CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

INCORPORAÇÃO DE REJEITO MAGNÉTICO EM MATERIAIS ÁLCALI ATIVADOS

Francisco de Castro Valente Neto

Araxá

2022

Francisco de Castro Valente Neto

INCORPORAÇÃO DE REJEITO MAGNÉTICO EM MATERIAIS ÁLCALI ATIVADOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do CEFET-MG, na linha de pesquisa em Processamento de Minérios e Rejeitos como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.

ARAXÁ
2022

Valente Neto, Francisco de Castro
V154i Incorporação de rejeito magnético em materiais álcali ativados / Francisco de Castro Valente Neto. – 2022.
49 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2022.
Bibliografia.

1. Mineração – Teses. 2. Rejeitos de Mineração – Teses. 3. Magnetita – Teses. 4. Escória (metalurgia) – Teses. I. Resende, Domingos Sávio de. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU 622

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Márcia Martins da Silva CRB-6/2578

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os servidores do Departamento de Minas e Construção Civil pelo apoio e incentivo à conclusão desse trabalho.

Agradeço aos Técnicos de Laboratório Marcio Mateus Pimenta e Richard Rodrigues Barreto, do CEFET MG – Belo Horizonte pelo grande auxílio nos ensaios de compressão dos corpos de prova.

Meu reconhecimento as várias pessoas que doaram livremente seu tempo e conhecimento para que pudesse finalizar esse trabalho: Profa. Dra Marcela Maira Nascimento de Souza Soares, Allan Erlikhman Medeiros Santos, Guilherme Alzamora, Alexander Martin Silveira Gimenez e Michelly dos Santos Oliveira.

Agradecimentos especiais:

À Lucia Castanheira e ao Hildor José Seer pelo incentivo e "puxões de orelha".

À Jamila Costa pelo estímulo.

Ao Prof. Dr. Augusto Bezerra pela paciência e conselhos sempre incentivadores.

À Mariana Pires que foi fundamental na conclusão desse trabalho. Muito obrigado.

Ao meu orientador e incentivador, Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende, minha imensa gratidão.

Aos meus pais, Francisco (*in memoriam)* e Ida.

Às minhas irmãs, Eugênia, Ana Maria e Renata.

À minha filha Marcela.

RESUMO

É de conhecimento geral que a indústria cimenteira é uma das maiores produtoras de CO_2 do planeta, partindo da queima do combustível (carvão, óleo combustível ou gás) e da transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio na formulação do clínquer, o cimento Portland comum. Desta forma, vários estudos são realizados para averiguar a redução e ou substituição desse cimento, uma delas é o processo de álcali ativação de materiais específicos para a formação do um composto com propriedades aglomerantes. Além disso, existe outro problema ambiental resultante dos rejeitos gerados pela mineração, que são, normalmente, depositados em barragens. Um desses rejeitos é o magnético, rejeito este constituído basicamente pelo mineral magnetita, e que, até a atualidade, não se encontrou uma via técnica e econômica para sua utilização. Portanto, este trabalho visa incorporar o rejeito magnético em materiais álcali ativados com o intuito de estudar o comportamento físico e mecânico nesses compostos. Para isso foi utilizado o rejeito magnético, originado do beneficiamento de minério fosfatado de uma mina em Goiás e como precursor foi utilizado escória de alto forno oriunda da produção de ferro gusa. O rejeito magnético, tal qual foi recebido, foi seco em estufa e peneirado. A escória de alto forno foi recebida já seca e peneirada. Todos esses materiais foram caracterizados por Difratometria de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX). A escória de alto forno foi ativada com hidróxido de sódio PA. Foram confeccionados corpos de prova de 25 mm de diâmetro por 50 mm de altura somente com a escória álcali ativada (REF), com escória álcali ativada e areia (EA) e com escória álcali ativada e rejeito magnético (ERM). O período de cura foi de 7 e 28 dias, a partir do qual foram feitos ensaios de resistência à compressão, absorção de água e ataque por ácido sulfúrico. Foi verificado que o rejeito magnético contribuiu positivamente nas propriedades mecânicas estudadas. Desta forma espera-se contribuir para o melhor conhecimento do comportamento desse tipo de compósito.

Palavras-chave: Magnetita; Escória; Álcali ativado

ABSTRACT

It is common knowledge that the cement industry is one of the largest producers of CO2 on the planet, starting from the burning of fuel (coal, fuel oil or gas) and the transformation of calcium carbonate into calcium oxide in the formulation of clinker, Portland cement. common. In this way, several studies are carried out to investigate the reduction and/or replacement of this cement, one of them is the alkali activation process of specific materials for the formation of a compound with agglomerating properties. In addition, there is another environmental problem resulting from the tailings generated by mining, which are usually deposited in dams. One of these wastes is magnetic waste, which basically consists of the mineral magnetite, and which, to date, no technical and economic way has been found for its use. Therefore, this work aims to incorporate the magnetic waste in alkali-activated materials in order to study the physical and mechanical behavior of these compounds. For this purpose, magnetic tailings were used, originating from the processing of phosphate ore from a mine in Goiás, and blast furnace slag from the production of pig iron was used as a precursor. The magnetic waste, as it was received, was dried in an oven and sieved. The blast furnace slag was received already dry and sieved. All these materials were characterized by X-Ray Diffraction (XRD) and X-Ray Fluorescence (FRX). The blast furnace slag was activated with sodium hydroxide PA. Specimens measuring 25 mm in diameter and 50 mm in height were made with activated alkali slag only (REF), with activated alkali slag and sand (EA) and with activated alkali slag and magnetic waste (ERM). The curing period was 7 and 28 days, from which tests were carried out on compressive strength, water absorption and sulfuric acid attack. It was verified that the magnetic waste contributed positively to the studied mechanical properties. In this way, it is expected to contribute to a better understanding of the behavior of this type of composite.

Keywords: Magnetite; Slag; activated alkali

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Estrutura atômica da magnetita 14
Figura 2– Representação dos spins de acordo com a coordenação do metal 15
Figura 3 – Compressão de lama asfáltica 21
Figura 4 – Alto forno 23
Figura 5 – Alto forno (estrutura interna) 23
Figura 6 - Frações da areia e do rejeito magnético 27
Figura 8- Pasta na argamassadeira 30
Figura 9- Moldes com pasta no vibrador 30
Figura 10 - Moldes sob a placa de vidro 31
Figura 11 - Corpos de prova ainda nos moldes 31
Figura 12 – Corpo de prova no ensaio de compressão axial 33
Figura 13 – Corpo de prova em ensaio por compressão diametral (vista frontal e vista lateral) 33
Figura 14 – Corpo de prova partido pelo ensaio por compressão diametral. 34
Figura 15 – Distribuição granulométrica da escória de alto forno 37
Figura 16 – Identificação semiquantitativa da escória de alto forno 39
Figura 17 – Gráfico traços X resistência a compressão radial 40
Figura 18 – Gráfico Traços X Resistência a compressão diametral 41
Figura 19 – Gráfico de absorção de água e índices de vazios 42
Figura 20 – Gráfico de massa específica real 43
Figura 21 – Gráfico perda de massa por ataque ácido 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporção dos materiais utilizados 32
Tabela 2 – Quantitativo de corpos de prova 32
Tabela 3 – Resultados do cálculo de umidade 35
Tabela 4 – Massa do rejeito magnético por faixa granulométrica 36
Tabela 5 – Teores da fluorescência de raios X 36
Tabela 6 - Composição química da escória de alto forno 38
Tabela 7 – Relações de incremento na resistência a compressão radial com o tempo de cura 40
Tabela 8 – Relações de incremento na resistência a compressão diametral com o tempo de cura 41
Tabela 9 – Massa específica 43
Tabela 10 – Perda de massa por ataque ácido 44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIF – Banded Iron Formation

NaOH – Hidróxido de sódio

RAA – Reação Álcali Ativada

PMN – Polimorfonucleares

DNA – Ácido Desoxirribonucleico

RMU – Rejeito Magnético Úmido

RMS – Rejeito Magnético Seco

NBR – Norma Brasileira

DRX – Difratometria por Raios X

FRX – Fluorescência por Raios X

SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO e JUSTIFICATIVA 12
1.1 Objetivos 13
1.1.1 Objetivo geral 13
1.1.2 Objetivos específicos 13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
2.1 Rejeito magnético (RM)/Magnetita 14
2.1.1 Gênese e ocorrência da magnetita 16
2.1.2 Aplicações da magnetita 16
2.1.2.1 Adsorvedor de metais 16
2.1.2.2 Material de construção civil 18
2.1.2.3 Indústria de refratários 19
2.1.2.4 Indústria farmacéutica 19
2.1.2.5 Lama asfáltica 20
2.1.2.6 Proteção ionizante 21
2.1.2.7 Indústria siderúrgica 22
2.1.2.8 Catalizador 24
2.2 Escória de Alto Forno (EAF) 25
3. MATERIAIS E MÉTODOS 26
3.1 Materiais 26
3.2 MÉTODOS 27
4. RESULTADOS 35
5. CONCLUSÃO 45
6. REFERÊNCIAS 46

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Quando o homem começou a perceber que existiam substâncias uteis para a sua sobrevivência, percebeu, também, que junto a estas existiam outras que não tinham utilidade, a partir daí iniciou-se o um grande desafio humano: o que fazer com esses materiais? Várias "soluções" surgiram, umas sem nenhum controle técnico, com por exemplo, lançamento de resíduos na beira de rios, estradas e mesmo no mar, alguns com certo controle: os aterros sanitários e barragens de rejeito.

Imaginem o tanto de materiais inúteis ou que se tornaram inúteis que o homem removeu ou produziu nesses milhares de anos de sua existência. Se levarmos em conta esse tempo, foi a pouco tempo atrás que se cogitou a necessidade de reutilizar ou reciclar esse resíduo. E hoje essa necessidade torna-se primordial.

O panorama dos resíduos sólidos no Brasil (2016) mostra que 3.326 municípios brasileiros destinam seus resíduos sólidos para locais impróprios, isso equivale a 59,7% dos municípios. Esse mesmo documento mostra que 76,5 milhões de pessoas sofrem os impactos negativos causados pela destinação inadequada dos resíduos.

O rejeito magnético, oriundo da atividade de concentração de minerais fosfatados, é um desses materiais, sendo depositado em barragens de rejeito. Até o presente momento não se obteve um processo eficaz para o seu aproveitamento. Esse rejeito magnético é constituído essencialmente por magnetita, que é um mineral de fórmula química Fe_3O_4.

Segundo Rodgers, L. 2018, o cimento, que é fabricado pelo homem, só perde para a água como o recurso mais consumido no mundo. É amplamente utilizado pela construção civil, mas sua produção acarreta um efeito colateral sobre o clima, pois é uma gigantesca fonte de dióxido de carbono, um dos vilões do aquecimento global.

De acordo com o instituto de pesquisa britânico Chatham House, a fabricação do cimento é responsável por 8% das emissões mundiais de CO_2. Se a indústria cimenteira fosse um país, este estaria apenas atrás da China e dos Estados Unidos em emissão desse gás. Comparando de outra forma: suas emissões são maiores que a queima de combustível de aviação (2,5%) e não estão muito atrás das geradas pelo agronegócio global (12%). (RODGERS, L 2018)

Desta forma, há uma grande preocupação em diminuir esse impacto ambiental. O ideal seria a total substituição do cimento Portland para a produção de concreto por outros materiais alternativos econômica, técnica e ambientalmente competitivos. Na última década, países da

Europa, Ásia e América tem utilizado os cimentos com adições, mesmo assim torna-se necessário o desenvolvimento de novos materiais. Entre estes materiais estão os álcali ativados e os geopolímeros.

Tomando por base pesquisas disponíveis em artigos científicos, capítulos de livros, teses mestrados ou doutorados optou-se em trabalhar o comportamento de materiais álcali ativados com adições de rejeito magnético, observando-se as alterações em certas propriedades físicas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho foi avaliar a influência do uso do rejeito magnético nas propriedades físicas e mecânicas em materiais álcali ativados.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Avaliar o uso de rejeito magnético como influenciador nas propriedades físicas e mecânicas em materiais álcali ativados;
- Colaborar no estudo de aproveitamento dos rejeitos magnéticos e escória de alto forno.

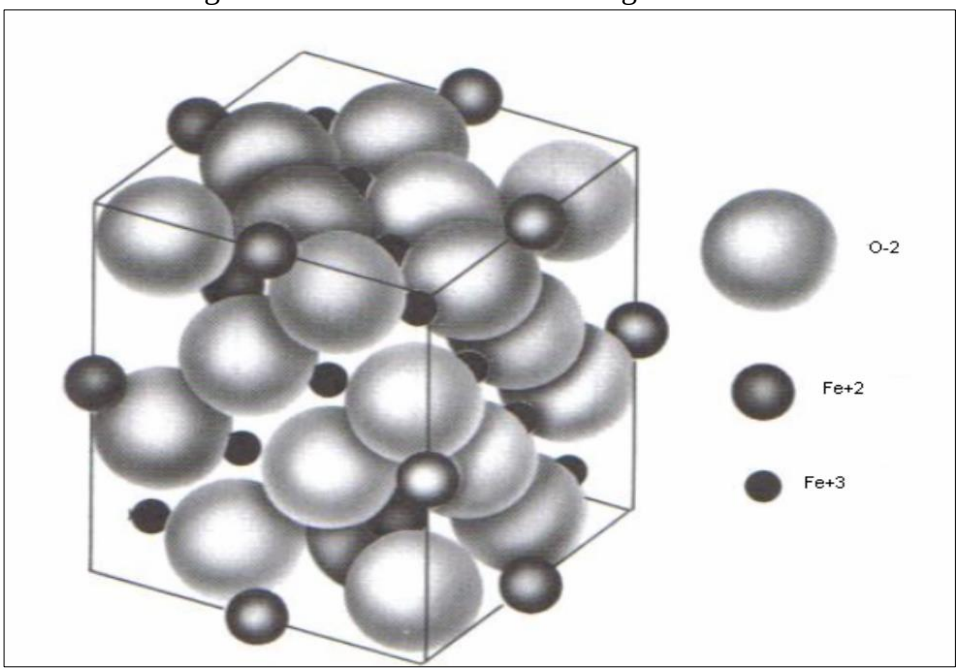
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rejeito magnético (RM) /Magnetita

O rejeito magnético (RM) é constituído basicamente pelo mineral magnetita associado a silicatos (piroxênios), fosfato (apatita) e óxidos (perovskita e ilmenita). A magnetita é um mineral de fórmula química Fe_3O_4 ou FeO Fe_2O_3, pertencente ao sistema cristalino isométrico. É frequentemente encontrada em cristais octaédricos e, também hábito maciço e granular.

Possui dureza 6, de acordo com a escala de Mohs. Densidade de 5,18. Brilho metálico. Cor e traço pretos. É fortemente magnética, sendo atraída facilmente por um imã comum. Quando pura, o que raramente acontece, possui 72,4% de ferro e 27,6% de oxigênio. Normalmente possui impurezas de magnésio e manganês (Klein,2012). Na Figura 1 é possível observar a estrutura atômica da magnetita.

Figura 1– Estrutura atômica da magnetita



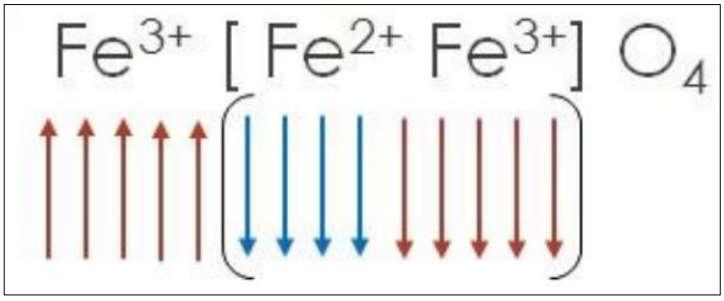
Fonte: Andrade (2009)

É um mineral ferrimagnético que contém o elemento ferro em dois estados de oxidação, Fe^{2+} e Fe^{3+}. Como os íons Fe^{3+} estão posicionados igualmente entre as posições tetraédricas e octaédricas, não existe momento magnético resultante da presença destes íons. Mas todos os íons Fe^{2+} se encontram nos interstícios octaédricos, sendo estes íons responsáveis pela

magnetização de saturação ou responsáveis pelo comportamento magnético do mineral (OLIVEIRA et al, 2013).

Outra forma de justificar o comportamento magnético da magnetita está mostrado na Figura 2. Onde os spins do Fe^{2+} estão orientados em uma direção e os do Fe^{3+} estão em oposição.

Figura 2– Representação dos spins de acordo com a coordenação do metal



Fonte: Silva (2013)

Partindo da definição de que mineral é um sólido homogêneo, de ocorrência natural, frequentemente formados por processos inorgânicos, com um arranjo atômico altamente ordenado e uma composição química homogênea e definida, mas não necessariamente fixa (KLEIN, 2012), alguns materiais que são denominados de “magnetitas” devem ser denominadas de magnetitas sintéticas já que são formadas por reações não naturais, como por exemplo:

I – As “magnetitas” derivadas de um resíduo siderúrgico produzido na etapa de conversão do ferro gusa em aço, na aciaria. A reação de conversão do ferro gusa ocorre em reator aberto e apresenta como subproduto uma névoa metálica densa. Esta névoa é coletada no ar por um sistema de filtros manga que periodicamente é lavado, a lama resultante desta lavagem é bombeada para decantadores e, em seguida, para um sistema de filtros prensa. A torta obtida no filtro prensa é composta por uma massa grossa úmida. Dependendo da unidade produtiva, uma siderúrgica pode produzir cerca de 17 toneladas de lama de aciaria por dia. (ORTIZ N., 2000)

II– As “magnetitas” na dimensão de nanopartículas podem ser obtidas pelo método eletroquímico, decomposição térmica, síntese hidrotérmica, decomposição-precipitação, micro emulsão, coprecipitação, deposição química a vapor e a impregnação. Desses métodos o de coprecipitação é o mais conhecido, simples e eficiente permitindo uma maior produção. Para obter a nano partícula de óxido de ferro (Fe_3O_4) mistura-se estequiometricamente sais de Fe^{2+}

e Fe^{3+} em meio aquoso (Schäfer, 2017). Em Andrade (2009) está assim descrito o método de coprecipitação para a obtenção da magnetita sintética:

Materiais usados:

- Cloreto ferroso tetra hidratado P.A.
- Cloreto férrico tetra hidratado
- Hidróxido de amônio
- Água destilada

Deve ser preparada uma solução aquosa de 5,0 mL de cloreto ferroso 0,6 M e 5,0 mL de cloreto férrico 1,1M. Ajustando o pH para 11 com o hidróxido de amônio. A mistura deve ser aquecida no banho-maria a 50 ± 3°C e mantida sob vigorosa agitação por 30 minutos. Ao atingir a temperatura ambiente, a mistura tem de ser filtrada. Secar todo o resíduo sólido em estufa a 37°C por 24 horas. O material obtido deve ser macerado com ajuda de um almofariz e pistilo e armazenado em temperatura ambiente.

2.1.1 Gênese e ocorrência da magnetita

Sua gênese está relacionada a processos ígneos, metamórficos e hidrotermais. De acordo com o Museu de Minerais e Rochas Heinz Ebert da UNESP a magnetita ocorre em quase todas as rochas ígneas, principalmente carbonatitos e piroxenitos, em alguns casos constituindo depósitos econômicos. Gnaisses e xistos são as rochas metamórficas mais comuns de se encontrar magnetita. Extensos depósitos econômicos ocorrem na forma Formações Ferríferas Bandadas (BIFs) de origem sedimentar e em alguns casos metamorfizados. A magnetita é um importante mineral-minério de ferro.

2.1.2 Aplicações da magnetita

2.1.2.1 ADSORVEDOR DE METAIS

A magnetita possui a capacidade de remover os íons metálicos do meio aquoso por fenômenos de adsorção. Ela se diferencia dos outros adsorventes por ser fortemente magnética, desta forma ela pode ser facilmente retirada da solução, utilizando um campo magnético simples (Leal, 2006).

Leal (2006) estudou a adsorção de urânio (U^{6+}), na forma de íons UO_2^{2+}, em solução nítrica pela magnetita sintética. Esta foi preparada pelo método de coprecipitação, adicionando-se uma solução de NaOH a uma solução contendo íons de Fe^{2+} e Fe^{3+}. Esta magnetita sintética mostrou-se como um pó preto e mostrou uma resposta magnética intensa na presença de um campo magnético sem, contudo, tornar-se magnética. Ao final do estudo concluiu-se que a utilização de nano partículas de magnetita sintética para remoção de íons $U0_2^{2+}$ em meio nítrico, é um material adsorvedor eficiente e de baixo custo que pode ser utilizado no tratamento de rejeitos líquidos radioativos provenientes do ciclo do combustível nuclear.

Susca, C. et. al (2003**)** realizou um trabalho utilizando magnetita sintética derivada do resíduo siderúrgico da conversão do ferro gusa em aço. Ela foi usada como adsorvedor em sistemas de remoção de compostos tóxicos. A principal característica para a sua utilização é a facilidade de sua remoção do meio. Observou-se que a magnetita sintética apresenta alguma solubilização em meio ácido (pH<3), em sistemas aquecidos, ou ainda em sistemas submetidos a tempo de agitação superior às 6 horas. Desta forma, foi utilizado a aspersão de solução de metassilicato de sódio como tratamento superficial da magnetita sintética resultando numa maior estabilidade química, apesar da pequena perda da capacidade adsortiva. Este efeito indesejável não comprometeu o estudo como um todo.

Normalmente, os compostos de ferro apresentam estruturas cristalinas favoráveis à sua utilização como material adsorvedor, principalmente o hidróxido e o óxido-hidroxido de ferro por apresentarem espaços entre as camadas hidratadas e planos com cargas superficiais que tendem a atrair e fixar certos elementos (íons positivos quanto íons negativos), mas materiais compostos predominantemente por magnetita (Fe_3O_4) como adsorvedor de metais pesados nunca foi testado. Desta forma, este trabalho proposto por Ortiz (2000) teve o objetivo de estudar a utilização de um resíduo siderúrgico composto por magnetita como adsorvedor de metais pesados em meio aquoso. Os metais estudados a serem adsorvidos foram: cádmio (Cd^{2+}), chumbo (Pb^{2+}), níquel (Ni^{2+}) e cobre (Cu^{2+}). O resíduo siderúrgico utilizado foi a magnetita sintética da etapa de conversão do ferro gusa em aço que se mostrou compatível, nas mesmas condições operacionais, com adsorventes não convencionais citados na literatura.

2.1.2.2 MATERIAL DE CONSTRUÇÃO CIVIL

A magnetita é um mineral com excelentes propriedades magnéticas e mecânicas e estão disponíveis em milhões de toneladas em aterros pelo mundo afora. Desta forma, o trabalho de Ferrazzo et al **(**2019**)** oferece uma visão das perspectivas de reciclagem dos resíduos de magnetita no setor da construção civil. A incorporação destes resíduos em pó no concreto resultou em melhorias na trabalhabilidade e resistência do material. A incorporação de resíduos de magnetita ao concreto mostrou, em todos os estudos analisados, bons resultados. Estes estudos indicam que a magnetita possui potencial de aplicação, principalmente quando utilizada como substituto ao agregado miúdo.

O concreto é um composto muito utilizado na construção civil formado por agregados miúdos (areia), agregados graúdos (brita), cimento Portland e água. O insumo areia é normalmente retirado de rios o que ocasiona graves problemas ambientais como assoreamento do próprio rio, desmatamento e contaminação por óleo e graxas.

No processamento da rocha fosfática são gerados cerca de 230 t/h de rejeito magnético, onde o mineral predominante é a magnetita, que é depositado em barragens. Em seu trabalho SILVA,et al 2016 confeccionaram corpos de prova onde houve a substituição da areia por magnetita nas proporções 10, 20 e 30%. Após 7, 14, 21 e 28 dias de cura foram rompidos. Os resultados mostram que a inclusão de magnetita no concreto aumentou a sua resistência mecânica de maneira considerável.

A reação álcali-agregado (RAA) é um mecanismo de degradação que ocorre em diversas estruturas de concreto quando submetidas a condições frequentes de umidade. Resumidamente, é uma interação química entre os minerais constituintes do agregado e os álcalis presentes no cimento Portland, em presença de água, acarretando a formação de um gel sílico-alcalino que se expande na presença de água e pode gerar processos de fissuração nas estruturas do concreto devido ao aumento das tensões confinantes no interior dos poros. Desta forma, Gobi (2017) estudou e avaliou a influência da adição de nano magnetita sintética no cimento como mitigador da reação álcali-agregado (RAA), para isso substituiu parcialmente o cimento por nano magnetita na proporção de 1 a 5%. Com este material moldou-se barras de argamassa e prismas de concreto contendo agregados potencialmente reativos. Através de vários ensaios foi possível concluir que a adição de nano magnetita ao concreto auxilia na diminuição da formação de produtos expansivos devido à reação álcali-agregado (RAA).

2.1.2.3 INDÚSTRIA DE REFRATÁRIOS

Horszczaruk et al. 2017 realizou um estudo experimental sobre o comportamento da blindagem de concreto com agregado de magnetita submetido a altas temperaturas. Para isso foram moldados e testados dois concretos: um com agregado de magnetita e outro com agregado natural. As propriedades mecânicas (resistência à compressão e resistência à tração) foram estudadas à temperatura ambiente e após exposição térmica. Para cada teste, os corpos de prova foram aquecidos a uma taxa de 1° C/min até diferentes temperaturas (300, 450, 600 e 800°C). Os resultados dos ensaios mostraram que as misturas contendo magnetita exibiram uma taxa duas vezes menor de deterioração que a contendo agregado normal. O uso da magnetita no concreto melhora significativamente as propriedades mecânicas do concreto até a temperatura de 450°C. A magnetita utilizada foi natural e originada da Suécia.

A utilização de materiais refratários ocorre desde a antiguidade. Eles são importantes, principalmente, devido a sua resistência a altas temperaturas. Os materiais refratários são utilizados de várias formas: cerâmica, tijolos, vidros, plásticos, argamassa e o concreto refratário é um desses materiais que é utilizado em larga escala. Os tijolos e o concreto refratário são, principalmente, consumidos pela indústria que necessita de um material que seja resistente ao calor e variações bruscas de temperatura, como os fornos. As propriedades de um concreto refratário são variadas e estão relacionadas com vários fatores como a sua composição, tipos de agregados, processos de cura e secagem. São de diversos tipos os agregados que podem ser utilizados na preparação de um concreto refratário e alguns desse agregado possuem características refratárias, tais como a bauxita, a magnetita calcinada e a chamota que é constituída de sílica e alumina (Cardoso 2012).

2.1.2.4 INDÚSTRIA FARMACÊUTICA

A Nanotecnologia vem nos últimos anos desenvolvendo nanopartículas com propriedades multifuncionais, consequentemente, abre um extenso campo de aplicações. Um exemplo dessa aplicação está nas Ciências Biomédicas: nanopartículas magnéticas permitem nova oportunidades como agentes de contraste para imagem em ressonância magnética, liberação específica de fármacos através de campo magnético, tratamento de tumores via hipertermia e separação biomolecular. A nano partícula mais utilizada é a magnetita sintética (Fe_3O_4), devido a suas possibilidades atrativas na biomedicina e sua baixa citotoxidade e alta

biocompatibilidade com o organismo. Essa nanopartícula é produzida através de reações químicas entre vários reagentes o que torna um produto de alto custo e em pequena quantidade. (Vendrame, 2011).

Os óxidos de ferro, em especial, a magnetita são os materiais mais usualmente incorporadas em matrizes poliméricas em escala nanométrica. Sua excelente propriedade magnética, a biocompatibilidade de sua superfície, sua baixa toxidade e sua alta estabilidade química faz da nano partícula de magnetita um material extremamente versátil para armazenamento de dados, diagnóstico e terapia em medicina, blindagem eletromagnética, papel de impressão magnético, remediação ambiental, entre outros**.** A associação de nano partículas de magnetita nas matrizes poliméricas, tanto na de celulose como na de acetato de celulose, proporcionou aos filmes poliméricos boas propriedades magnéticas e mecânicas (Furlan, 2014).

Esta invenção é aplicável ao diagnóstico através de biossensores eletroquímicos nano estruturados referindo-se a métodos e composições para a identificação de patógenos. Baseia-se na aplicação de uma sequência curta de oligonucleotídios (sonda de DNA) ligados eletrostaticamente a superfície de nano partículas de magnetita sintética (NPs Fe_3O_4), quitosana e polianilina para a detecção de patógenos em amostras com baixas concentrações (Oliveira, 2018).

2.1.2.5 LAMA ASFÁLTICA

Segundo Ferrazzo et al. (2019) as formas mais promissoras de aproveitamento de rejeitos de magnetita (RM) estão relacionadas a aplicações em misturas asfálticas e concreto. O autor estudou a utilização da magnetita como substituinte parcial ou integral do material de enchimento das misturas de asfalto, observando uma melhora a resistência à corrosão e rachaduras e mais ainda, o uso do pó de magnetita melhora a rigidez e a resposta elástica, além de promover a cura por microfissuras da mistura betuminosa. A incorporação de magnetita na mistura betuminosa deve resultar em um material que atenda às especificações da engenharia de pavimentação, potencializando o seu uso em larga escala para obtenção de um pavimento mais durável, como um agente promotor da cura de fissuras. Na Figura 3 pode-se observar a compressão de lama asfáltica.

Figura 3 – Compressão de lama asfáltica

Fonte: Monteiro (2022)

Em outro trabalho, avaliou-se o resultado da substituição do enchimento de calcário natural por magnetita na mistura asfáltica. Os enchimentos de magnetita e calcário foram adicionados ao betume de acordo com três relações enchimento/betume para formar mastiques de asfalto composto. Foram analisadas o comportamento reológico das misturas para avaliar o efeito da magnetita como enchimento potencial em aplicações de pavimento asfáltico, sendo que essa avaliação foi comparativa a misturas com base de enchimento com calcário. Os resultados mostraram que a adição de magnetita na mistura asfáltica representa uma forma adequada de reciclar esse material e também podem ser utilizadas para a indução ou cura por micro-ondas de fissuras do asfalto (Giustozzi et al, 2018)

De acordo com Patti et al (2018) os custos de manutenção de estradas de asfalto durante a sua vida útil, normalmente, vão além do orçamento disponível das autoridades rodoviárias. Uma nova abordagem para gerar capacidade de cura em compósitos de partículas de magnetita e betume por meio de aquecimento por indução, contribuindo, assim, para a redução das manutenções em pavimentos rodoviários. Dois tipos diferentes de magnetita foram misturados com o betume em três diferentes relações carga/betume. Os princípios de aquecimento por indução foram aplicados para gerar um campo magnético alternativo para aquecer rapidamente as amostras de betume-magnetita, derreter o betume circundante e curar a fissura. Os resultados indicaram que a temperatura dos compósitos aumentou sob o campo magnético alternativo, atingindo valores elevados de temperatura em curto espaço de tempo.

2.1.2.6 PROTEÇÃO IONIZANTE

Os critérios de seleção dos materiais e projeto da mistura de concreto para estruturas de proteção contra radiação ionizante incluem: propriedades mecânicas e físicas, a proteção contra

radiação ionizante e também a impermeabilidade a líquidos e gases. O concreto na cobertura do reator nuclear deve ser impermeável a ar e água potencialmente contaminados por radioatividade, o que pode ocorrer devido ao vazamento do sistema de resfriamento do reator. Um concreto de baixa permeabilidade também pode impedir a penetração de substâncias nocivas para o interior da estrutura. Isso reduz o risco de corrosão da armadura ou destruição do concreto. Kubissa (2018) realizou um trabalho com o objetivo de se saber qual o efeito da composição do concreto industrial projetado para estruturas de proteção contra radiação sobre a permeabilidade do ar e a difusão da umidade. Foi desenvolvido um projeto de mistura para concreto pesado de densidade aparente 3168-3317 kg / m^3 usando agregado de barita e magnetita e cimentos misturados com cinza volante e escória de alto-forno. O índice de permeabilidade ao ar foi testado usando o dispositivo Autoclam. A avaliação da qualidade do concreto com base nos resultados do API variou de “muito bom” a “bom”. A distribuição de umidade dentro dos corpos de prova de concreto foi equilibrada para Umidade Relativa UR = 60 ± 5.

Gur et al. (2017) investigou as propriedades de proteção gama de concretos contendo magnetita e limonita, nas diferentes proporções (5%, 10%, 15%, 20% e 30%). Foi utilizado uma fonte radioativa 60Co (1,25 MeV) construída no dispositivo Thratron 1000ETM usado para fins de radioterapia. Após os ensaios, os resultados revelaram que os concretos contendo magnetita e limonita foram mais eficazes que o concreto comum, atenuando melhor os raios gama. Conseguiu-se determinar que os valores do caminho livre médio diminuíram com o aumento das concentrações de magnetita e limonita, enquanto os coeficientes de atenuação linear para 10 blocos de concreto aumentaram com as concentrações crescente de magnetita e limonita (Gur et al., 2017)

2.1.2.7 INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

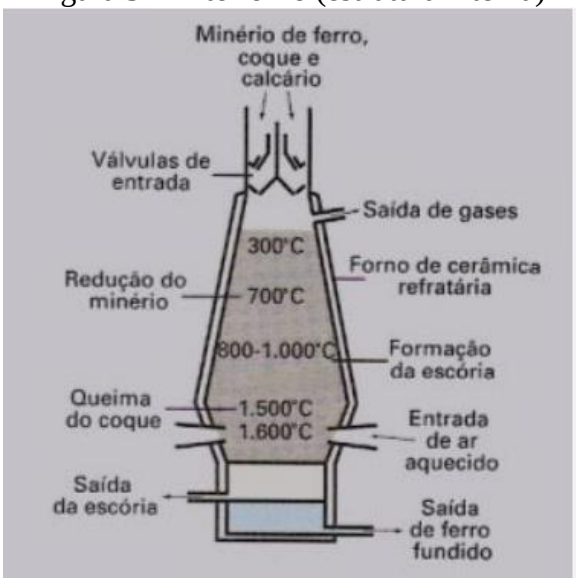
Pode-se dizer que o ferro é um dos sustentadores da civilização moderna. Várias são suas aplicações: transportes, construções, máquinas industriais e eletrodomésticos. Os principais minerais-minério de ferro são a hematita, magnetita e a goethita. Esses minerais são os principais formadores das grandes ocorrências econômicas de minério de ferro espalhadas pelo mundo (Klein,2012). São estes minerais que constituem a matéria prima básica da siderurgia, respondendo pelo item metálico (ferro) de alimentação dos reatores de redução, como o alto forno e os módulos de redução direta convencionais. Nestes locais, o minério de

ferro que é, predominantemente, constituído por aqueles minerais dará origem ao ferro primário, também denominado de ferro gusa, que tratado nas aciarias converte-se em aço (Policarpo, 2012). Na Figura 4 e 5 pode-se observar um modelo de alto forno a estrutura interna de um alto forno.

Figura 4 – Alto forno

Fonte: Diário do aço (2022)

Figura 5 – Alto forno (estrutura interna)



Fonte: Enciclopédia Global (2022)

2.1.2.8 CATALIZADOR

Catalizadores, não apenas os a base de ferro, são usados em diversos processos industriais, sendo que os materiais de ferro são os mais eficientes e baratos. Entre os processos mais importantes temos: a síntese de amônia, a conversão do monóxido a dióxido de carbono a altas temperaturas, desidrogenação do etilbenzeno a estireno, amoxidação do propeno a acrilonitrila e desidrogenação oxidativa de buteno a butadieno (OLIVEIRA et all 2013).

A síntese da amônia pelo processo Haber-Bosch, que pode ser considerada a uma das maiores descobertas no mundo da catálise, pode ser resumida na seguinte equação química: $N_2(g) + 3H_2(g) \leftrightarrow 2NH_3$ $\Delta HO = -92,6\ KJ.mol^{-1}$. A produção de amônia ocorre com grande rendimento quando os catalizadores são a base de ferro, sendo a magnetita, enriquecida com óxidos de alumínio e potássio, o mais usado (RIBEIRO, 2013).

A descoberta da "síntese da gasolina" por Fischer e Tropsch (FT), publicada em 1926, mostrava a utilização de ferro e cobalto como catalizadores e é até hoje utilizado. A síntese é uma reação de polimerização na superfície dos catalizadores, onde os reagentes CO e H_2, adsorvem-se, dissociam-se e reagem na superfície do catalizador formando iniciadores de cadeia ($.CH_3$), monômeros de metileno ($-CH_2-$) e água (OLIVEIRA et all, 2013).

O sistema Fenton, para tratamento de efluentes, foi descoberto em 1894 e até hoje um dos mais promissores para tal. Este sistema é um tipo de processo oxidativo avançado que possibilita a mineralização da grande maioria dos contaminantes orgânicos, a diminuição da toxidade do poluente e o aumento da biodegradabilidade do efluente. Este processo utiliza peróxido de hidrogênio e sulfato ferroso para a degradação de corantes e remoção da cor em efluentes têxteis. (Portal Tratamento de Água, 2020)

Óxidos de ferro, principalmente, a magnetita dopada com cobalto e manganês tem sido utilizada como catalizador heterogêneo em química fina. A catálise heterogênea é quando o catalizador está em um estado físico diferente do estado dos reagentes e produtos (FOGAÇA, 2021).

Estes óxidos são usados na oxidação aeróbica de vários alquenos monoterpênicos para a produção de novos materiais com valor agregado, como derivados mono-oxigenados alílicos e epóxidos. A utilização de óxidos de ferro nesses processos catalíticos de oxidação aeróbica tem grandes vantagens práticas: o catalizador é relativamente barato, fácil de sintetizar, tem alta seletividade, em algumas condições não é necessário solventes, o catalizador pode ser recuperado e reusado em vários ciclos catalíticos sem perda considerável de atividade e após o

uso haverá formação de espécies oxidadas na superfície o que pode levar a desativação do catalizador, mas nesse caso, um simples tratamento térmico sob fluxo de H_2 acarretará a reativação da ação catalítica da magnetita (OLIVEIRA et all, 2013).

2.2 Escória de Alto Forno (EAF)

Para a fabricação do ferro gusa utilizam-se unidades industriais denominadas Altos Fornos, onde ocorre a redução dos minerais de ferro (óxidos de ferro) e a separação das impurezas contidas. Duas fases são formadas, uma inferior formada por ferro gusa fundido (densa) e uma superior formada pela escória que contém grande parte das impurezas dos minerais de ferro e os fundentes (calcário calcítico ou dolomítico) e as cinzas do carvão vegetal ou do coque. Gera-se, aproximadamente, 200 a 300 Kg de EAF por tonelada de gusa. (ARCELOR MITTAL, 2021)

As escórias podem ser resfriadas de duas formas:

1) Esfriadas ao ar: a escória líquida vazada em locais apropriados onde se esfriam naturalmente, no ar. Desta forma, há formação de fases cristalinas com isso não adquirem poder de aglomerante hidráulico. Esse material recebe o nome de Escória Bruta de Alto Forno, que pode ser britada ou utilizada como matéria inerte em diversas aplicações.

2) Esfriadas com água: a escória em estado líquido é direcionada para granuladores onde é resfriada rapidamente por meio de jatos de água, desta forma, não há tempo para a formação de fases cristalinas, fazendo com que ela tenha um grande potencial hidráulico, isto é, endurecer, após moída, em contato com a água. Esta escória tem grande utilidade na fabricação de cimento e concreto. (ARCELOR MITTAL 2021).

A escória de alto forno será o material a ser álcali ativado e é, basicamente, constituída por óxidos de silício, de cálcio e de alumínio. Sua composição química é altamente dependente dos minérios que alimentam os altos fornos, normalmente sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio somam mais de 95% da composição química da escória (ÖZBAY et al.,2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento da pasta álcali-ativada foi utilizado como precursor a escória de alto forno, fornecida pela empresa Supermix, localizada em Belo Horizonte. Para a solução ativadora foi utilizado o hidróxido de sódio P.A. em micro pérolas (pureza igual ou maior que 97%), comercializado pela Neon Comercial Ltda sob o CAS n° 1310-73-2, com peso molar 40,00g; este reagente foi dissolvido em água destilada na concentração de 4M. A água destilada foi obtida com um destilador Pilsen da marca *Nova Técnica*.

Como agregados foram empregadas as quatro frações granulométricas da areia normal, 16 (retido entre as peneiras 2,4mm e 1,2mm), 30 (retido entre as peneiras 1,2mm e 0,6mm), 50 (retido entre as peneiras 0,6mm e 0,3mm) e 100 (retido entre as peneiras 0,3mm e 0,15mm) conforme especificado pela ABNT NBR 7214 (2015).

Em substituição à areia, foi utilizado o rejeito magnético nas mesmas faixas granulométricas (16, 30, 50 e 100). O rejeito magnético é oriundo do Complexo Carbonatítico Catalão I. Esse complexo está localizado nos municípios de Catalão e Ouvidor no extremo sudeste do Estado de Goiás (RIBEIRO, 2008). A empresa que explora este complexo possui etapas de beneficiamento do minério. A primeira etapa constitui na britagem e moagem do minério, onde ocorre a liberação dos minerais constituintes do minério. Posteriormente esse material passa pela separação magnética (via úmida), constituída por tambores rotativos com imãs permanentes onde, entre 97 e 99% da magnetita é retirada e enviada para o desaguamento. Nesta etapa, dois produtos são gerados: a água industrial que retorna ao processo e o rejeito magnético que é depositado em barragens próprias. (SANTOS, et al. 2002). A Figura 6 apresenta a areia normal e o rejeito magnético nas quatro frações granulométricas.

Figura 6 - Frações da Areia e do Rejeito Magnético

Fonte: Próprio Autor (2022)

3.2 MÉTODOS

Este trabalho foi dividido em quatro etapas.

1ª ETAPA

Inicialmente foram preparadas as amostras de rejeito magnético e de escória de alto forno.

A primeira caracterização foi calcular a umidade do rejeito magnético. O material foi dividido em seis bandejas facilitando o manuseio das mesmas ao colocá-las e retirá-las da estufa. As bandejas foram pesadas vazias e taradas e posteriormente preenchidas com o rejeito magnético úmido e pesadas depois colocadas na estufa, permanecendo por 24 horas, a uma temperatura de 100ºC. Posteriormente, foram pesadas.

Para o cálculo foi utilizada seguinte fórmula:

$$\boldsymbol{Umidade = \frac{RMU - RMS}{RMU}\ x\ 100}$$

Onde: RMU = Rejeito Magnético Úmido

RMS = Rejeito Magnético Seco

Esse material foi classificado granulometricamente, a seco, nas seguintes peneiras, conforme NBR NM 248 / NM-ISSO 3310-1:

16# (1,19mm) areia grossa

30# (0,595mm) areia média grossa

50# (0,297mm) areia média fina

100# (0,149mm) areia fina

Fundo (< 100#)

Para a determinação da massa específica da areia e do rejeito magnético foi utilizado o picnômetro de vidro de 50ml. Foram as seguintes etapas:

1- Massa do picnômetro seco e vazio (M1)
2- Colocou-se amostra de areia ou rejeito magnético até tampar o fundo do picnômetro e pesou (M2)
3- Completou o picnômetro com água e pesou (M3)
4- Pesou o picnômetro completo de água (M4)

Massa específica é:

$$\boldsymbol{\rho = \frac{M2 - M1}{(M4 + M2) - (M1 + M3)}}$$

2ª ETAPA

Foi realizada a caracterização química, física e morfológica do rejeito magnético e da escória de alto forno.

Alíquotas de, aproximadamente, 100g de cada fração granulométrica do rejeito magnético foram enviadas ao CEFET – BH onde foram caracterizadas por Difratometria de Raios X (DRX) e Fluorescência de Raios X (FRX).

A – Difração de Raios X

É uma técnica utilizada na determinação da estrutura atômica e molecular de um cristal, sendo que a estrutura cristalina faz com que um feixe de raios X incidente, sobre a amostra analisada, acabe sendo difratado em muitas direções específicas.

B – Fluorescência de Raios X

Os raios X podem ser produzidos por elétrons de elevada energia, da seguinte forma: o fóton de luz é absorvido por um elétron – efeito fotoelétrico – e este elétron passa para outra camada deixando um vazio, desta forma o átomo fica ionizado e ocorre uma subsequente perda de excitação, voltando ao seu estado fundamental através da emissão de um fóton de raios X ou de um elétron Auger. Este fenômeno de emissão de raios X é denominado de fluorescência induzida de raios X ou fluorescência de raios X.

A escória de alto forno, além da Difração de Raios X e Fluorescência de Raios X, foi realizado a análise de granulometria a laser.

3ª ETAPA

Foram preparados três tipos de pastas álcali ativadas:

1 - Somente escória de auto forno (EAF) e hidróxido de sódio (HS) denominado Referência (REF);

2 - EAF mais HS e areia, denominado escória e areia (EA);

3 - EAF mais HS e rejeito magnético denominado de escória e rejeito magnético (ERM);

Inicialmente, para a preparação da solução ativadora, o hidróxido de sódio foi dissolvido em água destilada na concentração de 4mol/L, a solução se manteve em repouso por 24h. Após esse período, a solução e os materiais sólidos foram colocados na argamassadeira para homogeneização, por um período de 1 minuto, na velocidade baixa. Em seguida, a pasta foi vertida em moldes cilíndricos de pvc, com dimensões de 50 mm de altura e um diâmetro de 25 mm, previamente lubrificados com lubrificante tipo vaselina. Os moldes foram preenchidos e para a maior compactação foram colocados em vibração, por dois minutos, em um agitador mecânico/peneirador.

Depois dessa etapa, os cilindros foram colocados em uma superfície plana e cobertos por uma placa de vidro, para não perderem umidade. Passados 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em sacos plásticos e lacrados, até a idade dos ensaios. Nas figuras 7 a 10 pode-se observar os seguintes processos empreendidos na terceira etapa: pasta na argamassadeira; moldes com pasta no vibrador; moldes sob a placa de vidro; corpos de prova ainda nos moldes.

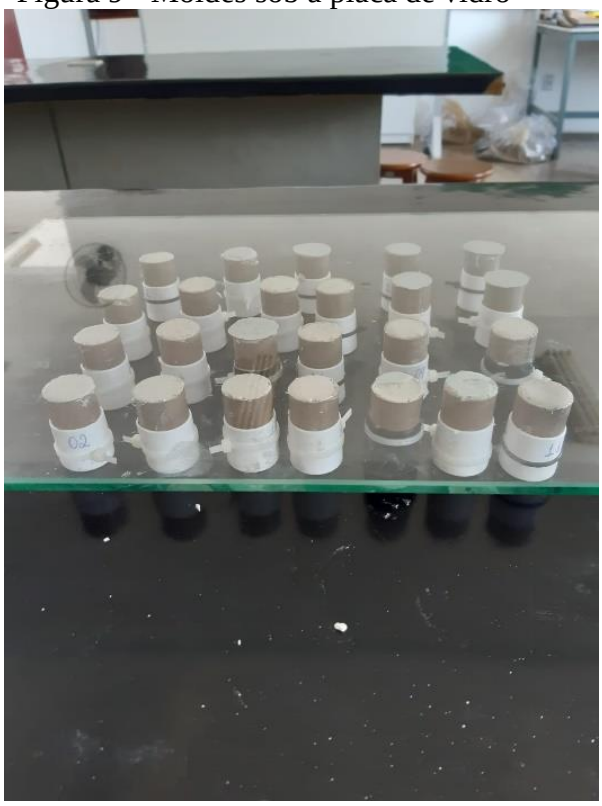
Figura 7- Pasta na argamassadeira.

Fonte: Próprio Autor (2022)

Figura 8- Moldes com pasta no vibrador

Fonte: Próprio Autor (2022)

Figura 9 - Moldes sob a placa de vidro



Fonte: Próprio Autor (2022)

Figura 10 - Corpos de prova ainda nos moldes

Fonte: Próprio Autor (2022)

A Tabela 01 mostra as quantidades de materiais utilizados na produção das pastas. Com o cálculo da massa específica do rejeito magnético e da areia foi feito o cálculo da substituição em volume da areia pelo rejeito magnético.

Tabela 1 – Proporção dos materiais utilizados

	Solução (g)	Escória (g)	Areia (g)	Rejeito (g)
REF	250	500		
EA	250	500	125 de cada fração	
ERM	250	500		215,35 de cada fração

Fonte: Próprio Autor (2022)

Foram confeccionados o seguinte quantitativo de corpos a serem ensaiados:

Tabela 2 – Quantitativo de corpos de prova

	REF		EA		ERM	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Compressão axial	4	4	4	4	4	4
Compressão diametral	4	4	4	4	4	4
Ataque ácido		3		3		3
Absorção de água		3		3		3

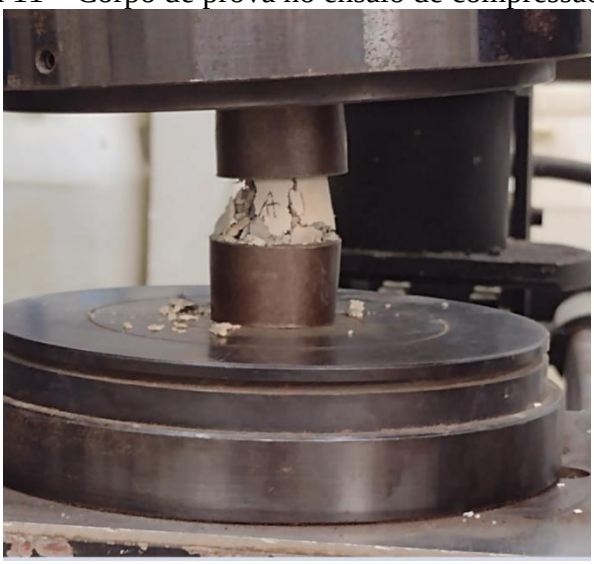
Fonte: Próprio Autor (2022)

4ª ETAPA

Resistência a compressão axial

Os corpos de provas foram rompidos à compressão axial após 7 e 28 dias. O equipamento utilizado para os ensaios foi Equipamento Universal de Ensaios EMIC modelo DL 30000. A velocidade de carregamento utilizada foi fixada em 0,25Mpa/s.

Figura 11 – Corpo de prova no ensaio de compressão axial



Fonte: Próprio Autor (2022)

Resistência à tração por compressão diametral

Os corpos de provas foram rompidos à compressão diametral após 7 e 28 dias, de acordo com a ABNT NBR 7222 (2011). O equipamento utilizado para os ensaios foi Equipamento Universal de Ensaios EMIC modelo DL 30000.

A resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) foi calculada pela seguinte equação:

$$\boldsymbol{f_{ct,sp} = \frac{2\,F}{\pi\,d\,l}}$$

Onde F é a força máxima obtida no ensaio (N), *d* corresponde ao diâmetro do corpo de prova (mm) e *l* é o comprimento do corpo de prova (mm).

Figura 12 – Corpo de prova em ensaio por compressão diametral (vista frontal e vista lateral)

Fonte: Próprio Autor (2022)

Figura 13 – Corpo de prova partido pelo ensaio por compressão diametral.

Fonte: Próprio Autor (2022)

Ataque ácido

A água, normalmente, não é pura e certas substâncias dissolvidas na água podem provocar a formação de produtos expansivos que vão ocasionar trincas e fissuras em argamassas e concretos. Desta forma, foram realizados testes para observar o comportamento dos corpos de prova imersos em uma solução de ácido sulfúrico a 5%, durante um período de sete dias. Esse procedimento está de acordo com a metodologia adotada por Magalhães et al. (2020).

Os corpos de prova foram colocados em um recipiente e cobertos com essa solução ácida, após o período de sete dias eles foram lavados e escovados, simulando um efeito de desgaste mecânico, secos em estufa, analisados visualmente e pesados para a verificação da perda de massa.

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

Os ensaios de determinação da absorção de água (A), índice de vazios (I_v) e massa específica real (ρ_r), foram realizados de acordo com a ABNT NBR 9778 (2005). Para que não ocorresse novas reações do material álcali ativado foram realizadas algumas modificações nessa norma: a temperatura de secagem que era de 100º passou para 50º e foi eliminado a etapa de fervura.

Para os cálculos, a massa foi determinada em três situações: massa seca (m_s), massa saturada (m_{sat}) e massa saturada imersa em água (m_i). Para determinação da massa seca, os corpos de prova foram mantidos na estufa por 72h a 50°C.

Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água a temperatura ambiente por mais 72h e então foram pesados na balança hidrostática para se obter o valor da massa imersa em água, em seguida as amostras foram enxugadas e a massa saturada foi obtida através da pesagem convencional.

$$\boldsymbol{A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} x100}$$

$$\boldsymbol{I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} x100}$$

$$\boldsymbol{\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}}$$

4. RESULTADOS

Caracterização da areia:

Foi realizado o cálculo da massa específica da areia, resultando em um valor de 2,67g/cm^3, que está coerente com a literatura.

Caracterização do rejeito magnético:

Umidade e Análise Granulométrica

Os resultados da umidade estão descritos na tabela abaixo:

Tabela 3 – Resultados do cálculo de umidade

RMU (kg)	RMS (kg)	UMIDADE (%)
10,055	9,665	4,05
13,495	12,960	4,10
8,590	8,275	3,85
9,975	9,575	4,18
10,365	9,960	4,07
9,925	9,565	3,78
62,405	60,000	4,01

Fonte: Próprio Autor (2022)

Todas essas frações foram pesadas e os resultados descritos na seguinte tabela:

Tabela 4 – Massa do rejeito magnético por faixa granulométrica

Peneira	kg	%
16#	6,935	12,25
30#	17,675	31,22
50#	13,320	23,53
100#	9,473	16,73
<100#	9,214	16,27
	56,617	100

Fonte: Próprio Autor (2022)

Observa-se que o rejeito magnético possui uma granulometria, na sua maioria, entre areia média fina e areia média grossa.

A massa específica do rejeito magnético foi de 4,60 g/cm^3

Fluorescência de Raios X

Tabela 5 – Teores da Fluorescência de Raios X

	16#	30#	50#	100#	Fundo
Fe_2O_3	74,00%	77,07%	72,88%	66,11%	67,51%
TiO_2	10,00%	10,17%	11,13%	11,61%	10,01%
P_2O_5	3,38%	3,02%	4,23%	7,31%	6,65%
SiO_2	6,92%	4,83%	5,87%	5,87%	6,52%
CaO	3,08%	2,63%	3,43%	6,34%	5,90%
TOTAL	97,38%	97,72%	97,54%	97,24%	96,59%

Fonte: Próprio Autor (2022)

O rejeito magnético é originado do processo de concentração de apatita (fosfato de cálcio) e como todo o processo não é perfeito algumas apatitas estão contidas nesse rejeito como pode-se perceber pelos teores expressivos em P_2O_5. Os teores de TiO_2 são também consideráveis devido a presença de titânio na própria magnetita e por minerais portadores de titânio

(perovskita, leucoxênio, anatasio). Os teores de SiO_2 são devidos ao quartzo, piroxênio e flogopita, minerais do grupo dos silicatos. Os minerais do grupo dos carbonatos (calcita e dolomita) associados aos silicatos são os responsáveis pelos teores de CaO.

Observando, ainda, a tabela 05 e segundo Pereira, A.C. 2014 os métodos usuais de tratamento de minérios de ferro com o intuito de remover o fósforo presente não são capazes de tornar o teor desse contaminante abaixo de 0,05%. Desta forma, os teores de fósforo neste rejeito estão muito acima para ser considerado um minério de ferro, já que teores acima de 0,06% são considerados altos (FERREIRA, et al 2015).

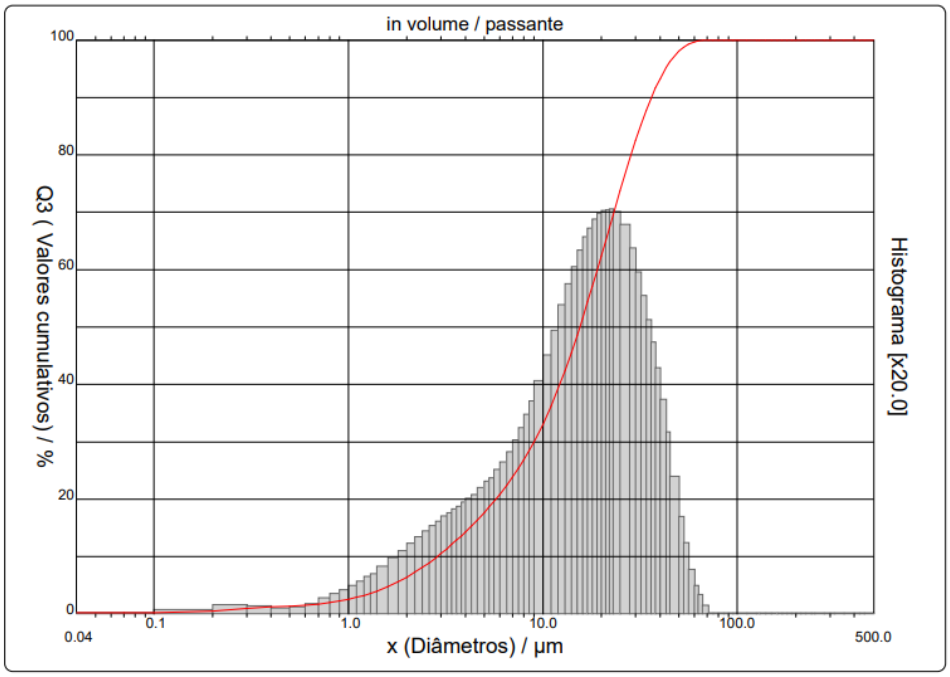
Caracterização da escória de alto forno

Análise granulométrica

A análise granulométrica da escória de alto forno foi realizada através do equipamento CILAS 1090 – Laser Particle Size Analyser, locado no Laboratório de Materiais do CEFET MG em Belo Horizonte.

O resultado é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Distribuição granulométrica da escória de alto forno



Fonte: Próprio autor (2022).

No gráfico acima, pode-se observar a linha contínua, denominada de curva acumulativa, que corresponde ao resultado acumulado abaixo de um dado diâmetro. Além da curva

acumulativa, pode-se observar um histograma que permite conhecer a uniformidade do diâmetro das partículas. Nesse caso, este histograma possui apenas um pico e é classificado como unimodal, indicando um diâmetro médio das partículas de 17,82µm.

De acordo com a escala de Atterberg, a escória de alto forno ensaiada apresenta majoritariamente granulometria equivalente à fração silte (entre 2 e 20 µm), que equivale a uma areia extremamente fina.

Alguns valores característicos da curva de distribuição granulométrica acumulada estão definidos a seguir:

d10 = 2,86µm, ou seja, 10% da amostra possui tamanho de partículas abaixo de 2,86µm;

d50 = 15,50µm, ou seja, 50% da amostra possui tamanho de partículas abaixo de 15,50µm;

d90 = 36,19µm, ou seja, 90% da amostra possui tamanho de partículas abaixo de 36,19µm.

Fluorescência de Raios X

Segundo JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. 2000 as escórias provenientes de indústrias que utilizam alto fornos alimentados com carvão vegetal geralmente produzem escórias ácidas enquanto as escórias provenientes de fornos movidos a coque geram escórias básicas. Esta classificação é feita com base na relação entre CaO e SiO2 onde valores menores que 1 representam escórias ácidas e maiores que 1 escórias básicas. Desta forma, pode-se observar pela tabela 06, que a composição química da escória de alto forno utilizada pode ser classificada como básica, pois sua relação CaO/SiO_2 é igual a 2,35, maior que 1,0.

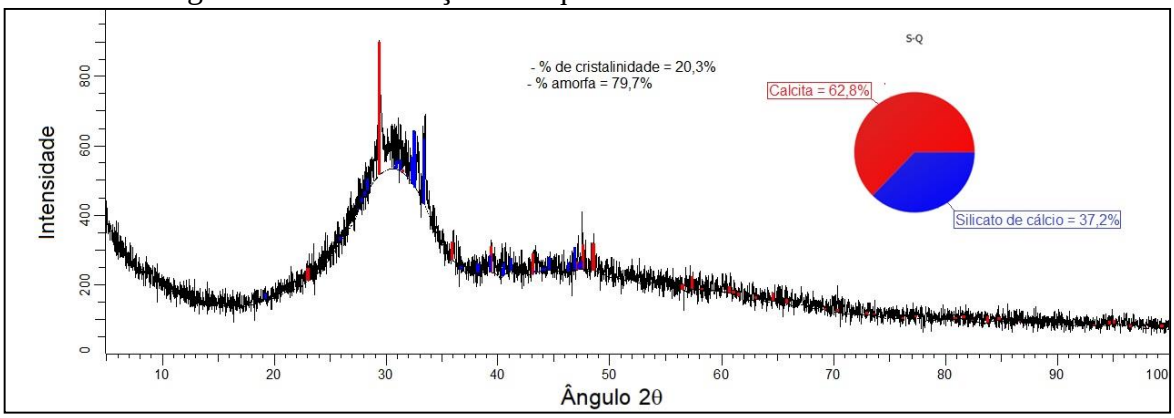
Tabela 6 - Composição química da escória de alto forno

Composição química da escória de alto forno (%)										
CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	SO_3	MnO	K_2O	Fe_2O_3	TiO_2	SrO	BaO
60,56	25,73	6,88	2,25	1,70	0,65	0,59	0,54	0,39	0,37	0,34

Fonte: Próprio Autor (2022)

Analisando a figura 12, observa-se que 79,7 % da escória de alto forno é constituída por material amorfo. O difratograma deste material não apresenta picos característicos e dessa forma há praticamente uma ausência de um arranjo ordenado e periódico de átomos. Os únicos picos identificados foram de calcita (carbonato de cálcio) e de silicato de cálcio (wollastonita sintética)**.**

Figura 15 – Identificação semiquantitativa da escória de alto forno



Fonte: Próprio Autor (2022)

As escórias de alto forno podem ser esfriadas de duas formas:

Esfriada ao ar ou Cristalizada – quando são vazadas em estado líquido em pátios apropriados, onde são esfriadas ao ar. É um processo lento, desta forma os seus componentes formam distintas fases cristalinas, e com isto não adquirem poder de aglomerante hidráulico. Essa escória recebe o nome de Escória Bruta de Alto-Forno, podendo ser britada ou utilizada como material inerte em diversas aplicações, substituindo materiais pétreos. (Arcelor Mittal 2022)

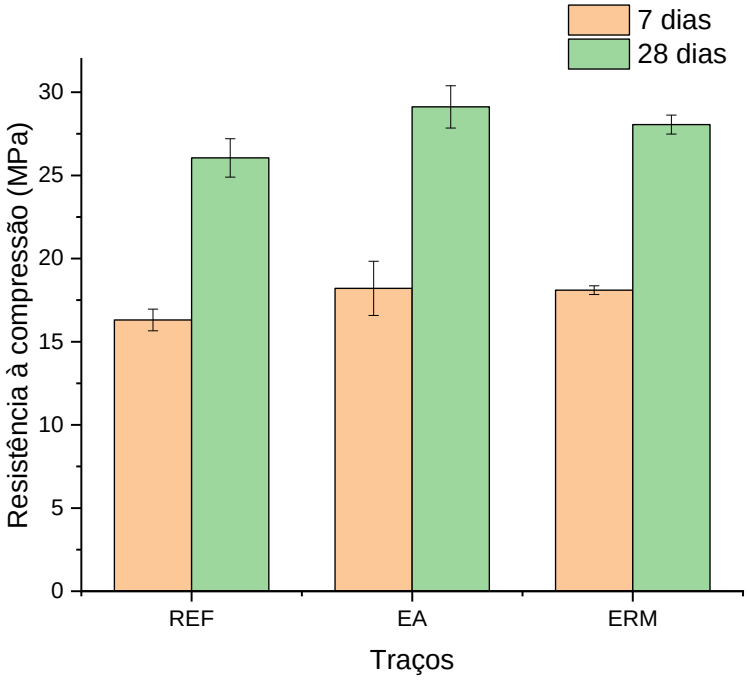
Esfriada com água ou Granulada – a escória líquida é transportada para os granuladores nos quais é esfriada bruscamente por meio de jatos de água sob alta pressão. Não havendo tempo suficiente para formação de cristais, essa escória se granula "vitrificando" e recebe o nome de Escória Granulada de Alto-Forno. Devido ao seu grande potencial hidráulico (endurecer, após moída, quando em contato com a água), essa escória tem um mercado amplo, principalmente para cimenteiras e concreteiras, nas quais pode ser moída e utilizada na fabricação do cimento e concreto. (Arcelor Mittal 2022)

Desta forma pode-se concluir que a escória de alto forno utilizada é originada de resfriamento brusco com água.

Resistência a compressão axial

Como podemos observar na figura 16, a resistência a compressão axial aumentou com a adição de areia e rejeito magnético.

Figura 16 – Gráfico Traços x Resistência a compressão axial



Fonte: Próprio Autor (2022)

Tabela 7 – Relações de incremento na resistência a compressão axial com o tempo de cura

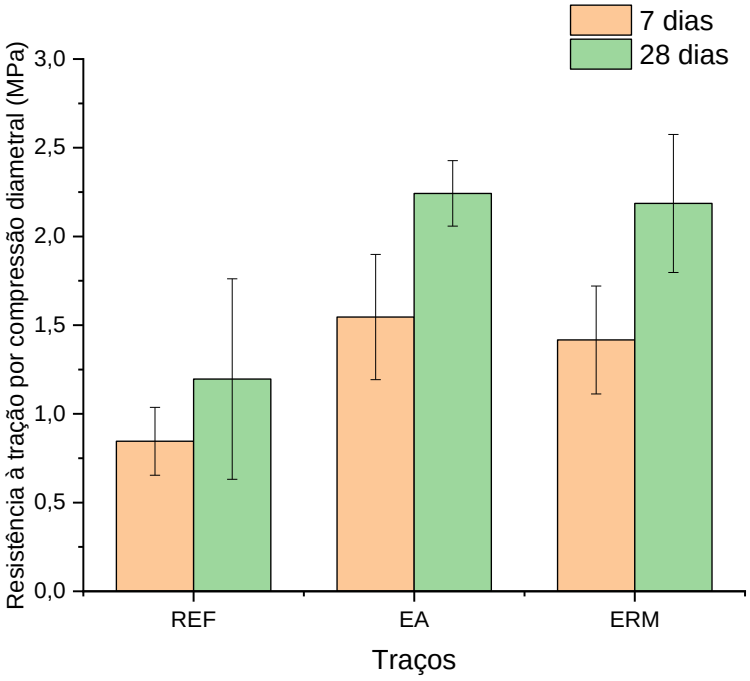
	REF (MPa) média	EA (MPa) média	ERM (MPa) média
7 dias	16,31	18,21	18,01
28 dias	26,05	29,12	28,05
AUMENTO	62%	63%	65%

Fonte: Próprio Autor (2022)

Aos 28 dias houve um aumento de 11,7% na resistência a compressão axial na comparação entre a REF e EA e de 7,67% entre REF e ERM.

Resistência à tração por compressão diametral

Figura 17 – Gráfico Traços x Resistência a compressão diametral



Fonte: Próprio Autor (2022)

Tabela 8 – Relações de incremento na resistência a compressão diametral com o tempo de cura

	REF (Mpa) média	EA (Mpa) média	ERM (Mpa) média
7 dias	0,84	1,54	1,41
28 dias	1,19	2,24	2,18
AUMENTO	70,6	68,8	64,7

Fonte: Próprio Autor (2022)

Aos 28 dias houve um aumento de 88% na resistência a compressão diametral na comparação entre a REF e EA e de 83% entre REF e ERM.

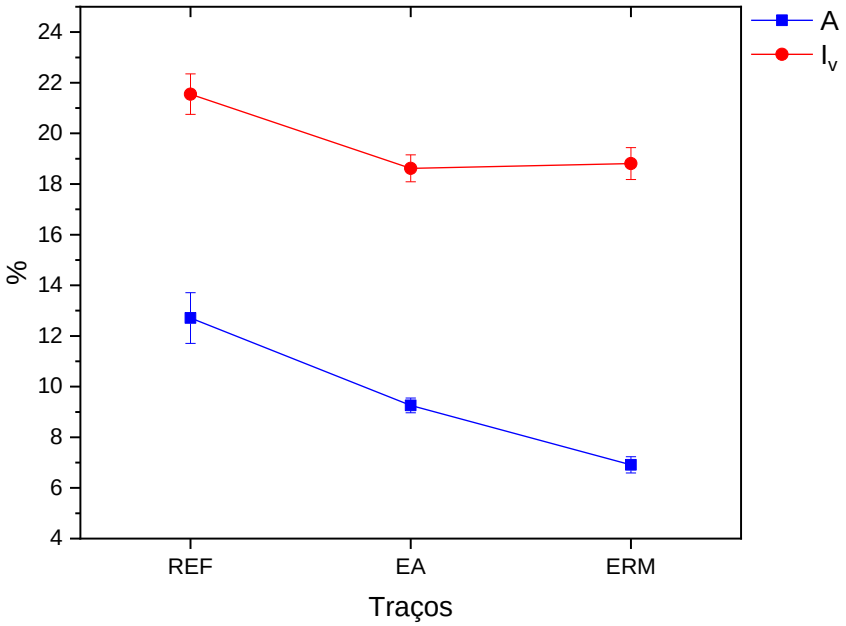
Absorção de água e índice de vazios

Analisando o gráfico da figura 18, observa-se que o índice de vazios diminui com a adição da areia e do rejeito magnético em relação a Referência (21,55%), sendo que não há uma diferença significativa nessa diminuição entre os corpos de prova com areia (18,62) e os com rejeito magnético (18,81%)

Quanto a absorção de água o declínio é bastante acentuado, já que na Referência a absorção de água está na faixa de 12,71%, com areia cai para 9,26% e com rejeito magnético 6,91%.

A redução dessas duas propriedades se deve ao preenchimento dos poros pela areia e pelo rejeito magnético.

Figura 18 – Gráfico de absorção de água e índices de vazios



Fonte: Próprio Autor (2022)

Massa específica real

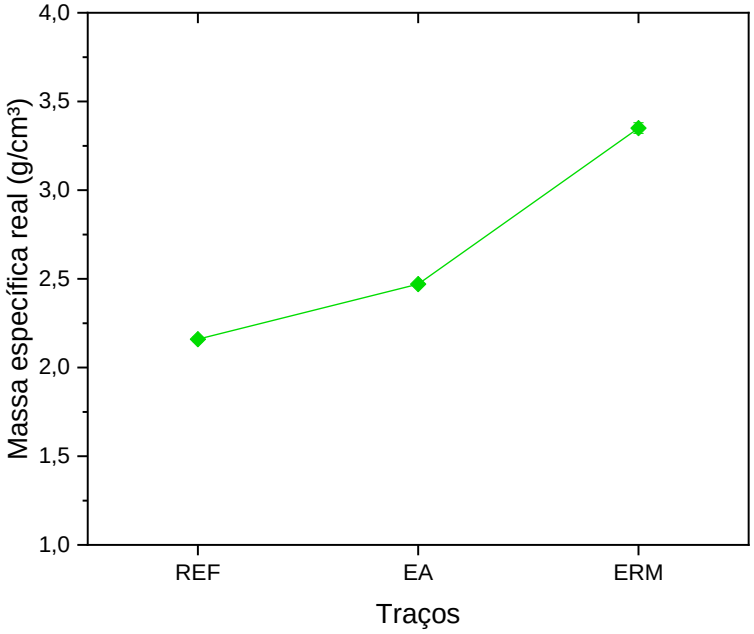
Como era de se esperar a massa específica aumentou, conforme observado no gráfico da figura 16, já que foram adicionados materiais com densidades maiores que a Referência (escória de alto forno + hidróxido de sódio).

Tabela 9 – Massa específica

	MASSA ESPECÍFICA (g/cm^3) média
REFERÊNCIA – REF	2,16
AREIA – EA	2,47
REJEITO MAGNÉTICO – ERM	3,35

Fonte: Próprio Autor (2022)

Figura 19 – Gráfico de massa específica real



Fonte: Próprio Autor (2022)

Ataque ácido

Quanto ao ensaio de perda de massa por ataque ácido pode-se observar, figura 20, que os corpos de prova com adição de areia foram os que menos perderam massa, provavelmente, devido não reatividade do quartzo e outros silicatos da areia com o ácido sulfúrico.

Os corpos de prova Referência perderam, em média, 5,26% da sua massa que pode ser entendido como uma reação ácido-base, já que esses corpos são formados somente com escória de alto forno e hidróxido de sódio. Aliado ao fato da escória de alto forno possuir calcita, um carbonato de cálcio, na sua constituição.

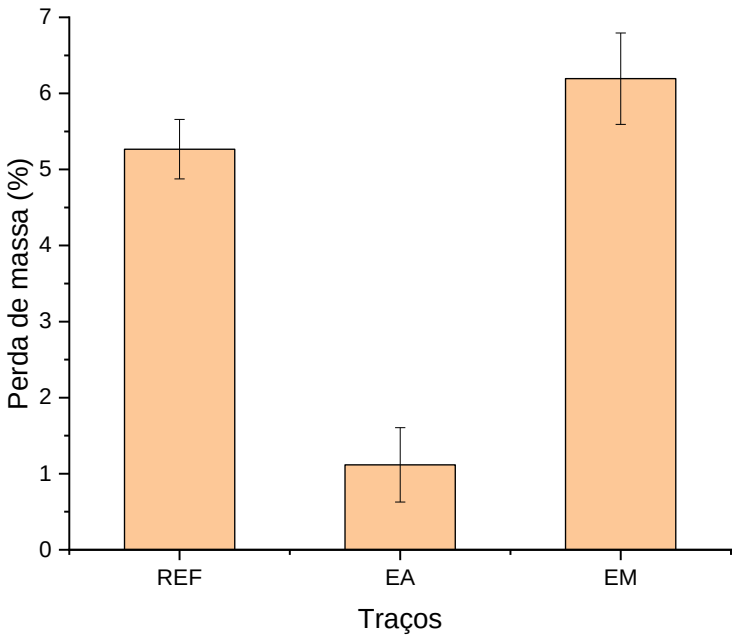
Para os corpos de prova com rejeito magnético a perda de massa foi maior, 6,19% em média. Além das considerações feitas no parágrafo anterior, deve-se levar em conta um contaminante nesse rejeito magnético, a apatita (fosfato de cálcio) que em contato com o ácido sulfúrico forma, basicamente, sulfato de cálcio hidratado e ácido fosfórico, desta forma contribuindo para a perda de massa. Segundo ORTIZ, N 2000, a magnetita, que é o principal mineral do rejeito magnético, é considerada quimicamente estável, sendo infusível e vagarosamente solúvel em ácido clorídrico.

Tabela 10 – Perda de massa por ataque ácido

	PERDA DE MASSA POR ATAQUE ÁCIDO (porcentagem %) média
REFERÊNCIA	5,26
AREIA	1,11
REJEITO MAGNÉTICO	6,19

Fonte: Próprio Autor (2022)

Figura 20 – Gráfico perda de massa por ataque ácido



Fonte: Próprio autor (2022)

5. CONCLUSÃO

A partir dos materiais e métodos propostos neste estudo foi possível produzir um compósito, a base de rejeito magnético e escória de alto forno, que possui propriedades mecânicas úteis para a construção civil.

Foi observado o aumento da resistência à compressão axial e diametral para os compósitos com areia e rejeito magnético, chegando próximo aos do cimento classe 32 MPa.

Com relação a absorção de água e os índices de vazio verificou-se uma diminuição considerável nesses parâmetros.

O compósito com rejeito magnético comportou-se de maneira inesperada quanto ao ataque ácido. Como a magnetita é, relativamente, inerte ao ataque por ácidos, uma possível explicação para a perda de massa seria a reatividade de outros minerais que compõe o rejeito magnético (carbonatos e fosfatos).

Por fim, demonstrou-se ser possível produzir compósitos a partir de escórias e rejeitos industriais que, na maioria das vezes, estariam sendo estocados de maneira impactante ao ambiente, transformando-os em materiais ou produtos úteis ao nosso dia a dia, sem a emissão de CO_2 para a atmosfera.

6. REFERÊNCIAS

AFINKO. **MEV**: Entenda o que faz a Microscopia Eletrônica de Varredura, 2020. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-microscopia-eletronica-mev/>. Acesso em: 30 out. 2022.

ANDRADE, P. L de. **Síntese e caracterização da magnetita revestida por polímeros naturais (fucana e levana) para imobilização de enzimas.** 2009. 59 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Materiais) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/1703>. Acesso em 01 out. 2022.

ARCELOR MITTAL. **Escória de Ato Forno.** Disponível em: <https://Escória de Alto-Forno/ArcelorMittal Tubarão/Coprodutos/Produtos e Soluções/ArcelorMittal>. Acesso em: 4 nov. 2022.

ARNOLD; D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas.** 2011. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNISINOS, São Leopoldo, 2011. Disponível em: <https://repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/3727>. Acesso em: 4 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2016.** Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2016/ abrelpe.org.br>panorama>. Acesso em: 5 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR7214**: Areia Normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

CARDOSO, L. R. **Concreto Refratário** – constituintes, propriedades e aplicações. 2012. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: < https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-9GBR9J/1/monografia_final3.pdf>. Acesso em: 15 set.2022.

ENCICLOPÉDIA GLOBAL. **Alto-Forno (Metalurgia)**. mar. 2013. Disponível em: <https://www.megatimes.com.br/2013/03/alto-forno-metalurgia.html>. Acesso em: 1 nov.2022.

FERRAZZO, S. T; BRAGAGNOLO, L; KORF, E. P. **Caracterização tecnológica e reutilização de resíduos de magnetito em misturas de asfalto e concreto:** Uma Revisão. RBCIAMB, n.54, p, 69-89, dez. 2019. Disponível em:<https://doi.org./10.5327/Z2176-947820190512>. Acesso em:1 nov.2022.

FERREIRA, K.C. et al. Estudo sobre a ocorrência de alto teor de fósforo em um concentrado de minério de ferro. In: 45º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS., 16º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 17-21 ago. 2015, Rio de Janeiro. **ABM Proceedings.** Disponível em: <//https://abmproceedings.com.br/26333.pdf>. Acesso em:1 nov.2022.

FOGAÇA, J. R. V. **Catálise Heterogênea.** Brasil Escola. Disponível em: < https://brasilescola.uol.com.br/quimica/catalise-heterogenea.htm>. Acesso em: 4 abr. 2021.

FURLAN, D. M. **Ésteres de celulose:** síntese e posterior preparação de filmes com incorporação de nanopartículas de magnetita. 2014. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75134/tde-09022015-155905/publico/DaianaMariaFurlanDISSERTACAOREVISADA.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2022.

GARCIA MONTEIRO. **Qual a diferença entre Microrrevestimento Asfáltico e Lama Asfáltica?** Disponível em:<http://www.garciamonteiro.com.br/qual-a-diferenca-entre-microrrevestimento-asfaltico-e-lama-asfaltica>. Acesso em: 3 nov. 2022.

GIUSTOZZI, F. et al. Shear rheology and microstructure of mining material-bitumen composites as filler replacement in asphalt mastics. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 726-735, mai. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.190>. Acesso em: 3 nov. 2022.

GOBI, C. M. **Estudo da influência da incorporação de nano Fe3O4 na reatividade de agregados em argamassas e concreto de cimento Portland.** 2017. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/47458>. Acesso em: 17 set. 2022.

GUR, A; ARTIG, B; CAKIR, T. Photon Attenuation Properties of Concretes containing magnetite and limonites ores. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v. 53, n. 1, p. 184-191, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp170115>. Acesso em: 17 set. 2022.

HORSZCZARUK, E; SIKORA, P; ZAPOROWSKI, P. Mechanical properties of shielding concrete with magnetite aggregate subjected to high temperature. In: 7TH SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE MATERIAL PROBLEMS IN CIVIL ENGINEERING (MATBUD'2015), Szczecin, Poland, 2015. **Procedia Engineering.** n. 108, p. 39-46, 2015. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/282539773_Mechanical_Properties_of_Shielding_Concrete_with_Magnetite_Aggregate_Subjected_to_High_Temperature>. Acesso em: 12 nov. 2022.

JOHN, V. M; AGOPYAN, V. Reciclagem de escória de alto-forno no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2000, São Paulo, **Anais....** Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001175589>. Acesso em: 17 set. 2022.

KASVI. **Microscopia:** A história e evolução dos microscópios. Disponível em: <https://kasvi.com.br/microscopio-microscopia-historia-evolucao/>. Acesso em: 2 out. 2022.

KLEIN, C; DUTROW, B. **Manual de ciências dos minerais.** Tradução e revisão técnica de Rualdo Menegat. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

KUBISSA, W; GLINICKI, M. A; DĄBROWSKI, M. Permeability testing of radiation shielding concrete manufactured at industrial scale. **Materials and Structures,** 16 jun. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1617/s11527-018-1213-0.pdf>. Acesso em: 2 out. 2022.

LEAL, R. **Estudo da magnetita como material adsorvedor de íons uranilo.** 2006. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Roberto%20Leal_M.pdf>. Acesso em: 15 out. 2022.

MAGALHÃES, L. F. **Avaliação do rejeito de minério de ferro como adição pozolânica para cimento Portland.** 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://www.posmat.cefetmg.br/2018/01/30/convite-de-defesa-de-dissertacao-avaliacao-do-rejeito-de-minerio-de-ferro-como-adicao-pozolanica-para-cimento-portland/>. Acesso em:17 set. 2022.

MAGALHÃES, L. F. et al. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, 2020. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123260 >. Acesso em:17 set. 2022.

MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura. Universidade Federal de Santa Catarina.** Disponível em: <http://www.usp.br/nanobiodev/wp-content/uploads/MEV_Apostila.pdf. Acesso em:15 out. 2022.

MITSUTAKE, H; POPPI, R. J; BREITKREITZ, M. C. Raman Imaging Spectroscopy: History, Fundamentals and Current Scenario of the Technique. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. v. 30, 2019. Disponível em: <http://orcid.org/0000-0002-0596-9692>. Acesso em: 11 out. 2022.

MUSEU de MINERAIS, MINÉRIOS e ROCHAS HEINZ EBERT. Apresenta informações e serviços do Museu de Minerais, Minérios e Rochas, situado no Departamento de Petrologia e

Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, pertencente à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Disponível em: <https://museuhe.com.br/>. Acesso em: 3 nov. 2022.

OLIVEIRA, L. C. A; FABRIS, J. D; PEREIRA, M. C. Óxidos de ferro e suas aplicações em processos catalíticos: uma revisão. **Química Nova**, v. 36, n.1, p.123-130, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000100022>. Acesso em: 15 out. 2022.

OLIVEIRA, M. D. et al. Processo para detecção eletroquímica da Leishmaniose utilizando nanopartículas magnéticas e filme eletro depositado de magnetita/quitosana/polianilina. **Repositório Institucional da Universidade Federal de Pernambuco,** 2018. Disponível em: < https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/35422>. Acesso em: 15 ago. 2022.

ORTIZ, N. **Estudo da utilização de magnetita como material adsorvedor dos metais Cu^{2+}, Pb^{2+}, Ni^{2+} e Cd^{2+}, em solução.** 2000. 176 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/posg30/textocompleto/nilce%20ortiz_d.pdf>. Acesso em:3 nov. 2022.

ÖZBAY, E; ERDEMIR, M; DURMUS, H. I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 423-434, 2016. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-a7146749-e6a8-3965-bb29-dc75ffbd2a5c>. Acesso em: 22 agosto 2022.

PEREIRA, A.C. **Processos de remoção de fósforo do minério de ferro – Uma revisão.** 2014. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9L2HJA/1/monografia_ufmg_antonio_clareti_pereira__processos_de_remo__o_de_f_sforo_do__min_rio_de_ferro__uma_revis_o.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2022.

POLICARPO, F. F. **Minério de ferro: desafios para as indústrias mineral e siderúrgica.** 2012. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9CAH4A/1/monografia___vers_o_final___fl_vio_ferreira_policarpo.pdf>. Acesso em: 22 agosto 2022.

SOUZA, A. P de; PONTES, P. P.. **Utilização de processo fenton para tratamento de efluente contendo corante disperso. Alcolina química e derivados.** 02 jul. 2020. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/processo-fenton-tratamento-efluente-corante/>. Acesso em: 1 dez. 2022.

REFORMA do alto-forno 3 da Usiminas é adiada para 2023. **Diário do Aço,** Ipatinga, 21 mai. 2021. Disponível em: <https://Reforma do alto-forno 3 da Usiminas é adiada para 2023 | Portal Diário do Aço (diariodoaco.com.br)>. Acesso em: 1 dez. 2022.

RIBEIRO, C. C. **Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de fósforo, terras raras e titânio do complexo carbonatítico Catalão I, GO.** 2008. 508 f. Tese

(Doutorado em Geociências) – Universidade da Brasília, Brasília, 2088. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/1695>. Acesso em: 1 dez. 2022.

RIBEIRO, D. Processo de Haber-Bosch. **Revista de Ciência Elementar**. v. 1. n. 1. 2013. Disponível em: <https://www.fc.up.pt/pessoas/jfgomes/pdf/vol_1_num_1_26_art_processoHaberBosch.pdf> Acesso em:22 agosto 2022.

RODGERS, L. Aquecimento Global: a gigantesca fonte de CO2 que está por toda parte, mas você talvez não saiba. **BBC News**. 17 dez. 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>. Acesso em:22 ago. 2022.

SAMPAIO, J. A. et al. Separação magnética e eletrostática. **Tratamento de minérios.** 6.ed. cap.8, p.341-379, Rio de Janeiro, 2018. CETEM/MCTIC. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2180>. Acesso 22 ago. 2022.

SANTOS, R. L. C; SOBRAL, L. G. S; ARAUJO, R. V. Produção de fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Catalão. In: **XIX ENTMME.** Recife, Pernambuco, 2002. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2002/ENTMME2002-9.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2022.

SCHÄFER, T. M. Z. **Síntese, caracterização e aplicação de nanopartículas de óxido de ferro (Fe3O4).** 2017. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2017. Disponível em:<http://tede.unioeste.br/handle/tede/3266>. Acesso em: 15 out. 2022.

SUSCA, C. et al. Estudo da Estabilidade Química da Magnetita Utilizada como Adsorvedor em Processos de Remoção de Composto Tóxico de Soluções. **Cerâmica,** v. 49, dez.2003. Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares. Disponível em <http://copec.eu/congresses/cbpas2003/proc/pdf/T201.pdf>. Acesso em:22 ago. 2022.

VENDRAME, S. C. **Síntese, caracterização e análise de citotoxidade de nanopartículas de magnetita para aplicações biomédicas.** 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava-PR, 2011. Disponível em: <http://localhost:8080/tede/handle/tede/430>. Acesso em:15 out. 2022.