

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MÔNICA ANGÉLICA AVANCI**

**COMPÓSITOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE RESÍDUO DE  
MINÉRIO DE FERRO DA CIDADE DE MARIANA, LODO DE DRAGAGEM DO  
PORTO DE PARANAGUÁ E RESÍDUO DE PRODUÇÃO DE CAL**

**CURITIBA**

**2022**

**MÔNICA ANGÉLICA AVANCI**

**COMPÓSITOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE RESÍDUO DE  
MINÉRIO DE FERRO DA CIDADE DE MARIANA, LODO DE DRAGAGEM DO  
PORTO DE PARANAGUÁ E RESÍDUO DE PRODUÇÃO DE CAL**

**Composites for civil construction from iron ore tailings from Mariana city,  
dredged sludge from Paranaguá Port, and lime production waste**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, com ênfase em Materiais, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vsévolod Mymrine

**CURITIBA**

**2022**



Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



MONICA ANGELICA AVANCI

**COMPÓSITOS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE RESÍDUO DE MINÉRIO DE FERRO DA CIDADE DE MARIANA, LODO DE DRAGAGEM DO PORTO DE PARANAGUÁ E RESÍDUO DE PRODUÇÃO DE CAL**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 09 de Março de 2022

Prof Vsevolod Mymrine, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Edgar Winter Junior, Doutorado - Faculdade de Pinhais (Fapi)

Prof.a Karina Querne De Carvalho Passig, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Monica Beatriz Kolicheski, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Rodrigo Eduardo Catai, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 09/03/2022.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Vsévolod Mymrine, com quem tive o privilégio de trabalhar ao longo dessa jornada. Um dos pesquisadores mais brilhantes que já conheci. O entusiasmo, sabedoria e dedicação com que coordenou os trabalhos foram excepcionais, tornando-se um referencial de orientador e pesquisador para mim, sempre motivando e oferecendo desafios. Seu apoio, ensinamentos e amizade levarei para toda a vida.

Ao Prof. Dr. André Nagalli pela oportunidade de aprender e crescer acadêmica e profissionalmente, aprimorando meu espírito crítico.

À Prof.<sup>a</sup> Dra. Karina Querne de Carvalho Passig por estar sempre disposta a cooperar.

Aos professores Dr. André Nagalli, Dr. Edgar Winter Júnior, Dra. Karina Querne de Carvalho Passig, Dra. Mônica Beatriz Kolicheski, e Dr. Rodrigo Eduardo Catai pelas contribuições e sugestões que proporcionaram um ganho substancial ao trabalho.

A todos os professores do PPGEC que, através de seus ensinamentos, contribuíram para a realização deste trabalho.

A todas as pessoas do grupo de pesquisa do Prof. Dr. Vsévolod Mymrine pela cooperação na obtenção de dados.

Ao Técnico de Laboratório, Felipe Perretto, por todo apoio e auxílio.

Ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todas as caracterizações realizadas ao longo dessa pesquisa, em especial ao Técnico de Laboratório Alexandre José Gonçalves.

Ao Laboratório Multiusuário de Análises Químicas (LAMAQ) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, na figura da Técnica Química Rubia Camila Ronqui Bottini pelas análises de lixiviação e solubilidade.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná, em especial ao Técnico Érico Sito Szameitat, pelas metalizações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, do Setor de Tecnologia, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por me proporcionar a oportunidade de cursar o doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio financeiro.

À minha família, por acreditarem em mim, estarem sempre torcendo pelo meu sucesso e me incentivarem a correr atrás de meus sonhos.

Aos meus pais, João e Jane, espero continuar levando comigo o que Deus me deu de melhor: os ensinamentos de vocês.

Às minhas filhas, Letícia e Heloíse, pelo incentivo e apoio incondicional bem como pela compreensão das ausências e afastamento temporário.

Finalmente, agradeço ao meu companheiro, Guilherme, por todo amor e carinho, por ter estado ao meu lado ao longo desta jornada, vivendo todos os momentos de felicidade ou frustração junto comigo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – código de financiamento 001.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – finance code 001.

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém  
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.*

**Arthur Schopenhauer**

## RESUMO

AVANCI, Mônica Angélica. **Compósitos para construção civil a partir de resíduo de minério de ferro da cidade de Mariana, lodo de dragagem do Porto de Paranaguá e resíduo de produção de cal.** 2022. 136 f. Tese. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

Atualmente, há forte tendência de reduzir a exploração de recursos naturais com o reaproveitamento de rejeitos provenientes dos processos de industrialização de materiais. No presente trabalho, novos compósitos para fabricação de materiais de construção utilizando rejeitos provenientes da extração de minério de ferro da cidade de Mariana, da dragagem do Porto de Paranaguá e da produção de cal foram desenvolvidos. As matérias-primas foram coletadas, secas em estufa e caracterizadas quanto sua composição química, mineralógica, morfológica, granulométrica. A técnica para elaboração dos corpos de prova consistiu em secagem, peneiramento, pesagem, mistura, compactação e cura. A proporção das matérias-primas variou de 10 a 30%<sub>m</sub> para o resíduo de minério de ferro, 40 a 75%<sub>m</sub> para o lodo de dragagem e 15 a 30%<sub>m</sub> para o resíduo de produção de cal. Os materiais desenvolvidos foram analisados de acordo com a retração linear, massa específica, resistência à compressão axial, absorção de água, coeficiente de resistência à água, lixiviação e solubilidade. Os novos materiais também foram caracterizados através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), Difração de raio-X (DRX) com o objetivo de analisar os processos de interação físico-químicas dos processos de formação estrutural dos novos materiais. Os compósitos desenvolvidos apresentaram valores de resistência a compressão axial de até 22,66 MPa. Os compósitos 4 (10%<sub>m</sub> de resíduo de minério de ferro, 60%<sub>m</sub> de lodo de dragagem e 30%<sub>m</sub> de resíduo de produção de cal) e 8 (15%<sub>m</sub> de resíduo de minério de ferro, 55%<sub>m</sub> de lodo de dragagem e 30%<sub>m</sub> de resíduo de produção de cal) foram os que obtiveram os melhores valores de resistência para todos os períodos de cura avaliados. Todos esses materiais podem ser utilizados em aplicações gerais de engenharia civil, como bases ou sub-bases de estradas, aeródromos e barragens, substituindo brita natural, brita, areia, e na produção de tijolos, telhas e outros produtos. A resistência aprimorada dos materiais é atribuída às novas formações de gel amorfas. O emprego dos três resíduos conjuntamente para produção de material para construção civil consiste em inovação, não sendo reportado em literatura até o momento.

**Palavras-chave:** resíduo de minério de ferro; lodo de dragagem de portos; reaproveitamento de resíduos; indústria de construção civil; desenvolvimento sustentável.

## ABSTRACT

AVANCI, Mônica Angélica. **Composites for civil construction from iron ore tailings from Mariana city, dredged sludge from Paranaguá Port, and lime production waste**. 2022. 136 p. Thesis. (Graduate Program in Civil Engineering) - The Federal University of Technology - Paraná, 2022.

Currently, there is a strong tendency to reduce the exploitation of natural resources with the reuse of waste from material industrialization processes. In the present work, new composites for manufacturing construction materials using iron ore tailings (IOT) from Mariana city, dredging sludge (DS) from Paranaguá Port, and lime waste (LPW) were developed. The raw materials were collected, oven-dried, and characterized regarding their chemical, mineralogical, morphological and granulometric features. The specimens' preparation technique consisted of drying, sieving, weighing, mixing, compacting, and curing. The proportion of raw materials ranged from 10 to 30 wt.% IOT, 40 to 75 wt.% DS and 15 to 30 wt.% r LPW. The developed materials were analyzed according to linear shrinkage, specific mass, axial compressive strength, water absorption, water resistance coefficient, leaching, and solubility. The new materials were also characterized through Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), X-ray Diffraction (XRD) in order to analyze the physicochemical interaction processes of the structure formation processes of new materials. The developed composites showed axial compressive strength values of up to 22.66 MPa. Composites 4 (10 wt.% IOT, 60 wt.% DS e 30 wt.% LPW) and 8 (15 wt.% IOT, 55 wt.% DS, 30 wt.% LPW) were the ones that obtained the best strength values for all curing periods evaluated. All these materials can be used in general civil engineering applications, as foundations or sub-bases of roads, airfields and dams, replacing natural gravel, crushed stones, sand, and in the production of bricks, tiles and other products. The improved strength of the materials is attributed to the new amorphous gel formations. Using the three residues together for material production for civil construction is an innovation not reported in the literature so far.

**Keywords:** iron ore tailings; dredging sludge; waste reuse; construction industry; sustainable development.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Moldes de aço carbono utilizados na confecção dos corpos de prova. ....	39
Figura 2 - Fluxograma da confecção dos corpos de prova. ....	40
Figura 3 - Fluxograma das análises realizadas nas matérias-primas e nos compósitos desenvolvidos.....	41
Figura 4 - Fluxograma das análises realizadas para caracterização das matérias-primas estudadas. ....	42
Figura 5 - Fluxograma das análises realizadas para caracterização dos compósitos desenvolvidos.....	47
Figura 6 - Matérias-primas utilizadas neste estudo: a) Lodo de dragagem do Porto de Paranaguá (LDP) úmido e b) após secagem em estufa; c) Resíduo de minério de ferro (RMF); d) Resíduo de produção de cal. ....	54
Figura 7 - Imagens de MEV da superfície do Lodo de Dragagem de Porto (LDP): a) magnificação de 200X e b) magnificação de 1,00 kX.....	59
Figura 8 - Imagens de MEV da superfície do Resíduo de Minério de Ferro (RMF): a) magnificação de 200X e b) magnificação de 1,00 kX.....	59
Figura 9 - Imagens de MEV da superfície do Resíduo de Produção de Cal (RPC): a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX e c) magnificação de 10,00 kX.	60
Figura 10 - Imagem do lodo de dragagem de porto (LDP), obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS. ....	61
Figura 11 - Imagem do resíduo de minério de ferro (RMF), obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS. ....	62
Figura 12 - Imagem do resíduo de produção de cal (RPC), obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS. ....	63
Figura 13 – Composição mineral do Lodo de Dragagem de Porto (LDP), obtida por DRX.....	65
Figura 14 - Composição mineral do Resíduo de Minério de Ferro (RMF), obtida por DRX.....	66
Figura 15 - Composição mineral do Resíduo de Produção de Cal (RPC), obtida por DRX.....	67
Figura 16 - Composição mineral da composição 4, obtida por DRX: a) mistura seca inicial; b) 1 ano de cura; c) 2 anos de cura; d) 3 anos de cura. ....	77

Figura 17 - Composição mineral da composição 8, obtida por DRX: a) mistura seca inicial; b) 1 ano de cura; c) 2 anos de cura.....	79
Figura 18 - Composição mineral da composição 20, obtida por DRX: a) mistura seca inicial; b) 1 ano de cura; c) 2 anos de cura; d) 3 anos de cura.....	81
Figura 19 - Imagens de MEV da superfície do compósito 4 aos 3 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, e c) magnificação de 5,00 kX..	83
Figura 20 - Imagens de MEV da superfície do compósito 4 aos 28 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 5,00 kX, e d) magnificação de 10,00 kX. ....	84
Figura 21 - Imagens de MEV da superfície do compósito 4 aos 365 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 5,00 kX, e d) magnificação de 10,00 kX. ....	85
Figura 22 - Imagens de MEV da superfície do compósito 8 aos 3 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 1,00 kX, e d) magnificação de 5,00 kX. ....	86
Figura 23 - Imagens de MEV da superfície do compósito 8 aos 28 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 5,00 kX, e d) magnificação de 10,00 kX. ....	87
Figura 24 - Imagens de MEV da superfície do compósito 8 aos 365 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 5,00 kX, e d) magnificação de 10,00 kX. ....	88
Figura 25 - Imagens de MEV da superfície do compósito 20 aos 3 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, e c) magnificação de 5,00 kX..	89
Figura 26 - Imagens de MEV da superfície do compósito 20 aos 28 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, e c) magnificação de 5,00 kX..	90
Figura 27 - Imagens de MEV da superfície do compósito 20 aos 365 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, e c) magnificação de 5,00 kX. ....	91
Figura 28 - Imagem da superfície da amostra da composição 4 aos 3 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS. ....	92
Figura 29 - Imagem da superfície da amostra da composição 4 aos 28 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS. ....	93
Figura 30 - Imagem da superfície da amostra da composição 4 aos 365 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS. ....	94

Figura 31 - Imagem da superfície da amostra da composição 8 aos 28 dias de cura, obtida através de.....	95
Figura 32 - Imagem da superfície da amostra da composição 8 aos 365 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS. ....	96
Figura 33 – Mapa composicional do compósito 4 aos 3 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	97
Figura 34 - Mapa composicional do compósito 4 aos 28 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	98
Figura 35 - Mapa composicional do compósito 4 aos 365 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	99
Figura 36 - Mapa composicional do compósito 8 aos 3 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	100
Figura 37 - Mapa composicional do compósito 8 aos 28 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g, h) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	101
Figura 38 - Mapa composicional do compósito 8 aos 365 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	102
Figura 39 - Mapa composicional do compósito 20 aos 3 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	103
Figura 40 - Mapa composicional do compósito 20 aos 28 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g, h) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	104
Figura 41 - Mapa composicional do compósito 20 aos 365 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra. ....	105

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Número de documentos obtidos durante revisão da literatura na base Scopus, limitando o estado da arte à área de ciência dos materiais, separados por autor. ....	34
Gráfico 2 - Número de documentos obtidos durante revisão da literatura na base Web of Science, limitando o estado da arte à área de ciência dos materiais, separados por autor. ....	35
Gráfico 3 - Curva granulométrica das matérias-primas. ....	57
Gráfico 4 - Resistência à compressão axial dos compósitos desenvolvidos em diferentes idades de cura. ....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação comercial dos agregados miúdos quanto ao módulo de finura (NBR 7211:2009, versão 2019).....	56
Quadro 2 - Minerais presentes no compósito 4 em diferentes idades de cura.....	78
Quadro 3 - Minerais presentes no compósito 8 em diferentes idades de cura.....	80
Quadro 4 - Minerais presentes no compósito 20 em diferentes idades de cura.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Diferentes tipos e fontes de resíduos sólidos e seus potenciais de reciclagem e aproveitamento para materiais de construção.....	19
Tabela 2 - Principais resíduos sólidos e seus usos na produção de materiais de construção.....	20
Tabela 3 - Proporção das matérias-primas para cada composição. ....	38
Tabela 4 - Composição granulométrica das matérias-primas usadas no estudo: LDP (lodo de dragagem de portos), RMF (resíduo de minério de ferro) e RPC (resíduo de produção de cal).....	56
Tabela 5 - Especificação da distribuição granulométrica para utilização de materiais como agregado miúdo (ABNT NBR 7211/09) .....	57
Tabela 6 - Composição química do lodo de dragagem de porto (LDP) em cada ponto assinalado na Figura 10, obtida através de EDS, em %peso. ....	61
Tabela 7 - Composição química do resíduo de minério de ferro (RMF) em cada ponto assinalado na Figura 11, obtida através de EDS, em %peso. ....	62
Tabela 8 - Composição química do resíduo de produção de cal (RPC) em cada ponto assinalado na Figura 12, obtida através de EDS, em %peso. ....	63
Tabela 9 - Composição química das matérias-primas, obtida através de FRX.....	64
Tabela 10 – Resistência à compressão axial dos compósitos desenvolvidos, em diferentes idades de cura. ....	68
Tabela 11 – Absorção de água dos compósitos desenvolvidos, em diferentes idades de cura. ....	71
Tabela 12 – Coeficiente de resistência à água dos compósitos desenvolvidos, em diferentes idades de cura. ....	72
Tabela 13 - Coeficiente de retração linear dos compósitos desenvolvidos, em diferentes idades de cura. ....	74
Tabela 14 - Massa específica dos novos compósitos, em diferentes idades de cura. ....	75
Tabela 15 - Composição química do compósito 4 aos 3 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 28, obtida através de EDS, em %peso. ....	92
Tabela 16 - Composição química do compósito 4 aos 28 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 29, obtida através de EDS, em %peso. ....	93

Tabela 17 - Composição química do compósito 4 aos 365 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 27 obtida através de EDS, em %peso. ....	94
Tabela 18 - Composição química do compósito 8 aos 28 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 28 obtida através de EDS, em %peso. ....	95
Tabela 19 - Composição química do compósito 8 aos 365 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 29 obtida através de EDS, em %peso. ....	96
Tabela 20 - Lixiviação de metais pesados dos compósitos 4, 8 e 20.....	106
Tabela 21 - Solubilidade de metais pesados dos compósitos 4, 8 e 20. ....	106

## LISTA DE ABREVIATURAS

abr.	Abril
Dr.	Doutor
ed.	Edição
f.	Folhas
i.e.	Isto é
jan.	Janeiro
Ltd.	Limitada
n.	Número
nov.	Novembro
out.	Outubro
p.	Páginas
Prof.	Professor
v.	Volume



## LISTA DE SIGLAS

A <sub>água</sub>	Percentual da absorção de água
ABRAFATI	Associação Brasileira dos Fabricantes de Tinta
Al	Alumínio, elemento químico
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Caulinita
Al(OH) <sub>3</sub>	Gibbsita
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASTM D	<i>American Society for Testing and Materials: Designation</i>
C	Carbono, elemento químico
Ca	Cálcio, elemento químico
CaCO <sub>3</sub>	Calcita, aragonita, carbonato de cálcio
CaF <sub>2</sub>	Fluorita
Ca <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	Andradita
CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Dolomita
CaO	Cal, óxido de cálcio
CaO <sub>(s)</sub>	Cal virgem
Ca(OH) <sub>2</sub>	Portlandita, hidróxido de cálcio
Ca(OH) <sub>2(aq)</sub>	Cal hidratada
CaO.SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	Silicato de cálcio hidratado
Cd	Cádmio, elemento químico
Cl	Cloro, elemento químico
cm	Centímetros, unidade de comprimento
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos, unidade de volume
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico, dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
CPs	Corpos de Prova
cps	Contagens por segundo
Cr	Cromo, elemento químico
C <sub>ra</sub>	Coefficiente de resistência à água
CSH	Silicato de cálcio hidratado
Cu	Cobre, elemento químico
DRX	Difração de Raios X

EDS	Espectrometria por Dispersão de Energia
Et al	E outros
$f_{c_n}$	Resistência à compressão axial para o tempo de cura n
Fe	Ferro, elemento químico
FeCO <sub>3</sub>	Siderita
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnetita
FeO(OH)	Goethita
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
FRX	Fluorescência de Raios X
g	Gramas, unidade de massa
g/cm <sup>3</sup>	Grama por centímetro cúbico, unidade de densidade e massa específica
GOST	<i>Gosudarstvennyy Standart</i> , Normas técnicas russas
h	Horas, unidade de tempo
H <sub>2</sub> O	Água
K	Potássio, elemento químico
K(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	Microclina
kg	Quilogramas, unidade de massa
kg <sub>CO<sub>2</sub>e</sub> /kg	Quilogramas de gás carbônico emitido por quilograma
kgf/cm <sup>2</sup>	Quilograma-força por centímetro quadrado, unidade de resistência
km	Quilômetro, unidade de comprimento
kN	Quilonewton, unidade de força
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
kX	Mil vezes, utilizado para magnificação
LDP	Lodo de dragagem de porto
m	Metro, unidade de comprimento
mesh	Unidade de abertura por polegada
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mf	Módulo de finura
mg	Miligramas, unidade de massa
Mg	Magnésio, elemento químico
MG	Minas Gerais
mg/kg	Miligrama por quilograma, unidade de concentração
mg/L	Miligrama por litro, unidade de concentração

MgCO <sub>3</sub>	Magnesita
MgO	Periclase, óxido de magnésio
Mg(OH) <sub>2</sub>	Brucita
MJ/kg	Mega Joule por quilograma, unidade de energia interna
mL	Mililitros, unidade de volume
mm	Milímetros, unidade de comprimento
mm <sup>2</sup>	Milímetros quadrados, unidade de área
MPa	Mega Pascal, unidade de pressão
nº	Número
Na	Sódio, elemento químico
NaCl	Halita
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira
ND	Não detectado
Ni	Níquel, elemento químico
NM	Norma Mercosul
nm	Nanômetro, unidade de comprimento
Pb	Chumbo, elemento químico
PET	Polietileno tereftalato
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PR	Paraná
psi	Libra-força por polegada quadrada, unidade de pressão
RCD	Resíduos de construção e demolição
RMF	Resíduo(s) de minério de ferro
RPC	Resíduo(s) de Produção de Cal
rpm	Rotações por minuto, unidade de velocidade angular
Si	Silício, elemento químico
SiO <sub>2</sub>	Sílica, quartzo, cristobalita, dióxido de silício
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ânion sulfato
UE	União Europeia
X	Vezes, utilizado para magnificação
Zn	Zinco, elemento químico

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\geq$	Igual ou superior
$\pm$	Mais ou menos
%	Porcentagem, por cento
%m	Porcentagem em massa
%p	Porcentagem em peso
%RA	Porcentagem retida acumulada
°	Graus, unidade de ângulo
°C	Graus Celsius, unidade de temperatura
$\alpha$	Coefficiente de retração linear
$\rho$	Massa específica do CP
$\gamma$	Massa específica do agregado miúdo
$\mu\text{m}$	Micrometros, unidade de comprimento
$2\theta$	Posição angular, ângulo entre o feixe transmitido e o feixe refletido na difração de raios X
R\$	Reais

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 Problema de pesquisa .....	13
1.2 Delimitação do problema de pesquisa.....	13
1.3 Perguntas de pesquisa .....	13
1.4 Hipóteses.....	14
1.4.1 Hipótese básica .....	14
1.4.2 Hipóteses secundárias .....	14
1.5 Objetivos.....	14
1.5.1 Objetivo geral .....	14
1.5.2 Objetivos específicos.....	14
1.6 Justificativa .....	15
1.7 Estrutura da tese .....	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
2.1 Sustentabilidade na construção civil .....	17
2.1.1 Resíduos sólidos na construção civil.....	18
2.2 Minério de Ferro .....	20
2.2.1 Resíduo de minério de ferro .....	21
2.2.2 Barragens de contenção de rejeitos .....	23
2.2.2.1 Ruptura de barragens.....	23
2.2.3 Uso de resíduos de minério de ferro .....	25
2.3 Lodo de dragagem de hidrovias .....	27
2.3.1 Dragagem no Porto de Paranaguá.....	28
2.3.2 Usos de lodo de dragagem .....	29
2.4 Cal.....	31
2.4.1 Resíduo de produção de cal.....	32
2.4.2 Usos do resíduo de produção de cal .....	32

2.5 Cenário científico .....	34
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1 Materiais.....	36
3.1.1 Escolha das matérias primas.....	36
3.1.2 Coleta dos materiais .....	37
3.2 Confeção dos corpos de prova .....	37
3.3 Caracterizações .....	41
3.3.1 Caracterização das matérias-primas.....	41
3.3.2 Caracterização dos compósitos desenvolvidos.....	47
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>53</b>
4.1 Caracterização das matérias-primas.....	53
4.1.1 Características visuais, massa específica e potencial hidrogeniônico .....	53
4.1.2 Distribuição de tamanho de partículas .....	54
4.1.3 Morfologia e composição química .....	58
4.1.4 Composição mineralógica .....	65
4.2 Caracterização dos compósitos desenvolvidos.....	67
4.2.1 Caracterização das propriedades mecânicas e físicas dos materiais desenvolvidos.....	67
4.2.2 Definição dos traços a serem estudados.....	75
4.2.3 Processos físico-químicos de formação das estruturas dos materiais desenvolvidos.....	76
4.2.4 Sustentabilidade dos materiais desenvolvidos .....	105
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>108</b>
<b>6 TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos municipais e industriais configura um dos maiores problemas enfrentados atualmente pelos gestores de resíduos no mundo. O crescimento populacional, associado ao avanço tecnológico, tem contribuído para um aumento significativo na geração destes resíduos, que podem ser relacionados a riscos ambientais e de saúde pública significativos em todo o mundo (DOLAR et al., 2016; ALFAIA et al., 2017).

No Brasil, a situação referente à gestão de resíduos sólidos requer maior atenção. As indústrias de fabricação e transformação de materiais produzem, em diferentes graus, certa quantidade de resíduos que nem sempre são reaproveitados e representam ônus ambiental ao serem descartados. Providenciar destinação adequada a estes subprodutos constitui um grande dilema (CASAGRANDE et al., 2008; LEME et al., 2014; SOUZA et al., 2014).

Em alguns casos, estes produtos podem ser reutilizados diretamente ou podem ser aproveitados como matéria-prima básica em outros processos industriais. O desenvolvimento de pesquisas que envolvam a utilização de resíduos, tratando estes poluentes como matérias-primas valiosas para aplicações com maior valor agregado e visando a sua transformação em bens úteis para a sociedade e a proteção do meio-ambiente, é uma iniciativa relevante e indispensável (NODEHI, 2022).

Dentre as inúmeras atividades geradoras de passivo ambiental, a indústria do concreto, a dragagem de hidrovias e a mineração, particularmente a extração de minério de ferro terão ênfase no presente trabalho.

A indústria de concreto é conhecida por deixar enorme pegada ambiental no planeta Terra. Primeiro, existem os grandes volumes de material necessários para produzir bilhões de toneladas de concreto anuais mundiais. Depois, há as emissões de CO<sub>2</sub> causadas durante a produção de cimento Portland, juntamente com as necessidades de energia, consumo d'água e geração de resíduos de construção e demolição. Esses fatores contribuem para a impressão geral de que o concreto não é particularmente amigo do ambiente ou compatível com as demandas do desenvolvimento sustentável (SHEN et al., 2017).

Para melhorar essa situação, o uso crescente de materiais que podem servir como substitutos parciais para o cimento Portland, em particular aqueles que são subprodutos de processos industriais, como cinzas volantes, escória de alto forno,

resíduos de vidro e pneus inservíveis vem sendo adotado. O custo dos materiais de construção aumenta dia a dia devido à alta demanda, escassez de matérias-primas e alto preço da energia. Do ponto de vista da economia de energia e conservação dos recursos naturais, o uso de constituintes alternativos em materiais de construção é hoje uma preocupação global (SAFIUDDIN et al., 2010). A substituição por materiais reciclados tem feito progresso significativo no mundo, reduzindo a necessidade de extrair agregados virgens (MEYER, 2009).

A mineração e a dragagem de rios, lagos e oceanos também são atividades que merecem atenção. O aproveitamento dos recursos minerais deve estar comprometido com os princípios de desenvolvimento sustentável, implicando no aproveitamento racional dos recursos naturais e preservando-se o meio ambiente. O descarte de resíduos das usinas de beneficiamento pode eventualmente se tornar um considerável fator de poluição, tornando necessárias medidas preventivas ou corretivas, especialmente com rejeitos de minérios metálicos e carvões (BENVINDO, 2010).

Em relação à gestão de sedimentos dragados, é perceptível o custo socioambiental acarretado. A dragagem é periodicamente necessária para manter os canais e bacias de manobra abertos em muitos portos ao redor do mundo. No entanto, a dragagem de sedimentos contaminados pode transformar esse procedimento rotineiro em fonte de poluição dos corpos d'água receptores. Muitos poluentes, como metais pesados, compostos orgânicos ou organometálicos, estão presentes em altas concentrações devido às atividades humanas nas áreas costeiras, onde se localizam os portos. Assim, os riscos decorrentes da dragagem devem ser avaliados criteriosamente para preservação da qualidade ambiental (OLIVEIRA et al., 2020).

Além disso, uma vez que os resíduos são materiais que já foram extraídos, triturados e processados, os custos para sua reutilização são menores quando comparados com os materiais primários, os quais precisam passar pelo processo de beneficiamento de mineração cujo custo compreende de 40 a 60% da despesa total do processamento mineral (COX et al., 2010; ZHAO et al., 2014; MYMRIN et al., 2021a).

Dentro deste contexto, o presente trabalho visa à produção de compósitos para materiais de construção civil ecologicamente corretos, exclusivamente a partir de resíduos industriais – resíduo de extração de minério de ferro e lodo de dragagem de porto - empregando resíduo de produção de cal como material ligante. Esses



compósitos podem ser empregados para produção de materiais de construção como tijolos, blocos, pavimentos e bases rodoviárias. O emprego dos três resíduos conjuntamente para produção de material para construção civil consiste em inovação, não sendo reportado em literatura até o momento.

### **1.1 Problema de pesquisa**

O emprego de resíduos industriais como matérias-primas alternativas aos materiais tradicionais na produção de materiais de construção é viável e efetivo?

### **1.2 Delimitação do problema de pesquisa**

Estudo experimental a nível laboratorial, partindo de uma abordagem hipotética-indutiva, de compósitos confeccionados exclusivamente com resíduos industriais, em que suas propriedades químicas e físicas podem se alterar em função dos processos existentes em cada indústria. Serão utilizados resíduos de extração de minério de ferro, coletados do material depositado sobre o solo na cidade de Mariana (MG); de dragagem de hidrovias, proveniente do Porto de Paranaguá (PR); e de produção de cal, oriundo de indústrias locais do Paraná, para produção de materiais para construção civil que apresentem propriedades físicas, químicas e mecânicas que atendam aos requisitos das normas brasileiras.

### **1.3 Perguntas de pesquisa**

Como reduzir a exploração de recursos naturais e reaproveitar resíduos provenientes de processos de industrialização?

Como reaproveitar resíduos para formulação de novos materiais e componentes que atendam às especificações técnicas e ambientais vigentes?

Como minimizar o impacto ambiental ocasionado por tragédias como a da cidade de Mariana?

Como minimizar o impacto ambiental causado pela geração de lodo proveniente da dragagem de portos?

Como minimizar o impacto ambiental causado pela exploração de pedreiras de calcário?

## **1.4 Hipóteses**

### 1.4.1 Hipótese básica

Os resíduos de extração de minério de ferro, de dragagem de hidrovias e da produção de cal podem ser empregados como matérias-primas para produção de novos materiais para construção civil.

### 1.4.2 Hipóteses secundárias

O material desenvolvido exclusivamente a partir de resíduos atende aos requisitos das normas brasileiras.

A utilização de resíduos, comumente sem valor agregado, como matéria-prima gera redução nos custos de produção do material de construção.

O material desenvolvido reduz a exploração de recursos naturais e minimiza impactos ambientais causados pelo descarte inadequado dos resíduos estudados.

## **1.5 Objetivos**

### 1.5.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa aplicar resíduos provenientes da extração de minério de ferro, da dragagem de hidrovias e da produção de cal como matérias-primas para produção de novos materiais para construção civil tipo concreto sem cimento Portland.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Desenvolver compósitos para construção civil, variando os teores das matérias-primas;
- Avaliar a melhor proporção entre as matérias-primas utilizadas para obtenção de material com propriedades físicas, químicas e mecânicas que atendam aos requisitos das normas brasileiras;

- Caracterizar os novos materiais produzidos, a fim de determinar as alterações químicas, morfológicas e estruturais promovidas pela incorporação dos resíduos aos mesmos;
- Estudar os processos físico-químicos de formação da estrutura dos novos materiais desenvolvidos.

## **1.6 Justificativa**

O desenvolvimento de tecnologia para produção de materiais para construção civil, utilizando como matérias-primas lodo de dragagem de hidrovias, lodo de extração de minério de ferro e resíduo de produção de cal, atende a duas demandas cruciais nos dias de hoje. Primeiro, a necessidade de gerenciamento de resíduos por parte das empresas que trabalham com produtos que podem causar algum dano, tanto à saúde individual ou coletiva quanto à degradação ao meio ambiente. Além disso, serve para suprir a crescente produção da indústria de construção civil no Brasil e no mundo.

Na literatura científica e nas patentes mundiais, estão descritas pesquisas em ampla variedade de resíduos e suas aplicações potenciais e o levantamento bibliográfico acerca de produção de materiais de construção civil empregando resíduos de extração de minério de ferro, lodo de dragagem de hidrovias e resíduo da produção de cal é bastante extensa, porém não foram encontrados registros da utilização desses materiais usados concomitantemente.

## **1.7 Estrutura da tese**

A presente tese está dividida em cinco capítulos, incluindo este primeiro, o qual apresenta os aspectos gerais do tema abordado: uma breve introdução, problema, delimitação e hipóteses que nortearam a pesquisa, objetivos e a justificativa desta.

No capítulo 2 são apresentadas revisão bibliográfica contemplando o processo de geração dos resíduos, suas características químicas e físicas, produções, destinações e aproveitamentos bem como um breve estado da arte.

No capítulo 3 são descritos os métodos e materiais utilizados nesta pesquisa, apresentando os procedimentos de coleta dos resíduos, definição das composições,

moldagem dos corpos de prova, ensaios realizados nas matérias-primas e compósitos desenvolvidos.

Os resultados obtidos pelos ensaios de caracterização são apresentados e discutidos no capítulo 4. Também são definidos os compósitos que terão suas composições mineralógicas, químicas e estruturas morfológicas analisadas. Estes resultados foram usados como base para se chegar às conclusões apresentadas no capítulo 5.

Ao final, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo apresenta-se uma revisão da literatura acerca dos temas relacionados ao desenvolvimento da pesquisa em questão.

### 2.1 Sustentabilidade na construção civil

A construção civil é um dos setores da economia que exerce grande influência para o desenvolvimento do país, sendo responsável pela criação de novas tecnologias e geração de renda e emprego

O concreto é um dos materiais de construção mais importantes não apenas pela quantidade, mas também pelo impacto ambiental. O consumo de concreto está em constante aumento, portanto, na União Europeia (UE), foram produzidos 215 milhões de metros cúbicos de concreto em 2015 (WALACH, 2021). A produção de cimento é responsável por 5-8% das emissões globais de dióxido de carbono (TEH, 2017). As substâncias emitidas no ar e na água durante a produção do concreto contribuem não apenas para o aquecimento global, mas também para a acidificação e eutrofização (KIM E CHAE, 2016). Deste ponto de vista, alguns benefícios ambientais podem ser vistos, decorrentes da durabilidade de uma estrutura e da possibilidade de moldar seu perfil ambiental por meio da otimização material-construtiva.

As primeiras vertentes de pesquisa sobre a redução do impacto do concreto no meio ambiente foram relacionadas às misturas de concreto. Misturas alternativas de concreto foram desenvolvidas através da introdução de materiais cimentícios suplementares e agregados reciclados (WALACH, 2021). Na tecnologia de concreto convencional, o aumento da resistência mecânica do concreto está relacionado ao aumento do teor de clínquer Portland, o que resulta em um menor perfil ambiental. A substituição de uma certa quantidade de cimento por subprodutos de processos industriais (por exemplo, cinza volante), caracterizada por cargas ambientais mais baixas do que o ligante original, foi proposta por Shoubi, Barough e Amirsoleimani (2013).

A substituição do cimento em uma mistura de concreto por um ligante alternativo de 5, 10 a 20% poderia reduzir as emissões totais de gases de efeito estufa na UE em 0,06%, 0,12% e 0,25%, respectivamente, o que representa 11,3 milhões de

toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente no último caso (WALACH et al., 2019). Por sua vez, a substituição de uma tonelada de agregado natural por agregado reciclado alternativo reduz as emissões de carbono em 58% (FALESCHINI, ZANINI E PELLEGRINO, 2016).

Outros resultados de Agregados leves mostram que cerca de 49–51% dos impactos ambientais líquidos podem ser reduzidos pela produção de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) em vez de produzir agregados de brita. No entanto, o uso de agregado reciclado levanta questões mais problemáticas relacionadas à pureza do agregado (SKRZYPCZAK, I. et al., 2017; SOBOTKA et al., 2017; JASKOWSKA-LEMANSKA, 2019), reologia das misturas de concreto, resistência e durabilidade do concreto endurecido (AGRELA, ALAEJOS E DE JUAN, 2013; KENAI, 2018).

### 2.1.1 Resíduos sólidos na construção civil

O crescimento da população, a crescente urbanização e a elevação do padrão de vida devido às inovações tecnológicas têm contribuído para aumentar a quantidade de uma variedade de resíduos sólidos gerados pelas atividades industriais, de mineração, domésticas e agrícolas (ABDEL-SHAFY E MANSOUR, 2018).

Os resíduos sólidos podem ser classificados por perigo e por composição. As informações sobre geração de resíduos sólidos, particularmente sobre resíduos industriais e perigosos, são muitas vezes difíceis de reunir. Métodos ineficientes de coleta de dados, inconstância na periodicidade de pesquisas, relutância da indústria em fornecer informações e confusão sobre as definições de resíduos perigosos são todos fatores contribuintes. De um modo geral, os resíduos sólidos municipais (em termos de massa) são uma parte relativamente pequena do total de resíduos sólidos gerados (SHARMA et al., 2021).

A reciclagem de resíduos sólidos em aplicações de engenharia civil passou por um desenvolvimento considerável ao longo de muito tempo. A utilização de cinzas volantes, escórias de alto-forno, fosfogesso, agregados reciclados, lama vermelha, resíduo da produção de celulose Kraft, resíduos de chá, entre outros, em materiais de construção mostra alguns exemplos do sucesso de pesquisas nessa área (SAFIUDDIN et al., 2010).

Da mesma forma, a reciclagem de resíduos perigosos para uso em materiais de construção e o impacto ambiental de tais práticas são estudados há muitos anos (Cyr et al., 2004). Os potenciais de reciclagem e aproveitamento dos diferentes tipos de resíduos sólidos são mostrados na Tabela 1. De fato, há uma grande margem para a instalação de indústrias secundárias para a reciclagem e utilização de grandes resíduos sólidos em materiais de construção, como pode ser percebido na Tabela 1. Os usos de diferentes tipos de resíduos sólidos em materiais de construção são mostrados na Tabela 2.

Tabela 1- Diferentes tipos e fontes de resíduos sólidos e seus potenciais de reciclagem e aproveitamento para materiais de construção.

<b>Resíduo Sólido</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Fonte</b>	<b>Usos potenciais</b>
<b>Agroindustrial (orgânicos)</b>	Bagaço, palha e casca de arroz e trigo, resíduos de serraria, casca de amendoim, juta, sisal, talo de algodão, resíduos vegetais em geral	Painéis de cimento, painéis de partículas, painéis de isolamento, painéis de parede, folhas de telhado, aglutinantes, painéis de construção fibrosos, tijolos, cimento à prova de ácido, fibra de coco, compósitos reforçados, compósitos poliméricos
<b>Industrial</b>	Resíduos de combustão de carvão, escória de aço, lama vermelha de bauxita, resíduo de construção e demolição	Tijolos, blocos, telhas, cimento, tintas, agregados finos e graúdos, concreto, substitutos de madeira, produtos cerâmicos
<b>Mineração/resíduos minerais</b>	Resíduos de lavagens de carvão; resíduos de mineração das indústrias de ferro, cobre, zinco, ouro e alumínio	Tijolos, agregados leves finos e grossos, ladrilhos
<b>Resíduos não perigosos</b>	Resíduos de gesso, lodo de cal, resíduos de calcário, vidro quebrado e cerâmica, resíduos de processamento de mármore, pó de forno	Blocos, tijolos, clínquer de cimento, aglutinante hidráulico, placas de gesso fibroso, gesso, cimento supersulfatado
<b>Resíduos perigosos</b>	Materiais de jateamento contaminados, resíduos de galvanização, resíduos metalúrgicos, lodo de efluentes e de estações de tratamento de resíduos, resíduos de curtume	Painéis, tijolos, cimento, cerâmica, azulejos

Fonte: Adaptada de PAPPU, SAXENA E ASOLEKAR, 2007.

Tabela 2 - Principais resíduos sólidos e seus usos na produção de materiais de construção.

Resíduo Sólido		
Nome	Tipo	Uso em materiais de construção
Cinza volante, cinza de fundo, cinza de casca de arroz, cinza combustível de óleo de palma, fibras orgânicas	Agroindustrial	Agregado, concreto, materiais de cimentação suplementares, cimento misturado, tijolos, telhas, blocos, painéis de partículas, painéis de isolamento, painéis de cimento, painéis de parede, telhas, compósitos poliméricos reforçados
Fosfogesso, resíduos de vidro, escória granulada de alto forno, resíduos de escória de aço, pneus de borracha	Industrial	Agregados finos e graúdos, mistura com cimento, concreto, tijolos, blocos, telhas, produtos cerâmicos
Pó de pedreira	Mineração/mineral	Agregados finos e graúdos, concreto, tijolos, telhas, blocos, materiais de acabamento de superfície
Resíduos de construção e demolição (entulhos de concreto, telhas, tijolos inservíveis)	Industrial	Agregados finos e graúdos, concreto, tijolos, blocos, materiais de sub-base de pavimento

Fonte: Adaptada de SAFIUDDIN et al., 2010.

## 2.2 Minério de Ferro

O ferro é um dos minerais mais abundantes no mundo, representando cerca de 4,2% da crosta terrestre. Diversos minerais possuem ferro como componente principal, mas somente os óxidos apresentam grandes concentrações. Os principais minerais que contêm ferro são: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). As formações ferríferas compostas de hematita e sílica ( $\text{SiO}_2$ ), denominadas itabiritos, se constituem nos maiores depósitos de ferro (FERREIRA E LEITE, 2015).

Os principais depósitos de ferro no mundo localizam-se no Brasil, Austrália, África do Sul e Rússia. O Brasil e a Austrália dominam a produção mundial de ferro, cada um com cerca de um terço das exportações totais no mundo (CAXITO E DIAS, 2018).

Dentre as reservas mundiais de minério de ferro, 19,8% encontram-se em solo brasileiro, localizadas majoritariamente nos estados de Minas Gerais (74,4%), Pará (19,5%) e Mato Grosso do Sul (2,2%) (DPNM, 2018). Sua extração corresponde a 4% do Produto Interno Bruto (PIB) do país e a 87,7% dos bens primários exportados,



representando uma atividade econômica muito importante para o país (DPNM, 2018). O principal país de destino do minério de ferro é a China, com participação de 75% no total exportado (ANM, 2021).

Em 2019, a produção mundial de minério de ferro foi de 2,4 bilhões de toneladas, das quais 396,8 milhões de toneladas foram de produção brasileira, sendo que 65% deste valor foi produzido pelo estado de Minas Gerais (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

Em geral, o minério encontrado no estado de Minas Gerais possui um baixo teor de ferro, entre 31 e 45%, o que torna obrigatório o beneficiamento para seu uso na indústria siderúrgica, já que há a exigência de um material com teor de 60 a 70% de ferro em sua composição (LIMA et al., 2011).

Portanto, o minério extraído passa por um processo de tratamento, o qual divide o minério extraído em duas parcelas: concentrado e rejeito. As etapas desse processo são: cominuição, peneiramento, classificação, concentração, desaguamento, secagem e disposição de rejeito (LUZ et al., 2010; SILVA et al., 2012).

A cominuição é a operação em que ocorre a britagem e a moagem do extrato, que então passa por um processo de peneiramento, que é a separação do material por tamanho, e por uma classificação do tipo ciclone, classificação em espiral. Após a classificação, é feita a concentração do material para que atinja o percentual adequado de teor de ferro. Esta é realizada através de métodos como: gravítico, magnético, eletrostático e flotação. O desaguamento é um processo de espessamento e filtragem, sendo que a secagem ocorre por um secador rotativo, *spray dryer* e secador de leite fluidizado (LUZ et al., 2010).

Após todas essas etapas, é realizada a disposição do resíduo, que pode ser realizada de três formas: enchimento de cava a céu aberto, enchimento de galerias subterrâneas ou disposição em barragem de contenção de rejeitos. Estima-se que para 1 tonelada de minério de ferro beneficiado, são produzidos 400 kg de resíduos (ARAÚJO et al., 2003).

### 2.2.1 Resíduo de minério de ferro

O resíduo do minério de ferro (RMF) é um material fino, denso, estável e cristalino, sendo constituído, principalmente, por óxidos de ferro, sílica e alumina ( $Al_2O_3$ ), e que não apresenta características perigosas. Os óxidos mais comumente

encontrados no resíduo de beneficiamento do ferro são quartzo (tetraedros de sílica,  $\text{SiO}_2$ ), cristobalita (polimorfismo do quartzo,  $\text{SiO}_2$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) (BASTOS, 2016; SHETTIMA et al., 2016).

A constituição mineralógica do RMF permite sua incorporação em materiais destinados à construção civil, em substituição parcial ao agregado natural em compostos cimentícios (YELLISHETTY et al., 2008; LIU et al., 2012; CHEN et al., 2013).

O RMF, quando usado em compostos à base de cimento como agregado, promove ganho de resistência mecânica. Apesar disso, se sua porcentagem na mistura for muito elevada, a trabalhabilidade é reduzida significativamente. A trabalhabilidade é uma das principais propriedades do concreto fresco. Ela tem relação direta com a quantidade de água na argamassa e na relação com o cimento, sendo usada para indicar se o concreto é adequado ou não à peça que será moldada. Um motivo possível para tal comportamento é a sua heterogeneidade de características físico-químicas, ocasionadas por sua variação de composição (UCHECHUKWU et al., 2014; ZHAO et al., 2014).

Suas características químicas são, em geral, semelhantes às matérias-primas comuns. Portanto, vários trabalhos estudam a possibilidade do uso de RMF para produção de cimento, adição de concreto, fabricação de tijolos e proteção radiológica. Entretanto, seu uso só foi bem-sucedido quando combinado com outros materiais, como areia, brita, cal e cimento (MA et al., 2016; BOLTAKOVA et al., 2017).

Estatísticas de descarte de resíduos mostram que, globalmente, em vista à produção dos países emergentes, é gerada uma quantidade de 5 a 7 bilhões de toneladas anuais de resíduos de minérios de ferro. Só na União Europeia, já foram armazenadas mais de 1,2 bilhão de toneladas e, na China, 300 milhões de toneladas de minério de ferro são descartadas anualmente (LIU et al., 2005; SCHOENBERGER, 2016).

Com relação à produção, no Brasil, são geradas diariamente quase 380 mil toneladas de RMF, os quais são despejados em 672 barragens de contenção. Considerando-se a produção brasileira de 2014, tem-se que 275,5 milhões de toneladas de resíduos foram depositadas em barragens de contenção (WILLIAMS, 2016; SNISB, 2019). Não foram encontrados dados mais atualizados sobre a disposição desses resíduos.

## 2.2.2 Barragens de contenção de rejeitos

Barragens de contenção de rejeitos representam não somente um risco em caso de rompimento, mas também um grande impacto ambiental, considerando-se as grandes quantidades de minério de ferro descartadas e suas grandes áreas ocupadas. Tais impactos incluem desmatamento, poluição hídrica tanto de rios quanto dos lençóis freáticos, além de danos biológicos – a acidificação da hidrografia próxima desestabiliza a fauna e a flora nativas (BELLENFANT et al., 2013; KOSSOFF et al., 2014; CARVALHO et al., 2020).

Dentre os principais riscos relacionados aos resíduos de mineração, a sobrecarga das barragens é uma das maiores preocupações da sociedade brasileira, pois afeta a estabilidade estrutural dessas construções cujo custo de manutenção é extremamente elevado. Algumas das barragens existentes no país estão bem próximas de sua capacidade total e outras estão em processo de descomissionamento, pois se encontram em estado final de operação, sendo reconhecidas por possuir alto risco de colapso (BELLENFANT et al., 2013; IBAMA, 2015).

### 2.2.2.1 Ruptura de barragens

Já vieram a ocorrer graves acidentes com barragens de contenção de rejeitos, na Espanha, em 1998, na Romênia, em 2001, e no Canadá, em 2015. Em terras nacionais, o estado de Minas Gerais foi palco de dois graves acidentes envolvendo o rompimento de barragens, sendo eles o de Mariana, em 2015, e o de Brumadinho, em 2019 (GALVÃO et al., 2020).

Em novembro de 2015, no subdistrito Bento Rodrigues em Mariana/MG, ocorreu o desastre industrial com o maior impacto ambiental do Brasil e o maior do mundo envolvendo barragens de contenção. Com o colapso da barragem de Fundão, da mineradora SAMARCO, mais de 35 milhões de metros cúbicos de lama foram liberados no meio ambiente, alcançando e percorrendo o rio Doce até desaguar no oceano Atlântico e afetando os ecossistemas durante seu percurso. Estima-se que o efeito dos resíduos afetará a vida marinha pelos próximos 100 anos, além da possível

extinção de 12 espécies endêmicas ao rio e de outras 11 espécies ameaçadas da fauna local (IBAMA, 2015; AZEVEDO, 2016; ESPINDOLA, 2019).

Os impactos ambientais foram inúmeros, Da Silva, Ferreira e Scotti (2015) elencam os seguintes impactos: assoreamento dos corpos d'água; ravinamentos profundos; erosão; elevada turbidez; contaminação química, inclusive de metais pesados; perda da biodiversidade; infertilidade dos solos cobertos pela lama, impactos na microbiota dos solos e da água; além das perdas humanas e materiais.

Desta forma, torna-se difícil quantificar a perda ambiental, mediante uma tragédia de enormes proporções. Além de todos esses impactos, há ainda o impacto social e econômico. As consequências socioeconômicas são inúmeras para as pessoas direta e indiretamente atingidas por esta catástrofe (DE CASTRO E DE ALMEIDA, 2019).

O primeiro grande impacto para a população em geral foi a falta de abastecimento de água nos municípios atingidos devido a presença de metais e a alteração de outros componentes que contaminam a qualidade da água, afetando sobremaneira, as companhias de saneamento básico, as atividades agrícolas, as populações ribeirinhas que sobrevivem da pesca, os balneários com a paralisação de turismo, entre outros (IPEA, 2016; BASTOS et al., 2021).

No que concerne aos danos causados à ictiofauna - conjunto de espécies de peixes que habitam determinada região hidrográfica - identificou-se ao longo do trajeto do rio Doce um elevado índice de mortandade de peixes. Devido ao alto nível de turbidez da água, ocasionado pelos sedimentos que compõem os rejeitos, houve o "colapso" – fechamento das brânquias dos peixes que morreram por asfixia (LOPES, 2016).

Para além dos óbitos imediatos há ainda efeitos sobre a saúde que se prolongam no tempo e exigem um contínuo monitoramento e vigilância para detectar seus riscos e danos para as populações potencialmente expostas, não só no curto prazo, mas por anos após o evento (FREITAS et al., 2019).

Estudos apontam que num primeiro momento, há a ocorrência de doenças transmissíveis, como as diarreicas; e, num maior espaço de tempo, o impacto psicossocial do desastre pode agravar o quadro de doenças crônicas, sobretudo hipertensão, diabetes e insuficiência renal, e aumentar a ocorrência de transtornos mentais, como depressão e ansiedade, aumento do consumo de álcool, tabaco e outras drogas. Aumento da incidência de doenças cardiovasculares, respiratórias e

da obesidade também estão associadas a esses desastres (PEIXOTO E ASMUS, 2020).

Há ainda a possível exposição humana a metais e compostos metálicos. O rompimento da barragem de Fundão foi um evento pernicioso associado à liberação de rejeitos de minério, potencial fonte de exposição a metais pesados. Além disso, é importante ressaltar que em muitos casos a população exposta tem baixa escolaridade, baixa renda, subemprego, condições precárias de saneamento, é acometida por múltiplas doenças infecciosas, subnutrição, doenças crônicas, entre outras. Nessas populações, a exposição a alguma substância química, ou múltiplas substâncias, se configura como um fator de risco adicional, agravando sua vulnerabilidade (PEIXOTO E ASMUS, 2020).

Muitas foram as medidas tomadas pelos Governos Estaduais e Federal para o restabelecimento das atividades dos municípios afetados pelo desastre. Dentre elas pode-se citar o atendimento emergencial, a antecipação dos repasses do “Bolsa-Família” para os indivíduos inscritos no Programa na cidade de Mariana, a liberação de R\$ 6.220,00 do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS) para vítimas atingidas, o reabastecimento de água às cidades afetadas, o estabelecimento de multa à mineradora Samarco e a recuperação e o monitoramento do rio Doce (BRASIL, 2015).

Passado um ano do desastre, o CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS (2017) apurou que o vazamento de rejeitos da barragem continua ocorrendo, assim como novos impactos se concretizaram neste período e perpetuam-se em decorrência da não remoção dos rejeitos originais, situação que permite concluir que o desastre é continuado, haja vista que o problema persiste depois desse período e apesar das inúmeras medidas e providências adotadas.

### 2.2.3 Uso de resíduos de minério de ferro

Observando-se a utilização de RMF em substituição da argila para produzir clínqueres de cimento, foi revelado que a adição de RMF, em até 10%, pode ser capaz de produzir clínqueres de melhor qualidade (DO et al., 2008).

A utilização de RMF para produção de concreto revelou que a quantidade máxima admitida para este resíduo é de 40%. O clínquer de cimento feito a partir do RMF tem grande potencial para ser usado como matéria-prima de cimento, uma vez

que a adição do RMF não afetou qualitativamente a formação das fases mineralógicas (ZHAO et al., 2014).

Em 2015, Kuranchie et al. (2015) utilizaram RMF como agregados em concreto, descobrindo que o resíduo pode ser utilizado para substituir completamente os agregados convencionais. O concreto resultante exibiu boa resistência mecânica e, com relação à força de compressão, apresentou uma melhora de 11,56% comparado ao concreto feito com agregados convencionais.

Cimento com o uso de RMF como matéria-prima exibiu melhora na reatividade e menor calor de hidratação do que o produto comum (LUO et al., 2016). Já concreto com substituição parcial do agregado miúdo por RMF apresentou melhora da resistência mecânica, apesar de a trabalhabilidade ter sido prejudicada, pois o material ficou pouco adensável (SHETTIMA et al., 2016).

Um estudo, sobre a utilização de RMF arenoso como agregado na produção de concreto, concluiu que é possível utilizar este material para fazer tijolos leves para alvenaria não-estrutural (ZUCCHERATTE et al., 2017). Shettima et al (2018) avaliaram o uso de RMF como substituto para areia fluvial na produção de concreto. A textura do RMF, rugosa e angular, foi capaz de melhorar a resistência do concreto.

Em 2018, foi proposto o uso de RMF como pigmento na produção de tinta para construção civil, chamada de tinta sustentável. Os resultados foram comparados com tintas convencionais reconhecidas pela Associação Brasileira dos Fabricantes de Tinta (ABRAFATI). A tinta sustentável apresentou uma cor mais avermelhada, opacidade adequada e resultados satisfatórios referentes à durabilidade. O custo significativamente mais baixo para a produção da tinta sustentável implica um uso alternativo potencial para pintura, especialmente nas comunidades afetadas pelas barragens de RMF no Brasil e no mundo (GALVÃO et al., 2018).

Krivenko et al. (2019) obtiveram resultados que mostraram que, no caso dos cimentos de escória ativados por álcalis, as misturas de concreto compactado para bases podem incorporar até 40% de RMF. Tal mistura otimizada foi utilizada para pavimentação na construção de uma estrada-piloto em Qianxi, na China. Para uso na fabricação de telhas cerâmicas, o RMF pode ser utilizado, desde que na granulometria enquadrada em argilas (FONTES et al., 2019).

Um estudo combinou argila vermelha e RMF com escoria de alto-forno e resíduo de produção de cal para a fabricação de tijolos, os resultados indicaram que a adição de RMF até 55% é aceitável para materiais de tijolos (BEULAH et al., 2020).

Tijolos não cozidos, preparados com RMF pelo método de formação por pressão, apresentaram resultados promissores para aplicação na construção civil (CHEN et al., 2020).

RMF foram utilizados na produção de materiais de rocha artificial e as propriedades obtidas permitem diversas aplicações destes materiais na indústria de construção civil, como pisos e azulejos (DA SILVA e DE PAIVA, 2020).

Mymrin et al (2021a) desenvolveu compósitos de construção similares a concreto utilizando RMF, lodo de anodização de alumínio, resíduo de concreto e resíduo de produção de cal. Os compósitos apresentaram propriedades físico-mecânicas que atenderam aos requerimentos das normas brasileiras (MYMRIN et al., 2021a).

Singh et al. (2021) concluíram que RMF é uma adição estável a solos argilosos, desde que o uso do material resultante seja restrito à produção de tijolos.

O uso de RMF como substituto para pó de calcário para a produção de telhas mostrou grande potencial, visto que houve melhora nas propriedades físicas e mecânicas das telhas produzidas (EUGÊNIO et al., 2021).

Quando utilizados na produção de ladrilhos hidráulicos, os ladrilhos resultantes de materiais a base de RMF apresentaram uma aparência agradável e a performance físico-mecânica esperada (FONTES et al., 2021).

Espumas cerâmicas feitas com RMF apresentaram excelente performance material, incluindo uma densidade de  $0.77 \text{ g/cm}^3$  e uma distribuição de tamanhos de poros uniforme (LI et al., 2021).

Analisando-se a viabilidade de produção de compósitos cerâmicos de RMF, juntamente a escória de alto-forno de carvão e areia de fundição, constatou-se que tais materiais podem ser usados em conjunto para materiais de construção civil, em substituição aos recursos naturais, minimizando impactos ambientais (CECHIN et al, 2022).

### **2.3 Lodo de dragagem de hidrovias**

Visando garantir a profundidade dos canais para assegurar a navegabilidade das embarcações, são realizadas dragagens frequentes de leitos hídricos. Apesar de essenciais para manter o calado – altura entre a quilha e o leito de flutuação da embarcação – adequado às dimensões das embarcações, toda dragagem de

materiais e sedimentos gera impactos ambientais, especialmente quando usado o método de sucção (VARRIALE et. al., 1985; BROWN et. al., 1990; MONTEIRO, 2010; APPA, 2013).

Com o sistema de sucção, não somente lodo e sedimentos são extraídos, como também biontes do local dragado, estabelecendo a necessidade de justificativa perante órgãos competentes para a obtenção de licenciamento ambiental, na tentativa de minimizar as consequências ao meio-ambiente. Após dragagem, o material removido é armazenado em cisternas a bordo e transportado para a área de despejo (BROWN et al., 1990; APPA, 2011).

A área de descarte é distante da costa, garantindo que não haja interferências nos ambientes intermareais e estuários da região. No entanto, uma vez que, atualmente, o volume removido é comumente depositado em alto-mar, tornam-se preocupantes a poluição provocada nas áreas de descarte e o desequilíbrio subsequente da fauna e flora oceânicas (APPA, 2011; APPA, 2013b).

A exceção é quando o material dragado possui contaminantes, caso em que o descarte em mar aberto não é permitido. Nesta situação, o material é depositado em instalações confinadas de eliminação. Uma vez que a montagem de novas instalações exige um alto custo financeiro, percebe-se a necessidade de reutilizar os materiais dragados contidos, a fim de prolongar a utilização das instalações atuais (OLIN-ESTES et al., 2001).

### 2.3.1 Dragagem no Porto de Paranaguá

O porto de Paranaguá é um dos principais canais de escoamento nacionais e o maior exportador de produtos agrícolas do Brasil, com destaque para a soja e o farelo de soja. Exportação e importação de grãos, fertilizantes, contêineres, líquidos, automóveis, madeira, papel, sal e açúcar. A maioria dos navios são dos Estados Unidos, China, Japão e Coréia do Sul (KANASHIRO E XIE, 2016).

O porto de Paranaguá sempre enfrentou uma situação crítica quanto às atividades operacionais nos berços devido aos intensos processos de sedimentação nesta região. Os sedimentos fazem parte do ciclo hidrológico, dependendo de sua composição química e características de adsorção podem apresentar alta capacidade de acúmulo de contaminantes orgânicos e inorgânicos (COELHO et al., 2009). Além disso, os sedimentos não são apenas uma importante fonte de poluentes da água,



mas também servem como catalisadores, transportadores e fixadores de outros poluidores (KANASHIRO E XIE, 2016).

Os portos paranaenses possuem um programa de dragagem do porto de Paranaguá, o qual abrange toda a costa até o porto de Antonina. Até 2013, em Paranaguá, foram dragados 2,7 milhões de metros cúbicos, englobando todo o trajeto desde o canal de acesso, a bacia de evolução e os berços comerciais do porto. A intenção é que, com a dragagem, se possa manter a profundidade no canal de acesso aos portos de Paranaguá e Antonina acima de 13 m. Então, o material dragado é despejado em alto-mar, 20 km após a Ilha do Mel (APPA, 2013b).

Analisando-se a avaliação físico-química e ecotoxicológica, é visto que o lodo de dragagem dos portos de Paranaguá e Antonina possui baixa probabilidade de causar efeitos adversos ao mar do litoral brasileiro, visto que a concentração de todos os elementos e compostos se encontram abaixo do nível limítrofe estabelecido para águas marinhas (APPA, 2012).

A caracterização química do material dragado, feita para determinar as concentrações de poluentes, revelou a presença frequente de mercúrio, com o valor máximo sendo de 0,24 mg/kg, sendo que o nível limite é de 0,71 mg/kg. Outro elemento encontrado foi o níquel, porém com valor de 25,8 mg/kg, também abaixo do limite, que é de 51,6 mg/kg (APPA, 2012).

Kanashiro e Xie (2016) avaliaram as propriedades químicas do lodo dragado do porto (LDP) de Paranaguá e concluíram que a maioria das amostras apresentou concentrações abaixo do Nível 1 estabelecido pela Resolução CONAMA nº 454/2012. No entanto, considerando a natureza dessas contaminações, sugeriram que perdas durante as operações de embarque/descarga, armazenamento e transferência de produtos no porto de Paranaguá, constituem fontes de materiais poluentes nas águas do berço amostral e que a maior parte da contaminação pode vir de fertilizantes, uma vez que o porto de Paranaguá exporta grãos e importa fertilizantes que servem para controle de pragas na produção de alimentos.

### 2.3.2 Usos de lodo de dragagem

Um estudo sobre a preparação de agregados leves não-sinterizados a partir de lodo de dragagem concluiu que, se os sedimentos dragados fossem usados como

matéria-prima na concretagem, seria essencial uma camada protetora estável para evitar que o material fosse esmagado ou hidratado (PENG et al., 2017).

Uma pesquisa sobre redução de energia analisou a sinterização de uma mistura de fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) e sedimentos de dragagem de reservatório a uma temperatura 200 °C menor do que a utilizada pela indústria manufatureira. O agregado resultante se enquadrou nos parâmetros para concreto de alta-força, com uma força de compressão maior do que os concretos com agregados comerciais (WEI, WENG E XIE, 2018).

Lodo fluvial foi utilizado para a preparação de tijolos ecologicamente corretos, após solidificação por fosfogesso hemi-hidratado, cimento Portland comum, escoria e metassilicato de sódio (MAIERDAN et al., 2020).

Sedimentos dragados do porto de Gaoxiong, em Taiwan, foram utilizados para a preparação de agregados leves (LIM et al., 2020).

Foi demonstrada a viabilidade do uso da areia e sedimentos da dragagem marinha de Dunquerque como um novo material para a construção de camadas de fundação e de base para estradas (SIHAM et al., 2007; ZENTAR et al., 2021).

Bhairappanavar, Liu e Shakoore (2021), ao estudarem o potencial de tijolos fabricados com cimento e material de dragagem, descobriram que os tijolos resultantes não somente atingiam as especificações da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como exibiram resultados excelentes. A energia interna do tijolo fabricado foi de 1,49 MJ/kg e a emissão de gás carbônico foi de 0,162  $\text{kg}_{\text{CO}_2\text{eq}}/\text{kg}$ , sendo mais ecologicamente sustentável quando comparado com os tijolos convencionais.

Sobre a aplicação de mistura de sedimentos de LDP e escória de forno de oxigênio básico em construção, a baixa concentração de metais pesados na mistura de sedimentos e escória faz com que seja segura para aplicações práticas (LIM et al., 2021).

Mymrin et al. (2021b) utilizaram LDP de Paranaguá, no Brasil, juntamente com cinzas de madeira e resíduo de produção de cal, para desenvolver material sustentável. Os compósitos desenvolvidos podem ser utilizados como material de base para estradas, concreto sem cimento, tijolos não queimados e outros materiais de construção sustentáveis.

Apesar de existirem estudos sobre a aplicação de LDP como material de construção, ela se concentra apenas na solidificação à base de cimento,

acompanhada de baixa resistência e alto consumo de energia. Para desenvolver um novo material de construção com resistência relativamente maior, Chen et al (2021) estudaram o uso de cinzas volantes, escória de aço e escória granulada de alto-forno na solidificação de LDP.

## 2.4 Cal

Elemento mineral proveniente de rochas calcárias ou magnesianas, a cal é amplamente aproveitada pela construção civil. É usada, por exemplo, na execução de concretos asfálticos e solos estabilizados; e na produção de isolantes térmicos e blocos sílico-calcários. Contudo, seus principais usos no canteiro estão relacionados à preparação de argamassas ou aos processos de pinturas (PETTIJOHN, 1975).

Calcário é um grupo de rochas cuja constituição mineral é composta majoritariamente por carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). A cal ( $\text{CaO}$ ) é produzida a partir destas rochas. Após a extração, seleção e moagem, o material é submetido à calcinação, processo em que altas temperaturas quebram o carbonato de cálcio em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (PETRUCCI, 1979; SLOTTE et al., 2013).

A cal é um aglomerante aéreo, produto resultante da calcinação de pedras calcárias a uma temperatura inferior ao do início de sua fusão (cerca de  $900\text{ }^\circ\text{C}$ ). Aglomerante é o material ativo, ligante, cuja principal função é formar uma pasta que promove a união entre os grãos dos agregados. Aglomerantes aéreos são aqueles que endurecem pela ação química do  $\text{CO}_2$  (gás carbônico) do ar. O endurecimento decorre da recarbonatação da cal hidratada pela absorção do  $\text{CO}_2$  presente na atmosfera (OLIVEIRA, 2021).

Em 2019, a produção mundial de cal foi de 430 milhões de toneladas. A China é a maior produtora mundial, fornecendo cerca de 67% da produção anual, enquanto o Brasil é o quinto maior produtor, participando com 2% (USGS, 2019). Estimou-se a produção brasileira em 8,4 milhões de toneladas, representada pelos produtores integrados (79%); mercado cativo (15%); mercado cativo produtores não integrados (3%) e transformadores (3%) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

A cal pode ser comercializada de duas maneiras: virgem ( $\text{CaO}_{(s)}$ ) regida pela NBR 6453, e hidratada ( $\text{Ca(OH)}_{2(aq)}$ ) regida pela NBR 7175. A segunda é produzida a partir da primeira, por hidratação em temperatura ambiente. No Brasil, a cal hidratada

é a mais empregada na construção civil, pela maior segurança no transporte, manuseio e aplicação. Contudo, a cal virgem também pode ser utilizada, como é tradicionalmente consumida no Paraná e em parte de Santa Catarina, apesar de sua manipulação requerer uma hidratação prévia no canteiro de obras (QUARCIONI, 2008; CALAES, 2009).

A cal é a primeira camada a se formar no processo de calcinação e, por possuir condutividade térmica bem maior que a da rocha, ela diminui a velocidade de avanço da reação, conforme a reação se direciona ao núcleo do bloco de calcário. Assim, a calcinação perfeita depende da velocidade, temperatura e duração da calcinação (CINCOTTO, 1977; GUIMARÃES, 1997; OATES, 1998).

A cal é muito utilizada na construção civil para produção de argamassas para assentamento de blocos, produção de argamassas para revestimentos e produção de tijolos sílico-calcários, utilizados em alvenaria estrutural (OLIVEIRA, 2021).

#### 2.4.1 Resíduo de produção de cal

Resíduo de produção de cal (RPC) é a cal quando esta possui teor de elementos carbonatos e não-calcários acima de 12% (ABNT, 2003). O RPC apresenta coloração clara próxima ao bege acinzentado, provavelmente devido ao material de origem, uma vez que, supostamente, as rochas com qualidade ideal são as que possuem coloração branca ou tons de cinza e rosado (LIMA, 2016). As propriedades químicas do RPC são bem similares às da cal virgem, podendo ser usado como aglomerante-ligante e reagente químico (ABNT, 2003).

O RPC se origina quando, na calcinação, o processo de combustão ocorre de forma incompleta e a rocha é mal queimada (em temperaturas inferiores a 960 °C) ou em consequência de armazenamento inadequado, em contato com a umidade do ar. Portanto, RPC é frequentemente composto por cal parcialmente não-calcinada, ou seja, na forma de carbonato (calcário) (GUIMARÃES, 1997; GARCIA, 2008).

#### 2.4.2 Usos do resíduo de produção de cal

Apesar da aplicação de cal ser muito ampla e diversificada, RPC só são utilizados, atualmente, pelas indústrias para a conservação de energia térmica no processo de produção de clínqueres de cimento, porém, de acordo com a NBR 6453,

podem ser comercializados como subprodutos, quando constituídos por elementos carbonatados e não-calcários em quantidades elevadas (ABNT, 2003; BHATTY E GAJDA, 2004).

Para produção de compósito de cimento, foram pesquisadas composições a base de RPC e cimento Portland, obtendo um material de alta performance (STROEVEN et al., 2001). Quando incorporado ao concreto asfáltico, foi observado que o RPC proporcionou melhora nas características de deformação permanente, rigidez e resistência à fadiga do concreto (DO et al., 2008).

Ao se aplicar RPC como matéria-prima para estabilização de solo em um local subseqüentemente pavimentado de concreto, foi observado que as misturas cumpriram com as exigências mínimas (AL-SAYED et al., 2015).

Um estudo combinou escória resfriada de metal ferroso e RPC como agente aglutinante para barro natural para construção de base de rodovias, substituindo completamente as camadas tradicionais de areia natural e cascalho. As propriedades mecânicas observadas possibilitam, também, a aplicação destes compósitos como materiais de construção (MYMRIN et al., 2019a).

Analisada como substituição para matérias-primas de construção, a combinação de lodo de esgoto, cinzas de madeira e RPC apresentou propriedades mecânicas que excederam os parâmetros estabelecidos nas normas técnicas brasileiras, enquanto os resultados dos testes de lixiviação e solubilidade se mostraram em concordância com as normas sanitárias do país (MYMRIN et al., 2019b).

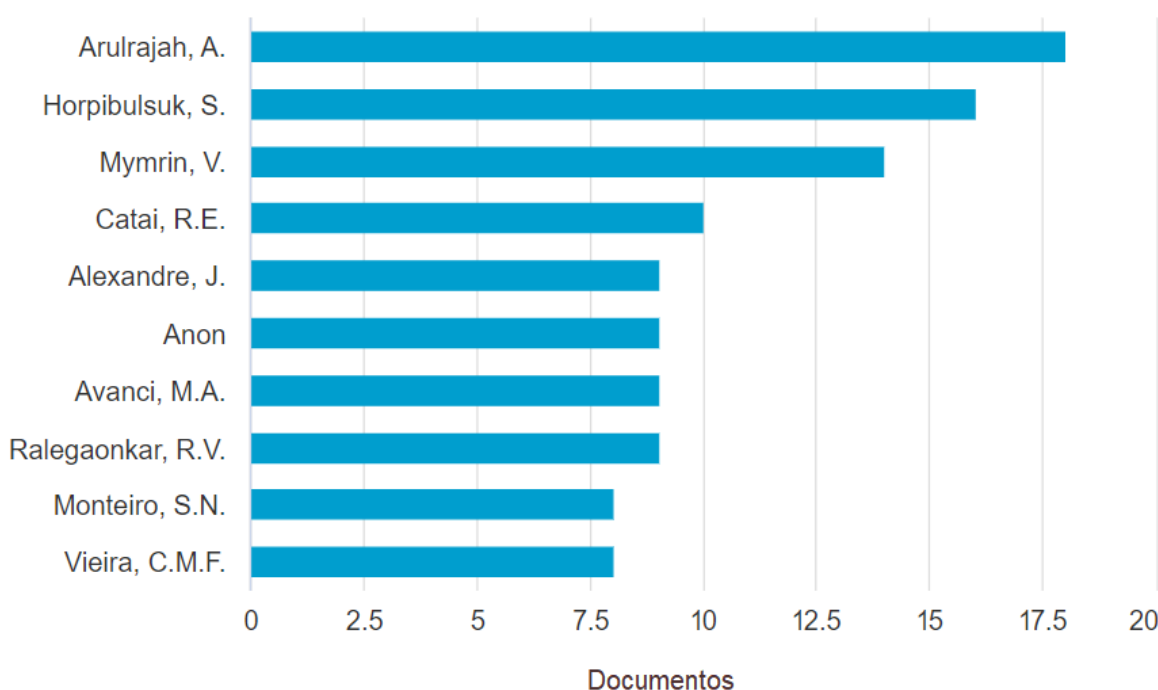
Em 2020, Bhurtel e Eisazadeh analisaram a força e a durabilidade de argila de Bangkok estabilizada com cinzas de fundo e cal. Os resultados mostraram melhora tanto na força quanto na durabilidade do material desenvolvido (BHURTEL E EISAZADEH, 2020).

Mymrin et al. (2021c) desenvolveram compósitos para materiais de construção com três tipos de resíduos: resíduos de construção e demolição, resíduos de gesso e RPC. Em outro estudo desenvolvido por Mymrin et al. (2021d) foram analisados compósitos para materiais de construção que utilizaram lodo de fosfogesso, escória de ferro (conversor refrigerado) e RPC como matérias-primas. Os compósitos atingiram as especificações das normas sanitárias do Cazaquistão.

## 2.5 Cenário científico

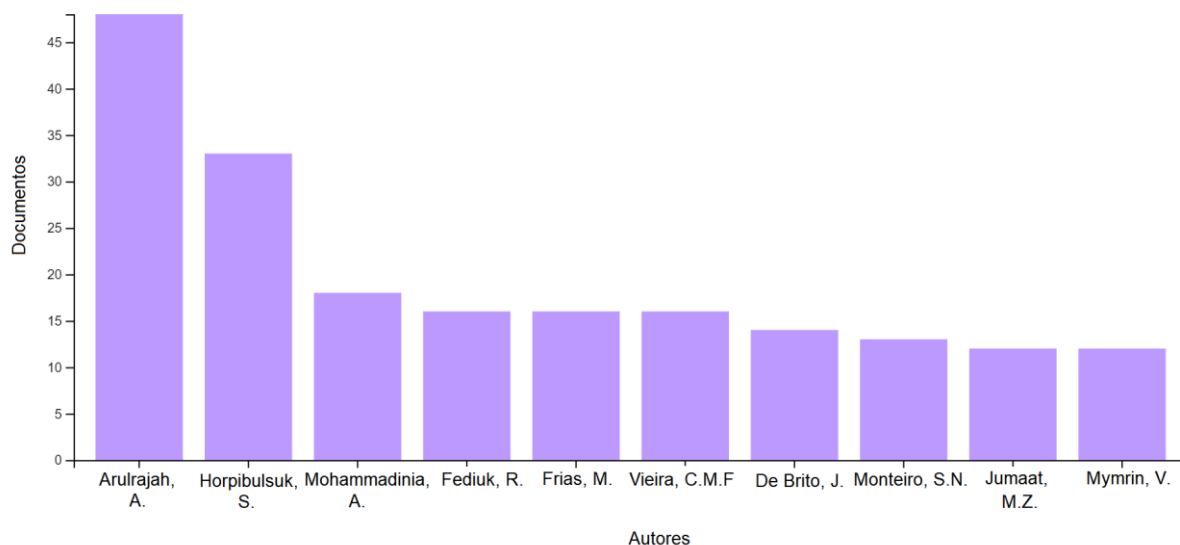
Na literatura científica e nas patentes mundiais, estão descritas pesquisas em ampla variedade de resíduos e suas aplicações potenciais. Limitando o estado da arte à área de ciência dos materiais e focando apenas em materiais de construção civil, foi obtida lista contendo 2.719 documentos na base de dados *Scopus* e 2.694 na base de dados *Web of Science*. Os principais autores encontrados estão enumerados nos Gráfico 1 e Gráfico 2:

Gráfico 1 – Número de documentos obtidos durante revisão da literatura na base Scopus, limitando o estado da arte à área de ciência dos materiais, separados por autor.



Fonte: Adaptado de SCOPUS (2022).

Gráfico 2 - Número de documentos obtidos durante revisão da literatura na base Web of Science, limitando o estado da arte à área de ciência dos materiais, separados por autor.



Fonte: Adaptado de *WEB OF SCIENCE* (2022).

Alguns exemplos dos avanços mais recentes são apresentados a seguir: Argamassas ativadas por álcali de escória de volume total, usando escória de alto forno granulada moída resfriada a água, como material de aluminossilicato, e escória de alto forno resfriada a ar, para substituir areia de fabricação mecânica (SHI et al., 2020); compostos de cerâmica vermelha fabricados a partir da lama vermelha de bauxita e areia de fundição (ALEKSEEV et al., 2019); concretos preparados com agregados modificados com lama vermelha do processo Bayer (LI et al., 2020) e com resíduos de plástico (PET – Polietileno tereftalato) (GUPTA et al., 2021); argamassas de revestimento produzidas com incorporação de aparas de tecido para uso como reforço ou isolantes térmicos (MACHADO et al., 2021); elaboração de compósitos para uso em construção civil a partir de lama vermelha de bauxita e resíduos de mineração de ardósia (MYMRIN et al., 2020).

Analogamente, o levantamento bibliográfico acerca de produção de materiais de construção civil empregando resíduos de minério de ferro, lodo de dragagem e resíduo da produção de cal é bastante extensa, porém não foram encontrados registros da utilização desses materiais usados concomitantemente, consistindo em inovação. Algumas das abordagens encontradas na literatura para esses resíduos estão apresentadas em capítulos específicos (itens 2.2.3, 2.3.2 e 2.4.2).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentam-se os procedimentos adotados para a realização do trabalho, com o intuito de desenvolver novos compósitos a partir dos resíduos industriais citados no capítulo 2. Não é escopo do trabalho avaliar a viabilidade comercial do produto, apenas a exequibilidade técnica.

Os materiais utilizados na presente pesquisa foram: resíduo de minério de ferro (RMF), lodo de dragagem de porto (LDP) e resíduo de produção de cal (RPC). Para a produção dos corpos de prova, foram aplicadas pesagem, secagem, peneiramento, mistura, compactação e cura. Tanto para matérias-primas quanto para composições finais dos corpos de prova, foram realizados testes para análises morfológica, física, química e mineral.

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados na presente pesquisa foram: resíduo da extração de minério de ferro (RMF), oriundo da cidade de Mariana (MG); lodo de dragagem marítima (LDP), proveniente do porto de Paranaguá (PR); resíduo da produção de cal (RPC), oriundo de empresa da região metropolitana de Curitiba (PR).

##### 3.1.1 Escolha das matérias primas

A definição dos resíduos utilizados se fundamentou no preceito de que os aglomerantes reagem em ambiente alcalino, logo a escolha de resíduos com pH alto proporcionaria ambiente favorável para as reações químicas. Por definição, todo aglomerante é um material ativo e ligante cuja principal função é formar uma pasta que promova a união entre os grãos existentes. A utilização de resíduos da produção da cal se faz necessária, visto que nestes pode haver resquícios de materiais aglomerantes e outros subprodutos industriais, que se classifiquem como pozolanas – materiais com elevado teor de sílica em forma reativa.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), as pozolanas são definidas como material silicoso ou sílico-aluminoso que em si mesmo possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante. Contudo, em temperatura ambiente, as pozolanas, em uma forma finamente pulverizada e na presença de umidade, reagem quimicamente com



o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) para formar compostos com propriedades cimentantes. Os resíduos selecionados obtiveram pH neutro ou alcalino.

### 3.1.2 Coleta dos materiais

O RMF foi coletado do material depositado sobre o solo na cidade de Mariana (MG), após o rompimento da barragem de contenção de Fundão (2015). O material foi extraído a uma profundidade de 50 cm, a fim de evitar impurezas eventualmente assentadas na camada superficial.

A coleta do LDP foi executada pela empresa DTA engenharia, responsável pela dragagem do porto de Paranaguá, no trecho Bravo 1 do porto de Paranaguá (PR).

O RPC foi coletado de uma empresa não-identificada da região metropolitana de Curitiba (PR), contendo teor de carbonatos de 18,5% e de materiais não-calcários de 22,4%.

Todos os resíduos foram acondicionados em sacos plásticos ou baldes e lacrados imediatamente após a coleta de modo a manter o estado de conservação e umidade o mais próximo possível do ponto onde foram recolhidos, sendo então enviados ao laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Curitiba.

Após recebimento dos resíduos na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, foi realizada a secagem do RMF em estufa a temperatura de 105 °C por 24 horas, seguida por resfriamento a temperatura ambiente e destorroamento.

## 3.2 Confeccção dos corpos de prova

Foram definidos 20 traços de combinação entre os resíduos coletados para a fabricação de corpos de prova, nos quais variou-se a concentração das matérias-primas. As porcentagens utilizadas variaram de 10 a 30% para RMF, 45 a 75% para LDP e 15 a 30% para RPC, como pode ser observado na Tabela 3. A definição das composições e a metodologia utilizada para moldagem dos corpos de prova, tiveram como base trabalhos anteriores publicados pelo grupo de pesquisa do Prof. Dr. Vsévolod Mymrine (MYMRIN, PONTE e IMPINNISI, 2005; MYMRIN e CORRÊA, 2007; MYMRIN et al., 2015, 2017, 2019c).

Tabela 3 - Proporção das matérias-primas para cada composição.

N°	Composições (%m)		
	RMF	LDP	RPC
1		75	15
2		70	20
3	10	65	25
4		60	30
5		70	15
6		65	20
7	15	60	25
8		55	30
9		65	15
10		60	20
11	20	55	25
12		50	30
13		60	15
14		55	20
15	25	50	25
16		45	30
17		55	15
18		50	20
19	30	45	25
20		40	30

Fonte: Autoria própria (2018).

Nota: RMF – Resíduo de Minério de Ferro

LDP – Lodo de Dragagem de Porto

RPC – Resíduo de Produção de Cal

Após secagem e peneiramento, as matérias-primas foram pesadas de acordo com a proporção estabelecida para cada composição em balança digital da marca MARTE, modelo AD2000, com precisão de  $\pm 0,0001$  g, sendo então, misturadas manualmente até a homogeneização, com auxílio de pistilo e almofariz e, então, hidratadas com concentração de água variando entre 13 e 15% v/m.

Para a moldagem, foram utilizados moldes de aço carbono de 20 mm de diâmetro (Figura 1). Como os corpos de prova (CPs) deveriam possuir altura final de 20 mm, foram inseridas no molde diferentes quantidades para cada composição, valores que foram repetidos para todos os exemplares do mesmo traço.

Figura 1 - Moldes de aço carbono utilizados na confecção dos corpos de prova.

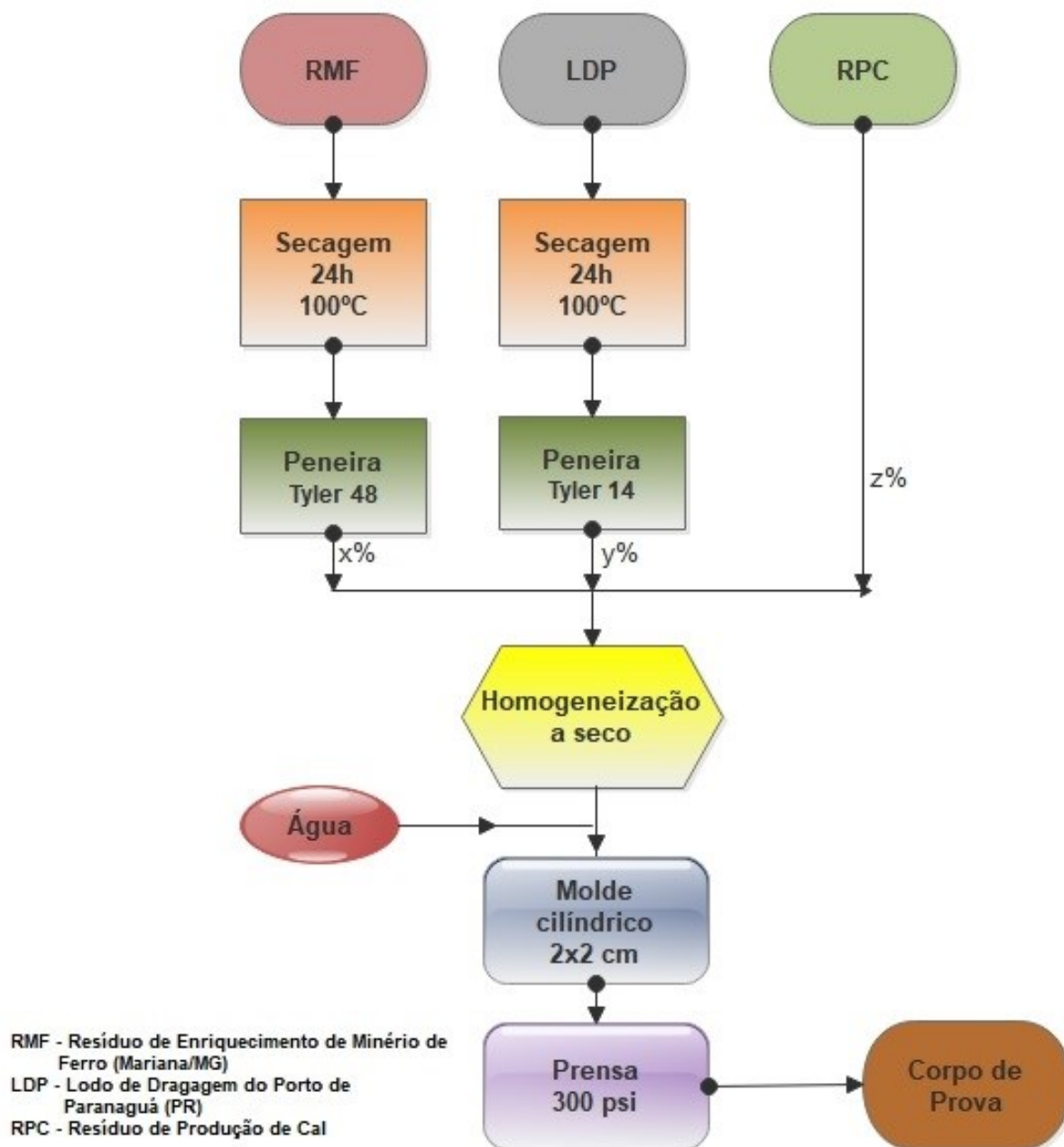


Fonte: Autoria própria (2018).

As misturas homogeneizadas e hidratadas foram compactadas a 300 psi em prensa hidráulica manual da marca BOVENAU, modelo P10ST. Foram moldados 70 corpos de prova, com diâmetro de 20 mm e altura de 20 mm, por traço a ser estudado, totalizando 1400 CPs. Na Figura 2 apresenta-se fluxograma esquematizando a confecção dos corpos de prova (CPs).

Após serem compactados, os CPs foram guardados em local seco, com temperatura ambiente e ausência de luz solar para curar até a data dos respectivos ensaios. Segundo a NBR 14931 (2004), o concreto deve ser curado enquanto não atingir endurecimento satisfatório, para tanto foram analisadas as idades de cura de 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180, 365, 730 dias. A cura dos corpos de prova foi realizada em ambiente com umidade e a temperatura ambiente, pois o hidróxido de cálcio presente na RPC é considerado um aglomerante aéreo, ou seja, é necessário evaporação da água presente na mistura e penetração do gás carbônico do ar atmosférico, para que haja ganho de resistência.

Figura 2 - Fluxograma da confecção dos corpos de prova.

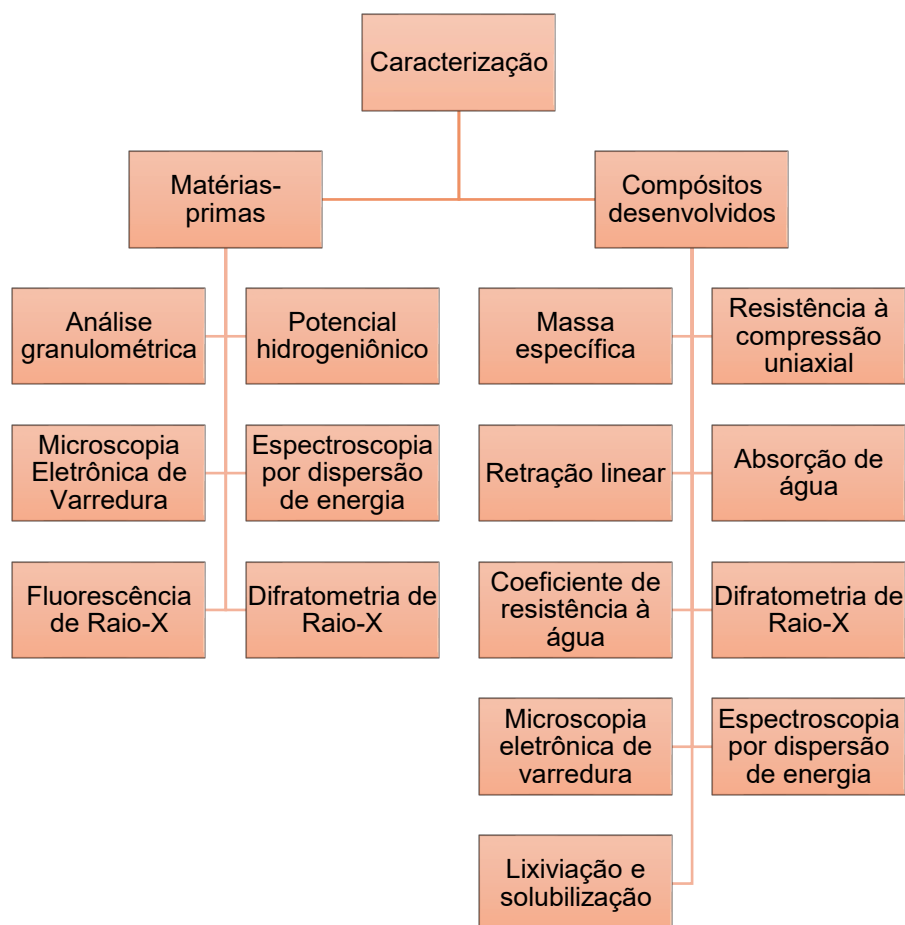


Fonte: Autoria própria (2018).

### 3.3 Caracterizações

Foram realizadas diversas técnicas para caracterização tanto das matérias-primas quanto dos compósitos desenvolvidos, conforme apresentadas na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma das análises realizadas nas matérias-primas e nos compósitos desenvolvidos.



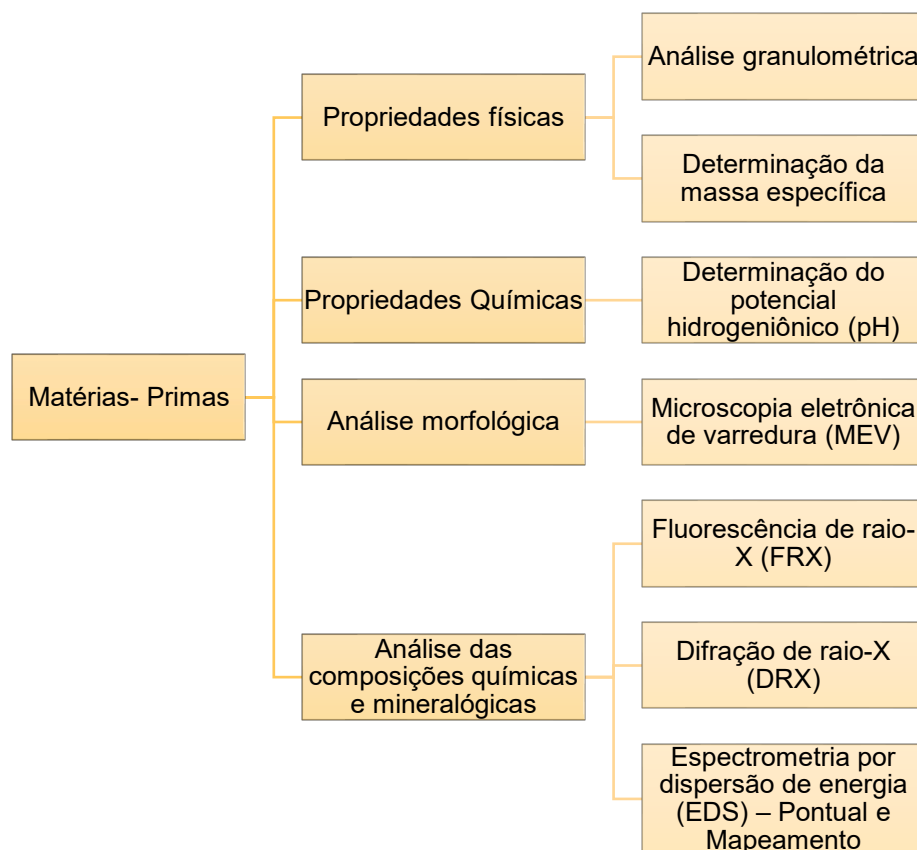
Fonte: Autoria própria (2021).

As análises foram realizadas em quintuplicata e as médias e desvios padrões foram calculados.

#### 3.3.1 Caracterização das matérias-primas

Nesta seção, encontram-se as técnicas realizadas para caracterização apenas das matérias-primas utilizadas no presente trabalho (Figura 4), sendo estas: RMF, LDP e RPC.

Figura 4 - Fluxograma das análises realizadas para caracterização das matérias-primas estudadas.



Fonte: Autoria própria (2021).

### 3.3.1.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada através de peneiramento para quantificar a distribuição por tamanho das partículas, conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) e os agregados classificados conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019). Foram determinadas também as frações de pedregulho, areia grossa e areia fina de acordo com a ASTM D 3282/04. Adicionalmente, com base em classificação específica da área de materiais de construção apresentada por Albuquerque (2012), foram determinadas as frações de areia fina, areia média e areia grossa.

Utilizou-se as peneiras da série normal: 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  e fundo. O material foi separado em duas amostras de 300 g cada, estas foram colocadas no conjunto de peneiras e agitado manualmente em cada peneira por aproximadamente 3 minutos. Em seguida, foi determinada a massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto. A quantidade

que se mantém nos limites inferiores e superiores da peneira após o processo de peneiramento é chamada de porcentagem retida acumulada. Com os valores obtidos, determinou-se a dimensão máxima característica<sup>1</sup> e o módulo de finura<sup>2</sup>, conforme a equação (1):

$$M_f = \frac{\sum \%RA}{100} \quad (1)$$

onde:  $M_f$  é o módulo de finura e %RA é a porcentagem retida acumulada.

### 3.3.1.2 Determinação do potencial hidrogeniônico

A fim de assegurar meio adequado para ocorrência das reações químicas citadas no item 3.1.1, foram efetuadas as medições de pH das matérias-primas, adaptando-se a NBR 16937-7 (ABNT, 2021) e TEIXEIRA et al. (2017). Foram colocados 20 g de amostra em um béquer e em seguida adicionados 50 mL de água destilada. Foi utilizada para pesagem uma balança analítica marca Shimadzu, modelo AUW 220D, com precisão de  $\pm 0,1$  mg. A solução formada foi sonicada, em um ultrassom da marca Unique, modelo MaxiClean1400A, durante 5 minutos e deixada em repouso por 2 h. O sobrenadante teve seu valor de pH medido em pHmetro de bancada digital da TECNOPON, modelo MPA-210.

### 3.3.1.3 Determinação da massa específica

É a relação entre a massa e o volume, excluindo deste os vazios permeáveis e os vazios entre os grãos. A análise foi realizada pelo Método de Chapman, conforme NBR 9776/87. Adicionou-se 500 mg da matéria-prima seca que se desejava analisar a um frasco de Chapman contendo 200 mL de água destilada.

1. Grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

2. Soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

Agitou-se cuidadosamente a mistura para remoção de eventuais bolhas de ar e para assegurar que o material não ficasse aderido às paredes do frasco. A leitura do nível atingido pela água no frasco indica o volume, em  $\text{cm}^3$ , ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo.

A massa específica do agregado miúdo foi calculada de acordo com a equação (2):

$$\gamma = \frac{500}{L - 200} \quad (2)$$

onde:  $\gamma$  é a massa específica do agregado miúdo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e L é o volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo ( $\text{cm}^3$ ).

#### 3.3.1.4 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é capaz de produzir imagens com alta resolução da superfície do material, com aparência tridimensional e ampliação de até 300 mil vezes, permitindo a avaliação da estrutura superficial (MANNHEIMER, 2002).

A técnica é baseada na emissão termoiônica de um feixe de elétrons a partir de um filamento metálico. Quando o feixe interage com o material, os elétrons perdem energia, por dispersão ou absorção, revelando a superfície e as fases da amostra (MANNHEIMER, 2002).

A análise da morfologia das superfícies foi realizada através de micrografias feitas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss, modelo EVO MA 15. Análise dos aspectos tridimensionais por estereoscopia de elétrons secundários processadas pelo programa Mex da Alicona.



### 3.3.1.5 Espectroscopia por dispersão de energia - EDS

A espectroscopia de energia dispersiva (EDS) permite determinar a composição química elementar qualitativa da amostra. Existem duas maneiras de se fazer um teste de EDS, a primeira é com um equipamento de raio-X e a segunda acoplado um detector de energia dispersiva ao equipamento de MEV (MEE, 2016).

Neste ensaio, é utilizado um feixe de radiação para irradiar a amostra, sendo que este interage com o material, ionizando um elétron central. Os raios X característicos de quando um elétron de camada mais externa preenche a vacância são detectados, permitindo a análise da composição química da amostra (NGO, 1999).

Cada espectro EDS registrado é mapeado para uma posição específica na amostra e, assim como no FRX, a posição dos picos permite a identificação do elemento, enquanto a intensidade do sinal corresponde à concentração do elemento (MEE, 2016).

As análises das composições químicas das superfícies foram realizadas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, através do sistema de análise química tipo EDS (Oxford) com software AZ Tech (*Advanced*) com detector tipo SDD de 80 mm<sup>2</sup> do Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss, modelo EVO MA 15.

### 3.3.1.6 Fluorescência de raio-X - FRX

A fluorescência de raio-X (FRX) é uma técnica que possibilita a determinação da composição química através da detecção dos raios X característicos dos elementos presentes na composição. Após a irradiação de uma amostra sólida com um feixe de raios X, a sua interação com o material resulta em raios X de freamento e raios X característicos (LAKOWICZ, 2006).

Os raios X característicos possuem este nome por serem específicos ao elemento irradiado, uma vez que resultam da energia eliminada em forma de onda após um elétron da camada L assumir a vacância da camada K após a ionização deste. Os picos do espectro resultante representam, assim, os elementos presentes

na amostra, bem como sua quantidade é expressa pela intensidade do sinal, ou seja, o tamanho dos picos (LAKOWICZ, 2006).

A composição química também foi obtida através de fluorescência de raio-X (FRX). A análise foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná, em um espectrômetro de fluorescência de raio X Malvern PANalytical Axios-mAX, com tubo de ródio e com o auxílio do *software* SuperQ 5.3. As matérias-primas foram submetidas previamente ao processo de moagem em moinho pulverizador de panela AMP1-M da marca Amef, com rotação de 1120 rpm e granulometria média de saída de 400 mesh (0,035 mm).

### 3.3.1.7 Difração de raio-X - DRX

A difração de raios X é um fenômeno onde um feixe incidente de raios X interage com os átomos de um cristal, que possuem espaçamento uniforme, causando interferência. O teste de difração de raio-X (DRX) é aplicado para determinação da estrutura atômica e molecular de um material ou para determinar o tamanho dos cristais existentes na amostra (LEE, 2017).

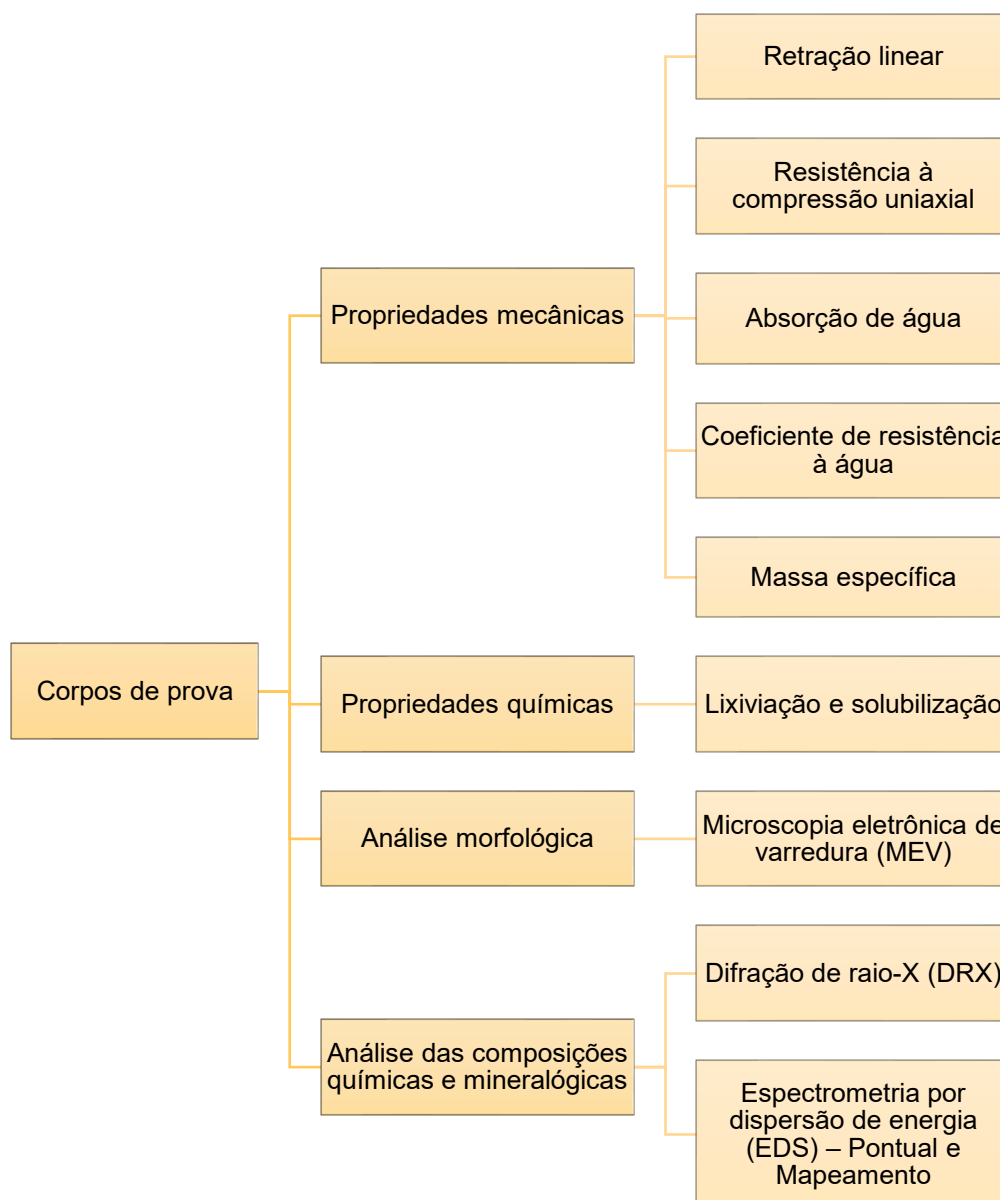
Neste, a amostra é triturada até formar um pó fino e homogêneo, então um feixe incidente de raios X é difratado pelos átomos em direções específicas, que são determinadas a partir da sua composição média em massa. Cada estrutura cristalina produz um padrão de difração característico. Com base nos ângulos e intensidades dos feixes difratados, pode-se obter uma imagem tridimensional da densidade dos elétrons dentro do cristal. A partir desta, as posições médias dos átomos e suas ligações químicas dentro do cristal são determinadas (LEE, 2017).

A análise da composição mineral das matérias-primas foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná através da técnica de difração de raios-X em um difratômetro Empyrean da Malvern PANalytical, com detector X'Celerator e tubo de cobre. Os resultados foram interpretados com o auxílio do *software HighScore Plus* da Malvern PANalytical, usando o banco de dados PAN-ICSD. As matérias-primas foram submetidas previamente ao processo de moagem em moinho pulverizador de panela AMP1-M da marca Amef, com rotação de 1120 rpm e granulometria média de saída de 400 mesh (0,035 mm).

### 3.3.2 Caracterização dos compósitos desenvolvidos

Nesta seção, pode-se encontrar informações a respeito das caracterizações realizadas nos corpos de prova das composições pré-definidas (Figura 5).

Figura 5 - Fluxograma das análises realizadas para caracterização dos compósitos desenvolvidos.



Fonte: Autoria própria (2021).

#### 3.3.2.1 Retração linear

O coeficiente de retração linear ( $\alpha$ ) foi utilizado para verificar a retração linear (ou expansão) das amostras. O ensaio foi adaptado das orientações da NBR15261

(ABNT, 2005). Foi verificada a retração das amostras, através de medição por paquímetro, para os seguintes tempos de cura: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180 dias, 1 e 2 anos.

O coeficiente é dado pela equação (3):

$$\alpha = \frac{(l_{fn})}{l_i} \times 100 \quad (3)$$

onde:  $\alpha$  é o coeficiente de retração linear;  $l_i$  é o diâmetro inicial do CP; e  $l_{fn}$  é o diâmetro medido no tempo de cura n.

### 3.3.2.2 Massa específica

A massa específica foi obtida pela relação entre a massa da amostra seca e seu volume, calculada para as idades de 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180 dias, 1 e 2 anos. A massa específica pode ser obtida pela equação (4):

$$\rho = m / (\pi \times r^2 \times h) \quad (4)$$

onde:  $\rho$  é a massa específica do CP, em g/cm<sup>3</sup>, m é a massa da amostra seca em g, r é o raio da amostra em cm e h a sua altura em cm.

### 3.3.2.3 Resistência à compressão uniaxial

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram realizados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), em prensa da marca EMiC, modelo DL 10000, capacidade máxima de 100 kN. Foram rompidos 5 corpos de prova para cada composição nas idades: 3, 7, 14, 28, 60, 90, 180 dias, 1 e 2 anos. A resistência à compressão axial foi determinada através de cálculo numérico após a obtenção do valor da força máxima alcançada na compressão axial do CP.

A equação (5) foi utilizada para determinação da resistência à compressão uniaxial:

$$f_{c_n} = 4 \times \frac{F}{\pi d^2} \quad (5)$$

onde:  $f_{c_n}$  é a resistência à compressão axial para o tempo de cura  $n$ , em MPa,  $F$  é a força máxima alcançada em N e  $d$  é o diâmetro do CP em mm. Foram calculados as médias e os desvios padrão.

### 3.3.2.4 Absorção de água

A absorção de água foi dada através da comparação dos pesos dos CPs antes e após a imersão em água por 24 horas, podendo ser determinada pela equação (6):

$$A_{\text{água}}(\%) = \frac{(m_f - m_i)}{m_i} \times 100 \quad (6)$$

onde:  $A_{\text{água}}$  é o percentual da absorção de água pelo CP,  $m_f$  é a massa do corpo de prova após a imersão, em g, e  $m_i$  é a massa do corpo de prova seco, em g.

Esta análise foi realizada para 5 CPs de cada composição para as idades de 28, 90 dias, 1 e 2 anos. Foram calculados as médias e os desvios padrão.

### 3.3.2.5 Coeficiente de resistência à água

O coeficiente de resistência à água é dado comparando-se os valores de resistência à compressão axial de uma mesma composição, secos e após imersão em água por 24 h. O teste seguiu o padrão da norma NBR 5739/2018 para determinação da resistência à compressão uniaxial, porém os CPs são avaliados conforme a norma Russa GOST 9479/1984 por não existirem critérios nas normas brasileiras para essa determinação. Este ensaio foi realizado para as idades de 28, 90 dias, 1 e 2 anos, utilizando-se 5 CPs para cada idade de cura analisada. A equação (7) foi utilizada para determinação do coeficiente de resistência à água:

$$C_{ra} = \frac{R_{sat}}{R_{seco}} \quad (7)$$

onde:  $C_{ra}$  é o coeficiente de resistência à água,  $R_{sat}$  é a resistência dos CPs após a imersão em água e  $R_{seco}$  é a resistência dos CPs secos.

Foram calculados as médias e os desvios padrão.

#### 3.3.2.6 Difração de Raio-X

A fim de se determinar a constituição cristalina dos compósitos desenvolvidos tais como composição química, estrutura do cristal, tamanho do cristalito, foi realizada a técnica de Difração de raio-X no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná, em um difratômetro *Empyrean* da Malvern PANalytical, com detector X'Celerator e tubo de cobre. Os resultados foram interpretados com o auxílio do *software HighScore Plus* da Malvern PANalytical, usando o banco de dados PAN-ICSD.

#### 3.3.2.7 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A quantidade, tamanho, morfologia e distribuição das fases e defeitos cristalinos. A análise da morfologia das superfícies foi realizada através de micrografias feitas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss, modelo EVO MA 15. Análise dos aspectos tridimensionais por estereoscopia de elétrons secundários processadas pelo programa Mex da Alicona.

#### 3.3.2.8 Espectroscopia por dispersão de energia - EDS

As análises das composições químicas das superfícies foram realizadas no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, através do sistema de análise química tipo EDS

(Oxford) com software AZ Tech (*Advanced*) com detector tipo SDD de 80 mm<sup>2</sup> do Microscópio Eletrônico de Varredura Zeiss, modelo EVO MA 15.

### 3.3.2.9 Lixiviação e solubilização

Para analisar a mobilidade dos metais nos compósitos desenvolvidos foram realizados ensaios de lixiviação e solubilidade. O ensaio de lixiviação de metais pesados foi realizado de acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004) e o de solubilização segundo NBR 10006 (ABNT, 2004).

Lixiviação de resíduos sólidos refere-se à capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes neles, por meio de dissolução no meio extrator. Solubilização de resíduos sólidos é a operação que tem o objetivo de diluir substâncias contidas neles, por meio de lavagem em meio aquoso. A lixiviação e solubilização de resíduos sólidos são processos que ajudam a identificar a maneira de dissolução de determinado resíduo no meio ambiente ou na água.

Estes dois ensaios foram realizados com o intuito de determinar a estabilidade química dos resíduos, ou seja, verificar o grau de imobilização dos contaminantes (metais pesados) presentes nos materiais, quando em contato com soluções aquosas.

As amostras foram previamente moídas em moinho pulverizador de panela AMP1-M da marca Amef e secas em estufa por 24 horas para a realização dos ensaios de solubilização e lixiviação.

Para a análise de solubilização, foi obtido o extrato solubilizado de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004). A amostra foi colocada em um béquer, sendo o volume completado com água deionizada. A solução formada foi então agitada com agitador magnético em baixa velocidade a fim de solubilizar a maior quantidade de grãos sólidos possível. Após esse processo, o béquer foi coberto com filme de PVC, permanecendo em repouso a temperatura ambiente por 7 dias. Decorrido este período, a solução foi filtrada com auxílio de membrana filtrante de 0,45 µm de porosidade. O filtrado obtido, definido como o extrato solubilizado, foi utilizado para determinar as concentrações de metais pesados.

Para o ensaio de lixiviação, foi obtido extrato lixiviado das amostras conforme NBR 10005 (ABNT, 2004). O extrato lixiviado foi utilizado para determinar as concentrações de metais presentes nos compósitos.

A determinação dos metais foi realizada, tanto para o ensaio de lixiviação, como para o de solubilidade, por Espectroscopia de Absorção Atômica (AAS) em espectrofotômetro SavantAA da GBC *Scientific Equipment* com atomizador de chama ar-acetileno em filamento de tungstênio, comprimento de onda de 422,7 nm e largura de fenda de 0,5 nm no Laboratório Multiusuário de Análises Químicas (LAMAQ) da UTFPR, *campus* Curitiba.

Os resultados obtidos para ambos os ensaios foram analisados segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Os ensaios de lixiviação e solubilidade foram feitos em triplicata.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, os resultados obtidos pelos ensaios de caracterização são apresentados e discutidos.

### 4.1 Caracterização das matérias-primas

Neste item são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização das matérias-primas utilizadas para a confecção dos compósitos.

#### 4.1.1 Características visuais, massa específica e potencial hidrogeniônico

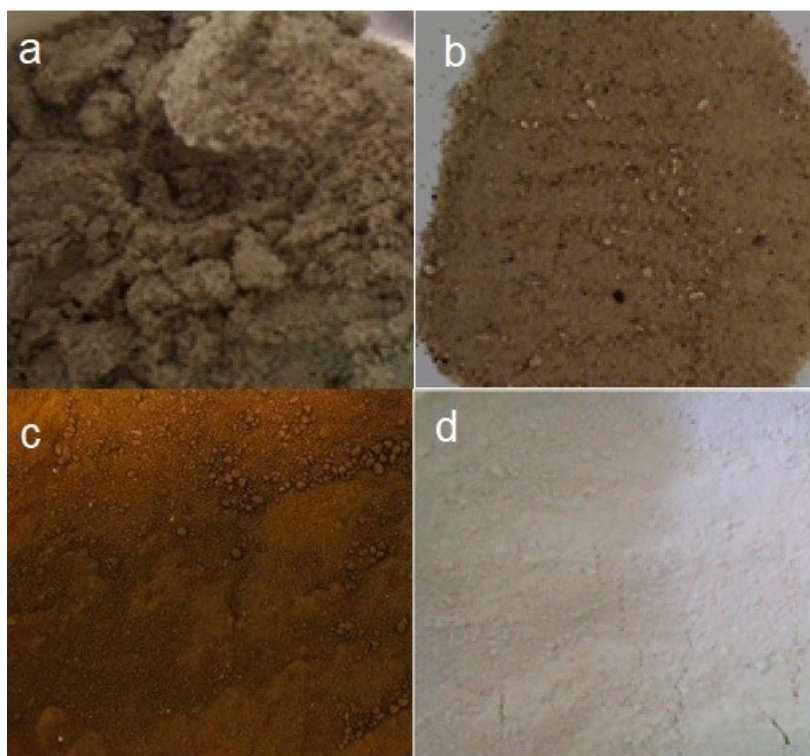
A determinação da massa específica é importante, pois há a possibilidade de se estimar a faixa de resistência dos materiais desenvolvidos a partir do conhecimento desse valor (CARRIJO, 2005).

O meio ambiente alcalino favorece as reações químicas de formação das estruturas que influenciarão a maioria das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos desenvolvidos (MYMRIN et al., 2019d). A fim de assegurar esse meio adequado para ocorrência das reações químicas necessárias, foram efetuadas as medições de pH das matérias-primas.

A amostra coletada no canal do porto de Paranaguá é composta basicamente por areia fina, apresentando característica arenosa, com coloração levemente branca, (Figura 6a) e odor desagradável. É possível observar fragmentos de conchas e outros resíduos no material seco (Figura 6b). A massa específica, determinada por meio do frasco Chapman, de acordo com a norma NBR 9776/87 (ABNT, 1987), foi de 2,540 g/cm<sup>3</sup> para o LDP, sendo classificada como normal (na faixa de 2 a 2,8 g/cm<sup>3</sup>). Outros autores encontraram valores semelhantes de massa específica para o LDP (WANG et al., 2020; PENG E CHEN, 2021). O valor obtido de pH foi de 7,21 (neutro).

A amostra de resíduo de minério de ferro (RMF) apresenta característica arenosa, com coloração avermelhada, possivelmente devido ao teor de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no material (Figura 6c). A massa específica foi de 3,280 g/cm<sup>3</sup> e o pH de 10,21. Valores de densidade e pH em conformidade com achados de outros autores (DA SILVA, 2014).

Figura 6 - Matérias-primas utilizadas neste estudo: a) Lodo de dragagem do Porto de Paranaguá (LDP) úmido e b) após secagem em estufa; c) Resíduo de minério de ferro (RMF); d) Resíduo de produção de cal.



Fonte: Autoria própria (2018).

O resíduo de produção de cal é um sólido branco com característica arenosa (Figura 6d). A coloração branca é devida ao óxido de cálcio (CaO), principal constituinte das cales. A amostra apresentou massa específica de  $2,280 \text{ g/cm}^3$  e pH de 12,33. Belakroum (2018) obteve valor semelhante de massa específica ( $2 \text{ g/cm}^3$ ).

A densidade da cal comercial varia entre  $3,2$  e  $3,4 \text{ g/cm}^3$  (OLIVEIRA, AQUINO E KLITZKE, 2009), portanto o material utilizado se trata de resíduo.

O RMF exibiu valor de densidade mais elevado entre as matérias-primas utilizadas, em decorrência do alto teor de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) em sua composição.

#### 4.1.2 Distribuição de tamanho de partículas

A granulometria é um importante fator para as propriedades de suporte de carga e para a compactação, sendo determinada a partir da curva de distribuição granulométrica. Suporte de carga é a capacidade da estrutura do material em resistir a tensões, sem mudanças no arranjo tridimensional das partículas constituintes (ALAKUKKU et al., 2003).

A análise granulométrica mostrou que todas as matérias-primas podem ser classificadas como agregado miúdo segundo a NBR 7211:2009 (versão corrigida 2019), pois passam pela peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm (Tabela 4).

O LDP teve maior concentração de partículas retidas na peneira 0,15 mm (78,72%). Observa-se que tanto o RMF quanto o RPC (Tabela 4) são materiais mais grossos. Ambos apresentam a maioria das partículas com diâmetros na faixa de 1,18 e 2,35 mm, sendo o RMF ligeiramente mais grosso, com 36,70% de partículas retidas na peneira 1,18 mm.

De acordo com a norma ASTM D 3282/04, os solos e agregados para construção de rodovias são classificados em pedregulho (2,0 a 75 mm), areia grossa (0,425 a 2,0 mm) e areia fina (0,075 a 0,425 mm).

Os dados de granulometria obtidos no peneiramento mostram que, segundo a ASTM D 3283/04, o LDP é constituído em sua maioria por areia fina (98,09%), com 1,70% de areia grossa e 0,21% de pedregulhos. O RMF e o RPC são compostos majoritariamente por areia grossa (61,00 e 70,00%, respectivamente). O RMF apresenta ainda 37,30% de pedregulhos e pequena fração de areia fina (1,70%). O RPC tem constituição bastante semelhante ao RMF, com 28,20% de pedregulho e 1,80% de areia fina em sua composição.

Com base em classificação específica da área de materiais de construção apresentada por Albuquerque (2012), as frações são nomeadas da seguinte maneira: areia fina (0,15 a 0,6 mm), areia média (0,6 a 2,4 mm) e areia grossa (2,4 a 4,8 mm).

Segundo essa classificação, LDP possui em sua composição 87,10% de areia fina, 1,70% de areia média e 0,21% de areia grossa. O RMF é formado em sua maioria por areia média (61,00%) e areia grossa (37,30%), com pequena quantidade de areia fina (1,00%). O RPC também é constituído basicamente por areia média (70,00%) e areia grossa (28,20%), com leve fração de areia fina (1,10%).

O agregado miúdo para concreto pode ser classificado comercialmente segundo o Módulo de Finura ( $M_f$ ), de forma a atender aos limites estabelecidos na NBR 7211:2009 (ABNT, 2019). Tal classificação se dá da maneira exibida no Quadro 1.

Tabela 4 - Composição granulométrica das matérias-primas usadas no estudo: LDP (lodo de dragagem de portos), RMF (resíduo de minério de ferro) e RPC (resíduo de produção de cal).

Abertura (mm)	LDP			RMF			RPC		
	Retido (g)	Retido (%)	%RA	Retido (g)	Retido (%)	%RA	Retido (g)	Retido (%)	%RA
4,75	0,40	0,08%	0,08%	0,06	0,60%	0,60%	0,10	1,00%	1,00%
2,36	0,65	0,13%	0,21%	3,67	36,70%	37,30%	2,72	27,20%	28,20%
1,18	1,93	0,39%	0,60%	6,00	60,00%	97,30%	6,90	69,00%	97,20%
0,60	6,58	1,32%	1,91%	0,10	1,00%	98,30%	0,10	1,00%	98,20%
0,30	41,87	8,37%	10,29%	0,05	0,50%	98,80%	0,05	0,50%	98,70%
0,15	393,62	78,72%	89,01%	0,05	0,50%	99,30%	0,06	0,60%	99,30%
Fundo	54,95	10,99%	100,00%	0,07	0,70%	100,00%	0,07	0,70%	100,00%
Total	500,00	100,00%		10,00	100,00%		10,00	100,00%	
Inicial	500			10,00					

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota: %RA – Porcentagem retida acumulada.

Quadro 1 - Classificação comercial dos agregados miúdos quanto ao módulo de finura (NBR 7211:2009, versão 2019).

Classificação	Módulo de finura ( $M_f$ )
Areia fina	Entre 1,55 e 2,20 na faixa da Zona utilizável inferior
Areia média	Entre 2,20 e 2,90 na faixa da Zona ótima
Areia grossa	Entre 2,90 e 3,50 na faixa da Zona utilizável superior

Fonte: Autoria própria (2022).

A dimensão máxima característica encontrada no LDP foi 0,60 mm e, após aplicação na Equação 1 o módulo de finura resultante foi de 2,02. De acordo com a NBR 7211:2009 (ABNT, 2019), LDP pode ser classificado como areia fina.

Tanto o RMF quanto o RPC apresentaram dimensão máxima característica de 4,75 mm, sendo que o módulo de finura do RMF foi ligeiramente maior que o do RPC (5,31 e 5,23, respectivamente). De acordo com a norma acima citada, ambos os materiais não se classificam como areia.

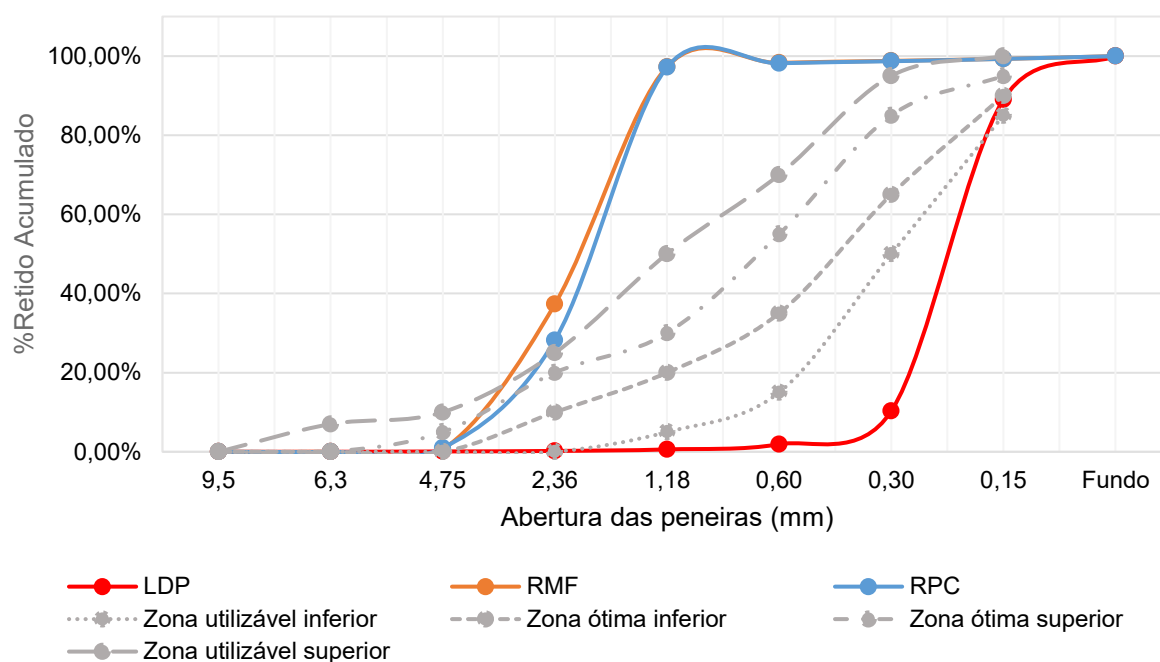
Acredita-se que 60% a 70% dos resíduos de mineração do Quadrilátero Ferrífero apresentam granulometria tendendo às areias finas e médias siltosas (CAMPANHA, 2011). Com isso, a composição granulométrica do resíduo apresentou valores fora do esperado e observado em outras bibliografias.

Observando-se a curva granulométrica das matérias-primas, percebe-se uma distribuição uniforme dos grãos para o lodo de dragagem de portos (LDP) (Gráfico 3). Neste caso, não há partículas menores para preencher os vazios. Consequentemente, pode ser mais difícil alcançar propriedades de alta densidade e de suporte de carga.

O RMF e o RPC são materiais bem graduados, representados por curvas que abrangem um intervalo completo de tamanhos de grãos, os vazios deixados pelas

partículas grandes são preenchidos pelas partículas menores. Isso resulta em uma estrutura densa e boas propriedades de suporte de carga. Porém, o fato de a amostra possuir partículas com diâmetros grandes não é o ideal em se tratando de possível aglomerante, visto que demanda maior tempo para a reação química do material.

Gráfico 3 - Curva granulométrica das matérias-primas.



Fonte: Autoria própria (2022).

A distribuição granulométrica para utilização de materiais como agregado miúdo deve atender aos limites estabelecidos na NBR 7211:2009 (ABNT, 2019) (Tabela 5).

Tabela 5 - Especificação da distribuição granulométrica para utilização de materiais como agregado miúdo (ABNT NBR 7211/09)

Abertura da peneira (mm)	Limite Inferior		Limite Superior	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,60	15	35	55	70
0,30	50	65	85	95
0,15	90	95	95	100

Fonte: Adaptada da NBR 7211:2009 (ABNT, 2019).

Entretanto, podem ser utilizados materiais com distribuição granulométrica diferentes destes limites, desde que realizados estudos prévios de dosagem para que se comprove a aplicabilidade.

Segundo a NBR 6453/2003 (ABNT, 2003), a %RA em peneira com abertura de 1,00 mm deve ser igual ou inferior a 5,0% para a cal virgem comum e igual ou inferior a 2,0% para a cal virgem especial. Observando-se que a %RA encontrada para o RPC é muito superior à prevista em norma (97,20%), o material usado é classificado como resíduo.

#### 4.1.3 Morfologia e composição química

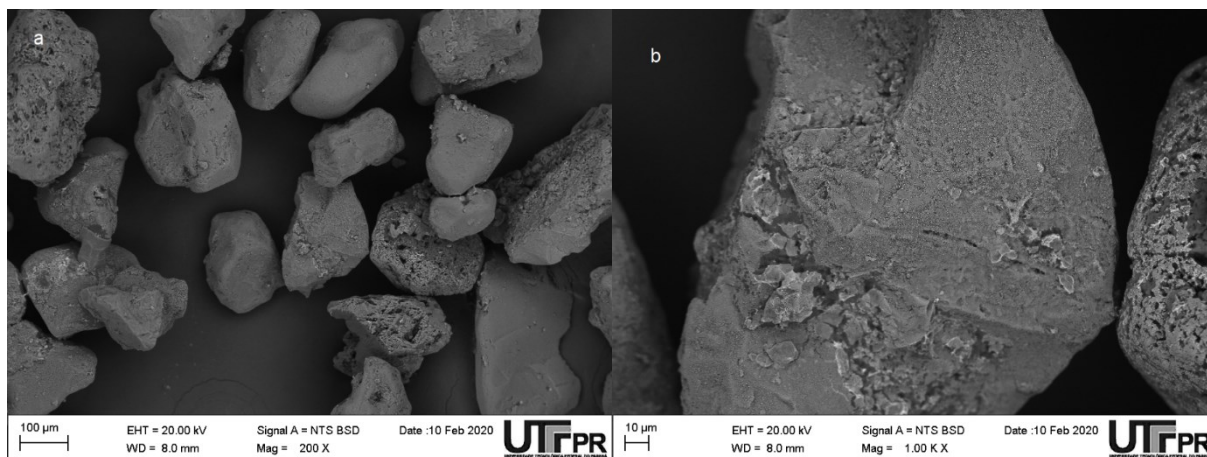
As análises da composição química e da morfologia dos materiais utilizados neste estudo são importantes para entender as modificações ocorridas ao longo do processo de cura dos materiais desenvolvidos.

##### 4.1.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A estrutura morfológica do sedimento dragado (LDP), observada por MEV com ampliação de 200X (Figura 7a), apresenta estrutura vesicular, com grãos arredondados, sem ângulos agudos e com dimensões semelhantes entre si, típicos de partículas de areia. Percebe-se também estruturas cristalinas cúbicas semelhantes a halita.

Na imagem obtida com magnificação de 1,00 kX (Figura 7b), pode-se notar o grão com mais detalhes, sendo visível a destruição de sua superfície, inclusive sua descamação, resultante da fricção durante a história geológica desta partícula. Este tipo de destruição pode aumentar a dissolução da camada superficial em ambiente alcalino (ILER, 1976), especialmente nas primeiras etapas de hidratação das misturas iniciais, com formação de grupo de minerais, principalmente amorfos de silicato de cálcio hidratado (CSH –  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) com composições instáveis (MYMRIN, 1987).

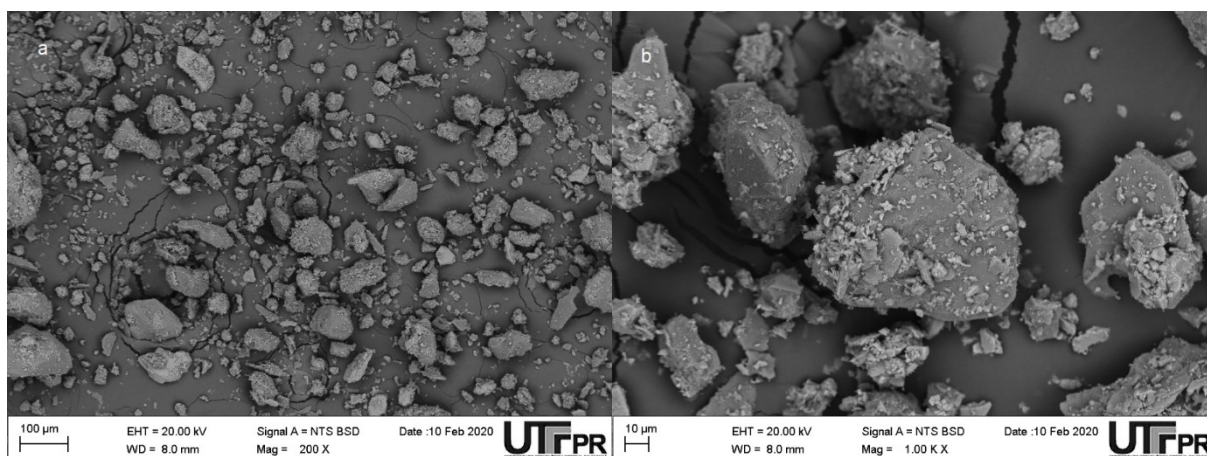
Figura 7 - Imagens de MEV da superfície do Lodo de Dragagem de Porto (LDP): a) magnificação de 200X e b) magnificação de 1,00 kX.



Fonte: Autoria própria (2019).

O substrato de RMF, observado a magnificação de 200X (Figura 8a), apresentou superfície com rachaduras e presença de partículas, exibindo superfícies irregulares e de diferentes tamanhos e formas. A imagem ampliada em 1,00 kX (Figura 8b) mostra as fraturas existentes na base e a descamação da superfície dos grãos.

Figura 8 - Imagens de MEV da superfície do Resíduo de Minério de Ferro (RMF): a) magnificação de 200X e b) magnificação de 1,00 kX.

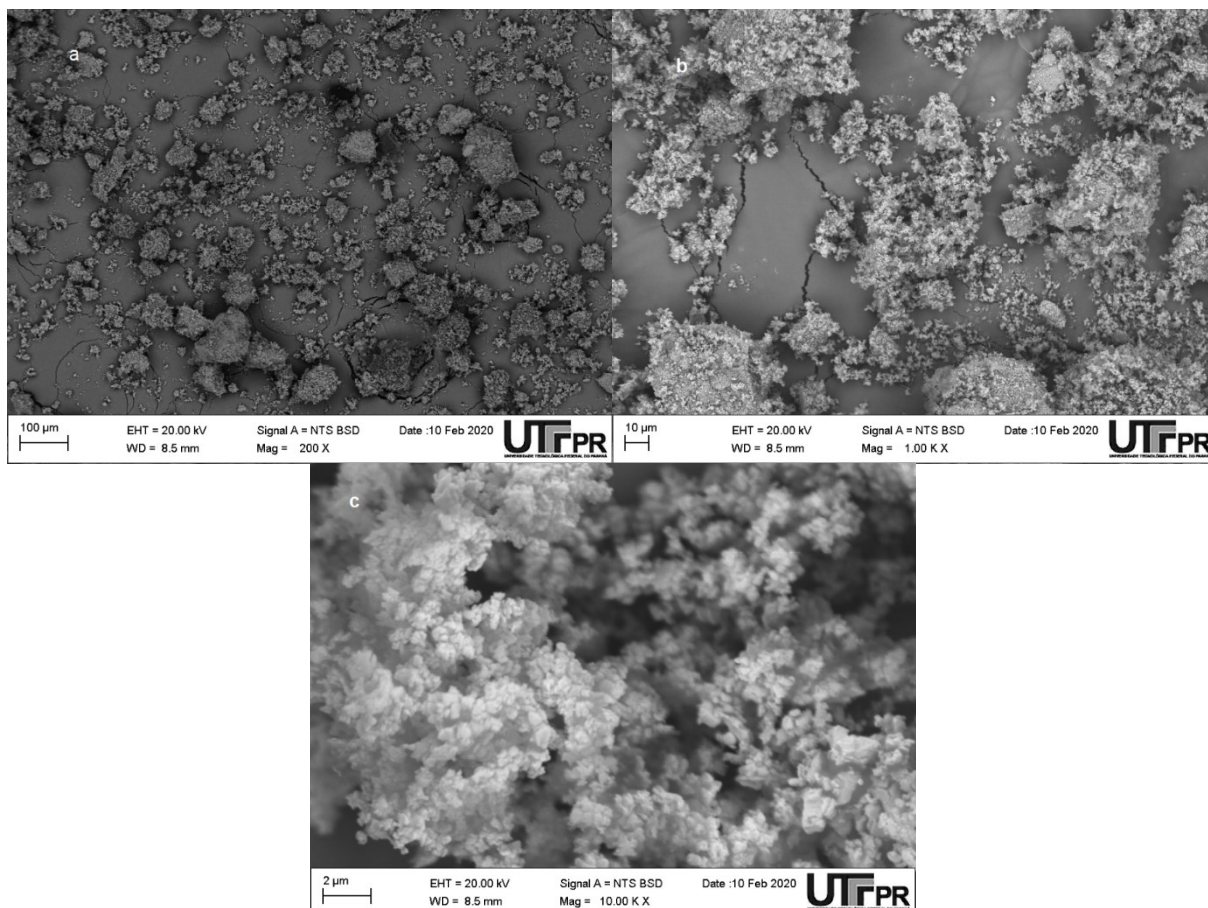


Fonte: Autoria própria (2019).

A imagem de MEV do RPC, com ampliação de 200X (Figura 9a), exibe uma superfície irregular, com rachaduras e poros. Há aglomerados de diversos tamanhos, dispersos heterogeneamente sobre a superfície. Nota-se, ao observar a mesma superfície com magnificação de 1,00 kX (Figura 9b), partículas de diversos tamanhos

sem ligação química entre si. A uma maior magnificação (10,00 kX) (Figura 9c), a partícula do material revelou-se totalmente amorfa, semelhante a uma nuvem.

Figura 9 - Imagens de MEV da superfície do Resíduo de Produção de Cal (RPC): a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX e c) magnificação de 10,00 kX.



Fonte: Autoria própria (2019).

Via de regra, um material é dito amorfo quando seus átomos não conservam qualquer tipo de organização ou regularidade em sua disposição espacial, ou ainda, não possui invariabilidade na composição química em diferentes pontos.

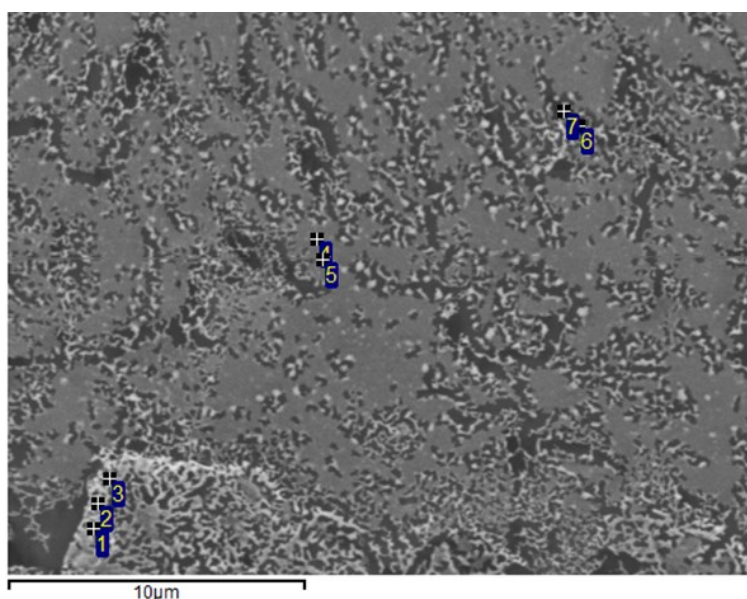
#### 4.1.3.2 Espectroscopia por dispersão de energia (EDS)

A concentração de cada elemento químico presente em pontos diferentes das matérias-primas (Figura 10 a 12), determinada por EDS, encontra-se nas Tabela 6 a 8.



O LDP é composto principalmente pelos elementos carbono, com concentração variando entre 33,26 e 51,85%p., e silício, concentração entre 43,77 e 100,00%p (Tabela 6). Este achado já era esperado, uma vez que o principal componente do lodo de dragagem é a areia e, também, devido à grande quantidade de matéria orgânica movimentada no porto de Paranaguá. A existência dos elementos Na e Cl se deve ao sal presente em grande quantidade na água do mar.

Figura 10 - Imagem do lodo de dragagem de porto (LDP), obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 6 - Composição química do lodo de dragagem de porto (LDP) em cada ponto assinalado na Figura 10, obtida através de EDS, em %peso.

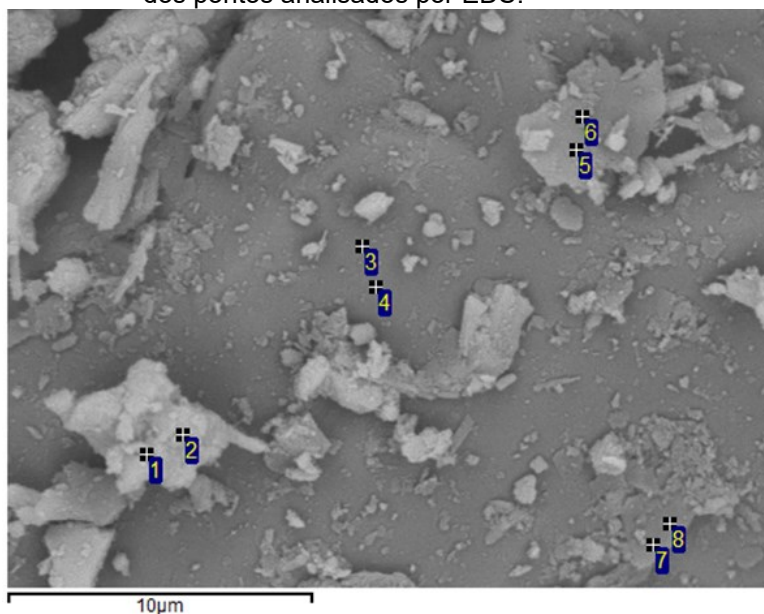
Ponto	C	Na	Mg	Al	Si	Cl	Total
1	37,25	2,41	0,33	0,97	54,91	4,13	100,00
2	51,85	1,42	-	1,04	43,77	1,91	100,00
3	-	0,76	-	-	97,66	1,58	100,00
4	37,85	-	-	-	61,72	0,43	100,00
5	38,19	0,37	-	-	61,44	-	100,00
6	-	-	-	-	100,00	-	100,00
7	33,26	-	-	0,36	66,38	-	100,00
Max.	51,85	2,41	0,33	1,04	100,00	4,13	
Min.	33,26	0,37	0,33	0,36	43,77	0,43	

Fonte: Autoria própria (2019).

O RMF é constituído principalmente pelos elementos silício (18,08 a 82,82%p) e ferro (1,33 a 76,74%p) (Tabela 7), principais componentes presentes na barragem.

Os altos teores de carbono (de 28,85 a 37,97%p) podem ser explicados pela própria matéria orgânica carregada pelo lodo em seu trajeto após o rompimento da barragem de Fundão.

Figura 11 - Imagem do resíduo de minério de ferro (RMF), obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS.



Fonte: Autoria própria (2019).

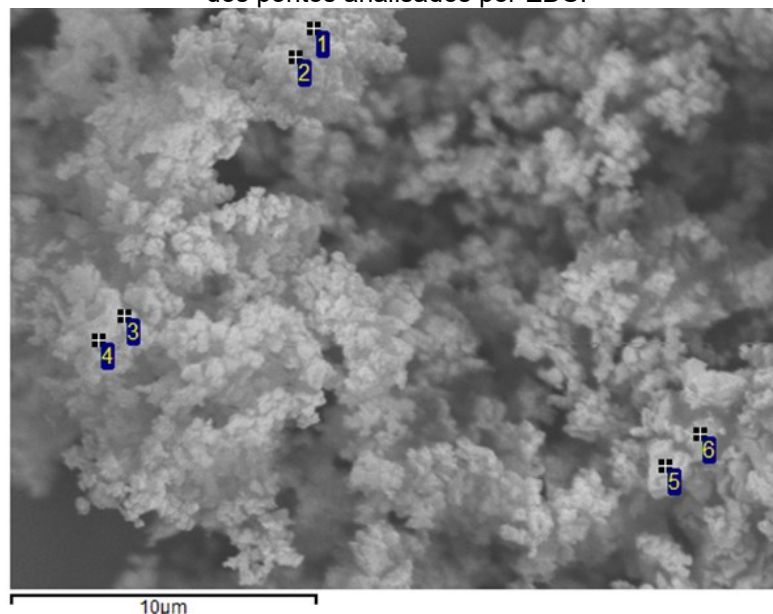
Tabela 7 - Composição química do resíduo de minério de ferro (RMF) em cada ponto assinalado na Figura 11, obtida através de EDS, em %peso.

Ponto	C	Al	Si	K	Fe	Total
1	28,85	3,52	18,08	-	49,55	100,00
2	-	4,19	19,07	-	76,74	100,00
3	35,83	-	62,74	-	1,43	100,00
4	35,75	-	62,91	-	1,33	100,00
5	36,81	1,29	53,58	-	8,32	100,00
6	37,97	1,61	51,78	-	8,64	100,00
7	-	4,04	81,40	1,06	13,50	100,00
8	-	3,44	82,82	1,10	12,64	100,00
Max.	37,97	4,19	82,82	1,10	76,74	
Min.	28,85	1,29	18,08	1,06	1,33	

Fonte: Autoria própria (2019).

Os principais elementos encontrados na amostra de RPC, através da análise de EDS foram cálcio (42,39 a 31,19%p), magnésio (28,33 a 15,00%p) e carbono (46,32 a 34,08%p) (Tabela 8).

Figura 12 - Imagem do resíduo de produção de cal (RPC), obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS.



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 8 - Composição química do resíduo de produção de cal (RPC) em cada ponto assinalado na Figura 12, obtida através de EDS, em %peso.

Ponto	C (%p)	Mg (%p)	Al (%p)	Si (%p)	Ca (%p)	Total
1	41,94	22,58	0,63	-	34,86	100,00
2	43,91	24,71	-	-	31,38	100,00
3	46,32	22,49	-	-	31,19	100,00
4	44,63	15,00	-	8,30	32,07	100,00
5	35,06	21,79	0,76	-	42,39	100,00
6	34,08	28,33	-	-	37,59	100,00
Max.	46,32	28,33	0,76	8,30	42,39	
Min.	34,08	15,00	0,63	8,30	31,19	

Fonte: Autoria própria (2019).

#### 4.1.3.3 Fluorescência de raio-X (FRX)

A composição química das matérias-primas, determinada por FRX, encontra-se representada na Tabela 9.

A amostra de LDP apresenta coloração levemente branca, possivelmente devido ao teor de CaO (0,4%) no material (Tabela 9). LDP constitui-se essencialmente de SiO<sub>2</sub> (95,2%), com baixo teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,3%) provavelmente de origem argilosa. A concentração de CO<sub>2</sub> de 0,8% pode ser atribuída a presença de substâncias orgânicas e carbonatos das conchas, as quais também são responsáveis pelo teor de CaO (0,4%). Os valores encontrados para MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e Cl foram considerados normais para o material uma vez que os íons Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup> são os

mais abundantes na composição química da água do mar (ALVES, 2006). Não foi determinada a perda ao fogo.

Tabela 9 - Composição química das matérias-primas, obtida através de FRX

Componente	Composição química (%p)		
	RMF	LDP	RPC
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,4	0,4	0,7
SiO <sub>2</sub>	58,6	95,2	1,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2	1,3	0,5
SO <sub>3</sub>	< 0,1	0,1	<0,1
CaO	0,1	0,4	49,8
MgO	0,1	0,2	30,6
Na <sub>2</sub> O	0,1	0,5	-
K <sub>2</sub> O	0,2	0,6	<0,1
MnO	0,1	-	<0,1
TiO <sub>2</sub>	0,1	0,1	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	-	-
Cl	-	0,4	-
CO <sub>2</sub>	-	0,8	-
P.F. (Perda ao fogo)	2,19	-	16,2

Fonte: Autoria própria (2019)

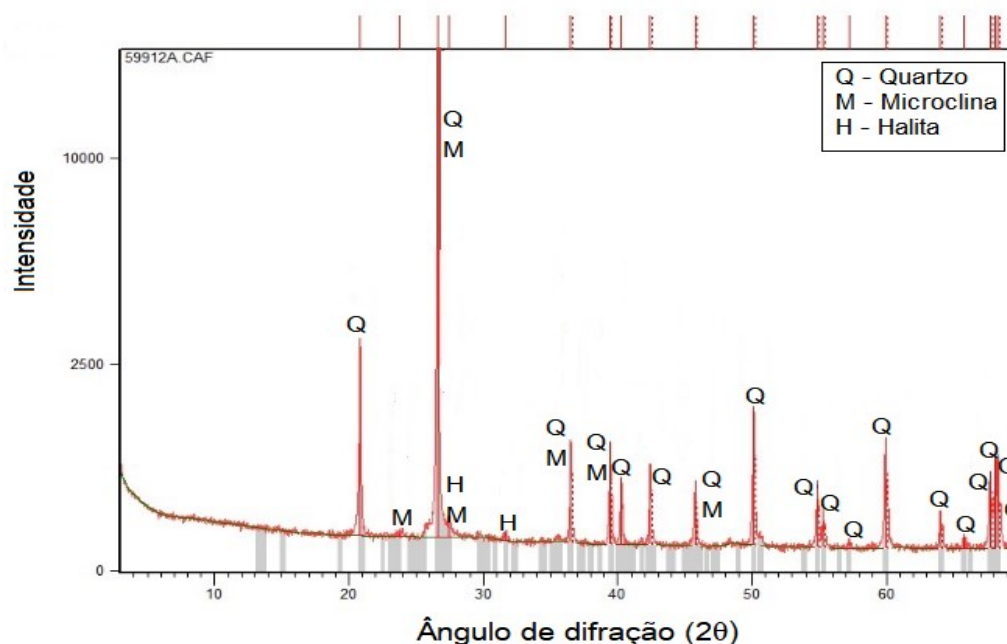
RMF é constituído por dois componentes básicos: SiO<sub>2</sub> (58,6%) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (35,4%). Apresenta também baixas concentrações de óxidos de metais alcalinos (Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O), metais alcalino-terrosos (CaO e MgO) e alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). O valor de perda ao fogo (2,19%) pode ser devido a matéria orgânica misturada ao material após o rompimento da barragem.

RPC constitui-se principalmente por CaO (49,8%) e MgO (30,6%). Conforme a NBR 6453/2003 (ABNT, 2003), óxidos totais na base não volátil (CaO total +MgO total) devem ser iguais ou superiores a 90,0% para a cal virgem especial e iguais ou superiores a 88,0% para a cal virgem comum, portanto o produto usado nesta pesquisa é classificado como resíduo de produção de cal. A presença de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e outras impurezas podem ser explicadas pelo processo de acúmulo dos sedimentos calcários devido ao processo metamórfico de formação das rochas calcárias. A perda ao fogo tão elevada é explicada pela perda de água para o ambiente.

#### 4.1.4 Composição mineralógica

A análise da composição mineralógica do LDP, realizada por DRX (Figura 13), mostrou a presença dos cristais de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), microclina ( $\text{K(AlSi}_3\text{O}_8)$ ) e halita ( $\text{NaCl}$ ).

Figura 13 – Composição mineral do Lodo de Dragagem de Porto (LDP), obtida por DRX.

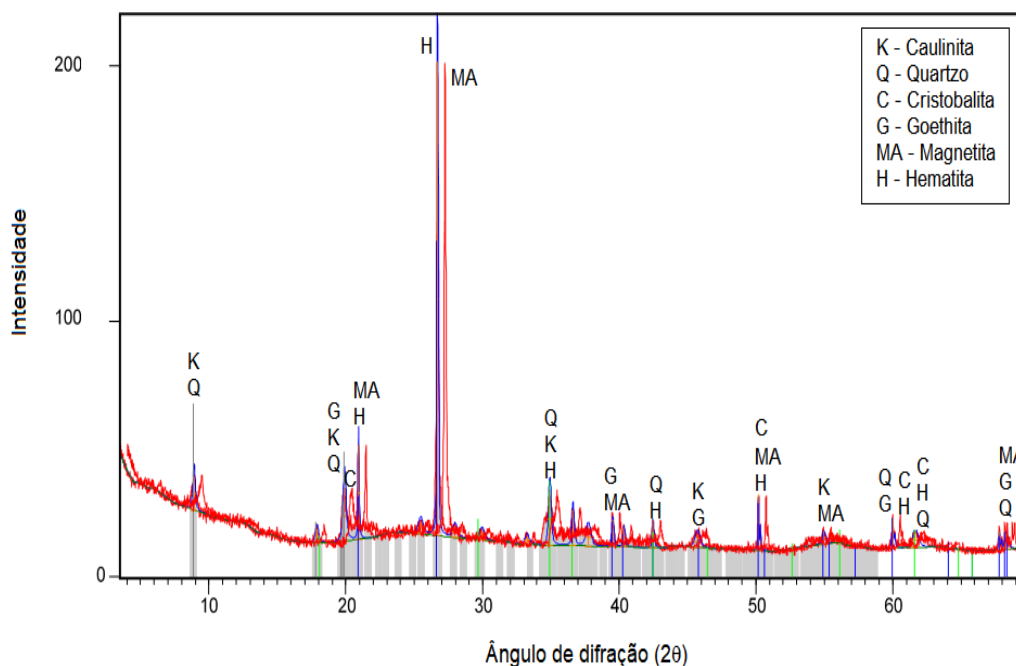


Fonte: Autoria própria (2019).

A maioria dos picos são de cristais de quartzo, sendo o maior deles coincidente com o pico do cristal de microclina em  $2\theta = 26,7^\circ$ . Também foi detectada a presença de pequena quantidade de halita, com pequenos picos, quase imperceptíveis em  $2\theta = 28^\circ$  e  $2\theta = 31,5^\circ$ . Os achados de DRX confirmam os resultados da análise de FRX (Tabela 9).

O Resíduo de minério de ferro é basicamente composto por quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), goethita ( $\text{FeO(OH)}$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) (Figura 14), característico de resíduos de beneficiamento do ferro segundo Galvão *et al.* (2018); Li *et al.* (2010) e Shettima *et al.* (2016). Os picos dos minerais são de baixa intensidade, o maior deles, correspondente ao pico do cristal hematita ( $2\theta = 26,5^\circ$ ) é um pouco superior a 200 cps, indicando predominância de partículas de tamanhos menores (MORAIS, 2015). Além disso, a presença desses minerais também é confirmada pelo FRX.

Figura 14 - Composição mineral do Resíduo de Minério de Ferro (RMF), obtida por DRX.

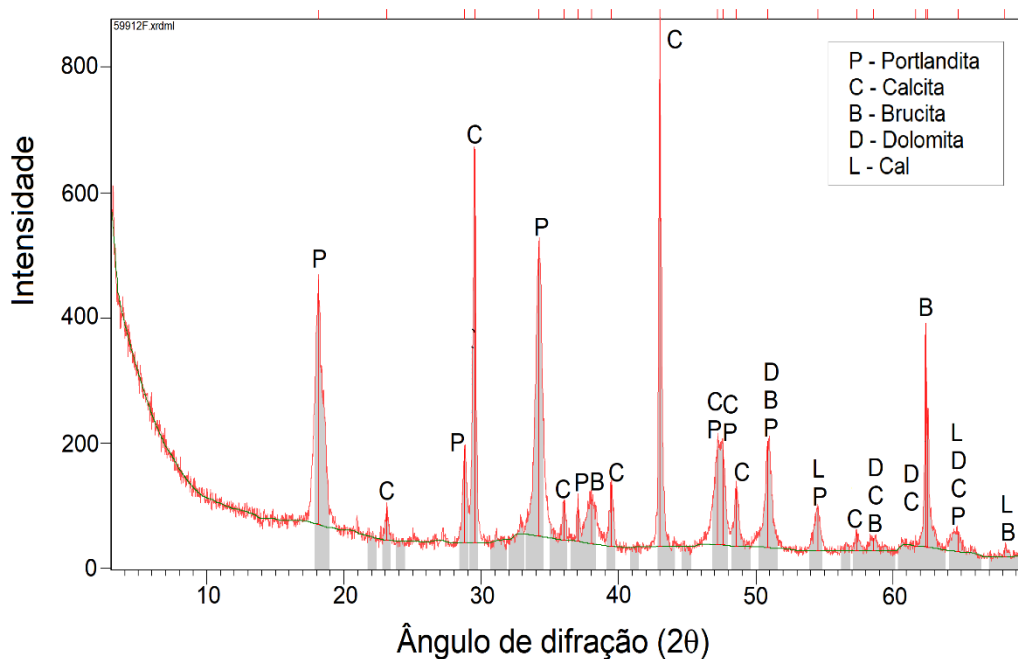


Fonte: Autoria própria (2019).

Os resultados da análise de DRX do RPC mostraram picos dos minerais portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e cal ( $\text{CaO}$ ) (Figura 15). Analisando a composição mineralógica do RPC, observa-se que os picos de maior intensidade pertencem aos minerais calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) (em  $2\theta = 29^\circ$  e  $44^\circ$ ) e portlandita (em  $2\theta = 18^\circ$  e  $34^\circ$ ), sem justaposição com picos de outros minerais.

Não são observados picos livres de cal, apenas coincidindo com picos de outros minerais. Esse fato é verificado geralmente quando há um baixo teor de cal na amostra, devido a queima incompleta da rocha calcária, seja pela temperatura ou tempo de combustão insuficientes ou devido a condições inadequadas de armazenamento do material que, em contato com a umidade do ar, reage dando origem à portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) que, por sua vez, ao absorverem o  $\text{CO}_2$  presente no ar, se transformam em calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Portanto, essa ocorrência comprova que o material utilizado se trata mesmo de um resíduo.

Figura 15 - Composição mineral do Resíduo de Produção de Cal (RPC), obtida por DRX



Fonte: Autoria própria (2019).

## 4.2 Caracterização dos compósitos desenvolvidos

Neste item são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de caracterização dos novos materiais desenvolvidos.

### 4.2.1 Caracterização das propriedades mecânicas e físicas dos materiais desenvolvidos

#### 4.2.1.1 Resistência à compressão axial

A resistência é uma das principais características do concreto, pois afeta diretamente a integridade de uma estrutura. Os ensaios para efeitos de resistência do concreto apresentam dados que certificam a qualidade da estrutura por meio de informações como capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade da estrutura para resistir às influências previstas durante o processo executivo e uso da edificação (NETO E COELHO, 2017).

Os compósitos 3, 4 e 8 foram os que obtiveram os melhores valores de resistência axial até o período de cura de 1 ano (Tabela 10 e Gráfico 4). Percebe-se queda na resistência dos compósitos 4 e 8 aos 2 anos de cura. Esse fato

provavelmente se deve a erros experimentais. De forma geral, percebe-se tendência de aumento de resistência com o tempo de cura dos materiais desenvolvidos.

Tabela 10 – Resistência à compressão axial dos compósitos desenvolvidos, em diferentes idades de cura.

Compósito	Composição, %m			Resistência Axial (MPa)								
				Dias de Cura								
N°	RMF	LDP	RPC	3	7	14	28	60	90	180	365	730
1	10	75	15	0,18	0,49	0,84	1,03	2,10	5,81	3,66	4,94	11,03
2	10	70	20	0,29	0,59	0,96	1,59	1,94	5,64	5,35	9,44	16,29
3	10	65	25	0,70	1,76	2,54	2,54	4,05	6,37	12,42	16,47	18,06
4	10	60	30	1,61	3,33	3,55	4,45	7,24	8,54	14,83	22,66	16,67
5	15	70	15	0,36	1,02	1,17	1,51	2,91	3,65	3,28	4,58	5,92
6	15	65	20	0,26	0,84	1,50	2,35	3,17	2,94	9,28	8,44	11,63
7	15	60	25	1,27	1,46	2,36	2,58	4,99	5,62	10,08	12,08	13,49
8	15	55	30	1,79	3,11	3,84	4,11	5,55	10,68	16,23	16,35	14,89
9	20	65	15	0,43	0,88	1,62	1,72	2,70	3,72	3,24	4,77	4,55
10	20	60	20	0,69	1,30	1,47	2,50	3,22	4,99	5,21	4,64	5,64
11	20	55	25	1,05	2,13	2,14	3,39	6,37	5,39	5,92	7,67	8,82
12	20	50	30	1,00	1,87	3,08	4,39	5,57	5,99	7,93	10,43	12,94
13	25	60	15	0,307	0,59	1,69	1,58	2,31	3,67	2,83	2,76	3,72
14	25	55	20	0,50	0,86	1,47	2,15	4,90	3,90	3,94	4,62	5,92
15	25	50	25	0,77	1,18	1,49	3,30	4,42	2,99	5,54	8,44	9,29
16	25	45	30	1,14	2,20	2,93	3,30	5,87	4,85	7,41	12,60	12,93
17	30	55	15	0,56	0,94	0,57	0,97	2,18	2,78	2,73	2,33	3,64
18	30	50	20	0,49	1,61	1,46	2,82	3,28	2,57	5,17	5,65	6,38
19	30	45	25	0,96	1,40	1,80	1,92	2,62	2,68	6,81	10,70	11,53
20	30	40	30	1,17	2,16	2,12	2,46	2,86	3,33	8,59	10,63	13,72

Fonte: Autoria própria (2021).

Nota: RMF – Resíduo de Minério de Ferro.

LDP - Lodo de Dragagem de Paranaguá.

RPC - Resíduo de Produção de Cal.

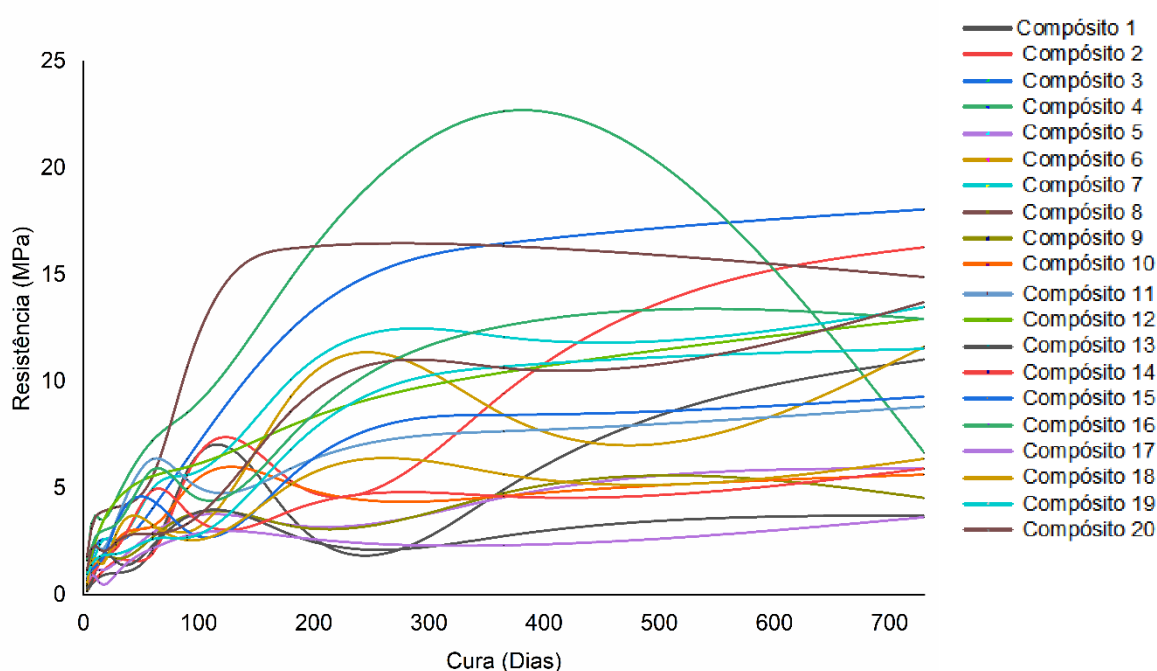
Dentre as formulações pré-estabelecidas, nos grupos de mesmo teor de RMF, os compósitos com maior concentração de RPC (30%) foram os que obtiveram os melhores valores de resistência (Tabela 10 e Gráfico 4), sendo o compósito 4 o que obteve melhores resultados (22,66 MPa aos 365 dias e 16,67 MPa aos 730 dias de cura).

Este fato pode ser explicado pela ativação alcalina das partículas de RMF e LDP pelo RPC com sua interação química e síntese de novas formações. Essas novas formações, com o tempo de cura, preencheram os poros entre as partículas,



aumentando a densidade e resistência dos corpos de prova (CPs). Esta hipótese também explica a tendência de aumento de resistência axial com o tempo de cura. Ocorrência semelhante foi observada por Mymrin et al. (2015) usando RPC como aglutinante em mistura de três tipos de resíduos de produção de porcelana e lodo de estação de tratamento de efluentes para produção de materiais de construção sem cimento.

Gráfico 4 - Resistência à compressão axial dos compósitos desenvolvidos em diferentes idades de cura.



Fonte: Autoria própria (2022).

Observa-se que a elevação da concentração de RMF é favorável até 15%, melhorando a resistência à compressão dos corpos de prova (CPs). A partir dessa concentração (15%), a adição de RMF não produz o mesmo efeito.

A redução da concentração de LDP nos compósitos levou ao aumento de resistência, provavelmente devido à redução da quantidade de partículas finas nas misturas, presentes na composição do LDP.

Segundo a NBR 15270-1 (ABNT, 2017), blocos e tijolos para alvenaria são classificados conforme sua aplicação em VED (uso exclusivo para vedação) e EST (uso estrutural e para vedação racionalizada) seguido da indicação da resistência mínima em quilograma-força por centímetro quadrado ( $\text{kgf/cm}^2$ ), podendo ser VED15, VED30 ou VED40 e EST40, EST60, EST80 e outros. Aproximando,  $1 \text{ kgf/cm}^2$  igual a

0,1 MPa, VED15 deve possuir resistência axial mínima de 1,5 MPa e assim sucessivamente para as demais classes (NBR 15270-1 - ABNT, 2017).

Observa-se que os compósitos 4 e 8 obtiveram resistência para a Classe VED15 (1,61 e 1,79 MPa) com apenas 3 dias de cura e que, a partir de 60 dias de cura, todos os compósitos possuíam resistências superiores a essa classe, sendo que a maioria cumpria os requisitos para classe VED40 (compósitos 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15 e 16), tendo o compósito 4 atingido, inclusive, resistência para classe EST60.

Aos 28 dias de cura, três compósitos atingiram valores superiores aos requisitos para classe VED40 (compósitos 4, 8 e 12 – 30%RPC).

Aos 90 dias de cura, três compósitos apresentaram requisitos superiores aos da classe EST60 (compósitos 3, 4 e 8, com menores teores de RMF – 10 e 15% – e maiores concentrações de RPC – 25 e 30%).

Aos 365 dias de cura, todos os compósitos desenvolvidos, excetuando-se compósitos 13 e 17, excederam em muito os requisitos para as classes VED40 e EST40 da referida norma, com o compósito 4 (10%RMF, 60%LDP e 30%RPC) atingindo valor de resistência para classe EST200. Os compósitos 13 e 17, que tiveram valores de resistência em conformidade com a classe VED15, possuíam teor mínimo de RPC em suas composições (15%).

A NBR 6136:2016 (ABNT, 2016), que regulamenta os critérios para blocos vazados de concreto simples para alvenaria, determina os valores de resistência mínimos aos 28 dias: com função estrutural - Classe A  $\geq 8,0$  MPa, Classe B entre 4,0 Mpa e 8,0 MPa, e com ou sem função estrutural - Classe C  $\geq 3,0$  MPa. De acordo com essa norma, três composições atendem aos requisitos da classe B (compósitos 4, 8 e 12, com valores máximos de RPC – 30%).

#### 4.2.1.2 Absorção de água

De acordo com a NBR 6136:2016 (ABNT, 2016), os valores de absorção de água para blocos vazados de concreto simples para alvenaria com função estrutural devem ser inferiores ou iguais a 9,0% para Classe A e inferiores ou iguais a 10,0% para Classe B. Já para blocos vazados com ou sem função estrutural, os valores para a Classe C devem ser iguais ou inferiores a 11,0%.

Segundo a referida norma, duas composições atendem aos requisitos da classe C aos 28 dias (Tabela 11) (compósitos 6 e 7, com teores de RMF de 15%, LDP

de 65 e 60%, e RPC de 20 e 25%, respectivamente). Observa-se uma gradual redução na absorção de água com o aumento da idade de cura, provavelmente devido a formação de novas estruturas com conseqüente redução de poros no material, diminuindo a permeabilidade da água nos mesmos.

Tabela 11 – Absorção de água dos compósitos desenvolvidos, em diferentes idades de cura.

Compósito	Absorção de água (%)			
	Dias de cura			
	28	90	365	730
1	16,49	11,19	11,32	8,07
2	15,69	9,86	9,44	6,89
3	14,30	9,34	8,30	7,33
4	13,94	9,25	7,80	6,83
5	17,54	12,93	11,83	10,45
6	10,91	10,20	9,62	8,55
7	10,89	9,98	9,60	8,48
8	11,45	10,02	9,36	8,33
9	13,63	13,03	13,08	11,45
10	14,76	14,37	13,15	11,19
11	13,14	12,25	11,44	10,44
12	12,46	11,32	10,34	9,16
13	13,96	13,52	12,51	10,98
14	13,69	13,27	11,98	10,35
15	12,58	12,50	10,95	10,13
16	12,24	10,42	10,15	9,56
17	14,64	13,10	12,73	11,62
18	13,03	12,58	11,50	11,10
19	12,67	13,47	10,69	9,80
20	13,83	12,11	11,55	10,32

Fonte: Autoria própria (2021).

À idade de 90 dias, quatro composições atenderam aos requisitos da classe B (compósitos 2, 3, 4 e 7), todas estas possuíam a mínima concentração de RMF estudada (10%).

Aos 365 dias, quase todas as composições satisfaziam os parâmetros da norma para alguma das classes, excetuando-se as composições 9,10,13 e 17, sendo que as composições 3 e 4 apresentaram valores dentro dos parâmetros para materiais da classe A. Observa-se que os compósitos com menores teores de RMF apresentaram melhores resultados, satisfazendo as exigências da norma para classes A e B aos 365 e 730 dias de cura.

Na NBR 15270-1 (ABNT, 2017) é definido que o índice de absorção de água para blocos cerâmicos para alvenaria de vedação não deve ser inferior a 8% nem superior a 21%. Nota-se na Tabela 11 que nenhuma das composições excedeu os

requisitos mínimos e máximos exigidos pela norma nas idades, onde houve maior absorção de água (28 e 90 dias de cura).

#### 4.2.1.3 Coeficiente de resistência à água

A norma russa GOST 9479-84 (GOST 9479-84, 2011) determina uma tolerância de até 35% de perda da resistência dos corpos de prova saturados em relação aos secos, i.e., para estar em conformidade com o padrão, o valor da resistência uniaxial após imersão em água pode ser até 65% inferior ao obtido para o material seco.

De acordo com a norma supracitada, apenas os compósitos 9, 17, 19 e 20 (o primeiro com 20% RMF, e os demais com 30%) satisfazem essa exigência aos 28 dias de cura, com uma redução na resistência após saturação em água de 11% (Tabela 12). Aos 90 dias de cura, os compósitos 3, 6, 7, 16, 19 e 20 foram os únicos que não excederam o limite de 35% de queda na resistência. Com idades de 365 e 730 dias, todos os materiais desenvolvidos atenderam as exigências da norma russa.

Tabela 12 – Coeficiente de resistência à água dos compósitos desenvolvidos, em diferentes idades de cura.

Compósito	Composição			Coeficiente de Resistência à Água ( $C_{ra}$ )			
	RMF	LDP	RPC	Cura (dias)			
				28	90	365	730
<b>1</b>	10	75	15	0,54	0,37	0,84	0,84
<b>2</b>	10	70	20	0,51	0,64	0,70	1,29
<b>3</b>	10	65	25	0,49	0,71	0,82	0,90
<b>4</b>	10	60	30	0,39	0,57	0,80	0,71
<b>5</b>	15	70	15	0,38	0,56	1,00	0,85
<b>6</b>	15	65	20	0,41	0,96	0,85	0,73
<b>7</b>	15	60	25	0,63	0,69	0,88	0,74
<b>8</b>	15	55	30	0,56	0,45	0,78	0,76
<b>9</b>	20	65	15	0,89	0,62	0,65	0,75
<b>10</b>	20	60	20	0,44	0,36	0,98	0,67
<b>11</b>	20	55	25	0,61	0,36	0,94	0,73
<b>12</b>	20	50	30	0,51	0,45	0,88	0,69
<b>13</b>	25	60	15	0,29	0,12	0,85	0,69
<b>14</b>	25	55	20	0,48	0,36	0,99	0,78
<b>15</b>	25	50	25	0,56	0,58	0,73	0,74
<b>16</b>	25	45	30	0,60	0,69	0,83	0,75
<b>17</b>	30	55	15	0,69	0,27	0,97	0,72
<b>18</b>	30	50	20	0,28	0,47	0,75	0,67
<b>19</b>	30	45	25	0,67	0,83	0,66	0,81
<b>20</b>	30	40	30	0,73	0,80	0,66	0,72

Fonte: Autoria própria (2021).

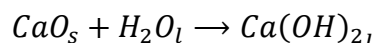
#### 4.2.1.4 Retração linear

A secagem do concreto é sempre acompanhada por uma retração significativa, pois o concreto tende a perder água para o ambiente (ANAPRE, 2009). Retração ou expansão consiste na redução ou aumento das dimensões do compósito seja no estado fresco seja no estado endurecido, mesmo na ausência de tensões mecânicas e de variação de temperatura. Esta perda de umidade ou evaporação faz com que o concreto se enfraqueça, levando a fissuras, deformações internas e externas de flexão. Desta forma, a análise dessa propriedade é importante para reduzir a probabilidade de surgimento de patologias ocasionadas pela retração do material (MILAGRES, 2019).

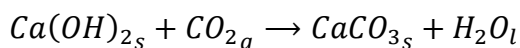
Observa-se que os compósitos com menores teores de RMF (10 e 15%) apresentaram expansão aos 3 dias de cura, enquanto os com maiores concentrações deste material sofreram retração no mesmo período (Tabela 13). A partir da idade de 7 dias todos os compósitos desenvolvidos sofreram retração, provavelmente decorrente da evaporação parcial da água.

A expansão e retração das amostras no processo de hidratação foi, evidentemente, resultado da entrada de água nos poros do material no início do processo, da formação de uma solução altamente alcalina devido à hidratação do RPC, e da corrosão química da superfície das partículas sólidas do material por esta solução (MYMRIN et al., 2019c).

A dilatação inicial foi provocada pela água contida no interior da mistura, durante reação interna dos materiais constituintes nas primeiras idades. Ao se adicionar água à mistura tem-se uma reação de hidratação formando a cal hidratada, a seguir:



Após este período, a água que não foi consumida na hidratação dos resíduos é liberada para o ambiente externo, ocorrendo a diminuição do diâmetro dos CPs. Há nessa fase a absorção do gás carbônico do ar, transformando a cal hidratada em carbonato de cálcio, acarretando o endurecimento do material.



Essa alteração de expansão para retração também pode ser explicada pelo bloqueio preferencial dos poros previamente abertos das amostras e pelo início do processo de sinérese das novas formações de sol-gel (MYMRIN et al., 2019c).

Tabela 13 - Coeficiente de retração linear dos compósitos desenvolvidos, em diferentes idades de cura.

Compósito	Coeficiente de retração linear (a), em %								
	Cura (dias)								
	3	7	14	28	60	90	180	365	730
<b>1</b>	101,09	98,91	98,36	98,91	98,91	98,36	98,36	98,36	98,36
<b>2</b>	101,17	98,36	98,91	98,36	98,36	97,27	98,36	98,36	98,36
<b>3</b>	100,45	98,91	98,91	98,36	98,36	98,36	98,91	98,91	98,91
<b>4</b>	100,36	98,91	98,36	98,36	98,36	98,36	98,91	98,91	98,91
<b>5</b>	102,17	97,63	96,72	96,72	96,72	96,17	96,17	96,17	96,17
<b>6</b>	102,73	98,36	98,36	97,27	97,27	97,27	97,27	98,36	98,36
<b>7</b>	102,73	98,36	98,36	97,27	97,27	97,27	101,09	98,36	98,36
<b>8</b>	101,64	101,55	101,55	101,55	101,55	101,55	101,09	100,55	98,36
<b>9</b>	97,27	98,36	97,81	96,72	96,72	98,36	96,17	101,64	98,36
<b>10</b>	98,91	98,91	98,91	98,36	98,36	98,36	98,36	101,64	98,36
<b>11</b>	98,36	96,72	96,72	96,72	96,72	98,36	98,36	98,36	98,36
<b>12</b>	100,00	98,91	98,36	98,36	98,36	98,91	99,45	98,91	98,91
<b>13</b>	98,91	98,36	98,36	98,36	98,36	98,36	98,36	103,28	100,55
<b>14</b>	100,28	100,55	98,36	98,36	98,36	98,36	97,27	103,28	98,36
<b>15</b>	98,91	100,00	98,36	98,36	98,36	98,36	98,36	98,91	98,91
<b>16</b>	98,91	98,36	98,36	98,36	98,36	98,36	98,36	98,36	98,36
<b>17</b>	98,72	96,72	96,17	96,17	96,17	96,72	96,17	98,36	96,17
<b>18</b>	98,36	98,91	98,36	97,81	97,81	97,27	99,45	97,27	96,17
<b>19</b>	98,91	98,91	98,36	98,36	98,36	98,36	98,36	98,91	98,91
<b>20</b>	98,91	98,36	98,36	98,36	98,36	98,27	97,91	97,91	97,36

Fonte: Autoria própria (2021).

#### 4.2.1.5 Massa específica

Pode-se observar na Tabela 14 que não há uma constância no crescimento da massa específica aparente nas primeiras idades, isso se dá pela água de amassamento presente nos poros. Todavia, a partir dos 60 dias de cura, essa variação não é mais percebida, mas sim o aumento da massa específica aparente, o que pode ser justificado pelo preenchimento de vazios devido a novas formações entre os elementos. Além disso, pode-se constatar que as composições que obtiveram maiores resistências, são as de maior massa específica aparente, sendo consequência direta do preenchimento de vazios por novas formações.

Tabela 14 - Massa específica dos novos compósitos, em diferentes idades de cura.

Compósito	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )								
	Idade de cura (dias)								
	3	7	14	28	60	90	180	365	730
<b>1</b>	2,25	2,46	2,50	2,50	2,53	2,51	2,53	2,86	2,62
<b>2</b>	2,57	2,48	2,49	2,54	2,59	2,60	2,57	2,93	2,77
<b>3</b>	2,40	2,47	2,46	2,52	2,58	2,57	2,54	3,14	2,60
<b>4</b>	2,53	2,62	2,72	2,72	2,83	2,83	2,83	3,19	2,53
<b>5</b>	2,61	2,65	2,61	2,61	2,66	2,63	2,65	2,78	2,66
<b>6</b>	2,31	2,54	2,54	2,65	2,69	2,69	2,71	3,09	2,63
<b>7</b>	2,22	2,44	2,44	2,54	2,59	2,59	2,50	2,94	2,54
<b>8</b>	2,44	2,52	2,52	2,52	2,61	2,63	2,61	3,07	2,68
<b>9</b>	2,62	2,56	2,59	2,65	2,67	2,60	2,69	2,74	2,60
<b>10</b>	2,44	2,49	2,52	2,55	2,59	2,60	2,62	2,85	2,68
<b>11</b>	2,50	2,75	2,82	2,79	2,82	2,75	2,78	2,80	2,85
<b>12</b>	2,57	2,64	2,68	2,68	2,73	2,70	2,73	3,05	2,82
<b>13</b>	2,51	2,54	2,56	2,58	2,62	2,59	2,64	2,83	2,65
<b>14</b>	2,29	2,49	2,58	2,65	2,67	2,65	2,79	2,90	2,67
<b>15</b>	2,58	2,61	2,76	2,76	2,79	2,77	2,86	2,94	2,87
<b>16</b>	2,65	2,71	2,83	2,83	2,91	2,89	2,95	2,79	3,01
<b>17</b>	2,70	2,78	2,79	2,78	2,80	2,74	2,82	2,79	2,78
<b>18</b>	2,62	2,67	2,70	2,73	2,76	2,78	2,68	2,82	2,86
<b>19</b>	2,58	2,63	2,66	2,66	2,75	2,72	2,74	3,00	2,76
<b>20</b>	2,53	2,76	2,71	2,75	2,81	2,86	2,89	3,00	2,65

Fonte: Autoria própria (2021).

#### 4.2.2 Definição dos traços a serem estudados

Os compósitos 4, 8 e 20 foram selecionados para estudo dos processos físico-químicos de formação das novas estruturas dos materiais desenvolvidos. Os compósitos 4 e 20 foram escolhidos por conterem concentrações mínima e máxima de RMF em suas composições, favorecendo a comparação e a determinação da influência deste resíduo nos novos materiais. Ademais, o compósito 4 apresentou bom desempenho nas avaliações das propriedades físicas e mecânicas, atendendo aos requisitos das normas nacionais. O compósito 8 foi selecionado por ter apresentado propriedades físicas e mecânicas que melhor atendem aos requisitos das normas brasileiras, juntamente com o compósito 4.

#### 4.2.3 Processos físico-químicos de formação das estruturas dos materiais desenvolvidos

Os processos físico-químicos de formação das novas estruturas dos materiais desenvolvidos foram averiguados através da análise das alterações morfológicas e nas composições mineralógicas e microquímicas das amostras selecionadas (item 4.2.2).

##### 4.2.3.1 Alterações nas composições mineralógicas dos materiais durante hidratação e cura

A composição mineralógica das novas formações dos compósitos desenvolvidos selecionados foi estudada por difratometria de raio-X (DRX). A análise por difração de raio-X permite a identificação mineral através da caracterização de sua estrutura cristalina.

A comparação das curvas de DRX do compósito 4 antes e após 1, 2 e 3 anos do processo de hidratação da mistura seca inicial (Figura 16a, b, c e d) não mostrou alterações significativas na posição dos picos das estruturas cristalinas. A diferença mais notável foi a elevação geral na intensidade dos picos de 4.000 para cerca de 9.000 contagens por segundo e um leve aumento no fundo de raios X decorrente do envelhecimento anual das amostras.

Os minerais presentes na mistura inicial (Figura 16a) são andradita, aragonita, calcita e quartzo. Aragonita e calcita são provenientes do RPC. A aragonita é um polimorfo metaestável de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Quartzo, que é considerado o mineral mais abundante da Terra, é oriundo do LDP. Andradita ocorre associada à calcita, dolomita, magnetita e é gerada por metamorfismo sobre calcários impuros ou rochas ígneas cálcicas.

No difratograma da mistura seca inicial da composição 4, os picos com maior intensidade correspondem aos picos coincidentes dos minerais quartzo e aragonita em  $2\theta = 26,5^\circ$  e  $50^\circ$  e calcita e aragonita em  $2\theta = 29,5^\circ$ .

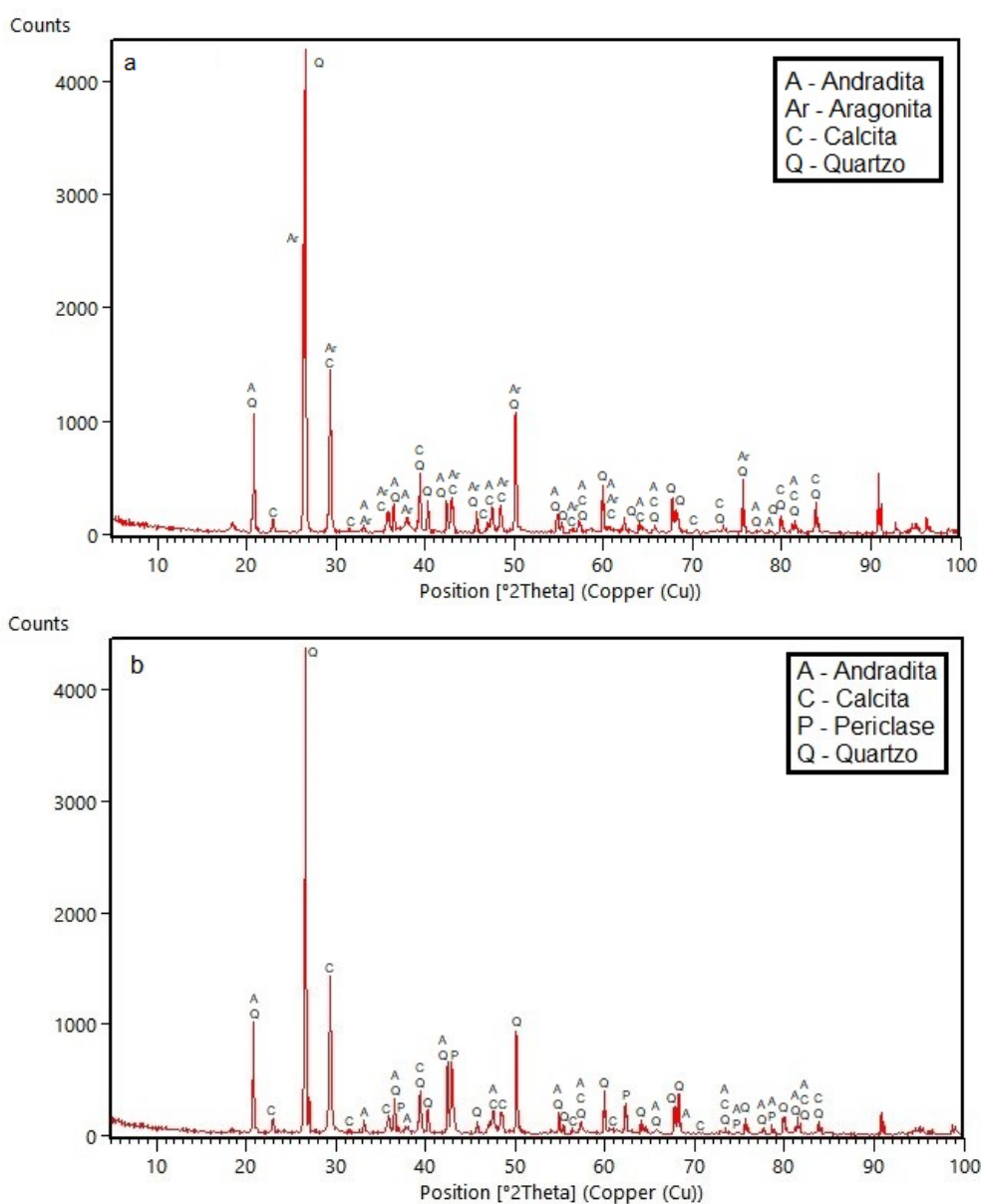
No difratograma da composição 4 aos 365 dias de cura (Figura 16b), percebe-se o surgimento de periclase ( $\text{MgO}$ ). Periclase é um mineral raro de óxido de magnésio. Geralmente, é encontrado como componente de calcários dolomíticos metamorfoseados. Pode hidratar e transformar em brucita e outros minerais de magnésio por ação da umidade em condições atmosféricas normais. Normalmente,

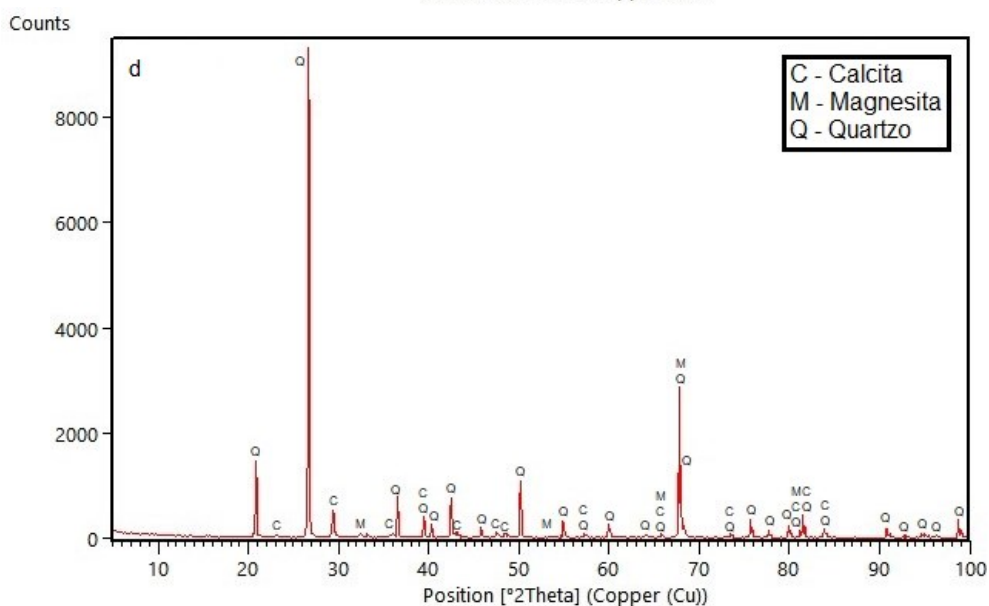
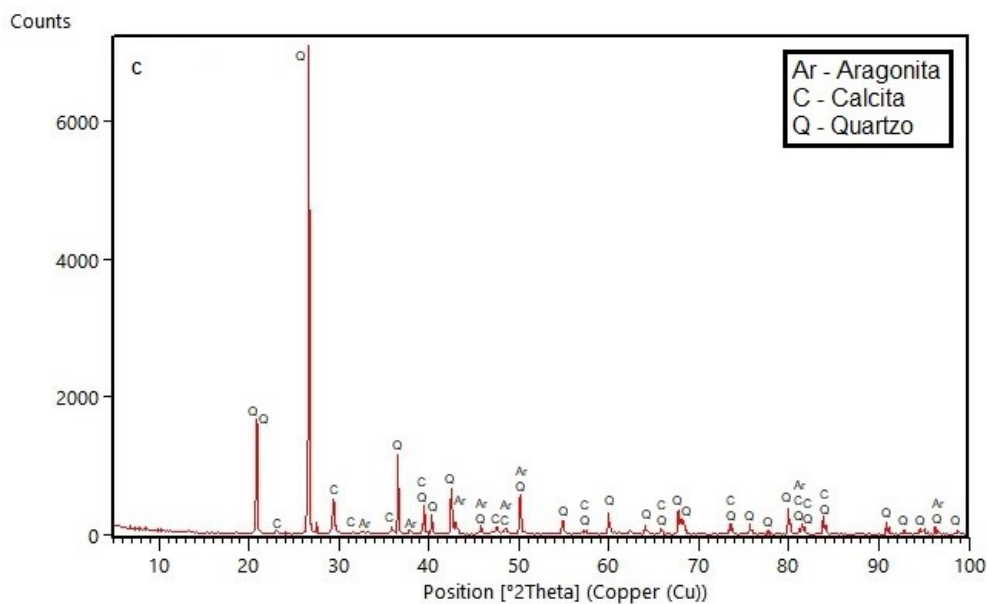


ocorre associado à hematita. Houve pouca alteração com relação aos picos apresentados e os maiores continuam sendo os de quartzo. O alto valor de intensidade do pico de quartzo, próximo de 4000 cps, comparando com picos dos demais minerais que são muito baixos, disfarça o alto teor de materiais amorfos.

No quadro 2 estão listados os minerais encontrados nos difratogramas da composição 4 com suas respectivas fórmulas químicas.

Figura 16 - Composição mineral da composição 4, obtida por DRX: a) mistura seca inicial; b) 1 ano de cura; c) 2 anos de cura; d) 3 anos de cura.





Fonte: Autoria própria (2021).

Quadro 2 - Minerais presentes no composto 4 em diferentes idades de cura.

Nome do Mineral	Fórmula Química
<b>Andradita</b>	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
<b>Aragonita</b>	$\text{CaCO}_3$
<b>Calcita</b>	$\text{CaCO}_3$
<b>Magnesita</b>	$\text{MgCO}_3$
<b>Periclase</b>	$\text{MgO}$
<b>Quartzo</b>	$\text{SiO}_2$

Fonte: Autoria própria (2022).

De modo geral, há a síntese de cristais que pode explicar o endurecimento das amostras até 4,45 MPa durante os primeiros 28 dias e até 16,67 aos 720 dias de cura. Outra explicação para o endurecimento das amostras é a mudança das

estruturas cristalinas e a síntese de novas formações amorfas de sol-gel no espaço poroso das amostras, com lenta transição do gel para o estado sólido através do processo de sinérese do gel (MYMRIN et al., 2017).

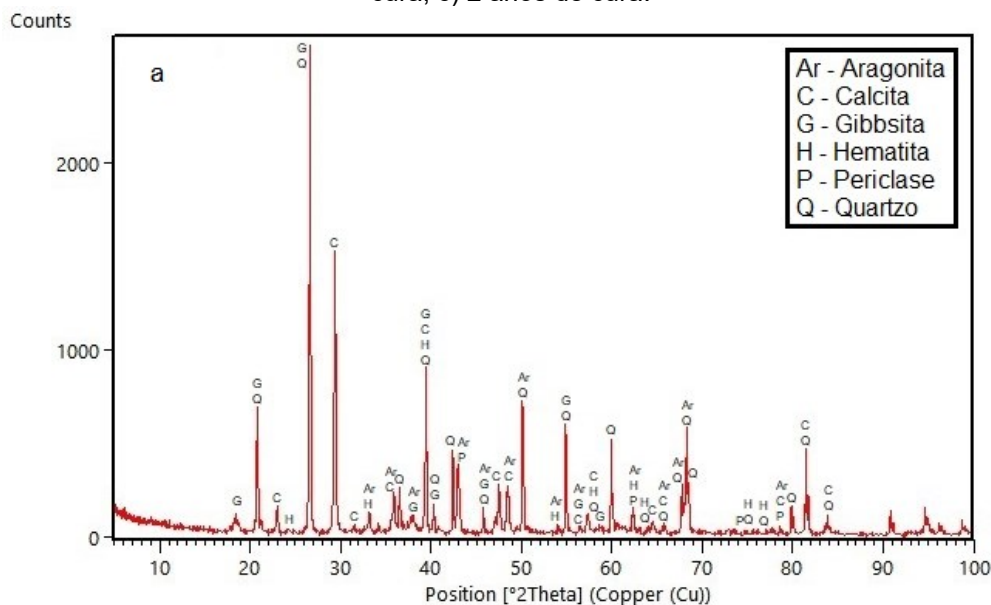
O difratograma da mistura seca inicial da composição 8 (Figura 17a) revela a presença de aragonita, calcita, gibbsita, hematita, periclase e quartzo nas amostras. A gibbsita é uma das formas minerais do hidróxido de alumínio, sendo um dos constituintes principais da bauxita. Ocorre associado a bohemita, caulinita, goethita, coríndon e outros oxi-hidróxidos de Fe e Al.

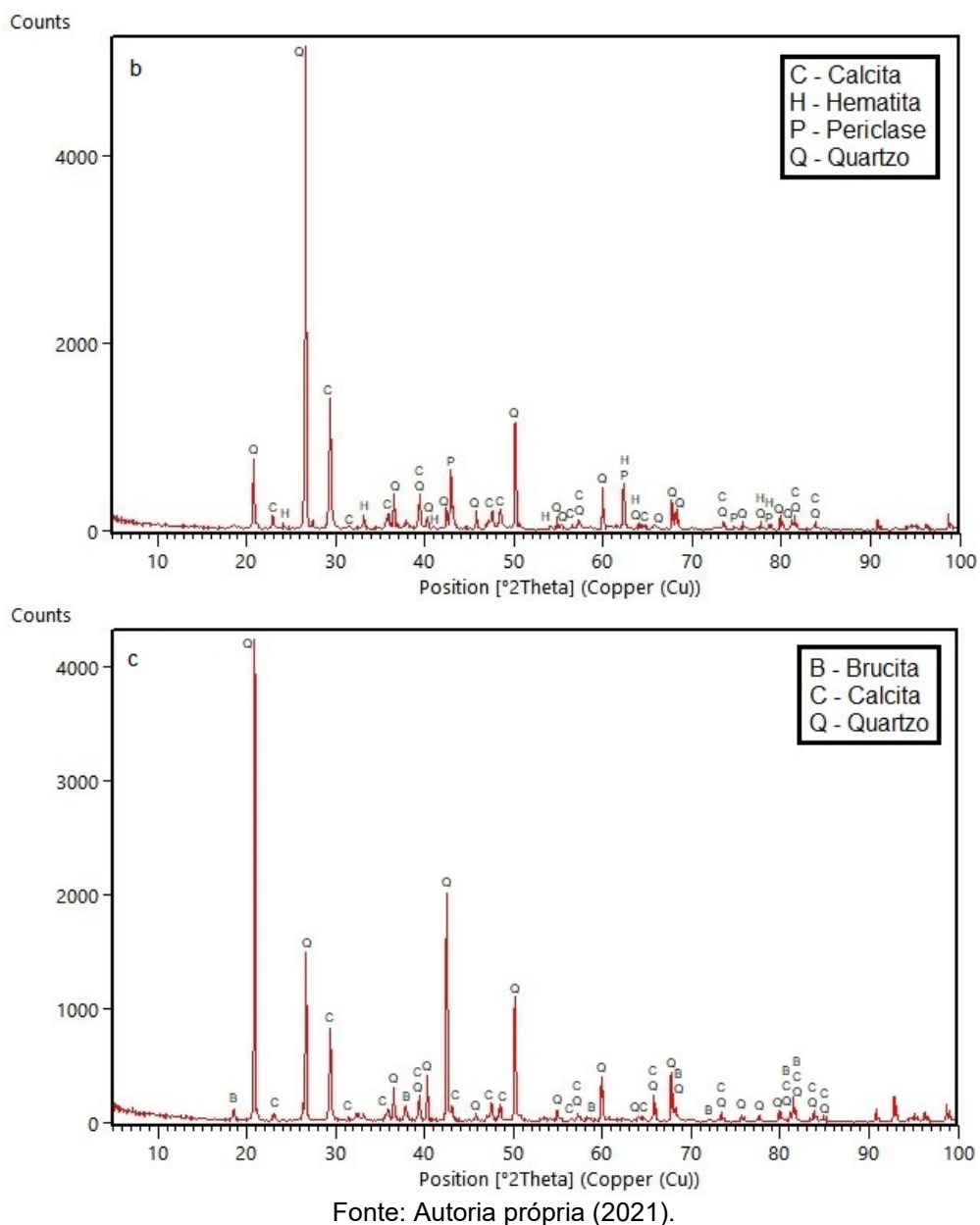
Os picos de maior intensidade na Figura 17a são os picos coincidentes de quartzo e gibbsita em  $2\theta = 26,5^\circ$  e de calcita em  $2\theta = 29,3^\circ$ .

Comparando os difratogramas da composição 8 nas idades de 1 e 2 anos de cura (Figura 17b e c), observa-se o desaparecimento dos picos de periclase com o surgimento de picos de brucita devido à hidratação e cura do material ao ar livre.

Todos os minerais encontrados nos difratogramas da composição 8 são apresentados no quadro 3 com suas respectivas fórmulas químicas.

Figura 17 - Composição mineral da composição 8, obtida por DRX: a) mistura seca inicial; b) 1 ano de cura; c) 2 anos de cura.





Quadro 3 - Minerais presentes no composto 8 em diferentes idades de cura.

Nome do Mineral	Fórmula Química
Aragonita	$\text{CaCO}_3$
Brucita	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
Calcita	$\text{CaCO}_3$
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Periclase	$\text{MgO}$
Quartzo	$\text{SiO}_2$

Fonte: Autoria própria (2021).

Há o aumento do fundo de raios X e da intensidade dos picos do mineral quartzo com o aumento do período de hidratação e cura nos ângulos  $2\theta = 21^{\circ}$ ,  $42,5^{\circ}$ ,

50° e 69° devido à dissolução no meio altamente alcalino das camadas superficiais mecanicamente destruídas dos grãos deste mineral, restando apenas estruturas de quartzo mais perfeitas com uma maior intensidade de raios X refletidos (Mymrin, 1987).

A camada dissolvida de grãos de quartzo pode participar do processo sol-gel com a síntese de novas formações amorfas, como o CSH, que apresenta um fundo de raios X bastante elevado. O CSH tem grande influência na maioria das propriedades físicas e mecânicas do concreto.

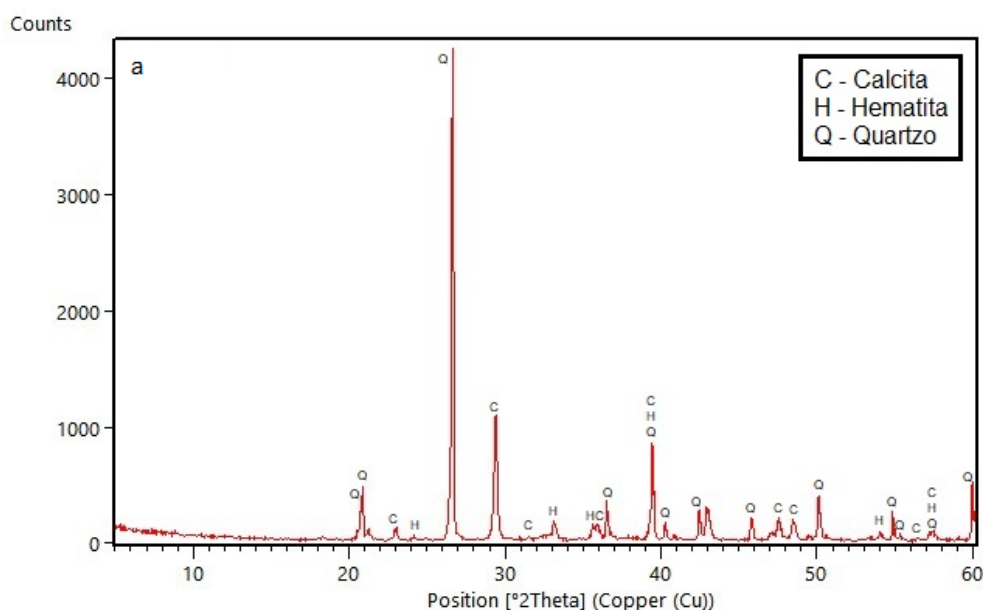
O difratograma da mistura seca inicial da composição 20 (Figura 18a) mostra a presença dos minerais calcita, hematita e quartzo nas amostras. O pico de maior intensidade é o do mineral quartzo em  $2\theta = 26,5^\circ$ .

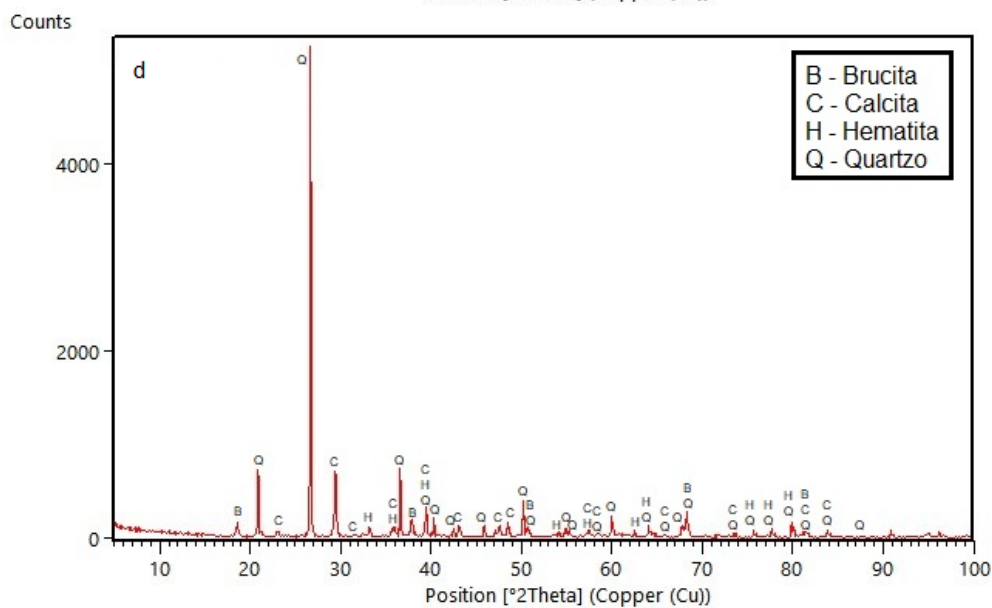
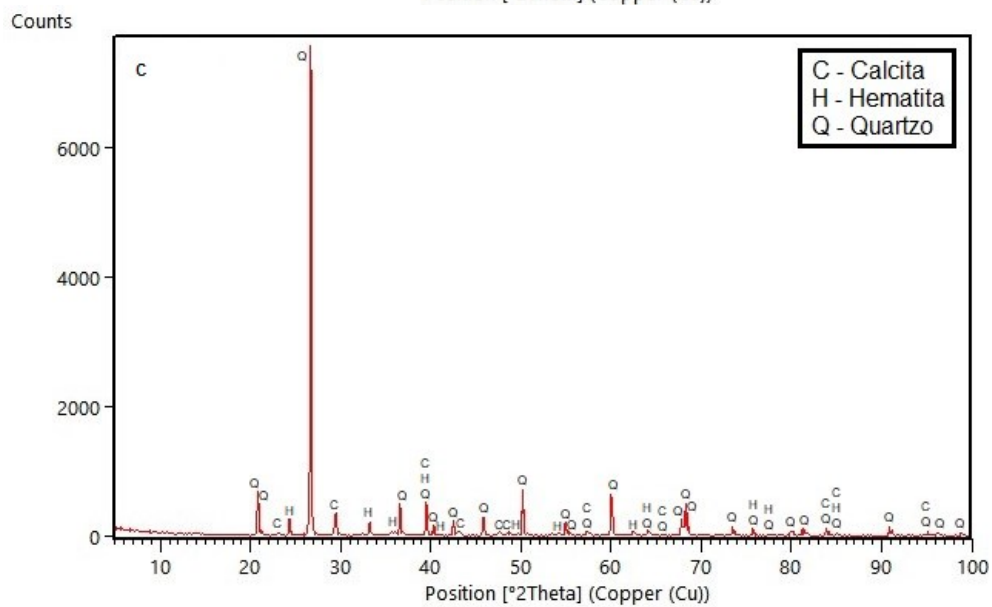
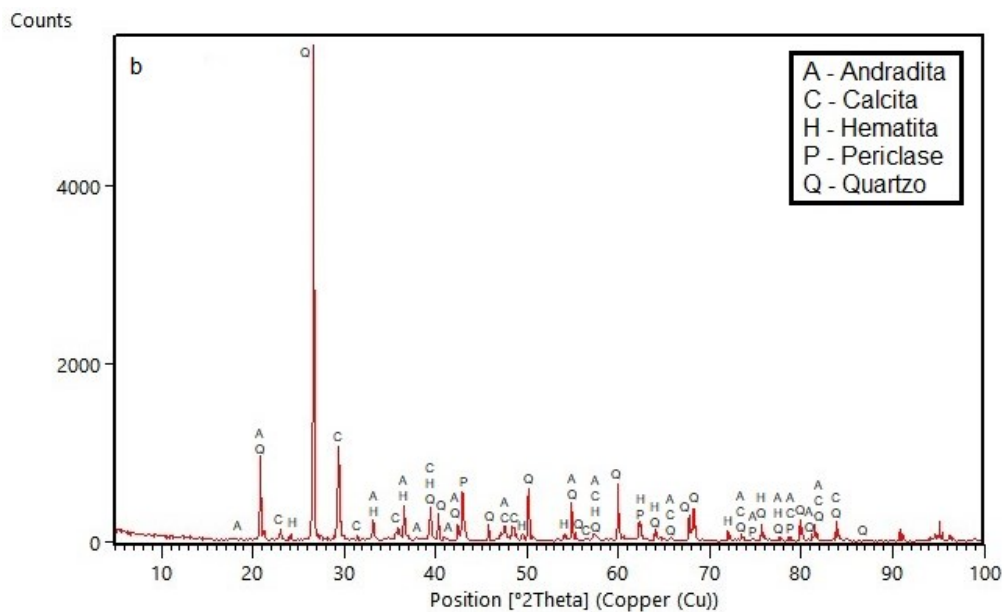
Com 1 ano de hidratação e cura (Figura 18b), ocorre aumento na intensidade dos picos de quartzo nos ângulos  $2\theta = 21^\circ$  e  $26,5^\circ$  de 4.000 para cerca de 5.000 contagens por segundo e o surgimento de picos de andradita e periclase.

Com o aumento da idade de hidratação e cura para 2 e 3 anos (Figura 18c e d), percebe-se novas elevações da intensidade do pico do mineral quartzo no ângulo  $2\theta = 26,5^\circ$  para cerca de 7.000 contagens por segundo.

No quadro 4 estão listados os minerais encontrados nos difratogramas da composição 20 com suas respectivas fórmulas químicas.

Figura 18 - Composição mineral da composição 20, obtida por DRX: a) mistura seca inicial; b) 1 ano de cura; c) 2 anos de cura; d) 3 anos de cura.





Fonte: Autoria própria (2021).

Quadro 4 - Minerais presentes no compósito 20 em diferentes idades de cura.

Nome do Mineral	Fórmula Química
Andradita	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Brucita	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
Calcita	$\text{CaCO}_3$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Periclase	$\text{MgO}$
Quartzo	$\text{SiO}_2$

Fonte: Aatoria própria (2021).

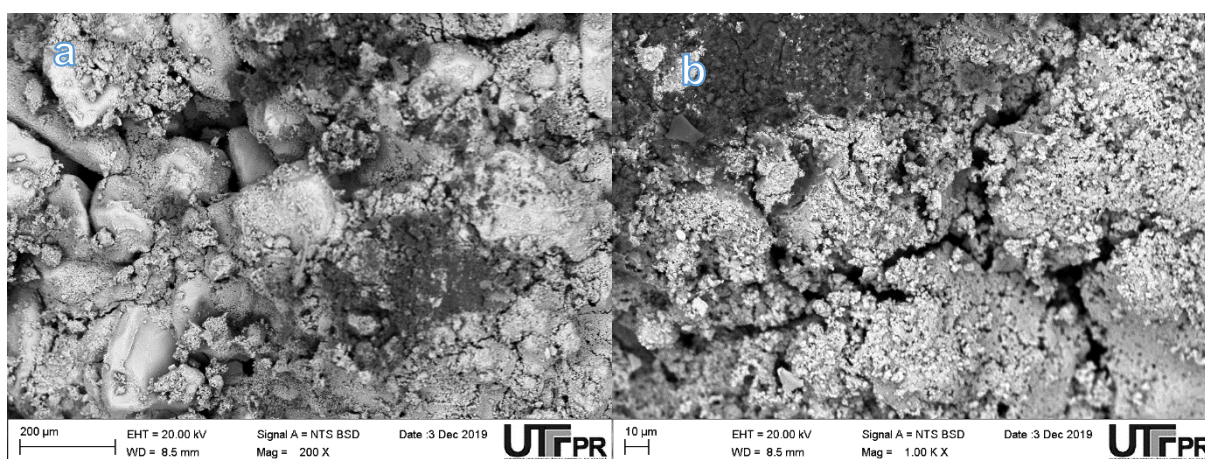
#### 4.2.3.2 Mudança das estruturas micro morfológicas durante de hidratação e cura

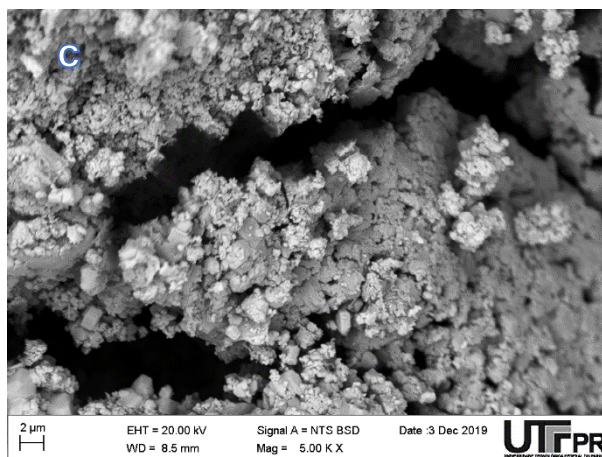
As alterações nas estruturas morfológicas durante a cura dos compósitos selecionados foram analisadas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e os resultados são apresentados a seguir.

A estrutura morfológica do compósito 4 aos 3 dias de cura, observada por MEV com ampliação de 200X (Figura 19a), apresenta partículas com grãos arredondados, sem ângulos agudos e com dimensões semelhantes entre si, recobertos por camada de material. Percebe-se, ademais, quantidade considerável de vazios e espaços sem recobrimento.

Em maiores ampliações (Figura 19b e c), é possível observar a desagregação da camada superficial dos grãos. Percebe-se que a camada que recobre as partículas tem formato semelhante a nuvens, com a existência de vazios. Não se observam formações cristalinas.

Figura 19 - Imagens de MEV da superfície do compósito 4 aos 3 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, e c) magnificação de 5,00 kX.



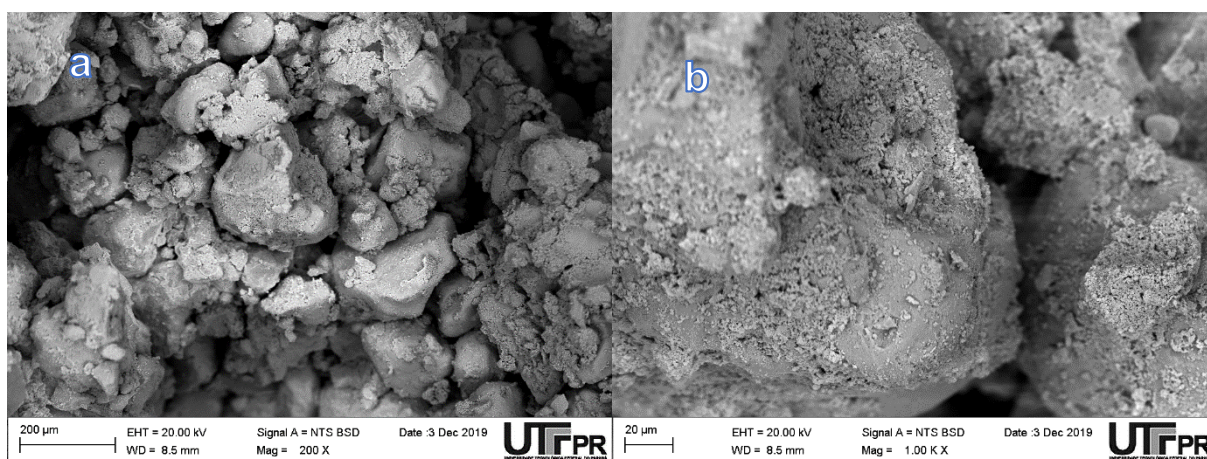


Fonte: Autoria própria (2021).

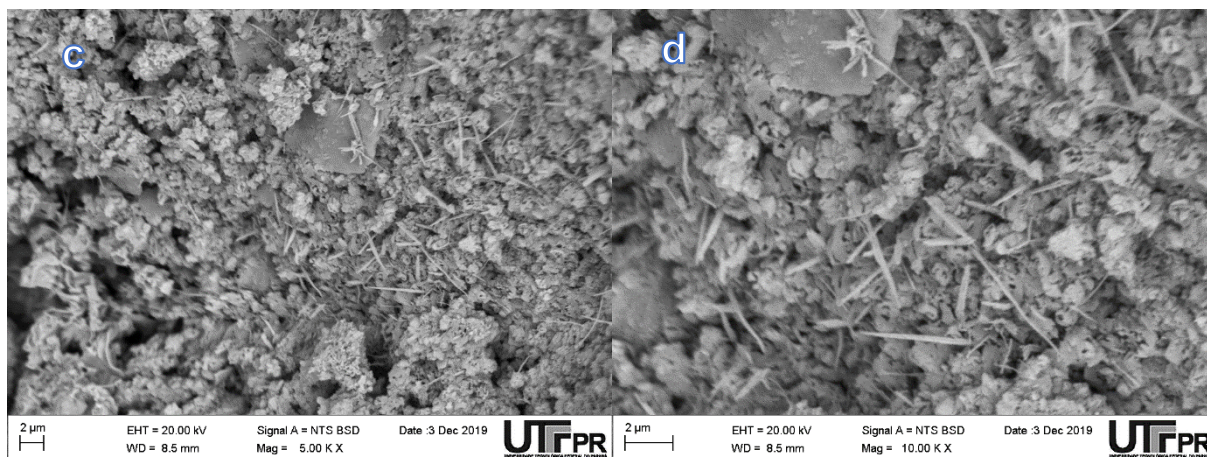
Aos 28 dias de cura, nota-se que algumas partículas do compósito 4 já se fundiram em unidades maiores com configuração um pouco semelhante, e o número de poros foi reduzido (Figura 20a).

Na magnificação de 1,00 kX (Figura 20b), observa-se a desagregação da camada superficial do grão e, em magnificações ainda maiores (Figura 20c e d), é possível visualizar cristais em forma de agulhas delgadas e longas e maciços de hidróxido de cálcio (FREITAS E ARTIGAS, 2019).

Figura 20 - Imagens de MEV da superfície do compósito 4 aos 28 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 5,00 kX, e d) magnificação de 10,00 kX.





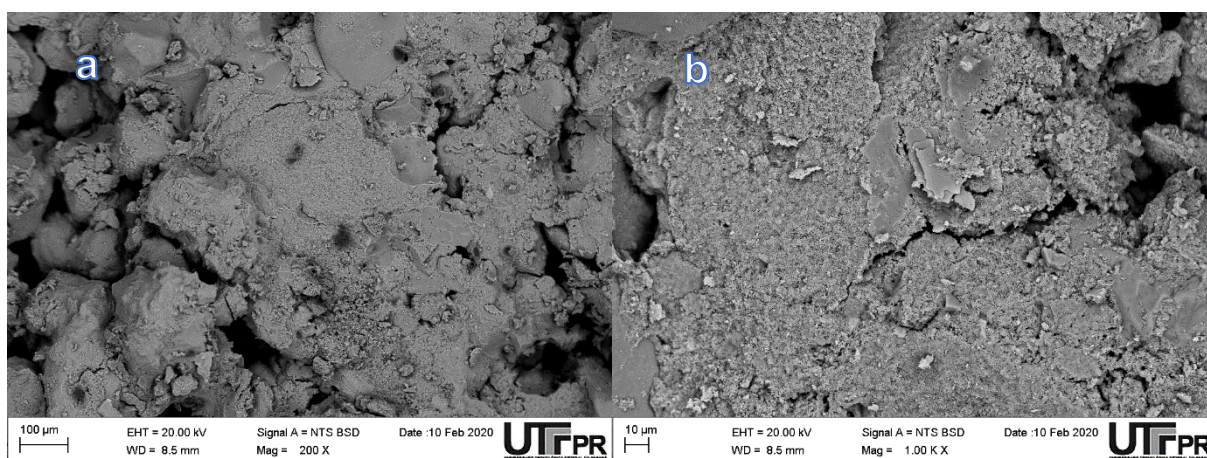


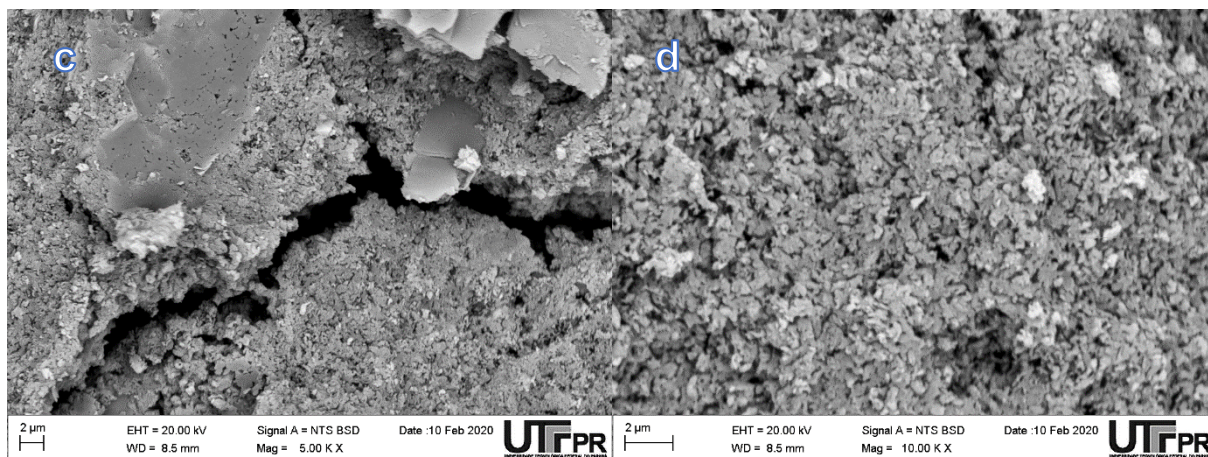
Fonte: Autoria própria (2021).

Aos 365 dias de cura, o compósito 4 apresentou densificação quase total do material (Figura 21a e b) e os poros reduziram significativamente.

É possível observar pequenas novas formações com formato de escamas sobre a superfície da amostra (Figura 21c e d), indicando a síntese de novas estruturas devido à reação química em ambiente altamente alcalino das partículas que preenchem os poros do material. O processo sol-gel de formação das estruturas ocorre pela corrosão alcalina da superfície das partículas vizinhas com formação de coloide na fase sol e as reações químicas entre esses transformam sol em gel, solidificando e endurecendo o material.

Figura 21 - Imagens de MEV da superfície do compósito 4 aos 365 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 5,00 kX, e d) magnificação de 10,00 kX.

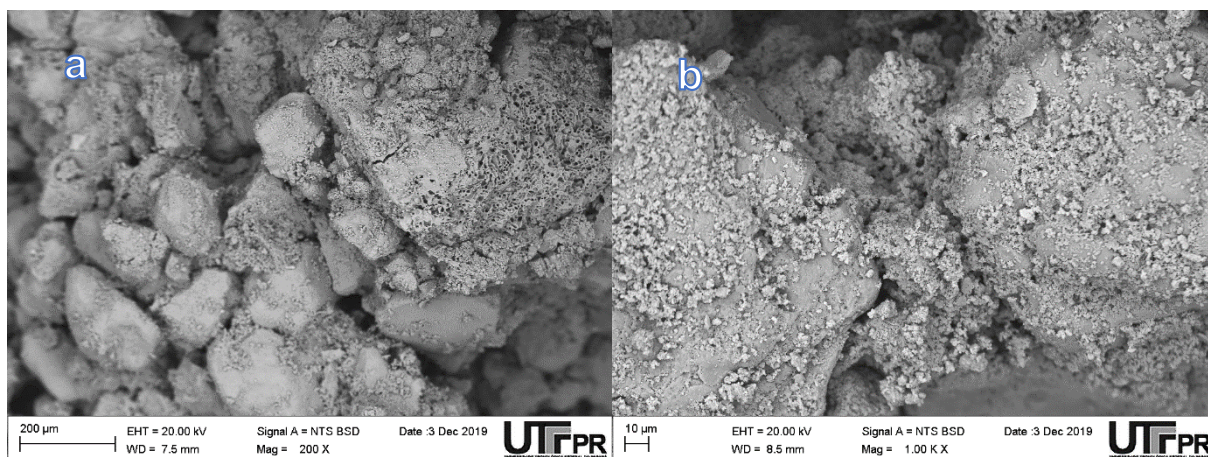


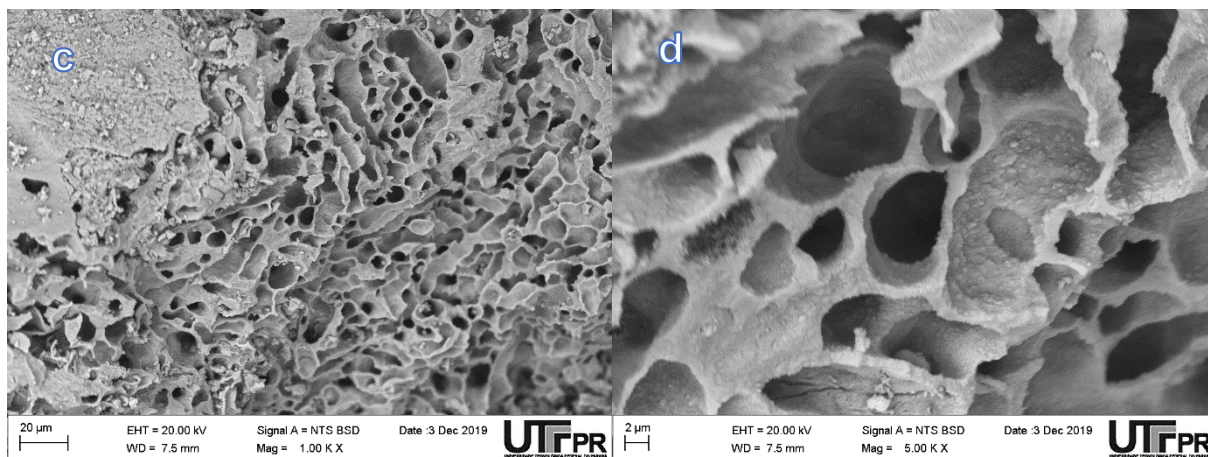


Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 22 observam-se imagens de MEV do compósito 8 aos 3 dias de cura em diferentes magnificações. Pode-se inferir da micrografia que se trata de possível pasta hidratada (água + aglomerante) hidratada e que a estrutura não é homogênea (Figura 22a). Algumas áreas da amostra são densas (Figura 22b) e outras bastante porosas (Figura 22c e d).

Figura 22 - Imagens de MEV da superfície do compósito 8 aos 3 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 1,00 kX, e d) magnificação de 5,00 kX.

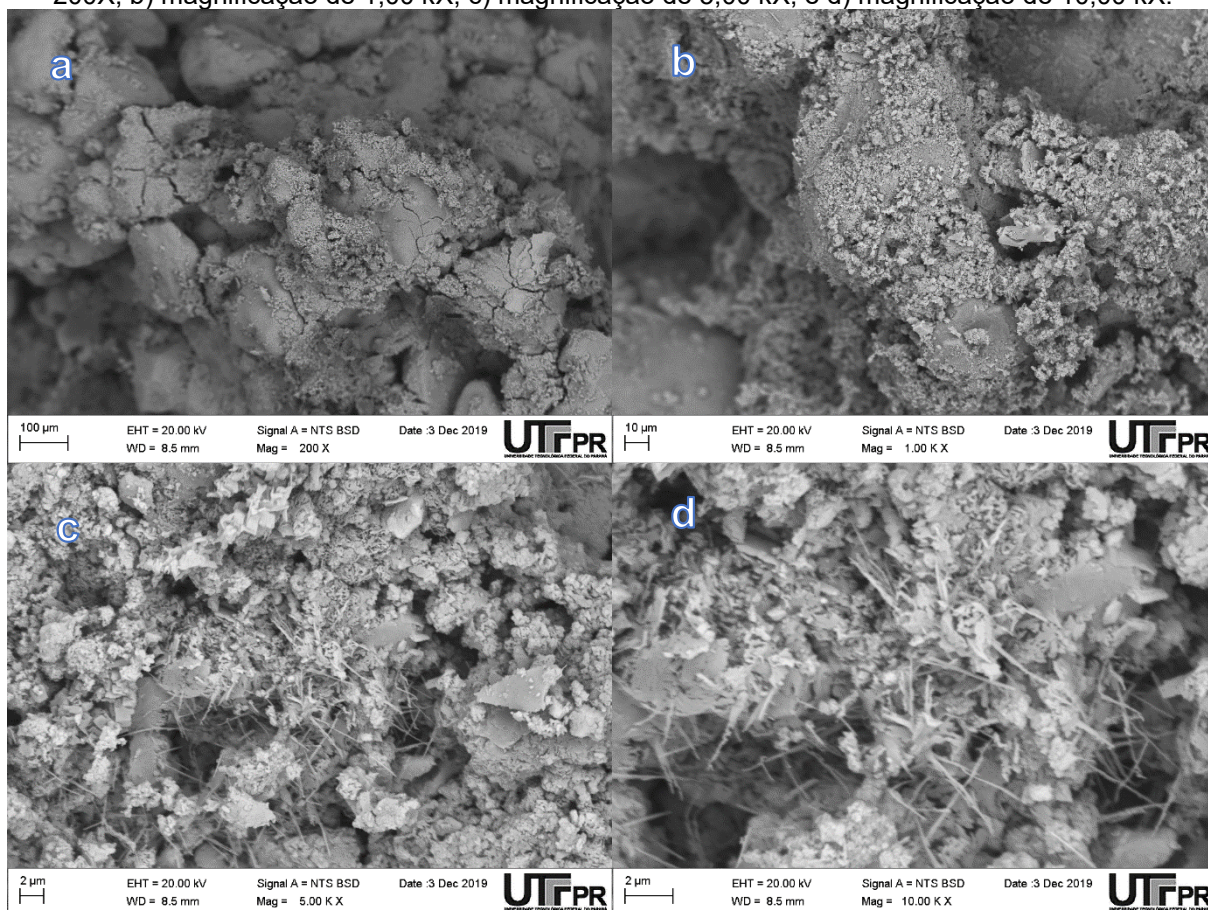




Fonte: Autoria própria (2021).

Aos 28 dias de cura, a síntese de novas formações dentro do espaço do poro levou à diminuição no número de poros entre as partículas (Figura 23a e b). Em maiores ampliações (Figura 23c e d), é possível observar o aparecimento de formações cristalinas em forma de agulha.

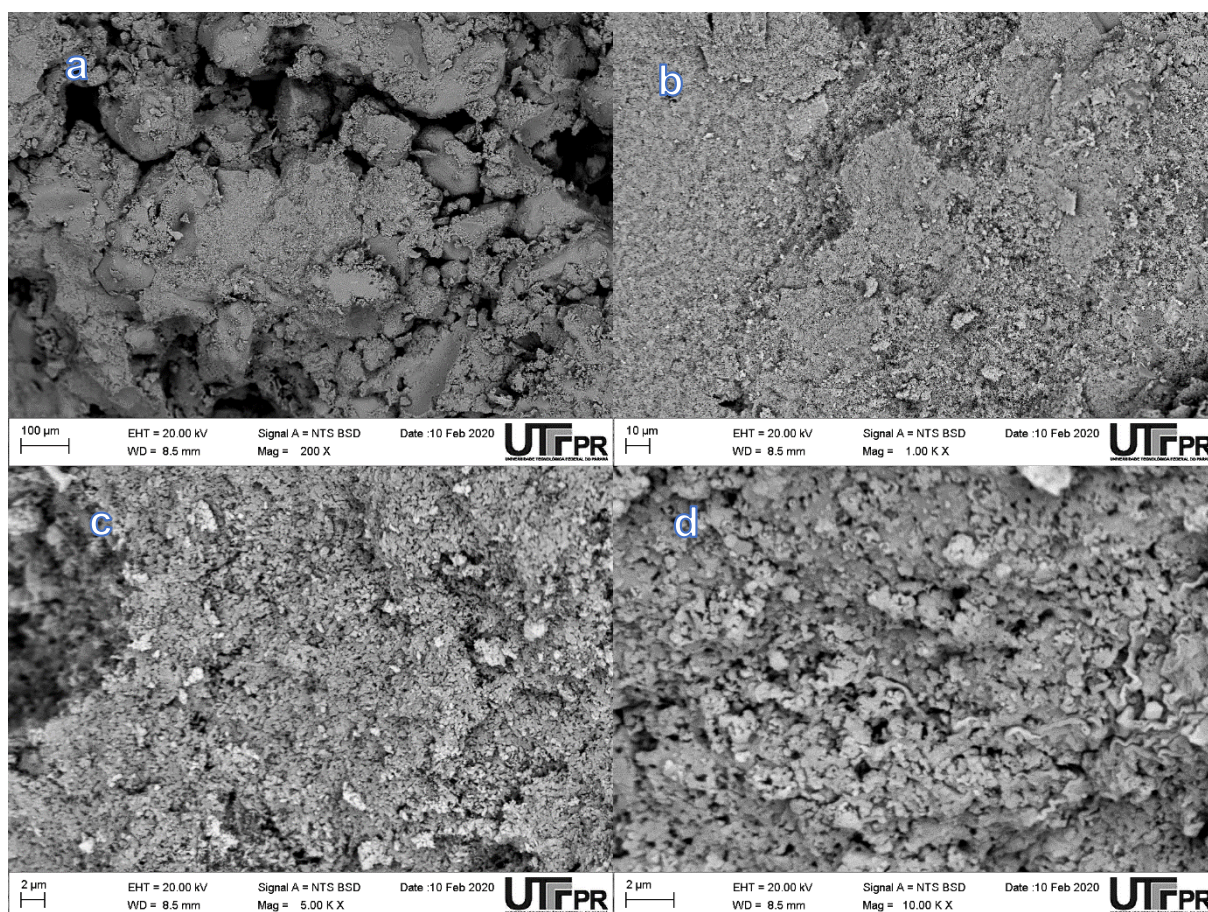
Figura 23 - Imagens de MEV da superfície do composto 8 aos 28 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 5,00 kX, e d) magnificação de 10,00 kX.



Fonte: Autoria própria (2021).

Aos 365 dias de cura, a síntese de novas formações dentro do espaço de poros do compósito 8 praticamente fechou os vazios do material (Figura 24a, b, c e d), o que foi uma das razões para o fortalecimento dos materiais até 16,35 MPa.

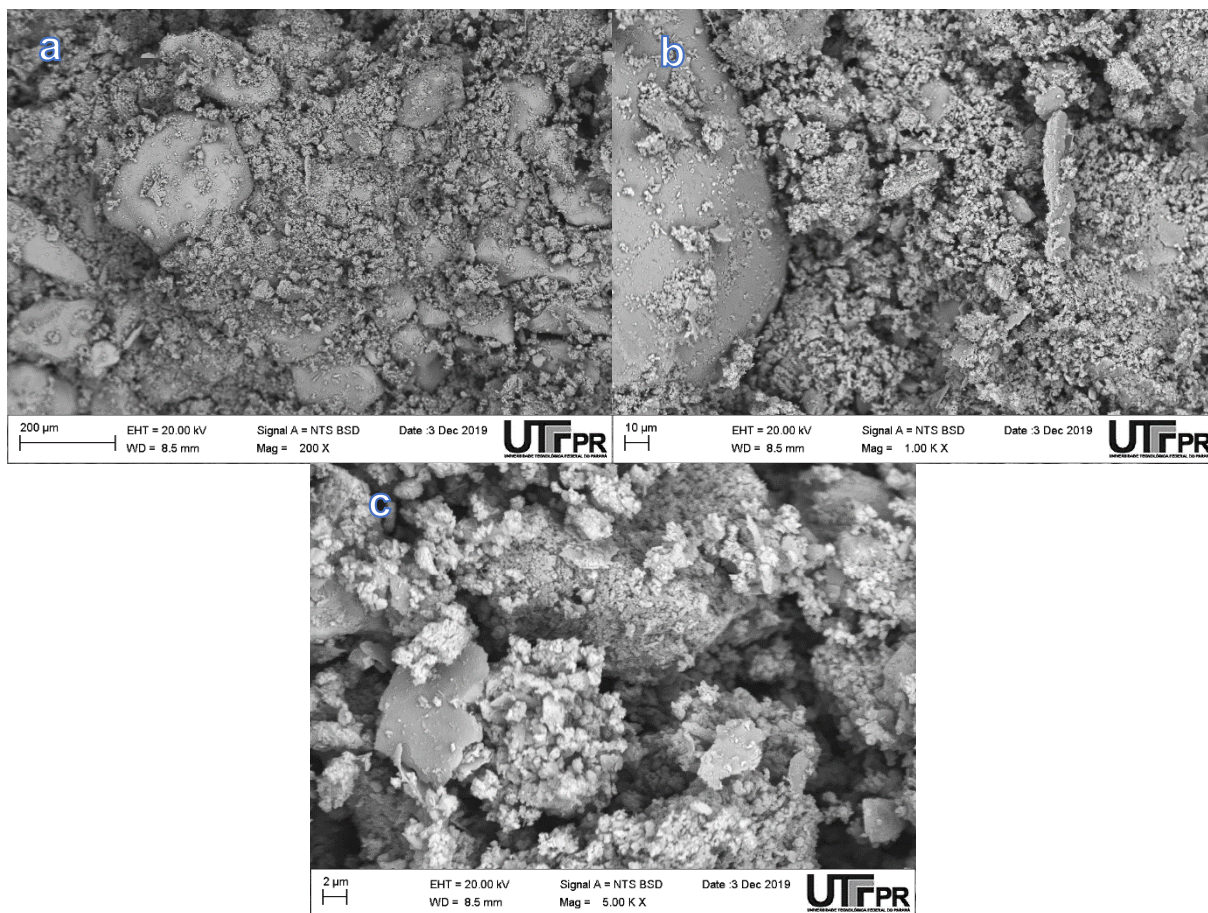
Figura 24 - Imagens de MEV da superfície do compósito 8 aos 365 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, c) magnificação de 5,00 kX, e d) magnificação de 10,00 kX.



Fonte: Autoria própria (2021).

Percebe-se, na fotomicrografia do compósito 20 aos 3 dias de cura (Figura 25a e b), grande número de partículas de diferentes configurações e tamanhos. Em maior magnificação (Figura 25c), nota-se vasta quantidade de poros entre essas partículas. Essa foi a principal razão para os valores de resistência à compressão mais baixos e os valores de absorção de água mais altos desse compósito.

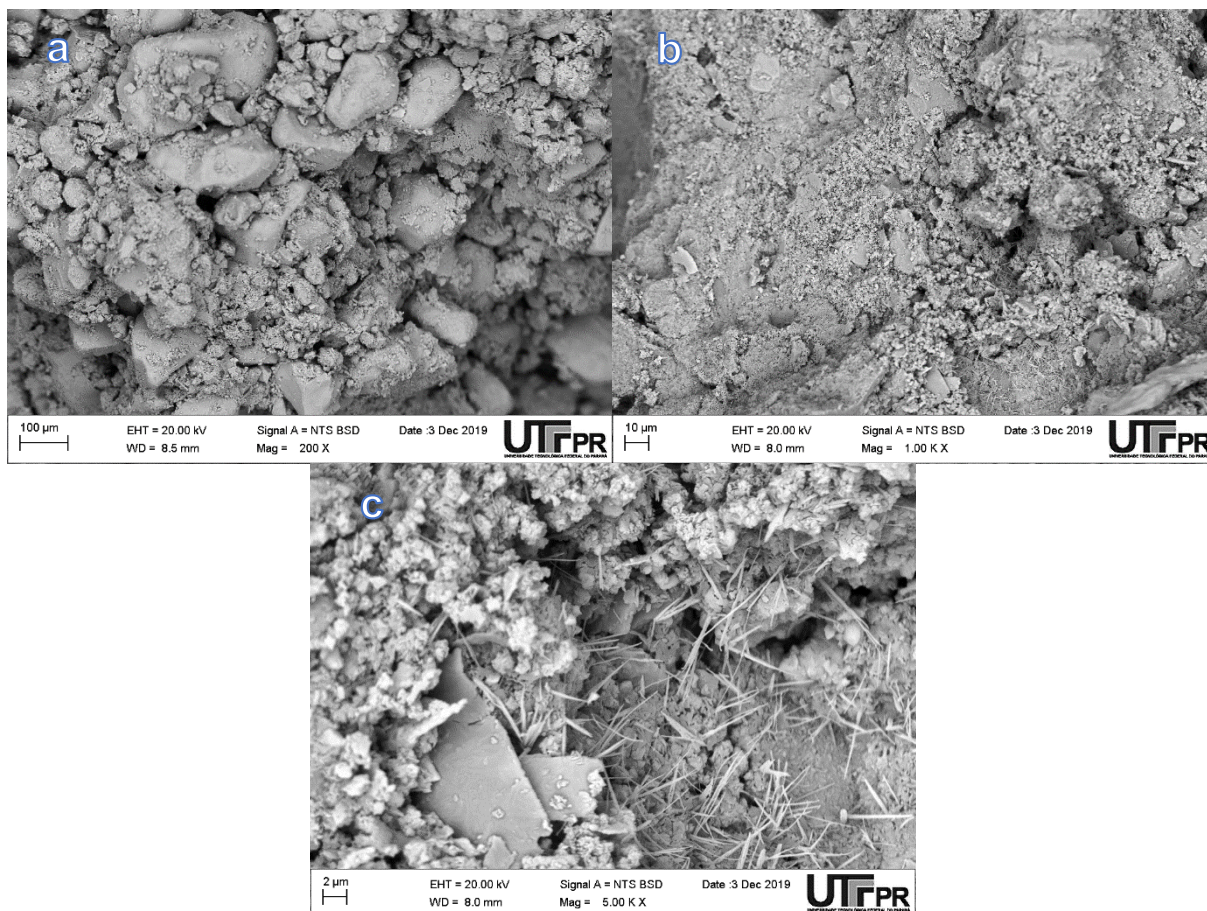
Figura 25 - Imagens de MEV da superfície do compósito 20 aos 3 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, e c) magnificação de 5,00 kX.



Fonte: Autoria própria (2021).

Aos 28 dias, as partículas de diferentes tamanhos do compósito 20 foram envoltas em novas formações que tomaram toda a superfície das amostras de teste, atuando como uma cola entre partículas sólidas (Figura 26a e b). O número de poros no material foi drasticamente reduzido e houve surgimento de cristais em forma de agulhas delgadas e longas (Figura 26c).

Figura 26 - Imagens de MEV da superfície do compósito 20 aos 28 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, e c) magnificação de 5,00 kX.

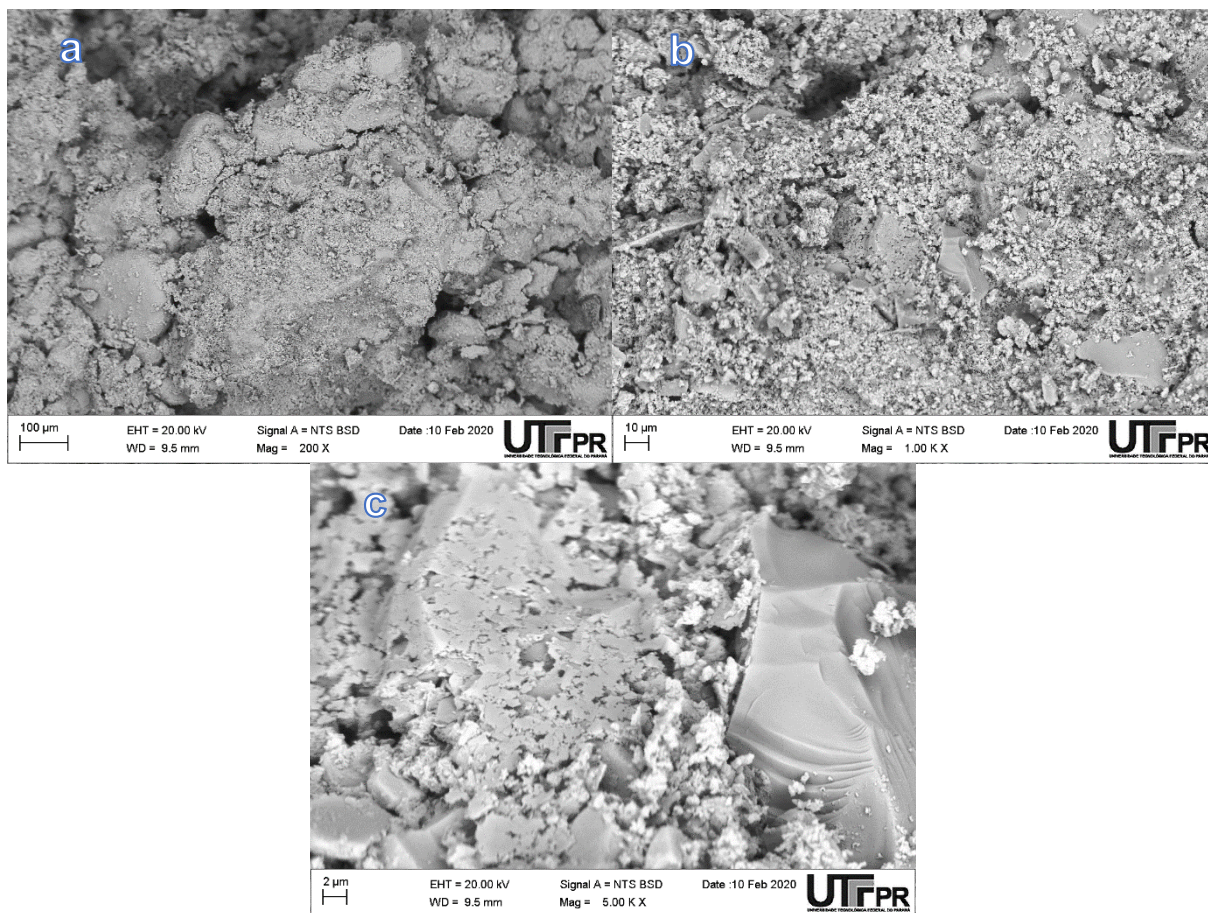


Fonte: Autoria própria (2021).

A estrutura morfológica da mistura hidratada inicial do compósito 20 transformou-se em um material monolítico após 365 dias (Figura 27a) devido à dissolução química das superfícies das partículas em um meio altamente alcalino de materiais hidratados e a interação química entre essas soluções com a síntese de novas formações gel de diferentes composições químicas.

Ainda são visíveis alguns poros e trincas com aumentos de 1,00 e 5,00 kX (Figura 27b e c) no campo monolítico de novas formações.

Figura 27 - Imagens de MEV da superfície do compósito 20 aos 365 dias de cura a: a) magnificação de 200X, b) magnificação de 1,00 kX, e c) magnificação de 5,00 kX.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tal integridade e densidade das novas formações podem explicar a resistência axial das amostras de 10,63 Mpa.

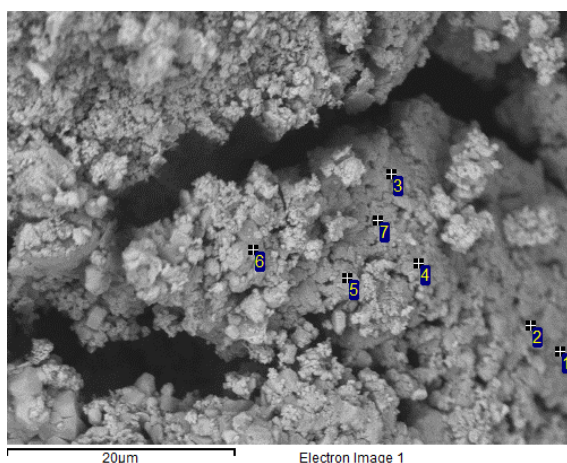
#### 4.2.3.3. Composição microquímica das novas formações pelo método de EDS - Pontual

As alterações nas composições microquímicas das novas formações que fortaleceram os compósitos desenvolvidos foram estudadas por espectroscopia por dispersão de energia (EDS).

Os elementos químicos identificados na composição 4 aos 3 dias de cura são carbono (C), magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), cloro (Cl), cálcio (Ca) e ferro (Fe), elementos presentes nas matérias-primas. Os elementos estão homogeneamente distribuídos nos pontos 1 e 2, 4 e 5 (Tabela 15 e Figura 28), sem

variações significativas em suas concentrações ao longo destes, excetuando-se o elemento Fe (entre 3,51% e 6,58%). Os demais pontos analisados apresentam discrepância nos teores de cada elemento químico. Pode-se inferir tratar-se de material amorfo, pois os elementos amorfos são formados por arranjos atômicos aleatórios e sem simetria ou ordenação de longo alcance.

Figura 28 - Imagem da superfície da amostra da composição 4 aos 3 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 15 - Composição química do compósito 4 aos 3 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 28, obtida através de EDS, em %peso.

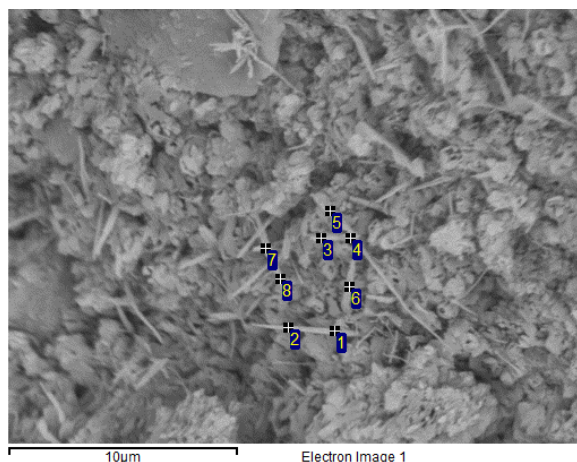
Ponto	C	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Total
1	10,58	6,28	0,95	-	-	77,43	4,66	100,00
2	11,69	6,95	0,91	-	-	77,80	2,65	100,00
3	8,56	5,00	0,63	-	0,82	82,15	2,83	100,00
4	12,65	5,53	1,65	1,10	-	72,50	6,58	100,00
5	10,19	5,61	1,27	1,08	-	78,33	3,51	100,00
6	6,55	5,76	-	-	0,74	85,10	1,85	100,00
7	6,44	3,78	0,97	-	0,84	83,75	4,22	100,00
Max.	12,65	6,95	1,65	1,10	0,84	85,10	6,58	
Min.	6,44	3,78	0,63	1,08	0,74	72,50	1,85	

Fonte: Autoria própria (2021).

Aos 28 dias de cura, pode-se verificar a continuidade do processo de hidratação através do surgimento de cristais finos em forma de agulha na micrografia de MEV (Figura 29), confirmada não apenas por sua forma estrutural, mas também pela pequena variação na concentração dos elementos químicos ao longo dessas novas formações (Tabela 16).



Figura 29 - Imagem da superfície da amostra da composição 4 aos 28 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS.



Fonte: Autoria própria (2021).

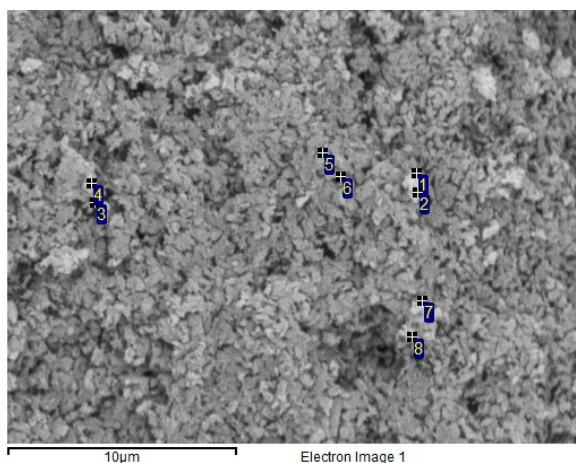
Tabela 16 - Composição química do compósito 4 aos 28 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 29, obtida através de EDS, em %peso.

Ponto	C	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Sn	Total
1	47,04	16,96	0,63	-	1,29	33,21	0,88	-	100,00
2	45,04	22,15	-	-	0,88	31,94	-	-	100,00
3	46,45	19,14	-	-	1,24	31,59	1,57	-	100,00
4	47,78	17,20	-	-	1,18	31,25	0,81	1,79	100,00
5	42,06	18,35	-	0,69	1,24	36,47	1,19	-	100,00
6	44,24	20,16	-	-	1,04	34,55	-	-	100,00
7	47,35	17,30	-	-	1,06	32,20	2,09	-	100,00
8	45,34	17,23	-	-	1,15	32,20	4,09	-	100,00
Max.	47,78	22,15	0,63	0,69	1,29	36,47	4,09	1,79	
Min.	42,06	16,96	0,63	0,69	0,88	31,25	0,81	1,79	

Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados das análises de EDS para o compósito 4 aos 365 dias de cura mostram alto nível de heterogeneidade nos pontos 3 e 4 (Figura 30 e Tabela 17). Tais variações são inaceitáveis para estruturas cristalinas, sendo típicas de substâncias amorfas.

Figura 30 - Imagem da superfície da amostra da composição 4 aos 365 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS.



Fonte: Autoria própria (2021).

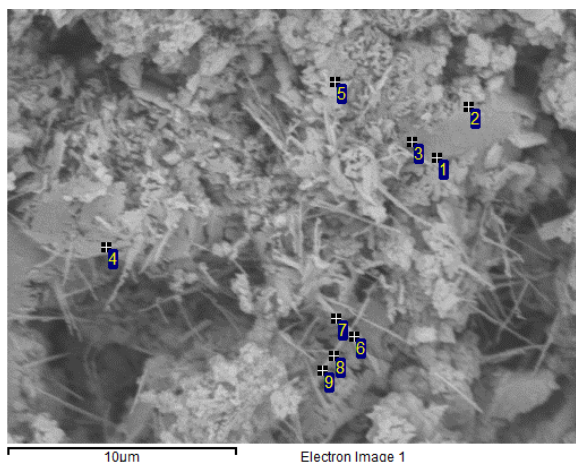
Tabela 17 - Composição química do compósito 4 aos 365 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 27 obtida através de EDS, em %peso.

Ponto	C	Mg	Al	Cl	Ca	Total
1	28,26	24,38	0,72	-	46,64	100,00
2	29,74	25,48	-	-	44,78	100,00
3	25,47	20,68	-	-	53,85	100,00
4	38,22	25,62	-	0,67	35,49	100,00
5	35,47	26,00	-	-	38,53	100,00
6	38,31	23,55	-	0,49	37,65	100,00
7	37,81	23,38	-	-	38,81	100,00
8	41,37	19,42	0,75	-	38,46	100,00
Max.	41,37	26,00	0,75	0,67	53,85	
Min.	25,47	19,42	0,72	0,49	35,49	

Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados de EDS para a composição 8 aos 28 dias de cura exibem alto grau de heterogeneidade nos pontos analisados (Figura 31, Tabela 18). Os valores do teor de carbono (C) nesses pontos variaram entre 14,52 e 44,63%, magnésio (Mg) entre 13,48 e 25,85%, cálcio (Ca) entre 32,19 e 65,52% e ferro (Fe) entre 2,36 e 6,10% (Tabela 18).

Figura 31 - Imagem da superfície da amostra da composição 8 aos 28 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 18 - Composição química do compósito 8 aos 28 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 28 obtida através de EDS, em %peso.

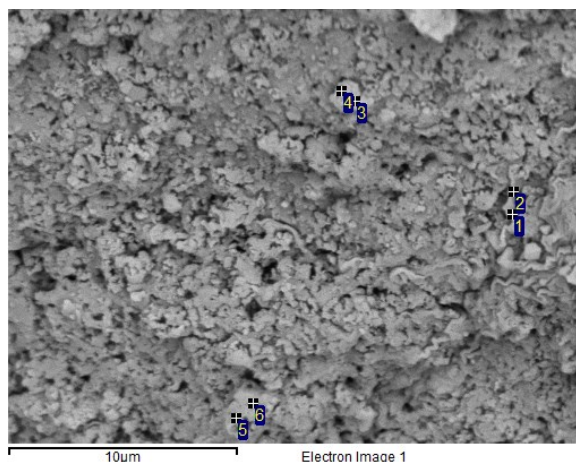
Ponto	C	Mg	Al	Si	Cl	Ca	Fe	Total
1	21,06	14,66	1,77	1,91	1,15	55,94	3,50	100,00
2	28,95	14,72	1,63	1,37	1,28	46,82	5,23	100,00
3	14,52	15,85	0,66	-	1,66	64,40	2,90	100,00
4	15,65	13,48	-	-	1,53	65,52	3,83	100,00
5	44,63	18,98	0,80	-	1,04	32,19	2,36	100,00
6	27,20	25,10	-	-	1,07	41,84	4,79	100,00
7	23,80	16,51	-	-	1,13	54,89	3,67	100,00
8	21,39	25,85	-	-	1,18	48,25	3,32	100,00
9	25,69	21,19	0,73	-	1,28	45,01	6,10	100,00
Max.	44,63	25,85	1,77	1,91	1,66	65,52	6,10	
Min.	14,52	13,48	0,66	1,37	1,04	32,19	2,36	

Fonte: Autoria própria (2021).

A inconsistência nos teores dos elementos químicos também é observada para a idade de cura de 365 dias, com os valores variando consideravelmente entre pontos próximos (Figura 32,

Tabela 19).

Figura 32 - Imagem da superfície da amostra da composição 8 aos 365 dias de cura, obtida através de MEV, com a delimitação dos pontos analisados por EDS.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 19 - Composição química do compósito 8 aos 365 dias de cura em cada ponto assinalado na Figura 29 obtida através de EDS, em %peso.

Ponto	C	Mg	Ca	Fe	Total
1	38,21	26,99	32,34	2,46	100,00
2	31,57	22,47	44,64	1,32	100,00
3	34,42	28,66	35,36	1,56	100,00
4	34,08	26,14	38,63	1,15	100,00
5	40,06	26,28	31,20	2,46	100,00
6	36,16	24,02	36,83	2,98	100,00
Max.	40,06	28,66	44,64	2,98	
Min.	31,57	22,47	31,20	1,15	

Fonte: Autoria própria (2021).

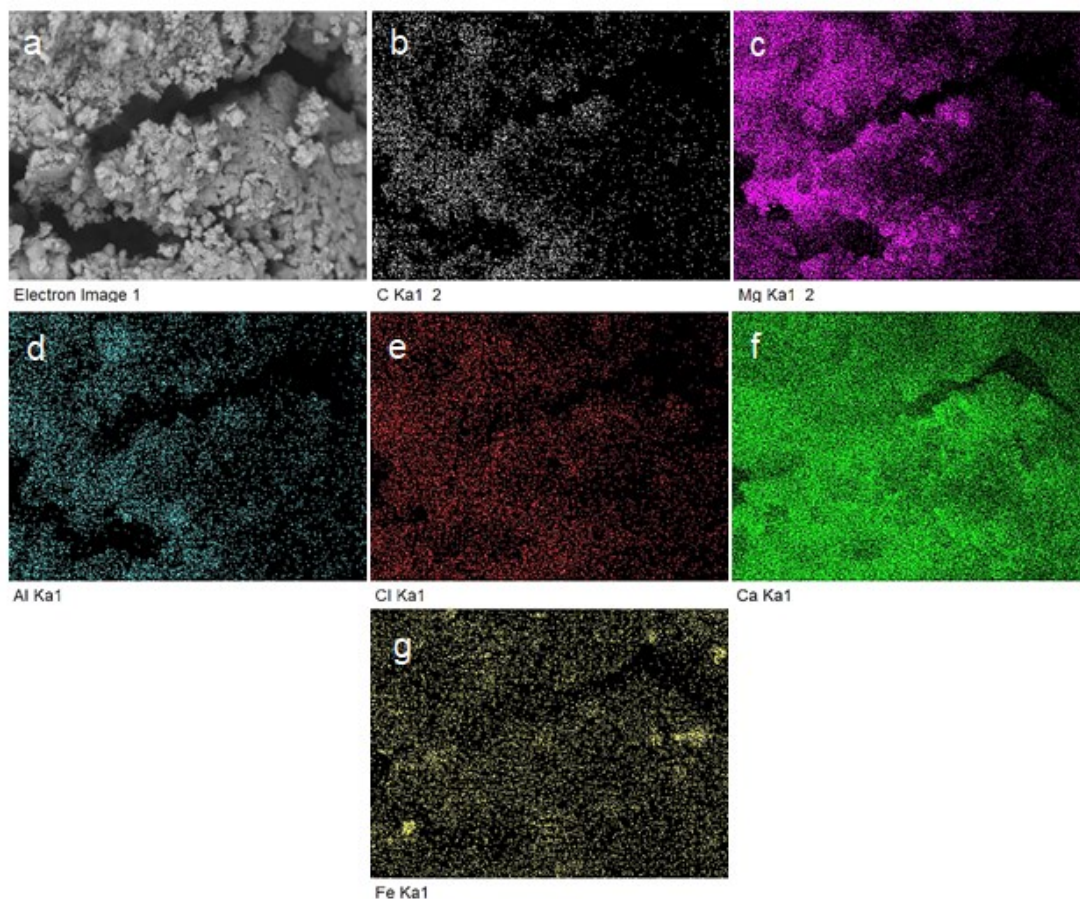
#### 4.2.3.4. Distribuição dos principais elementos químicos nas novas formações pelo método de mapeamento por EDS

A análise da distribuição dos principais elementos químicos presentes nos compósitos desenvolvidos selecionados para estudo foi realizada através de mapeamento da superfície da amostra por EDS. O mapeamento por EDS permite a visualização da distribuição espacial dos elementos químicos em uma amostra, inclusive destacando elementos presentes apenas em quantidades vestigiais.

A Figura 33 mostra imagens composicionais resultantes onde fotomicrografia da área investigada para análise de EDS é exibida em escala de cinza (Figura 33a) e os elementos carbono (C), magnésio (Mg), alumínio (Al), cloro (Cl), cálcio (Ca) e ferro (Fe) são apresentados em escala de cinza, roxo, ciano, vermelho, verde e amarelo, respectivamente (Figura 33b, c, d, e, f, g). Em cada imagem, a cor é apresentada

como forte e brilhante quando rica em elementos e escura quando deficiente em elementos na escala de intensidade relativa.

Figura 33 – Mapa composicional do compósito 4 aos 3 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.



Fonte: Autoria própria (2022).

Todas as partículas minerais estão bem dispersas no compósito. Os elementos presentes em maior quantidade são Ca, Mg e Fe, resultado que vai ao encontro do resultado das análises de EDS (Tabela 15) e DRX (Figura 16). Há predominância de Cl, Ca e Fe nas regiões da trinca do material e de C, Mg e Al nas regiões onde há aglomerados de partículas em forma de nuvem (Figura 33a). Ferro (Fe) é fortemente detectado em regiões próximas às trincas da amostra (Figura 33a).

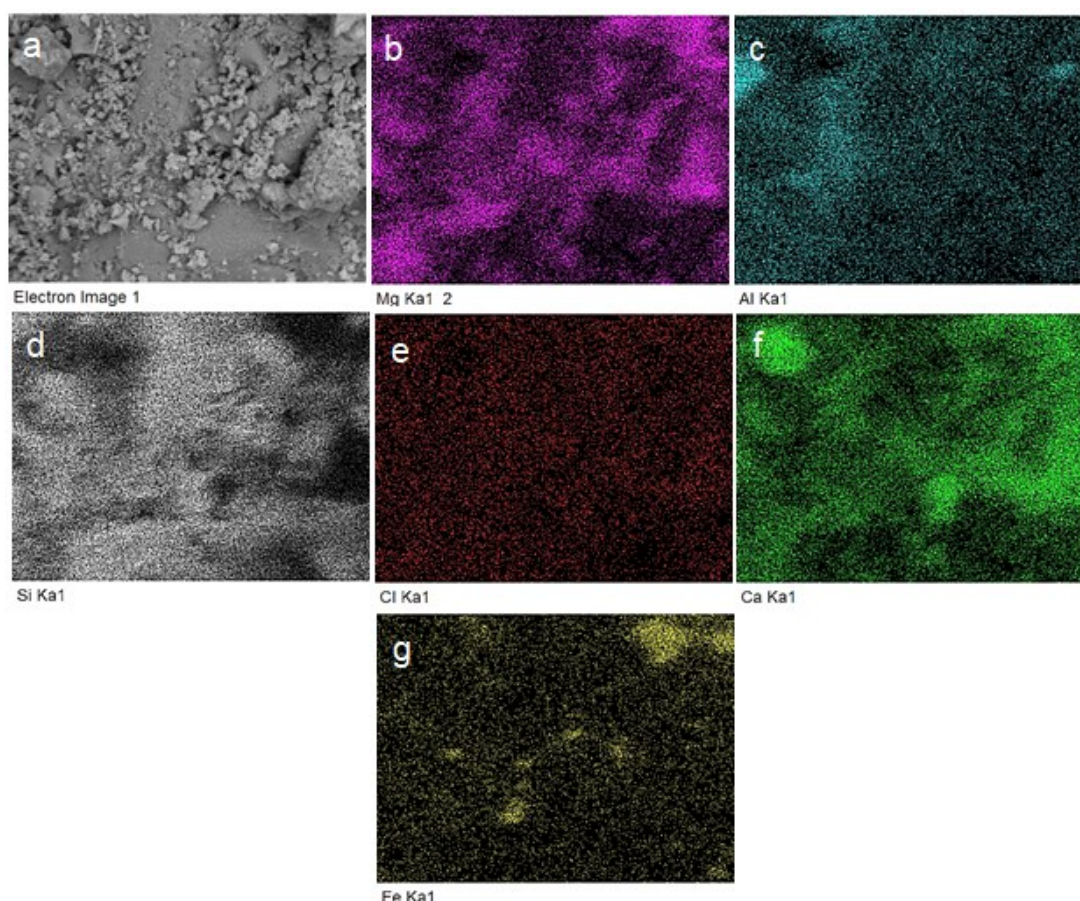
Observa-se que os elementos estão distribuídos sem nenhuma ordenação, podendo-se deduzir tratar-se de material amorfo.

Bastante inusitado é o não-aparecimento do elemento químico silício (Si), uma vez que ele está presente tanto na análise pontual de EDS (Tabela 15) quanto na

difração de raio-X (Figura 16). Provavelmente, em decorrência de limitações na interpretação feita pelo equipamento utilizado

Aos 28 dias de cura, a área mapeada do compósito 4 apresenta superfície lisa coberta por aglomerados de partículas de diferentes tamanhos (Figura 34a). Os principais elementos químicos encontrados são magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), cloro (Cl), cálcio (Ca) e ferro (Fe) (Figura 34b-g). Os elementos estão distribuídos em toda a área analisada, não sendo visível formas cristalinas. Observa-se deficiência de Mg nas áreas livres de aglomerados e região com forte concentração de Fe correspondendo na imagem de MEV à microestrutura com formato vesicular.

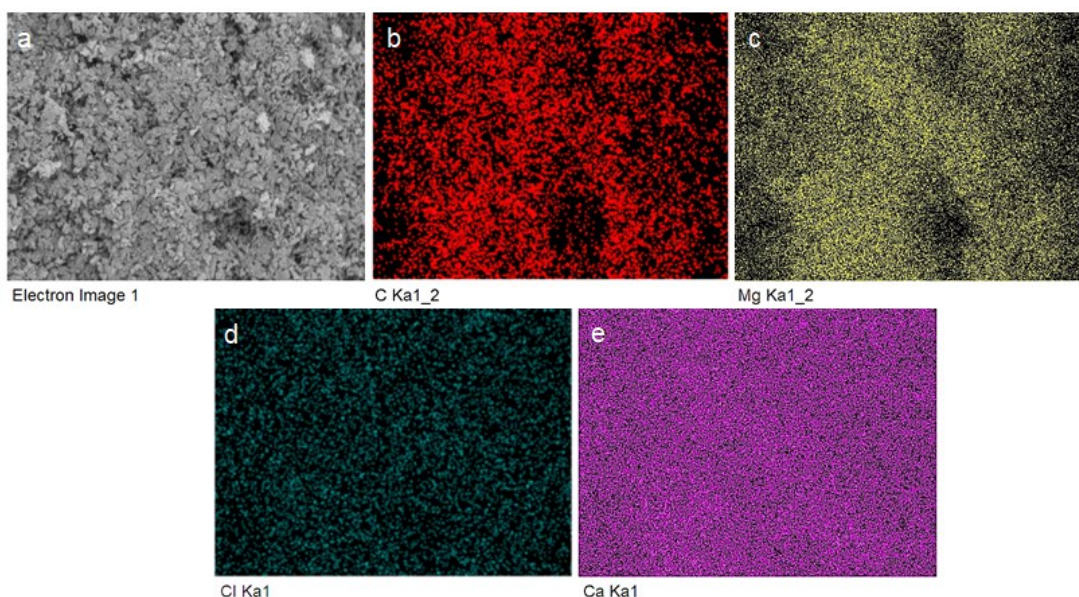
Figura 34 - Mapa composicional do compósito 4 aos 28 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.



Fonte: Autoria própria (2022).

Aos 365 dias, a superfície do compósito 4 (Figura 35a) apresenta todos os elementos químicos uniformemente distribuídos nas imagens composicionais (Figuras 35 b, c, d, e).

Figura 35 - Mapa composicional do compósito 4 aos 365 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.

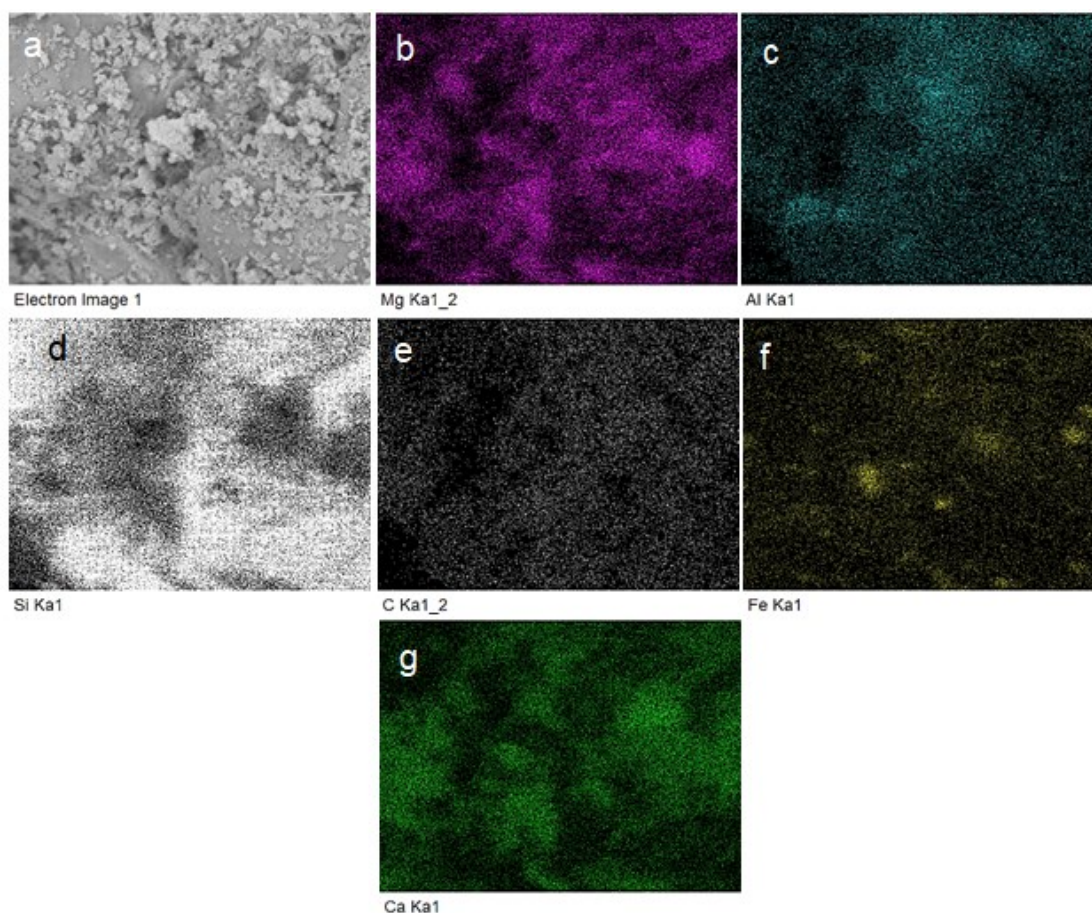


Fonte: Autoria própria (2022).

Ao longo dos 365 dias de cura do compósito 4, não foi possível observar formações cristalinas nos mapeamentos das superfícies por EDS. As novas formações amorfas estão distribuídas por toda superfície, sendo a síntese dessas novas formações o que explica o endurecimento do material e todas as suas propriedades mecânicas.

A Figura 36 mostra o mapa composicional do compósito 8 aos 3 dias de cura. Os elementos magnésio (Mg), alumínio (Al), silício (Si), carbono (C), ferro (Fe) e cálcio (Ca) (Figura 36b, c, d, e, f, h) estão dispersos por toda a área analisada. Nota-se, na Figura 36a, regiões com poros e regiões onde houve formação de estruturas amorfas. As regiões dos poros são deficientes em Mg, Al e Si. As estruturas amorfas formadas são, entretanto, ricas em Mg e Ca.

Figura 36 - Mapa composicional do compósito 8 aos 3 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.

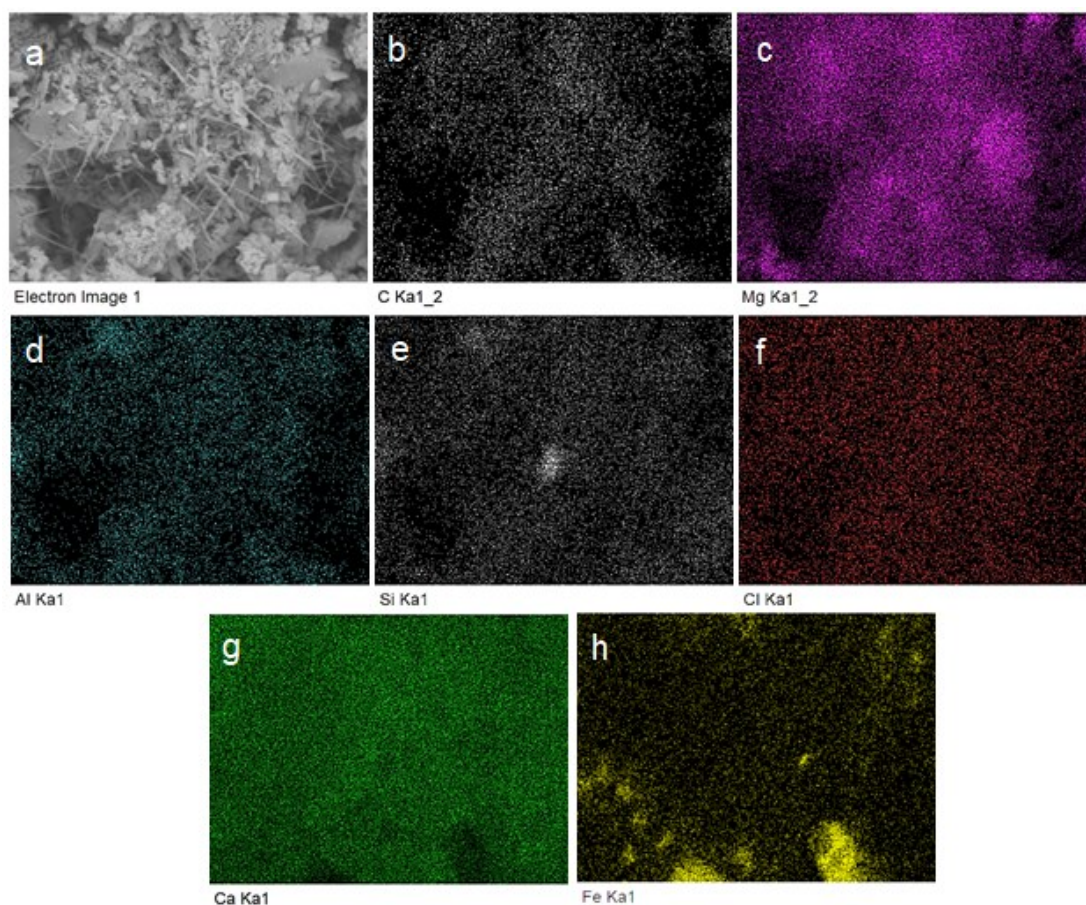


Fonte: Autoria própria (2022).

Aos 28 dias, percebem-se formações finas e delgadas em forma de agulhas na fotomicrografia obtida por MEV (Figura 37a) do compósito 8. Não se percebe concentração elevada de elementos nessas formações. Os poros observados na imagem de MEV são deficientes em C, Mg, Al e Si (Figura 37b, c, d, e). Fe foi fortemente detectado na região inferior da figura (Figura 37h), correspondendo às formações semelhantes a nuvens. Todos os elementos estão distribuídos por toda a área analisada (Figura 37b-h).



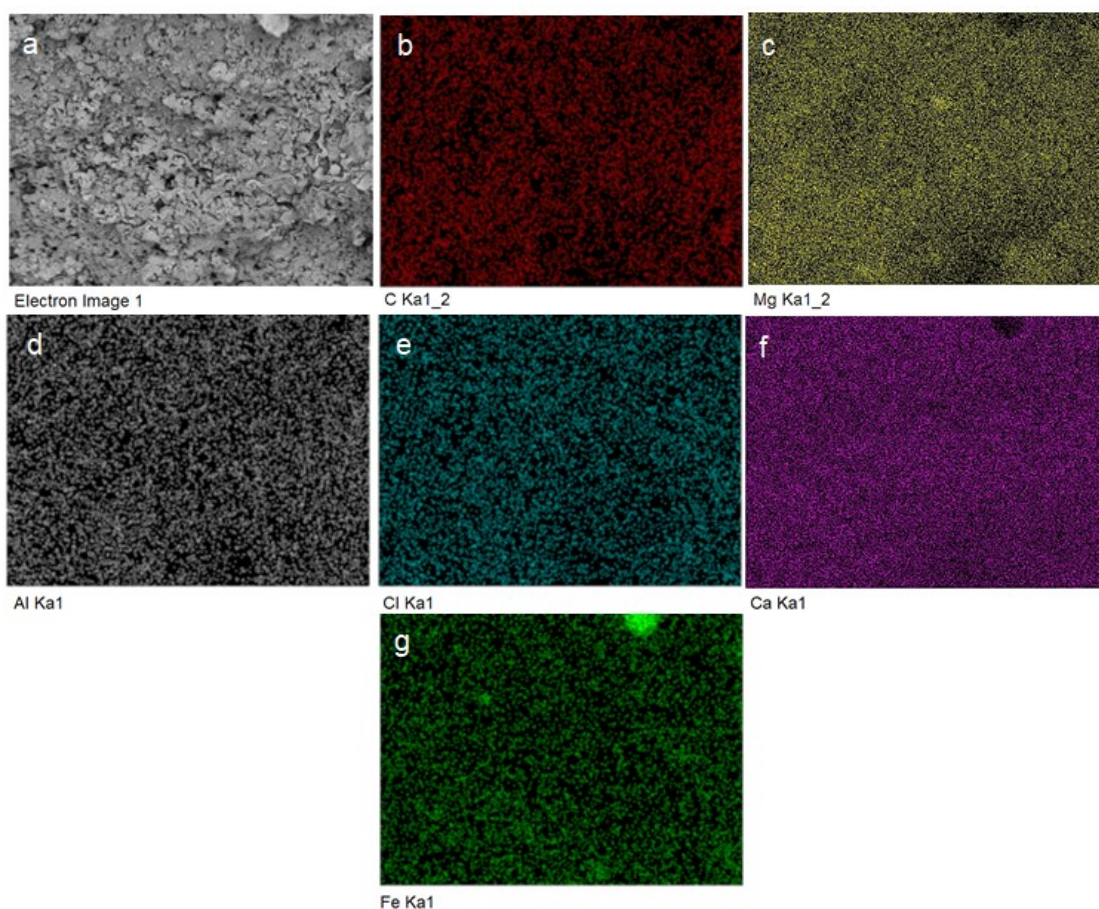
Figura 37 - Mapa composicional do compósito 8 aos 28 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g, h) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.



Fonte: Autoria própria (2022).

A área analisada aos 365 dias é composta por uma camada de novas formações de gel, não se percebe a presença de formações cristalinas (Figura 38a). O mapeamento elemental mostra distribuição uniforme de C, Mg, Al, Cl, Ca e Fe sobre a superfície do compósito 8 (Figura 38b, c, d, e, f, g). As formações gel são as principais responsáveis pelo endurecimento e as propriedades do compósito 8.

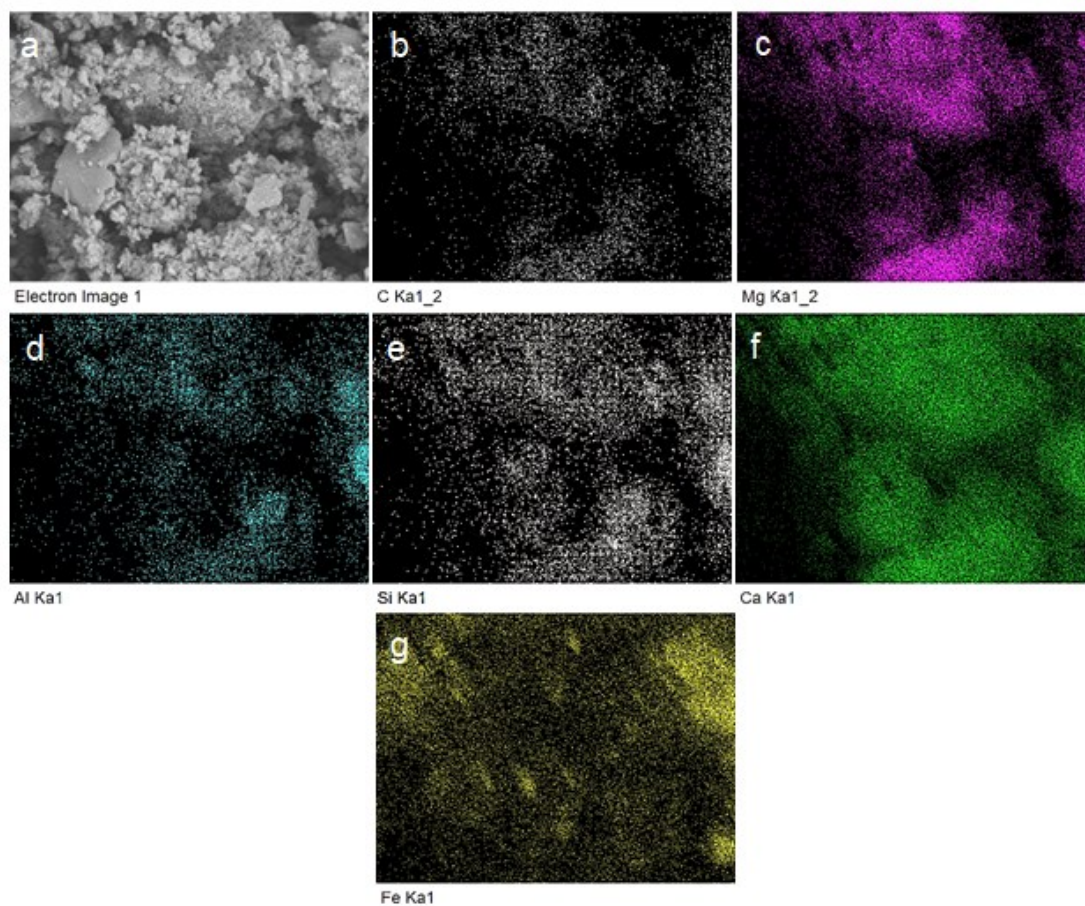
Figura 38 - Mapa composicional do compósito 8 aos 365 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.



Fonte: Autoria própria (2022).

O mapa composicional do compósito 20 aos 3 dias de cura revela a presença dos elementos químicos C, Mg, Al, Si, Ca e Fe (Figura 39b, c, d, e, f, g). A imagem de MEV da área analisada mostra uma superfície com poros e rachaduras, coberta por partículas de diferentes tamanhos e formas em um estado livre, aparentemente não conectadas entre si (Figura 39a). As regiões porosas são deficientes em todos os elementos. Há predominância de C, Mg, Al, Si e Ca nas regiões onde há aglomerados de partículas sem forma definida. Fe é fortemente detectado em regiões específicas que correspondem a formações maciças e bem definidas.

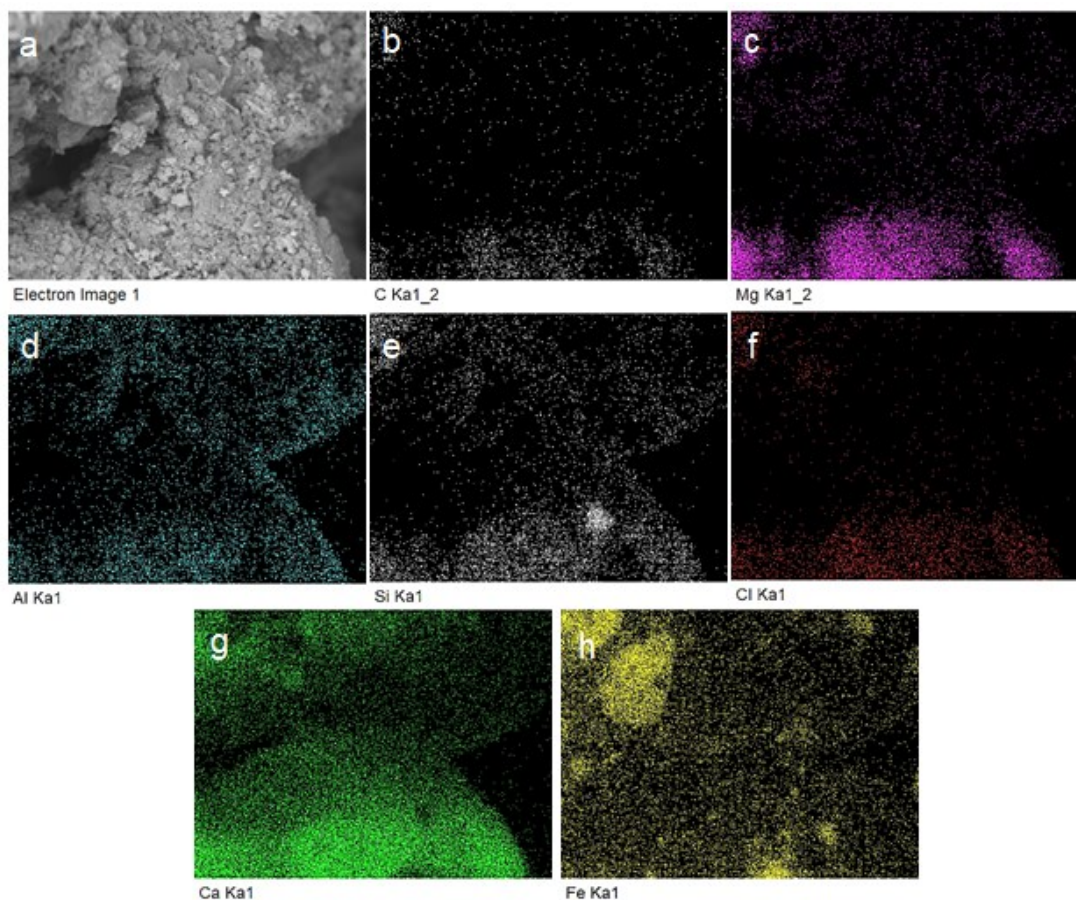
Figura 39 - Mapa composicional do compósito 20 aos 3 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.  
C20D3



Fonte: Autoria própria (2022).

Aos 28 dias de cura, quase todas as partículas foram cobertas por uma camada de novas formações, combinadas em agregados (Figura 40a). A composição elemental pode ser observada nas Figura 40b-h. As maiores concentrações são dos elementos Al, Si, Ca e Fe. Fe e Mg são fortemente detectados em regiões específicas.

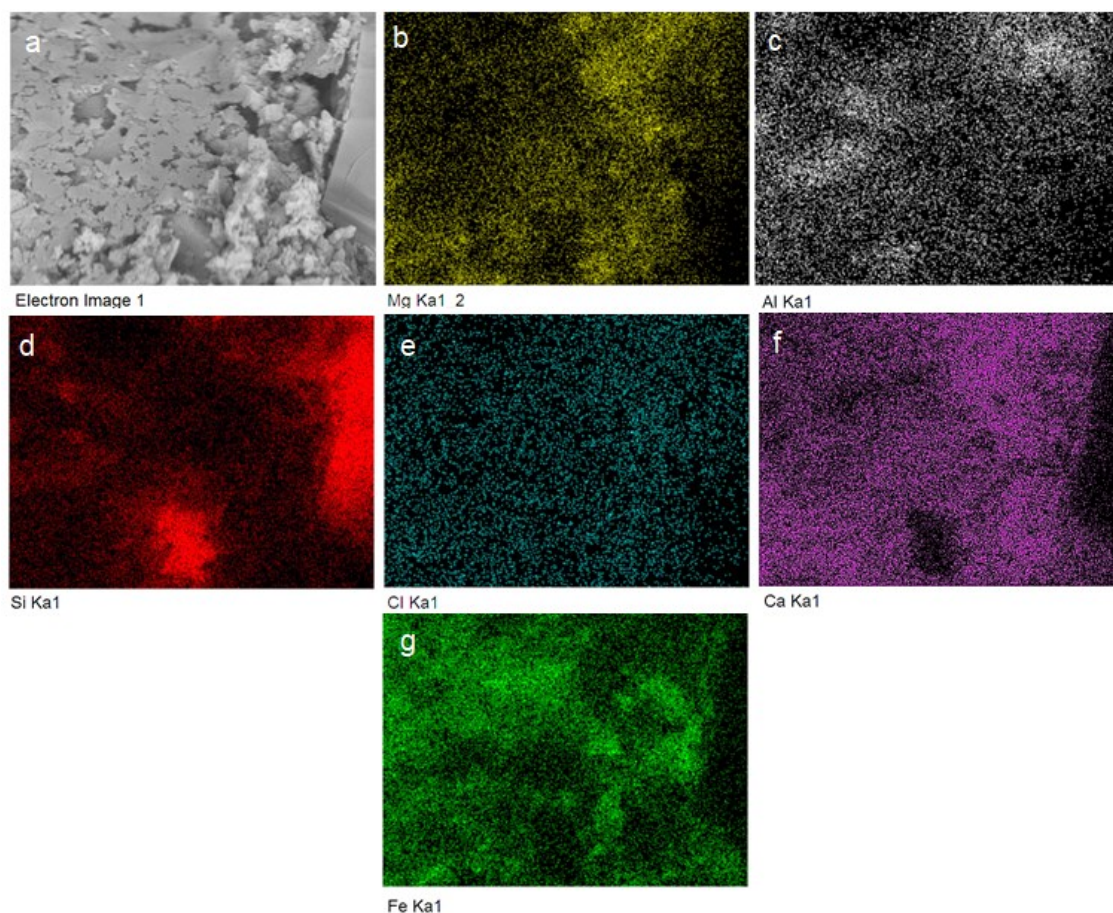
Figura 40 - Mapa composicional do compósito 20 aos 28 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g, h) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.



Fonte: Autoria própria (2022).

Aos 365 dias de cura, percebe-se na imagem analisada (Figura 41a), ampla área de densa formação gel com rachaduras. Os elementos químicos encontram-se distribuídos por toda a superfície da amostra (Figura 41b-g). O Si é fortemente detectado nas regiões onde aparecem estruturas maciças e bem definidas.

Figura 41 - Mapa composicional do compósito 20 aos 365 dias de cura obtido por EDS: a) imagem de MEV da superfície analisada; b, c, d, e, f, g) distribuição dos principais elementos químicos individualmente na superfície analisada da amostra.



Fonte: Autoria própria (2022).

A análise da composição elemental por EDS dos compósitos selecionados permite estabelecer que os valores das propriedades físicas e mecânicas dos materiais desenvolvidos são explicados pela ocorrência de processos sol-gel no espaço poroso das amostras com a geração de novas formações amorfas, sua sinérese, e transições para um estado de pedra.

#### 4.2.4 Sustentabilidade dos materiais desenvolvidos

Para determinar a estabilidade química dos materiais desenvolvidos, foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização a fim de detectar a presença de metais pesados e determinar o grau de imobilização dos contaminantes (metais pesados) porventura presentes nos compósitos selecionados 4, 8 e 20. Foram investigadas as

concentrações dos metais cálcio, cádmio, chumbo, cromo, ferro, zinco, cobre e níquel nos extratos lixiviado e solubilizado.

Foram identificados apenas os metais cálcio, cobre e zinco nos extratos lixiviados dos compósitos analisados, porém em concentrações abaixo do valor máximo estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004) (Tabela 20). Este fato é atribuído à robusta ligação química dos metais pesados em composições químicas praticamente insolúveis.

Tabela 20 - Lixiviação de metais pesados dos compósitos 4, 8 e 20.

Metal	Lixiviação (mg/L)			
	Comp.4	Comp.8	Comp.20	NBR 10004 (2004)
<b>Ca</b>	19,23	14,55	215,6	*
<b>Cd</b>	ND	ND	ND	0,5
<b>Cr total</b>	ND	ND	ND	5,0
<b>Cu</b>	0,163	0,143	0,149	*
<b>Fe</b>	ND	ND	ND	*
<b>Ni</b>	ND	ND	ND	*
<b>Zn</b>	ND	ND	0,063	*
<b>Pb</b>	ND	ND	ND	1,0

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota: \* Não apresenta limite estabelecido na NBR 10004 (2004).

ND – Não detectado.

No ensaio de solubilização, foram encontrados os metais cálcio, cádmio, cromo, cobre, ferro e níquel (Tabela 21).

Tabela 21 - Solubilidade de metais pesados dos compósitos 4, 8 e 20.

Metal	Solubilidade (mg/L)			
	Comp.4	Comp.8	Comp.20	NBR 10004 (2004)
<b>Ca</b>	3.656	3.876	196	*
<b>Cd</b>	0,029	0,024	0,039	0,005
<b>Cr total</b>	ND	0,056	ND	0,05
<b>Cu</b>	0,119	0,132	0,154	2,0
<b>Fe</b>	ND	ND	0,616	0,3
<b>Ni</b>	0,138	0,133	0,177	*
<b>Zn</b>	ND	ND	ND	5,0
<b>Pb</b>	ND	ND	ND	0,01

Fonte: Autoria própria (2022).

Nota: \* Não apresenta limite estabelecido na NBR 10004 (2004).

ND – Não detectado.

Observa-se que os compósitos avaliados apresentaram concentrações de cádmio (Cd) acima do máximo permitido pela NBR 10004 (ABNT, 2004). A concentração de cromo no compósito 8 estava levemente acima do limite estabelecido e a de ferro (Fe) foi o dobro do determinado pela norma no compósito 20. Os demais

metais identificados apresentaram valores de solubilização abaixo dos limites máximos.

## 5 CONCLUSÕES

Está experimentalmente provada a viabilidade técnica de aplicar resíduos provenientes da extração de minério de ferro (RMF), da dragagem de hidrovias (LDP) e da produção de cal (RPC) como matérias-primas para produção de novos materiais para construção civil tipo concreto sem cimento Portland.

Os compósitos 4 (10% RMF, 60% LDP, 30% RPC) e 8 (15% RMF, 55% LDP, 30% RPC) são os que melhor atendem aos requisitos das normas brasileiras com valores de resistência à compressão axial de até 22,66 MPa e tendência de aumento de resistência com o tempo de cura.

Compósitos com maior concentração de RPC (30%) obtiveram os melhores valores de resistência.

A adição de resíduo de minério de ferro (RMF) se mostrou favorável até a concentração de 15%. Valores superiores levaram à redução da resistência das amostras.

A redução da concentração de LDP nos compósitos levou a um aumento de resistência, provavelmente devido à redução da quantidade de partículas finas nas misturas, presente na composição química do LDP.

Composições que obtiveram maiores resistências são as de maior massa específica aparente, sendo consequência direta do preenchimento de vazios por novas formações.

Os valores das propriedades físicas e mecânicas dos materiais desenvolvidos são explicados pela ocorrência de processos físico-químicos sol-gel no espaço poroso das amostras com a geração de novas formações amorfas, sua sinérese, e transições para um estado de pedra.

Os compósitos selecionados apresentam valores de lixiviação de metais abaixo do máximo estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Fato atribuído à robusta ligação química dos metais pesados em composições químicas praticamente insolúveis.

Os compósitos selecionados apresentam valores de solubilização de metais acima do máximo permitido pela NBR 10004 (ABNT, 2004) para o cádmio (Cd) e ferro (Fe).



## 6 TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se os seguintes temas como sugestão para trabalhos futuros:

- Fabricação de blocos, tijolos e placas a partir das composições desenvolvidas e avaliação das propriedades mecânicas dos produtos;
- Estudo da viabilidade econômica da fabricação dos novos materiais;
- Estudo da interação entre as partículas de cada material, visando melhorar os resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

ABPC. **Associação Brasileira dos Produtores de Cal**. São Paulo, 1959. Disponível em <<http://www.abpc.org.br/>>, acesso em setembro de 2020.

ABDEL-SHAFY, H.I.; MANSOUR, M.SM. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian journal of petroleum**, v. 27, n. 4, p. 1275-1290, 2018.

AGRELA, F.; ALAEJOS, P.; DE JUAN, M.S. Properties of concrete with recycled aggregates. In: **Handbook of recycled concrete and demolition waste**. Woodhead Publishing, 2013. p. 304-329.

AL-SAYED, M.H.; MADANY, I.M.; AL-KHAJA, W.A.; DARWISH, A.A. **Properties of asphaltic paving mixes containing hydrated lime waste**. Waste Management & Research, v. 10, p. 183-194, 2015.

ALAKUKKU, L. et al. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. **Soil and tillage research**, v. 73, n. 1-2, p. 145-160, 2003.

ALBUQUERQUE, A. S. Agregados. In: FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção**. Vol. 1. 5 ed. 63-120 p. 2012.

ALEKSEEV, K.; MYMRIN, V.; AVANCI, M.A; et al. Environmentally clean construction materials from hazardous bauxite waste red mud and spent foundry sand. **Construction and Building Materials**, v. 229, n. xxx, p. 116860, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116860>.

ALFAIA, R. G. S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management and Research**, v. 35, n. 12, p. 1195–1209, 2017.

ALVES, T. L. **Estudo da formação de incrustações inorgânicas em membranas de nanofiltração utilizadas em processos de dessulfatação**. 206 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Centro de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2006.

ANAPRE. (2009) Boletins Técnicos. Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho - ANAPRE, São Paulo, Brasil.

ANM. **Informe Mineral: Julho – Dezembro 2020**. Agência Nacional de Mineração, Brasília, abr. 2021.

APPA. **Monitoramento dos impactos da atividade de dragagem emergencial dos berços de atracação do porto de Paranaguá** Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, 2011.

\_\_\_\_\_. **Avaliação físico-química e ecotoxicológica dos sedimentos contaminados entre os portos de Paranaguá e Antonina.** Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, 2012.

\_\_\_\_\_. **Appa dá início à dragagem do porto de Antonina.** Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, 2013a.

\_\_\_\_\_. **Áreas que serão dragadas.** Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, 2013b.

ARAUJO, A. C.; AMARANTE, S.C.; SOUZA, C.C.; SILVA, R.R.R. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy**, v. 112, n. 1, p. 54-64, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6453:** Cal virgem para construção civil - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6473:** Cal virgem e cal hidratada – Análise química. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211:** Agregados para concreto — Especificação. Rio de Janeiro, 2009, versão corrigida 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776:** Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16916**: Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 16937-7**: Águas agressivas — Durabilidade do concreto Parte 7: Determinação do pH pelo método potenciométrico. Rio de Janeiro, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AZEVEDO, A.L. **Acidente em Mariana é o maior da História com barragens de rejeitos**. Jornal O Globo, Minas Gerais, 2015. Disponível em <https://oglobo.globo.com/brasil/acidente-em-mariana-o-maior-da-historia-com-barragens-de-rejeitos-18067899>, acesso em 16/09/2021.

AZEVEDO-SANTOS, V. M. et al. A dura lição com a tragédia do rio Doce. **Boletim ABLimno**, v. 42, n. 1, p. 09-13, 2016.

BASTOS, J.N. et al. Mariana's Tragedy: A Systemic Cutting. **Caderno de Geografia**, v.31, Número Especial 1, 2021

BASTOS, L. A. de C. *et al.* Using iron ore tailings from tailing dams as road material. **Journal of materials in civil engineering**, v. 28, n. 10, p. 04016102, 2016.

BELAKROUM, R. et al. Design and properties of a new sustainable construction material based on date palm fibers and lime. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 330-343, 2018.

BELLENFANT, G.; GUEZENNEC, A.G.; BODÉANAN, F.; D'HUGUES, P.; CASSARD, D. **Reprocessing of mining waste: Combining environmental management and metal recovery?** Mine Closure 2013: Proceedings of the eight international seminar on mine closure, Australian Centre for Geomechanics, p. 571-582, 2013.

BENVINDO, A. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 2010.

BEULAH, M. et al. An experimental study on utilisation of red mud and iron ore tailings in production of stabilised blocks. In: **Sustainable Civil Engineering Practices**. Springer, Singapore, 2020. p. 9-19.

BHAIRAPPANAVAR, S.; LIU, R.; SHAKOOR, A.. Eco-friendly dredged material-cement bricks. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121524, 2021.

BHATTY, J.I.; GAJDA, J. **Alternative materials: pyroprocessing**. World Cement, v. 35, n. 12, p. 41-48, 2004.

BOLFARINE, H.; SANDOVAL, M.C. **Introdução à inferência estatística**. SBM, 2001.

BOLTAKOVA, N. V.; FASEEVA, G.R.; KABIROV, R.R.; NAFIKOV, R.M.; ZAKHAROV, Y.A . Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000–2015. **Waste management**, v. 60, p. 230-246, 2017.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Conheça 12 ações do governo para enfrentar os impactos da tragédia de MG e ES**. 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=naKsSHrPU6E>. Acesso em: 10 jan. 2022.

BROWN, B.E.; LE TISSIER, M.D.A.; SCOFFIN, T.P.; TUDHOPE, A.W. Evaluation of the environmental impact of dredging on intertidal coral reefs at Ko Phuket, Thailand, using ecological and physiological parameters. **Inter-Research Science Center, Marine Ecology Progress Series**, v. 65, n. 3, p. 273-281, 1990.

BHURTEL, A.; EISAZADEH, A. Strength and durability of bottom ash and lime stabilized Bangkok clay. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 24, n. 2, p. 404-411, 2020.

CALAES, G.D. **Relatório técnico 79 - Análise-síntese da transformação mineral no país**. Projeto ESTAL, Ministério de Minas e Energia, J.Mendo Consultoria, 2009.

CAMPANHA, A. Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação. **Universidade Federal de Viçosa**, 2011.

CARVALHO, J.M.F.; FONTES, W.C.; AZEVEDO, C.F.; BRIGOLINI, G.J.; SCHMIDT, W.; PEIXOTO, R.A.F. Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120530, 2020.

CARRIJO, Priscila Meireles. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CASAGRANDE, M. C.; SARTOR, M.N.; GOMES, V.; DELLA, V.P.; HOTZA, D.; OLIVEIRA, A.D. Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 1/2, p. 34-42, 2008.

CAXITO, F.; DIAS, T.G. **Recursos minerais de Minas Gerais**: Ferro. Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais – CODEMGE, Belo Horizonte, 2018.

CECHIN, Luana et al. Ceramics composites from iron ore tailings and blast furnace slag. **Ceramics International**, 2021. Disponível em: <https://doi-org.ez22.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ceramint.2021.12.260>.

CHEN, H. et al. Fabrication of Baking-free Bricks from Iron Ore Tailings. **Current Materials Science: Formerly: Recent Patents on Materials Science**, v. 13, n. 2, p. 97-110, 2020.

CHEN, Y. et al. Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 1083-1088, 2013.

CHEN, Z. et al. Properties of dredged sludge solidified with alkali-activated slag-based materials and blended with copper slag as fine aggregates of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 312, p. 125459, 2021.

CINCOTTO, M.A. **Estudo da composição química da cal hidratada**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 1977.

CINCOTTO, M.A., QUARCIONI, V.A.; JOHN, V.M. **Cal na construção civil**. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais, São Paulo, 2007.

COELHO, G.G et al. Avaliação do impacto genotóxico de poluentes químicos presentes nos sedimentos do Rio do Sal por meio de análises de aberrações cromossômicas (AC) na espécie *Allium cepa*. Resumos do 55o **Congresso Brasileiro de Genética**. 30 de agosto a 02 de setembro de 2009. Águas de Lindóia. SP. Brasil.

CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS (Brasil). **Relatório sobre o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o Vale do Rio Doce**. Brasília, 2017. 64 p.

CONTINI, P.; SAND, P. H. Methods to expedite environment protection: International ecostandards. **American Journal of International Law**, v. 66, n. 1, p. 37-59, 1972.

COX, J.; GIORGI, S.; SHARP, V.; STRANGE, K.; WILSON, D.C.; BLAKEY, N. Household waste prevention: a review of evidence. **Waste Management and Research**, v. 28, n. 3, p. 193-219, 2010.

CYR, M. et al. Recycling waste in cement-based materials: a studying methodology. In: **RILEM Proceedings of the Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, Spain**. 2004. p. 306-315.

DA SILVA, C. B.; DE PAIVA, P. R. P. Artificial stone production using iron ore tailing (IOT). **Cerâmica**, v. 66, p. 164-171, 2020.

DA SILVA, D.L.; FERREIRA, M.C.; SCOTTI, M.R. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, v. 24, n. 1-2, 2015.

DA SILVA, F. L. et al. Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. **Ceramics International**, v. 40, n. 10, p. 16085-16089, 2014.

DE CASTRO, L.; DE ALMEIDA, E. Desastres e desempenho econômico: avaliação do impacto do rompimento da barragem de Mariana. **Geosul**, v. 34, n. 70, p. 406-429, 2019.

DNPM. **Sumário Mineral Brasileiro: 2018**. Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 2018.

DO, H.S.; MUN, P.H.; KEUN, R.S. A study on engineering characteristics of asphalt concrete using filler with recycled waste lime. **Waste Management**, v. 28, n. 1, p. 191-199, 2008.

DOLAR, D.; KOŠUTIĆ, K.; STRMECKY, T. Hybrid processes for treatment of landfill leachate: Coagulation/UF/NF-RO and adsorption/UF/NF-RO. **Separation and Purification Technology**, v. 168, p. 39-46, 2016.

DOWLING, A.; O'DWYER, J.; ADLEY, C.C. Lime in the limelight. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 13-22, 2015.

DUNSTER, A. **The use of recycled and secondary materials in residential construction**. Milton Keynes: NHBC Foundation; 2012.

ESPINDOLA, H.S., NODARI, E.S., SANTOS, M.A. dos. Rio Doce: riscos e incertezas a partir do desastre de Mariana (MG). **Revista Brasileira de História**, v. 39, n. 81, p. 141-162, 2019.

EUGÊNIO, T.M.C. et al. Study on the feasibility of using iron ore tailing (iot) on technological properties of concrete roof tiles. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122484, 2021.

FALESCHINI, F.; ZANINI, M.; PELLEGRINO, C. Environmental impacts of recycled aggregate concrete. **Proceedings of the Italian Concrete Days—Giornate Aicap**, 2016.

FERREIRA, H.; LEITE, M. G. P. A Life Cycle Assessment study of iron ore mining. **Journal of cleaner production**, v. 108, p. 1081-1091, 2015.

FISCHER, H. **X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)– Basics**. Disponível em: <https://xrf-spectroscopy.com/>. Acesso em 08/01/2022.

FONTES, W.C. et al. Assessment 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. et al. Hydraulic Tiles Produced with Fine Aggregates and Pigments Reclaimed from Iron Ore Tailings. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 7, n. 1, p. 151-165, 2021.

FREITAS, C.M. et al. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, 2019.

FREITAS, J.A.; ARTIGAS, L.V. (2019) A estrutura do concreto [PowerPoint de apoio à disciplina de Materiais de Construção, lecionada na UFPR, PPGEC].

GALVÃO, E.S. et al. Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure. **Chemosphere**, v. 257, p. 127184, 2020.

GALVÃO, J.L.B. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 412-422, 2018.

GARCIA, A. **Inspeção geral do ambiente e do ordenamento do território**. Setor de fabricação de cimento e cal, Lisboa, 2008.

GUIMARÃES, J.E.P. **A cal: Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. Pini, 1997.

GUPTA, B. K.; KAPOOR, K.; NAZEER, M.; KAUR, M. Waste Plastic Aggregates as a Replacement of Natural Aggregates. In: **Sustainable Environment and Infrastructure**. Lecture Notes in Civil Engineering, v. 90, p. 249-258, 2021.

IBAMA, **Relatório técnico sobre os impactos da ruptura da barragem de Fundão, Mariana, MG**, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Brasília, 2015.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Nota Técnica. Os pescadores da bacia do rio Doce: Subsídios para a mitigação dos impactos socioambientais do desastre da Samarco em Mariana, Minas Gerais, 2016. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=27809:nota-tecnica-2016-maio-numero-11-dirur-os-pescadores-da-bacia-do-rio-doce-subs%20idios-para-a-mitigacao-dos-impactos-socioambientais-do-desastre-da-samarco-em-mariana-minas-gerais&catid=19%200:dirur&directory=1](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=27809:nota-tecnica-2016-maio-numero-11-dirur-os-pescadores-da-bacia-do-rio-doce-subs%20idios-para-a-mitigacao-dos-impactos-socioambientais-do-desastre-da-samarco-em-mariana-minas-gerais&catid=19%200:dirur&directory=1)  
Acesso em: 10/01/2022.

JASKOWSKA-LEMANSKA, J. Impurities of recycled concrete aggregate-types, origin and influence on the concrete strength parameters. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 042056.

KANASHIRO, A.M.; XIE, J. Evaluation of Chemical Properties of Dredged Materials, Paranagua Port, Brazil, according to Dredging Legislation CONAMA 454/2012. **Journal on Innovation and Sustainability RISUS**, v. 7, n. 3, p. 90-102, 2016.



KENAI, S. Recycled aggregates. In: **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**. Woodhead Publishing, 2018. p. 79-120.

KIM, T.H.; CHAE, C.U. Environmental impact analysis of acidification and eutrophication due to emissions from the production of concrete. **Sustainability**, v. 8, n. 6, p. 578, 2016.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M.G.; HUDSON-EDWARDS, K. A. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, p. 229-245, 2014.

KRIVENKO, P.; KOVALCHUK, O.; BOIKO, O. Practical experience of construction of concrete pavement using non-conditional aggregates. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012089.

KURANCHIE, F. A. et al. Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete. **Cogent Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1083137, 2015.

LAKOWICZ, J.R. **Principles of fluorescence spectroscopy**. Boston, MA: springer US, 2006.

LEE, Myeongkyu. **X-Ray diffraction for materials research: from fundamentals to applications**. CRC Press, 2017.

LEME, M. M. V.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O.J.; LOPES, B.M.; FERREIRA, C.H. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 8–20, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003>

LI, L. et al. The influence of temperature and SiC content on the recycling of iron ore tailings for the preparation of value-added foam ceramics. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, n. 1, p. 330-340, 2021.

LI, X.; ZHANG, Q.; MAO, S. Investigation of the bond strength and microstructure of the interfacial transition zone between cement paste and aggregate modified by Bayer red mud. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, n. April 2020, p. 123482, 2021. Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123482>.

LIM, Yee Cheng et al. Recycling dredged harbor sediment to construction materials by sintering with steel slag and waste glass: Characteristics, alkali-silica reactivity and metals stability. **Journal of environmental management**, v. 270, p. 110869, 2020.

LIM, Yee Cheng et al. Application of Basic Oxygen Furnace Slag in Increased Utilization of Dredged Harbor Sediment. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 7, n. 2, p. 704-717, 2021.

LIMA, C. S. **O efeito da calcinação na qualidade do produto final do processo de produção da cal**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Mineração) Universidade Federal do Pampa. 2016.

LIMA, R.M.F.; LOPES, G.M.; GONTIJO, C.F. Aspectos mineralógicos, físicos e químicos na flotação catiônica inversa de minério de ferro de baixos teores, do Quadrilátero Ferrífero – MG. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 8, n. 2, p. 126-131, 2011.

LIU, H.; PROBST, A.; LIAO, B. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). **Science of the Total Environment**, v. 339, n. 1-3, p. 153-166, 2005.

LIU, W.Y.; XU, X.L.; AN, Y.Y. Study on the sprayed concrete with iron tailings. **Advanced Materials Research**, v. 347–353, p. 1939–1943, 2012.

LOPES, L.M.N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Sinapse Múltipla**, v. 5, n. 1, p. 1-1, 2016.

LOTTERMOSER, B.G. **Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts**. Berlin, 2007.

LUO, L.; ZHANG, Y.; BAO, S.; CHEN, T. Utilization of iron ore tailings as raw material for portland cement clinker production. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, 2016.

LUZ, A. B. da; LINS, FREITAS, F. A. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ, A. B. da; FRANÇA, S. C. A; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de minérios**. 6 ed. Rio de Janeiro: CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2018. p. 3-26.

MA, B.; CAI, L.; LI, X.; JIAN, S. Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products. **Journal of Cleaner Production**, v. 127 p. 162-171, 2016.

MACHADO, E.; OLIVEIRA, D.; MACHADO, E.; et al. Study of the incorporation of fabric shavings from the clothing industry in coating mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123730, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123730>.

MAIERDAN, Y.; HAQUE, M. A.; CHEN, B.; MAIMAITIYIMING, M.; AHMAD, M. R. Recycling of waste river sludge into unfired green bricks stabilized by a combination of phosphogypsum, slag, and cement. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 120666, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120666>.

MANNHEIMER, W.A. **Microscopia dos materiais: uma introdução**. Editora E-papers, 2002.

MEE - MATERIALS EVALUATION AND ENGINEERING, INC. Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). In: **Handbook of analytical methods for materials**. Plymouth, MN, p. 15-16, 2016.

MENDES, B.C. et al. Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116669, 2019.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and concrete composites**, v. 31, n. 8, p. 601-605, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>.

MILAGRES, Eduardo Araújo. Retração e secagem do concreto: estudo da retração do concreto e o aparecimento de patologias. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - . **Boletim do setor mineral: 2020**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Brasília, out. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos: 2020**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Brasília, jan. 2021.

MONTEIRO, A.M. **Estudo das técnicas de disposição de sedimentos contaminados de dragagem**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2010.

MYMRIN, V.A. **The theoretical basis for the resistance strengthening of clay soils dump slags ferrous metallurgy to create the foundations of roads**. Thesis (Diss Dr Geol Miner Sci), Moscow State University (MGU), Lomonosov, Moscow, 1987.

MYMRIN, V.; PONTE, H.A.; IMPINNISI, P.R. Potential application of acid jarosite wastes as the main component of construction materials. **Construction and building materials**, v. 19, n. 2, p. 141-146, 2005.

MYMRIN, V.; CORRÊA, S.M. New construction material from concrete production and demolition wastes and lime production waste. **Construction and Building materials**, v. 21, n. 3, p. 578-582, 2007.

MYMRIN, Vsévolod A. et al. Hazardous phosphor-gypsum chemical waste as a principal component in environmentally friendly construction materials. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, n. 4, p. 2611-2618, 2015.

MYMRIN, Vsévolod A. et al. Microstructure and mechanical properties of cementless construction materials from thermal engineering wastes. **Applied Thermal Engineering**, v. 81, p. 185-192, 2015.

MYMRIN, V. et al. Utilization of sediments dredged from marine ports as a principal component of composite material. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 4041-4049, 2017.

MYMRIN, V. et al. Efficient road base material from Kazakhstan's natural loam strengthened by ground cooled ferrous slag activated by lime production waste. **Journal of cleaner production**, v. 231, p. 1428-1436, 2019a.

MYMRIN, V. et al. Structure formation processes of sustainable construction material from hazardous sewage sludge with additions of wood ash, and lime production waste. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 12, p. 5191-5201, 2019b.

MYMRIN, Vsevolod et al. Characterization of construction materials on the base of mortar waste, activated by aluminum anodization sludge and lime production waste. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 202-209, 2019c.

MYMRIN, Vsevolod et al. Overburden soil and marine dredging sludge utilization for production of new composites as highly efficient environmental management. **Journal of environmental management**, v. 236, p. 206-213, 2019d.

MYMRIN, V. et al. Sustainable material manufacturing from hazardous bauxite red mud in composites with clay slate waste and lime production waste. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 111, n. 5, p. 1375-1385, 2020.

MYMRIN, V. et al. Physical-chemical processes of sustainable construction materials structure formation with iron ore processing tailings and aluminum anodizing sludge. **Construction and Building Materials**, v. 298, p. 123698, 2021a.

MYMRIN, V. et al. Environmentally clean materials from contaminated marine dredged sludge, wood ashes and lime production wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 307, p. 127074, 2021b.

MYMRIN, V. et al. Manufacturing and properties of composite material from demolition debris, plaster waste, and lime production waste to decrease ecological problems of cities. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 115, n. 11, p. 3441-3451, 2021c.

MYMRIN, Vsevolod et al. Material cycle realization by hazardous phosphogypsum waste, ferrous slag, and lime production waste application to produce sustainable construction materials. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, n. 2, p. 591-603, 2021d.

NETO, G. C.; COELHO, F. M. A importância do correto adensamento do concreto e seu impacto na resistência final da peça. **Projectus**, v. 1, n. 4, p. 17-30, 2017.

NGO, P.D. Energy dispersive spectroscopy. In: **Failure Analysis of Integrated Circuits**. Springer, Boston, MA, 1999. p. 205-215.

NODEHI, Mehrab; TAGHVAEE, Vahid Mohammad. Applying Circular Economy to Construction Industry through Use of Waste Materials: A Review of Supplementary Cementitious Materials, Plastics, and Ceramics. **Circular Economy and Sustainability**, p. 1-34, 2022.

OATES, J.A.H. **Lime and limestone: Chemistry and technology, production and uses**, John Wiley & Sons, Weiheim, 2008.

OLIN-ESTES, T.J.; PALERMO, M.R. Recovery of dredged material for beneficial use: the future role of physical separation processes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 85, n. 1-2, p. 39-51, 2001.

OLIVEIRA, D. D. de; ROJAS, E. G.; FERNANDEZ, M. A. dos S. Should TBT continue to be considered an issue in dredging port areas? A brief review of the global evidence. **Ocean & Coastal Management**, v. 197, p. 105303, Nov. 2020.

OLIVEIRA, E.M.; OLIVEIRA, E.M.; OLIVEIRA, C.M.; DAL-BÓ, A.G.; PETERSON, M. Study of the incorporation of fabric shavings from the clothing industry in coating mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123730, 2021.

OLIVEIRA, J.S; AQUINO, A.D., KLITZKE, W. (2009) Óxido de cálcio [PowerPoint de apoio à disciplina de Processos Inorgânicos I, lecionada na UFPR, PPGEQ]. Disponível em: [https://docs.ufpr.br/~gazda/oxi\\_ca.htm](https://docs.ufpr.br/~gazda/oxi_ca.htm)

OLIVEIRA, M.A.N. et al. Evolução do Processo de Carbonatação em Argamassas de Cal Aérea. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 2021.

PAPPU, A.; SAXENA, M.; ASOLEKAR, S.R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials. **Building and environment**, v. 42, n. 6, p. 2311-2320, 2007.

PEDROSO, D.E. **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil**. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

PEIXOTO, S.V.; ASMUS, C.I.R.F. O desastre de Brumadinho e os possíveis impactos na saúde. **Ciência e Cultura**, v. 72, n. 2, p. 43-46, 2020.

PENG, L.; CHEN, B. Mechanical behavior, durability, thermal performances and microstructure of GGBFS–Modified MPC solidified dredged sludge. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124557, 2021.

PENG, X. et al. Preparation of non-sintered lightweight aggregates from dredged sediments and modification of their properties. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 9-20, 2017.

PETTIJOHN, F.J. **Rocas Sedimentárias**. 3ª ed., Buenos Aires: Edigraf, p. 419-420, 1975.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de construção**. 2ª ed., Porto Alegre: Editora Globo, p. 270, 1979.

QUARCIONI, V.A. **Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland – Estudo em pasta**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ROUAIGUIA, I. et al. Valorization of waste rocks from Boukhadra iron ore mine for better environmental management. **Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk**, n. 6, p. 60-67, 2017.

SAFIUDDIN, Md et al. Utilization of solid wastes in construction materials. **International journal of physical sciences**, v. 5, n. 13, p. 1952-1963, 2010.

SCHOENBERGER, E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. **Resources Policy**, v. 49, p. 119-128, 2016.

SHARMA, S. et al. Critical review on the Solid-wastes issue: Generation, Composition, Disposal and their recycling potential for various applications. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2021. p. 012147.

SHEN, W., LIU, Y., YAN, B. et al. Cement industry of China: driving force, environment impact and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 618-628, 2017.

SHETTIMA, A.U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72-79, 2016.

SHETTIMA, A. U. et al. Strength and microstructure of concrete with iron ore tailings as replacement for river sand. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2018. p. 01003.

SHI, J.; TAN, J.; LIU, B.; et al. Experimental study on full-volume slag alkali-activated mortars : Air-cooled blast furnace slag versus machine-made sand as fine aggregates. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, p. 123983, July 2021. Elsevier B.V. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123983>.

SHOUBI, M.V.; BAROUGH, A.S.; AMIRSOLEIMANI, O. Assessment of the roles of various cement replacements in achieving the sustainable and high performance concrete. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**, v. 6, n. 1, p. 68, 2013.

SIHAM, K. et al. Marine dredged sediments as new materials resource for road construction. **Waste management**, v. 28, n. 5, p. 919-928, 2008.

SILVA, A.P.M.; VIANA, J.P.; CAVALCANTE, A.L.B. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Relatório de Pesquisa, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012.

SINGH, Ranjeet Kumar et al. Utilization of Iron Ore Tailings for Brick Manufacture from Donimalai Mines of Karnataka, India. **Journal of Scientific and Industrial Research**, v. 80, n. 3, p. 210-220, 2021.

SKRZYPCZAK, I. et al. Environmental aspects and renewable energy sources in the production of construction aggregate. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2017. p. 00160.

SLOTTE, M.; ROMÃO, I.; ZEVENHOVEN, R. Integration of a pilot-scale serpentinite carbonation process with an industrial lime kiln. **Energy**, v. 62, p. 142-149, Finlândia, 2013.

SNISB. **SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS** – Relatório de Segurança de Barragens 2018. Brasília, 2019. Disponível em <https://www.snisb.gov.br/>, acesso em 04/10/2020.

SOBOTKA, A. et al. Management of reverse logistics supply chains in construction projects. **Procedia engineering**, v. 208, p. 151-159, 2017.

SOLOMONS, I. Mine tailings recovery can be value generator, says Council for Geoscience. **Mining Weekly**, 2017. Disponível em <https://www.miningweekly.com/login.php?url=/article/mine-tailings-recovery-can-be-value-generator-reduces-enviro-impact-2017-06-09>, acesso em 04/10/2020.

SOUZA, S. N. M. de; HORTTANAINEN, M.; ANTONELLI, J.; KLAUS, O.; LINDINO, C.A.; NOGUEIRA, C.E.C. Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment. **Waste Management and Research**, v. 32, n. 10, p. 1015–1023, 2014.

SPE - SOCIEDADE PORTUGUESA DE ESTATÍSTICA. Associação Brasileira de Estatística. **Glossário inglês-português de estatística**, 2011.

STROEVEN, P.; VU, D.D.; BUI, D.D.; DONG, A.V. **Research on cementitious materials to promote sustainable developments in Vietnam**. Proceedings First International Conference on Concrete and Development C and D 1, p. 583-593, 2001.

TEH, S.H. et al. Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymers in Australia. **Journal of cleaner production**, v. 152, p. 312-320, 2017.

TEIXEIRA, Paulo César et al. pH do solo. In: \_\_\_\_\_. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017. p. 199-202.

UCHECHUKWU, E. A.; EZEKIEL, M. J. Evaluation of the iron ore tailings from Itakpe in Nigeria as concrete material. **Advances in Materials**, v. 3, n. 4, p. 27-32, 2014.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. **Padrões UTFPR para elaboração de trabalhos acadêmicos e científicos**. Curitiba, 2018. 258 p.

USGS - US GEOLOGICAL SURVEY. Minerals yearbook. **National Minerals Information Centre**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mybvl>.

VARRIALE, A.M.C.; CREMA, R.; GALLETTI, M.C.; ZUNARELLI, R.V. Environmental impact of extensive dredging in a coastal marine area. **Marine Pollution Bulletin**, v. 16, n. 12, p. 483-488, 1985.

WALACH, D. et al. Environmental performance of ordinary and new generation concrete structures—a comparative analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 4, p. 3980-3990, 2019.

WALACH, D. Analysis of factors affecting the environmental impact of concrete structures. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 204, 2021.

WANG, C.; HARBOTTLE, D.; LIU, Q.; XU, Z. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. **Minerals Engineering**, v. 58, p. 113-131, 2014.

WANG, H. et al. Mechanical behavior of fiber-reinforced, chemically stabilized dredged sludge. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 79, n. 2, p. 629-643, 2020.

WEI, Yu-Ling; WENG, Shao-Di; XIE, Xiang-Qi. Reduction of sintering energy by application of calcium fluoride as flux in lightweight aggregate sintering. **Construction and building materials**, v. 190, p. 765-772, 2018.

WILLIAMS, D. **Tailings storage facilities**. In: Gold Ore Processing: Project Development and Operations, 2<sup>a</sup> ed., p. 663-676, Cingapura: Elsevier, 2016.

YELLISHETTY, M.; KARPE, V.; REDDY, E.H.; SUBHASH, K.N.; RANJITH, P.G. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 11, p. 1283-1289, 2008.

YOZZO, D.J.; WILBER, P.; WILL, R.J. Beneficial use of dredged material for habitat creation, enhancement, and restoration in New York-New Jersey Harbor. **Journal of Environmental Management**, v. 73, n. 1, p. 39-52, 2004.

ZENTAR, R.; WANG, H.; WANG, D. Comparative study of stabilization/solidification of dredged sediments with ordinary Portland cement and calcium sulfo-aluminate cement in the framework of valorization in road construction material. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122447, 2021.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultrahigh performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540-548, 2014.

ZUCCHERATE, A.C.V.; FREIRE, C.B.; LAMEIRAS, F.S. Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethylthephtalate. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 859-865, 2017.