

Argamassa para blindagem de raio-X contendo pigmento magnético de óxido de ferro obtido da drenagem ácida de minas

X-ray shielding mortar containing iron oxide magnetic pigment obtained from acid mine drainage

DOI:10.34117/bjdv7n10-12

Recebimento dos originais: 07/09/2021

Aceitação para publicação: 05/10/2021

Richard Thomas Lermen

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Processos de Fabricação (PPGE3M-UFRGS)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, IMED.

Endereço: Rua Senador Pinheiro, 304 - Passo Fundo – RS, CEP: 99070-220

E-mail: richard.lermen@gmail.com

Deuander de Oliveira Mello

Mestre em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, IMED

Centro de Ensino Superior Riograndense, CESURG.

Endereço: Rodovia Leonel de Moura Brizola (BR 386), km 138, Beira Campo, Sarandi, RS, Brasil, CEP: 99560-000.

E-mail: deuander@gmail.com

Rodrigo de Almeida Silva

Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa (PPGE3M-UFRGS)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, IMED.

Endereço: Rua Senador Pinheiro, 304 - Passo Fundo – RS, CEP: 99070-220

E-mail: rodrigo.silva@gmail.com

RESUMO

O principal objetivo do artigo foi produzir argamassa para atenuação de raios-X utilizando pigmento magnético de óxido de ferro obtido da Drenagem Ácida de Minas (DAM). As amostras foram produzidas com diferentes teores de substituição da areia natural pelo pigmento, nos percentuais de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Ensaios nas argamassas, de densidade no estado fresco e endurecido, absorção de água, resistência à tração e à compressão, além de, ensaio da atenuação de ondas de raios-X foram realizados. De acordo com os resultados, observaram-se ganhos na proteção radiológica devido ao uso do subproduto obtido do efluente da mineração. Acréscimo do bloqueio de raios-X foi observado em todos os teores de substituição, sendo as substituições de 75% e 100% as mais significativas, isto é, obteve-se, aproximadamente, 45% de atenuação a mais do que a amostra de referência. Quanto as demais características avaliadas, o traço que atendeu aos valores indicados pela NBR 13276/2016 para o índice de consistência e, também, apresentou resistências maiores à tração e à compressão do que os demais, foi aquele com substituição de 25% da areia natural pelo pigmento, sendo superado apenas pela amostra de referência. Por fim, a utilização do óxido de ferro recuperado da DAM

trata-se de uma opção para compor argamassas com função de blindagem de radiação eletromagnética.

Palavras-chave: Argamassa Magnética, Blindagem de Raio-X, Drenagem Ácida de Minas (DAM).

ABSTRACT

The main aim of this paper was to produce a X-ray shielding mortar using iron oxide magnetic pigment obtained from Acid Mine Drainage (AMD). Samples were produced with different levels of replacement of natural sand by pigment, in percentages of 0%, 25%, 50%, 75% and 100%. Density in the fresh and hardened state, water absorption, tensile and compression strength and X-ray attenuation tests were carried out. According to results, gains in radiological protection were observed due to the use of the by-product obtained from mining effluent. Increased X-ray blocking was observed at all substitution levels, with 75% and 100% substitutions being the most significant, that is, approximately 45% more attenuation than the reference sample was obtained. As for the other characteristics evaluated, the mix that met the values indicated by NBR 13276/2016 for the consistency and also presented greater tensile and compression strength than the others, was the one with 25% replacement of natural sand by the pigment, being surpassed only by the reference sample. Finally, the use of iron oxide recovered from DAM is an option to compose mortars with a shielding function from electromagnetic radiation.

Keywords: Magnetic Mortar, X-Ray Shielding, Acid Mine Drainage (DAM).

1 INTRODUÇÃO

A construção civil e outros segmentos industriais têm buscado realizar o reaproveitamento de resíduos. A incorporação desses materiais pode ocorrer com o objetivo de reduzir custos ou potencializar alguma propriedade específica dos materiais e, principalmente, tratar os passivos ambientais (SILVA *et al.* 2020). Dentre os segmentos industriais que buscam otimizar a geração de resíduos encontra-se a atividade de extração do carvão mineral.

O carvão mineral tem participação em cerca de 40% da energia elétrica mundial (GASPAROTTO e MARTINELLO, 2021). Porém, em seu processo de extração os rejeitos são geralmente depositados em torno da mineradora, o que causa problemas em grande escala. O principal resíduo gerado é a pirita (FeS_2), um sulfeto de ferro que, quando exposto ao oxigênio e a umidade, sofre oxidação. A água das chuvas ao entrar em contato com a pirita oxidada forma uma drenagem altamente poluidora, a Drenagem Ácida de Minas – DAM. Esse efluente traz danos para a vegetação e contamina os corpos hídricos, tratando-se do pior problema ambiental associado à mineração (AMARAL FILHO *et al.* 2013; SILVA *et al.*, 2019; LI *et al.* 2021).

A busca por adequação e diminuição da geração de rejeitos pelas carboníferas é constante, porém ainda há muito para ser estudado, principalmente, quando se trata do reaproveitamento dos rejeitos na forma de produtos (matéria prima). Uma possível alternativa é a extração de óxido de ferro sintético a partir da DAM, os quais podem ser utilizados em concretos e argamassas com o intuito de blindagens de radiação (VOLKMAN, 2006; ALBUQUERQUE, 2014; ASLANI *et al.*, 2020).

A atenuação ou blindagem de radiação é característica necessária para a construção de laboratórios, salas de exames, entre outros que utilizam altas intensidades de radiações em seus processos, uma vez que a exposição a energias elevadas pode causar danos à saúde dos seres humanos. Deste modo, o material utilizado como vedação deve ser capaz de atenuar a transmissão ondas eletromagnéticas até níveis não perigosos, sendo determinante da otimização do projeto (SANTOS *et al.*, 2013).

Os produtos cimentícios são empregados para proteção radiológica e podem receber adições em sua composição visando o acréscimo da massa específica (FACURE E SILVA, 2007, OUDA, 2015). Concretos ou argamassas que contém elementos pesados proporcionam aumento na capacidade de blindagem pois, neste caso, haverá no material um número maior de átomos servindo como barreiras físicas para as ondas radioativas (AGHAMIRI *et al.*, 2013; TAUHATA *et al.*, 2014; LERMEN, 2020).

A magnetita (Fe_3O_4) tem sido aplicada em misturas cimentícias com sucesso, não afetando a hidratação da pasta e alcançando níveis superiores de atenuação (OTO e GÜR, 2013; SIKORA *et al.*, 2016; OTO *et al.*, 2016). Este óxido de ferro é extraído de depósitos naturais na forma de uma pedra mineral de elevada dureza e altamente magnética, de cor preta e brilho metálico (CAO e CHUNG, 2004; ORTIZ, 2000). Sendo que, também existe a possibilidade de obter a magnetita através de um processo químico que tem como matéria-prima um dos rejeitos da mineração de carvão (SILVA, 2010).

O tratamento mais empregado para a DAM é denominado tratamento ativo. Este modelo consiste em processos de neutralização/precipitação/sedimentação (VASQUEZ, 2007). Contudo, resulta em custos operacionais, energéticos e pelo uso de reagentes, além da geração de grande volume de lodo (SILVEIRA, SILVA e RUBIO, 2009). Como forma de tratamento alternativo da DAM, tem-se a precipitação seletiva, a qual possui custos menores do que o tratamento ativo, além de possibilitar a recuperação do ferro na forma de óxidos, que podem ser empregados em materiais de construção (SCHWERTMANN e CORNELL, 2000; TANNER, 2016).

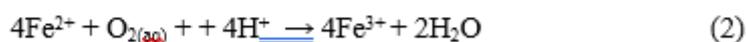
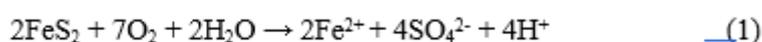
Baseado nessas premissas, o presente estudo tem como principal objetivo a utilização da magnetita, produzida a partir da precipitação seletiva da DAM, em argamassas para blindagem de radiação ionizante. Desta forma, visa-se avaliar uma alternativa sustentável de um agregado atenuante obtido no tratamento de rejeitos da mineração. Além disso, o seu uso substituirá parte da areia natural, minimizando custos e impactos ambientais da extração de recursos naturais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PIGMENTO

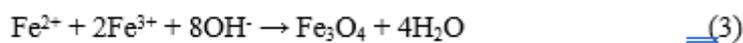
A matéria-prima para extração do pigmento magnético de óxido de ferro é a Drenagem Ácida de Minas – DAM, um efluente de elevada acidez formado pela ação da água e do oxigênio sobre os resíduos da mineração de carvão contendo pirita (dissulfeto de ferro – FeS₂).

A amostra de DAM foi produzida conforme o experimento de Lopes (2017), que realizou a percolação de água sobre os resíduos piritosos em circuito fechado, visando obter um extrato aquoso rico em íons ferrosos, que em meio aeróbio, foram oxidados, formando íons férricos, conforme as reações V e VI. Primeiramente foi gerada acidez e Fe²⁺ e, em seguida, íon Fe³⁺ pela oxidação do íon Fe²⁺ devido à presença de oxigênio dissolvido (VIGÂNICO, 2009). As Equações 1 e 2 apresentam os processos químicos das transformações:



O processo de geração controlada ocorreu por lixiviação através de um concentrado piritoso coletado em um depósito de rejeitos de mineradora de carvão no estado de Santa Catarina. O resíduo, também mantido em meio aeróbio, recebeu a percolação de água em circulação durante quatro semanas e formou a DAM sintética. A unidade de geração utilizada está representada pela Figura 1, na qual foi utilizado cerca de 15 kg de rejeito piritoso com granulometria entre 2 a 10 mm de diâmetro, lixiviado em 200 litros de água com grau potável.

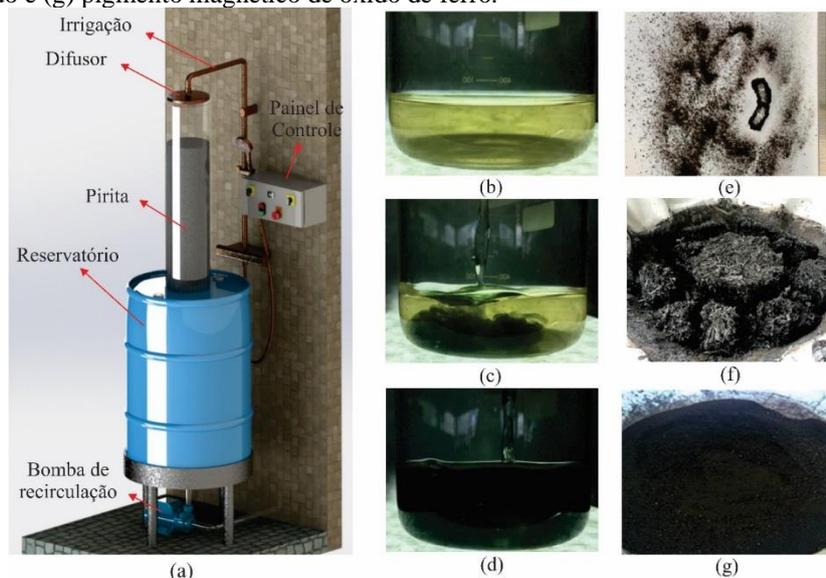
De posse da drenagem sintética (Figura 1(b)) foram adotadas práticas de sintetização do óxido de ferro a partir da experiência de Lopes (2017), que considerou a adição de base forte (como hidróxido de sódio ou de potássio) em solução contendo íons férricos e ferrosos na estequiometria 2:1, até a solução atingir pH entre 9 e 14, resultando em magnetita e água, conforme a Equação 3.



A síntese do pigmento foi realizada conforme a sequência mostrada na Figura 1(b-g). Como agente alcalino foi utilizado o hidróxido de sódio (NaOH), sendo adicionado na DAM até atingir pH superior a 13 (Figura 1(c)), agitando-se constantemente. Após isso, a mistura permaneceu durante 24 horas em descanso para sedimentação (Figura 1(d)) e posterior filtragem, para então completar os processos de extração do pigmento magnético (Figura 1(e)).

Desta forma, obteve-se o lodo (Figura 1(f)) que foi lavado, secado e moído, resultando no pigmento magnético de óxido de ferro (Figura 1(g)). O lodo resultante da neutralização da DAM é classificado conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo não perigoso do tipo não inerte – Classe II A.

Figura 1. (a) Dispositivo para geração da DAM. (b-e) Sequência do processo de sintetização do pigmento, (f) lodo gerado e (g) pigmento magnético de óxido de ferro.



O pigmento foi caracterizado através de fluorescência de raios-X (FRX), a qual permite identificar a composição química do pigmento. A análise foi realizada pelo

Laboratório de Caracterização Microestrutural- LACAMI de Criciúma/SC através do equipamento de modelo EDX 7000 da marca Shimadzu.

A verificação da cristalinidade e as fases cristalinas presentes no pigmento foram determinadas através da análise de difração de raio-X (DRX). Para essa análise foi utilizado um difratômetro de raio-X de marca Siemens (BRUKER AXS), modelo D-5000 (θ - θ), equipado com tubo de ânodo fixo de Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), operando a 40 kV e 40 mA no feixe primário e monocromador curvado de grafite no feixe secundário. O intervalo angular analisado foi de 0° a 70° , escala 2θ , em passo de $0,05^\circ/s$, utilizando-se fendas de divergência e anti-espalhamento de 1° e $0,2 \text{ mm}$ no detector.

Também, foi realizada a granulometria do pigmento por peneiramento, seguindo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e da massa específica de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009), utilizando balança de alta precisão.

2.2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

2.2.1 Aglomerantes e agregados

Foram utilizados como agregados a areia fina (material granular passante na peneira com abertura de malha $4,75 \text{ mm}$ e retido na peneira com abertura de malha $150 \mu\text{m}$, conforme NBR 7211 (ABNT, 2019)) e o pigmento magnético produzido a partir da DAM. O aglomerante foi cimento Portland pozolânico do tipo CP-IV 32, recomendado para este tipo de compósito devido ao baixo teor alcalino e por ser de baixo calor de hidratação, o que colabora para resistir a sulfatos (SILVA E TENÓRIO, 2015).

2.2.2 Produção das argamassas

A produção das argamassas foi com traço, em massa, de 1:5 (aglomerante:agregados), sendo estabelecida a relação água/cimento de 0,67. Essa dosagem fora obtida a partir de ensaios prévios que alcançaram tais razões como as menores possíveis (do ponto de vista de consumo de cimento e água) desde que causassem a aglomeração das partículas de agregado pela pasta cimentícia, possibilitando a moldagem das amostras. Os corpos de prova foram produzidos em forma cilíndricas ($40 \times 80 \text{ mm}$) e placas ($50 \times 50 \times 10 \text{ mm}$). O fator utilizado foi o percentual de substituição da areia natural pelo pigmento de 0% (referência), 25%, 50%, 75% e 100%. Um total de três amostras para cada ensaio foram produzidas totalizando 60 corpos de prova. A mistura foi realizada por um agitador mecânico (argamassadeira).

2.2.3 Caracterização das argamassas no estado fresco

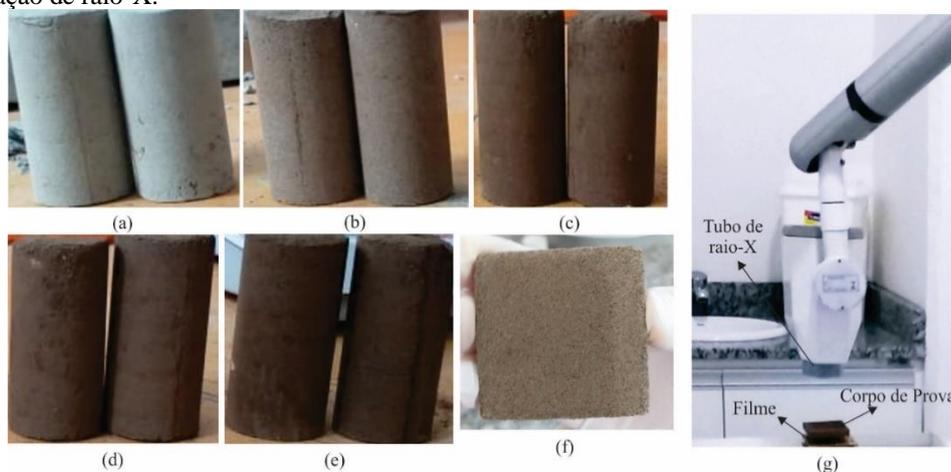
Para identificação do desempenho da argamassa no estado fresco, foram realizados os ensaios de densidade de massa (NBR 13278 (ABNT (2005)) utilizando balança de alta precisão e o de índice de consistência (NBR 13276 (ABNT 2016)) que foi obtido na mesa de abatimento (*flowtable*). Tal caracterização é importante pois a argamassa deve responder às solicitações submetidas nas etapas de preparo (mistura) e aplicação, através de um comportamento que facilite o lançamento, nivelamento e acabamento.

2.2.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Após 28 dias de cura, foram realizados, primeiramente, utilizando os CP's cilíndricos (Figura 2(a)), os ensaios de densidade no estado endurecido (NBR 13280 (ABNT, 2005)) e de absorção de água (NBR 9778 (ABNT, 2005)), por serem não destrutivos. Em seguida, um CP de cada percentual foi usado para rompimento no ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222 (ABNT, 2011)) e outro para o ensaio de resistência à compressão simples (NBR 13279 (ABNT, 2005)). Os equipamentos utilizados foram: balança de alta precisão e prensa hidráulica do tipo EMIC PC 200 C.

Os ensaios de blindagem de raios X foram utilizadas placas (como a representada na Figura 2(f)) contando com duas unidades de cada percentual de substituição da areia natural pelo pigmento magnético.

Figura 2. Corpos de prova cilíndricos com diferentes percentuais de substituição, sendo (a) 0%, (b) 25%, (c) 50%, (d) 75% e (e) 100%. (f) Corpo de prove e forma de placa e (g) aparato experimental para verificar a atenuação de raio-X.



A fonte de emissão de radiação tratou-se de um aparelho de raios X CMR modelo Spectro 70 X. O tubo foi ajustado em posição centralizada a 10 cm da amostra, a qual sobrepôs os filmes radiográficos (conforme demonstrado na Figura 2(g)). Foram realizadas as irradiações a 60 kV e 10 mGy durante 3 segundos. Após isso foram reveladas as imagens dos filmes em câmara escura.

A leitura do grau de blindagem seguiu a abordagem adotada por Nardone et al. (2017), sendo realizada através da análise de imagens dos filmes radiográficos e, utilizando o software ImageJ, para comparar as escalas de cinza da atenuação causada pelas argamassas após a incidência das ondas eletromagnéticas. Este experimento foi realizado para todos os teores de substituição da areia natural pelo pigmento magnético extraído da DAM, com duas repetições (amostras do mesmo percentual). Sendo que, por meio dos histogramas obtidos no software ao final do processo, pôde-se calcular a média de atenuação das amostras de argamassa e de cada teor de óxido empregado.

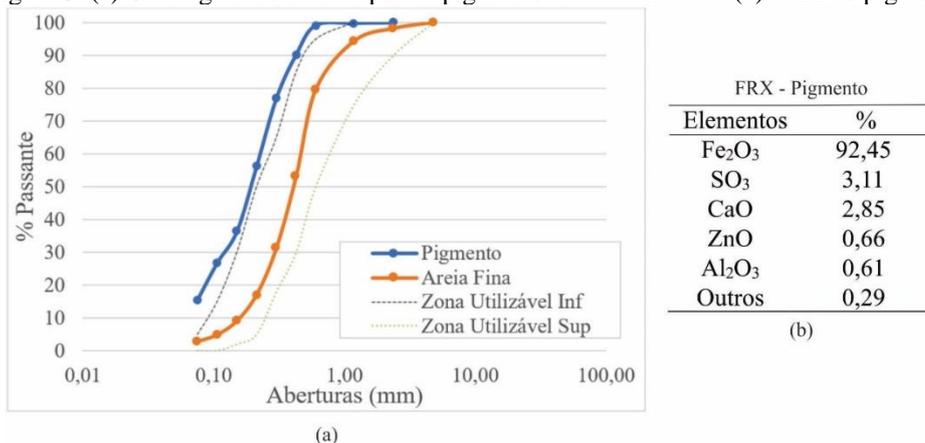
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PIGMENTO DE ÓXIDO E FERRO

O pigmento extraído da DAM apresentou massa específica de 2826 kg/m^3 e a areia natural de 2640 kg/m^3 . As curvas granulométricas para esses materiais podem ser observadas na Figura 3(a). O pigmento possui módulo de finura de 0,88 e a areia natural de 1,87, ou seja, a granulometria do pigmento pode ser considerada de partículas duas vezes menores do que a própria areia fina. Se considerada a zona utilizável de agregados finos para concretos, compreendida na NBR 7211 (ABNT, 2019), a granulometria do pigmento estaria fora da região recomendada devido à finura.

Os resultados de composição química, observados através da fluorescência de raios X, são descritos na Figura 3(b). Pôde-se observar que o produto obtido apresenta majoritariamente óxido de ferro sob a forma Fe_2O_3 .

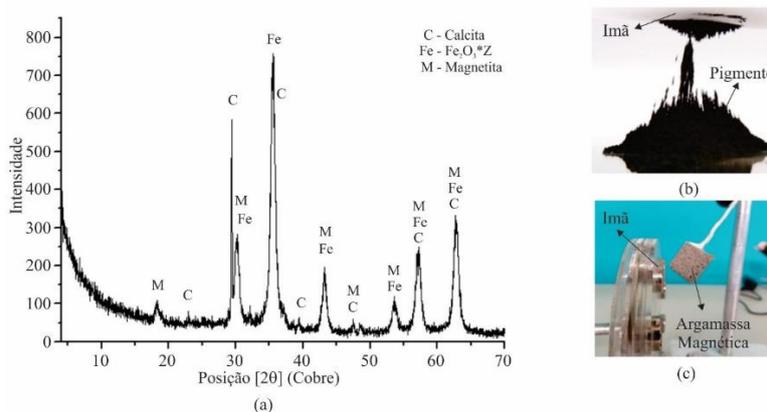
Figura 3. (a) Curva granulométrico para o pigmento e a areia natural. (b) FRX do pigmento.



O resultado da difração de raios X (Figura 4(a)) demonstrou picos de hematita (Fe₂O₃) e magnetita (Fe₃O₄). Diniz et al. (2015) e Madeira (2010), obtiveram através de sintetização em laboratório, picos dos mesmos óxidos, sendo que, este último realizou o processo com material precursor sendo a DAM.

A afirmação do pigmento tratar-se de um óxido de ferro, através da síntese a partir da drenagem, corrobora com as literaturas que indicam a obtenção de minerais da mesma ordem, ou semelhantes, em relação aos óxidos de ferro naturais. Os quais possuem aplicação em compósitos cimentícios para blindagens de radiação, pela capacidade de acrescentar a massa específica dos mesmos. Tal fator foi influente para as análises propostas. Outras características notáveis foram a coloração escura e a propriedade magnética, obtidas para o pigmento (Figura 4(b)) e transmitidas para a argamassa (Figuras 4(c)).

Figura 4. (a) DRX para o pigmento, (b) pigmento e (c) argamassa sendo atraídos por ímãs.

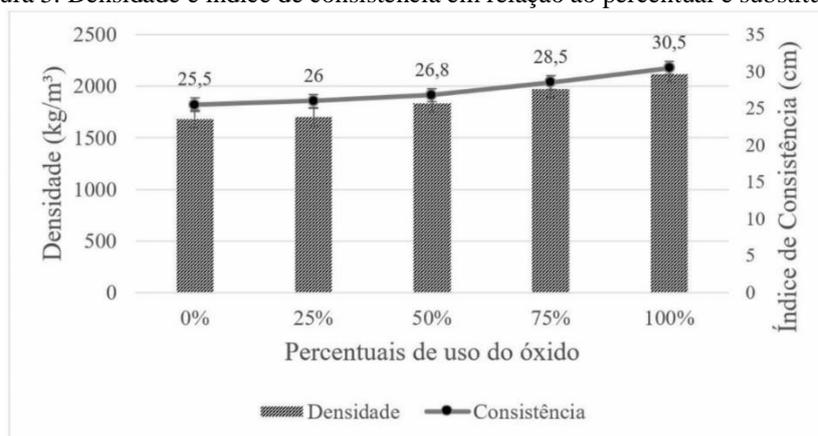


3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

A utilização do pigmento magnético de óxido de ferro em substituição da areia natural acarretou um maior espalhamento da argamassa no ensaio de consistência,

acredita-se que isso está relacionado ao teor de finos em sua granulometria. Ocorreu, ainda, o acréscimo da densidade da pasta devido ao pigmento ser mais pesado do que a areia, tais fatores foram sensíveis para cada mudança de percentual de emprego do óxido, como pode ser percebido no gráfico da Figura 5. Segundo Carasek et al. (2016), fatores de massa do agregado influenciam diretamente na consistência da argamassa. Quanto maior a diferença de densidade entre as fases (agregados e pasta) maior a tendência à segregação.

Figura 5. Densidade e índice de consistência em relação ao percentual e substituição.



Além disso, segundo Sikora et al. (2016), teores maiores que 5% de pequenas partículas de óxido de ferro afetam diretamente a hidratação e a trabalhabilidade. Isso ocorre graças às partículas finas do pigmento que consomem mais água, pela maior área superficial, em relação à areia natural, reduzindo assim, a quantidade destinada a hidratação do cimento.

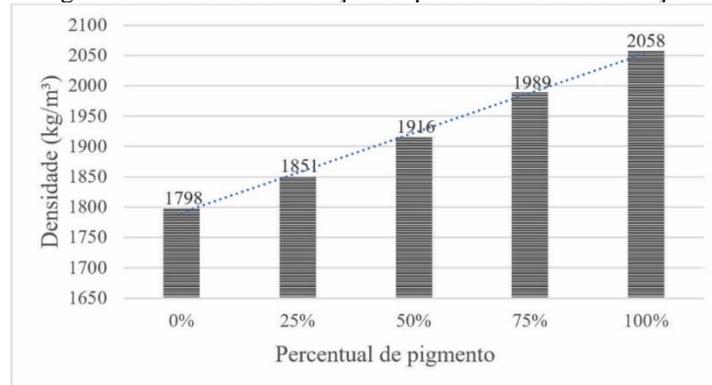
Associando os resultados obtidos da argamassa a estas afirmações, depreende-se que altos teores de substituição da areia natural por óxidos de ferro originados de resíduos podem prejudicar a consistência da mistura, o que pode ter dado causa às limitações das propriedades mecânicas analisadas no estado endurecido.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

3.3.1 Densidade e absorção de água

A presença do pigmento, uma vez que, possui densidade superior a da areia utilizada, acarretou um acréscimo linear da densidade da argamassa quando empregado em substituição do agregado natural, apresentado na Figura 6.

Figura 6. Densidade em função do percentual de substituição.

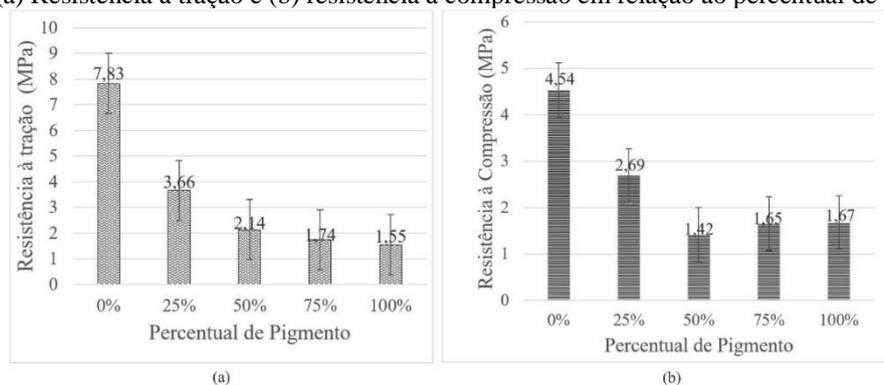


Em relação a absorção de água, os valores obtidos foram de 5,42% para referência, 7,30% para amostra de 25% de pigmento e 11,30% para amostra de 50%. Já para maiores teores de óxido (75% e 100%) as tensões causadas pela presença de água fizeram com que as ligações fossem rompidas e as amostras segregassem totalmente, reforçando a afirmação de Sikora et al. (2016) sobre os prejuízos de hidratação devido a presença das partículas de óxido de ferro.

3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão

De acordo com Sikora et al. (2016), o óxido de ferro possui alta energia superficial, o que resulta numa tendência de aglomeração das partículas. Pode ter sido esta a razão que causou o decréscimo de resistência à tração, ocorrendo de maneira sequencial a utilização do pigmento, o que pode ser visualizado na Figura 7(a).

Figura 7. (a) Resistência à tração e (b) resistência à compressão em relação ao percentual de substituição.



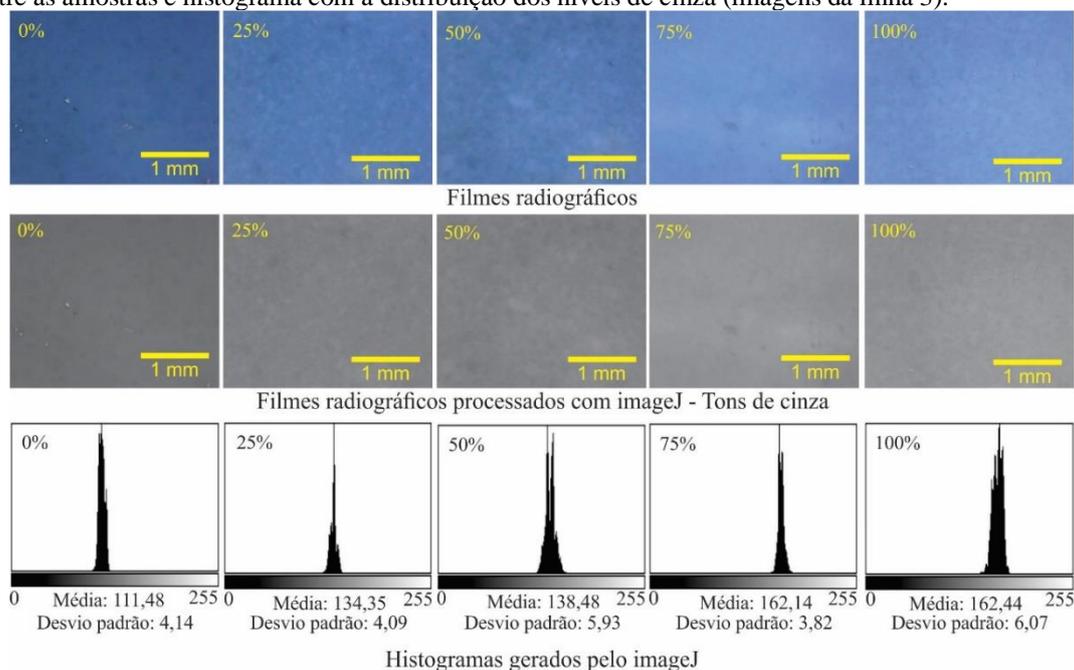
Yazdi et al. (2011) afirma que, a partir de 5% de incremento de nanopartículas de magnetita, começam a ocorrer decréscimos na resistência à compressão. O que foi observado através dos resultados da Figura 7(b), uma redução expressiva da resistência entre a amostra de referência e as com adição do óxido, que foram avaliadas a partir de

25% de inserção. Complementando a análise, dentre os percentuais de substituição, obteve a maior resistência à compressão aquele com 25% do pigmento e, a menor resistência dentre os teores avaliados, aquele com 50%. Acredita-se que ocorreu uma melhor distribuição granular entre areia e pigmento na razão 1:3.

3.3.3 Estimativa de atenuação de raio-x

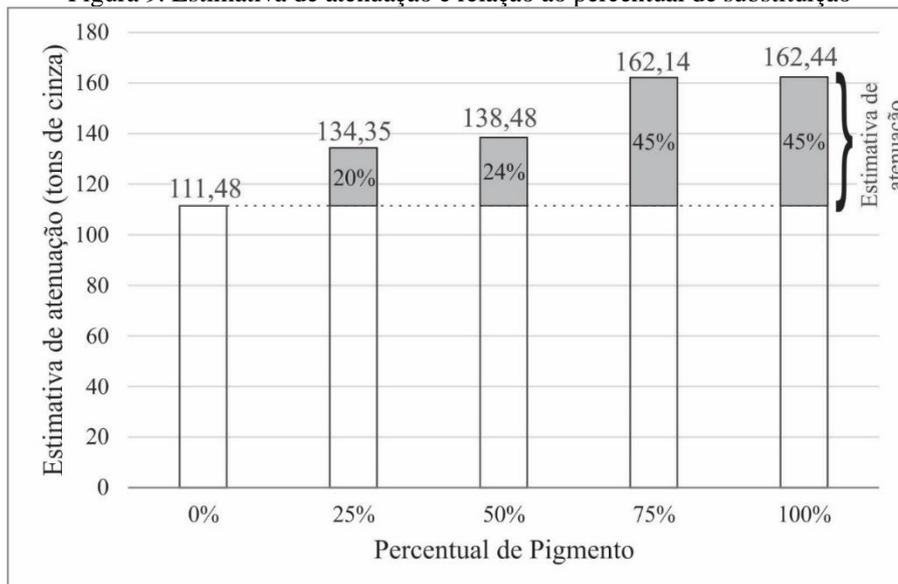
Após a incidência de raios-X nas amostras, percebe-se na Figura 8 que, de acordo com o teor do óxido, as mesmas demonstraram um maior número de pontos brancos ou áreas com tons mais claros que refletiram mais radiação. De acordo com a escala Hounsfield tal característica é comumente observada em elementos metálicos, sendo, neste caso, possivelmente devido ao pigmento magnético (OSBORNEA *et al.*, 2016). Na Figura 8 (linha 2) é apresentada a imagem convertida em escalas de cinza pelo software ImageJ, o programa quantifica de 0 a 255 os níveis de cor, permitindo a obtenção dos histogramas e das médias para cada amostra.

Figura 8. Filmes radiográficos (imagens da linha 1 e 2) mostrando as diferenças de atenuação de raio-X entre as amostras e histograma com a distribuição dos níveis de cinza (imagens da linha 3).



Através dos histogramas gerados pelo software, que apresentam a quantificação dos níveis de cinza (Figura 8 – linha 3), possibilitou-se verificar a atenuação média de cada amostra. Na Figura 9 são expostos os resultados deste experimento para cada percentual de pigmento e os ganhos de blindagem observados.

Figura 9. Estimativa de atenuação e relação ao percentual de substituição



A presença do pigmento extraído da DAM contribuiu para o ganho na blindagem de raios X em todos os teores. O maior acréscimo neste índice ocorreu entre 75% e 100% de pigmento, sendo 45% superior à amostra de referência.

Houve pequenas alterações entre os teores 75% e 100% e, também, entre os teores 25% e 50%. Supõe-se que, a melhor relação para compor uma matriz compacta (por uma granulometria contínua), conforme mencionado por Fontana (2015), ocorreu através da variação dos agregados areia fina natural e pigmento magnético extraído da DAM (duas vezes mais fino do que a areia) e que isso tenha ocorrido pela relação 1:3 entre estes materiais.

O que também reforça esta ideia, foi um ganho significativo de atenuação apresentado pela adição de 25% de pigmento (cerca de 20% maior que a argamassa de referência), ou seja, o outro percentual que utiliza da razão 1:3 para os agregados (pigmento:areia). Considerando que a amostra com esse teor apresentou índice de consistência dentro do recomendado pela NBR 13276 (ABNT, 2016) e resistências mecânicas superiores aos demais teores de substituição, logo, o seu uso em vedações passa a ser considerável.

4 CONCLUSÕES

A utilização do pigmento sintético extraído da DAM no desenvolvimento de argamassas foi avaliada quando as propriedades mecânicas (resistência à compressão e tração) e físicas (densidade e absorção de água). Também, uma estimativa da possível

atenuação de radiação foi realizada. De acordo com os resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser feitas em relação ao corpo de prova de referência:

- O pigmento de óxido de ferro sintético extraído da DAM quando utilizado na substituição do agregado natural (areia) causa uma significativa diminuição nas resistências mecânicas (compressão e tração);
- Um aumento de densidade foi observado com o aumento do percentual de substituição da areia natural pelo óxido de ferro sintético, conseqüentemente, aumenta a eficácia na atenuação de radiação;
- A absorção de água aumentou com o aumento do percentual de substituição, sendo que valores acima de 75% de substituição os corpos de prova segregaram totalmente.
- Outra característica interessante observada foi as propriedades magnéticas da argamassa, a qual deve ser melhor estudada.

Por fim, a argamassa magnética desenvolvida possui potencial de oferecer proteção radiológica maior do que a argamassa de referência, pois foram observados possíveis ganhos de atenuação de raio-X para todos os teores de substituição do agregado natural por óxido de ferro sintético. Estudos mais aprofundados de otimização do uso do óxido de ferro sintético em argamassas são necessários para o desenvolvimento de um produto comercialmente viável.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 7211: Agregado para concreto.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 52 – Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248 – Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2003.

AGHAMIRI, S. M. R., MORTAZAVI, S. M. J., RAZI, Z., MOSLEH-SHIRAZI, M. A., BARADARAN-GHAHFAROKHI, M., RAHMANI, F., e FAEGHI, F. Ulexite–galena intermediate-weight concrete as a novel design for overcoming space and weight limitations in the construction of efficient shields against neutrons and photons. **Radiation protection dosimetry**, v. 154, n. 3, p. 375-380, 2013.

ALBUQUERQUE, S. M. **Estudo para o desenvolvimento e caracterização de concretos de massa específica elevada para proteção às radiações gama e X.** Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

AMARAL FILHO, J. R. D., SCHNEIDER, I. A. H., DE BRUM, I. A., SAMPAIO, C. H., MILTZAREK, G., SCHNEIDER, C. Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 66, p. 347-353, 2013.

ASLANI, F.; LESSLIE, D. M.; HAMIDI, F. Development and analysis of highly workable high-strength heavyweight concrete using magnetite aggregates. **Structural Concrete**, v. 22, p. E169-E182, 2020.

CAO, Jingyao; CHUNG, D.d.l. Use of fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding. **Cement And Concrete Research**, v. 34, n. 10, p. 1889-1892, out. 2004.

CARASEK, H.; ARAUJO, R. C.; CASCUDO, O. e ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Matéria** (Rio J.) [online]. 2016, vol.21, n.3, pp.714-732

DINIZ, V. C. S.; DANTAS, B. B.; FIGUEIREDO, A. R.; CORNEJO, D. R.; COSTA, A. C. F. M.. Avaliação microestrutural e magnética de Fe_3O_4 sintetizada pelo método de reação de combustão. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 359, p.298-302, set. 2015.

FACURE, A. e SILVA, A. X. The use of high-density concretes in radiotherapy treatment room design. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 65, n. 9, p. 1023-1028, 2007.

FONTANA, L. M. T. **Argamassa pesada com escória de aciaria de forno elétrico para atenuação de radiação.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 135 p., 2015.

GASPAROTTO, J. e MARTINELLO, K. Da B. Coal as an energy source and its impacts on human health. **Energy Geoscience**, v. 2, n. 2, p. 113-120, 2021.

LERMEN, R. T., PRAUCHNER, M. B., SILVA, R. de A., e BONSEMBIANTE, F. T. Using Wastes from the Process of Blasting with Steel Shot to Make a Radiation Shield in Mortar. **Sustainability**, v. 12, n. 16, p. 6674, 2020

LI, D., GONG, B., LIU, Y., e DANG, Z. Self-healing coatings based on PropS-SH and pH-responsive HNT-BTA nanoparticles for inhibition of pyrite oxidation to control acid mine drainage. **Chemical Engineering Journal**, v. 415, p. 128993, 2021.

LOPES, F. A. **Produção hidrometalúrgica de óxidos magnéticos a partir de concentrado de pirita proveniente de rejeitos da mineração de carvão.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2017

MADEIRA, V. **Aproveitamento de resíduos da mineração de carvão para fabricação de produtos com elevado valor agregado.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 195p. 2010.

NARDONE, V.; TINI, P.; CARBONE, S. F.; GRASSI, A.; BIONDI, M.; SEBASTE, L.; CARFAGNO, T.; VANZI, E.; OTTO, G. de; BATTAGLIA, G.. Bone texture analysis using CT-simulation scans to individuate risk parameters for radiation-induced insufficiency fractures. **Osteoporosis International**, [s.l.], v. 28, n. 6, p.1915-1923, 27 fev. 2017

ORTIZ, N. **Estudo da adição de magnetita como material adsorvedor dos metais Cu, Pb, Ni e Cd, em solução.** Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

OSBORNEA, T.; TANG, C.; SABARWAL, K.; PRAKASH. V. How to interpret na unenhanced CT Brain scan. Part 1: Basic principles of Computed Tomography and relevant neuroanatomy. **South Sudan Medical Journal**, v. 9, n. 3, p. 1-3, 2016.

OTO, B., Gür, A., KAVAZ, E., ÇAKIR, T., e YALTAY, N. Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes. **Progress in Nuclear Energy**, v. 92, p. 71-80, 2016

OTO, B; GÜR, A. Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate. **International Journal of Physical Sciences**, v. 8, p. 310-314, 2013.

OUDA, A. S. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. **Progress in Nuclear Energy**, v. 79, p. 48-55, 2015
SANTOS, R. R. do, REAL, J. V., FRIEDRICH, B. Q., LUZ, R. M. da, e SILVA, A. M. M. da. SHIELD 1.0: desenvolvimento de um programa de cálculo de blindagem em radiodiagnóstico. **Revista Brasileira de Física Médica** (Online), 2013.

SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R. M. **Iron Oxides in the Laboratory: Preparation and Characterization.** 2. ed. [s.l.]: Wiley-vch Verlag GmbH, 2000.

SIKORA, P., HORSZCZARUK, E., CENDROWSKI, K., e MIJOWSKA, E. The influence of nano-Fe₃O₄ on the microstructure and mechanical properties of cementitious composites. **Nanoscale Research Letters**, v. 11, n. 1, p. 1-9, 2016.

SILVA, C. A. R. da, e TENÓRIO, M. de O. Concreto de Alta Densidade. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 57., 2015, Bonito - MS. Anais... [S.l.]: IBRACON, 2015. p. 1-5.

SILVA, G. T. de M., RIBEIRO, C. C., RIBEIRO, S. E. C., de OLIVEIRA, D. M., de OLIVEIRA, W. S., ALMEIDA, M. L. B. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 46883-46896, 2020.

SILVA, R. de A. **Recuperação hidrometalúrgica de metais da drenagem ácida de minas por precipitação seletiva.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em

Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

SILVA, R. de A., SECCO, M. P., LERMEN, R. T., SCHNEIDER, I. A. H., HIDALGO, G. E. N., SAMPAIO, C. H. Optimizing the selective precipitation of iron to produce yellow pigment from acid mine drainage. **Minerals Engineering**, v. 135, p. 111-117, 2019.

SILVEIRA, A.N.; SILVA, R. D. R.; RUBIO, J. Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil: comparative active processes and water reuse. **International Journal of Mineral Processing**, v.93, n.2, p. 103-109, 2009.

TANNER A. O. Iron oxide pigments [Advance Release] Minerals Yearbook 2014. Compiler, USGS, US Dept of the Interior, Washington DC. 2016.

TAUHATA, L., SALATI, P. A., DI PRINZIO, R., e DI PRINZIO, A. R. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – 10ª revisão**. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014

VASQUEZ, B. A. F. **Tratamento secundário de Drenagem Ácida de Mina em banhados construídos e lagoa de polimento**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007

VIGÂNICO, E. M. **Produção de sulfato ferroso a partir de rejeitos do carvão**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

VOLKMAN, D. E. Concrete for radiation shielding. In: Lamond, J. F. Pielert, J. H. (ed.). **Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials**. Los Alamos: ASTM, 2006. cap. 48, p. 570-577.

YAZDI, N.; AREFI, M.; MOLLAAHMADI, E.; NEJAND, B. To study the effect of adding Fe₂O₃ nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar, **Life Sci**, [s.l], v. 8. n. 4, p. 550–554, 2011.