



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Rayanne de Jesus Andrade Fidelis

**INCORPORAÇÃO DE REJEITO MAGNÉTICO EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS**

Belo Horizonte/MG

Junho/2023

Rayanne de Jesus Andrade Fidelis

**INCORPORAÇÃO DE REJEITO MAGNÉTICO EM COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra.

Coorientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.

Belo Horizonte/MG

Junho/2023

RESUMO

As últimas décadas foram marcadas por estudos e pesquisas que tiveram como principais objetivos o aproveitamento de resíduos industriais pela construção civil, destacando entre esses materiais os resíduos gerados pelas atividades de mineração. São perceptíveis avanços na descoberta de tecnologias capazes de contribuir com a sustentabilidade da construção civil, abrangendo inclusive o conceito de economia circular. Estudos recentes mostram resultados satisfatórios na utilização de rejeitos provenientes do beneficiamento de minérios na incorporação em compósitos à base de cimento Portland. Este trabalho avaliou a influência do uso de rejeito magnético nas propriedades físicas e químicas dos compósitos cimentícios produzidos. O material utilizado trata-se de um rejeito magnético rico em magnetita (Fe_3O_4) proveniente do beneficiamento de minério de nióbio. A pesquisa conta com uma avaliação do uso de rejeito magnético como material ultrafino para adição em cimento Portland. Foram realizados ensaios de caracterização desse material, seguido do desenvolvimento de compósitos cimentícios. Os compósitos cimentícios foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, absorção de água, porosidade, densidade aparente e ataque ácido. As misturas com adição de 2% de rejeito magnético diminuiu o valor médio de absorção de água, já o índice de vazios não variou significativamente em relação aos corpos de prova de referência. A adição de 2% e 4% de magnetita influenciaram positivamente na resistência à compressão. Em todas as idades o acréscimo de 2% foi o que obteve as maiores médias de resistência. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade para a adição de magnetita em argamassas cimentícias. A incorporação de até 4% de magnetita influenciou positivamente nas propriedades estudadas, além de agregar valor ao resíduo sem finalidade, promovendo ganhos ambientais. Com isso, enfatiza-se a necessidade de investigar cada vez mais o emprego da magnetita em compósitos cimentícios, visto que pode acarretar diversas vantagens, principalmente o ganho em propriedades físicas e mecânicas, além de reduzir os impactos ambientais causados pela deposição desses materiais no meio ambiente.

Palavras-chaves: Magnetita; Matrizes Cimentícias; Cimento Portland.

ABSTRACT

The last few decades were marked by studies and research whose main objectives were the use of industrial waste by civil construction, highlighting among these materials the waste generated by mining activities. Advances in the discovery of technologies capable of contributing to the sustainability of materials, processes, and construction practices are noticeable, aiming to increase the materials life cycle and reduce the amount of waste deposited in piles, contributing to a reduction in the need for extraction of aggregates. Recent studies show satisfactory results in the use of tailings from mineral processing in the incorporation into Portland cement-based composites. This work evaluated the influence of the use of magnetic waste on the physical and chemical properties of the cementitious composites produced. The material used is a magnetic waste rich in magnetite (Fe_3O_4) from niobium ore processing. The research has an evaluation of the use of magnetic waste as an ultrafine material for addition in Portland cement. Characterization tests of this material were performed, followed by the development of cementitious composites. The cementitious composites were submitted to tests of compressive strength, water absorption, porosity, bulk density and acid attack. The mixtures with addition of 2% of magnetic waste decreased the average value of water absorption, since the index of voids did not vary significantly in relation to the reference specimens. The addition of 2% and 4% of magnetite positively influenced the compressive strength. In all ages the increase of 2% was the one that obtained the highest average of resistance. The results confirm the feasibility for the addition of magnetite in cement mortars. The incorporation of up to 4% of magnetite positively influenced the studied properties, besides adding value to the waste without purpose, promoting environmental gains. Thus, it is emphasized the need to increasingly investigate the use of magnetite in cementitious composites, since it can cause several advantages, especially the gain in physical and mechanical properties, environmental impacts caused by the deposition of these materials in the environment.

Keywords: Magnetite; Cementitious Matrices; Portland cement.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força e por guiar meus passos para construir esse trabalho.

Aos meus amados pais, Raymundo e Vera, que sempre se doaram e abriram mão de muitos dos seus sonhos para viverem os meus. Por todo carinho suporte e por sempre me apoiar nas minhas decisões. Obrigada por acreditarem na minha capacidade e por confiarem em mim. Também agradeço à minha irmã, Rayssa, que sempre esteve ao meu lado.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra, pelo conhecimento compartilhado, paciência, dedicação e confiança depositada em mim e no meu trabalho.

Ao meu coorientador Dr. Prof. Domingos Sávio de Resende pela atenção e suporte.

À Rosângela e a sua família, pela amizade, carinho e por sempre acreditarem em mim.

Ao Kaio, pelo companheirismo e apoio. A todos os meus amigos, especialmente ao Thiago e a Kely, pelo companheirismo e confiança em mim. A todos os meus familiares pelo carinho de sempre.

Aos meus amigos e colegas de mestrado, Mariana, Pamella e Gabriel, pelo apoio e experiência compartilhada.

Aos meus colegas de laboratório, em especial ao Richard pela paciência e auxílio nos ensaios laboratoriais.

Aos professores que tive, pela dedicação e ensinamentos.

A todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram a alcançar esta conquista.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura cristalina da magnetita.	22
Figura 2: Materiais usados no estudo do emprego de rejeito magnético como material ultrafino em argamassas de cimento Portland.....	55
Figura 3: Curva granulométrica do rejeito magnético moído proveniente do beneficiamento de minério de nióbio.	57
Figura 4: Difração de Raio X do rejeito magnético.	57
Figura 5: Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do rejeito magnético gerado durante o beneficiamento de minério de nióbio.	58
Figura 6: Resultado ensaio de absorção de água (A) e índice de vazios (Iv). .	61
Figura 7: Resultado ensaio de massa específica real.	61
Figura 8: Resultado ensaio de ataque ácido.	64
Figura 9: Resultado ensaio de resistência à compressão.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos métodos de síntese de nanoestruturas de magnetita.....	25
Tabela 2: Propriedades físicas e químicas do cimento Portland.....	55
Tabela 3: Composição de óxidos do rejeito magnético.....	57
Tabela 4: Proporções dos componentes das misturas de argamassas.....	58
Tabela 5: Análise de variância	62
Tabela 6: Teste de Tukey para absorção de água.....	62
Tabela 7: Teste de Tukey para índice de vazios.....	62
Tabela 8: Teste de Tukey para massa específica real.....	63
Tabela 9: Análise de variância para ataque ácido.....	64
Tabela 10: Análise de variância para resistência à compressão.....	66
Tabela 11: Teste de Tukey para resistência à compressão.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIFs	<i>Banded Iron Formations</i>
CP	Corpos de Provas
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de Raios X
GEE	Gases de Efeito Estufa
FT- IR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
MEV	Microscopia de Varredura Eletrônica
NBR	Norma Brasileira
TC	Temperatura de Curie
TFFI	<i>Transformation of Ferrous to Ferric Iron</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO GERAL	10
1 Introdução e Justificativa.....	10
2 Objetivos	13
2.1. Objetivo Geral	13
2.2. Objetivos Específicos.....	13
3 Estrutura do trabalho	13
4 Referências Bibliográficas.....	13
CAPÍTULO II - MAGNETITA: PROPRIEDADES E APLICAÇÕES – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
1 Introdução	16
2 Formação e Ocorrência da Magnetita	18
3 Propriedades.....	20
3.1. Propriedades Estruturais e Magnéticas.....	21
4 Nanomagnetita Sintética	23
5 Aplicações da Magnetita	25
5.1. Nanomedicina	26
5.2. Ambiental	29
5.3. Aplicação de Magnetita em Compósitos Cimentícios	32
6 Considerações Finais.....	35
7 Referências Bibliográficas.....	36
CAPÍTULO III - APLICAÇÃO DE REJEITO MAGNÉTICO COMO MATERIAL ULTRAFINO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND	53
1 Introdução	53
2 Materiais e Métodos.....	55
3 Referências Bibliográficas.....	68
CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES FINAIS	70

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO GERAL

1 Introdução e Justificativa

A indústria da construção civil possui grande relevância para o desenvolvimento econômico e social de um país, visto que oferece grandes oportunidades de emprego direta ou indiretamente, além de influenciar no processo de urbanização. Entretanto, esse setor comporta-se como gerador de impactos ambientais negativos, ressaltando o elevado consumo de recursos naturais (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018; WANG et al., 2018). Assim, a busca crescente pela economia de recursos naturais, diminuição do consumo de energia, pelo aumento da produtividade e da responsabilidade social em todos os processos estimula a indústria da construção a explorar soluções mais eficientes e sustentáveis (CARVALHO et al., 2019).

Nas últimas décadas, o progresso no setor industrial acarretou o aumento significativo na quantidade e nos tipos de resíduos sólidos (BARBUTA et al., 2015). O descarte de vários desses materiais, juntamente com os graves impactos ambientais e sociais ocasionados principalmente pela sua disposição, vem se tornando desafiador. Dentre tais desafios, é importante destacar a necessidade de grandes extensões de área para a disposição e as dificuldades envolvidas na estabilidade a longo prazo. A maioria desses resíduos não possui uso específico, o que torna relevante o estabelecimento de processos de reciclagem ou de formas de reaproveitamento desses materiais a fim de minimizar os impactos ambientais (GADEA et al., 2010).

Na linha de aproveitamento de materiais, salienta-se que a incorporação de resíduos em um ciclo produtivo representa não apenas uma alternativa de produção mais barata, mas uma possibilidade de reciclagem e reutilização desses materiais, sendo estas possibilidades interessantes tanto no aspecto ambiental quanto no econômico. Nesse cenário, a economia circular torna-se importante, visto que se trata de um sistema econômico baseado em modelos de negócios que substituem o conceito de 'fim de vida' por reduzir, reutilizar,

reciclar e recuperar materiais em processos de produção/distribuição e consumo (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).

Dessa forma, com o reaproveitamento de resíduos pela construção civil, o ciclo no processo de produção é mantido, ao mesmo tempo que confere uma proteção para as empresas contra a escassez de recursos e preços instáveis, criando oportunidades de negócios inovadores e métodos eficazes de produção e consumo (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; WITJES; LOZANO, 2016). Os desafios estão na mudança da mentalidade das partes interessadas do setor para uma produção mais limpa de matérias-primas, seguindo modelos de construção circular e superando problemas técnicos, como preço, barreiras legais e regulamentações, onde pode haver uma baixa disponibilidade/aceitação do mercado para estas soluções obtidas com a construção circular (SIEFFERT; HUYGEN; DAUDON, 2014). Cabe ao governo e organizações contribuírem para que esta mudança entre as partes interessadas da indústria da construção ocorra da melhor forma possível, permitindo que enxerguem grandes possibilidades e sigam estratégias para um processamento e reutilizações mais sustentáveis de materiais/produtos (AJAYI; OYEDELE, 2017).

Atualmente, existe uma procura constante pelo aproveitamento de resíduos industriais pela construção civil, com destaque na pesquisa e busca de tecnologias que possam contribuir com a sustentabilidade dos processos e práticas de construção (AWOYERA; ADESINA, 2020; LUHAR; LUHAR, 2019). Estudos apontam que grande parte dos resíduos gerados nos diversos setores da economia pode ser reciclada, reutilizada, transformada e incorporada na indústria da construção civil, produzindo novos materiais de construção.

Exemplos de materiais de construção que possam receber resíduos industriais provenientes de outros setores econômicos são os materiais cimentícios. Esses materiais de construção podem receber adições minerais, com a finalidade de proporcionar melhorias nas propriedades físicas e mecânicas do material, por exemplo, inibir o ingresso de água, diminuir o calor de hidratação, refinar a estrutura de poros, tornar o concreto mais resistente ao ataque de cloretos e sulfatos etc. (RAISDOSFER, 2015).

Dentre as atividades responsáveis pela movimentação de grandes volumes de resíduos e subprodutos encontra-se a mineração. Esse setor produz anualmente, em todo mundo, aproximadamente 25 bilhões de toneladas de resíduos sólidos (estéreis e rejeitos). Durante a última década, observou-se a crescente necessidade de encontrar soluções eficazes e sustentáveis para a gestão de resíduos produzidos nas minerações. A reutilização desses materiais pode acarretar diminuição no volume e disposição superficial, levando à redução de custos de gerenciamento e mitigação de passivos ambientais (BENARCHID et al., 2018).

Como o setor da construção sempre mostrou capacidade de absorver grande quantidade de materiais alternativos, uma ampla gama de resíduos de atividades de mineração está sendo investigada para sua viabilidade de reciclagem. Por exemplo, alguns estéreis e rejeitos são objetos de pesquisas que têm em vista o aproveitamento destes materiais em cimentos, argamassas e concretos como adições (MAGALHÃES et al., 2020; MORAIS et al., 2020; SIDDIQUE; JANG, 2020), agregados para a construção civil (BENARCHID et al., 2018; JU et al., 2017) e agregados para pavimentação (GAUTAM et al., 2018; TENZA-ABRIL et al., 2019).

Considerando esse cenário, destaca-se a mineração de nióbio em complexos carbonatíticos alcalinos com elevados volumes de óxidos de ferro aos minerais de interesse, que geralmente gera uma quantidade significativa de rejeitos magnéticos compostos majoritariamente por magnetita (Fe_3O_4). Via de regra, esse rejeito é encaminhado, por bombeamento, para barragens de contenção, podendo eventualmente, promover impactos ambientais negativos. Objetivando encontrar uma destinação sustentável para esse rejeito magnético, essa pesquisa avaliou a incorporação desse material em compósitos cimentícios

2 Objetivos

2.1. Objetivo Geral

A presente proposta tem como objetivo geral avaliar a influência do uso do rejeito magnético nas propriedades físicas e químicas dos compósitos cimentícios.

2.2. Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos da presente proposta estão:

- Apresentar, de forma clara e objetiva, o estado da arte do uso da magnetita (sintética ou natural) em compósitos cimentícios, focando nas propriedades influenciadas e nas lacunas do conhecimento para essa aplicação;
- Avaliar o uso de rejeito magnético do processo de mineração do nióbio como material ultrafino para adição em cimento Portland.

3 Estrutura do trabalho

Para cumprir os objetivos propostos, este trabalho encontra-se dividido em quatro capítulos, incluindo esta introdução geral. Cada capítulo seguinte foi produzido em formato de artigos individuais. O Capítulo II apresenta um artigo de revisão da literatura a respeito da magnetita, visto que é o mineral em maior quantidade no rejeito magnético em estudo. O Capítulo III sugere a aplicação do rejeito magnético como material ultrafino para adição em argamassas de cimento Portland. Por último, o Capítulo IV traz as considerações finais.

4 Referências Bibliográficas

AJAYI, S. O.; OYEDELE, L. O. Policy imperatives for diverting construction waste from landfill: Experts' recommendations for UK policy expansion. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 57–65, 2017.

AWOYERA, P. O.; ADESINA, A. Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00330, 2020.

BARBUTA, M. et al. Wastes in Building Materials Industry. **Agroecology**, n. May 2016, 2015.

BENARCHID, Y. et al. Application of Quebec recycling guidelines to assess the

use feasibility of waste rocks as construction aggregates. **Resources Policy**, v. 59, n. January, p. 68–76, 2018.

CARVALHO, J. M. F. DE et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397–409, 2019.

GADEA, J. et al. Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 672–677, 2010.

GAUTAM, P. K. et al. Laboratory investigations on hot mix asphalt containing mining waste as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 143–152, 2018.

JU, W. J. et al. Environmental compatibility of lightweight aggregates from mine tailings and industrial byproducts. **Metals**, v. 7, n. 10, 2017.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, n. April, p. 221–232, 2017.

LUHAR, S.; LUHAR, I. Potential application of E-wastes in construction industry: A review. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 222–240, 2019.

MAGALHÃES, L. F. DE et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123260, 2020.

MORAIS, C. F. et al. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, n.268, p. 121073, 2021.

RAISDORFER, J.W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: Efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos**. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

SIDDIQUE, S.; JANG, J. G. Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 31, n. November 2019, p. 101322, 2020.

SIEFFERT, Y.; HUYGEN, J. M.; DAUDON, D. Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering-architecture collaboration. **Journal of Cleaner Production**, v. 67, p. 125–138, 2014.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

TENZA-ABRIL, A. J. et al. Effects of using mine tailings from La Unión (Spain) in hot bituminous mixes design. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 2, 2019.

WANG, H. et al. Application of wall and insulation materials on Green building: A review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 9, 2018.

WITJES, S.; LOZANO, R. Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 112, p. 37–44, 2016.

CAPÍTULO II - MAGNETITA: PROPRIEDADES E APLICAÇÕES – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 Introdução

A magnetita (Fe_3O_4) é um mineral ferrimagnético que apresenta ferro em dois estados de oxidação, Fe^{2+} e Fe^{3+} . Assim, trata-se de um óxido de ferro misto com FeO e Fe_2O_3 com estrutura de espinélio invertido semelhante à montmorilonita (KLEIN, 2002). A magnetita é um ímã natural, característica muito distinta, e se apresenta na forma de cristais opacos de cor preto e brilho variando do metálico ao opaco (MELFOS; HELLY; VOUDOURIS, 2011).

Esse mineral é comumente disseminado como mineral acessório em rochas ígneas e metamórficas. Entretanto, em determinados tipos de rochas, através da segregação magmática, a magnetita tornar-se um dos principais constituintes de rochas, e, assim, formar grandes depósitos de minério. Dentre os principais tipos de depósitos minerais nos quais há magnetita associada, pode-se destacar as formações de ferro bandadas (BIF's do inglês *Banded Iron Formation*), os depósitos de magnetita e titanomagnetita magmáticas, *skarns* de magnetita, acumulações metamórficas de magnetitas, magnetitas em serpentinitos/ofiolitos e depósitos de ferro hidrotérmicos (ELIOPOULOS; ECONOMOU-ELIOPOULOS, 2019). Além disso, existem ocorrências de magnetita, de origem química e sedimentar, como por exemplo, as placas finas e crescimentos dendríticos entre placas de mica e areias negras de praia (KLEIN, 2002; PILCHIN, 2011).

A magnetita tem atraído atenção desde a Antiguidade, devido às suas propriedades, com o seu uso para aplicações práticas documentado desde o século VIII, quando era utilizada pelos chineses como dispositivo de navegação (MILLS, 2004). Nas últimas décadas, com o desenvolvimento da tecnologia e da ciência, estão sendo estudados diversos métodos de síntese de magnetita com o objetivo de obter partículas com maior pureza e de tamanhos e formas distintas, como por exemplo, partículas octaédricas (CHEN et al., 2017; LEI et al., 2017), microesferas (ABE et al., 2019; DANIEL et al., 2020) e nanoesferas (FOTUKIAN et al., 2020; MISHRA et al., 2017; SHI et al., 2020). Entre as rotas de síntese mais conhecidas estão os métodos de coprecipitação (ARTEAGA-

DÍAZ et al., 2019; KLENCSÁR et al., 2019), coprecipitação reversa (SHAHID; CHOI, 2020) decomposição térmica (DEY et al., 2019; TOYOS-RODRÍGUEZ et al., 2019), microemulsão (SINGH; UPADHYAY, 2018), síntese hidrotérmica (CURSARU et al., 2020; FADLI et al., 2019; TORRES-GÓMEZ et al., 2019) e metodologias mais elaboradas, como o processo de sol-gel (MOHEBBI et al., 2018; TAKAI et al., 2019).

O comportamento magnético apresentado pela magnetita desencadeou diversos estudos de aplicações promissoras em diversas partes do mundo, o que mostra a versatilidade desse material. Alguns exemplos dessas aplicações são: descontaminação de efluentes e tratamento de água (BESTAWY; EL-SHATBY; ELTAWAIL, 2020; KUMAR et al., 2020; MATEUS et al., 2018; MOSIVAND; KAZEMINEZHAD, 2018; SAVIĆ et al., 2019; SOMU; KANNAN; PAUL, 2019); administração de medicamentos (EBADI et al., 2019; EL-KHARRAG et al., 2019; GOLUBEVA et al., 2019; KOROLEV et al., 2019; SHIMA; DAMODARAN, 2020; TAUFIQ et al., 2020; ZAMANI; RASTEGARI; VARAMINI, 2019), ressonância magnética (HUANG et al., 2020; KOZLOVA et al., 2020; NADOLL et al., 2014; SOLEYMANI et al., 2020; TIWARI et al., 2020), ferrofluidos (ABRO; KHAN; GÓMEZ-AGUILAR, 2020; HUSSANAN; SALLEH; KHAN, 2018; SHAHSAVAR et al., 2020) , armazenamento de energia térmica (BABA et al., 2019; GROSU et al., 2017; ORTEGA-FERNÁNDEZ et al., 2020), etc.

Os efeitos da magnetita em compósitos cimentícios vêm sendo estudados ao longo dos últimos anos. Pesquisas apontam que a incorporação de pequenas quantidades de nanomagnetita pode aprimorar as propriedades mecânicas e refinamento da estrutura dos poros de compósitos a base de cimento (BARUCKA-LIPSKA; TECHMAN, 2018; SIKORA et al., 2018). Além disso, é observada a melhora da resistência à compressão e redução ao ataque de cloretos e sulfatos, bem como a diminuição da absorção de água (BRAGANÇA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2020b).

Assim, nessa conjuntura, este capítulo visa apresentar, de maneira clara e objetiva, o estado da arte da magnetita (sintética ou natural) e sua aplicação em compósitos cimentícios.

2 Formação e Ocorrência da Magnetita

O ferro férrico (ferro III ou Fe^{3+}) é instável entre temperaturas intermediárias e altas, por outro lado, o ferro ferroso (ferro II ou Fe^{2+}) é instável entre temperaturas baixas e intermediárias. Assim, fica claro que os minerais que contêm ferro férrico são formados sob condições de baixa temperatura e minerais que são constituídos por ferro ferroso são formados sob condições de alta temperatura. Apesar da maioria dos minerais formadores de rochas conter óxido de ferro ferroso, existem alguns que contêm ferro férrico. Além disso, existe, em um número pequeno, minerais que contêm tanto ferro ferroso quanto ferro férrico, como por exemplo, a magnetita, biotita, sciagita, onafacita, etc. Esses últimos necessitam de condições bastante específicas nas rochas em que estão contidos para sua formação e preservação durante a evolução geológica que se segue (PILCHIN, 2011).

A estabilidade dos óxidos de ferro depende não somente das condições termodinâmicas, mas também da oxidação (O_2 , H_2O , CO_2 etc.) ou agentes de redução (C, S, CO, H_2 , etc.), presentes no momento da formação das rochas e minerais e toda evolução seguinte (PILCHIN, 2011). Dessa forma, é evidente que as condições termodinâmicas das transformações de ferro ferroso para ferro férrico (TFFI, do inglês *transformation of ferrous to ferric iron*) governam a aparência e estabilidade de alguns minerais que apresentam ferro. A reação de TFFI pode ser empregada para a caracterização das condições termodinâmicas da transformação, assim como a estabilidade, condições de oxidação e propriedades magnéticas das rochas e minerais envolvidos. Qualquer rocha ou mineral contendo ferro ferroso ou ferro férrico ficará instável quando for submetido às temperaturas na faixa da temperatura de TFFI (PILCHIN; EPPELBAUM, 2006; PILCHIN; EPPELBAUM, 2007)

Em específico, a estabilidade da magnetita pode ocorrer por meio de três grupos principais de processos: 1) condições de temperatura e pressão (aquecimento, resfriamento; aumento e diminuição da pressão); 2) processos de oxidação (presença de oxigênio, água, dióxido de carbono etc.); 3) processos de redução (presença de enxofre, carbono, hidrogênio etc.). Vários processos de diferentes

grupos podem estar presentes e operar juntos no mesmo cenário (PILCHIN, 2011).

Na literatura, para analisar a estabilidade desse mineral foram conduzidos inúmeros experimentos, nos quais foram avaliadas diferentes condições de formação e estabilidade. É observada a formação de magnetita por meio da redução de hematita na presença de solução aquosa entre 350°C e 570°C e pressão entre 100MPa e 200MPa (MATTHEWS, 1976). Também verifica-se a formação de magnetita, a partir do aquecimento de hematita a 1100°C em condição de vácuo (PARK et al., 1999).

Em relação a ocorrência de magnetita, esse mineral pode ser encontrado em uma extensa variedade de rochas. As análises de composição mineralógica apontam que esse mineral é um dos minerais acessórios mais comuns em rochas ígneas, sejam essas intrusivas, extrusivas ou hipabissais (CHEN et al., 2019a; PILCHIN, 2011). Assim, destaca-se que a magnetita é um constituinte ubíquo de carbonatitos, rochas ígneas associadas a silicatos e fosfatos (PETROV, 2004; REGUIR et al., 2008). Existem diversos complexos carbonatíticos com magnetita associada, dentre os quais se destacam o Complexo carbonatítico de Oka, Canadá (CHEN et al., 2016); Complexo carbonatítico de Mushgai Khudag, Mongólia (NIKOLENKO et al., 2020); Complexo carbonatito-foscorito de Hongcheon, Coréia do Sul (AHN et al., 2014; SHIN; OH; LEE, 2013); Complexo carbonatito-foscorito de Yonghwa, Coréia do Sul (SEO et al., 2016) e depósito de Bayan Obo, China (FAN et al., 2016; HUANG et al., 2015; SONG et al., 2018; YANG et al., 2019a). No Brasil observa-se ocorrência de magnetita nos complexos carbonatíticos de Jacupiranga (BECCALUVA et al., 2017; CHMYZ et al., 2019), Catalão (GUARINO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2017; PEREIRA et al., 2019), Tapira (BRIGATTI et al., 2004; BROD et al., 2013; CONCEIÇÃO et al., 2020) e Araxá (NEUMANN; MEDEIROS, 2015; TAKEHARA; SILVEIRA; SANTOS, 2015).

A magnetita também ocorre em depósitos de tipo *skarn*, bastante comum na China (CHEN et al., 2020; LI et al., 2018; LIU et al., 2019; YIN; MA; ROBINSON, 2017). Além disso, está presente em rochas sedimentares e sedimentos, que

originam importantes depósitos de ferro, como BIFs, depósitos de ferro hidrotérmicos e areias de magnetitas (ou areias pretas, como são conhecidas) (PILCHIN, 2011).

Os BIF's são rochas formadas por camadas alternadas de óxido de ferro (magnetita e/ou hematita) e silicatos ou carbonatos. Há ocorrência desse tipo de rocha com magnetita associada na Austrália (CZAJA et al., 2018; DUURING et al., 2019), no Egito (EL-SHAZLY; KHALIL; HELBA, 2019; KHALIL; EL-SHAZLY; LEHMANN, 2015), no Brasil (ARAÚJO; LOBATO, 2019), na China (LAN et al., 2019; LI et al., 2014a, 2015), entre outros locais. Ressalta-se que na China, os BIF's representam 64% do total de recursos identificados e são alvos potenciais da exploração industrial por beneficiamento magnético (LI et al., 2014b).

Ainda que se encontre magnetita na maioria das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, a formação de depósitos de minério de magnetita é dependente da atividade magmática e da quantidade de voláteis presentes no magma. Por isso, esse mineral serve como indicador petrogenético, químico e de proveniência em estudos de exploração mineral de depósitos minerais (DARE et al., 2014; NADOLL et al., 2014; REGUIR et al., 2008).

Nesse cenário, as magnetitas detríticas, que são aquelas provenientes do intemperismo de rochas pré-existentes, carregam informações petrográficas e químicas exclusivas que podem ser utilizadas na pesquisa de proveniência. Estudos enfatizaram a possibilidade de utilizar esse tipo de magnetita como indicador de proveniência (GRIGSBY, 1990; JIANG et al., 2020; YUE; JIN; ZHAO, 2018).

3 Propriedades

A magnetita consiste em um mineral ferrimagnético formado pelos óxidos de ferro II e III (FeO e Fe₂O₃), cuja fórmula química é Fe₃O₄, com alguma eventual contaminação por magnésio e manganês bivalente. Apresenta coloração preta, brilho metálico, elevada dureza, traço preto e caráter fortemente magnético, comportando-se como um ímã natural. Uma das principais propriedades da magnetita é a elevada densidade, 5,18g/cm³, além disso, é considerada

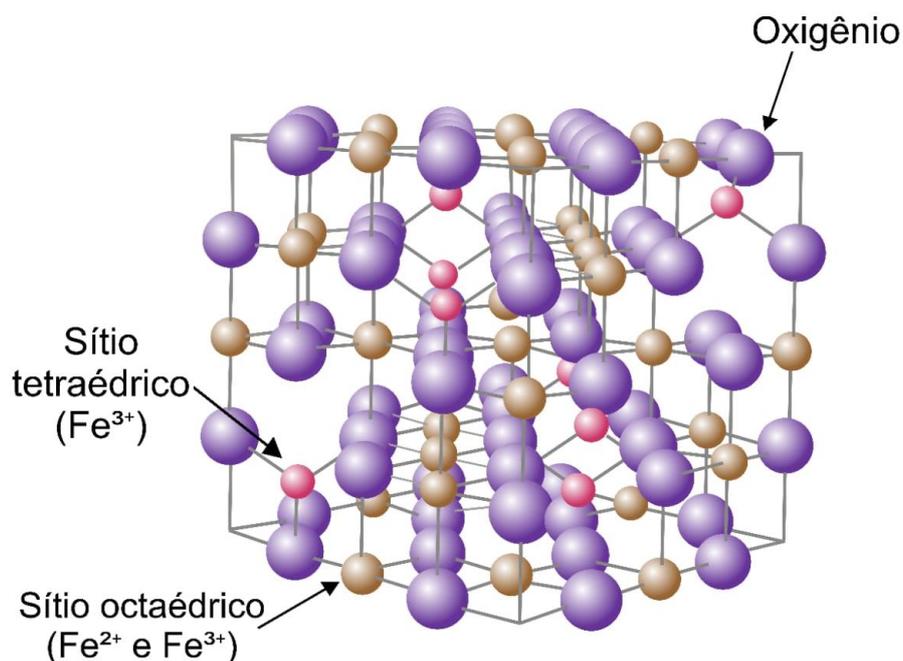
quimicamente estável, infusível e levemente solúvel em ácido clorídrico (KLEIN, 2002). A seguir serão exploradas as propriedades estrutural e magnética da magnetita.

3.1. Propriedades Estruturais e Magnéticas

Os principais detalhes da estrutura cristalina da magnetita foram estabelecidos em 1915, sendo umas das primeiras estruturas minerais nas quais foi aplicada difração de raios X (BRAGG, 1915). A magnetita possui estrutura cristalina de espinélio invertido, semelhante à montmorilonita, com estequiometria geral AB_2O_4 , onde A e B representam, respectivamente, um cátion bivalente e um cátion trivalente, no caso, Fe^{2+} e Fe^{3+} (NADOLL et al., 2014).

A magnetita apresenta uma célula unitária cúbica de face centrada, onde os íons de O^{2-} , estão dispostos cubicamente ao longo da direção cristalográfica [111]. Este arranjo dos íons de O^{2-} gera dois tipos de sítios de coordenação: os octaédricos e os tetraédricos. Os sítios de coordenação tetraédrica são formados por quatro íons O^{2-} , enquanto os sítios de coordenação octaédrica são compostos por seis íons O^{2-} . Os íons Fe^{2+} estão dispostos nos interstícios octaédricos e os íons Fe^{3+} são divididos, quase igualmente, em posições octaédricas e tetraédricas. O comprimento da aresta (a) da célula unitária da estrutura da magnetita equivale a 0,839nm (CORNELL; SCHWERTMANN, 2003). A Figura 1 ilustra a estrutura cristalina do mineral magnetita.

Figura 1: Estrutura cristalina da magnetita.



Fonte: Próprio autor.

O ferro bivalente presente na magnetita pode ser parcial ou totalmente substituído por outros íons bivalentes, como por exemplo, Zn^{2+} e Mn^{2+} . A substituição do ferro por demais íons é permitida pela flexibilidade da estrutura do oxigênio, que pode expandir ou contrair para acomodar cátions que possuem tamanho diferente do Fe^{2+} . Entretanto, essa troca de íons é acompanhada por chances de modificação no comprimento da aresta da célula unitária desse mineral (CORNELL; SCHWERTMANN, 2003). Essa tolerância estrutural da magnetita possibilita que elementos litófilos e siderófilos, tais como, Al, Ti, Mg, Cr, V, Ni, Co, Si e P substituam os íons de ferro, uma vez que apresentam raios iônicos similares a estes. Em condições físico-químicas favoráveis elementos calcófilos e outros elementos, por exemplo, Cu, Zn, Ga, Sn e Ce, podem também ser incorporados a estrutura cristalina desse mineral (BROUGHM et al., 2017; CHEN et al., 2019a).

Em relação às propriedades magnéticas, a magnetita é um mineral ferrimagnético à temperatura ambiente e tem uma temperatura de Curie de 850K (577°C). A existência de dois sítios catiônicos diferentes na estrutura cristalina do mineral, tetraédricos ocupados por Fe^{3+} e octaédricos ocupados por Fe^{3+} e Fe^{2+} , formam as bases para o ferrimagnetismo. No estado ferrimagnético, os

momentos magnéticos dos íons nestes sítios possuem alinhamento antiparalelo. Contudo, nos sítios octaédricos há duas vezes mais íons de ferro que nos sítios tetraédricos, induzindo, dessa forma, o aparecimento de um momento magnético líquido. Essa propriedade ferrimagnética, é um dos fatores que tornam a magnetita interessante no ponto de vista industrial e essencial em algumas aplicações (CORNELL; SCHWERTMANN, 2003; CULLITY; GRAHAM, 2009; PILCHIN, 2011).

4 Nanomagnetita Sintética

A nanotecnologia vem inovando o mundo da ciência e tecnologia, trazendo grandes expectativas para o desenvolvimento de países e indústrias. Isto ocorre através da manipulação e do uso de diferentes tipos de nanomateriais, que são estruturas com tamanhos entre 1 a 100nm e que apresentam propriedades singulares não encontradas nesses materiais na escala macrométrica (MIERNICKI et al., 2019). A nanotecnologia assegura avanços relevantes em diversas áreas de produção, eletrônicos, telecomunicações, biomedicina, meio ambiente, entre outras, razão pela qual, atualmente, é tida como ferramenta promissora para superar múltiplos desafios encontrados em vários campos da ciência, tecnologia e engenharia (DOLEZ, 2015).

As nanopartículas de magnetita têm sido objeto de interesse científico e tecnológico devido às suas propriedades físicas, diferentes das apresentadas pela magnetita *bulk*, como por exemplo o superparamagnetismo, alta coercividade, baixa temperatura de Curie, além de ser atóxica e biocompatível (WEI et al., 2012). Dessa maneira, é crescente o número de possibilidades e aplicações tecnológicas dessas nanopartículas, por exemplo, no campo de armazenamento de dados, ferrofluidos, nanoadsorventes, imagens de ressonância magnética, terapia contra câncer, biomedicina, biossensor, bio-separação etc. (CABRERA et al., 2008; CENDROWSKI et al., 2017; GIRI; DAS; PRADHAN, 2011).

Recentemente, intensificaram os estudos de metodologias de síntese de nanopartículas de magnetita, visando obter diferentes tamanhos e formatos e

com elevada magnetização. As metodologias de síntese para este nanomaterial podem ser divididas em dois tipos, os métodos mecânicos e os métodos químicos. Os métodos mecânicos abrangem processos físicos que envolvem a manipulação do material em escala macro até a obtenção de partículas menores por meio de quebra das partículas. Os métodos químicos compreendem processos mais complexos baseados em reações químicas e um controle rigoroso de precursores usados, assim como, dos parâmetros de síntese. A principal vantagem dos métodos químicos em comparação aos métodos mecânicos encontra-se no fato de que os primeiros propiciam a modificação da superfície das partículas e o controle das propriedades morfológicas (VALENZUELA et al., 2009).

As rotas convencionais para a síntese de partículas de nanomagnetita incluem, moagem mecânica (ALMÁSY et al., 2015), decomposição térmica (TOYOS-RODRÍGUEZ et al., 2019), co-precipitação química (DAOUSH, 2017; RADÓN et al., 2017; WILLIAMS et al., 2018), sol-gel (HU et al., 2019), síntese eletroquímica (FAJAROH et al., 2018; NURLILASARI; WIDIYASTUTI; SETYAWAN, 2020) e métodos sonoquímico (HARNCHANA et al., 2018). O método de síntese influencia diretamente o tamanho, o formato das partículas obtidas, bem como, o comportamento destas dentro da solução. Por exemplo, a co-precipitação química produz partículas esféricas de nanomagnetita com tamanho abaixo de 25nm. Em alternativa, por meio da síntese por hidrólise, são obtidas partículas cubo-octaédricas com tamanho superior a 50nm (PETCHAROEN; SIRIVAT, 2012).

A decomposição térmica parece ser o melhor método de síntese de nanopartículas de magnetita devido ao seu controle do tamanho e morfologia das partículas. Os métodos de síntese hidrotérmica possibilitam a produção de nanomagnetitas com alta qualidade. Os métodos de co-precipitação e decomposição permitem a produção de elevadas quantidades de nanopartículas de magnetita. A Tabela 1 resume as vantagens e desvantagens de alguns métodos de síntese de nanoestruturas de Fe_3O_4 .

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos métodos de síntese de nanoestruturas de magnetita.

Método de síntese	Autores	Grau de dificuldade, Condições	Temperatura de reação °C	Tempo de reação	Controle de tamanho
Co-precipitação	Daoush (2017); Nnadozie e Ajibade (2020a), Saragi et al. (2018); Dubey e Kain (2017)	muito simples, condições ambiente	20-90	min.	ruim
Decomposição térmica	Dey et al. (2019); (Nikitin et al. (2017); Dey et al. (2019)	complicado, atmosfera inerte	100-320	horas-dias	muito bom
Microemulsão	Singh e Upadhyay (2018)	complicado, condições ambiente	20-50	horas	bom
Síntese hidrotermal	Ahmadian-Fard-Fini; Salavati-Niasari; Ghanbari (2018)	simples, alta pressão	220	horas-dias	muito bom

Fonte: Próprio autor.

Ademais, outros trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de incentivar o uso de outros recursos disponíveis, substituindo assim, os reagentes químicos fabricados em laboratório usados na síntese de nanoestruturas de magnetita. Existem alguns estudos bem sucedidos na síntese de nanomagnetita usando extratos de plantas, como, o de flores de *Brassica napus* (SAEED HUSSAIN; ABDUL, 2020), da folha de *Graptophyllum pictum* (SARI; YULIZAR, 2017), de alga *Kappaphycus alvarezii* (YEW et al., 2016) e da raiz de *Chromolaena odorata* (NNADOZIE; AJIBADE, 2020b), além de areias ricas em ferro (RAHMAWATI et al., 2018a, 2018b) e resíduos industriais (DAREZERESHKI et al., 2018; KUMAR et al., 2015; REN et al., 2017a).

Embora alguns métodos sejam mais consolidados do que os demais, é possível perceber que existe ampla variedade de métodos e materiais para realizar síntese de nanopartículas de magnetita. Esse óxido de ferro, seja sintetizado ou natural, apresenta inúmeras aplicações em campos distintos da ciência.

5 Aplicações da Magnetita

Refletindo suas propriedades singulares, as partículas de magnetita possuem usos bastante difusos, e cada vez mais, é crescente o número das suas aplicações tecnológicas. Como já exposto, essas partículas podem ser

empregadas nas áreas da medicina e do meio ambiente. A seguir essas aplicações serão detalhadas.

5.1. Nanomedicina

A nanomedicina é um campo em rápida evolução que adota o conhecimento e as ferramentas da nanotecnologia ao diagnóstico, prevenção e tratamento de doenças, promovendo benefícios clinicamente relevantes. Os nanomateriais são usados em ambientes médicos distintos, incluindo diagnóstico e terapia de uma diversidade de doenças, estratégias de engenharia de tecidos e medicina regenerativa (BAGHABAN-ESLAMINEJAD et al., 2017; KARGOZAR; MOZAFARI, 2018; NUZHINA et al., 2019).

Devido ao potencial de aplicação biomédica, as nanopartículas têm atraído interesse no uso como materiais nanomédicos. Isso ocorre devido ao fato dessas partículas apresentarem elevada relação superfície/volume, o que permite a modificação da superfície para aplicações biomédicas específicas. Conforme a relação superfície/volume aumenta, a quantidade de átomos na superfície também aumenta, acarretando elevada reatividade química e aumento da adsorção na superfície. Essas propriedades são bastante relevantes, possibilitando a otimização das nanopartículas dependendo da função desejada (NUZHINA et al., 2019).

Grande parte desse interesse está voltado para partículas que exibem comportamento magnético, como é o caso das nanopartículas de magnetita. Para serem utilizadas como plataformas multifuncionais em biomedicina, essas partículas podem ser modificadas para melhorar a sua estabilidade, prevenir a agregação, aumentar a biocompatibilidade e dispersibilidade, ampliando o tempo de circulação e reduzindo a citotoxicidade (NUZHINA et al., 2019).

De acordo com o uso e do tipo de droga, estratégias distintas podem ser selecionadas para a configuração com nanopartículas de magnetitas. As drogas podem ser adsorvidas na superfície das nanopartículas por interações eletrostáticas, por ligações químicas ou através de agente de reticulação intermediário (NUZHINA et al., 2019).

Por apresentarem propriedades magnéticas ímpares, biocompatibilidade, biodegradabilidade, facilidade na síntese e funcionalização, as nanopartículas de magnetita têm demonstrado potencial para uma infinidade de aplicações biomédicas, por exemplo, no carregamento de drogas, no tratamento de hipertermia, ressonância magnética entre outros.

As partículas de magnetita estão ganhando popularidade nos estudos de sistemas de entrega de drogas em consequência do seu superparamagnetismo. Entretanto, são necessárias outras propriedades somadas ao superparamagnetismo para que seja possível o uso dessas partículas como veículo de entrega de fármacos, tais como, forma, tamanho, características de superfície e funcionalidade (YEW et al., 2020).

Há alguns medicamentos que podem ser integrados com nanopartículas de magnetita, como fármacos usados no tratamento de câncer. No sistema de distribuição direcionada de drogas, as partículas de magnetita podem se acumular no local do tumor com o auxílio de campo magnético externo. Isso pode aumentar a eficiência da liberação do medicamento no local do tumor e destruir as células cancerosas sem danificar as células saudáveis (YEW et al., 2020).

Hidrogéis e nanocompósitos magnéticos se apresentam como uma boa opção para o transporte e liberação de drogas. Por exemplo, hidrogéis híbridos contendo poli (N-isopropilacrilamida) contendo nanopartículas de magnetita mostram grande potencial na entrega de cloridrato de doxorubicina (KIM et al., 2017; POORGHOLY et al., 2018) e de docetaxel (XIE et al., 2017). Outro compósito que se manifesta como sistema de liberação eficiente e inteligente de cloridrato de doxorubicina, medicamento utilizado em terapias no combate ao câncer, é o hidrogel magnético natural baseado em alginato, gelatina e nanopartículas magnéticas de magnetita (JAHANBAN-ESFAHLAN et al., 2020). Além disso, outras drogas podem ser integradas em hidrogéis baseados em nanopartículas de magnetita, como 5-fluorouracil (AMINI-FAZL; MOHAMMADI; KHEIRI, 2019; CHEN et al., 2019b) e quercetina (ASHJARI et al., 2020).

Quando as nanopartículas de magnetita são submetidas a um campo magnético de corrente alternada, há liberação de calor, que tem aplicação como uma ferramenta terapêutica denominada hipertermia de fluido magnético. Essa hipertermia causa a destruição de células tumorais ao aumentar a temperatura na faixa de 41 a 46°C. Dessa maneira, as células tumorais são danificadas e sofrem apoptose após curto período de aplicação do campo magnético. Assim, as células tumorais são mais sensíveis à temperatura, enquanto as células saudáveis são mais resistentes ao fluxo de calor, sendo a hipertermia magnética uma alternativa no tratamento de câncer (ABDELLAHI et al., 2018; DING et al., 2017b; ZAYED et al., 2016).

Nanopartículas de magnetita dopadas com ítrio (0,1 a 10%) apresentam elevada biocompatibilidade e baixa citotoxicidade, além de provocar a redução na viabilidade das células, sugerindo o seu uso no tratamento de hipertermia. (KOWALIK et al., 2020). Nanocompósitos de magnetita e ortoferritas (RFeO_3) de terras raras também possuem propriedades ideais para aplicações em hipertermia magnética (OLIVEIRA et al., 2019).

Outro uso de partículas nanométricas de magnetita na nanomedicina é como agente de contraste em ressonância magnética (RM), umas das modalidades de imagem biomédica mais confiáveis na medicina diagnóstica. Essas partículas acarretam melhoria de imagens de RM por apresentarem superparamagnetismo, tempo de relaxamento transversal (T_1) e longitudinal (T_2) e elevado tempo de alinhamento do momento magnético. Além disso, são menos tóxicas e possuem alta estabilidade coloidal em ambientes biológicos. Após a exposição a um campo magnético externo, as nanopartículas de magnetita produzem gradientes com grande área microscópica, que reduzem o tempo de relaxamento de spins nucleares, ocasionando, dessa forma, um contraste negativo ou escuro (ASHJARI et al., 2020).

Estudos apontam que nanopartículas cúbicas de magnetita conjugadas com Pluronic F-127 exibem alta estabilidade coloidal em meio aquosos e demonstram melhoria nas propriedades em relação aos agentes de contrastes comercialmente disponíveis (NIKITIN et al., 2017). Esse potencial de aplicação

como agente de contraste também pode ser observado em nanopartículas de magnetita revestidas por glutathione (BEATO-LÓPEZ et al., 2020) e látex natural (ARSALANI et al., 2019).

5.2. Ambiental

Quanto às questões ambientais, a poluição e escassez da água são decorrentes de inúmeras fontes, como águas residuais industriais, esgoto doméstico, escoamento de águas pluviais, água de fossas sépticas, práticas agrícolas etc. É importante ressaltar que as indústrias são responsáveis pelo lançamento de diversos produtos químicos tóxicos, materiais orgânicos e inorgânicos, lodo radioativo, enxofre, ácidos, álcalis e metais pesados no meio ambiente. Tais resíduos, quando liberados em ecossistemas aquáticos sem o devido tratamento, tornam este ambiente insalubre para qualquer uso. Dessa forma, o tratamento adequado é extremamente relevante, podendo evitar problemas de saúde humana, contaminação de recursos hídricos e comprometimento de vida aquática (CHOWDHARY et al., 2020; HASAN; SHAHRIAR; JIM, 2019).

Nesta busca por soluções eficazes no tratamento de efluentes aquosos, as nanopartículas de magnetita têm chamado atenção no campo da remoção de poluentes e remediação ambiental, baseado em suas propriedades favoráveis, como elevada área superficial, alta capacidade de adsorção, considerável estabilidade, fácil preparação e operação e possível reciclagem. Assim, essa utilização proporciona uma metodologia apropriada e exequível para separar e remover os contaminantes através da aplicação de campos magnéticos externos (BASERI; TIZRO, 2017; STAN et al., 2017).

As nanopartículas de magnetita podem ser adotadas na remoção de diferentes contaminantes, desde íons metálicos até compostos orgânicos. Recentemente, as partículas de nanomagnetitas estão sendo estudadas na remoção de íons metálicos, como cobre (AL-JABRI; DEVI; AL ABRI, 2018; CRUZ JORGE et al., 2018; GAO et al., 2016; YANG et al., 2018), níquel (BASERI; TIZRO, 2017; TRAN et al., 2019), zinco (COSTA et al., 2019), chumbo (CHERAGHIPOUR; PAKSHIR, 2020; CHU et al., 2019), cromo (ABDUL; ABDUL TALIB; AMIR, 2020;

HOANG et al., 2020; YANG et al., 2019b) e urânio (CALÌ et al., 2018; SONG et al., 2017), podendo ser funcionalizadas, revestidas por alguma substância ou material, ou parte constituinte de um compósito.

De acordo com o trabalho desenvolvido por Sulaiman et al. (2019), partículas micrométricas de magnetita apresentam capacidade de adsorção de cobre (Cu^{2+}) equivalente a 11,36mg/g. Esse valor difere ao encontrado por Shahrashoub e Bakhtiari (2021) em compósitos de nanomagnetita e carvão ativado, que apresentaram a capacidade máxima de adsorção de cobre de 23,61mg/g, quando utilizado carvão em pó e 13,37mg/g, quando usado o carvão em pó granulado.

Quanto a remoção simultânea de íons, segundo o trabalho de Adeli, Yamini e Faraji (2017), as nanopartículas de magnetita revestidas por dodecil-sulfato de sódio são capazes de remover íons de cobre (Cu^{2+}), níquel (Ni^{2+}) e zinco (Zn^{2+}), sendo a capacidade máxima de adsorção desses íons igual a 24,30, 41,20 e 59,20mg/g, respectivamente. Para Pooladi e Bazargan-Lari (2020), o compósito de quitosana-hidroxiapatita-nanomagnetita apresenta também uma capacidade de adsorção eficiente para íons (Cu^{2+}) e (Zn^{2+}).

Bagbi et al. (2017) constataram que nanopartículas de magnetita funcionalizadas com L-cisteína apresentam capacidade de adsorção de chumbo (Pb^{2+}) e cromo (Cr^{6+}) equivalentes 18,8 e 34,5mg/g, respectivamente, à temperatura de 45°C. O potencial de adsorção do cromo (Cr^{6+}) também foi analisado por Ren et al., (2017b) onde partículas porosas de nanomagnetita mostram a capacidade máxima de adsorção de 14,49mg/g a 25°C, valor inferior ao encontrado por Bagbi et al. (2017) , indicando uma possível relação entre a temperatura na qual é realizada a adsorção e a funcionalização da superfície das partículas.

A interação do urânio com óxidos ferro pode desempenhar um papel essencial na sua destinação ambiental. A adsorção de urânio na superfície e a incorporação na estrutura desses óxidos são potenciais mecanismos para imobilizar espécies desse metal actínido. Portanto, a magnetita também é pesquisada para remoção de urânio presente em águas residuais associadas ao

uso de radioisótopos em usinas nucleares, testes de armas nucleares, mineração e pesquisa médica (LU et al., 2018; TOWNSEND et al., 2021).

Exemplificando, Ding et al. (2017) avaliaram o desempenho de compósitos de nanopartículas de magnetita uniforme suportados por óxido de grafeno na remoção de urânio em soluções, constatando a elevação da sorção de urânio (VI), e o aumento da redução de urânio (VI) para urânio (IV). Tais descobertas são relevantes para pesquisas de materiais à base de magnetita para a pré-concentração e remoção de radionuclídeos em aplicações de remoção de poluentes ambientais e gerenciamento de resíduos nucleares. Gdula et al. (2019) analisaram a capacidade de sorção de urânio, desta vez por compósito constituído por magnetita-sílica funcionalizados com amina, onde observaram a adsorção rápida e da ordem de 118mg/g.

Lu et al. (2018) propuseram remoção rápida de urânio em solução aquosa através da imobilização deste em magnetita por eletrodeposição, na qual observou que mais de 90% de urânio foi precipitado com a magnetita. Com os resultados obtidos pelos autores pode-se atentar para a possibilidade de reciclagem de urânio, sendo que esta metodologia não gerou poluição secundária.

Em relação aos poluentes orgânicos, consoante a Ganesan, Louis e Damodaran (2018), compostos de *nanoclusters* de magnetita envolta de óxido de grafeno possuem potencial de adsorção de corantes orgânicos, como azul de metileno, laranja de metila e rodamina, sendo as capacidades máximas de adsorção a 30°C iguais a 131,10, 39,95 e 34,50, respectivamente. Outra configuração de compósitos de magnetita e óxido de grafeno também é eficiente na remoção de rodamina. De acordo com (MISHRA; MOHANTY, 2018), nanopartículas de magnetitas decoradas com óxido de grafeno apresentam capacidade de remoção de corante rodamina de 89%.

Além da remoção de íons metálicos e poluentes orgânicos, vale ressaltar que o uso de nanomagnetita para a remoção bacteriana em efluentes industriais vem ganhando espaço, pois configura-se como uma alternativa menos nociva se

comparada às técnicas comumente aplicadas. Oliveira et al. (2020a) obtiveram resultados que confirmam a capacidade de remoção da bactéria *Staphylococcus aureus* em efluentes de laticínios por meio de nanopartículas de magnetita funcionalizadas com extrato da semente de *Moringa oleifera* Lam. Assim, percebe-se a vasta aplicação na área ambiental de partículas de magnetita e compósitos à base desse óxido de ferro, que apresentam grande capacidade adsorvente e potencial de reciclagem.

5.3. Aplicação de Magnetita em Compósitos Cimentícios

Os compósitos cimentícios são os materiais mais usados para infraestruturas, pois são resistentes à água, facilmente moldados em inúmeras formas e tamanhos, possuem baixo custo de produção e as matérias-primas que os constituem são facilmente encontradas (HAN et al., 2017). Entretanto, assegurar boas propriedades mecânicas e físico-químicas, é um verdadeiro desafio para os engenheiros de materiais e tecnólogos de concreto (HORSZCZARUK, 2019).

Diversos aditivos minerais vêm sendo usados em compósitos cimentícios, não apenas pelas vantagens ambientais e econômicas, mas também pelas melhorias nas propriedades mecânicas e físico-químicas desses materiais. O uso de adições em compósitos cimentícios melhora a trabalhabilidade, aumenta a plasticidade sem aumentar o consumo de água, altera o tempo de pega, reduz exsudação e segregação, aumenta a resistência final etc. (OLTULU; ŞAHIN, 2013).

O progresso da nanotecnologia nas últimas décadas permitiu aos pesquisadores aplicar aditivos nanométricos para melhorar as propriedades de compósitos cimentícios com maior eficiência do que os produtos convencionais. Essa melhoria advém das propriedades exclusivas dos nanomateriais, como alta resistência, elevada área superficial, condutividade elétrica e atividade química. Assim, a produção industrial e a incorporação de nanomateriais em concretos é, sem dúvida, o futuro da tecnologia dos materiais de construção, pois podem ajudar a criar estruturas inovadoras, sustentáveis e avançadas, resultando na redução do uso de cimento e dos custos do projeto (SIKORA et al., 2016).

Em relação à pasta de cimento Portland, a adição de nanopartículas afetam a hidratação e a microestrutura da pasta, uma vez que essas acarretam o aumento na taxa de hidratação inicial, bem como na quantidade de silicatos de cálcio hidratados, além de causar redução da porosidade e melhorias nas propriedades mecânicas dos silicatos (RASHAD, 2013). Um dos materiais mais promissores que vem sendo investigados como adições em materiais cimentícios é a nanomagnetita. A aplicação de óxidos de ferro nanométricos nesses materiais demonstrou que os tais nanomateriais influenciam positivamente as propriedades mecânicas e a microestrutura, melhorando a resistência à compressão e à flexão e diminuindo a porosidade total dos compósitos cimentícios (SIKORA et al., 2016).

Dentre os estudos que vêm sendo realizados nessa área pode-se citar a investigação do efeito de adições de nanomagnetita nas propriedades microestruturais, mecânicas e de atenuação de gama de pastas de cimento Portland branco (FLOREZ et al., 2019), a avaliação do efeito da adição de nanomagnetita nas características de hidratação do cimento Portland (AMIN; EL-GAMAL; HASHEM, 2013), a investigação do efeito da adição de partículas de magnetita em compósitos cimentícios (GHAZANLOU et al., 2020) e a análise do efeito da adição do pó de magnetita residual oriunda do processo de britagem de rochas (SIKORA et al., 2019).

Imanian et al. (2020) propõem o uso de nanopartículas de magnetita associadas a nanotubos de carbono em compósitos cimentícios a fim de aumentar a interação entre a superfície do nanotubo de carbono (CNT) e a matriz de cimento, visto que essas aumentam a rugosidade e a dispersibilidade desses nanomateriais. Os autores relatam que as resistências à compressão, flexão e tração do compósito com incorporação de 0,3% (em peso) de nanotubos de carbono de paredes múltiplas e 0,3% (em peso) de magnetita em 28 dias aumentaram 83%, 104% e 98%, respectivamente. A porosidade e resistividade elétrica diminuíram em 31% e 48%, nessa ordem.

Horszczaruk et al. (2017) investigam nanopartículas de magnetita revestidas com casca de sílica para aumentar a resistência do concreto a temperaturas

elevadas, sem deterioração da sua capacidade de blindagem. Abdelsamie et al. (2021) expõem que a substituição de cimento por nanoestruturas com núcleo de sílica revestido com magnetita com casca de sílica (2,5%, 5% e 7,5%) melhoram as propriedades mecânicas e morfológicas de argamassas de cimento.

A aplicação de partículas de magnetita no desenvolvimento de compósitos de blindagem eletromagnética à base de cimento vem sendo bastante estudada. Atualmente, a popularidade de equipamentos eletrônicos e de comunicação ocasiona problemas de poluição por interferências magnéticas, que são prejudiciais à saúde pessoal. A fim de minimizar tais danos, é necessário o desenvolvimento de materiais de blindagem eletromagnética de alta frequência que agem como uma barreira para a restrição da admitância das ondas eletromagnéticas refletindo ou absorvendo-as (SINGH et al., 2013; ZHENG et al., 2014). (POOLADI; BAZARGAN-LARI, 2020)

Os compósitos de blindagem à base de cimento são capazes de conduzir à proteção eletromagnética em larga escala (WANASINGHE et al., 2020). Entretanto, a argamassa de cimento possui pouca eficiência de blindagem eletromagnética, assim, cargas condutoras ou magnéticas são desenvolvidas como materiais de blindagem eletromagnética em compósitos cimentícios. As partículas de nanomagnetita são o material magnético mais popular que apresentou proteção contra interferência eletromagnética. Essas partículas possuem elevada energia de superfície, grande área de superfície específica e magnetização suave satisfatória (CHAE; PIAO; CHOI, 2015; CHEN et al., 2015).

Guan et al. (2017) mostram que a adição de 15% (em peso) de pó de magnetita em compósitos aumentam o desempenho de absorção eletromagnética, com absorção igual a 28dB. Para ampliar a faixa de frequência da blindagem eletromagnética, estudos estão sendo desenvolvidos combinando nanopartículas de magnetita com óxido de grafeno, nanotubos ou fibras de carbono. Liu et al. (2017) relatam que a incorporação de 5% (em peso) de nanopartículas de magnetita junto com 0,4% (em peso) de fibras de carbono em matriz cimentícia acarretam uma eficiência de 29,8dB, que equivale a um aumento de 34,4% em relação ao compósito apenas com fibras de carbono. He

et al. (2018) afirmam que a adição de 5% de fluido magnético de nanomagnetita é adicionado ao cimento, o compósito preparado apresenta excelentes propriedades de absorção de ondas eletromagnéticas e acelera a hidratação do cimento e melhora a sua resistência à compressão.

Outra alternativa para o uso da magnetita residual no setor da construção civil é como agregado para compósitos cimentícios (ASLANI; HAMIDI; MA, 2019; ASLANI; LESSLIE; HAMIDI, 2021; SADRMOHTAZI; LOTFI-OMRAN; NIKBIN, 2020). O uso de agregado de magnetita pode melhorar as propriedades mecânicas e a eficiência ao degelo (HUANG; XU, 2019).

Ainda na linha de reaproveitamento de materiais, estudos propuseram o emprego de rejeito de minério fosfático, rico em magnetita, como substituto do agregado miúdo na composição do concreto, sendo uma solução viável ao aumento da resistência à compressão do concreto (SIKORA et al., 2019). Entretanto, não existem muitos estudos sobre o uso de rejeitos contendo magnetita como agregados e nem como adições ou substituições em compósitos cimentícios.

Dessa forma, percebe-se a ampla variedade de aplicações de magnetita no setor da indústria civil. Algumas dessas aplicações permitem a redução dos impactos ambientais negativos causados pela indústria da construção civil, seja por meio do reaproveitamento de resíduos de outras indústrias ou pela redução do consumo de matérias-primas.

6 Considerações Finais

As propriedades da magnetita natural e sintética foram documentadas e discutidas. Em relação às nanopartículas sintéticas de magnetita, ressalta-se a existência de uma infinidade de métodos de síntese para a produção dessas partículas. Atualmente, os métodos que utilizam outros recursos como precursores na síntese (por exemplo, extratos de plantas e resíduos industriais) estão ganhando destaque, devido ao fato destes buscarem substituir os reagentes químicos de laboratório.

Novas ideias para a incorporação de magnetita estão sendo rapidamente processadas nos campos de engenharia. Pode-se destacar o uso de magnetita em armazenamento de dados, ferrofluidos, nanoadsorventes, imagens de ressonância magnética, terapia contra câncer, biomedicina, biossensor e bio-separação.

Lançando um olhar para o emprego da magnetita em compósitos cimentícios, as opções de aplicação desse material podem acarretar em diversas vantagens, visto que algumas permitem o ganho em propriedades físicas e mecânicas além de reduzir os impactos causados pela indústria da construção civil, seja por meio do reaproveitamento de resíduos oriundos de outros setores ou pela redução do consumo de matérias-primas.

Entretanto, existe uma defasagem na literatura sobre o uso de rejeitos com magnetita provenientes de atividades industriais, principalmente de mineração, em compósitos cimentícios. Assim, enfatiza-se a necessidade de investigar cada vez mais esse material.

7 Referências Bibliográficas

ABDELLAHI, M. et al. Diopside-magnetite; A novel nanocomposite for hyperthermia applications. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 77, p. 534–538, 2018.

ABDELSAMIE, K. et al. Preference of Using Nano Silica \ Magnetite Core-Shell on Enhancement Mechanical and Morphological Properties of Cement Mortar. v. 16, n. 1, p. 53–66, 2021.

ABDUL, N. A.; ABDUL TALIB, S.; AMIR, A. Removal Kinetics of Chromium by Nano-Magnetite in Different Environments of Groundwater. **Journal of Environmental Engineering**, v. 146, n. 2, p. 04019111, 2020.

ABE, H. et al. Shape-controlled syntheses of magnetite microparticles and their magnetorheology. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 15, 2019.

ABRO, K. A.; KHAN, I.; GÓMEZ-AGUILAR, J. F. Heat transfer in magnetohydrodynamic free convection flow of generalized ferrofluid with magnetite nanoparticles. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, n. 0123456789, 2020.

ADELI, M.; YAMINI, Y.; FARAJI, M. Removal of copper, nickel and zinc by

sodium dodecyl sulphate coated magnetite nanoparticles from water and wastewater samples. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 10, p. S514–S521, 2017.

AHMADIAN-FARD-FINI, S.; SALAVATI-NIASARI, M.; GHANBARI, D. Hydrothermal green synthesis of magnetic Fe₃O₄-carbon dots by lemon and grape fruit extracts and as a photoluminescence sensor for detecting of E. coli bacteria. **Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 203, p. 481–493, 2018.

AHN, J. S. et al. Geochemical survey of rare earth elements (REEs) in the concealed ore body of Hongcheon, Korea. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, n. 6, p. 2153–2161, 2014.

AL-JABRI, M. T. K.; DEVI, M. G.; AL ABRI, M. Synthesis, characterization and application of magnetic nanoparticles in the removal of copper from aqueous solution. **Applied Water Science**, v. 8, n. 8, p. 1–7, 2018.

ALMÁSY, L. et al. Wet milling versus co-precipitation in magnetite ferrofluid preparation. **Journal of the Serbian Chemical Society**, v. 80, n. 3, p. 367–376, 2015.

AMIN, M. S.; EL-GAMAL, S. M. A.; HASHEM, F. S. Effect of addition of nano-magnetite on the hydration characteristics of hardened Portland cement and high slag cement pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 112, n. 3, p. 1253–1259, 2013.

AMINI-FAZL, M. S.; MOHAMMADI, R.; KHEIRI, K. 5-Fluorouracil loaded chitosan/polyacrylic acid/Fe₃O₄ magnetic nanocomposite hydrogel as a potential anticancer drug delivery system. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 132, p. 506–513, 2019.

ARAÚJO, J. C. S.; LOBATO, L. M. Depositional model for banded iron formation host to gold in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Brazil, based on geochemistry and LA-ICP-MS magnetite analyses. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 94, n. October 2018, p. 102205, 2019.

ARSALANI, S. et al. Magnetic Fe₃O₄ nanoparticles coated by natural rubber latex as MRI contrast agent. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 475, n. December 2018, p. 458–464, 2019.

ARTEAGA-DÍAZ, S. J. et al. applied sciences Environmental Assessment of Large Scale Production of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles via Coprecipitation. **Applied Sciences**, v. 9, n. 1682, p. 1–10, 2019.

ASHJARI, M. et al. Synthesis of PLGA–mPEG star-like block copolymer to form micelle loaded magnetite as a nanocarrier for hydrophobic anticancer drug. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 56, p. 101563, 2020.

ASLANI, F.; HAMIDI, F.; MA, Q. Fire performance of heavyweight self-compacting concrete and heavyweight high strength concrete. **Materials**, v. 12, n. 5, p. 1–24, 2019.

ASLANI, F.; LESSLIE, D. M.; HAMIDI, F. Development and analysis of highly workable high-strength heavyweight concrete using magnetite aggregates. **Structural Concrete**, v. 22, n. S1, p. E169–E182, 2021.

BABA, Y. F. et al. Multilevel comparison between magnetite and quartzite as thermocline energy storage materials. **Applied Thermal Engineering**, v. 149, n. November 2018, p. 1142–1153, 2019.

BAGBI, Y. et al. Lead and Chromium Adsorption from Water using L-Cysteine Functionalized Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–15, 2017.

BAGHABAN-ESLAMINEJAD, M. et al. **The role of nanomedicine, nanotechnology, and nanostructures on oral bone healing, modeling, and remodeling.** [s.l.] Elsevier Inc., 2017.

BARUCKA-LIPSKA, J.; TECHMAN, M. **Section Green Buildings Technologies and Materials INTERFEROMETRIC RADAR TECHNOLOGY IN CONSTRUCTION.** International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. **Anais...2018** Disponível em: <<https://doi.org/10.5593/sgem2018/6.4>>

BASERI, H.; TIZRO, S. Treatment of nickel ions from contaminated water by magnetite based nanocomposite adsorbents: Effects of thermodynamic and kinetic parameters and modeling with Langmuir and Freundlich isotherms. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 109, p. 465–477, 2017.

BEATO-LÓPEZ, J. J. et al. Glutathione-magnetite nanoparticles: synthesis and physical characterization for application as MRI contrast agent. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 7, p. 1–14, 2020.

BECCALUVA, L. et al. The alkaline-carbonatite complex of Jacupiranga (Brazil): Magma genesis and mode of emplacement. **Gondwana Research**, v. 44, p. 157–177, 2017.

BESTAWY, E. EL; EL-SHATBY, B. F.; ELTAWAIL, A. S. Integration between bacterial consortium and magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles for the treatment of oily industrial wastewater. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 36, n. 9, p. 1–16, 2020.

BRAGANÇA, M. O. G. P. et al. Performance of Portland cement concretes with 1% nano-Fe₃O₄ addition: Electrochemical stability under chloride and sulfate environments. **Construction and Building Materials**, v. 117, n. 2016, p. 152–162, 2016.

BRAGG W. H. The Structure of Magnetite and Spinel. **Nature**, v. 95, n. 2386, p. 561, 1915.

BRIGATTI, M. R. et al. Crystal chemistry of apatites from the Tapira carbonatite complex, Brazil. **European Journal of Mineralogy**, v. 16, n. 4, p. 677–685, 2004.

BROD, J. A. et al. Decoupling of paired elements, crossover REE patterns, and mirrored spider diagrams: Fingerprinting liquid immiscibility in the Tapira alkaline-

carbonatite complex, SE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 41, p. 41–56, 2013.

BROUGHM, S. G. et al. Mineral chemistry of magnetite from magnetite-apatite mineralization and their host rocks: examples from Kiruna, Sweden, and El Laco, Chile. **Mineralium Deposita**, v. 52, n. 8, p. 1223–1244, 1 dez. 2017.

CABRERA, L. et al. Magnetite nanoparticles: Electrochemical synthesis and characterization. **Electrochimica Acta**, v. 53, n. 8, p. 3436–3441, 2008.

CALÌ, E. et al. Functionalised magnetic nanoparticles for uranium adsorption with ultra-high capacity and selectivity. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 6, n. 7, p. 3063–3073, 2018.

CENDROWSKI, K. et al. Chemical and thermal stability of core-shelled magnetite nanoparticles and solid silica. **Applied Surface Science**, v. 407, p. 391–397, 2017.

CHAE, H. S.; PIAO, S. H.; CHOI, H. J. Fabrication of spherical Fe₃O₄ particles with a solvothermal method and their magnetorheological characteristics. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 29, p. 129–133, 2015.

CHEN, F. et al. LA-ICP-MS trace element analysis of magnetite and pyrite from the Hetaoping Fe-Zn-Pb skarn deposit in Baoshan block, SW China: Implications for ore-forming processes. **Ore Geology Reviews**, v. 117, n. June 2019, p. 103309, 2020.

CHEN, W. et al. Mineral chemistry of melanite from calcitic ijolite, the Oka carbonatite complex, Canada: Implications for multi-pulse magma mixing. **Journal of Earth Science**, v. 27, n. 4, p. 599–610, 2016.

CHEN, W. et al. In situ major and trace element analysis of magnetite from carbonatite-related complexes: Implications for petrogenesis and ore genesis. **Ore Geology Reviews**, v. 107, n. January, p. 30–40, 2019a.

CHEN, X. et al. Magnetic and self-healing chitosan-alginate hydrogel encapsulated gelatin microspheres via covalent cross-linking for drug delivery. **Materials Science and Engineering C**, v. 101, n. April, p. 619–629, 2019b.

CHEN, Y. et al. Enhanced electromagnetic interference shielding efficiency of polystyrene/graphene composites with magnetic Fe₃O₄ nanoparticles. **Carbon**, v. 82, n. C, p. 67–76, 2015.

CHEN, Z. et al. Controllable synthesis of magnetic Fe₃O₄ particles with different morphology by one-step hydrothermal route. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 426, n. November 2016, p. 121–125, 2017.

CHERAGHIPOUR, E.; PAKSHIR, M. Process optimization and modeling of Pb(II) ions adsorption on chitosan-conjugated magnetite nano-biocomposite using response surface methodology. **Chemosphere**, v. 260, p. 127560, 2020.

CHMYZ, L. et al. Hf-Pb isotope and trace element constraints on the origin of the

Jacupiranga Complex (Brazil): Insights into carbonatite genesis and multi-stage metasomatism of the lithospheric mantle. **Gondwana Research**, v. 71, p. 16–27, 2019.

CHOWDHARY, P. et al. Role of Industries in Water Scarcity and Its Adverse Effects on Environment and Human Health. In: **Environmental Concerns and Sustainable Development**. [s.l.: s.n.]. p. 235–256.

CHU, Y. et al. Plasma assisted-synthesis of magnetic TiO₂/SiO₂/Fe₃O₄-polyacrylic acid microsphere and its application for lead removal from water. **Science of the Total Environment**, v. 681, p. 124–132, 2019.

CONCEIÇÃO, F. T. et al. 40Ar/39Ar geochronological evidence for multiple magmatic events during the emplacement of Tapira alkaline-carbonatite complex, Minas Gerais, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 97, n. November 2019, p. 102416, 2020.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrences, and uses**. [s.l.] Wiley-VCH, 2003.

COSTA, T. R. DA et al. Fe₃O₄C core-shell nanoparticles as adsorbent of ionic zinc: evaluating of the adsorptive capacity. **Materials Research**, v. 22, p. 1–10, 2019.

CRUZ JORGE, E. Y. et al. Magnetite nanoparticles as adsorbent material for Cu²⁺ ions from aqueous solution. **Particulate Science and Technology**, v. 36, n. 6, p. 778–784, 2018.

CULLITY, B. .; GRAHAM, C. . **Introduction to Magnetic Materials**. Second Edition. [s.l.: s.n.].

CURSARU, L. M. et al. One-step soft chemical synthesis of magnetite nanoparticles under inert gas atmosphere. Magnetic properties and in vitro study. **Nanomaterials**, v. 10, n. 8, p. 1–15, 2020.

CZAJA, A. D. et al. A multistage origin for Neoproterozoic layered hematite-magnetite iron formation from the Weld Range, Yilgarn Craton, Western Australia. **Chemical Geology**, v. 488, n. April, p. 125–137, 2018.

DANIEL, T. T. et al. Magnetite-Based Resistor for Nitric Oxide Detection. **IEEE Sensors Journal**, v. 20, n. 22, p. 13341–13348, 2020.

DAOUSH, W. M. Co-Precipitation and Magnetic Properties of Magnetite Nanoparticles for Potential Biomedical Applications. **Journal of Nanomedicine Research**, n. April, 2017.

DARE, S. A. S. et al. Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. **Mineralium Deposita**, v. 49, n. 7, p. 785–796, 2014.

DAREZERESHKI, E. et al. Synthesis of magnetite nanoparticles from iron ore tailings using a novel reduction-precipitation method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 749, p. 336–343, 15 jun. 2018.

DEY, A. et al. Solventless synthesis and characterization of α -Fe, γ -Fe, magnetite and hematite using iron(III)citrate. **Solid State Sciences**, v. 95, n. July, p. 105932, 2019.

DING, C. et al. Synergistic mechanism of U(VI) sequestration by magnetite-graphene oxide composites: Evidence from spectroscopic and theoretical calculation. **Chemical Engineering Journal**, v. 324, n. Vi, p. 113–121, 2017a.

DING, Q. et al. Shape-controlled fabrication of magnetite silver hybrid nanoparticles with high performance magnetic hyperthermia. **Biomaterials**, v. 124, p. 35–46, 2017b.

DOLEZ, P. I. **Nanoengineering: Global Approaches to Health and Safety Issues**. [s.l.: s.n.].

DUBEY, V.; KAIN, V. Synthesis of magnetite by coprecipitation and sintering and its characterization. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 33, n. 8, p. 835–839, 2018.

DUURING, P. et al. Supergene modification of magnetite and hematite shear zones in banded iron-formation at Mt Richardson, Yilgarn Craton, Western Australia. **Ore Geology Reviews**, v. 111, n. February, p. 102995, 2019.

EBADI, M. et al. The impact of magnesium–aluminum-layered double hydroxide-based polyvinyl alcohol coated on magnetite on the preparation of core-shell nanoparticles as a drug delivery agent. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 15, p. 1–17, 2019.

EL-KHARRAG, R. et al. Synthesis and characterization of chitosan-coated magnetite nanoparticles using a modified wet method for drug delivery applications. **International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials**, v. 68, n. 1–3, p. 73–82, 2019.

EL-SHAZLY, A. K.; KHALIL, K. I.; HELBA, H. A. Geochemistry of banded iron formations and their host rocks from the Central Eastern Desert of Egypt: A working genetic model and tectonic implications. **Precambrian Research**, v. 325, n. February, p. 192–216, 2019.

ELIOPOULOS, D. G.; ECONOMOU-ELIOPOULOS, M. Trace element distribution in magnetite separates of varying origin: Genetic and exploration significance. **Minerals**, v. 9, n. 12, 2019.

FADLI, A. et al. The Oriented Attachment Crystal Growth Model in Hydrothermal Synthesis of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles. **Journal of Applied Materials and Technology**, v. 1, n. 1, p. 15–19, 2019.

FAJAROH, F. et al. Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles using PEG Template by Electrochemical Method. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1093, n. 1, 2018.

FAN, H. R. et al. The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit, China: Controversy and ore genesis. **Geoscience Frontiers**, v. 7, n. 3, p. 335–344, 2016.

FLOREZ, R. et al. The material characterization and gamma attenuation properties of Portland cement-Fe₃O₄ composites for potential dry cask applications. **Progress in Nuclear Energy**, v. 111, n. March 2018, p. 65–73, 2019.

FOTUKIAN, S. M. et al. Solvothermal synthesis of CuFe₂O₄ and Fe₃O₄ nanoparticles with high heating efficiency for magnetic hyperthermia application. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 816, p. 152548, 2020.

GANESAN, V.; LOUIS, C.; DAMODARAN, S. P. Graphene oxide-wrapped magnetite nanoclusters: A recyclable functional hybrid for fast and highly efficient removal of organic dyes from wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 2, p. 2176–2190, 2018.

GAO, J. et al. Single step synthesis of amine-functionalized mesoporous magnetite nanoparticles and their application for copper ions removal from aqueous solution. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 481, p. 220–228, 2016.

GDULA, K. et al. Amine-functionalized magnetite-silica nanoparticles as effective adsorbent for removal of uranium(VI) ions. **Journal of Molecular Liquids**, v. 290, 2019.

GHAZANLOU, S. I. et al. A comparative study on the mechanical, physical and morphological properties of cement-micro/nanoFe₃O₄ composite. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–14, 2020.

GIRI, S. K.; DAS, N. N.; PRADHAN, G. C. Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles using waste iron ore tailings for adsorptive removal of dyes from aqueous solution. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 389, n. 1–3, p. 43–49, 20 set. 2011.

GOLUBEVA, O. Y. et al. Synthesis and Study of Nanocomposites Based on Beta Zeolite and Magnetite for Targeted Drug Delivery. **Glass Physics and Chemistry**, v. 45, n. 1, p. 66–73, 2019.

GRIGSBY, J. D. Detrital magnetite as a provenance indicator. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 60, n. 6, p. 940–951, 1990.

GROSU, Y. et al. Natural Magnetite for thermal energy storage: Excellent thermophysical properties, reversible latent heat transition and controlled thermal conductivity. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 161, n. July 2016, p. 170–176, 2017.

GUAN, B. et al. The electromagnetic wave absorbing properties of cement-based composites using natural magnetite powders as absorber. **Materials Research Express**, v. 4, n. 5, p. 0–6, 2017.

GUARINO, V. et al. U–Pb ages, geochemistry, C–O–Nd–Sr–Hf isotopes and petrogenesis of the Catalão II carbonatitic complex (Alto Paranaíba Igneous Province, Brazil): implications for regional-scale heterogeneities in the Brazilian carbonatite associations. **International Journal of Earth Sciences**, v. 106, n. 6,

p. 1963–1989, 2017.

HAN, B. et al. Nano-core effect in nano-engineered cementitious composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 95, p. 100–109, 2017.

HARNCHANA, V. et al. Facile and economical synthesis of superparamagnetic magnetite nanoparticles coated with oleic acid using sonochemical route. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 6, p. 13995–14001, 2018.

HASAN, M. K.; SHAHRIAR, A.; JIM, K. U. Water pollution in Bangladesh and its impact on public health. **Heliyon**, v. 5, n. 8, p. e02145, 2019.

HE, Y. et al. Electromagnetic wave absorbing cement-based composite using Nano-Fe₃O₄ magnetic fluid as absorber. **Cement and Concrete Composites**, v. 92, n. May 2017, p. 1–6, 2018.

HOANG, L. P. et al. Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using a Magnetite Snail Shell. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 231, n. 1, 2020.

HORSZCZARUK, E. et al. Properties of Cement Composites Modified with Silica-magnetite Nanostructures. **Procedia Engineering**, v. 196, n. June, p. 105–112, 2017.

HORSZCZARUK, E. Properties of cement-based composites modified with magnetite nanoparticles: A review. **Materials**, v. 12, n. 2, 2019.

HU, P. et al. Temperature effects on magnetic properties of Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by the sol-gel explosion-assisted method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 773, p. 605–611, 2019.

HUANG, H.; XU, J. Y. Effect of magnetite on concrete mechanics and microwave deicing performance. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 267, n. 4, p. 0–9, 2019.

HUANG, X. W. et al. In-situ LA-ICP-MS trace elemental analyses of magnetite: The Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, North China. **Ore Geology Reviews**, v. 65, n. P4, p. 884–899, 2015.

HUANG, Y. et al. Gadolinium-doped carbon quantum dots loaded magnetite nanoparticles as a bimodal nanoprobe for both fluorescence and magnetic resonance imaging. **Magnetic Resonance Imaging**, v. 68, n. March 2019, p. 113–120, 2020.

HUSSANAN, A.; SALLEH, M. Z.; KHAN, I. Microstructure and inertial characteristics of a magnetite ferrofluid over a stretching/shrinking sheet using effective thermal conductivity model. **Journal of Molecular Liquids**, v. 255, p. 64–75, 2018.

IMANIAN, S. et al. Performance improvement of cement paste loaded with MWCNT–magnetite nanocomposite. **Advances in Cement Research**, p. 1–10, 2020.

JAHANBAN-ESFAHLAN, R. et al. A bio-inspired magnetic natural hydrogel containing gelatin and alginate as a drug delivery system for cancer chemotherapy. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 156, p. 438–445, 2020.

JIANG, H. et al. Provenance discrimination of upper Yangtze River basin sediments: New insights from heavy mineral signatures and detrital magnetite geochemistry. **Quaternary International**, v. 568, n. 1015, p. 79–89, 2020.

KARGOZAR, S.; MOZAFARI, M. Nanotechnology and Nanomedicine: Start small, think big. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 7, p. 15492–15500, 2018.

KHALIL, K. I.; EL-SHAZLY, A. E.; LEHMANN, B. Late Neoproterozoic banded iron formation (BIF) in the central Eastern Desert of Egypt: Mineralogical and geochemical implications for the origin of the Gebel El Hadid iron ore deposit. **Ore Geology Reviews**, v. 69, p. 380–399, 2015.

KIM, H. et al. Synergistically enhanced selective intracellular uptake of anticancer drug carrier comprising folic acid-conjugated hydrogels containing magnetite nanoparticles. **Scientific Reports**, v. 7, n. July 2016, p. 1–10, 2017.

KLEIN, C. **Mineral Science**. 22. ed. [s.l: s.n.].

KLENCŠÁR, Z. et al. The effect of preparation conditions on magnetite nanoparticles obtained via chemical co-precipitation. **Materials Chemistry and Physics**, v. 223, n. October 2018, p. 122–132, 2019.

KOROLEV, D. V. et al. Phosphocreatine immobilization of the surface of silica and magnetite nanoparticles for targeted drug delivery. **Russian Chemical Bulletin**, v. 68, n. 5, p. 1096–1101, 2019.

KOWALIK, P. et al. Yttrium-Doped Iron Oxide Nanoparticles for Magnetic Hyperthermia Applications. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 124, n. 12, p. 6871–6883, 2020.

KOZLOVA, A. A. et al. Magnetic composite submicron carriers with structure-dependent MRI contrast. **Inorganics**, v. 8, n. 2, 2020.

KUMAR, R. et al. Synthesis of magnetite nanoparticles from mineral waste. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 645, p. 398–404, 30 maio 2015.

KUMAR, S. et al. Visible light-assisted photodegradation by silver tungstate-modified magnetite nanocomposite material for enhanced mineralization of organic water contaminants. **Applied Nanoscience (Switzerland)**, v. 10, n. 5, p. 1555–1569, 2020.

LAN, C. et al. Trace elemental modification in magnetite from high-grade metamorphosed BIFs in the southern North China Craton. **Ore Geology Reviews**, v. 112, n. February, p. 103019, 2019.

LEI, W. et al. Synthesis and magnetic properties of octahedral Fe₃O₄ via a one-

pot hydrothermal route. **Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics**, v. 381, n. 4, p. 314–318, 2017.

LI, D. F. et al. Trace element geochemistry of magnetite: Implications for ore genesis of the Talate skarn Pb-Zn (-Fe) deposit, Altay, NW China. **Ore Geology Reviews**, v. 100, p. 471–482, 2018.

LI, H. et al. Mineralogical and microfabric characteristics of magnetite in the Wuyang Precambrian BIFs, southern North China Craton: Implications for genesis and depositional processes of the associated BIFs. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 94, p. 267–281, 2014a.

LI, H. et al. Types and general characteristics of the BIF-related iron deposits in china. **Ore Geology Reviews**, v. 57, p. 264–287, 2014b.

LI, H. M. et al. Desilicification and iron activation-reprecipitation in the high-grade magnetite ores in BIFs of the Anshan-Benxi area, China: Evidence from geology, geochemistry and stable isotopic characteristics. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 113, p. 998–1016, 2015.

LIU, Y. et al. Geochemical characteristics of magnetite in Longqiao skarn iron deposit in the Middle-Lower Yangtze Metallogenic Belt, Eastern China. **Mineralium Deposita**, v. 54, n. 8, p. 1229–1242, 2019.

LIU, Z. et al. Enhanced electromagnetic interference shielding of carbon fiber/cement composites by adding ferroferric oxide nanoparticles. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 575–581, 2017.

LU, B. QING et al. Immobilization of uranium into magnetite from aqueous solution by electrodepositing approach. **Journal of Hazardous Materials**, v. 343, p. 255–265, 2018.

MATEUS, G. A. P. et al. Obtaining drinking water using a magnetic coagulant composed of magnetite nanoparticles functionalized with *Moringa oleifera* seed extract. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 4, p. 4084–4092, 2018.

MATTHEWS, A. Magnetite formation by the reduction of hematite with iron under hydrothermal conditions. **American Mineralogist**, v. 6, p. 927–932, 1976.

MELFOS, V.; HELLY, B.; VOUDOURIS, P. The ancient Greek names “Magnesia” and “Magnetes” and their origin from the magnetite occurrences at the Mavrovouni mountain of Thessaly, central Greece. A mineralogical – geochemical approach. **Archaeological and Anthropological Sciences**, v. 3, p. 165–172, 2011.

MIERNICKI, M. et al. Legal and practical challenges in classifying nanomaterials according to regulatory definitions. **Nature Nanotechnology**, v. 14, n. 3, p. 208–216, 2019.

MILLS, A. A. **The Lodestone: History, physics, and formation**. [s.l.: s.n.]. v. 61

MISHRA, A.; MOHANTY, T. Study of organic pollutant removal capacity for magnetite@ graphene oxide nanocomposites. **Vacuum**, v. 157, n. June, p. 524–529, 2018.

MISHRA, S. et al. Facile Hydrothermal Synthesis of Hollow Fe₃O₄ Nanospheres: Effect of Hydrolyzing Agents and Electrolytes on Electrocapacitive Performance of Advanced Electrodes. **International Journal of Metallurgy and Metal Physics**, v. 2, n. 1, p. 1–15, 2017.

MOHEBBI, M. et al. Synthesis and characterisation of Fe₃O₄ at MPTMS at Au nanocomposite by sol-gel method for the removal of methylene blue. **Micro and Nano Letters**, v. 13, n. 7, p. 979–984, 2018.

MOSIVAND, S.; KAZEMINEZHAD, I. Magnetite nanoparticles functionalized with polypyrrole by pulsed sono-electrocrystallization and their applications for water treatment. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 29, n. 14, p. 12466–12476, 2018.

NADOLL, P. et al. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. **Ore Geology Reviews**, v. 61, p. 1–32, 2014.

NEUMANN, R.; MEDEIROS, E. B. Comprehensive mineralogical and technological characterisation of the Araxá (SE Brazil) complex REE (Nb-P) ore, and the fate of its processing. **International Journal of Mineral Processing**, v. 144, p. 1–10, 2015.

NIKITIN, A. et al. Synthesis, characterization and MRI application of magnetite water-soluble cubic nanoparticles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 441, p. 6–13, 2017.

NIKOLENKO, A. M. et al. Ar-Ar geochronology and petrogenesis of the Mushgai-Khudag alkaline-carbonatite complex (southern Mongolia). **Lithos**, v. 372–373, p. 105675, 2020.

NNADOZIE, E. C.; AJIBADE, P. A. Green synthesis and characterization of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles using *Chromolaena odorata* root extract for smart nanocomposite. **Materials Letters**, v. 263, p. 127145, 2020a.

NNADOZIE, E. C.; AJIBADE, P. A. Green synthesis and characterization of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles using *Chromolaena odorata* root extract for smart nanocomposite. **Materials Letters**, v. 263, 15 mar. 2020b.

NURLILASARI, P.; WIDIYASTUTI, W.; SETYAWAN, H. Novel monopolar arrangement of multiple iron electrodes for the large-scale production of magnetite nanoparticles for electrochemical reactors. **Advanced Powder Technology**, v. 31, n. 3, p. 1160–1168, 2020.

NUZHINA, J. V. et al. Preclinical Evaluation and Clinical Translation of Magnetite-Based Nanomedicines. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 54, n. June, p. 101282, 2019.

OLIVEIRA, A. et al. Synthesis and characterization of nanocomposites based on

rare-earth orthoferrites and iron oxides for magnetic hyperthermia applications. **Ceramics International**, v. 45, n. 14, p. 17920–17929, 2019.

OLIVEIRA, A. M. DE et al. Functionalized magnetite nanoparticles with *Moringa oleifera* with potent antibacterial action in wastewater. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 0, n. 0, p. 1–22, 2020a.

OLIVEIRA, Í. L. et al. Insights into the late-stage differentiation processes of the Catalão I carbonatite complex in Brazil: New Sr–Nd and C–O isotopic data in minerals from niobium ores. **Lithos**, v. 274–275, p. 214–224, 2017.

OLIVEIRA, T. A. et al. Use of Raman spectroscopy to characterize the effect of nanomagnetite as an addition to Portland cement paste on mitigating internal sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120803, 2020b.

OLTULU, M.; ŞAHIN, R. Effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study. **Energy and Buildings**, v. 58, p. 292–301, 2013.

ONYENWOKE, R.; WIEGEL, J. Structure, Properties, Microbiology and Applications of Magnetite. In: **Magnetite: Structure, Properties and Applications**. [s.l: s.n.]. p. 297–316.

ORTEGA-FERNÁNDEZ, I. et al. Performance assessment of an oil-based packed bed thermal energy storage unit in a demonstration concentrated solar power plant. **Energy**, 2020.

PARK, J. C. et al. A new synthetic route to wustite. **Bulletin of the Korean Chemical Society**, v. 20, n. 9, p. 1005–1009, 1999.

PEREIRA, L. et al. Constraining the economic potential of by-product recovery by using a geometallurgical approach: The example of rare earth element recovery at Catalão I, Brazil. **Economic Geology**, v. 114, n. 8, p. 1555–1568, 2019.

PETCHAROEN, K.; SIRIVAT, A. Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method. **Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology**, v. 177, n. 5, p. 421–427, 25 mar. 2012.

PETROV, S. V. Economic deposits associated with the alkaline and ultrabasic complexes of the Kola Peninsula. In: WALL, F.; ZAITSEV, A. N. (Eds.). **Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province**. London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2004. p. 469–490.

PILCHIN, A.; EPPELBAUM, L. V. **Iron and its Unique Role in the Earth Evolution**. 1st. ed. [s.l.] Mexico Geoph. Society, 2006.

PILCHIN, A. N. Magnetite: The story of the mineral's formation and stability. In: **Magnetite: Structure, Properties and Applications**. [s.l: s.n.]. p. 1–99.

PILCHIN, A. N.; EPPELBAUM, L. V. Stability of iron oxides and their role in the formation of rock magnetism. **Acta Geophysica**, v. 55, n. 2, p. 133–153, 2007.

POOLADI, A.; BAZARGAN-LARI, R. Simultaneous removal of copper and zinc ions by Chitosan/Hydroxyapatite/nano-Magnetite composite. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 6, p. 14841–14852, 2020.

POORGHOLY, N. et al. Intelligent anticancer drug delivery performances of two poly(N-isopropylacrylamide)-based magnetite nanohydrogels. **Drug Development and Industrial Pharmacy**, v. 44, n. 8, p. 1254–1261, 2018.

RADÓN, A. et al. Structure and optical properties of Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by co-precipitation method with different organic modifiers. **Materials Characterization**, v. 131, n. April, p. 148–156, 2017.

RAHMAWATI, R. et al. Synthesis of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles from Iron sands by Coprecipitation-Ultrasonic Irradiation Methods. **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 9, n. 1, p. 155–160, 2018a.

RAHMAWATI, R. et al. Green Synthesis of Magnetite Nanostructures from Naturally Available Iron Sands via Sonochemical Method. **Bulletin of the Chemical Society of Japan**, v. 91, n. 2, p. 311–317, 2018b.

RASHAD, A. M. A synopsis about the effect of nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nano-Fe₃O₄ and nano-clay on some properties of cementitious materials - A short guide for Civil Engineer. **Materials and Design**, v. 52, p. 143–157, 2013.

REGUIR, E. P. et al. EARLY MAGMATIC AND REACTION-INDUCED TRENDS IN MAGNETITE FROM THE CARBONATITES OF KERIMASI , TANZANIA The material examined in the present work is part of in London , UK . The three samples selected for detailed. **The Canadian Mineralogist**, v. 46, p. 879–900, 2008.

REN, G. et al. A new green synthesis of porous magnetite nanoparticles from waste ferrous sulfate by solid-phase reduction reaction. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 710, p. 875–879, 2017a.

REN, G. et al. Chromium (VI) adsorption from wastewater using porous magnetite nanoparticles prepared from titanium residue by a novel solid-phase reduction method. **Science of the Total Environment**, v. 607–608, p. 900–910, 2017b.

SADRMOMTAZI, A.; LOTFI-OMRAN, O.; NIKBIN, I. M. Influence of cement content and maximum aggregate size on the fracture parameters of magnetite concrete using WFM, SEM and BEM. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 107, n. December 2019, p. 102482, 2020.

SAEED HUSSAIN, F. H.; ABDUL, D. A. Green synthesis of magnetite nanoparticles using brassica napus flower extract: An efficient and highly recyclable catalyst for the one-pot synthesis of some new N, N-- bis [(P-Cresol-2-YI) substituted phenyl methyl]-4, 4- - oxydianilines. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 63, n. 4, p. 1255–1268, 2020.

SARAGI, T. et al. The impact of synthesis temperature on magnetite nanoparticles size synthesized by co-precipitation method. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1013, n. 1, 2018.

SARI, I. P.; YULIZAR, Y. **Green synthesis of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles using Graptophyllum pictum leaf aqueous extract**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **Anais...Institute of Physics Publishing**, 25 abr. 2017

SAVIĆ, A. B. et al. Multifunctional use of magnetite-coated tuff grains in water treatment: Removal of arsenates and phosphates. **Advanced Powder Technology**, v. 30, n. 8, p. 1687–1695, 2019.

SEO, J. et al. Geochemical and mineralogical characteristics of the Yonghwa phoscorite–carbonatite complex, South Korea, and genetic implications. **Lithos**, v. 262, n. September 2016, p. 606–619, 2016.

SHAHID, M. K.; CHOI, Y. Characterization and application of magnetite Particles, synthesized by reverse coprecipitation method in open air from mill scale. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 495, n. September 2019, p. 165823, 2020.

SHAHRASHOUB, M.; BAKHTIARI, S. The efficiency of activated carbon/magnetite nanoparticles composites in copper removal: Industrial waste recovery, green synthesis, characterization, and adsorption-desorption studies. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 311, n. August 2020, p. 110692, 2021.

SHAHSAVAR, A. et al. On evaluation of magnetic field effect on the formation of nanoparticles clusters inside aqueous magnetite nanofluid: An experimental study and comprehensive modeling. **Journal of Molecular Liquids**, v. 312, p. 113378, 2020.

SHI, L. et al. Synthesis of size-controlled hollow Fe₃O₄ nanospheres and their growth mechanism. **Particuology**, v. 49, p. 16–23, 2020.

SHIMA; DAMODARAN, P. Mesoporous Magnetite Nanoclusters as Efficient Nanocarriers for Paclitaxel Delivery. **ChemistrySelect**, v. 5, n. 29, p. 9261–9268, 2020.

SHIN, D.; OH, Y.; LEE, M.-J. Mineral Chemistry of Magnetite from the Hongcheon Carbonatite-Phoscorite Complex, Korea. **Journal of the Mineralogical Society of Korea**, v. 26, n. 4, p. 299–312, 2013.

SIKORA, P. et al. The Influence of Nano-Fe₃O₄ on the Microstructure and Mechanical Properties of Cementitious Composites. **Nanoscale Research Letters**, v. 11, n. 1, 1 dez. 2016.

SIKORA, P. et al. The effects of Fe₃O₄ and Fe₃O₄/SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of cement mortars exposed to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 441–450, 10 set. 2018.

SIKORA, P. et al. Incorporation of magnetite powder as a cement additive for improving thermal resistance and gamma-ray shielding properties of cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 113–121, 2019.

SINGH, A. P. et al. Multiwalled carbon nanotube/cement composites with exceptional electromagnetic interference shielding properties. **Carbon**, v. 56, p. 86–96, 2013.

SINGH, P.; UPADHYAY, C. Fine tuning of size and morphology of magnetite nanoparticles synthesized by microemulsion. **AIP Conference Proceedings**, v. 1953, p. 1–6, 2018.

SOLEYMANI, M. et al. Effects of multiple injections on the efficacy and cytotoxicity of folate-targeted magnetite nanoparticles as theranostic agents for MRI detection and magnetic hyperthermia therapy of tumor cells. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–14, 2020.

SOMU, P.; KANNAN, U.; PAUL, S. Biomolecule functionalized magnetite nanoparticles efficiently adsorb and remove heavy metals from contaminated water. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 94, n. 6, p. 2009–2022, 2019.

SONG, W. et al. Genesis of the world's largest rare earth element deposit, Bayan Obo, China: Protracted mineralization evolution over ~1 b.y. **Geology**, v. 46, n. 4, p. 323–326, 2018.

SONG, X. M. et al. Facile preparation of S-doped magnetite hollow spheres for highly efficient sorption of uranium(vi). **Dalton Transactions**, v. 46, n. 10, p. 3347–3352, 2017.

STAN, M. et al. Removal of antibiotics from aqueous solutions by green synthesized magnetite nanoparticles with selected agro-waste extracts. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 107, p. 357–372, 2017.

SULAIMAN, S. et al. Adsorption potential of magnetite nanoparticles for copper removal from aqueous solution. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, v. 9, n. 1, p. 5424–5429, 2019.

TAKAI, Z. I. et al. **Preparation and Characterization of Magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles By Sol-Gel Method** *International Journal of Nanoelectronics and Materials*. [s.l: s.n.].

TAKEHARA, L.; SILVEIRA, F. V.; SANTOS, R. V. **Potentiality of Rare Earth Elements in Brazil**. [s.l.] Elsevier Inc., 2015.

TAUFIQ, A. et al. Synthesis of magnetite/silica nanocomposites from natural sand to create a drug delivery vehicle. **Heliyon**, v. 6, n. 4, 2020.

TIWARI, A. et al. Graphitic Carbon Coated Magnetite Nanoparticles for Dual Mode Imaging and Hyperthermia. **ACS Applied Nano Materials**, v. 3, n. 1, p. 896–904, 2020.

TORRES-GÓMEZ, N. et al. Shape tuning of magnetite nanoparticles obtained by hydrothermal synthesis: Effect of temperature. **Journal of Nanomaterials**, v. 2019, 2019.

TOWNSEND, L. T. et al. Sulfidation of magnetite with incorporated uranium. **Chemosphere**, n. C, 2021.

TOYOS-RODRÍGUEZ, C. et al. A Simple and Reliable Synthesis of Superparamagnetic Magnetite Nanoparticles by Thermal Decomposition of Fe(acac)₃. **Journal of Nanomaterials**, v. 2019, 2019.

TRAN, L. T. et al. Studying Ni(II) adsorption of magnetite/graphene oxide/chitosan nanocomposite. **Advances in Polymer Technology**, v. 2019, n. li, 2019.

USMAN, M. et al. Magnetite and Green Rust: Synthesis, Properties, and Environmental Applications of Mixed-Valent Iron Minerals. **Chemical Reviews**, v. 118, n. 7, p. 3251–3304, 2018.

VALENZUELA, R. et al. Influence of stirring velocity on the synthesis of magnetite nanoparticles (Fe₃O₄) by the co-precipitation method. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 488, n. 1, p. 227–231, 20 nov. 2009.

VAN GENUCHTEN, C. M. et al. Controls on the formation of Fe(II,III) (hydr)oxides by Fe(0) electrolysis. **Electrochimica Acta**, v. 286, n. 0, p. 324–338, 2018.

WANASINGHE, D. et al. Advancements in electromagnetic interference shielding cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 231, p. 117116, 2020.

WEI, Y. et al. **Synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles and their magnetic properties**. Procedia Engineering. **Anais...Elsevier Ltd**, 2012

WILLIAMS, G. V. M. et al. Spin-dependent tunnelling in magnetite nanoparticles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 460, p. 229–233, 2018.

XIE, W. et al. Injectable and self-healing thermosensitive magnetic hydrogel for asynchronous control release of doxorubicin and docetaxel to treat triple-negative breast cancer. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 9, n. 39, p. 33660–33673, 2017.

YANG, K. et al. The bayan Obo (China) giant REE accumulation conundrum elucidated by intense magmatic differentiation of carbonatite. **Geology**, v. 47, n. 12, p. 1198–1202, 2019a.

YANG, X. et al. Improved removal capacity of magnetite for Cr(VI) by electrochemical reduction. **Journal of Hazardous Materials**, v. 374, n. February, p. 26–34, 2019b.

YANG, Z. F. et al. Co-precipitation of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles onto carbon nanotubes for removal of copper ions from aqueous solution. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 82, p. 56–63, 2018.

YEW, Y. P. et al. Green Synthesis of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles Using Seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) Extract. **Nanoscale Research Letters**, v. 11, n. 1, 1 dez. 2016.

YEW, Y. P. et al. Green biosynthesis of superparamagnetic magnetite Fe₃O₄ nanoparticles and biomedical applications in targeted anticancer drug delivery system: A review. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 2287–2308, 2020.

YIN, S.; MA, C.; ROBINSON, P. T. Textures and high field strength elements in hydrothermal magnetite from a skarn system: Implications for coupled dissolution-precipitation reactions. **American Mineralogist**, v. 102, n. 5, p. 1045–1056, 2017.

YUE, W.; JIN, B.; ZHAO, B. Transparent heavy minerals and magnetite geochemical composition of the Yangtze River sediments: Implication for provenance evolution of the Yangtze Delta. **Sedimentary Geology**, v. 364, p. 42–52, 2018.

ZAMANI, H.; RASTEGARI, B.; VARAMINI, M. Antioxidant and anti-cancer activity of *Dunaliella salina* extract and oral drug delivery potential via nano-based formulations of gum Arabic coated magnetite nanoparticles. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v. 54, n. September, p. 101278, 2019.

ZAYED, M. A. et al. Analytical Characterization of Hematite / Magnetite Ferrofluid Nanocomposites for Hyperthermia Purposes. **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, v. 29, n. 11, p. 2899–2916, 2016.

ZHENG, J. et al. Enhanced microwave electromagnetic properties of Fe₃O₄/graphene nanosheet composites. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 589, p. 174–181, 2014.

CAPÍTULO III - APLICAÇÃO DE REJEITO MAGNÉTICO COMO MATERIAL ULTRAFINO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND

1. Introdução

A indústria cimenteira é tida como uma das maiores causadoras de impactos ao meio ambiente, devido à elevada quantidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e pelo alto consumo de energia durante o processo de fabricação do cimento Portland (CAI et al., 2016; HOSSAIN et al., 2017; MIKULČIĆ et al., 2016; MISHRA; SIDDIQUI, 2014). Essa indústria é responsável por cerca de 6 a 9% das emissões antrópicas globais de CO₂ e consome cerca de 12-15% da energia industrial total. Além disso, esse setor também gera emissões de NO_x, SO_x e partículas de poeira de forno (OFOSU-ADARKWA; XIE; JAVED, 2020; SHEN et al., 2017; TALAEI et al., 2019).

Ao contrário da maior parcela do setor manufatureiro, na indústria cimenteira as emissões de GEE são resultantes do consumo de energia e do processo produtivo do clínquer. As emissões inerentes ao processo produtivo são geradas na etapa de calcinação, onde aproximadamente 0,5kg de CO₂ é produzido para cada kg de clínquer (TALAEI et al., 2019).

A *World Business Council for Sustainable Development* (2018) propõe cinco medidas que podem promover a transição verde e o desenvolvimento sustentável da indústria do cimento nas pesquisas existentes: (1) melhoria da eficiência energética; (2) redução da proporção de clínquer para cimento; (3) implementação de captura e armazenamento de carbono; (4) mudança para combustíveis alternativos e (5) uso de matérias-primas alternativas para produção de cimento. A melhoria da eficiência energética trata-se de uma estratégia básica, que ocasiona a redução da intensidade energética e as emissões de CO₂ ao lançar mão de tecnologias avançadas, tais como, forno a seco de grande porte e tecnologia de geração de energia de calor residual. A redução da proporção do clínquer para cimento significa optar por adições ao clínquer, reduzindo o consumo de energia, bem como a emissão de CO₂ por tonelada de cimento. A implementação da tecnologia de captura e armazenamento de carbono é direta e eficiente na redução das emissões de

dióxido de carbono e tem sido objeto de estudos em todo o mundo. Em comparação com os combustíveis fósseis convencionais, os combustíveis alternativos podem diminuir a emissão de CO₂ e de outros poluentes de forma bastante eficaz. O uso de algumas matérias-primas alternativas para a produção de cimento acarretam em uma menor emissão de carbono, se comparado ao uso de calcário (CORMOS; CORMOS, 2017; WEN; CHEN; MENG, 2015; ZHANG et al., 2021).

Geralmente, as adições minerais são utilizadas em substituição e adição ao clínquer, fornecendo um conforto ambiental, visto que subprodutos industriais são reciclados, emissões de poluentes são reduzidas e matérias-primas e energia economizadas. Ademais, essas adições reduzem os custos de materiais à base de cimento e diversificam as aplicações e propriedades do cimento Portland. As adições minerais mais utilizadas, atualmente, são nanomateriais e resíduos provenientes de outras indústrias, que geralmente seriam descartados em grandes volumes e sem nenhuma reutilização, gerando riscos de passivos ambientais (CASTRO et al., 2017).

Entre os nanomateriais empregados como adição em compósitos cimentícios, estudos apontam que nanomateriais de carbono melhoram as resistências mecânicas, comportamento à fratura e aumentam a resistividade elétrica (GILLANI et al., 2017; LEE et al., 2020; NAQI et al., 2019; YOO et al., 2019). As partículas de nano sílica promovem compósitos cimentícios com maior resistência mecânica e durabilidade quanto à impermeabilidade à água e aos íons cloreto (DU, 2019; DU; PANG, 2019; KOOSHAFAR; MADANI, 2020). As partículas de nanomagnetita, por sua vez, aumentam as resistências mecânicas, verificadas pelo preenchimento dos poros, estabilidade química em ambientes de cloreto e sulfato e blindagem gama (BRAGANÇA et al., 2016; FLOREZ et al., 2019; GHAZANLOU et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020).

A utilização de resíduos industriais é bastante desafiadora, entretanto, pode viabilizar diversas vantagens para a indústria cimenteira (SINGH; SUBRAMANIAM, 2019). A adição de borracha de pneu reciclada se mostra eficaz no desenvolvimento de argamassas com pronunciado comportamento

hidrofóbico, o qual permite a diminuição da penetração de água, que causa deterioração progressiva e falha (NUZAIMAH et al., 2018).

Neste contexto, o objetivo do presente capítulo desta pesquisa é avaliar a potencialidade da utilização de rejeitos magnéticos provenientes da mineração de nióbio como adição em argamassas de cimento Portland.

2. Materiais e Métodos

Para a preparação das argamassas convencionais foram utilizados cimento Portland, areia normal brasileira classificada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) (#16, #30, #50 e #100) , rejeito magnético proveniente de mineração de nióbio moído e água potável da companhia de abastecimento público de água (Figura 2). O aglomerante usado foi o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV ARI) em consequência do seu menor teor de adições em relação aos demais tipos de cimento. As propriedades químicas e físicas do CPV ARI são apresentadas na Tabela 2.

Figura 2: Materiais usados no estudo do emprego de rejeito magnético como material ultrafino em argamassas de cimento Portland.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2: Propriedades físicas e químicas do cimento Portland.

Ensaio Químicos				
Ensaio	Metodologia	Un.	Resultado	Exigências
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NM 15/12	%	0,91	≤ 1,00
Perda ao fogo - PF	ABNT NM 18/12	%	4,41	≤ 4,50
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NM 14/12	%	1,49	≤ 6,50
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NM 16/12	%	3,06	≤ 4,50
Anidrido Carbônico - CO ₂	ABNT NM 20/12	%	2,84	≤ 3,00
Ensaio Físicos				
Ensaio	Metodologia	Un.	Resultado	Exigências
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm ³ /g	4,938	≥ 3.000,00
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm ³	3,02	não aplicável

Índice de finura - # 75 μ m (n ^o 200)	ABNT NBR 11579/13	%	0,23	\leq 6,00
Resíduo na peneira # 325	ABNT NBR 9202/85	%	2,61	não aplicável
Água de consistência normal	ABNT NM 43/03	%	28,5	não aplicável
Início de pega	ABNT NM 65/03	minutos	100	\geq 60,00
Fim de pega	ABNT NM 65/03	minutos	160	\leq 600,00
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582/12	Mm	0,00	\leq 5,00
Ensaio Mecânicos				
Ensaio - ABNT NBR 7215/96	Un.	Des. Pad.	Resultado	Exigências
Resistência à compressão - 1 dia	MPa	1,32	27,70	14,00
Resistência à compressão - 3 dias	MPa	1,78	39,6	24,00
Resistência à compressão - 7 dias	MPa	1,60	44,30	34,00
Resistência à compressão - 28 dias	MPa	1,64	52,80	não aplicável
Observações				
Na ₂ O: 0,07%	K ₂ O: 0,92%	Na ₂ Oeq: 0,67		

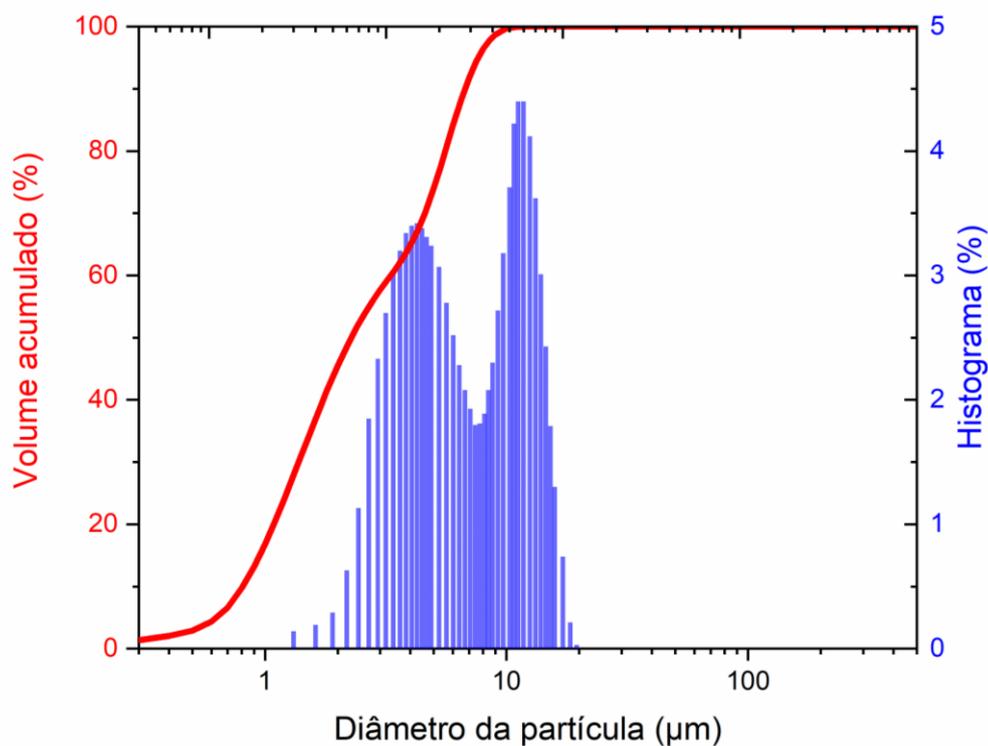
Fonte: Brennand Cimentos (2018).

2.1. Caracterização do rejeito magnético

Após a coleta da amostra, o rejeito magnético foi seco em estufa a 100°C durante 24 horas e em seguida passou por moagem em moinho planetário de alto desempenho (FRITSCH, Pulverisette 5) durante 15 minutos com velocidade de 300rpm. Após o processo de moagem, a amostra de rejeito magnético foi caracterizada. A distribuição granulométrica foi determinada por um granulômetro a laser CILAS 1060, com 13% de obscuração. A Figura 3 mostra a curva de distribuição cumulativa do tamanho das partículas do rejeito magnético. O tamanho das partículas encontra-se no intervalo entre 0,3 μ m e 500 μ m, com tamanho médio de 3,21 μ m e com 90% das partículas (d₉₀) abaixo de 6,74 μ m.

A composição de óxido do rejeito magnético foi determinada por espectroscopia de fluorescência de raios X dispersiva de energia (Shimadzu EDX – 720) (Tabela 3). As fases cristalinas foram estabelecidas por difração de raio X (Shimadzu XRD-7000) utilizando radiação Cu K α , com 2 θ variando de 5° a 100°, a 2°/min. Os picos de magnetita foram identificados utilizando o *software* Match! 3 (Figura 4). Por último, as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do rejeito foram adquiridas usando equipamento Hitachi TM 3000 com detector de elétrons retroespalhados (Figura 5).

Figura 3: Curva granulométrica do rejeito magnético moído proveniente do beneficiamento de minério de nióbio.



Fonte: Própria autora.

Tabela 3: Composição de óxidos do rejeito magnético.

Óxido	Fe ₂ O ₃	BaO	SO ₃	P ₂ O ₅	NbO	TiO ₂	SiO ₂	ZrO ₂	SrO	ZnO
%	82,69	11,78	3,12	0,75	0,60	0,52	0,35	0,08	0,07	0,05

Fonte: Própria autora.

Figura 4: Difração de Raio X do rejeito magnético.

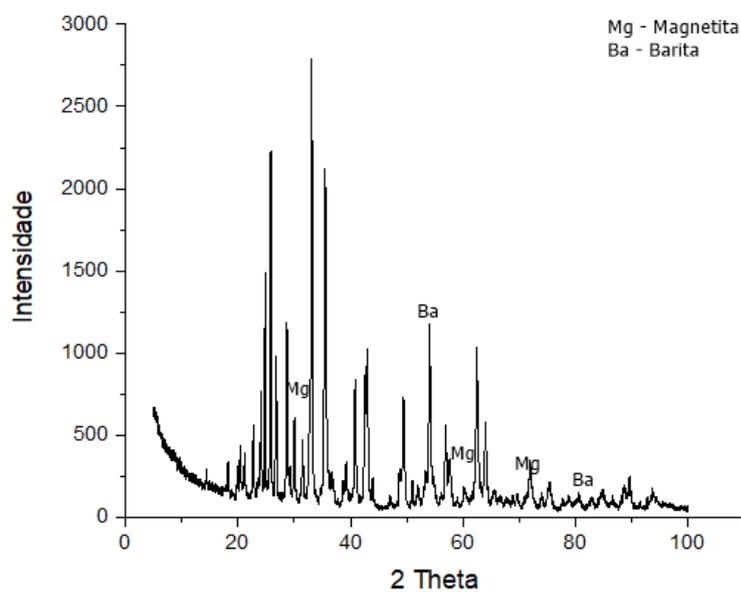
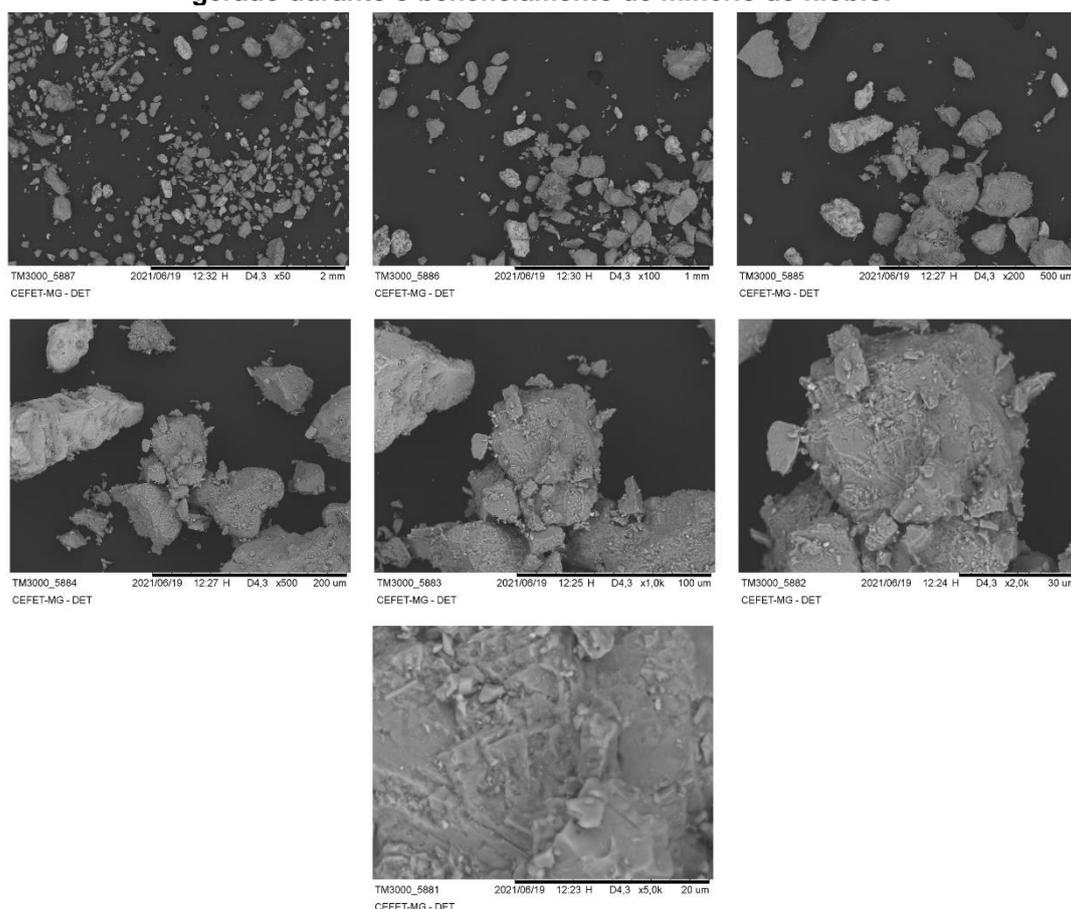


Figura 5: Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do rejeito magnético gerado durante o beneficiamento de minério de nióbio.



Fonte: Própria autora.

2.2. Produção e avaliação de argamassas de cimento

Foram preparados cinco tipos de argamassas contendo adições de 2%, 4%, 8% em peso de rejeito magnético em relação a massa de cimento Portland, além de uma argamassa de referência. Utilizou-se relação a/c igual a 0,48. A Tabela 4 traz as proporções dos componentes das misturas.

Tabela 4: Proporções dos componentes das misturas de argamassas.

Designação da amostra	Massa para mistura (g)			
	Cimento	Areia	Água	Rejeito magnético
R ₀	624	1872	300	-
R ₂	624	1872	300	12,48
R ₄	624	1872	300	24,96
R ₈	624	1872	300	49,92

Fonte: Própria autora.

Para cada porcentagem de adição, foram moldados corpos de provas (CPs) cilíndricos com diâmetro e altura iguais a 25mm e 50mm, respectivamente,

sendo moldados para ensaios de resistência à compressão, absorção de água, porosidade, densidade aparente e ataque ácido. Os CPs foram curados imersos em água saturada com hidróxido de cálcio.

A resistência à compressão foi avaliada em 7, 28 e 91 dias. Para o ensaio, foi usada a máquina de ensaio universal EMIC e o *software* TESC e Vmaq, com taxa crescente de 0,25 Mpa/s, de acordo com as especificações fornecidas pela norma brasileira NBR 7215 (ABNT, 2019).

A absorção de água foi determinada através dos procedimentos definidos pela NBR 9778 (ABNT, 2005). A absorção de água (A), índice de vazios (I) e massa específica real (ρ_r) foram calculadas de acordo com as equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad [1]$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad [2]$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad [3]$$

Onde m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura; m_s é a massa da amostra seca em estufa; m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura e ρ é a massa específica da água.

Por último, para avaliar a resistência ao ataque ácido, os corpos de prova curados de 28 dias foram secos em estufa, pesados e submersos em uma solução de ácido sulfúrico a 5% (m/m). Após 7 dias, as amostras foram lavadas, escovadas e secas em estufas e pesadas novamente para determinar a perda de massa. A fim de observar o efeito do ataque ácido sobre a microestrutura da argamassa, foi realizada análises de microscopia eletrônica de varredura.

3. Resultados e discussão

3.1. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica real

As propriedades de absorção de água, índice de vazios e massa específica real foram avaliadas após 28 dias de cura, em todos os traços: referência, com adição de 2%, 4% e 8% de magnetita. Os resultados estão apresentados nas Figuras 5 (absorção de água e índice de vazios) e Figura 6 (massa específica real).

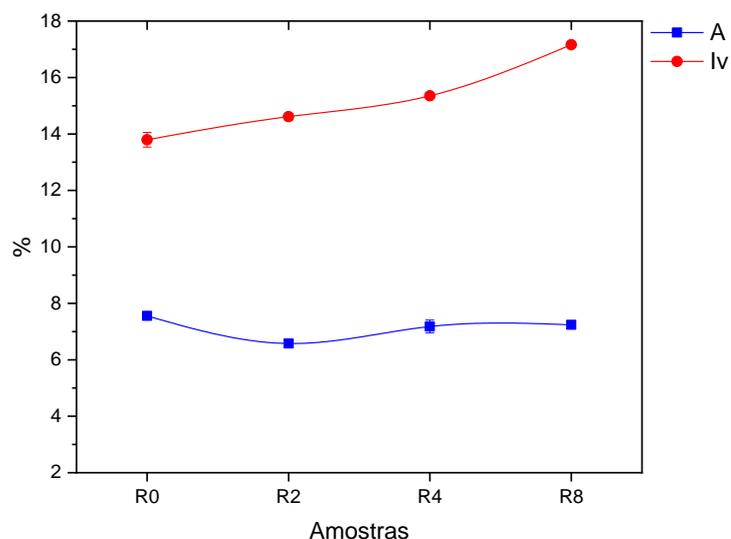
Com relação ao ensaio de absorção de água, nota-se que não houve variação significativa entre os traços. Observa-se que os resultados com adição de rejeito magnético obtiveram valores de absorção de água menores do que o traço de referência. Os corpos de prova com 2% de rejeito magnético foram o que obtiveram menor valor de absorção de água, correspondendo à média 6,57%, enquanto os corpos de prova de referência, com adição de 4% e 8% atingiram respectivamente, 7,55%, 7,18% e 7,24%.

Esse resultado sugere que houve preenchimentos de vazios ao adicionar rejeito magnético na mistura. A inserção de material fino em compósitos cimentícios promove o preenchimento dos macros e dos microporos da mistura diminuindo a capacidade de absorção (SHETTIMA et al., 2016).

O resultado do índice de vazios também se mostrou com baixa variação entre os traços. No entanto, ao acrescentar maiores porcentagens de rejeito magnético, como 8% nota-se um aumento considerável de vazios.

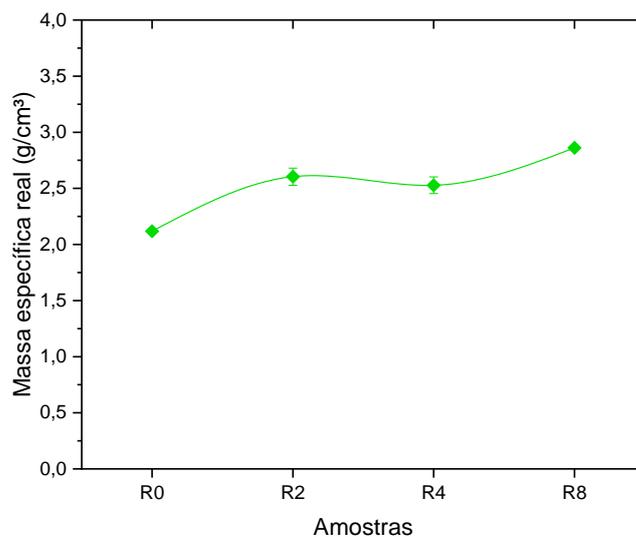
Já a massa específica real é crescente à medida que se aumenta as porcentagens do rejeito magnético adicionada, como já esperado. Os valores médios foram de 2,11g/cm³ para os corpos de prova de referência, e 2,60g/cm³, 2,53g/cm³ e 2,86g/cm³ para adição de 2%, 4% e 8% de rejeito magnético, respectivamente.

Figura 6: Resultado ensaio de absorção de água (A) e índice de vazios (Iv).



Fonte: Própria autora.

Figura 7: Resultado ensaio de massa específica real.



Fonte: Própria autora.

A análise de variância ANOVA foi aplicada para melhor compreensão dos resultados. Ao considerar 5% de erro, foi analisado o valor-p, onde entende-se que $p \geq 0,05$ os resultados são estatisticamente iguais e $p \leq 0,05$ os valores são considerados distintos. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 5. Já na Tabela 6 e Tabela 7 são apresentados os testes de Tukey, onde as médias que compartilham uma letra são consideradas significativamente semelhantes.

Com relação ao ensaio de absorção de água, os corpos de prova de referência e com adição de 2% de rejeito magnético foram considerados diferentes, as demais combinações são consideradas estatisticamente semelhantes (Tabela 6). Portanto pode-se afirmar que a argamassa com adição de 2% de rejeito magnético obteve o melhor desempenho relacionada a absorção de água.

O índice de vazios dos corpos de prova com 8% de rejeito magnético é estatisticamente diferente dos demais. No entanto, a argamassa de referência e com acréscimo de 2% são considerados semelhantes.

Para os valores de massa específica real, os corpos de prova de referência são considerados estatisticamente diferente dos demais, assim como as adições de 4% e 8% (Tabela 8).

Tabela 5: Análise de variância

Ensaio	Varição	Amostras	Valor F	Valor-P
Absorção de água	Entre grupos	R0, R2, R4, R8	7,94	0,037
Índice de vazios	Entre grupos	R0, R2, R4, R8	98,13	0,0003
Massa específica real	Entre grupos	R0, R2, R4, R8	32,18	0,003

Fonte: Própria autora.

Tabela 6: Teste de Tukey para absorção de água.

Fator	N	Média	Agrupamento
R0	2	7,555	A
R8	2	7,2400	A B
R4	2	7,181	A B
R2	2	6,576	B

Fonte: Própria autora.

Tabela 7: Teste de Tukey para índice de vazios.

Fator	N	Média	Agrupamento
R8	2	17,1603	A
R4	2	15,3517	B
R2	2	14,612	B C
R0	2	13,795	C

Fonte: Própria autora.

Tabela 8: Teste de Tukey para massa específica real.

Fator	N	Média	Agrupamento
R8	2	2,8613	A
R2	2	2,6040	A B
R4	2	2,5278	B
R0	2	2,1182	C

Fonte: Própria autora.

3.2. Ensaio de ataque ácido

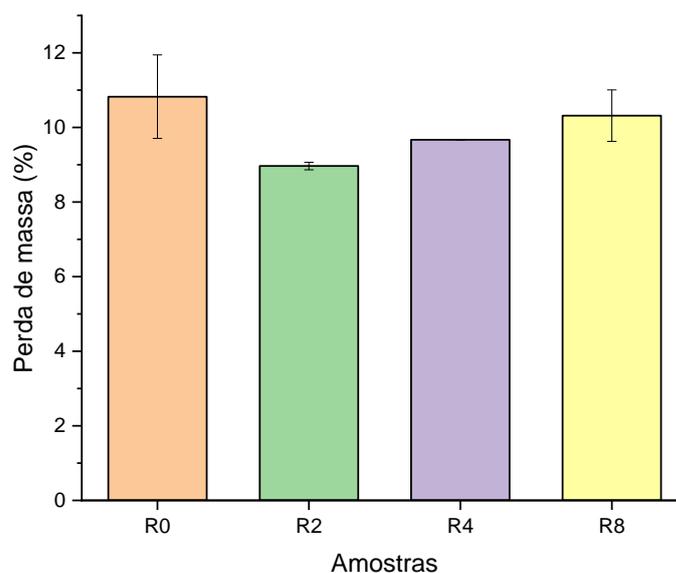
A perda de massa após ataque ácido é apresentada na Figura 7. Os corpos de prova de referência obtiveram perda de massa média de 10,82%, com 2% de adição de rejeito magnético a perda diminuiu para 8,96%, já os traços com 4% e 8% de magnetita apresentaram, respectivamente, 9,67% e 10,32%. A menor perda de massa ocorreu nos corpos de prova com 2% de rejeito magnético, em concordância com o ensaio de absorção de água.

A ação do ácido consiste em um ataque aos componentes do cimento na pasta endurecida, essa ação possivelmente interfere nos compostos de cálcio, com isso a capacidade de ligação do cimento é prejudicada (BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2003).

Essa perda de massa ocasionada por ataque ácido está intimamente relacionada com a quantidade de poros no material. A diminuição da perda de massa pode ser atribuída à finura do material incorporado, ocupando os vazios da mistura. Quanto maior a porosidade, o ácido pode entrar mais facilmente na matriz cimentícia e menor será a durabilidade. Portanto, essa propriedade está relacionada ao quanto esse material é denso, impermeável e bem compactado. (BAKHAREV; SANJAYAN; CHENG, 2003; GRUYAERT et al., 2012; LARA; CORDEIRO, 2018; SHETTIMA et al., 2016).

Ao aplicar a análise de variância nos resultados, verificou-se que todos os valores se mostraram estatisticamente semelhantes (Tabela 8). Portanto pode-se inferir que a adição do rejeito magnético não influenciou significativamente nesta propriedade.

Figura 8: Resultado ensaio de ataque ácido.



Fonte: Própria autora.

Tabela 9: Análise de variância para ataque ácido.

Ensaio	Varição	Amostras	Valor F	Valor-P
Ataque ácido	Entre grupos	R0, R2, R4, R8	1,50	0,344

Fonte: Própria autora.

3.3. Ensaio de resistência à compressão

O resultado do ensaio de resistência à compressão (Figura 8) aponta um aumento do valor de resistência nas argamassas com adição de rejeito magnético. As argamassas R₂ apresentaram maior resistência em comparação às demais misturas em todas as idades.

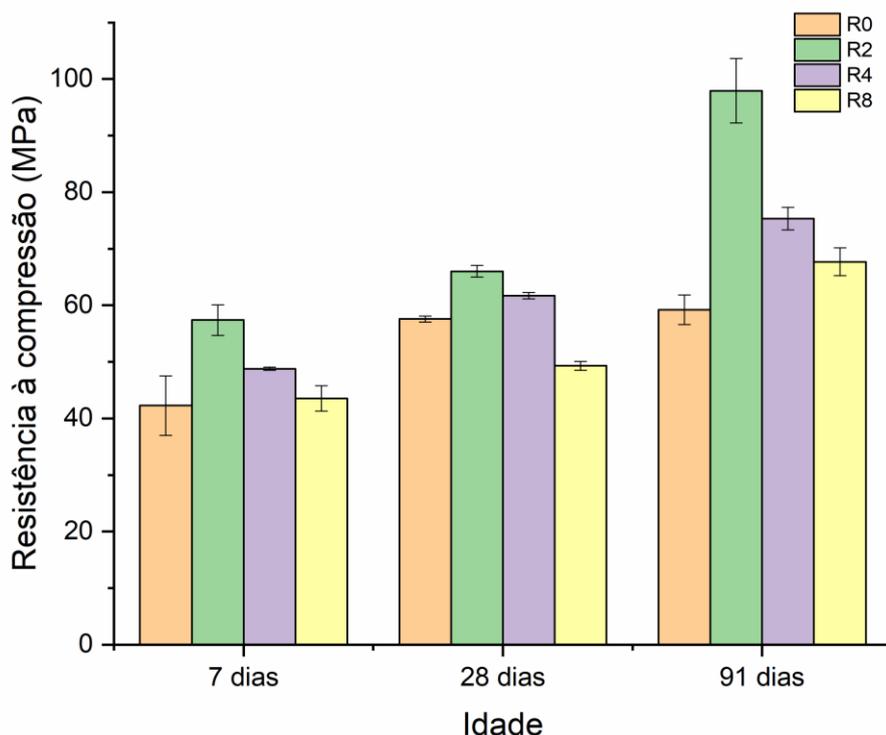
Todos os corpos de prova atingiram o limite mínimo de 34MPa em 7 dias, estabelecido pela norma ABNT NBR 16697 (2018) para cimentos do tipo CPV. Ao avaliar os resultados nota-se que em todas as idades as argamassas com adição de 2% se sobressaem positivamente com resistências mais elevadas que as demais, os corpos de prova com 4% apresentaram a segunda melhor resistência. Já as argamassas com adição de 8% de rejeito magnético se mostraram com valores abaixo das demais, próximos às argamassas de

referência. Aos 28 dias de idade, os corpos de prova com adição de 2% apresentaram valor médio de 66,01MPa, enquanto a média das referências foi de 57,58%. Apenas o acréscimo de 8% que ficou abaixo da referência, apresentando valor médio de 49,31%.

Essa queda na resistência com adições maiores de rejeito magnético pode ter ocorrido pela perda da trabalhabilidade e conseqüente perda na eficácia da compactação, uma vez que ao adicionar o rejeito na mistura a necessidade de água é maior, resultando em uma queda na trabalhabilidade e, com isso, aumento de vazios, como pode ser visto anteriormente nos resultados de absorção de água e no índice de vazios.

Após os 28 dias verifica-se que os corpos de prova continuaram a ganhar resistência, em especial o traço com adição de 2% de rejeito magnético, o qual obteve, aos 91 dias, o valor de 97,94MPa. Nas demais adições também foi verificado melhorias na resistência, a adição de 4% e 8% atingiram, respectivamente, 75,33MPa e 67,69MPa. Já para os corpos de prova de referência não foi observada diferença significativa entre essas idades.

Figura 9: Resultado ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Própria autora.

Ao aplicar a análise de variância nos resultados, verifica-se que os valores médios da idade de 91 dias com acréscimo da rejeito magnético obtiveram os melhores resultados e possuem diferença significativa dentre as demais porcentagens de adição. Aos 28 dias, o acréscimo de 2% e 4% de rejeito magnético se mostraram estatisticamente semelhantes. Já na idade de 7 dias, as argamassas com 2% também apresentaram o melhor resultado, seguido dos acréscimos de 4% e 8%, os quais não apresentaram diferença significativa.

Tabela 10: Análise de variância para resistência à compressão.

Ensaio	Varição	Amostras	Valor F	Valor-P
Resistência à compressão	Entre grupos	R0, R2, R4, R8 (7, 28 e 91 dias)	177,91	0,00001

Fonte: Própria autora.

Tabela 11: Teste de Tukey para resistência à compressão.

Fator	N	Média	Agrupamento
91 dias 2%	3	97,94	A
91 dias 4%	3	75,333	B
91 dias 8%	3	67,697	C
28 dias 2%	3	66,017	C D
28 dias 4%	3	61,700	D E
91 dias REF	3	59,213	E
28 dias REF	2	57,580	E
7 dias 2%	2	57,38	E
28 dias 8%	2	49,310	F
7 dias 4%	2	48,785	F
7 dias 8%	2	43,530	F G
7 dias REF	4	42,275	G

Fonte: Própria autora.

4. Conclusão

A adição de rejeito magnéticos proveniente do beneficiamento de minério de nióbio em compósitos cimentícios foi avaliada por meio de parâmetros físicos e mecânicos.

O acréscimo de 2% de rejeito magnético diminuiu o valor médio de absorção de água, já o índice de vazios não variou significativamente em relação aos corpos de prova de referência.

No ensaio de ataque ácido, as argamassas com adição de 2% de rejeito magnético apresentaram a menor perda de massa média dentre os traços, com 8,96%, esse valor foi 1,86% abaixo da perda de massa média dos corpos de prova de referência.

A adição de 2% e 4% de rejeito magnético influenciou positivamente na resistência à compressão. Em todas as idades o acréscimo de 2% foi o que obteve as maiores médias de resistência. Possivelmente, o rejeito magnético atuou como filler, preenchendo os vazios da argamassa e com isso proporcionou melhorias na resistência e nas demais propriedades estudadas.

O acréscimo de 8% de rejeito magnético resultou em uma queda na resistência à compressão, possivelmente se deve ao fato da diminuição da trabalhabilidade e conseqüente dificuldade de homogeneização da massa. Porém, vale ressaltar, que todos os resultados foram acima que 34MPa em 7 dias de idade, limite mínimo estabelecido para cimentos CPV.

Os resultados obtidos confirmam a viabilidade para a adição de rejeito magnético proveniente de beneficiamento de minério de nióbio em argamassas cimentícias. A incorporação de até 4% desse material influenciou positivamente nas propriedades estudadas, além de agregar valor ao resíduo sem finalidade, promovendo ganhos ambientais.

5. Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

BRAGANÇA, M. O. G. P. et al. Performance of Portland cement concretes with 1% nano-Fe₃O₄ addition: Electrochemical stability under chloride and sulfate environments. **Construction and Building Materials**, v. 117, n. 2016, p. 152–162, 2016.

BAKHAREV, T.; SANJAYAN J. G.; CHENG Y. -B. Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. **Cement and Concrete Research**, v.33, p. 1607-1611, 2003.

CAI, B. et al. Evaluating CO₂ emission performance in China's cement industry: An enterprise perspective. **Applied Energy**, v. 166, p. 191–200, 2016.

CASTRO, A. L. et al. Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 63, n. 365, p. 65–76, 2017.

CORMOS, A. M.; CORMOS, C. C. Reducing the carbon footprint of cement industry by post-combustion CO₂ capture: Techno-economic and environmental assessment of a CCS project in Romania. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 123, p. 230–239, 2017.

DU, H. Properties of ultra-lightweight cement composites with nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 696–704, 2019.

DU, H.; PANG, S. D. High performance cement composites with colloidal nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 317–325, 2019.

FLOREZ, R. et al. The material characterization and gamma attenuation properties of Portland cement-Fe₃O₄ composites for potential dry cask applications. **Progress in Nuclear Energy**, v. 111, n. November 2018, p. 65–73, 2019.

GHAZANLOU, S. I. et al. A comparative study on the mechanical, physical and morphological properties of cement-micro/nanoFe₃O₄ composite. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–14, 2020.

GILLANI, S. S. U. H. et al. Improving the mechanical performance of cement composites by carbon nanotubes addition. **Procedia Structural Integrity**, v. 3, p. 11–17, 2017.

GRUYAERT, E. et al. Investigation of the influence of blast-furnace slag on the resistance of concrete against organic acid or sulphate attack by means of accelerated degradation tests. **Cement and Concrete Research**, v. 42, p. 173-

185, 2012.

HOSSAIN, M. U. et al. Comparative LCA on using waste materials in the cement industry: A Hong Kong case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 199–208, 2017.

KOOSHAFAR, M.; MADANI, H. An investigation on the influence of nano silica morphology on the characteristics of cement composites. **Journal of Building Engineering**, v. 30, n. January, p. 101293, 2020.

LARA, R. C; CORDEIRO, G. C. Effect of Rice Husk Ash as Supplementary Cementitious Material on the Performance of Cement-Based Pastes Continuously Exposed to Organic Acid Solution (Vinasse). **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 7, jul. 2019.

LEE, H. et al. Enhanced bonding behavior of multi-walled carbon nanotube cement composites and reinforcing bars. **Composite Structures**, v. 243, n. March, p. 112201, 2020.

MIKULČIĆ, H. et al. Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 119–132, 2016.

MISHRA, S.; SIDDIQUI, N. A. A Review On Environmental and Health Impacts Of Cement Manufacturing Emissions. **International Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences**, v. 2, n. 3 June 2014, p. 2, 2014.

NAQI, A. et al. Effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the strength development of cementitious materials. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1203–1211, 2019.

NUZAIMAH, M. et al. Recycling of waste rubber as fillers: A review. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 368, n. 1, 2018.

OFOSU-ADARKWA, J.; XIE, N.; JAVED, S. A. Forecasting CO₂ emissions of China's cement industry using a hybrid Verhulst-GM(1,N) model and emissions' technical conversion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 130, n. May, p. 109945, 2020.

OLIVEIRA, T. A. et al. Use of Raman spectroscopy to characterize the effect of nanomagnetite as an addition to Portland cement paste on mitigating internal sulfate attack. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120803, 2020.

SHEN, W. et al. Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. July, 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, 1 set. 2016.

SINGH, G. V. P. B.; SUBRAMANIAM, K. V. L. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 118024, 2019.

SUSTAINABLE, D. W. B. C. FOR. **Technology Roadmap for Cement** International Energy Agency, [s.l: s.n.].

TALAEI, A. et al. Assessment of long-term energy efficiency improvement and greenhouse gas emissions mitigation options for the cement industry. **Energy**, v. 170, p. 1051–1066, 2019.

WEN, Z.; CHEN, M.; MENG, F. Evaluation of energy saving potential in China's cement industry using the Asian-Pacific Integrated Model and the technology promotion policy analysis. **Energy Policy**, v. 77, p. 227–237, 2015.

YOO, D. Y. et al. Effects of carbon nanomaterial type and amount on self-sensing capacity of cement paste. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 134, p. 750–761, 2019.

ZHANG, C. Y. et al. Green transition pathways for cement industry in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 166, n. May 2020, p. 105355, 2021.

CAPÍTULO V - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da magnetita em compósitos cimentícios pode promover a melhoria nas propriedades físicas e mecânicas, além de diminuir os impactos causados pelo setor da construção civil, seja através do reaproveitamento de resíduos provenientes de outros setores ou pela redução do consumo de matérias-primas, como por exemplo, agregados naturais.

Ressalta-se que existe na literatura uma defasagem sobre o emprego de rejeitos contendo magnetita oriundos de atividades industriais em compósitos cimentícios. Considerando esse cenário, esse trabalho foi possível observar a influência do uso de rejeito magnético rico em magnetita compósitos cimentícios empacotados e do uso de rejeito magnético tratado mecanicamente por moagem em argamassas convencionais.

Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar o calor de hidratação de compósitos cimentícios contendo percentuais de rejeito magnético oriundo do beneficiamento de minério de nióbio.
- Avaliar parâmetros como água combinada, o teor de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio das misturas no processo de hidratação de misturas contendo adição de rejeito magnético oriundo do beneficiamento de minério de nióbio.
- Avaliar o uso de rejeito magnético do processo de mineração do nióbio como agregado miúdo na produção de compósitos cimentícios;