CARBONATAÇÃO DE ARGAMASSAS MISTAS PRODUZIDAS COM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

https://doi.org/10.22533/at.ed.81921081119

HERMENEGILDO, GABRIELA C.[1]; CARNEIRO, GISELE O. P.[1]; NOGUEIRA, JÚLIA A. W.[1]; BEZERRA, AUGUSTO C.[2], BESSA, SOFIA A. L.[1];
[1]UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS / UFMG; [2] CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS/ CEFET-MG.
E-MAIL DO AUTOR CORRESPONDENTE: GABHICARMO@GMAIL.COM

RESUMO: O estado de Minas Gerais é segundo maior produtor de minério de ferro do Brasil e em 2019, foi responsável por 39% da produção deste mineral do país. Este trabalho buscou avaliar a carbonatação e o potencial de captura de CO_2 em argamassas de revestimento mistas nos traços 1:2:9 e 1:1:6, produzidas com rejeito de minério de ferro (RMF), calcinado a 500 graus e in natura, em substituição ao cimento CP IV, nos teores de 0%, 10% e 20%. Para isso, foram realizados ensaios mecânicos e de carbonatação natural. Os resultados indicam a viabilidade da incorporação do RMF em argamassas sem prejuízo para a sua durabilidade.

PALAVRAS-CHAVES: Carbonatação, rejeito de minério de ferro, argamassas.

ABSTRACT: The state of Minas Gerais is the second largest iron ore producer in Brazil and in 2019, it was responsible for 39% of the country's iron ore production. This work aimed to evaluate carbonation and CO_2 capture potential in mixed coating mortars, in 1:2:9 and 1:1:6 mixes, produced with iron ore tailings (IOT), calcined at 500 degrees and in natura, in replacement of cement CP IV, at levels of 0%, 10% and 20%. For this, mechanical and natural carbonation tests were carried out. The results indicate the feasibility of incorporating IOT into mortars without harming their durability.

KEYWORDS: Carbonation, iron ore tailings, mortars.

1 | INTRODUÇÃO

Desde seu início, em meados do século XVII, a mineração tem contribuído de modo significativo para o desenvolvimento do país e, até hoje, a indústria mineral se destaca por auxiliar de forma direta a balança comercial brasileira [1]. No primeiro semestre de 2019, a participação de minério de ferro correspondeu a 64,8% das exportações da Indústria Extrativa Mineral. No ano seguinte, os estados com as maiores arrecadações de Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) foram: Pará (51%) e Minas Gerais (39%), os maiores produtores de minério de ferro do país. [2].

A extração mineral gera grande volume de resíduos e seu armazenamento, além de dispendioso, gera significativo passivo ambiental e risco elevado de acidentes, como o que ocorreu em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambas cidades de Minas Gerais

[3]. A demanda de grandes áreas para sua deposição, o potencial de contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas, bem como os riscos de ruptura e falha nas barragens capazes de provocar danos ambientais e sociais são alguns dos problemas associados à extração do minério de ferro, fato que torna a destinação adequada dos rejeitos uma demanda cada vez mais urgente.

Como exemplo de viabilidade, a China tem buscado modificar o modelo linear de produção (take, made and dispose) e utilizar 20% dos rejeitos de mineração na construção civil [4]. Recentemente, a lei 23.575, de 15 de janeiro de 2020 (que alterou a lei 6.763, de 26 de dezembro de 1975) autorizou o Poder Executivo de Minas Gerais a zerar a carga tributária incidente em obras de cimento e concreto em que haja emprego de rejeito ou estéril de minério. Essas ações, que partem do Poder Público, são grandes viabilizadoras do uso de rejeitos e estéreis nos materiais e nos componentes da construção, sem as quais o esforço dos pesquisadores não conseguiria alcançar o real emprego desses resíduos pela sociedade [1].

Em um segundo plano, tem-se a indústria cimenteira, que é responsável por aproximadamente 7% das emissões antropogênicas globais de CO_2. O cimento é o principal componente de concretos e argamassas, cerca de 90% de todo o cimento produzido no Brasil é empregado nestes materiais, sendo 35% destinados à produção de concretos e 55% a produção de argamassas, sendo o restante (10%) é empregado para outros usos. A fim de reduzir suas emissões, este setor tem buscado melhorar a eficiência energética, reduzir o teor de clínquer contido no cimento e implementar técnicas de estocagem e captura de carbono [5].

A captura de CO_2 em materiais cimentícios, como argamassas e concretos, ocorre devido à reação química de carbonatação, ao longo de sua vida útil ou após a demolição da edificação/estrutura [6]. A carbonatação é um fenômeno que ocorre entre a portlandita (hidróxido de cálcio – CH) e o CO_2 presente no ar. Tal reação depende diretamente da porosidade, da umidade relativa do ar, da concentração de CO_2, da pressão de penetração e da temperatura do meio ambiente [7-8].

Neste sentido, o presente estudo objetiva avaliar as propriedades mecânicas e a profundidade da carbonatação em argamassas de revestimento mistas, nas quais o cimento é substituído por rejeito de minério de ferro (RMF).

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, avaliou-se as propriedades mecânicas e a carbonatação de argamassas mistas de revestimento. Para a produção das argamassas foram utilizados: i) cimento Portland Pozolânico, tipo CP IV 32; ii) rejeito de minério de ferro (RMF); iii) areia fina lavada; e iv) cal hidratada CH-I.

Os traços 1:2:9 (G1), e 1:1:6 (G2), em massa (cimento: cal: areia), foram escolhidos por serem os mais comumente utilizados em rebocos interno e externo, respectivamente [9; 10; 11].

O rejeito de minério de ferro (RMF), utilizado em substituição parcial ao cimento, foi fornecido pela Vallourec Mineração, em seu estado *in natura* e calcinado a 500 °C (em forno rotativo). Todas as amostras de RMF foram secas em estufa a 100 ºC por 24h e, posteriormente, cominuídas em moinho planetário de alto desempenho, com quatro

recipientes de moagem (FRITSCH, modelo Pulverisette 5). Os recipientes e as esferas utilizadas são compostos por óxido de Zircônio, 94,2% ZrO_2, com densidade de 5,7 g/cm³.

O agregado miúdo utilizado foi a areia média lavada e peneirada, disponível na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. As amostras foram caracterizadas quanto à sua granulometria, NBR NM 248 [13]. Para tal, a areia foi seca em estufa por 24h.

Os teores de substituição utilizados (0%, 10% e 20%), foram definidos em estudos anteriores [10; 11; 12], assim como o fator água/aglomerante de todas as argamassas, que foi fixado em 0,95. Foram moldados traços de referência sem resíduo e com substituição, em massa, do cimento por RMF, conforme Tabela 1.

Para os ensaios de resistência à compressão e à tração, conforme ABNT NBR 13279/2005 [14], foram moldados para cada grupo quatro corpos de prova prismáticos com dimensões de 40x40x160 mm. Os prismas foram rompidos, aos 28 dias, em uma Máquina Universal de Ensaio Emic DL30000N.

Os valores da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram aferidos aos 28 dias, segundo ABNT NBR 9778/ 2005 [14]. Para cada grupo foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura (Figura 1).

Para o ensaio de carbonatação, foram utilizados corpos de prova cilíndricos que permaneceram em ambiente de laboratório até a idade de 120 dias. A umidade relativa de 65 ± 1% foi adotada como parâmetro. Nas datas do ensaio, as amostras foram submetidas à ruptura diametral e aplicação de uma solução de 1% de fenolftaleína diluída em álcool isopropílico e água destilada foi aspergida nas superfícies, segundo especificação da RILEM CPC-18 [17].

Tipo de resíduo	Argamassas	G1 – 1:2:9				G2 – 1:1:6			
		Cimento	Cal	Areia	RMF	Cimento	Cal	Areia	RMF
Sem resíduo	REF	1	2	9	-	1	1	6	-
RMF *in natura*	IN-10	0,9	2	9	0,1	0,9	1	6	0,1
	IN-20	0,8	2	9	0,2	0,8	1	6	0,2
RMF 500 °C	500-10	0,9	2	9	0,1	0,9	1	6	0,1
	500-20	0,8	2	9	0,2	0,8	1	6	0,2

Tabela 1 – Traços das argamassas

Fonte: Autores, 2021



Figura 1 – Corpo de prova de argamassa - ensaio da NBR 9778/2005

Fonte: Autores, 2021

Nessas condições, o hidróxido de cálcio (CH) adquire uma tonalidade vermelho-púrpura (componente básico, pH > 8,0), enquanto a parte que sofreu carbonatação e que, consequentemente, absorve CO2 (componente ácido, pH < 8,0) permanece incolor [18]. Existe ainda uma região na fronteira das duas onde a carbonatação já está em andamento e que este ensaio não é capaz de indentificar, denominada zona parcialmente carbonatada ou zona semi-carbonatada, como pode ser visto na Figura 2.

Após a aspersão da solução de fenolftaleína, aguardou-se 10 minutos para a secagem das amostras para então prosseguir com a análise do ensaio. A análise da área carbonatada foi realizada com o auxílio do *software* AutoCAD 2019® [8].

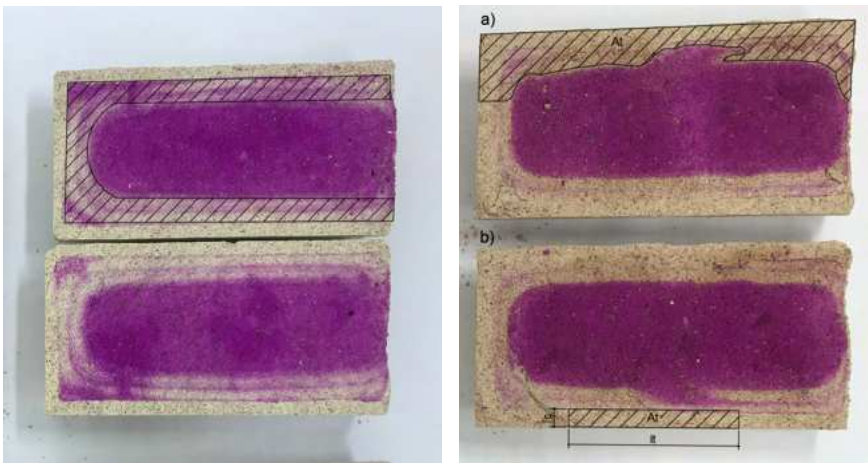

Figura 2 – Zona semi-carbonatada não mensurável nos cálculos (esq.); Análise gráfica da área carbonatada. a) Delimitação da área; b) Penetração média de carbonatação (dir.)

Fonte: Autores, 2021

As escalas foram ajustadas para o tamanho real, o que permitiu a delimitação gráfica da área incolor que indica a área carbonatada. Com o software, é possível medir a área total através do método de Gauss, que consiste em um algoritmo matemático que calcula a área de polígonos irregulares [8]. Logo, dividindo-se a área total (At) pelo comprimento (lt), Figura 2-a, é possível obter a penetração média de carbonatação (lc) conforme é mostrado na Figura 2-b. Foram rompidas quatro amostras para cada tipo de argamassa. Por meio dessa metodologia, cada corpo de prova rompido gerou seis medidas do perfil de penetração de CO_2.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios de resistência à tração são apresentados na Figura 3. Observa-se uma tendência na diminuição da resistência à flexão com o aumento do teor de RMF na argamassa. De modo geral, os resultados não interferem na classificação das argamassas como R1, segundo ABNT NBR 13281/ 2005 [19] e são aptas a serem utilizadas como argamassas de revestimento interno.

A Figura 4 apresenta os valores de resistência média à compressão aos 28 dias. Assim como nas análises referentes à flexão, com o aumento do teor de RMF na argamassa, nota-se uma tendência na redução dos valores de resistência à compressão. No caso do traço G1 (1:1:6), as argamassas se mantêm na classificação como P1 [19], quanto ao traço G2 (1:2:9), argamassas podem ser classificadas como P3 [19].

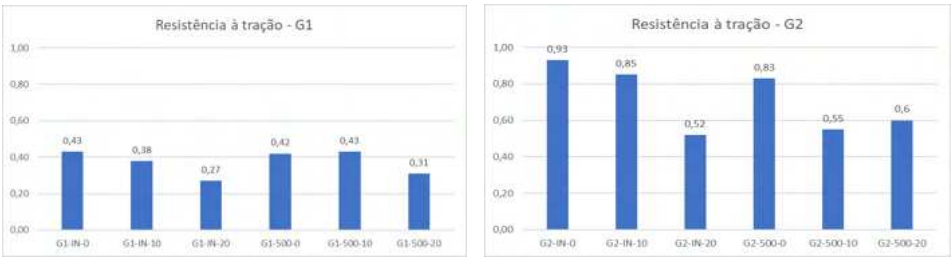

Figura 3 - Resultados de resistência à tração das argamassas do G1 (esq.) e do G2 (dir.).

Fonte: Autores, 2021

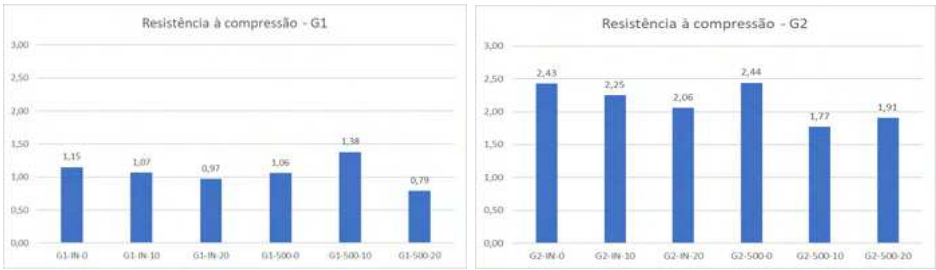

Figura 4 - Resultados de resistência à compressão das argamassas do G1 (esq.) e do G2 (dir.).

Fonte: Autores, 2021

Os resultados do ensaio de absorção de água, através dos índices de vazios, massas específicas e índices de absorção revelaram que as substituições de cimento por RMF não alteraram significativamente os valores obtidos, comparados à argamassa de referência (Figuras 5 e 6).

Os resultados referentes ao ensaio de carbonatação natural, aos 120 dias, das argamassas estão expressos nas Tabelas 2 e 3. A geometria das amostras influencia nas frentes de carbonatação, amostras cilíndricas elevam a profundidade em aproximadamente 50% quando comparadas a amostras prismáticas [16]. O motivo pode ser devido a maior soma dos vetores de difusão nas amostras cilíndricas [8].

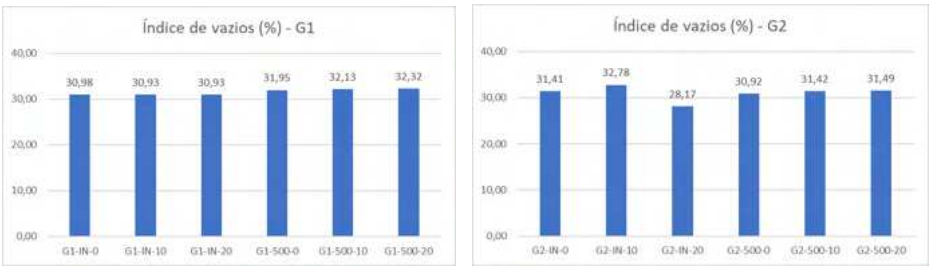

Figura 5 - Resultados do índice de vazios das argamassas do G1 (esq.) e do G2 (dir.).

Fonte: Autores, 2021

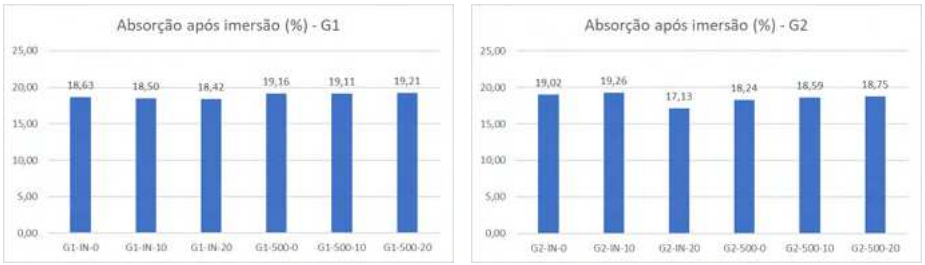

Figura 6 - Resultados da absorção de água das argamassas do G1 (esq.) e do G2 (dir.).

Parâmetros	G1 IN 0	G1 IN 10	G1 IN 20	G1 500 0	G1 500 10	G1 500 20
Média (mm)	5,03	4,86	4,15	4,69	4,90	5,67
Desvio padrão	1,09	1,11	1,06	0,78	0,85	1,13
CV (%)	21,64	22,81	25,45	16,61	17,28	19,94

Tabela 2 – Profundidade de carbonatação – G1

Fonte: Autores, 2021

Parâmetros	G2 IN 0	G2 IN 10	G2 IN 20	G2 500 0	G2 500 10	G2 500 20
Média (mm)	5,47	5,16	4,95	5,06	5,69	5,83
Desvio padrão	1,28	1,31	1,14	1,00	0,89	0,86
CV (%)	23,38	25,44	23,08	19,77	15,66	14,67

Tabela 3 – Profundidade de carbonatação – G2

Fonte: Autores, 2021

De modo geral, há uma tendência a diminuição da frente de carbonatação quando o rejeito se encontra in natura, e inversamente a esse fato, há uma tendência de aumento na profundidade de carbonatação quando o rejeito está calcinado a 500 ˚C. Essa tendência de aumento das propriedades da argamassa nas amostras calcinadas, também pode ser observada no que se refere ao ensaio de absorção, onde os índices de vazios e absorção se elevam para as amostras do grupo G1 calcinadas a 500 ˚C.

Como a carbonatação de argamassas que levam cal na sua composição é uma propriedade até mesmo esperada (e positiva, num cenário de captura de carbono pelos materiais de construção), pode-se considerar que o uso de RMF como substituto do cimento Portland não interferiu, de forma preponderante, nos valores de carbonatação observados [6, 20].

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelos ensaios realizados, percebe-se que a substituição do cimento Portland pelo RMF não afetou as propriedades mecânicas e a durabilidade, mensurada pelo ensaio de carbonatação. Essa conclusão é possível já que há uma tendência de que as argamassas produzidas com RMF apresentem carbonatação semelhante às argamassas de referência, logo as propriedades das argamassas também não sofrem relativas alterações.

REFERÊNCIAS

1. MIRANDA, M.A.; ARRUDA, E.A.M., Produção e avaliação de microconcretos com rejeito de minério de ferro para a fabricação de componentes construtivos. Revista Matéria, v.00, n.0, 2020. (No prelo).

2. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM. Arrecadação CFEM por ano. Brasília, Brasil, outubro de 2020. Disponível em:< anm.gov.br>. Acesso em abril de 2021.

3. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, IBRAM, *Relatório Anual de Atividades.* Julho de 2018-junho de 2019. Disponível em:<http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2019/07/relatorio-anaul-2018-2019.pdf/. Acesso em abril de 2021.

4. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais, SEMAD, "**Mineiros conhecem modelo chinês de economia circular na mineração**". Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/3704-mineiros-conhecem-modelo-chines-de-economia-circular-na-mineracao>. Acesso em maio de 2021.

5. JOHN, V. M. et al. Potencial de mitigação de CO_2 de materiais cimentícios. SINIC e ABCP. São Paulo: [s.n.], 2018 (não publicado).

6. MAZURANA, L. **Captura de CO_2 em argamassa de revestimento através da carbonatação natural** / Lissandra Mazurana – 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2019.

7. LIMA, S. A.; SALES, A., ALMEIDA, F. C. R., et al., "Concretos com cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação da durabilidade por meio de ensaios de carbonatação e abrasão", *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 201-212, Abr./jun. 2011.

8. LADEIRA, L. O. **Resistência à tração e à carbonatação de argamassas fabricadas com nanotubos de carbono sintetizados diretamente sobre o clínquer.** Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte., 2017.

9. DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre.** 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

10. BESSA, S.; MENDONÇA, I.; VIMIEIRO, J.; GURGEL, G.; MAGALHÃES, L.; BEZERRA, A.; LOURA, R. Análises de argamassas de revestimento produzidas com rejeito de minério de ferro. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

11. MENDONÇA, I. K. ; VIMIEIRO, J. I. C. ; BELO, B. R. ; LOURA, R. M. ; Bessa, S. A. L. ; BEZERRA, A. C. S. . Absortância solar de argamassas coloridas produzidas com rejeito de minério de ferro. In: VI Congresso de Engenharia Civil, 2019, Juiz de Fora. **Anais do VI CONENGE**. Juiz de Fora: UFJF, 2019.

12. MORAIS, C. F.; BELO, B. R.; BEZERRA, A. C. S.; PORTO, M. P.; LOURA, R. M.; BESSA, S. A. L. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121073, 2021.

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

14. ABNT. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

15. ABNT. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

16. KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa.** Tese (Doutorado em Engenharia), Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

17. RILEM. **CPC 18 Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth.** TC56 - MHM Hydrocarbon Materials, 1998. ISSN 0025-5432/88.

18. NEVES, I. B. F. Avaliação da carbonatação em argamassas de cimento com adições de cinza de casca de arroz amorfa e cristalina. Dissertação de Mestrado - UnB. Brasília, 2005.

19. ABNT. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

20. COSTA, M. R. M. M.; PACHECO, A. P. G. Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta. **Matéria** (Rio de Janeiro) [online]. 2018, v. 23, n. 1. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0286>.