis fluidos que venham a entrar em contato com a peça são conservados sobre a superfície e impedidos de penetrar, devido ao seu caráter impermeável (MOLINARI, 2007).

Uma grande vantagem desse tipo de material encontra-se no fato de que a carga mineral do reforço também pode ser representada por resíduos, advindos de alguma cadeia produtiva industrial. É possível, ainda, adicionar a esses resíduos outros materiais, tais como, corantes, vidros, conchas e espelhos, a fim de proporcionar uma aparência e aspecto mais elegante à peça artificial. Assim sendo, a rocha artificial posiciona-se como uma forte concorrente para as rochas naturais, como o mármore, o granito, a ardósia e o quartzito, na área de design e decoração de ambientes, em virtude da gama de texturas e cores possíveis de serem adotadas na estrutura da rocha artificial (NOCITI, 2014; CARVALHO *et al.*, 2015). A Tabela 3 apresenta uma comparação dos preços encontrados no mercado para diferentes tipos de rochas naturais e artificiais.

Tabela 3 – Variação de preços encontrados para rochas naturais e artificiais

	Tipo de rocha	Faixa de preço do m² (em reais)
Natural	Ardósia	80 – 125
	Mármore	250 – 600
	Granito	300 – 550
	Limestone	350 – 650
Artificial	Aglostone®	400 – 500
	Emporio Stone®	500 – 700
	Technistone®	650 – 800
	Silestone®	800 – 1300
	Nanoglass®	900 – 1500
	Corian®	em média 3000

Fonte: A própria autora.

As aplicações mais comuns da rocha artificial são em revestimentos verticais, como muros, paredes e fachadas; em revestimentos horizontais, como pisos e lajotas; como elementos estruturais, pilares e colunas; e como elementos ornamentais, em pias, tampos de mesa, tanques, assessorios sanitários, pedras de túmulos, arte estatutária e outras peças decorativas (FRASCÁ; YAMAMOTO, 2014).

A utilização de rochas artificiais não ocorre apenas por fatores de estética, estudos comprobatórios da qualidade desses materiais têm expandido o seu uso na engenharia. Estudos realizados por Ribeiro e Purquerio (1999) demonstraram que o granito sintético apresentou elevada absorção de vibrações e excelente estabilidade dimensional, o que o qualifica para ser usado como base para instrumentos de precisão.

A rocha artificial mais comum no mercado atual é o mármore sintético, produto amplamente conhecido no mercado, tendo sua aplicação mais comum em pias, tanques e lavatórios, em todos os tamanhos e formas. Devido ao aumento da procura e dos investimentos nesse setor, tem se tornado um produto cada vez mais leve e resistente. Outra rocha sintética encontrada com facilidade é o granito sintético, com menor participação no mercado, devido ao maior custo da carga mineral, é um material de propriedades mecânicas excelentes e destacada beleza estética (RABAH; LEVY NETO, 2016).

De acordo com a literatura, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para produzir rochas artificiais a partir de diferentes cargas minerais e bases poliméricas, sendo elas:

- 1 – Carvalho *et al.* (2015) desenvolveu uma pedra artificial de matrix epóxi incorporada com resíduo de sinterização da indústria siderúrgica, cujo propósito é fabricar pedras artificiais com características melhoradas para serem usadas como placas para construção de casas e estradas, produzidas por vibro compressão a vácuo, na qual se homogeneiza a resina epóxi com 80 e 85% em peso do referido resíduo. Os resultados indicaram que a pedra artificial incorporada com 80% de resíduo tem propriedades superiores à incorporada com 85%, além de mercadamente mais forte do que a pedra artificial comercial, fabricada com resíduo de granito.
- 2 – Ribeiro *et al.* (2014a) fabricou pedra artificial a partir de resíduos de mármore por meio de processo de moldagem por transferência de resina. No qual, uma mistura de resíduos de mármore, resina poliéster, catalisador e diluente foram inseridos dentro de um molde hermético sob vácuo. Revelando, comparativamente, maior taxa de porosidade e absorção de água, bem como menor resistência mecânica que a pedra artificial importada. Embora não seja conveniente usá-lo como material estrutural, o mesmo pode ser adequado para uso como revestimento de parede e acústico, bem como isolante térmico.
- 3 – Peng e Qin (2018) produziram uma laje de pedra artificial de alta qualidade usando um cadinho descartável de SiO_2 . O cadinho de sílica fundida é um recipiente para preparação de silício policristalino, que pode ser usado apenas uma vez, devido à mudança de fase que ocorre durante o processo de fundição. Pó fino de cadinho de SiO_2 e areia de quartzo foram misturados com resina polimérica, através de uma compactação vibratória em um ambiente de vácuo. As lajes de pedra artificial obtidas neste trabalho apresentaram altas resistências à flexão e compressão, superiores à laje de construção natural.

- 4 – Demartini *et al.* (2018) produziu pedra artificial a partir da aglutinação de resina epóxi a resíduos finos derivados do mármore dolomítico produzido por serras circulares de lâminas diamantadas, sendo esse mármore artificial elaborado por vibro compressão a vácuo. Os resultados obtidos indicaram, por meio dos testes de absorção de água, resistência à compressão uniaxial e à flexão, que as partículas residuais juntamente à resina epóxi apresentaram aderência em níveis satisfatórios.
- 5 – Silva *et al.* (2018) avaliou as propriedades mecânicas e físicas de um mármore artificial produzido à base de resíduos de mármore de calcita e resina epóxi, utilizando o processo de vibro compressão a vácuo. Os resultados indicaram que as pedras artificiais exibiram comportamentos físicos e mecânicos dentro do intervalo esperado para esse tipo de peça, possibilitando seu desenvolvimento como material alternativo para aplicação em construção civil.
- 6 – Gomes *et al.* (2018) desenvolveram um trabalho no qual 80% em massa de resíduos (pó de pedra e chamota das indústrias de tijolos) foram incorporados em 20% em peso de resina epóxi para produzir uma nova pedra artificial ornamental para uso em construção civil. As placas de pedra artificial foram elaboradas usando processos de vibração e vácuo. As peças apresentaram propriedades mecânicas, físicas, mecânicas e térmicas dentro da faixa padrão esperada, podendo ser usada, por exemplo, para pavimentação de alto tráfego.
- 7 – E, ainda, Chen *et al.* (2018) incorporou resíduo industrial do processamento de mármore artificial, na forma de pó, em polietileno de alta densidade, junto a compósitos de madeira. Os resultados dos ensaios mecânicos e térmicos foram otimistas. O propósito desse estudo é fornecer um novo método para utilização de resíduos oriundos da fabricação de mármore artificial, melhorando o desempenho de compósitos, minimizando a poluição ambiental.

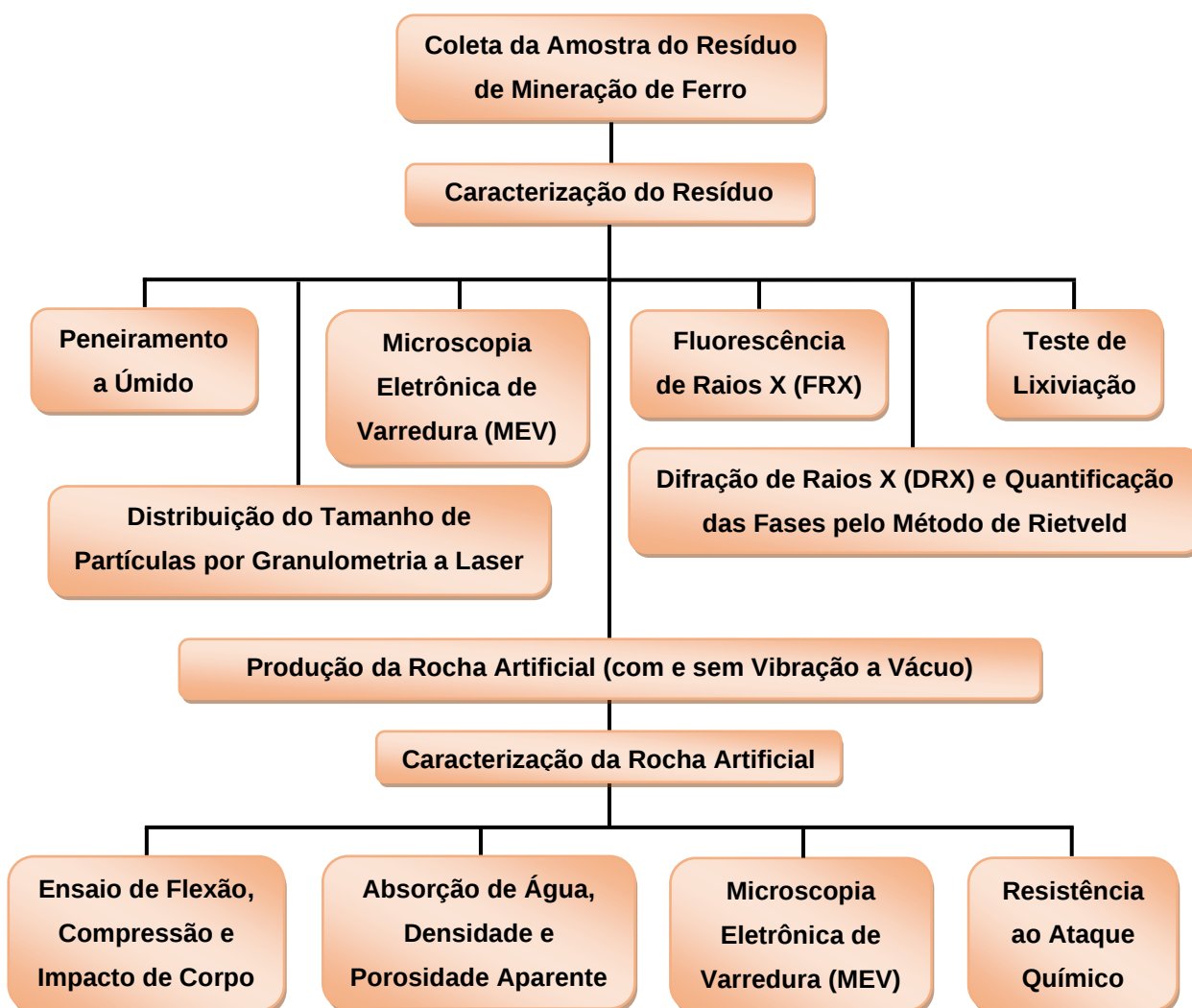
A rocha artificial também substitui as rochas naturais ornamentais e, conseqüentemente, tem um amplo mercado, uma vez que, 80% da produção mundial são usadas na forma de chapas e ladrilhos para revestimentos. De acordo com a Associação Brasileira de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS), no 1º trimestre

do ano de 2019 o Brasil faturou aproximadamente US\$ 1,36 milhões com a exportação de material rochoso artificial, cujo valor representa 1,7 mil toneladas (ABIROCHAS, 2019a). As importações brasileiras de rocha artificial superaram a partir de 2018, em valor e volume físico, as de materiais rochosos naturais (ABIROCHAS, 2019b), sugerindo o entendimento de que a procura na construção civil pela rocha artificial frente à rocha natural tem crescido significativamente com o passar dos anos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, primeiramente caracterizou-se o resíduo de minério de ferro, proveniente do rompimento da barragem de Fundão (Mariana – MG), a fim de que fossem elucidadas suas características químicas, mineralógicas e morfológicas. Para a produção da rocha artificial foram utilizados o resíduo previamente caracterizado e as resinas poliéster e epóxi. A resina poliéster insaturada usada foi a Centerpol® 626 com adição de monômero de estireno comercial e catalisador peróxido de metilcetona (MEK). A resina epóxi foi a Araldite® LY 1564 BR junto ao endurecedor Araldur® 2963 BR. O fluxograma (Figura 13) mostra o esquema da metodologia adotada para a realização deste estudo.

Figura 13 – Esquema da metodologia adotada para realização do trabalho



Fonte: A própria autora.

4.1 Materiais

As amostras de resíduo do beneficiamento de minério de ferro foram coletadas (após o rompimento da barragem de Fundão, Mariana – MG) em pontos aleatórios, respeitando uma distância mínima entre os pontos de 5 m e uma profundidade de 30 cm, às margens do Rio do Carmo (município de Barra Longa – MG), próximo à formação do Rio Doce, como mostrado na Figura 14. Após a coleta, as amostras foram secas em estufa a 100°C, por 24 horas. Em seguida, foram desagregadas, homogeneizadas e quarteadas em alíquotas de 500 g e peneiradas a úmido. Ressaltando que, devido a restrição de entrada em áreas próximas à barragem rompida, a escolha do ponto de coleta foi definida neste local, uma vez que Barra Longa foi uma das cidades atingidas pelo fluxo de resíduo de minério de ferro escoado.

Figura 14 – Trecho do Rio Doce onde foram coletadas as amostras



Fonte: Gomes (2016).

A resina poliéster ortoftálica insaturada Centerpol® 626 utilizada é conhecida comercialmente como resina poliéster cristal 5061. A Tabela 4 mostra as especificações técnicas desta resina.

Tabela 4 – Especificações técnicas da resina poliéster Centerpol® 626

Propriedade	Unidade de Medida	Valor
Viscosidade (25 °C)	cP	1400 - 1700
Tempo de Gel	Minutos	10 - 15
Intervalo de Cura	Horas à 25 °C	10 - 14
Pico Exotérmico	°C	175
Sistema de Cura	% MEK	1
Peso Específico	g/cm ³	1,00 ± 0,05
Aspecto	-	Transparente/Cristal/ Líquido Viscoso

Fonte: Reichhold (2010).

O monômero de estireno comercial utilizado para diminuir a viscosidade da resina tem as seguintes especificações: Fórmula: C₈H₈; Massa Molar: 104,15 g/mol; Densidade: 909 kg/m³; e Ponto de Ebulição: 145 °C (MORRISON; BOYD, 2002).

O catalisador MEK comercial ou Peróxido de MEK (Metil Etil Cetona) é um acelerador de reações que possui as seguintes propriedades físico-químicas: estado físico líquido; odor característico; incolor; pH igual a 5,0; e densidade correspondente a 1,10 g/cm³ (QUÍMICA CREDIE, 2012).

As especificações da resina epóxi Araldite® LY 1564 BR utilizada na produção da rocha artificial estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações técnicas da resina epóxi Araldite® LY 1564 BR

Propriedade	Unidade de Medida	Valor
Viscosidade (25 °C)	cP	1200 - 1400
Tempo de Gel	Minutos	25 - 35
Intervalo de Cura	Horas à 25 °C	24
Sistema de Cura	% Araldur® 2963 BR	48
Peso Específico	g/cm ³	1,15 ± 0,05
Aspecto	-	Líquido Claro até amarelado

Fonte: Huntsman (2010).

O endurecedor Araldur® 2963 BR é um catalisador de reações que possui as seguintes propriedades físico-químicas: é um líquido límpido claro, viscosidade à 25°C entre 30 e 70 cP e densidade igual a 1,00 g/cm³ (HUNTSMAN, 2010).

4.2 Caracterização das Amostras do Resíduo de Mineração de Ferro

4.2.1 Peneiramento a úmido

O procedimento de peneiramento a úmido foi realizado de acordo com uma adequação da norma NBR 7181 (ABNT, 2016). As peneiras utilizadas foram da série Tyler com aberturas de 2,00 mm, 0,59mm, 0,149 mm e 0,074 mm. A escolha dessas aberturas foi uma adaptação da norma NBR 6502 (ABNT, 1995). As partículas maiores que 0,59 mm (pedregulho e areia grossa) foram descartadas, uma vez que possuem tamanho de grão superior ao desejável para utilização na produção de rocha artificial (ANDRADE, 2014). As partículas abaixo de 0,59 mm foram utilizadas no desenvolvimento do trabalho e denominadas da seguinte forma: i) amostra geral (AG), partículas com tamanho abaixo de 0,59 mm; ii) areia média (AM), partículas com tamanho entre 0,59 mm e 0,149 mm; iii) areia fina (AF), partículas com tamanho entre 0,149 mm e 0,074 mm e; iv) silte-argila (SA), partículas menores que 0,074 mm.

4.2.2 Distribuição do tamanho de partículas por difração a laser

A análise granulométrica por difração a laser foi realizada para as amostras AG, AM, AF e SA, utilizando o analisador de partículas a laser CILAS® modelo 1090 de alta precisão. O equipamento apresenta faixa analítica de 0,04 a 0,5 mm, 64 detectores e 100 classificações de tamanhos de partículas, e dois emissores de laser para cobrir uma grande faixa analítica.

4.2.3 Fluorescência de raios X (FRX)

A composição química semiquantitativa das amostras de resíduo foi obtida por fluorescência de raios X (FRX), realizada no equipamento SHIMADZU® EDX-720, no vácuo e em termos de óxidos. As amostras foram prensadas com ácido bórico na

proporção 1:4 (g de ácido bórico: g de amostra), utilizando a prensa hidráulica SL12 da marca SOLAB e a carga empregada foi de aproximadamente 9 toneladas.

4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise morfológica das amostras de resíduo, de acordo com classificação granulométrica, foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca SHIMADZU® e modelo SSX-550. As imagens foram obtidas com aceleração de elétrons de 15kV para amostras recobertas com ouro. Para tal, as amostras em pó foram pulverizadas sobre uma fita de carbono e metalizadas com ouro.

4.2.5 Difração de raios X (DRX) e quantificação das fases pelo Método de Rietveld

As análises de DRX, pelo método do pó, para identificar as fases presentes nas amostras de resíduo, foram realizadas no equipamento Shimadzu 7000 nas seguintes condições de operação: radiação Cu K α (35 KV/ 40 mA), velocidade do goniômetro 0,02° em 2 θ por passo, com tempo de contagem de 5 segundos por passo e coletados de 5° a 80° em 2 θ . As interpretações dos espectros foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF 02 (ICDD, 2003).

Para a quantificação das fases, pelo método Rietveld, foi utilizado o programa GSAS (LARSON; VON DREELE, 2001) com a interface EXPGUI (TOBY, 2001) utilizando a função de perfil pseudo-Voigt de Thompson-Cox-Hastings, sendo a radiação de fundo ajustada pelo polinômio de Chebyshev. Foram refinados o fator de escala, célula unitária, radiação de fundo, assimetria do perfil, parâmetros da largura total a meia altura, a partir dos parâmetros de alargamento instrumental obtidos com um padrão, posição atômica, deslocamentos atômicos isotrópicos e fatores de ocupação dos cátions.

4.2.6 Ensaio de lixiviação

Com o intuito de avaliar se ocorre dissolução dos metais presentes no resíduo, foi efetuado o teste de lixiviação. Este teste foi realizado de acordo com uma adaptação feita das normas ABNT NBR 10005:2004 e 10006:2004 (ABNT,

2004). Para realizar o teste 250,0 g da amostra geral (AG) foi acondicionada em um béquer contendo 1500 mL de água destilada. A suspensão foi agitada vigorosamente com o auxílio de um bastão de vidro, durante 5 min. O sistema foi vedado com filme PVC e deixado em repouso por 30 dias. Após esse tempo, separou-se o sobrenadante e o sólido sedimentado, este último foi seco em estufa a 100°C, durante 24 horas. Posteriormente, foi enviado para análise química semiquantitativa no FRX.

4.3 Produção e Composição da Rocha Artificial

A fim de avaliar a influência da composição e do método de produção da rocha artificial nas propriedades físicas, mecânicas e estruturais, diferentes formulações foram definidas, de acordo com a variação da faixa granulométrica da carga mineral, da resina polimérica utilizada e pela submissão da rocha artificial à vibração a vácuo (VV). As amostras da rocha artificial foram preparadas misturando as matérias-primas segundo as proporções descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Combinação de composições utilizadas na preparação da rocha artificial com e sem vibração a vácuo (VV)

Amostra	Composição de Carga Mineral	Composição de Resina Poliéster	Composição de Resina Epóxi
PR	0%	100%	-
ER	0%	-	100%
PAG	70% Amostra AG	30%	-
PAM	70% Amostra AM	30%	-
PAF	70% Amostra AF	30%	-
PSA	70% Amostra SA	30%	-
EAG	70% Amostra AG	-	30%
EAM	70% Amostra AM	-	30%
EAf	70% Amostra AF	-	30%
ESA	70% Amostra SA	-	30%

Além disso, foi adicionado 5% p/p de monômero de estireno em relação à massa da resina poliéster, com a finalidade de diminuir a viscosidade da resina

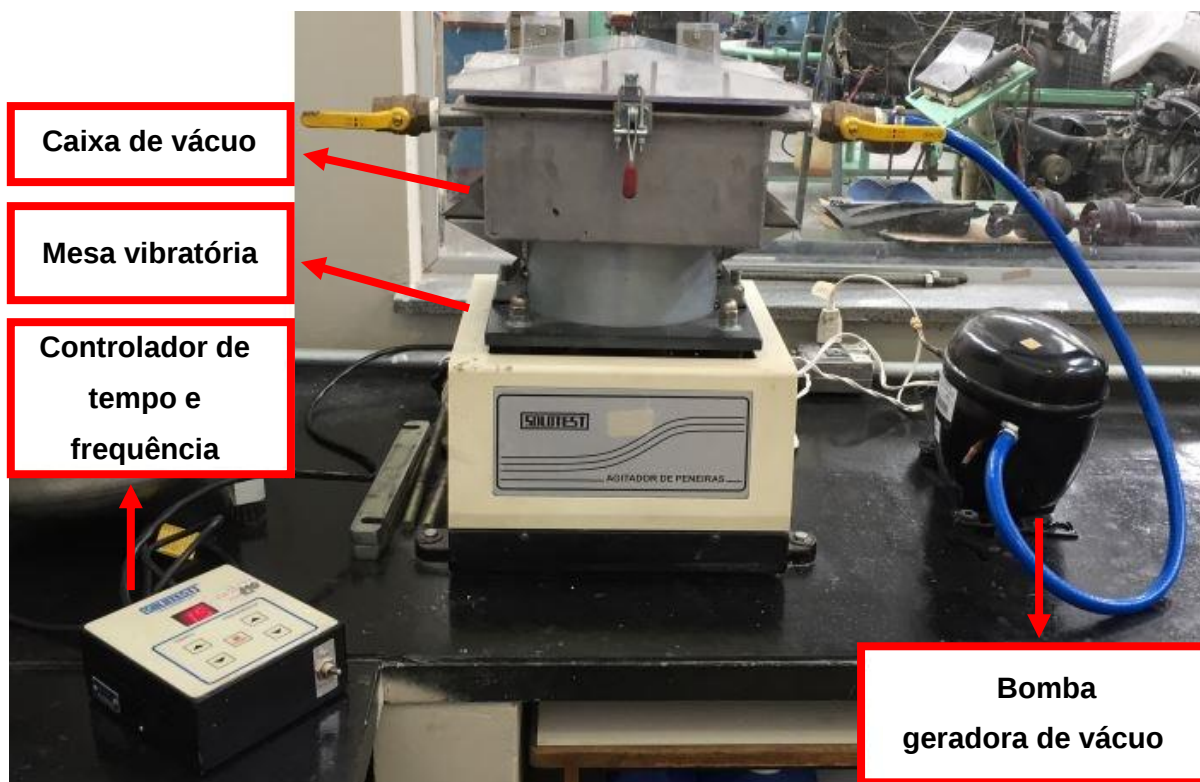
poliéster insaturada e, dessa forma, melhorar sua trabalhabilidade. Para iniciar a reação de reticulação da resina poliéster insaturada, foi utilizado o catalisador comercial MEK na dosagem de 1% p/p da massa da resina poliéster aplicada. Com relação a resina epóxi, foi adicionado apenas o endurecedor Araldur® 2963 BR em um percentual de 48% p/p.

Todos os corpos de prova foram preparados utilizando balança de precisão para dosagem das matérias-primas e a mistura foi feita a mão, com uma espátula de aço inoxidável, sempre evitando a agitação excessiva para evitar a formação de bolhas. Após a homogeneização completa da mistura, a massa do compósito foi despejada em uma fôrma de silicone devidamente lubrificada com cera de carnaúba, para facilitar o desmoldamento. No caso da produção das amostras elaboradas com vibração a vácuo, as fôrmas contendo a massa foram submetidas à vibração mecânica de 3 hertz por 15 minutos, com aplicação de sucção à vácuo de $1,3 \times 10^{-1}$ Pa. Ressaltando que, a cura dos corpos de prova foi realizada em temperatura ambiente por sete dias.

As amostras da rocha artificial confeccionadas sem e com o uso da vibração à vácuo (VV) foram identificadas, respectivamente, com a adição dos números “1” e “2” ao nome da amostra. O sistema de vibração a vácuo foi elaborado adotando uma metodologia adaptada de (RIBEIRO *et al.*, 2014b), o aparato está mostrado na Figura 15.

Uma fôrma de silicone foi utilizada para o processamento dos corpos de provas para o ensaio de flexão e para os testes de absorção de água, porosidade e densidade aparente possuem dimensões de 27,5 x 15,0 x 76,0 mm (largura x altura x profundidade). A fôrma de silicone usada para produzir as amostras do ensaio de impacto de corpo duro tem dimensão de 200 x 10 x 200 mm (largura x altura x profundidade). Já a fôrma de plástico utilizada para confeccionar os corpos de prova do ensaio de compressão possui formato cilíndrico com dimensão de 27,5 x 27,5 mm (altura x diâmetro).

Figura 15 – Aparato responsável pelo procedimento de vibração a vácuo (VV)



Fonte: A própria autora.

Ao todo foram produzidos 25 corpos de prova de cada formulação, para realização dos ensaios de flexão, compressão, impacto de corpo duro, absorção de água, porosidade, densidade aparente e resistência ao ataque químico. Para a análise microestrutural interna no microscópio eletrônico de varredura, uma amostra rompida no ensaio de flexão foi cortada e polida, utilizando o equipamento AROTEC-COR80, obtendo dessa forma a amostra para a análise.

4.4 Propriedades Físicas, Mecânicas e Estruturais da Rocha Artificial

4.4.1 Ensaio de absorção de água, densidade e porosidade aparente

Os ensaios de absorção de água, densidade e porosidade aparente foram realizados de acordo com uma adaptação da norma técnica ABNT NBR 15845/2010 (Anexo B) (ABNT, 2010a). Os cálculos de absorção de água, densidade e porosidade aparente foram determinados utilizando as Equações 1, 2 e 3.

$$AA (\%) = \frac{(P_u - P_s) \times 100}{P_s} \quad (1)$$

AA = Índice de absorção de água (%);

P_u = Peso da peça saturada em água, úmida (g);

P_s = Peso da peça seca (g).

$$PA (\%) = \frac{(P_u - P_s) \times 100}{(P_u - P_i)} \quad (2)$$

PA = Porosidade aparente (%);

P_i = Peso da peça submersa (g).

$$DA = \frac{P_s}{(P_u - P_i)} \quad (3)$$

DA = Densidade aparente (em g/cm³).

4.4.2 Resistência à flexão

O ensaio foi realizado na máquina universal AG-X, da Shimadzu, de acordo com uma adaptação da norma técnica ABNT NBR 15845/2010 (Anexo F) (ABNT, 2010c). A distância entre os apoios da base e a velocidade de avanço foram fixadas em 50 mm e 1 mm/min, respectivamente. E a tensão de ruptura foi calculada utilizando a Equação 4:

$$\sigma_{flexão} = \frac{M_f \times C}{ICG} \quad (4)$$

C = metade do valor da espessura, em milímetros;

M_f = momento fletor;

ICG = o momento de inércia em relação ao centro de gravidade.

O momento fletor (M_f) é calculado pela Equação 5:

$$M_f = \frac{F \times L}{4} \quad (5)$$

F = força atingida no ensaio, em Newton (N);

L = distância entre os apoios, em milímetros (mm).

O momento de inércia em relação ao centro de gravidade é calculado com a Equação 6:

$$I_{CG} = \frac{b \times h^3}{12} \quad (6)$$

b = espessura do corpo de prova em milímetros (mm);

h = altura do corpo de prova em milímetros (mm).

4.4.3 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão longitudinal simples foi realizado segundo uma adaptação da norma ABNT NBR 15845/2010 (Anexo E) (ABNT, 2010b). Utilizou-se a máquina universal para ensaios, modelo EMIC GR048, com capacidade máxima de 300kN. Em seguida, calculou-se o valor da resistência à compressão para cada amostra utilizando a Equação 7 (CANDIDO, 2012):

$$RC = \frac{P}{A} \quad (7)$$

RC = Resistência à compressão uniaxial (MPa);

P = Carga de ruptura (kN);

A = Área da secção transversal (mm²).

4.4.4 Resistência ao impacto de corpo duro

O ensaio de resistência ao impacto de corpo duro foi realizado com o propósito de analisar a coesão estrutural da rocha artificial, bem como a energia que esse material é capaz de dissipar dependendo da altura máxima (altura de rompimento) que o mesmo consegue suportar quando exposto a situações de quedas de objetos sob sua superfície. Através desse resultado torna-se possível calcular as dimensões das placas adequadamente, de acordo com cada demanda de uso.

O ensaio foi realizado baseando-se em uma adaptação da norma ABNT NBR 15845/2010 (Anexo H) (ABNT, 2010d) e no estudo desenvolvido por Silva *et al.* (2018). Para tanto, uma esfera de aço com uma massa de 400 g foi posicionada inicialmente a uma altura de 20 cm para cair em queda livre sobre a amostra da rocha artificial acentada em um colchão de areia. Os intervalos de altura foram crescentes de 5 cm a partir da altura inicial (20 cm) até ocorrer a fissuração e rompimento da placa, como sugere a Figura 16.

Figura 16 – Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro



Fonte: A própria autora.

Os resultados foram expressos pela média aritmética das alturas de ruptura obtidas e pela energia de ruptura das placas de acordo com a expressão relacionada na Equação 8.

$$W = m \times g \times h \quad (8)$$

W = energia de ruptura (J);

m = massa da esfera (0,4 Kg);

g = aceleração da gravidade (9,806 m/s²);

h = altura de ruptura (m).

4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise morfológica das amostras da rocha artificial, de acordo com cada combinação de composição, foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), da marca SHIMADZU® e modelo SSX-550. As imagens foram obtidas com aceleração de elétrons de 15kV para amostras recobertas com ouro.

4.4.6 Resistência ao ataque químico

O ensaio de resistência ao ataque químico foi realizado de acordo com uma adaptação da norma ABNT NBR 13818/97 (Anexo H) (ABNT, 1997). A realização do teste consistiu em submeter cinco amostras da rocha artificial ao ataque químico ocasionado pelas substâncias apresentadas na Tabela 7, nas respectivas concentrações e tempo de exposição.

Tabela 7 – Substâncias químicas e suas respectivas concentrações e tempo de exposição utilizados no ataque químico

Substância química	Concentração	Tempo de exposição
Cloreto de amônia [NH ₄ Cl]	10 g/L	24 h
Hidróxido de potássio [KOH]	30 g/L	24 h
Ácido clorídrico [HCl]	3% (v/v)	24 h
Hipoclorito de sódio [NaClO]	20 g/L	96 h
Ácido cítrico [C ₆ H ₈ O ₇]	100 g/L	96 h

Antes da imersão das amostras nas soluções químicas previamente preparadas, os corpos de prova foram pesados. Em seguida, as amostras foram imergidas nas soluções e o sistema foi vedado com papel filme, para que não houvesse trocas iônicas com o ambiente. Após o tempo de exposição, as amostras foram retiradas e levadas para secar em estufa a 50 °C durante 24 horas. Depois da secagem, pesou-se novamente os corpos de prova. Para identificar se houve perda de massa nas amostras submetidas ao ataque químico, calculou-se a diferença de massa das amostras depois e antes da imersão. As características visuais também foram observadas, a fim de se verificar se houve mudança de cor, brilho e textura da rocha artificial imergida nas soluções químicas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do Resíduo de Minério de Ferro

5.1.1 Peneiramento a úmido

A Tabela 8 mostra os resultados do peneiramento da amostra de resíduo como recebida. Pode-se observar que as faixas granulométricas (- 0,06 mm), (- 0,20 mm + 0,06 mm) e (- 0,60 mm + 0,20 mm), respectivamente, apresentaram maiores porcentagens em massa, perfazendo juntas um total de 93,06% da massa global.

Tabela 8 – Resultados da análise granulométrica a úmido

Amostra	Faixa granulométrica	Porcentagem em massa
Pedregulho (PE)	+ 2,00 mm	1,90%
Areia grossa (AR)	- 2,00 mm + 0,60 mm	5,04%
Areia média (AM)	- 0,60 mm + 0,20 mm	16,78%
Areia fina (AF)	- 0,20 mm + 0,06 mm	32,41%
Silte-Argila (SA)	- 0,06 mm	43,87%
	Σ (- 0,60 mm + 0,20 mm) +	
Amostra geral (AG)	(- 0,20 mm + 0,06 mm) + (- 0,06 mm)	93,06%

A maior porcentagem foi obtida para a fração abaixo de 0,06 mm (43,87%), este resultado era esperado, pois a granulometria desse tipo de resíduo é comumente muito fina (ANDRADE, 2014; JENA *et al.*, 2015). A presença da fração silte-argila em maior quantidade nos resíduos pode ser explicada pela presença da grande quantidade de lama gerada durante o processo de deslamagem, após a etapa de moagem. Portanto, esse perfil granulométrico está de acordo com os tipos de resíduos (arenoso e lama) que eram produzidos pela Samarco (SAMARCO, 2019).

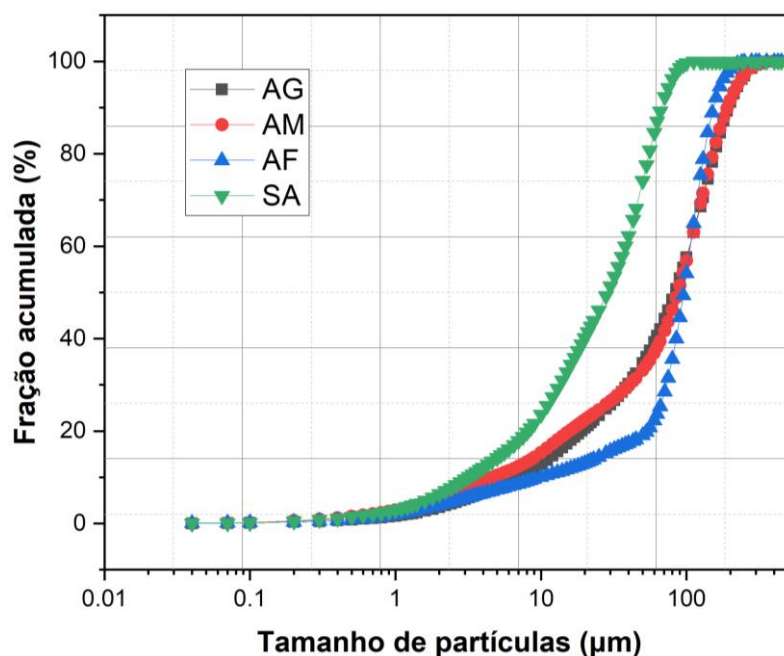
As amostras com tamanho de partículas entre PE (+ 2,00 mm) e AR (- 2,00 mm + 0,60 mm) foram descartadas, uma vez que apresentam baixo percentual em massa e necessitariam de moagem para que o seu tamanho de grão

se adequasse ao necessário para produção da rocha artificial, aumentando o custo do processo.

5.1.2 Distribuição do tamanho de partículas por difração a laser

A Figura 17 e Tabela 9 apresentam os resultados obtidos para a análise granulométrica por difração a laser realizada na amostra geral (AG), areia média (AM), areia fina (AF) e silte-argila (SA).

Figura 17 – Curvas de distribuição granulométrica para as frações: AG, AM, AF e SA



Fonte: A própria autora.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de granulometria a laser para as frações AG, AM, AF e SA

Frações	D ₁₀ (μm)	D ₅₀ (μm)	D ₉₀ (μm)	D _{médio} (μm)
AG	7,17	83,40	193,60	93,15
AM	9,87	95,63	195,89	105,69
AF	5,86	77,11	153,23	89,75
SA	3,16	28,11	67,27	35,52

De acordo com a Figura 17 e Tabela 9, pode-se observar uma variação dos diâmetros das partículas. A amostra SA apresenta a menor distribuição, com um D₅₀

de 28,11 μm . Enquanto a amostra AM exhibe a maior distribuição, com um D_{50} de 95,63 μm .

Ao comparar a Figura 17 e Tabela 9 com os resultados obtidos por Guimarães *et al.* (2012), notou-se similaridade entre os resultados. Isso comprova que as amostras de resíduo analisadas neste trabalho corroboram com o perfil de distribuição granular apresentado para resíduos oriundos do processamento de minério de ferro extraídos da região do Quadrilátero Ferrífero (onde a mina Germano e a barragem de Fundão estão localizadas).

Outro fato relevante é que a análise granulométrica é um parâmetro essencial a ser avaliado quando se objetiva usar cargas minerais na elaboração de materiais compósitos, uma vez que partículas de pequeno, na ordem de micrômetros, quando adicionadas à matriz de compósitos, melhoram o empacotamento de grãos e atuam como sítios de nucleação, potencializando as propriedades mecânicas, de interface e durabilidade do material (DAVE *et al.*, 2003; MAGALHÃES *et al.*, 2018).

5.1.3 Composição química semiquantitativa por fluorescência de raios X (FRX)

A Tabela 10 mostra a análise química semiquantitativa, em termos de óxidos, para as amostras areia média (AM), areia fina (AF), silte-argila (SA) e amostra geral (AG). Pode-se observar que as amostras AM e AF apresentaram elevados teores de SiO_2 , iguais a 76,6 e 77,0%, respectivamente. Este resultado está coerente, pois provavelmente trata-se do resíduo arenoso que foi depositado na barragem de Fundão, proveniente do processo de flotação utilizado na concentração do minério de ferro. Observa-se também que a amostra SA, proveniente do processo de deslamagem do minério de ferro, apresenta, reciprocamente, teores de SiO_2 e Fe_2O_3 iguais a 43,7 e 50,1% (SAMARCO, 2019). Ressaltando que, a amostra AG também apresenta um elevado teor de Fe_2O_3 (45,3%), este resultado também era esperado, pelo fato dessa amostra ser composta por areia média, areia fina e silte-argila.

O alto teor de ferro presente na amostra SA é corroborado pelos estudos realizados por Wolff e Costa (2008) e Vendrame *et al.* (2011), pois à medida que a granulometria do resíduo diminui (Tabela 8), a concentração de óxido de ferro aumenta (Tabela 10). E esse óxido de ferro (Fe_2O_3) é responsável por conferir coloração vermelho-amarronzada em produtos aos quais for adicionado. Assim

sendo, quanto maior o teor de ferro, mais vermelho-amarronzado será a peça final (SANTIS; ROSSIGNOLO, 2015).

Tabela 10 – Composição química semiquantativa por FRX

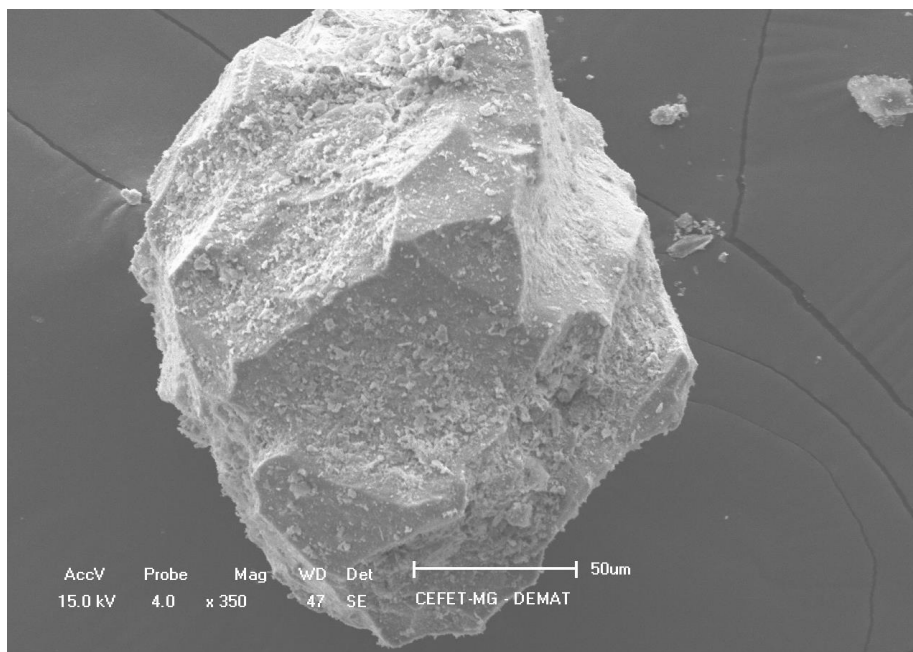
Amostra	AG	AM	AF	SA
Óxido	(%)	(%)	(%)	(%)
SiO₂	47,0	76,6	77,0	43,7
Fe₂O₃	45,3	20,6	18,5	50,1
Al₂O₃	6,7	2,3	4,1	5,7
CaO	0,6	0,3	0,1	-
K₂O	0,3	0,2	0,2	0,3
MnO	0,1	-	-	0,2

A presença de óxidos de alumínio nas amostras do resíduo pode ser explicada pela geologia da região, onde estão presentes os itabiritos anfibolíticos, que podem conter em sua composição teores de alumínio, sendo portadores desse elemento, a caulinita (ROCHA, 1997; MILANEZ; LOSEKANN, 2016). Segundo Gomes (2009), a tendência é um aumento da quantidade de óxidos de alumínio na argila, isso explica a maior presença desse componente nas amostras AG e SA.

5.1.4 Análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

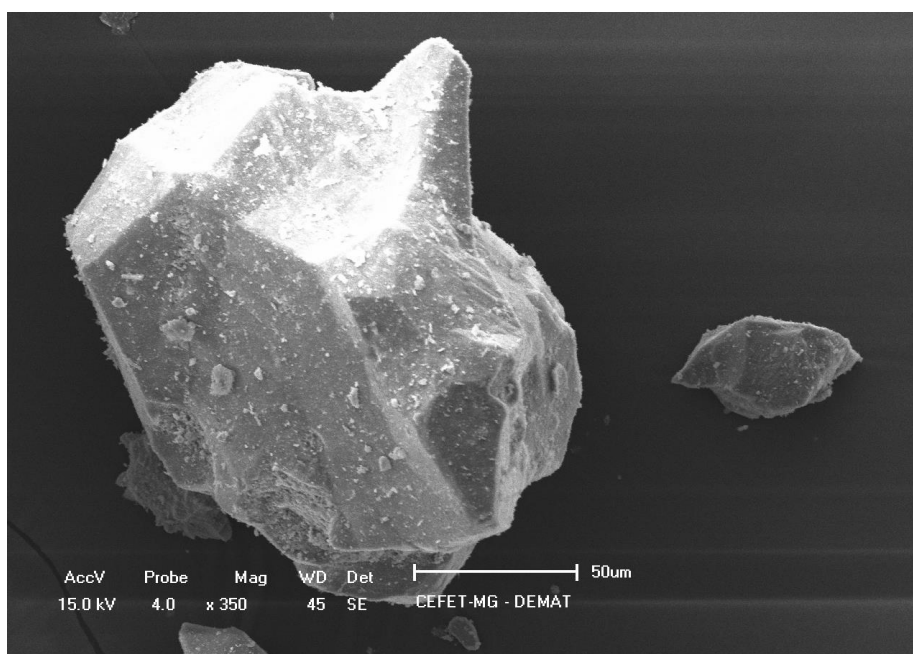
Nas Figuras 18, 19, 20 e 21 estão apresentadas as imagens obtidas no MEV para as amostras AF, AM, AG e SA, respectivamente. Pode-se observar nas Figuras 18 e 19 a existência de partículas maiores, sub-arredondadas, irregulares e angulares, provavelmente quartzo (ANDRADE, 2014; FONTES *et al.*, 2019).

Figura 18 – Imagens obtidas no MEV para a amostra AM



Fonte: A própria autora.

Figura 19 – Imagens obtidas no MEV para a amostra AF

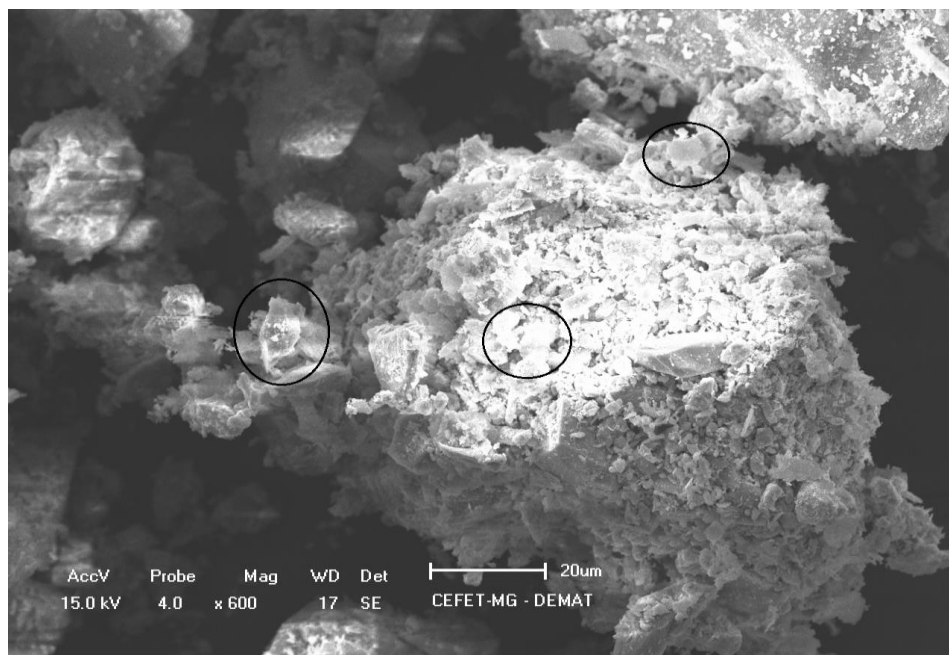


Fonte: A própria autora.

Na Figura 20 e 21, observa-se partículas com morfologia tabular, provavelmente associado à presença de hematita (ANDRADE, 2014; FONTES *et al.*, 2019). Também é possível observar um aglomerado de partículas, ou seja, partículas menores com formatos lamelares e irregulares aderidas à superfície das

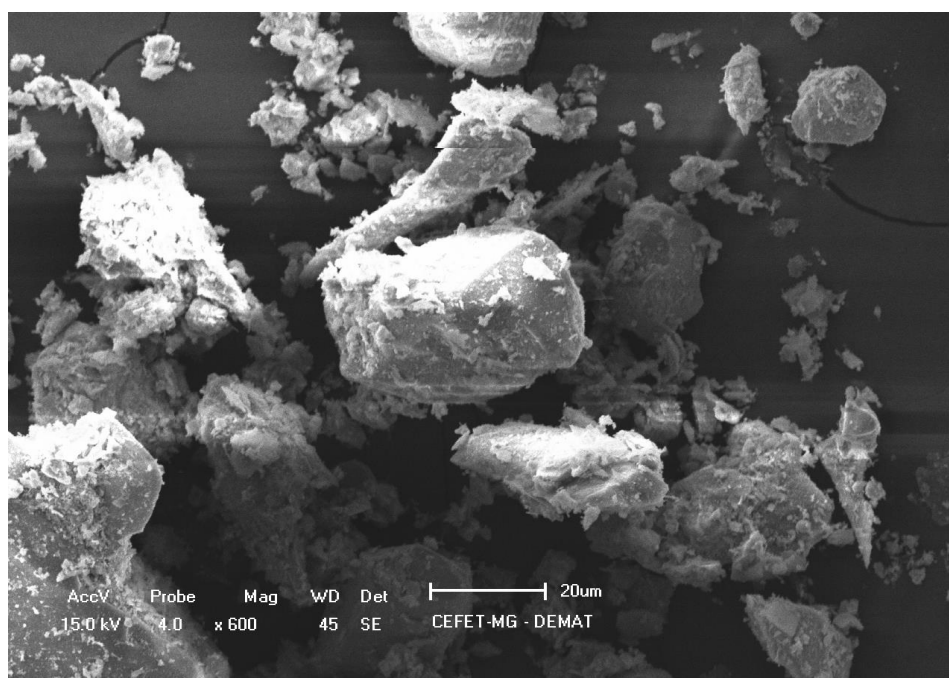
partículas maiores, o que é característico dos argilominerais e está provavelmente associado à presença da caulinita e da hematita (ANDRADE, 2014; FONTES *et al.*, 2019).

Figura 20 – Imagens obtidas no MEV para a amostra AG



Fonte: A própria autora.

Figura 21 – Imagens obtidas no MEV para a amostra SA

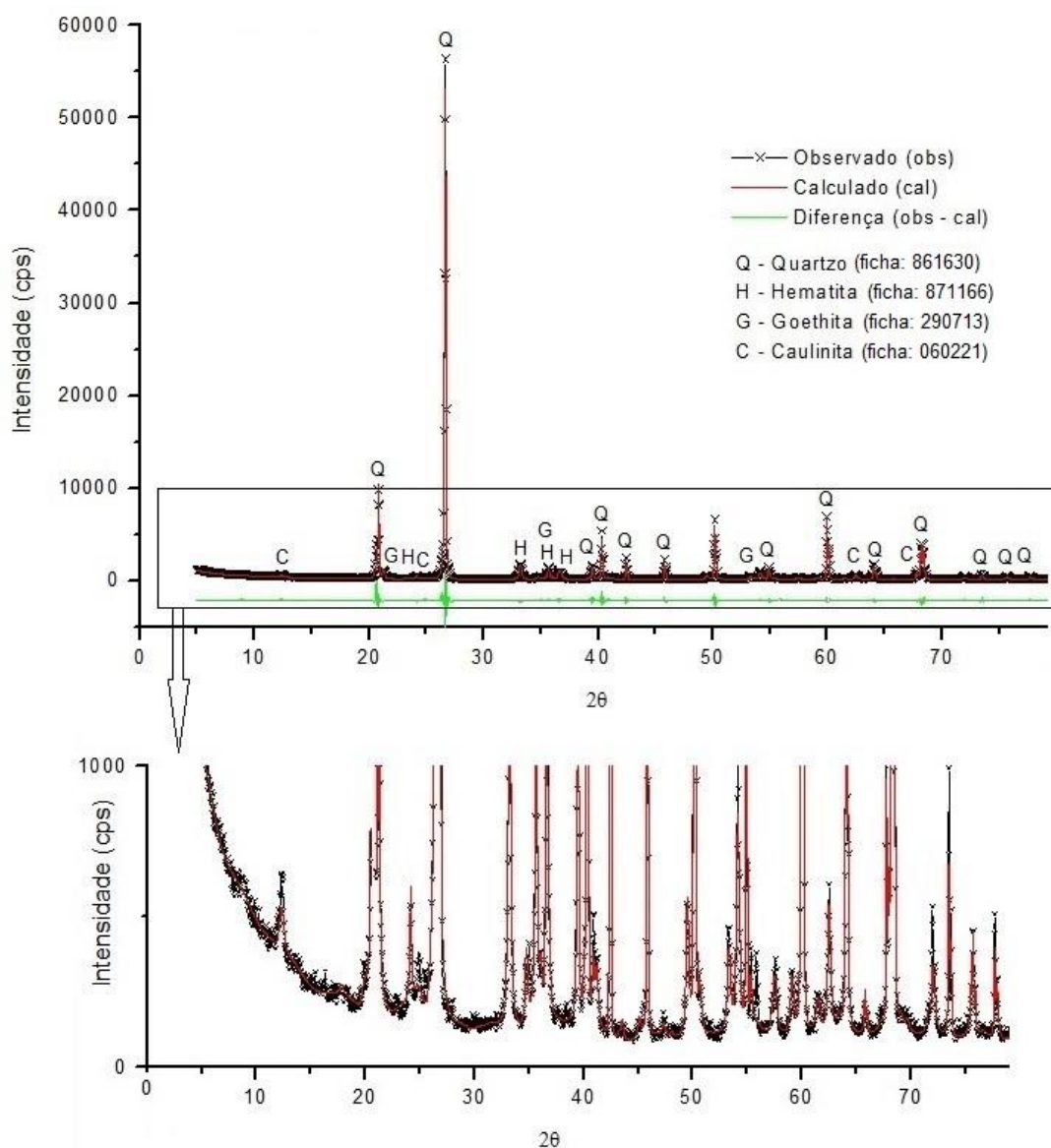


Fonte: A própria autora.

5.1.5 Determinação e quantificação das fases por difração de raios X e refinamento Rietveld

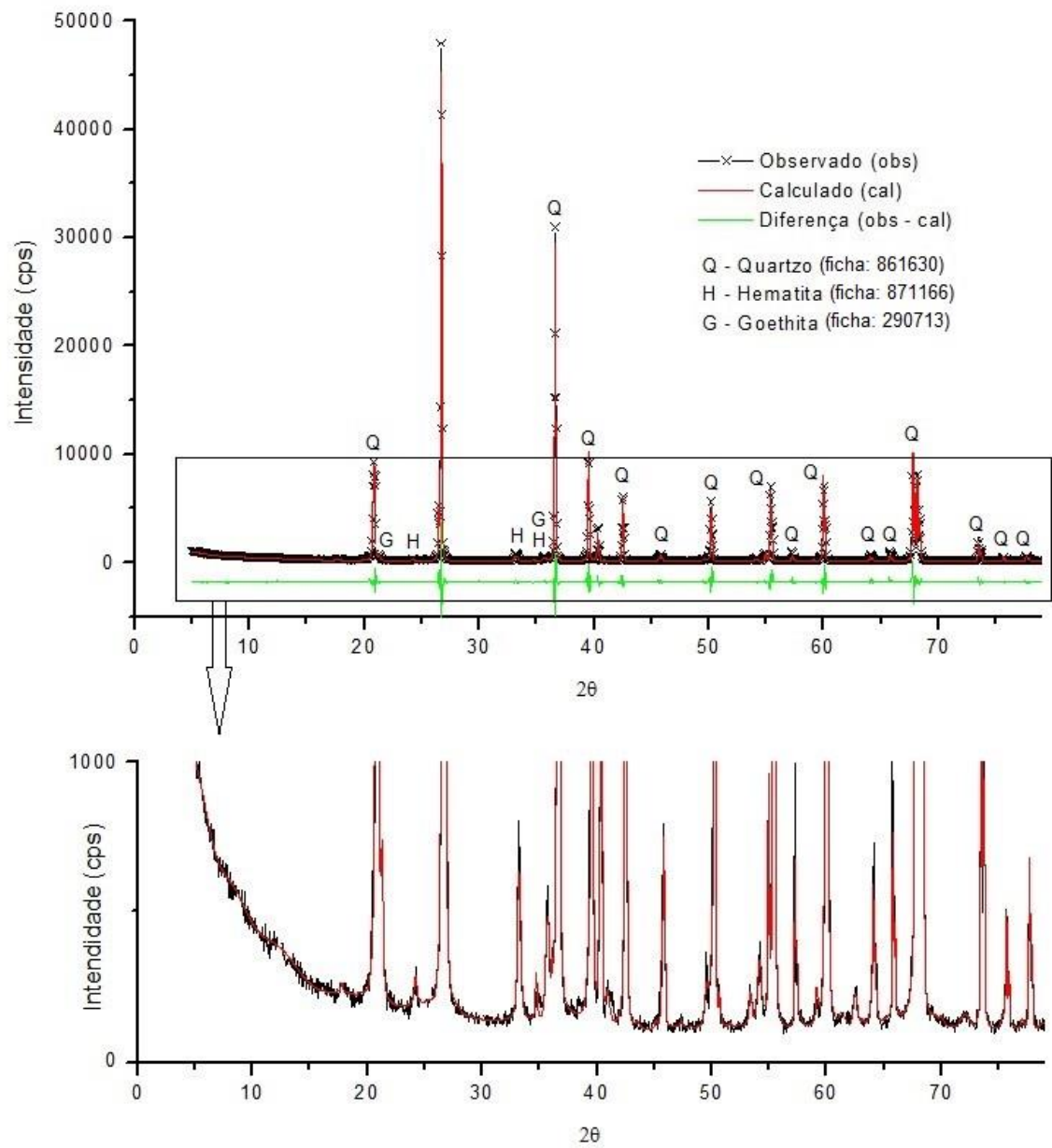
As Figuras 22, 23, 24 e 25 mostram os difratogramas refinados das amostras AG, AM, AF e SA, respectivamente. Também foi realizado um aumento do background (função Chebychev) dos difratogramas para melhor avaliar as posições dos picos, uma vez que no difratograma original a intensidade do quartzo, devido a sua alta cristalinidade, diminui a intensidade dos outros picos (SALES, 2015; MAIFREDE, 2011; SANTOS, 2009).

Figura 22 – Difratograma de raios X mostrando os resultados do refinamento para a amostra AG



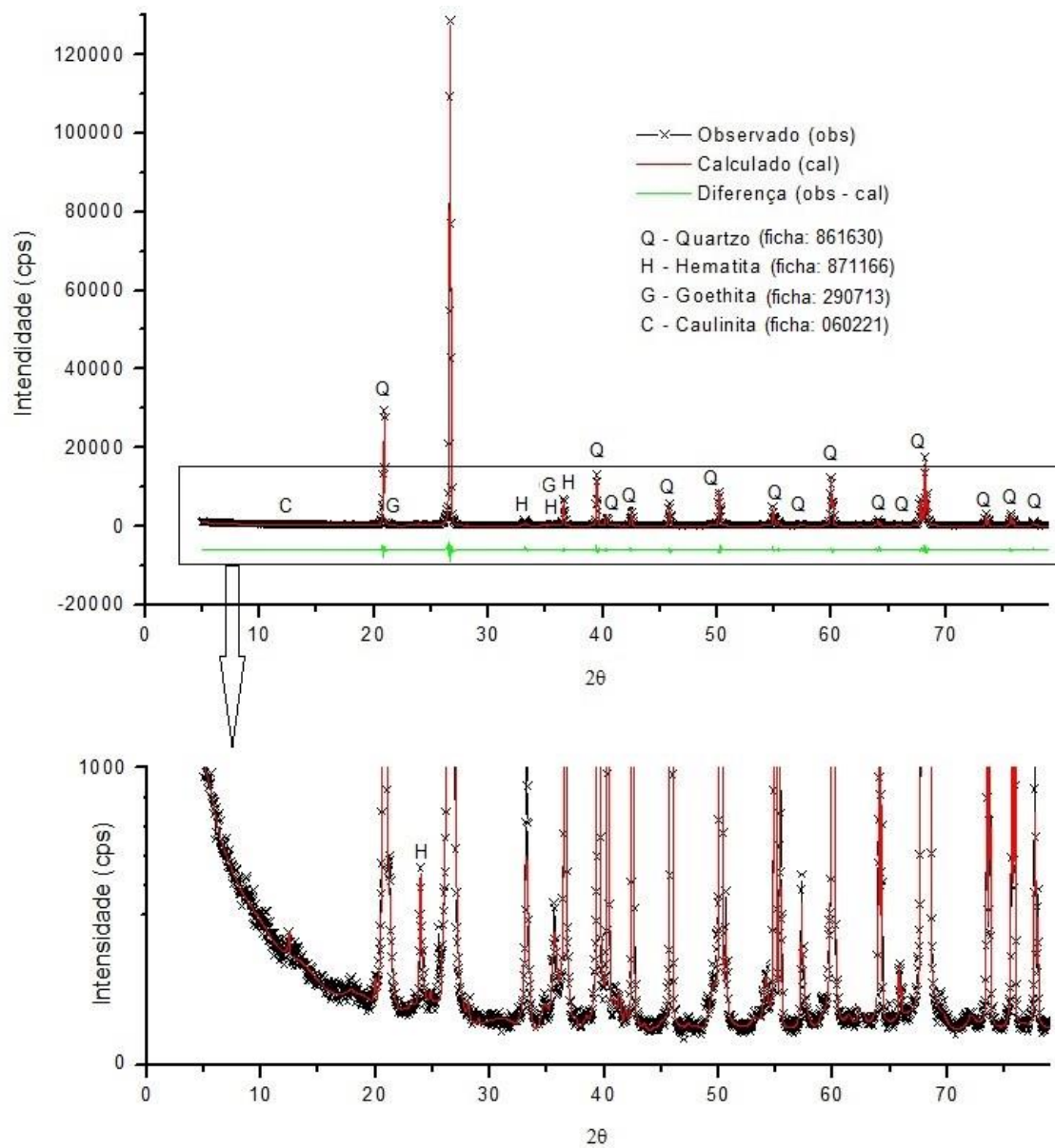
Fonte: A própria autora.

Figura 23 – Difratoograma de raios X mostrando os resultados do refinamento para a amostra AM



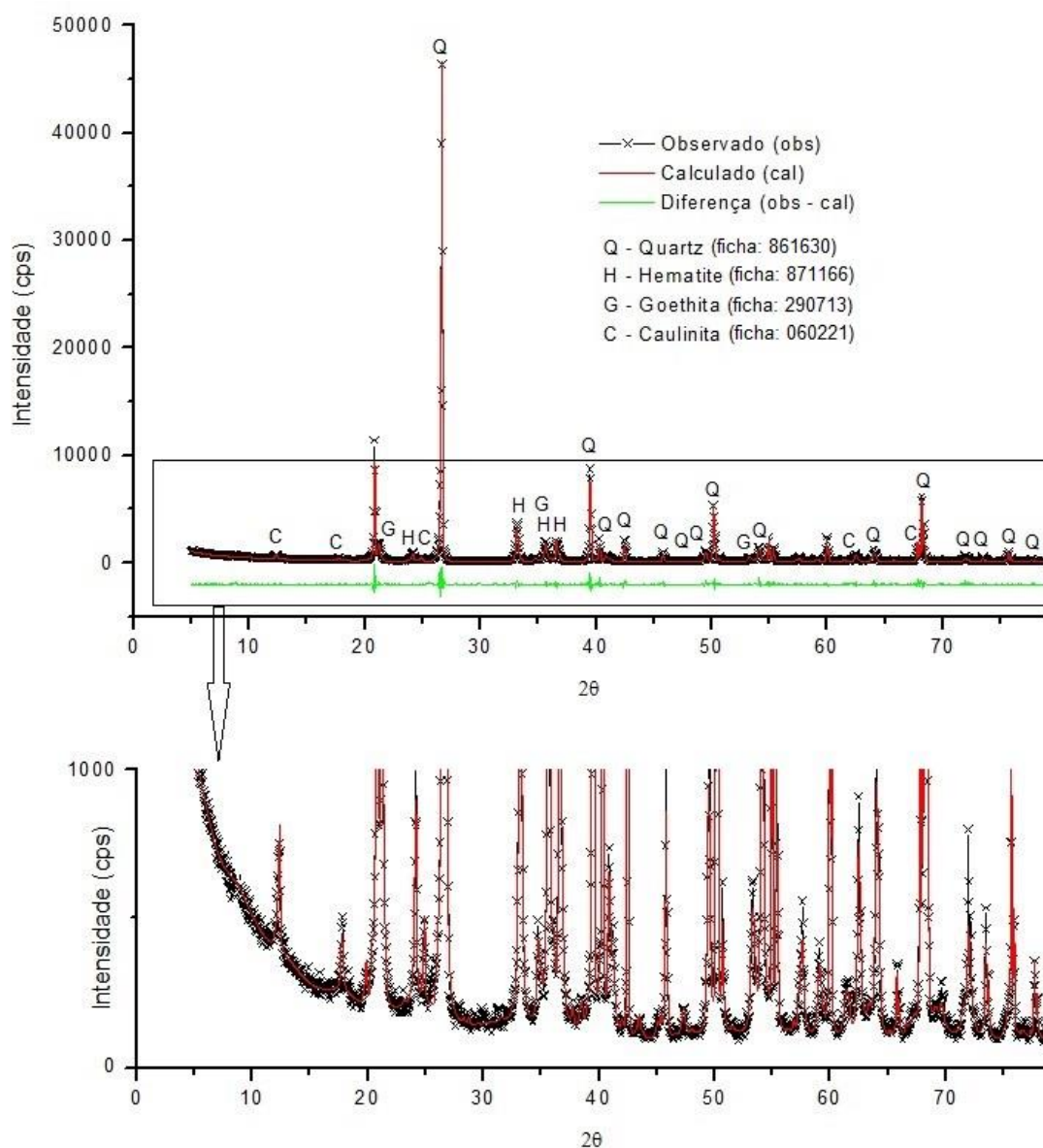
Fonte: A própria autora.

Figura 24 – Difratoograma de raios X mostrando os resultados do refinamento para a amostra AF



Fonte: A própria autora.

Figura 25 – Difratoograma de raios X mostrando os resultados do refinamento para a amostra SA



Fonte: A própria autora.

Pode-se observar que as amostras AG, AF e SA (Figuras 22, 24 e 25) são constituídas pelas fases quartzo, hematita, goethita (minerais de ferro) e caulinita. A amostra AM (Figura 23) não apresenta a fase caulinita, pois a caulinita é um argilomineral e possui granulometria fina, portanto só é encontrada nas frações mais finas do resíduo (WOLFF; COSTA, 2008; ANDRADE, 2014; GOMES, 2009).

A Tabela 11 mostra a porcentagens de cada uma das fases que compõem as amostras AG, AM, AF e SA. Pode-se observar que ocorreu uma predominância da fase quartzo, variando de 71,7% a 98,3% para as amostras SA e AM,

respectivamente. Os minerais de ferro (hematita e goethita) estão presentes em menores quantidades, sendo que a maior concentração desses minerais está presente na amostra SA (19,1%). A fase caulinita varia de 4,3% a 9,2% para as amostras AG e SA, respectivamente.

Tabela 11 – Composição mineralógica das amostras obtidas por DRX e refinamento Rietveld

Fases	Amostras			
	AG (%)	AM (%)	AF (%)	SA (%)
Quartzo (SiO ₂)	85,7 (± 1,0)	98,3 (± 1,0)	95,7 (± 1,0)	71,7 (± 1,0)
Hematita (Fe ₂ O ₃)	5,9 (± 0,5)	1,0 (± 0,3)	2,3 (± 0,5)	12,8 (± 0,5)
Goethita (FeO(OH))	4,1 (± 0,3)	0,7 (± 0,2)	1,0 (± 0,3)	6,3 (± 0,5)
Caulinita (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	4,3 (± 0,3)	---	1,0 (± 0,2)	9,2 (± 0,4)

A elevada presença de quartzo, como observado na Tabela 11, é explicada por este se tratar de resíduo advindo do processamento do minério de ferro, uma vez que a principal impureza contida nos minérios de ferro provenientes do quadrilátero ferrífero é o quartzo (WOLFF; COSTA, 2008; ORTIZ, 2014).

A presença da goethita pode ser explicada pelo fato de que em ambientes com drenagem deficiente, como o caso de uma barragem de resíduo, provavelmente, ocorre a hidratação e dissolução da hematita, ocasionando a neoformação de goethita, com consequente perda de ferro por lixiviação, como observado por Motta *et al.* (2002), Barbosa *et al.* (2009) e Machado *et al.* (2019).

Os resultados do refinamento (Figuras 22, 23, 24 e 25) demonstram que, em geral, houve boa concordância entre os difratogramas teórico e experimental. Para que o refinamento seja considerado perfeito, a linha que representa o difratograma calculado deve se sobrepor à linha que representa o difratograma observado, e a linha de diferença deve equivaler, o mais próximo possível, a uma reta. Entretanto, pode-se observar nas Figuras 22, 23, 24 e 25, que o maior desajuste mostrado pela linha da diferença dos difratogramas está associado ao pico do quartzo. Provavelmente, esse desajuste está associado ao deslocamento de 2θ e a simetria do pico de quartzo. Mas, a principal causa desse desajuste está no fato de se tratar de uma amostra contendo multiminerais (WEIDLER *et al.*, 1998).

5.1.6 Teste de lixiviação

O teste de lixiviação é um dos principais métodos utilizados para a avaliação química de resíduos sólidos quanto à sua toxicidade, pois ele determina a capacidade de imobilização de contaminantes perigosos na matriz residual, supervisionando a liberação de poluentes no meio ao qual os resíduos estarão expostos (OLIVEIRA, 2002; PIRES *et al.*, 2003).

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos para o teste de lixiviação. Pode-se observar que não ocorreu lixiviação dos metais no precipitado, principalmente do Mn (manganês), que é o metal pesado perigoso que está contido, como traço, nesse resíduo de mineração (NASCIMENTO, 2010). Dessa forma, entende-se que a reutilização desse resíduo não representa perigo ao meio ambiente e pode ser classificado de acordo com a ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004) como um resíduo Classe II B (Inertes).

Tabela 12 – Resultados do ensaio de lixiviação do precipitado

Óxido (%)	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MnO
Antes da lixiviação	46,0	46,3	6,7	0,3	0,6	0,1
Após a lixiviação	46,0	46,3	6,7	0,3	0,6	0,1

5.2 Caracterização Física e Mecânica da Rocha Artificial

5.2.1 Aspectos visuais

As Figuras 26, 27, 28 e 29 mostram o aspecto visual dos corpos de prova da rocha artificial elaborados com as amostras AG, AM, AF e SA, respectivamente. Nota-se (Figuras 26 e 29) que os corpos de prova confeccionados com as amostras AG e SA apresentaram uma coloração vermelho-amarronzada. Essa característica está relacionada ao fato de que essas amostras, possuem maiores teores de óxido de ferro em suas composições (Tabela 10).

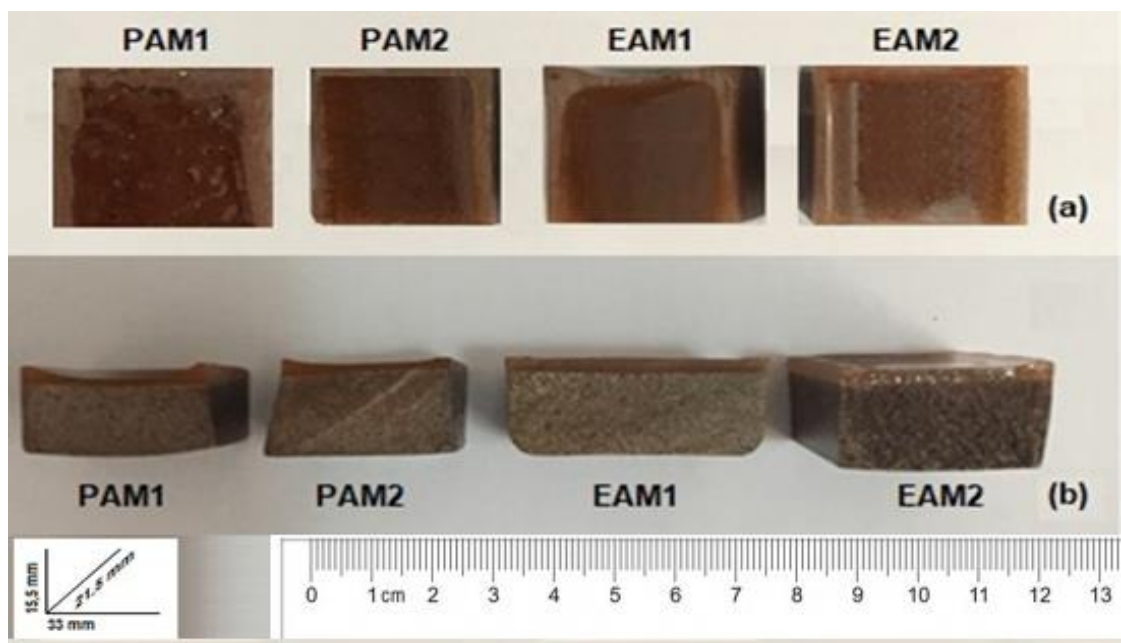
Ressalta-se que o aspecto mais claro (amarelo-amarronzado) observado nos corpos de prova apresentados nas Figuras 27 e 28 pode ser atribuído à composição majoritária de óxido de silício nas amostras AM e AF (Tabela 10).

Figura 26 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AG: (a) vista superior e (b) vista interna



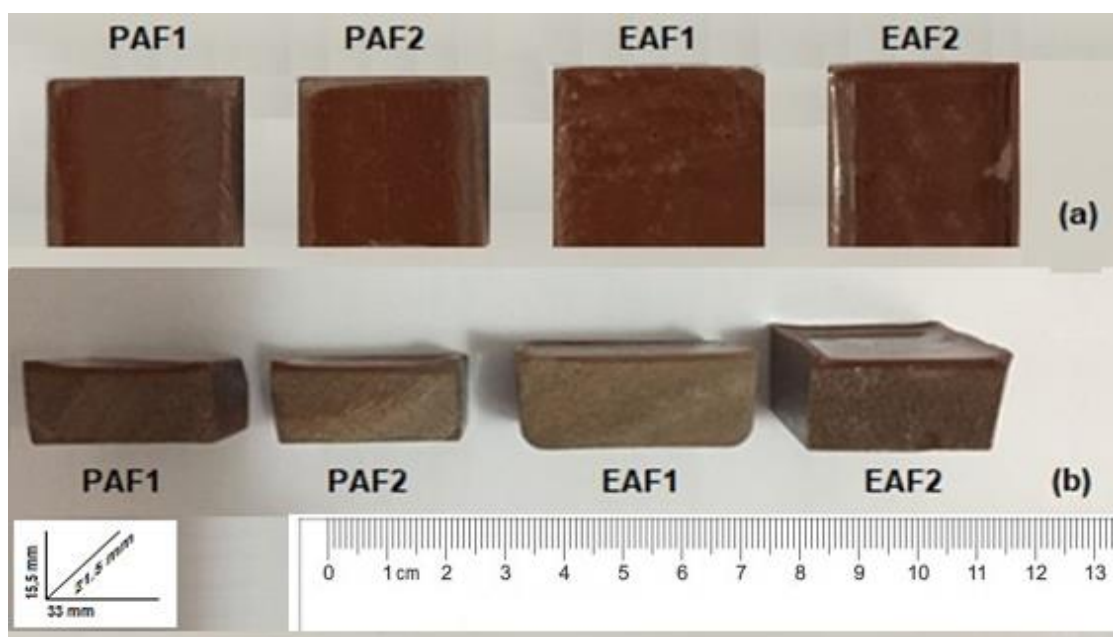
Fonte: A própria autora.

Figura 27 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AM: (a) vista superior e (b) vista interna



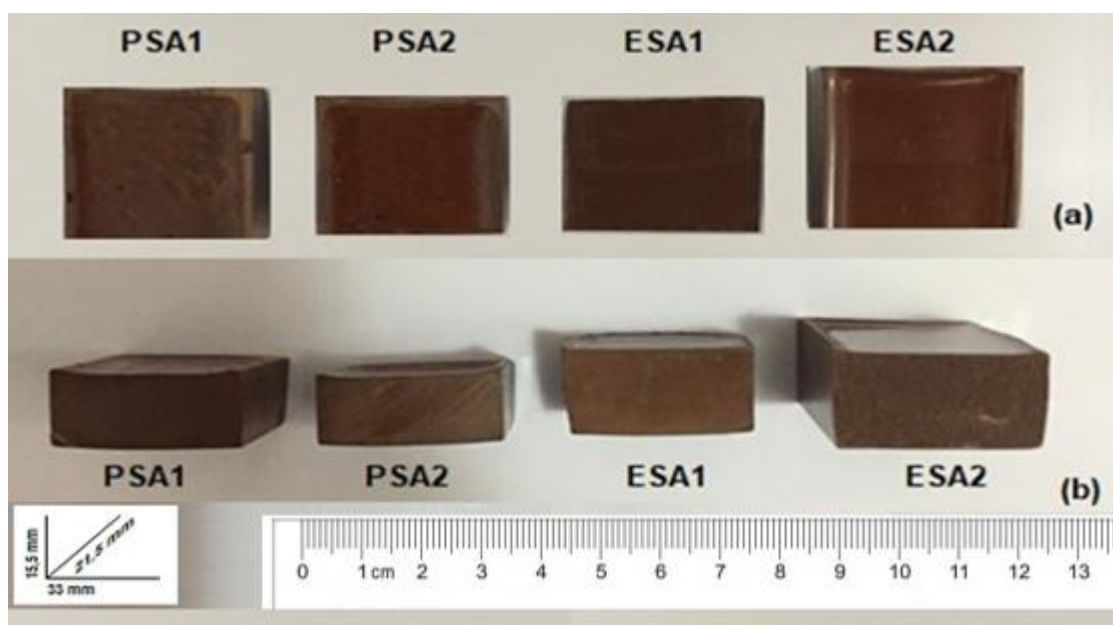
Fonte: A própria autora.

Figura 28 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AF: (a) vista superior e (b) vista interna



Fonte: A própria autora.

Figura 29 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra SA: (a) vista superior e (b) vista interna



Fonte: A própria autora.

Nas Figuras 26 (b), 27 (b) e 28 (b), nota-se a existência de uma fina camada de cor mais escura na região superior do corpo de prova, sugerindo que houve sedimentação das amostras AG, AM e AF depois de homogeneizadas nas resinas

poliéster e epóxi. Esse comportamento pode ser explicado pela constituição de partículas de maior tamanho na composição destas amostras, como mostram a Figura 17 e a Tabela 9.

A coloração mais homogênea (vermelho-amarronzada) pode-se ser observada na Figura 29 (a) e (b), essa característica também está relacionada com os tamanhos das partículas, por serem menores não ocorreu o processo de sedimentação.

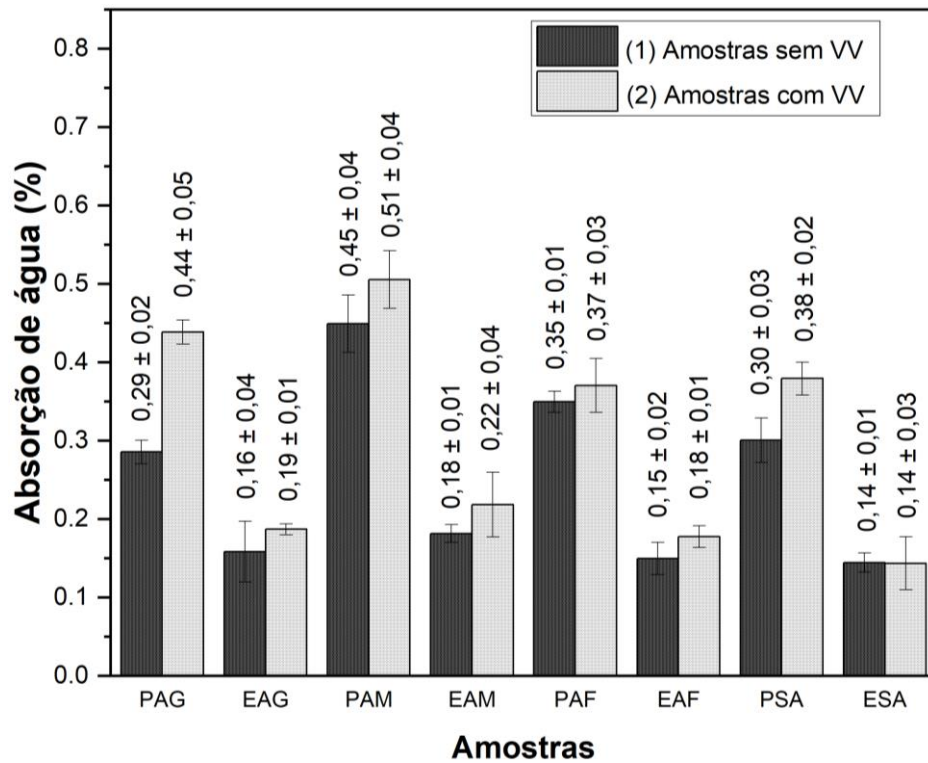
Ressalta-se que não foi observado nenhum macrodefeito superficial ou interno, indicando que o processo de homogeneização das partículas com as resinas foi satisfatório. Entretanto, ainda é necessário realizar as etapas de corte e polimento para melhorar o aspecto visual final da rocha artificial produzida. Dessa forma, é importante conhecer tanto as características estéticas superficiais como as características internas da rocha. Observou-se também que, visualmente, não houve diferença no aspecto dos corpos de prova elaborados sem e com vibração a vácuo.

5.2.2 Absorção de água, porosidade e densidade aparente

Os resultados de absorção de água, porosidade e densidade aparente estão apresentados nas Figuras 30 e 31 e nas Tabelas 13, 14, 15 e 16, respectivamente.

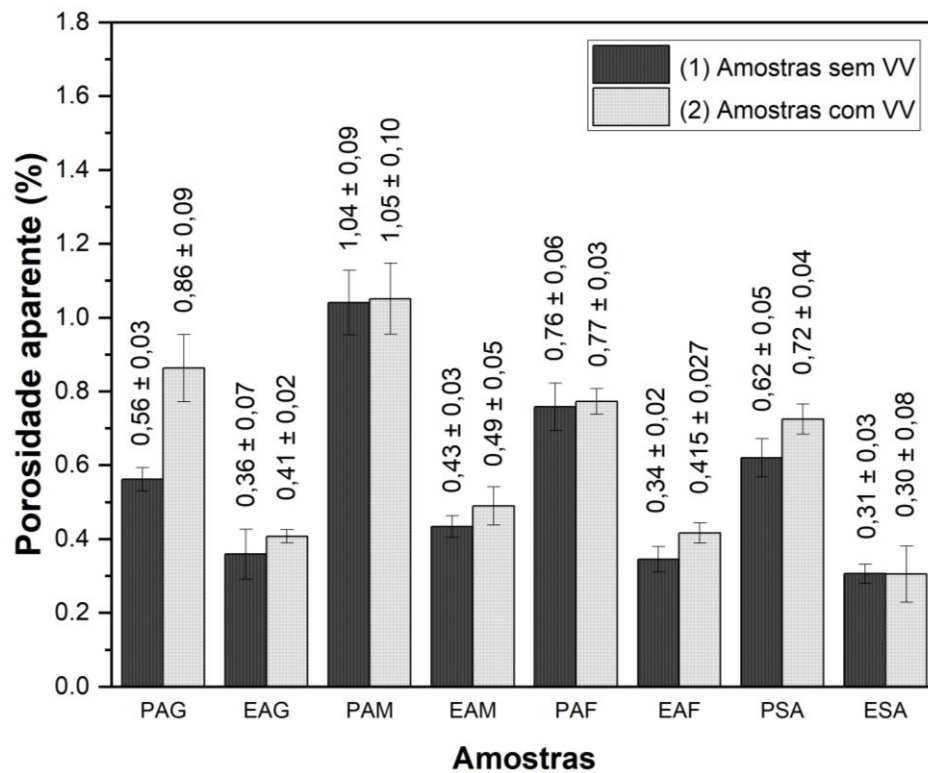
Sabe-se que não existem normas que determinam os valores limite para as propriedades físicas de rochas artificiais para revestimento. Portanto, os resultados exibidos nas Figuras 30 e 31, bem como nas Tabelas 13, 14, 15 e 16 foram comparados aos valores referenciais sugeridos pela ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) e ASTM C615 (ASTM, 1999), normas que especificam as características físicas necessárias para granitos destinados ao revestimento horizontal e vertical do interior e exterior de edifícios.

Figura 30 – Resultados de absorção de água: sem e com VV (Vibração a Vácuo)



Fonte: A própria autora.

Figura 31 – Resultados de porosidade aparente: sem e com VV (Vibração a Vácuo)



Fonte: A própria autora.

Tabela 13 – Resultados de densidade aparente dos corpos de prova elaborados com a amostra AG

Amostra	PAG1	PAG2	EAG1	EAG2
Densidade (g.cm ⁻³)	2,16 ± 0,06	1,97 ± 0,01	2,29 ± 0,16	2,18 ± 0,01

Tabela 14 – Resultados de densidade aparente dos corpos de prova elaborados com a amostra AM

Amostra	PAM1	PAM2	EAM1	EAM2
Densidade (g.cm ⁻³)	2,31 ± 0,09	2,06 ± 0,01	2,39 ± 0,01	2,25 ± 0,03

Tabela 15 – Resultados de densidade aparente dos corpos de prova elaborados com a amostra AF

Amostra	PAF1	PAF2	EAF1	EAF2
Densidade (g.cm ⁻³)	2,27 ± 0,03	2,05 ± 0,02	2,31 ± 0,01	2,15 ± 0,01

Tabela 16 – Resultados de densidade aparente dos corpos de prova elaborados com a amostra SA

Amostra	PSA1	PSA2	ESA1	ESA2
Densidade (g.cm ⁻³)	2,06 ± 0,05	1,91 ± 0,01	2,12 ± 0,01	2,12 ± 0,02

Dessa forma, efetuando-se a comparação, observou-se (Figura 30) que quase todos os corpos de prova (exceto PAG2, PAM1 e PAM2) apresentaram valores para absorção de água inferiores ao estabelecido pelas normas ($\leq 0,4\%$). Com relação aos resultados obtidos para a porosidade aparente, observou-se (Figura 31) que excluindo as amostras PAM1 e PAM2, as demais exibiram valores abaixo daquele definido pela ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015), ou seja, menor que 1%. Além disso, estes valores de porosidade aparente e absorção de água estão de acordo com os resultados obtidos por Lee *et al.* (2008) e Carvalho *et al.*, (2015), que avaliaram a porosidade e absorção de água de rochas artificiais produzidas com resíduos de granito e da indústria siderúrgica, respectivamente.

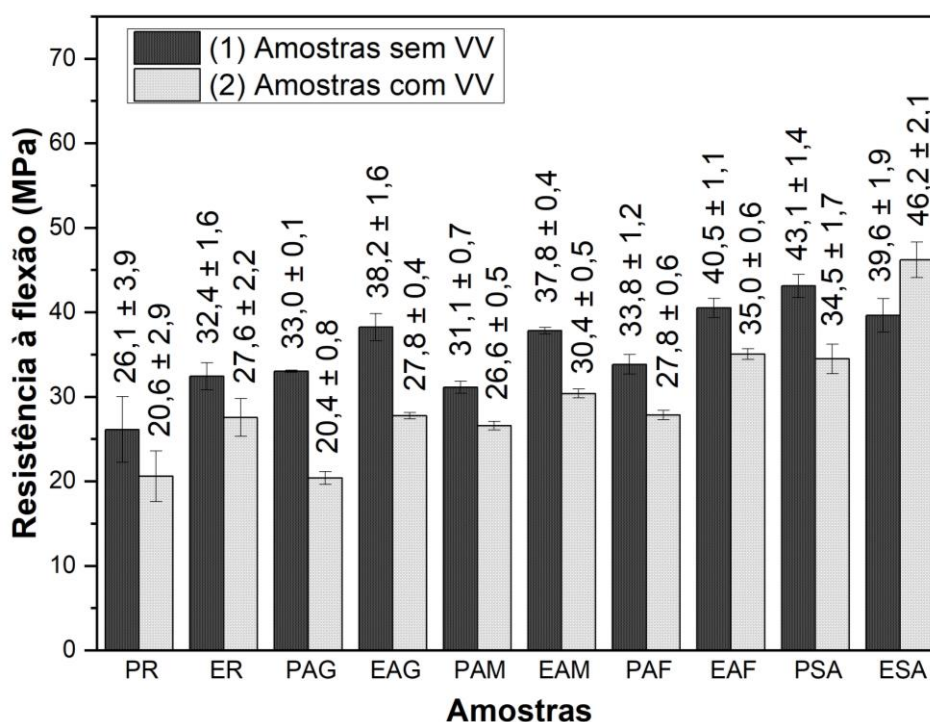
Os resultados de densidade aparente (Tabelas 13, 14, 15 e 16) foram inferiores ao estabelecido pelas normas ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) e a ASTM C615 (ASTM, 1999), ($\geq 2,56$ g/cm³). No entanto, essa circunstância não

impossibilita que a rocha artificial produzida nesse estudo seja utilizada como revestimento, visto que valores menores não causariam efeitos negativos para seu uso nesta finalidade (RIBEIRO *et al.*, 2017). Vale ressaltar que estes resultados são corroborados pelo estudo realizado por Lee *et al.* (2008).

5.2.3 Resistência à flexão de três pontos

Os resultados de resistência à flexão, para os corpos de prova produzidos com e sem vibração a vácuo (VV), estão apresentados na Figura 32. Observa-se que os corpos de prova elaborados com resina epóxi (EAG, EAM, EAF e ESA) apresentaram maior resistência mecânica do que aqueles produzidos com resina poliéster insaturada (PAG, PAM, PAF e PSA), sendo que o corpo de prova com maior resistência à flexão (46,2 MPa) foi produzido com resina epóxi, a amostra SA com vibração a vácuo. Isto, provavelmente, ocorreu porque as ligações químicas estabelecidas na resina epóxi são mais fortes que as existentes na resina poliéster, portanto, a resistência à flexão dos corpos de prova produzidos com a resina epóxi são superiores (SOLOMONS; FRYHLE, 2009).

Figura 32 – Resultados de resistência à flexão: sem e com VV (Vibração a Vácuo)



Fonte: A própria autora.

Ao comparar os corpos de prova elaborados com e sem vibração a vácuo (VV), é possível constatar que aqueles que foram submetidos ao processo de VV apresentaram menor resistência à flexão do que os que não passaram por VV (exceto os corpos de prova produzidos com resina epóxi e amostra SA). Esse resultado decorre do fato de que ambas as resinas possuem curto período de cura, ocasionando o aprisionamento dos gases liberados pela reação entre a resina e o agente endurecedor. As amostras expostas à vibração a vácuo têm seu tempo de cura reduzido, o que reflete na formação de um percentual ainda maior de microporos na estrutura interna do material (RIBEIRO *et al.*, 2017).

No caso dos corpos de prova produzidos com a amostra SA, observa-se que quando comparados os corpos de prova ESA1 e ESA2, o módulo de resistência à flexão aumenta, passando de 39,6 MPa para 46,2 MPa, respectivamente. Neste caso em particular, provavelmente, houve maior adesão e interações mais efetivas entre a amostra SA e a resina epóxi, quando os corpos de prova foram submetidos ao processamento por vibração a vácuo.

Vale ressaltar que, na literatura não existem trabalhos (artigos ou teses) utilizando resíduo de minério de ferro como carga para produção de rocha artificial, entretanto, pode-se fazer uma comparação dos resultados obtidos com os trabalhos que utilizaram outros tipos de materiais como carga. Portanto, comparando os resultados com os obtidos por Ribeiro *et al.*, 2017 (produziu rocha artificial com resíduo de mármore com resistência a flexão de 26,6 MPa), Carvalho *et al.*, 2015 (produziu rocha artificial com resíduo da indústria siderúrgica com resistência à flexão de 57,6 MPa) e Lee *et al.* (2008) (produziu rocha artificial com resíduo de granito com resistência à flexão de 46,3 MPa) pode-se observar que os valores encontrados neste estudo (Figura 32) foram superiores ou equivalentes.

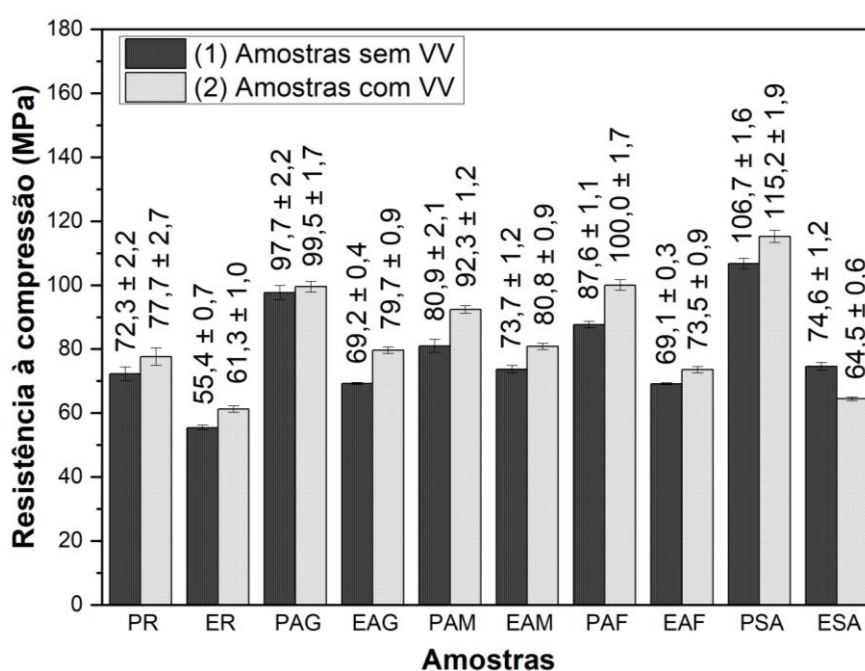
Outro fator considerado relevante foi que os resultados encontrados, para a rocha artificial produzida com resíduo de mineração, apresentaram valores superiores aos mínimos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) e a ASTM C615 (ASTM, 1999). Portanto, essa rocha artificial pode ser considerada um material de elevada resistência, possui potencial de uso em revestimentos e é adequada à construção civil.

5.2.4 Resistência a compressão e módulo de elasticidade

Os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Figura 33. Observa-se que os corpos de prova elaborados com resina poliéster insaturada (PAG, PAM e PSA) apresentaram maior resistência compressiva do que aquelas produzidas com resina epóxi (EAG, EAM e ESA), sendo que o corpo de prova com maior resistência à compressão (115,2 MPa) foi produzido com a resina poliéster insaturada, com a amostra SA e com vibração a vácuo. Segundo (SILVA *et al.*, 2018), tal comportamento pode estar associado ao fato de que as cadeias da resina poliéster insaturada podem ter se formado de forma mais satisfatória que as cadeias da resina epóxi, proporcionando um alto grau de interligação entre as cadeias ramificadas, dificultando o escorregamento das partículas do resíduo de minério de ferro quando submetidas ao ensaio de compressão.

Equiparando os corpos de prova elaborados com a mesma resina e igual faixa granulométrica da amostra de resíduo, alterando apenas o método de produção, é possível constatar que aquelas que foram submetidas ao processo de vibração a vácuo apresentaram maior resistência à compressão do que as que não passaram por VV, exceto no caso de ESA1 (74,6 MPa) e ESA2 (64,5 MPa).

Figura 33 – Resultados de resistência à compressão: sem e com VV
(Vibração a Vácuo)



Fonte: A própria autora.

Comparando os resultados de resistência a compressão com os obtidos por Palhares *et al.* (2016) (produziu rocha artificial com resíduo de ardósia com resistência a compressão de 78,0 MPa), Silva *et al.* (2018) (produziu rocha artificial com resíduo da mármore com resistência à compressão de 85,2 MPa) e Lee *et al.* (2008) (resistência à compressão de 78,7 MPa a 151,3 MPa) pode-se observar que os valores encontrados neste trabalho foram superiores ou equivalentes.

Apesar de não existir uma norma específica que classifique a resistência à compressão para rochas artificiais, Chiodi e Rodrigues (2009) mencionam que rochas ornamentais destinadas ao revestimento devem possuir resistência média entre a faixa de 70 a 130 MPa. Levando isso em consideração, entende-se que quase todos os corpos de prova elaborados apresentaram valores próximos (EAG1, EAF1 e ESA2) ou dentro desse intervalo.

Entretanto, segundo Ribeiro (2015) os fabricantes de mármore artificial relatam valores de resistência à compressão entre 97 e 150 MPa. Dessa forma, somente os corpos de prova PAG1, PAG2, PAF2, PSA1 e PSA2 apresentaram valores dentro desta faixa, o que sugere que embora os resultados estejam acima do exigido para mármore naturais, ainda é necessário aprimorar as rochas artificiais elaboradas nesse trabalho, possivelmente pela melhoria do processamento.

As Tabelas 17, 18, 19 e 20 apresentam os resultados de módulo de elasticidade obtidos pelo ensaio de compressão para as amostras da rocha artificial produzidas com AG, AM, AF e SA, respectivamente.

Tabela 17 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova elaborados com a amostra

AG

Amostra	PAG1	PAG2	EAG1	EAG2
Módulo de Elasticidade (GPa)	3,08 ± 0,51	2,93 ± 0,12	2,77 ± 0,17	2,94 ± 0,55

Tabela 18 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova elaborados com a amostra

AM

Amostra	PAM1	PAM2	EAM1	EAM2
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,70 ± 0,06	3,20 ± 0,09	2,98 ± 0,14	3,22 ± 0,14

Tabela 19 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova elaborados com a amostra

AF				
Amostra	PAF1	PAF2	EAF1	EAF2
Módulo de Elasticidade (GPa)	$2,96 \pm 0,19$	$3,17 \pm 0,28$	$2,70 \pm 0,28$	$2,94 \pm 0,28$

Tabela 20 – Módulo de elasticidade dos corpos de prova elaborados com a amostra

SA				
Amostra	PSA1	PSA2	ESA1	ESA2
Módulo de Elasticidade (GPa)	$2,73 \pm 0,35$	$3,78 \pm 0,08$	$2,52 \pm 0,18$	$2,55 \pm 0,27$

Observando as Tabelas 17, 18, 19 e 20, nota-se que o módulo de elasticidade apresentou baixa dispersão ou desvio padrão, o que confere maior confiabilidade para o uso desse material em projetos estruturais. O valor médio encontrado para o módulo de elasticidade de todas as amostras da rocha artificial elaboradas é aproximadamente 2,9 GPa, esse valor é superior àqueles determinados por Martins (2016) (produziu rocha artificial com resíduo de laminação de vidro com módulo de elasticidade de 1,2 GPa) e Silva *et al.* (2018) (produziu rocha artificial com resíduo da mármore com módulo de elasticidade de 2,1 GPa). Entretanto, Ribeiro e Rodriguez (2015) produziu mármore artificial com módulo de elasticidade superior (3,9 GPa). Uma possível explicação para essa diferença pode estar relacionada ao fato que Ribeiro e Rodriguez (2015) usaram um mecanismo de vibração a vácuo adicionado de compressão. A tecnologia vibro-compressão a vácuo pode ter proporcionado uma melhor compactação dos compósitos.

Ressalta-se que durante o ensaio de compressão foi verificado que as amostras da rocha artificial não apresentaram comportamento plástico, somente elástico, até sua fragmentação, provando que este material possui caráter frágil.

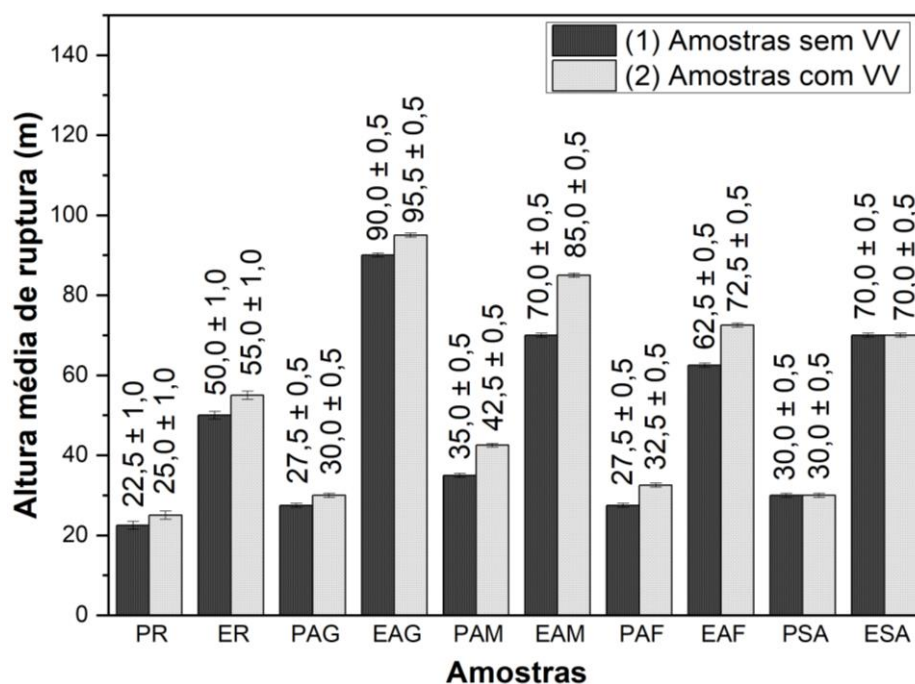
5.2.5 Ensaio de impacto de corpo duro

Os resultados de altura média de ruptura e energia de ruptura obtidos pelo ensaio de impacto de corpo duro para as amostras da rocha artificial estão respectivamente apresentados na Figura 34 e nas Tabelas 21, 22, 23 e 24.

Pode-se observar que a média das alturas apresentadas na Figura 34 para os corpos de prova confeccionados a partir de resina poliéster insaturada e diferentes cargas minerais, com e sem VV, foi de aproximadamente 32,0 cm. Já a média das alturas dos corpos de prova elaborados com resina epóxi e as frações do resíduo, com e sem VV, foi de aproximadamente 77,0 cm. Portanto, os corpos de prova produzidos com epóxi mostraram resistência ao impacto de corpo duro superior às amostras fabricadas com poliéster.

O cálculo da média das energias de ruptura organizadas nas Tabelas 21, 22, 23 e 24, obteve-se um valor igual a $2,13 \pm 0,02$ J. Ao compará-lo com o resultado de energia de ruptura média apresentado por Martins (2016) (que produziu rocha artificial com resíduo de laminação de vidro), respectivo a $2,26 \pm 0,27$ J entende-se que ambos são valores compatíveis.

Figura 34 – Resultados obtidos para altura média de ruptura dos corpos de prova da rocha artificial: (1) sem VV e (2) com VV



Fonte: A própria autora.

Tabela 21 – Resistência ao impacto de corpo duro dos corpos de prova elaborados com a amostra AG

Amostra	PAG1	PAG2	EAG1	EAG2
Energia de ruptura (J)	$1,08 \pm 0,01$	$1,18 \pm 0,01$	$3,53 \pm 0,03$	$3,73 \pm 0,03$

Tabela 22 – Resistência ao impacto de corpo duro dos corpos de prova elaborados com a amostra AM

Amostra	PAM1	PAM2	EAM1	EAM2
Energia de ruptura (J)	$1,37 \pm 0,06$	$1,67 \pm 0,03$	$2,75 \pm 0,07$	$3,33 \pm 0,04$

Tabela 23 – Resistência ao impacto de corpo duro dos corpos de prova elaborados com a amostra AF

Amostra	PAF1	PAF2	EAF1	EAF2
Energia de ruptura (J)	$1,08 \pm 0,01$	$1,28 \pm 0,01$	$2,84 \pm 0,02$	$2,45 \pm 0,02$

Tabela 24 – Resistência ao impacto de corpo duro dos corpos de prova elaborados com a amostra SA

Amostra	PSA1	PSA2	ESA1	ESA2
Energia de ruptura (J)	$1,18 \pm 0,01$	$1,18 \pm 0,02$	$2,75 \pm 0,01$	$2,75 \pm 0,02$

A norma ABNT NBR 15844 (ABNT, 2015) estabelece que a altura média de ruptura para granitos naturais deve ser maior que 30,0 cm. Comparando esse valor com os resultados apresentados na Figura 34, identifica-se que os corpos de prova PAG1 e PAF1 exibiram valores inferiores ao mencionado. Entretanto, Demartini (2017) menciona que encontrou um valor respectivo a 22,0 cm para o mármore natural comercial. Esse último valor é inferior aos obtidos nesse trabalho, mostrando que as amostras PAG1 e PAF1 também poderiam ser utilizadas.

Observando os resultados de altura média de ruptura com os obtidos por Martins (2016) (média das alturas de ruptura de 67,5 cm) e por Demartini (2017)

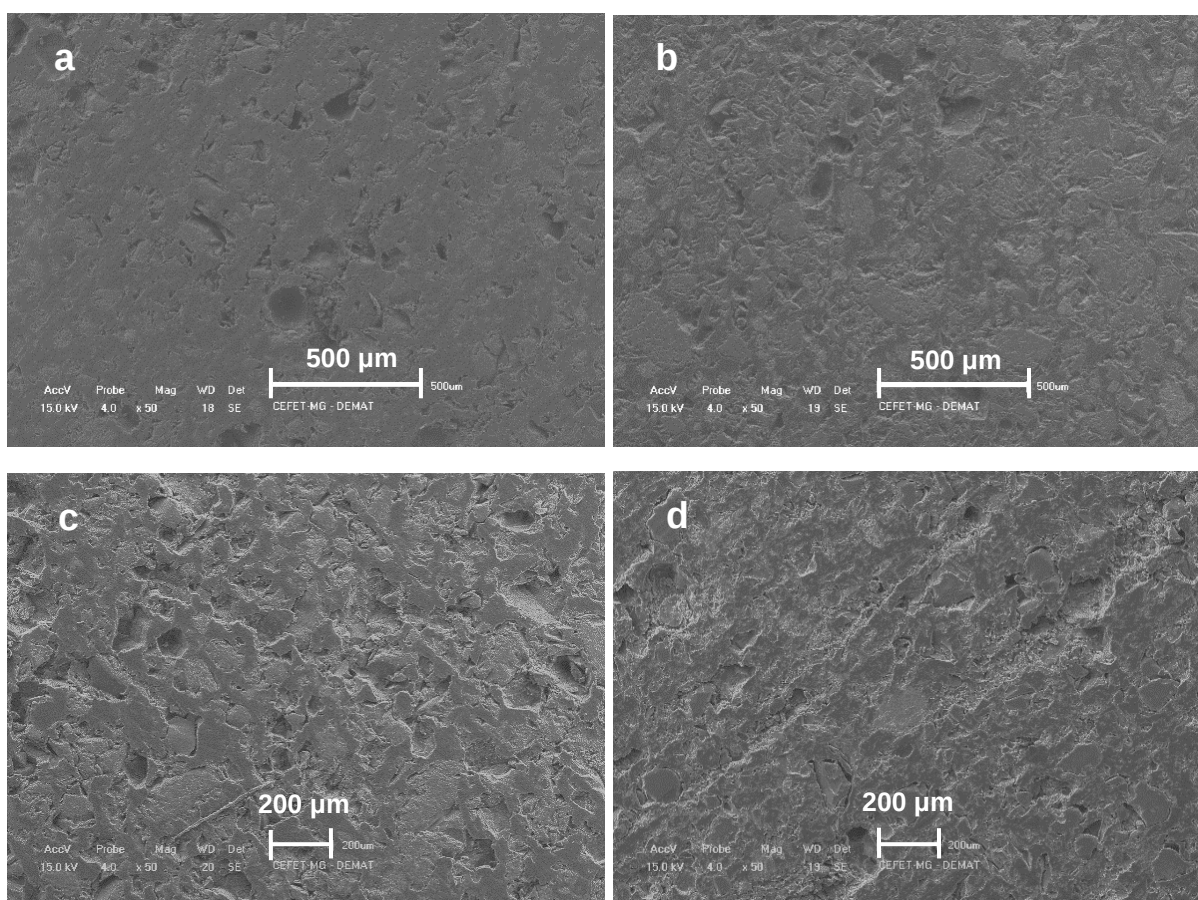
(produziu rocha artificial com resíduo de mármore com média das alturas de ruptura de 45,0 cm), nota-se que os valores encontrados neste trabalho foram superiores ou equivalentes.

Sabe-se que o ensaio de resistência ao impacto de corpo duro não é considerado absolutamente preciso, uma vez que os desvios padrão dos resultados geralmente são demasiadamente afastados entre si (aproximadamente 0,5 J) (MARTINS, 2016). Entretanto, neste estudo os resultados apresentados nas Tabelas 21, 22, 23 e 24 apontaram valores significativamente menores, o que torna os dados obtidos um pouco mais confiáveis.

5.3 Análise Microestrutural Interna da Rocha Artificial

Os resultados obtidos pela análise microestrutural, utilizando o MEV, das superfícies polidas dos corpos de prova estão apresentadas nas Figuras 35, 36, 37 e 38. Observou-se que todos os corpos de prova apresentaram poros em sua estrutura morfológica. Esse vazio microestrutural já era esperado, uma vez que as partículas que constituem o resíduo de minério de ferro e estão dispersas nas resinas poliéster e epóxi possuem formas irregulares (como apresentado nas Figuras 18, 19, 20 e 21).

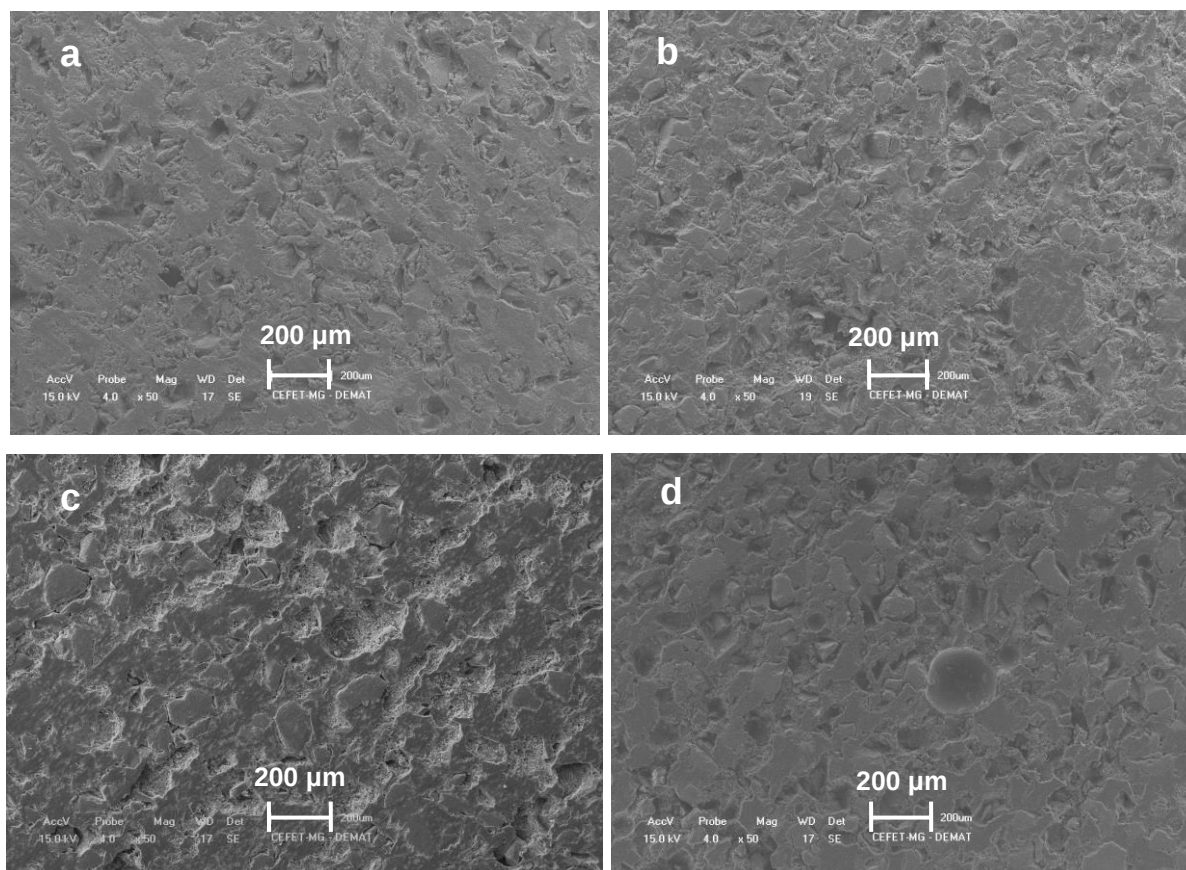
Figura 35 – Imagens (MEV) de superfícies polidas das amostras: (a) PAG1, (b) PAG2, (c) EAG1 e (d) EAG2



Fonte: A própria autora.

Comparando as diferenças de superfície observadas nas Figuras 35 (a) e (c), com as observadas nas Figuras 35 (b) e (d), pode-se pressupor que os corpos de prova elaborados com a amostra AG e com vibração a vácuo obtiveram uma menor eficiência na adesão entre as partículas e as resinas poliéster e epóxi, uma vez que micrografias mostradas na Figura 35 (a) e (c) exibem estruturas relativamente mais densas e lisas, e consequentemente, uma maior resistência a flexão, corroborando com os resultados apresentados na Figura 32.

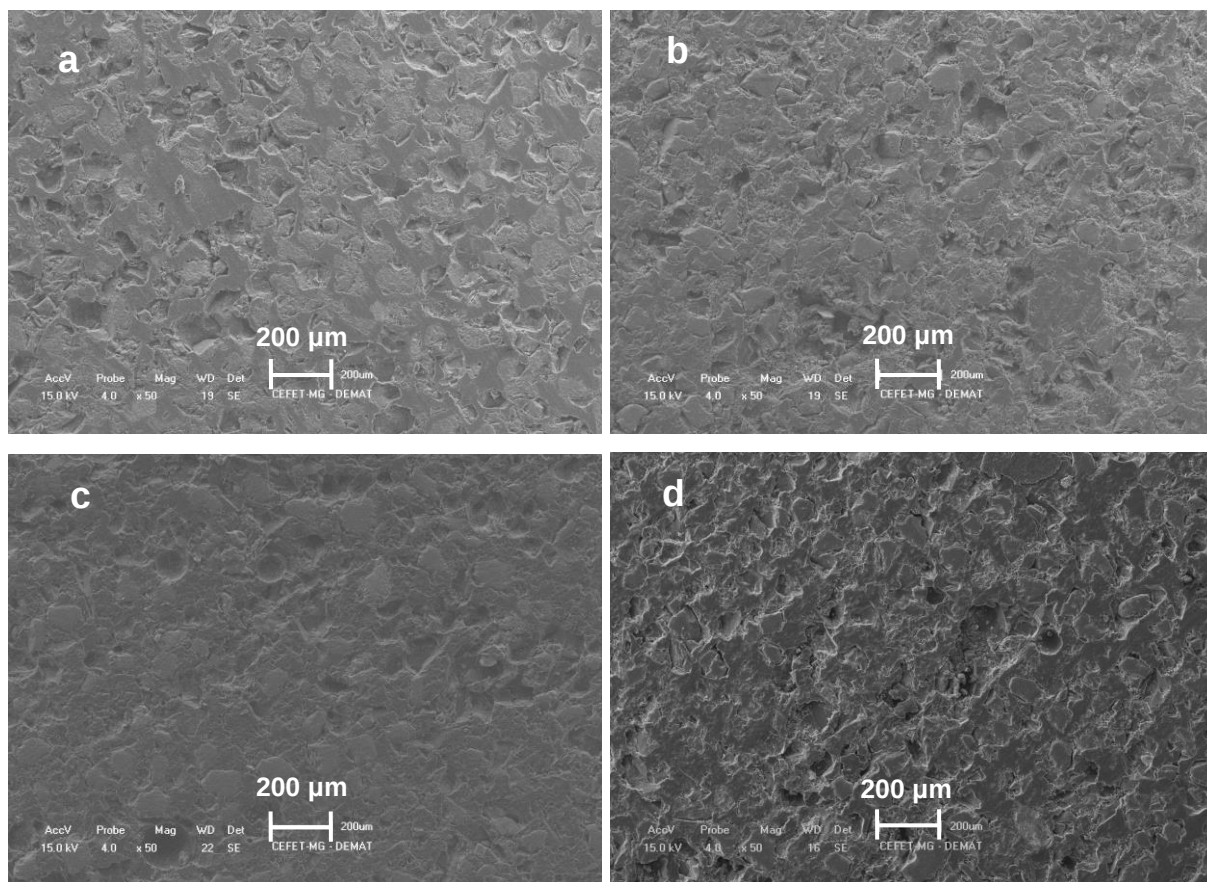
Figura 36 – Imagens (MEV) de superfícies polidas das amostras: (a) PAM1, (b) PAM2, (c) EAM1 e (d) EAM2



Fonte: A própria autora.

Observando a Figura 36, verifica-se ainda que poros foram encontrados com maior incidência nos corpos de prova confeccionados com a amostra AM, devido ao fato de que seu tamanho de grão é superior ao das demais classes granulares. Por isso, essas partículas tendem a sofrer um menor empacotamento. A baixa adesão entre carga/carga e carga/resina diminui a interface de contato, gera microcavidades, baixo molhamento e atuam como concentradores de tensão (VILELA, 2016). Por isso, pode-se associar o comportamento microestrutural encontrado, para a rocha artificial obtida com a amostra AM, com os baixos resultados alcançados pelas mesmas no teste de flexão (Figura 32).

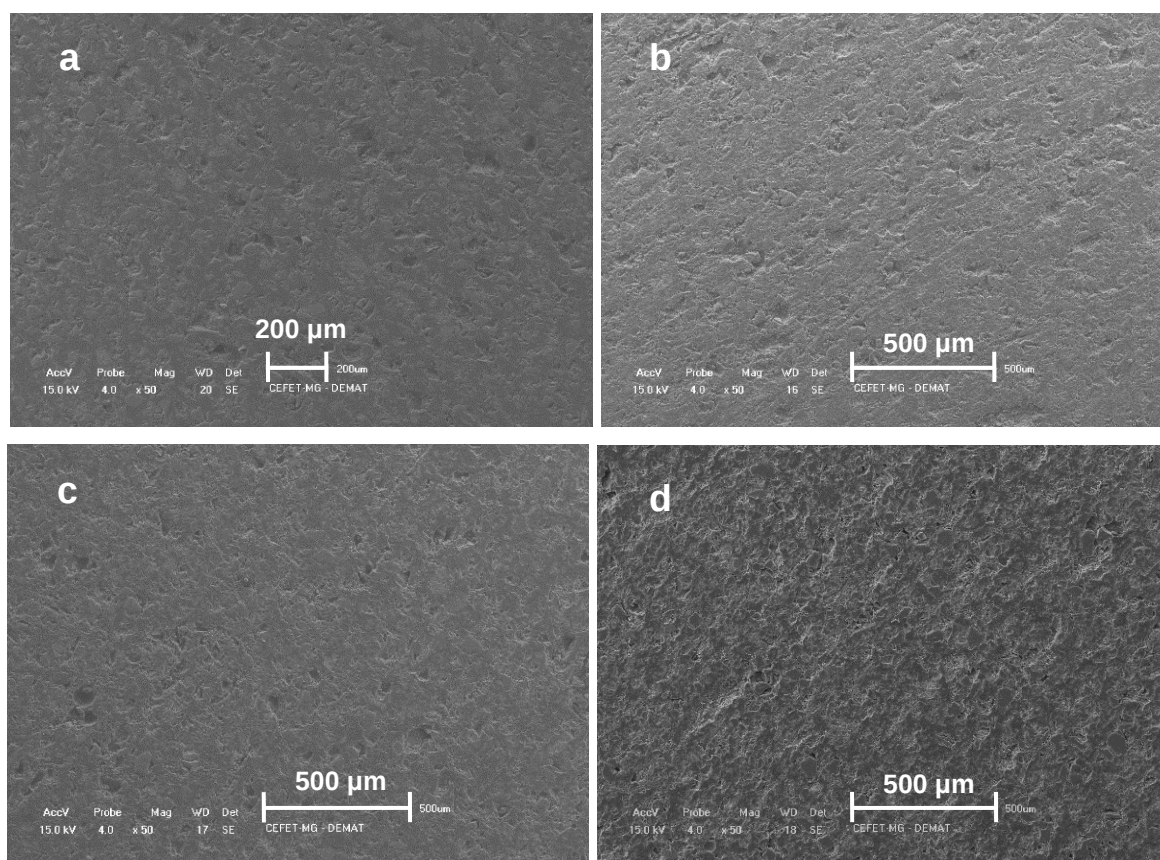
Figura 37 – Imagens (MEV) de superfícies polidas das amostras: (a) PAF1, (b) PAF2, (c) EAF1 e (d) EAF2



Fonte: A própria autora.

Nas Figuras 37 (a) e (c), respectivamente, as resinas poliéster e epóxi estão aparentemente bem aderidas às partículas. Tal condição contribuiu para que a ligação interfacial fosse mais eficaz e resultou em uma distribuição de tensão mais homogênea entre os corpos de prova PAF1 e EAF1 (Figura 32). Em contraste, observa-se, respectivamente, nas Figuras 37 (b) e (d), que os corpos de prova PAF2 e EAF2 apresentaram uma adesão entre matriz polimérica e carga mineral menor, diminuindo dessa forma sua resistência (Figura 32).

Figura 38 – Imagens (MEV) de superfícies polidas das amostras: (a) PSA1, (b) PSA2, (c) ESA1 e (d) ESA2



Fonte: A própria autora.

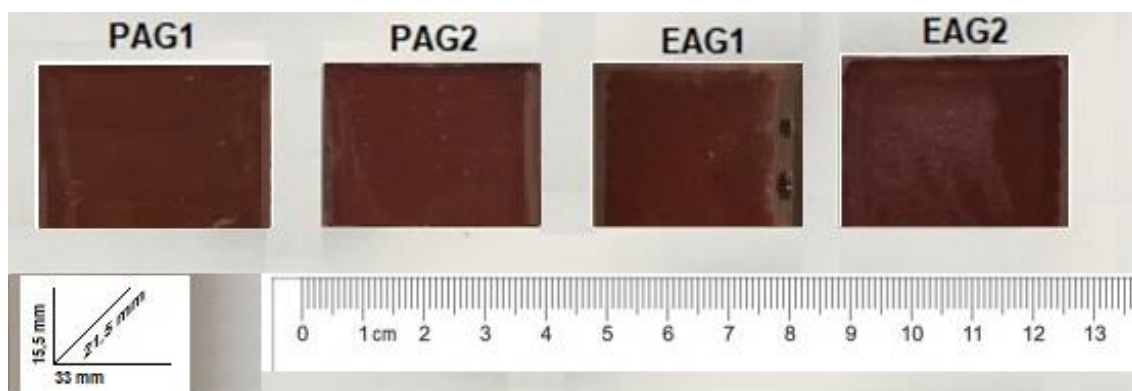
A Figura 38 mostra os resultados obtidos pela análise morfológica das amostras da rocha artificial elaboradas com SA, observa-se que as quatro superfícies polidas (a, b, c e d) exibiram estrutura densa e dispersão homogênea entre partícula/resina. Entretanto, diferenças microestruturais sensíveis podem ser notadas entre as Figuras 38 (a) e (b), bem como entre as Figuras 38 (c) e (d). Analisando a Figura 38 (d), constata-se que certamente a amostra ESA2 apresentou estrutura morfológica superior à dos demais corpos de prova. Tal característica corrobora com os resultados encontrados pelo teste de flexão (expostos na Figura 32), pois o corpo de prova ESA2 exibiu o valor mais alto de resistência à flexão.

5.4 Resistência ao Ataque Químico da Rocha Artificial

De acordo com os resultados obtidos pelo ensaio de resistência ao ataque químico (segundo uma adaptação da norma ABNT NBR 13818/97 – Anexo H), pode-se observar que não houve perda de massa quando os corpos de prova foram imergidos nas soluções aquosas de NH_4Cl (10 g/L), HCl (3% v/v), NaClO (20 g/L), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (100 g/L) e KOH (30 g/L), ou seja, as amostras permaneceram inertes.

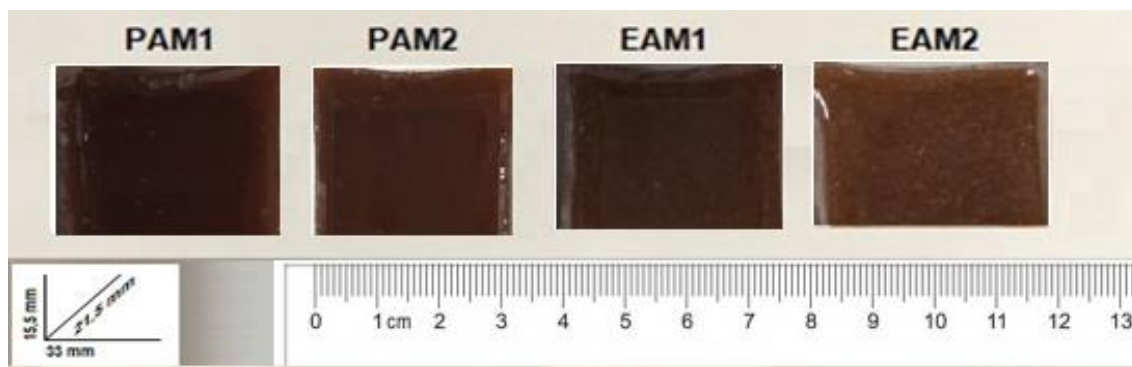
Nas Figuras 39, 40, 41 e 42 é possível observar os aspectos visuais das superfícies dos corpos de prova após imersão. Comparando com as Figuras 26 (a), 27 (a), 28 (a) e 29 (a) (antes da imersão), é possível verificar que não ocorreram alterações superficiais, ou seja, o brilho, a textura e o estado normal de cor mantiveram-se iguais. Portanto, pode-se afirmar que o uso desses reagentes químicos, que geralmente estão presentes na composição de produtos de limpeza ou em substâncias orgânicas naturais, sobre a superfície polida da rocha artificial não causaria danos à mesma.

Figura 39 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AG após ataque químico



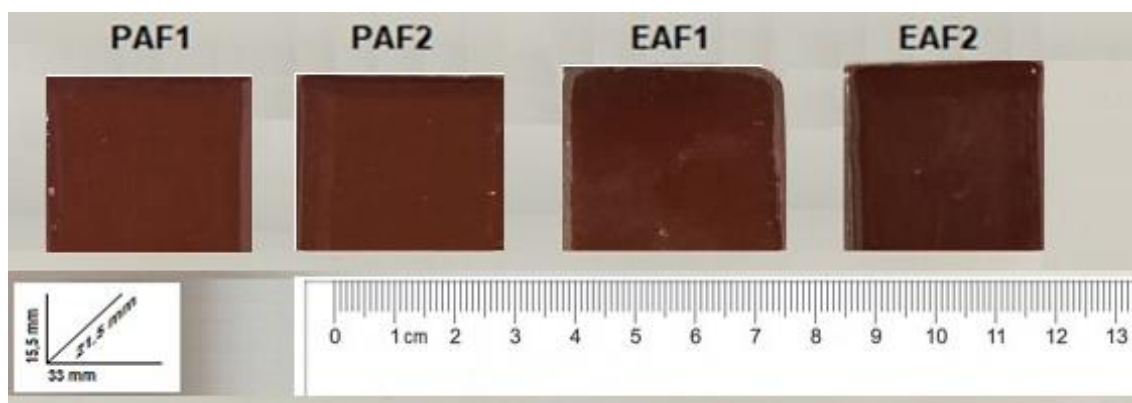
Fonte: A própria autora.

Figura 40 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AM após ataque químico



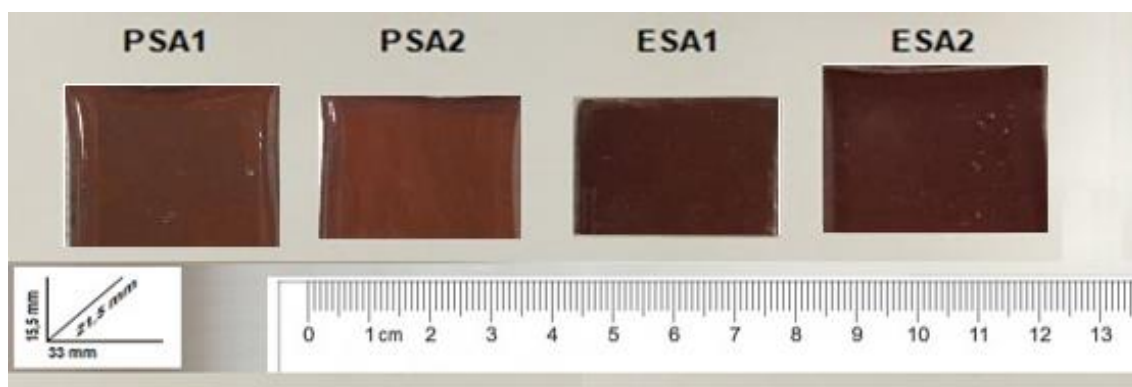
Fonte: A própria autora.

Figura 41 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra AF após ataque químico



Fonte: A própria autora.

Figura 42 – Aspecto visual dos corpos de prova elaborados com a amostra SA após ataque químico



Fonte: A própria autora.

6 CONCLUSÕES

O resultado do peneiramento a úmido mostrou que as faixas granulométricas intercaladas entre (- 0,60 mm + 0,20 mm), (- 0,20 mm + 0,06 mm) e inferiores a 0,06 mm apresentaram as maiores porcentagens em massa (93,06%) e a fração que apresentou maior porcentagem foi a inferior a 0,06 mm (43,87%) (SA).

Mediante os resultados obtidos para a distribuição granulométrica pela análise de granulometria a laser, conclui-se que o perfil de distribuição do tamanho de grãos do resíduo proveniente do rompimento da barragem do Fundão é similar à disposição de tamanhos apresentada pelos demais resíduos oriundos do beneficiamento de minério de ferro originário da região do Quadrilátero Ferrífero.

De acordo com a análise realizada por FRX para o resíduo, as amostras AM e AF apresentaram alto teor de SiO_2 , 76,6% e 77,0%, respectivamente. Para as faixas granulométricas das amostras AM e AF, constatou-se um teor médio de óxido de ferro de 19,55%, enquanto que para os grãos finos (amostra SA) o referido mineral apresentou-se em 50,1%.

Através das micrografias, pode-se verificar que a morfologia do resíduo apresentou partículas maiores, sub-arredondadas, irregulares e angulares, provavelmente quartzo, para as amostras AF e AM. Bem como exibiu a conformação de partículas tabulares, provavelmente hematita, para a amostra AG. Além disso, observou-se a existência de partículas menores, finas e aderidas à superfície, provavelmente hematita e caulinita, na amostra SA.

Quanto à difração de raios X e refinamento de Rietveld para as amostras do resíduo, observou-se uma predominância da fase quartzo nas amostras como um todo. Já os minerais de ferro (hematita e goethita) estiveram presentes em menores quantidades. Além disso, os resultados do refinamento mostraram que, em geral, houve boa concordância entre os difratogramas teórico e experimental.

Pelo teste de lixiviação para as amostras do resíduo, constatou-se que não ocorreu lixiviação dos metais, principalmente do Mn (mangânês), sendo classificado como um resíduo inerte de Classe II B.

Pela observação dos aspectos visuais da rocha artificial, notou-se que os corpos de prova elaborados com as amostras AG e SA apresentaram uma tonalidade vermelho-amarronzada. Enquanto que àquelas elaboradas com as

amostras AM e AF exibiram uma coloração amarelo-amarronzada. Percebeu-se também a formação de uma fina camada de cor mais escura na região superior do material rochoso, devido a sedimentação das amostras AG, AM e AF quando misturadas às resinas poliéster e epóxi. Não foram observadas diferenças significativas no aspecto visual dos corpos de prova elaborados sem e com vibração a vácuo.

A respeito dos resultados encontrados pelo teste de absorção de água inferiu-se que, com exceção das amostras PAG2, PAM1 e PAM2, todas as demais exibiram teores de absorção inferiores a 0,4%, valor de referência estabelecido para granitos naturais. Os resultados do teste de porosidade aparente mostraram valores menores que 1,0%, exceto para as amostras PAM1 e PAM2. Os resultados obtidos pelo teste de densidade aparente apresentaram valores inferiores a 2,56 g/cm³, devido ao uso de 30% (p/p) de carga polimérica na fabricação das rochas artificiais.

No tocante aos resultados obtidos pelo teste de flexão de três pontos para as amostras da rocha artificial, percebeu-se que aquelas elaboradas com resina poliéster apresentaram menor resistência à flexão. Assim como as amostras submetidas à vibração a vácuo alcançaram valores inferiores às aquelas que não passaram por esse processo, com exceção da amostra ESA2 (que inclusive foi o melhor valor obtido, igual a 46,2 MPa).

Em relação aos resultados alcançados pelo teste de compressão uniaxial simples, constatou-se que as amostras produzidas com resina poliéster demonstraram ser mais resistentes à incidência de tensões compressivas. A amostra PSA2 apresentou o melhor resultado para resistência à compressão (115,2 MPa). Em geral, os resultados referentes ao módulo de elasticidade mostraram que apesar de terem boa resistência mecânica, o material rochoso artificial é frágil.

No que corresponde ao teste de resistência ao impacto de corpo duro, aferiu-se que as amostras elaboradas com a mesma composição granulométrica, com adição de resina epóxi, expuseram resultados superiores às aquelas produzidas com resina poliéster. Assim como, em geral, as amostras submetidas à vibração a vácuo obtiveram melhor resistência ao impacto.

Em geral, as micrografias oriundas da análise microestrutural por MEV mostraram a existência de vazios na superfície polida das amostras da rocha artificial. Especificamente, a predominância dos poros se concentrou nas amostras

que passaram por vibração a vácuo, exceto no caso de ESA2. A formação desses vazios está atrelada ao uso de catalisador na cura da resina polimérica.

Pelo ensaio de resistência ao ataque químico não foi observada perda de massa nem alterabilidade química depois que os corpos de prova foram imersos nas soluções aquosas de NH_4Cl (10 g/L), HCl (3% v/v), NaClO (20 g/L), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (100 g/L) e KOH (30 g/L), permanecendo inertes.

De acordo com os resultados obtidos pela caracterização tanto do resíduo quanto das amostras da rocha artificial, pode-se presumir que não existem objeções químicas que impeçam a reutilização desse resíduo para produção desse tipo de rocha. E que, dependendo do tipo de aplicação da rocha artificial, não há necessidade de fazer a separação por faixa granulométrica, o que poderia acarretar em uma diminuição do custo de produção. Além disso, as propriedades físicas e mecânicas obtidas para a rocha artificial confirmam que este resíduo pode ser utilizado para este fim, ou seja, a rocha artificial produzida com este resíduo pode ser utilizada como material de revestimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS, Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2018.** Informe 01/2019, 2019a.

ABIROCHAS, Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no 1º Trimestre de 2019.** Informe 02/2019, 2019b.

ABIROCHAS, Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **O setor brasileiro de rochas ornamentais.** FILHO, C. C. (Geólogo). Brasília, 2018. 34 p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502, Análise Granulométrica – Rochas e Solos.** Rio de Janeiro, 1995.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181, Solo – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 2016.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004, Classificação de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004. 63 p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10005, Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004. 7 p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10006, Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004. 7 p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12766: Rochas para revestimento, determinação da massa específica aparente, porosidade e absorção de água aparente.** Rio de Janeiro, 1992.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13028: Mineração: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13029: Mineração: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha.** Rio de Janeiro, 2017.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio. Anexo H – Determinação da resistência ao ataque químico.** Rio de Janeiro, 1997.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15844: Rochas para revestimento – Requisitos para granitos.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15845: Rochas para revestimento – Métodos de ensaio. Anexo B – Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2010a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15845: Rochas para revestimento – Métodos de ensaio. Anexo E – Resistência à compressão uniaxial.** Rio de Janeiro, 2010b.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15845: Rochas para revestimento – Métodos de ensaio. Anexo F – Resistência à flexão (módulo de ruptura).** Rio de Janeiro, 2010c.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15845: Rochas para revestimento – Métodos de ensaio. Anexo H – Resistência ao impacto de corpo duro.** Rio de Janeiro, 2010d.

AGUIAR, M. C. **Desenvolvimento de rocha artificial com pó de rocha e aglomerante polimérico e geopolimérico.** 2016. 164 f. Tese (Doutorado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.

ALMEIDA, N. M. B. G. de. **Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta.** 2012. 216 f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2012.

AMN, Agência Nacional de Mineração. **Informe Mineral: 2/2018.** Brasília, 2019a. 25 p.

AMN, Agência Nacional de Mineração. **Sumário Mineral: 2017.** COSTA, M. M. D.; MEDEIROS, K. A.; LIMA, T. M. (Coordenadores). Brasília: AMN, 2019b. v. 37. 201 p.

ANDRADE, L. C. R. **Caracterização de resíduos de mineração de ferro, *in natura* e segregados, para aplicação como material de construção civil.** 2014. 112 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.** 2006. 145 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ASTM, American Society For Testing And Materials. **ASTM C97: Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone.** 2018.

ASTM, American Society For Testing And Materials. **ASTM C373: Standard test methods for determination of water absorption and associated properties by vacuum method for pressed ceramic tiles and glass tiles and boil method for extruded ceramic tiles non-tile fired ceramic whiteware products.** 2017.

ASTM, American Society For Testing And Materials. **ASTM C615: Standard specification for granite dimension stone**. 1999.

BALANÇO MINERAL BRASILEIRO. **Ministério de Minas e Energia**. Ano base 2001.

BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R. **Relações pedomorfogeológicas nas chapadas elevadas do Distrito Federal**. Revista Brasileira Ciência do Solo, v. 33, n. 5, p. 1379-1383, 2009.

BASTOS, L. A. de C.; SILVA, G. C. S.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. **Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, n. 10, p. 1-9, 2016.

BAUER, A.; VELDE, B.; BERGER, G. **Kaolinite transformation in high molar KOH solutions**. Applied Geochemistry, v. 13, n. 5, p. 619-629, 1998.

BAUER, A; BERGER, G. **Kaolinite and Smectite dissolution rate in right molar KOH solutions at 35 ° and 80 °C**. Applied Geochemistry, v. 13, n. 7, p. 905-916, 1998.

BBC NEWS, British Broadcasting Corporation. **Brumadinho é maior acidente de trabalho já registrado no Brasil**. Felipe Souza e João Fellet, da BBC News Brasil em São Paulo, 29 jan. 2019.

BEZERRA, C. G. **Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamentento físico-químico e mecânico de pastas de cimento**. 2017. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. FILHO, O. B. F. (Coordenador Geral). Brasília: ANM, 2019. 34 p.

BRASIL. **Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. In: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Minas Gerais, 2015.

BRASIL. Lei Federal n. 12.334, de 20 de set. de 2010. **Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)**, Brasília, DF.

BRASIL. Lei Federal n. 12.305, de 2 de ago. de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Brasília, DF.

CALLISTER, Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. 8. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2012.

CANDIDO, V. S. **Utilização de argilito e chamote de blocos de vedação na composição de massa de pavimento intertravado cerâmico adoquim**. 2012. 29f.

Tese (Mestrado) - Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2012.

CAO, X.; LEE, L. J. **Controlo f shrinkage and residual styrene of unsaturated polyester resins cured at low temperatures: I. Effect of curing agents**. Polymer, v. 44, n. 6, p. 1893-1902, 2003.

CARVALHO, E. A. S.; MARQUES, V. R.; RODRIGUES, R. J. S.; RIBEIRO, C. E. G.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. **Development of Epoxy Matrix Artificial Stone Incorporated with sintering residue from steelmaking industry**. Materials Research, v. 18, p. 235-239, 2015.

CARVALHO, E. A. S.; VILELA, N. F.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F.; SILVA, L. C. **Novel artificial ornamental stone developed with quarry waste in epoxy composite**. Materials Research, v. 1, p. 1-6, 2018a.

CARVALHO, P. S. L. de; MESQUITA, P. P. D.; REGIS, R. D. D.; MEIRELLIS, T. de L. **Sustentabilidade socioambiental da mineração**. Mineração, BNDES setorial 47, p. 333-390, 2018b.

CHACÓN, Y. G. **Análise de um compósito pultrudado: microscopia digital, caracterização mecânica e envelhecimento**. 2008. 119 p. Tese (Doutorado) – Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

CHEN, H.; HE, H.; TIAN, S.; CHEN, S. **Recycling of waste artificial marble powder in HDPE-Wood composites**. Polymer Composites, v. 39, n. 7, p. 2347-2355, 2018.

CHIGANNE, F.; MARCHE, C.; MAHDI, T. **Modelisation probabiliste du debit de rupture par submersion d'un barrage en remblai**. Anadian Journal of Civil Engeneering, v. 41, n. 8, p. 677-685, ago. 2014.

CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, E. de P. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos**. São Paulo: Abirochas, 2009. 118 p.

CNI, Confederação Nacional da Indústria; IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Mineração e Economia Verde: Encontro da Indústria para a Sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2012.

COOK, W. D.; MEHRABI, M.; EDWARD, G. **Ageing and yielding in model epoxy thermoset**. Polymer, v. 40, p. 1209-1218, 1999.

COSTA, A. V.; GUMIERI, A. G.; BRANDÃO, P. R. G. **Piso intertravado produzido com rejeito de sínter feed**. Revista IBRACON de estruturas e materiais, v. 7, n. 2, p. 228-259, abr. 2014.

CUPERTINO, L. F. **Modelagem do módulo de Young em nanocompósitos através de Inteligência Computacional**. 2009. 82 f. Dissertação (Mestrado) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2009.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Material**. New York: Oxford University Press, 2006.

DAVE, K.; LAWRENCE, S.; PENNOCK, D. M. **Mining the peanut gallery: Opinion extraction and semantic classification of product reviews**. In: Proceedings of the 12th international conference on World Wide Web, p. 519-528, ACM, 2003.

DEMARTINI, T. J. da C.; RODRÍGUEZ, R. J. S.; SILVA, F. S. **Physical and mechanical evaluation of artificial marble produced with dolomitic marble residue processed by diamond-plated bladed gang-saws**. Journal of Materials Research and Technology, v. 7, n. 3, p. 308-313, 2018.

DEY, S.; PANI, S.; MOHANTA, M. K.; SINGH, R. **Utilization of Iron Ore Slimes: A Future Prospective**. Separation Science and Technology, v. 47, p. 769-776, 2012.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. **NRM-18: Normas Reguladoras de Mineração - Portaria nº 12**. Brasília, 2002.

FASTEN GROUP. **Mármore Artificial**. Jiangsu City, Jiangsu Province, China, 2020.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Inventário de resíduos sólidos da mineração – Ano base 2017**. Belo Horizonte: FEAM, 2018. 47 p.

FERNANDES, F.R.C.; ARAÚJO, E.R. **Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais**. In: Conflitos ambientais na indústria mineira e metalúrgica... Rio de Janeiro: CETEM/CICP, p. 65-88, 2016.

FENG, D.; DEVENTER, J. S. J. V.; ALDRICH, C. **Removal of pollutants from acid mine wastewater using metallurgical by-product slags**. Separation and Purification Technology, v. 40, p. 61-67, nov. 2004.

FIGUEIREDO, M. M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2007.

FOLHA DE S. PAULO, Um jornal a serviço do Brasil. **Após 300 dias do rompimento de barragem da Vale, MG identifica 255ª vítima**. São Paulo, 2019.

FONTES, W. C.; CARVALHO, J. M. F. de; ANDRADE, L. C. R.; SEGADÃES, A. M.; PEIXOTO, R. A. F. **Assesment of the use potential of iron ore tailings in the manufacture of ceramic tiles: From tailings-dams to “brown porcelain”**. Construction and Building Materials, v. 206, p. 111-121, 2019.

FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; SILVA, S. N. da, PEIXOTO, R. A. F. **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams.** Construction and Building Materials, v. 112, p. 988-995, 2016.

FRANÇA, P. **Projetos de Disposição de Rejeitos na Vale: diversidade de soluções, riscos e desafios.** In: 13º Congresso Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte, 2009.

FRASCÁ, M. H. B. de O.; YAMAMOTO, J. K. **Deterioração de rochas graníticas em edificações e monumentos – investigação por ensaios de alteração acelerada.** Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. 4, p. 23-32, 2014.

G1, O portal de notícias da Globo. **Desastre ambiental em Mariana: Rompimento de barragem da Samarco, em Mariana, completa um mês.** Minas Gerais, 2015.

G1, O portal de notícias da Globo. **O que se sabe até agora sobre o rompimento da barragem em Brumadinho.** Minas Gerais, 2019.

GALVÃO, A. O. **Desenvolvimento e análise de material compósito a base de penas de frango (Fibras de Queratina – KF) e matriz de poliéster insaturado.** 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

GOMES, C. B. **Estudo da reutilização do rejeito de minério de ferro para produção de adoquim.** 2016. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, 2016.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do resíduo de minério de ferro.** 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GOMES, M. L. P. M.; CARVALHO, E. A. S.; SOBRINHO, L. N.; MONTEIRO, S. N.; RODRIGUEZ, R. J. S.; VIEIRA, C. M. F. **Production and characterization of a novel artificial stone using brick residue and quarry dust in epoxy matrix.** Journal of Materials Research and Technology, v. 7, n. 4, p. 492-498, 2018.

GOMES, R. C.; PEREIRA, E. L. **Avaliação do potencial de liquefação de resíduos de mineração.** III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas (SBMR), São Paulo, p. 91-101, 2002.

GUEDES, G.; SCHNEIDER, C. **A busca das melhores opções tecnológicas para evitar acidentes.** Revista Saneamento Ambiental, n. 186, Ano XXVI, ago. 2017.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** 2011. 129 f. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

GUIMARÃES, N. C.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas**. Revista Escola de Minas, v. 65, n. 4, p. 543-548, 2012.

HANEMANN, T. SCHUMACHER, B.; HAUBELT, J. **Polimerization conditions influence on the thermomechanical and dielectric properties of unsaturated polyester-styrene-copolymers**. Microelectronic Engennering, v. 87, p. 15-19, 2010.

HUNTSMAN, Huntsman Advanced Materials Química Brasil Ltda. **FISPQ – Araldite® LY 1564 BR e Araldur® 2963 BR**. 2010.

IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Laudo Técnico Preliminar**. Brasília, p. 1-25, 2015.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2016. 128 p.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Relatório anual de atividades: julho de 2018 – junho de 2019**. Brasília: IBRAM, 2019. 49 p.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas: Relatório de Pesquisa**. MOTA, J. A.; ALVAREZ, A. R. (Coordenadores). Brasília, 2012. 46 p.

JENA, S. K.; SAHOO, H.; RATH, S. S.; RAO, D. S.; DAS, S. K.; DAS, B. **Characterization and processing of iron ore slimes for recovery iron values**. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review, v. 36, p. 174-182, 2015.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D.; MOHYEDDIN, A. **Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete**. Civil & Environmental Enginnering, v. 2, p. 1-11, 2015.

LACAZ, F. A. de C.; PORTO, M. F. de S.; PINHEIRO, T. M. M. **Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeito de Fundão/Samarco**. Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 42, n. 9, p. 1-12, 2017.

LAPIQUE, F.; REDFORD, K. **Curing effects on viscosity and mechanical properties of a commercial epoxy resin adhesive**. International Journal of Adhesion & Adhesives, v. 22, p. 337-346, 2002.

LARSON, A. C.; VON DREELE, R. B. **General structure analysis system (GSAS)**. Los Alamos National Laboratory Report LAUR, p. 86-748, 2001.

LEE, M. Y.; KO, C. H.; CHANG, F. C.; LO, S. L.; LIN, J. D.; SHAN, M. Y.; LEE, J. C. **Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction**. Cement & Concrete Composites, v. 30, p. 583-587, 2008.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006, 313 p.

LI, C.; SUN, H.; BAI, J.; LI, L. **Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting**. Journal of Hazardous Materials, v. 174, p. 71-77, fev. 2010.

LIPHADZI, S. M.; VERMAAK, A. P. **Assessment of employees' perceptions of approaches to sustainable water management by coal and iron ore mining companies**. Journal of Cleaner Production – Elsevier, v. 153, p. 608-625, jun. 2017.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

LUZ, S. M. da; GONÇALVES, A. R.; DEL'ARCO JR., A. P. **Microestrutura e propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçado com celulose de bagaço e palha de cana**. Revista Matéria, v. 11, n. 2, p. 101-110, 2006.

MACÊDO NETO, M. C. de. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de palha de aço**. 2016. 76 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MACHADO, H. A.; OLIVEIRA, C. V.; OLIVEIRA, F. S.; CÔRREA, G. R. **O papel da litologia nos atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos perférricos do Brasil**. Caderno de Geologia (PUCMG, Impresso), v. 29, p. 510-525, 2019.

MAGALHÃES, L. F. de; MORAIS, I. de S.; LARA, L. F. dos S.; RESENDE, D. S. de; MENEZES, R. M. R. O.; AGUILAR, M. T. P.; BEZERRA, A. C. da S. **Iron ore tailing as addition to partial replacement of Portland cement**. Materials Science Forum, v. 930, p. 125-130, 2018.

MAIFREDE, E. B. **Estudo das fases de pedras de rins de oxalato de cálcio monohidratado e determinação de uma nova forma polimórfica**. 2011. 54 f. Dissertação (Mestrado) – Ciências Físicas, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, 2011.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 1 ed. São Paulo: Blücher, 197 p. 1991.

MARGOLIS, J. M. **Properties and performance requirements in advanced thermoset composite industrial and commercial applications**. New York: Van Nostrand Reinhold, p. 74-107, 1986.

MARTINS, L. B. de S. **Produção de rocha artificial utilizando resíduo de etapa de laminação de vidro plano em matriz de resina polimérica**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia,

Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2016.

MILANESE, A. C.; CIOFFI, M. O. H.; VOORWALD, H. J. C. **Flexural behavior of Sisal/Castor oil-based polyurethane and Sisal/Phenolic composites**. *Materials Research*, v. 15, p. 191-197, 2012.

MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. (Organizadores). **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição**. Rio de Janeiro: Folio Digital, Letra e Imagem, 2016.

MILLER, J. D.; ISHIDA, H.; MAURER, F. H. J. **Dynamic mechanical properties of interfacially modified glass sphere polyethylene**. *Reologica acta*, v. 27, 1988.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Relatório Técnico 18: Perfil da Mineração de Ferro**. Brasília, 2009. 63 p.

MOLINARI, E. J. **Reutilização dos resíduos de rochas naturais para o desenvolvimento de compósitos poliméricos com matriz termofixa na manufatura de pedras industriais**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MORRISON, R. T.; BOYD, R. N. **Organic Chemistry**. 6 ed. Editora Prentice-Hall, Nova Delfia, 2002.

MOTA, M. K. de F. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz polimérica com carga de bucha vegetal (luffa cylindrica)**. 2016. 105 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MOTTA, P. E. F.; CARVALHO FILHO, A.; KER, J. C.; PEREIRA, N. R. **Relações solo-superfície e evolução da paisagem em uma área do planalto central brasileiro**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, p. 869-878, 2002.

MUKHERJEE, G. S. **Evaluation of processing temperature in the production of fibre reinforced epoxy composites**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 108, n. 3, p. 947-950, 2012.

NASCIMENTO, D. R. **Flotação aniônica de minério de ferro**. 2010. 116 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2010.

NOCITI, D. M. **Obtenção de rochas sintéticas a partir de resíduos de vidro comercial e pó de granito**. 2014. Tese (Doutorado) – Engenharia Mecânica na área de Materiais, Faculdade de Engenharia do Caampus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

OLIVEIRA, P. S. de. **Rotas para recuperação de ferro fino contido no underflow do espessador de lama da usina de Conceição**. 2006. 128 f. Dissertação

(Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

OLIVEIRA, T. M. de; GENEROSO, F. J.; SILVA, T. O. da; SANT'ANNA, G. L.; SILVA, C. H. de C.; PITANDA, H. N. **Geomechanical Properties of mixtures of iron ore tailings improved with Portland cement**. Acta Scientiarum Technology, v. 41, p. 1-7, 2019.

OLIVEIRA, T. V. da S. de. **Estudo de testes de lixiviação aplicados aos resíduos perigosos solidificados/estabilizados com cimento**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002. 165 p.

ORTIZ, C. E. A. **Caracterização geometalúrgica e modelagem geoestatística da mina de brucutu – Quadrilátero Ferrífero (MG)**. 2014. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. 205 p.

OSINUBI, K. J.; YOHANNA, P. EBEREMU, A. O. **Cement modification on tropical black clay using iron ore tailings as admixture**. Transportation Geotechnics, v. 5, p. 35-49, dez. 2015.

PAL, A.; SAMANTA, A. N.; RAY, S. **Treatment of iron ore slime for value addition**. Hydrometallurgy – ELSEVIER, v. 105, p. 30-35, dez. 2010.

PALHARES, L. B.; GONTIJO, A. A. B.; GALVÃO, D. F.; FERNANDES, L. S. R.; SANTOS, C. G. dos; GUADANINI, A. T. G.; OLIVEIRA, L. B. de. **Produção de um compósito resina/rocha ornamental com pó de ardósia proveniente de rejeitos**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 60., 2016, Águas de Lindóia. Anais... São Paulo: ABCEAM, 2016. p. 2213-2223.

PANZERA, T. H.; RUBIO, J. C. C. **Development of a polymeric particulate composite for precision engineering applications**. CIRP Journal of Manufacturing Systems, v. 35, p. 12, 2006.

PEIXOTO, R. F.; BATISTA, J. O. dos S.; COSTA, E. C. P.; SANTOS, D. H. FILHO, J. N. de S.; BASTOS, L. A. de C.; FONTES, W. C.; MENDES, J. C. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na construção civil**. 2016. Relatório de Pesquisa, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2016.

PENG, L.; QIN, S. **Mechanical behavior and microstructure of an artificial stone slab prepared using a SiO₂ waste crucible and quartz sand**. Construction and Building Materials, v. 171, p. 273-280, 2018.

PILATO, L. A.; MICHNO, M. J. **Advanced composite materials**. New York: Springer-Verlag, 1994.

PINTO, E. C. **A dinâmica dos recursos naturais no Mercosul na década de 2000: “efeito China”, estrutura produtiva, comércio e investimento estrangeiro.** In: Red Mercosur de Investigaciones Económicas, *La explotación de recursos naturales em América Latina y sus impactos sobre el desarrollo*, IE- UFRJ, 2013.

PIRES, J. M. M.; LENA, J. C. de; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S. **Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano.** Revista Árvore, v. 27, n. 3, p. 393-397, 2003.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 180 p.

POSSA, M. V.; NASCIMENTO, C. R. **Reologia no Tratamento de Minérios.** In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 14. p. 595-631.

QUÍMICA CREDIE, Química Credie Ltda. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – Solvente Metil Etil Cetona (MEK).** Manaus, 2012.

RABAHI, R. F.; LEVY NETO, F. **Análise da resistência mecânica de vigas de mármore sintético através da teoria estática de Weibull.** Revista Matéria (UFRJ), v. 21, p. 542-551, 2016.

RABELLO, M. S. **Aditivação de polímeros.** 1 reimp. São Paulo: Artliber, 2007, 242 p.

REDDY, J. **Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis.** 1 ed. Boca Raton, USA: CRC press, 2004.

REICHHOLD, Reichhold Brasil Ltda. **Guia de Produtos Composites – FISPQ Resina Poliéster Centerpol 626.** 2010.

RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S. **Influence of compactation pressure and particle content on thermal and mechanical behavior of artificial marbles with marble waste and unsaturated polyester.** Materials Research, v. 18, p. 283-290, 2015.

RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S.; CARVALHO, E. A. de. **Microstructure and mechanical properties of artificial marble.** Construction and Building Materials, v. 149, p. 149-155, 2017.

RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S.; VIEIRA, C. M. F.; CARVALHO, E. A. de; CANDIDO, V. S.; MONTEIRO, S. N. **Fabrication of artificial stone from marble residue by resin transfer molding.** Materials Science Forum, v. 775-776, p. 336-340, 2014a.

RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S.; VIEIRA, C. M. F.; CARVALHO, E. A.; CÂNDIDO, V. S.; MONTEIRO, S. N. **Production of synthetic ornamental marble**

as a marble waste added polyester composite. Materials Science Forum, v. 775-776, p. 341-345, 2014b.

RIBEIRO, F. M. M.; PURQUERIO, B. M. **Granito sintético para estruturas de equipamentos de precisão de pequeno porte.** 1999. Metodologia de Projeto, Universidade Federal de São Paulo, USP – São Carlos, artigo apresentado no XV COBEM, Águas de Lindóia, São Paulo, 1999.

ROCHA, J. M. P. **Caracterização de Minérios Goethíticos-limoníticos da Mina de Alegria, MG.** 1997. 257 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

SALES, C. M. R. **Aplicação do método de Rietveld na análise do processo de síntese de diamante a partir de hidrocarboneto aromático antraceno.** 2015. 131 f. Tese (Doutorado) – Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campo dos Goytacazes, 2015.

SAMARCO, Samarco Mineração S. A. **Aproveitamento de rejeitos.** Minas Gerais, 2019.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. da; ANDRADE, M. C. de; FRANÇA, S. C. **Água no Processamento Mineral.** In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

SANT'ANA FILHO, J. N. de. **Estudos de reaproveitamento dos resíduos das barragens de minério de ferro para uso na pavimentação de rodovias e fabricação de blocos intertravados.** 2013. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, 2013.

SANTIS, B. C. de; ROSSIGNOLO, J. A. **Influência dos agregados leves de argila calcinada nas propriedades mecânicas de concretos estruturais.** Revista Matéria (UFRJ), v. 20, p. 399-406, 2015.

SANTOS, C. de O. P. **Aplicação do Método de Rietveld.** Publicação do Instituto de Química da Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), 2009.

SANTOS, E. A. dos.; MELO, J. D. D. **Mechanical and microstructural evaluation of Polymer matrix composites filled with recycled industrial waste.** Journal of Reinforced Plastics and Composites, v. 28, p. 2459-2471, 2009.

SILVA, A. C. da; VIDAL, M.; PEREIRA, M. G. **Impactos ambientais causados pela mineração e beneficiamento de caulim.** Rem: Revista Escola de Minas, v. 54, n. 2, 2001.

SILVA, A. F.; FIGUEIREDO, C. F. **Reaproveitamento de resíduos de MDF da indústria moveleira.** Revista Design & Tecnologia, v. 2, p. 77-87, 2010.

SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Ipea: Relatório de Pesquisa, Brasília. 46 p., 2012.

SILVA, F. S.; RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S. **Physical and Mechanical Characterization of Artificial Stone with Marble Calcite Waste and Epoxy Resin**. Materials Research, v. 21, n. 1, 2018.

SILVA, J. P. S. **Impactos ambientais causados pela mineração**. Revista Espaço da Sophia, n. 8, ano I, 2007.

SMITH, W. F. **Princípios de ciência e engenharia dos materiais**. 3 ed. Portugal: McGraw-Hill, 892 p., 1998.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos**. In: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de Minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 19. p. 829-896.

SOBRINHO, L. L. **Desenvolvimento de matriz polimérica para material compósito visando o reforço de dutos de aço**. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Ciência e Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SOLOMONS, T. W. G.; FRYHLE, C. B. **Química Orgânica**. 9 ed. LTC, v. 1 e 2, 2009.

TAVARES, P. H. C. P.; LAMEIRAS, F. S. **Zeta potential of iron oxide pigment powder using a rotating disk**. Journal of Material Science and Engineering (A&B), v. 3, p. 25-31, 2013.

TAKEHARA, L.; Vasconcellos, M. A. Z.; HINRICHS, R.; CUNHA, J. B. M. da; CHEMALE JR, F. **Phase quantification in iron ore**. Transactions – Institution of Mining and Metallurgy. Section C. Mineral Processing & Extractive Metallurgy, v. 118, p. 168-174, 2009.

TOBY, B. H. **EXPGUI, a graphical user interface for GSAS**. Journal of Applied Crystallography. v.34, p. 210–213. 2001.

VENDRAME, P. R. S.; EBERHARDT, D. N.; BRITO, O. R.; MARCHÃO, R. L.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. **Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado**. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 32, suplemento 1, p. 1657-1666, 2011.

VILELA, N. de F. **Produção de rocha artificial utilizando finos de brita em uma matriz epóxi**. 2016. Engenharia e Ciência dos Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2016.

WEIDLER, P. G.; LUSTER, J.; SCHNEIDER, H; GEHRING, A. U. **The Rietveld method applied to the quantitative mineralogical and chemical analysis of a ferralitic soil.** European Journal of Soil Science, v. 49, n. 49, p. 95-105, 1998.

WOLFF, A. P.; COSTA, G. M. **Characterization of ultrafines tailings of iron ores.** In: 2nd International Symposium on Iron Ore, 2008, São Luís – MA. 2nd International Symposium on Iron Ore., 2008.

YANG, C.; CUI, C.; QIN, J.; CUI, X. **Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings.** Construction and Building Materials, v. 70, p. 36-42, 2014.

YAO, R.; LIAO, S.; DAI, C.; LIU, Y.; CHEN, X.; ZHENG, F. **Preparation and characterization of novel glass-ceramic tile with microwave absorption properties from iron ore tailings.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v.378, p. 367-375, 2015.

ZIMMER, A. **Ceramic Products from Waste.** In: WUNDERLICH, W (Ed.). Ceramic Materials. 1. ed. Rijeka, Croácia: Sciyo, 2010. cap. 11. p. 215-228.