

## Produção e avaliação de microconcretos com rejeito de minério de ferro para a fabricação de componentes construtivos

Production and evaluation of microconcretos with iron ore tailings to produce construction components

Sofia Araújo Lima Bessa<sup>1</sup>, Mariana Alves Miranda<sup>2</sup>,  
Eduardo Archetti Martins Arruda<sup>2</sup>,  
Augusto Cesar da Silva Bezerra<sup>3</sup>, Helenice Maria Sacht<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Laboratório de Pesquisas Tecnológicas – LPT. Departamento de Tecnologia do Design, da Arquitetura e do Urbanismo – TAU. Escola de Arquitetura, UFMG. Rua Paraíba, 697, Savassi, CEP 30130-141. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

<sup>2</sup>Escola de Arquitetura, UFMG. Rua Paraíba, 697, Savassi, CEP 30130-141. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

<sup>3</sup>Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Materiais. Departamento de Engenharia de Transportes - DET/CEFET-MG. Av. Amazonas, 5253 - Nova Suíça, Belo Horizonte - MG, 30421-169. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>4</sup>Instituto Latino-americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, ILATIT/UNILA. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Avenida Silvio Américo Sasdelli, 1842 - Bairro Itaipu A, CEP: 85866-000. Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

e-mail: sofiaabessa@ufmg.br, salbessa@gmail.com, marianaalvesmiranda@ufmg.br, marianamiranda1520@gmail.com, eduardoarchetti@gmail.com, augustobezerra@cefetmg.br, nicesacht@yahoo.com.br

---

### RESUMO

O estado de Minas Gerais é o maior produtor de minério de ferro e, conseqüentemente, de rejeito de minério de ferro (RMF) do Brasil. Esta atividade de grande impacto ambiental está no centro das discussões políticas e sociais atuais devido aos desastres com rompimento de barragens ocorridos nas cidades de Mariana (2015) e de Brumadinho (2019), ambas mineiras. Estes eventos põem em discussão os métodos de descarte do RMF e coloca em destaque a possibilidade de um uso mais sustentável para este resíduo. Uma das alternativas é a utilização do RMF como insumo na fabricação de componentes da construção civil. Este trabalho avaliou a viabilidade do uso de RMF como agregado miúdo em microconcretos para a produção de elementos vazados. Para isso, o RMF foi caracterizado por meio de ensaios físicos e químicos. A dosagem do microconcreto foi realizada com base no método ABCP com  $f_{c28} = 25$  MPa e abatimento do tronco de cone entre 80 e 100 mm. Para a análise mecânica do microconcreto, foram moldados corpos de prova (10x20 cm) cilíndricos e realizados ensaios de resistência à compressão, absorção e índice de vazios, após 28 dias de cura. Para obter parâmetros de durabilidade, foram realizados ensaios de carbonatação natural aos 60, 120 e 180 dias, carbonatação acelerada aos 28 e 56 dias (teor de  $CO_2 = 5\%$ ; Umidade Relativa = 65%), além de ensaio de ataque ácido (solução  $H_2SO_4$  a 5%). O estudo apontou para a viabilidade da substituição do agregado miúdo por RMF na produção de microconcretos para elementos vazados, sem prejuízo para a sua durabilidade.

**Palavras-chave:** Microconcreto. Rejeito de minério de ferro. Componentes construtivos. Durabilidade. Sustentabilidade. Cobogós.

---

### ABSTRACT

The Minas Gerais state is the largest producer of iron ore and, as a result, iron ore tailings (IOT) of Brazil. This activity has a great environmental impact and it is currently the subject of political and social discussions in Brazil, due to disasters with disruption of mining dams that occurred in the cities of Mariana (2015) and Brumadinho (2019), both cities of Minas Gerais. These events bring into discussion the current methods of IOT disposal and highlight the possibility of a more sustainable use of mining tailings. One of the sustainable alternatives is the use of IOT as an input in the manufacture of civil construction components. In this way, this paper aimed to evaluate the feasibility of using iron ore tailing as

fine aggregate in microconcretes for the production of hollow elements (brick vents). Thus, the IOT was characterized through physical and chemical tests. The dosage of microconcrete was performed based on ABCP method with  $f_{c28} = 25$  MPa and the slump test between 80 e 100mm. For the mechanical analysis of the microconcrete, cylindrical specimens (10x20cm) were molded and tests were executed on them, such as compression and flexure strength, water absorption and void ratio. after 28 days curing. To obtain durability parameters, was performed natural carbonation tests at 60, 120 and 180 days, accelerated carbonation tests at 28 and 56 days ( $CO_2$  content = 5%; relative humidity (RH) = 65%), and acid attack test ( $H_2SO_4$  solution content = 5%). The research indicates the feasibility of replacing of the fine aggregate by IOT in the production of microconcretes for hollow elements (brick vents) confection without prejudice to its durability.

**Keywords:** Microconcrete. Iron ore tailing. Construction components. Durability. Sustainability. Brick vents.

## 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. O estado de Minas Gerais, um dos maiores produtores de minério de ferro do Brasil, exportou em 2018 mais de 145 milhões de toneladas de minérios, equivalente a mais de 10.000 milhões de dólares (60% do saldo comercial do ano), sendo que o minério de ferro foi o mineral mais explorado representando cerca de 90% desse valor [1-3].

O beneficiamento do minério de ferro tem como subproduto o rejeito de minério de ferro (RMF) e este, por não possuir destinação especificada em lei, é depositado em barragens de contenção por não ser reutilizado no processo produtivo. Além dos impactos ambientais de todos os processos que envolvem a extração do minério de ferro, a mineração está no centro das discussões sobre o gerenciamento dos resíduos, nos últimos tempos, devido aos desastres com rompimento de barragens ocorridos nas cidades de Mariana (2015) e de Brumadinho (2019), ambas no estado de Minas Gerais [4, 5]. Estes eventos puseram em discussão os métodos de descarte do rejeito de minério de ferro (RMF) e levantaram a possibilidade de um uso mais sustentável na construção civil [6]. Além disso, a exaustão dos depósitos de minério de alto teor em Minas Gerais tem levado a geração de uma maior quantidade de rejeito, uma vez que uma menor parcela do itabirito é aproveitada [7].

A tendência é que os RMF contenham cada vez menos ferro, pois os processos de extração do mineral estão mais eficientes. Na mesma direção, as principais jazidas de ferro em Minas Gerais têm passado por mudanças desde a década de 1970, quando se encontrava facilmente a hematita, com alto teor de ferro [7]. Atualmente, os processos de extração em itabiritos com menores quantidades de ferro têm exigido mudanças na forma de processamento e gerado rejeitos com maiores quantidades de sílica disponível. Excluindo-se a influência da granulometria, uma vez que o RMF possui menor finura que a areia natural, a tendência é de que o RMF possua cada vez mais propriedades químicas semelhantes à areia natural.

Como exemplo de viabilidade, a China tem buscado modificar o modelo linear de produção (*take, made and dispose*) e utiliza 20% dos rejeitos de mineração na construção civil [8]. Recentemente, a lei 23.575, de 15 de janeiro de 2020 (que alterou a lei 6.763, de 26 de dezembro de 1975) autoriza 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.

Como o beneficiamento do minério de ferro tem como subproduto o rejeito de minério de ferro, este vai continuar sendo gerado, seja com mais ou menos ferro, e precisa de uma destinação adequada. Seu uso em componentes construtivos implicará numa redução de consumo de agregado miúdo no concreto. Isso é relevante por conta da exaustão das lavras de areia natural e pelos impactos associados a essa atividade [9, 10]. Dessa forma, a análise de concretos produzidos com resíduos em substituição ao agregado é um vasto campo de pesquisa [11-13].

No Brasil, o uso de rejeitos de mineração se apresenta como um campo de aplicações variadas e sua viabilidade tem sido avaliada em pesquisas recentes [14-16]. A substituição do agregado miúdo natural por RMF, especificamente, nos materiais cimentícios, tais como blocos [17-19], argamassas [20-23], concretos [24-30], entre outros, já vem sendo estudada por diversos pesquisadores. Apesar do aumento das pesquisas nos últimos anos, ainda não é corrente os relatos sobre a durabilidade desses produtos.

TIAN *et al.* [26] relataram que em concretos com 35% de RMF, a carbonatação e outras propriedades relacionadas com a durabilidade não são modificadas. Em recente estudo, LI *et al.*, [25] analisaram as propriedades mecânicas básicas de concretos com RMF e relataram que, para valores ótimos de substituição de agregado miúdo por RMF (20-40%), o grau de compactação dos concretos aumentou, ao mesmo tempo que os poros mais deletérios foram preenchidos.

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 [31, 32]. Da mesma forma, os mecanismos de ação dos reagentes ácidos no concreto, originados principalmente ao ar livre, pela poluição do ar (deposi-

ção a seco) e pelas chuvas ácidas (deposição úmida), que são investigadas há algumas décadas e já é sabido que interferem na durabilidade das estruturas aparentes [33].

Para além da análise do emprego do RMF como substituto do agregado, é fundamental analisar a durabilidade com vistas à produção de componentes e produtos. Componentes construtivos utilizados em ambientes externos ou fachadas precisam de maior proteção contra as intempéries, notadamente a umidade. Ainda que os blocos (de vedação ou estruturais) fiquem recobertos por camadas de revestimento argamassado e pinturas (poliméricas ou minerais), em geral, alguns componentes são empregados “aparentes”, como é o caso das telhas e dos elementos vazados, que podem ser fabricados em material cimentício ou cerâmico [34].

Durante o período colonial brasileiro, os muxarabis, elementos vazados originários do Oriente Médio e trazidos pelos portugueses, foram amplamente utilizados, sendo gradativamente substituídos por outras aberturas, como as janelas de madeira e vidro (Figura 1). Os elementos vazados voltaram a ser utilizados na arquitetura brasileira, a partir da década de 1930, com a criação do cobogó, de origem industrializada, seguindo os preceitos do Modernismo. Os cobogós (Figura 2) são componentes arquitetônicos que possibilitam a iluminação e a ventilação natural dos ambientes, ao mesmo tempo que contribuem com proteção solar e conseguem filtrar a radiação por meio das aberturas dos elementos [34].

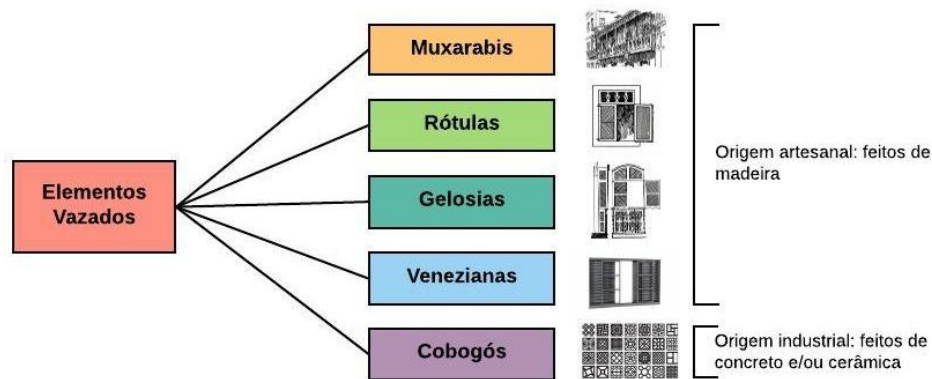


Figura 1: Origem e evolução dos elementos vazados. Fonte: MIRANDA *et al.* [26]

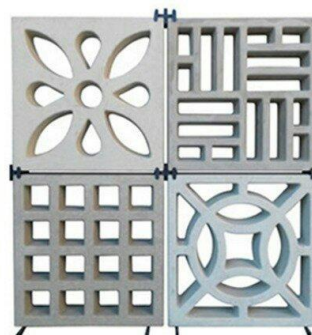


Figura 2: Cobogó, Fonte: MIRANDA *et al.* [26]

Os cobogós são elementos vazados criados no Brasil, que são utilizados como vedação vertical, aplicados de forma aparente, sem revestimento adicional, e podem ser produzidos em vários formatos e materiais [34]. Na região Nordeste do Brasil, devido ao clima quente e úmido, o uso do cobogó nunca foi descontinuado, mas passou por um lento esquecimento com o declínio dos preceitos Modernistas, tendo retornado ao cenário da construção civil ao final da década de 1990. Essa retomada foi, principalmente, impulsionada com a associação do seu uso à estratégias passivas de iluminação e de ventilação [35].

Usualmente fabricado em concreto, o cobogó é comumente utilizado sem nenhum revestimento ou tratamento superficial. Dessa forma, o microconcreto utilizado na sua produção precisa ter a mesma durabilidade de um bloco de vedação, por exemplo, para que o funcionamento do sistema de vedação vertical em que está localizado não seja afetado.

Sendo assim, esta pesquisa buscou atestar a viabilidade da produção de um microconcreto com rejeito de minério de ferro como substituto ao agregado miúdo, de forma que possa ser empregado na fabricação de elementos vazados, tais como o cobogó.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

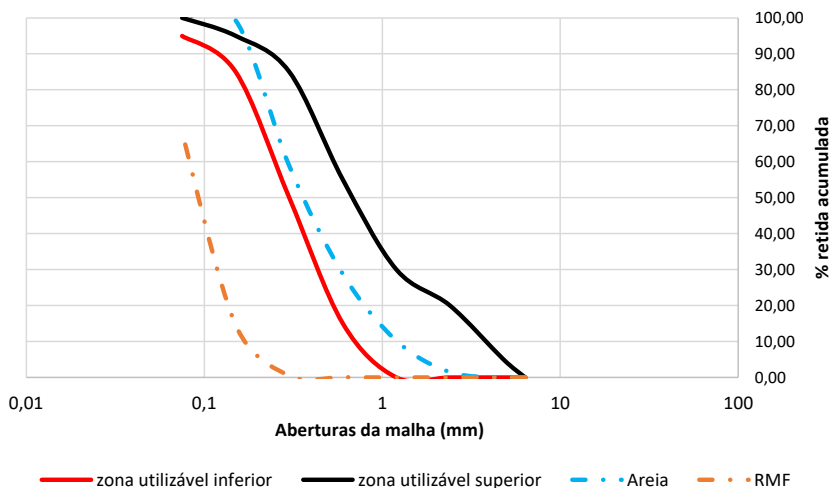
O presente trabalho propôs o desenvolvimento e a análise de um microconcreto, definido assim por utilizar materiais com dimensões máximas de 9,5 mm, com RMF para a produção de elementos vazados (EV). No Brasil, não há normalização para os EV, mesmo sendo componentes de vedação, a semelhança de blocos e tijolos, que possuem valores de resistência à compressão mínimos de 1,5 MPa [36]. Sendo assim, após pesquisas nos principais fabricantes de EV na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH/MG), percebeu-se que não há um consenso nem mesmo entre os fabricantes. Os valores praticados para a resistência à compressão do concreto e do próprio elemento construtivo variaram bastante. Portanto, para que fosse possível determinar as propriedades do microconcreto para os EV, estipulou-se o  $f_{c28}$  de 25 MPa.

Para a produção do microconcreto foi necessário o uso de cimento Portland de alta resistência inicial, tipo CP V ARI, adequado para a produção de elementos pré-fabricados; de rejeito de minério de ferro (RMF) *in natura*, disponibilizado pela Mineradora SAMARCO; de areia quartzosa natural, comercialmente disponível na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG; e de brita do tipo 00 (pedrisco).

Todos os materiais convencionais e o RMF foram caracterizados de modo a ser possível determinar o traço-base do microconcreto (Tabela 1). A determinação da massa específica do cimento foi realizada segundo a norma NM 23 [37]. Para a caracterização do agregado miúdo foram utilizadas as normas NM 52 [38] (para obtenção da massa específica) e a NBR 7211 [39] para a determinação do módulo de finura. A NBR 7211 também foi utilizada para a obtenção da dimensão máxima característica do agregado graúdo, que teve sua massa específica obtida com base na NM 53 [40]. As curvas granulométricas do RMF [41] e da areia estão apresentadas na Figura 3. Pode-se perceber que a curva do RMF fica totalmente fora dos limites da zona utilizável, determinados pela NBR 7211 [39], e possui granulometria inferior à areia natural.

**Tabela 1:** Propriedade físicas dos materiais utilizados

MATERIAIS	MASSA UNITÁRIA SOLTA (kg/m <sup>3</sup> )	MASSA UNITÁRIA COMPACTADA (kg/m <sup>3</sup> )	MASSA ESPECÍFICA (kg/m <sup>3</sup> )	MÓDULO DE FINURA (MF)	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA (DMC)
Areia	1230	-	2990	2,98	2,36
Cimento	-	-	3190	-	-
Brita 00	-	1540	2670	4,70	6,35
RMF	-	-	3000	0,83	0,30



**Figura 3:** Curvas granulométricas do RMF e da areia.

Além da caracterização física, a composição química do RMF foi determinada pelo espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Shimadzu, por meio de pastilhas prensadas, conforme valores apresentados na Tabela 2. Esses resultados atestam que o rejeito de mineração ainda pode conter elevados teores de ferro, mesmo após o processamento, resultado de uma concentração pouco efetiva. Da mesma forma, foi observado um teor elevado de sílica por outros autores [27, 42].

**Tabela 2:** Composição química do rejeito de minério de ferro (RMF)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO
RMF	48,92	48,70	2,18	0,13	0,09

A mineralogia da amostra foi determinada por difração de raios X no equipamento XRD-7000 da marca Shimadzu, gerada a 40kV e 30mA, usando radiação de Cu. A velocidade angular foi de 2°/min e o intervalo de varredura foi de  $2\theta = 10^\circ$  a  $80^\circ$ . No difratograma (Figura 4), é possível perceber que o rejeito possui uma acentuada característica cristalina, com picos de quartzo (Q) e hematita (H). Com a caracterização foi possível perceber que o RMF pode atuar como agregado e como filer, por sua finura e característica cristalina, na produção do concreto [7].

O método de dosagem utilizado foi o da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que é baseada nos métodos da *American Concrete Institute* (ACI) e da *Portland Cement Institute* (PCI), com algumas adaptações para o contexto brasileiro. Esse método é muito utilizado para dosagem de concretos de consistência plástica a fluida. A resistência característica à compressão de dosagem do microconcreto foi estipulada em 25 MPa, com abatimento (Figura 5) de 90 +/- 10 mm [43], de forma que houvesse uma adequada moldagem das peças, que são sempre compostas de contornos e desenhos esbeltos. O fator água/cimento foi estipulado em 0,60, por se tratar de elemento construtivo aparente e em condição de atmosfera moderada (urbana), caso aplicado à cidade de Belo Horizonte, MG [44]. O consumo de cimento Portland por metro cúbico de microconcreto ficou em 320 kg/m<sup>3</sup>.

O traço final obtido para o concreto foi 1 : 1,37 : 1,89 (cimento : agregado miúdo : agregado graúdo), em massa. O uso de aditivo superplastificante não foi considerado por questões econômicas. Os EV são elementos construtivos de vedação e não necessitam ser fabricados com microconcretos de elevada resistência mecânica, o que tornaria inviável o valor desse componente construtivo. Com o traço definido, foram feitos ajustes na quantidade de água, em laboratório, para que o abatimento estimado fosse atingido (Figura 5). O valor final para o fator água/cimento ficou em 0,57 - traço de referência (sem RMF). Os demais traços foram produzidos com substituição gradual da areia natural pelo RMF, em massa, com teores de 25%, 50%, 75% e 100%, conforme Tabela 3.

**Tabela 3:** Composição dos materiais para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto

TRAÇO	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	RMF (kg)	BRITA (kg)	ÁGUA (L)	ABATIMENTO (mm)
TR-0	320,00	438,40	0,00	604,80	182,40	110
TR-25	320,00	328,80	109,60	604,80	182,40	80
TR-50	320,00	219,40	219,40	604,80	182,40	110
TR-75	320,00	109,60	328,80	604,80	182,40	80
TR-100	320,00	0,00	438,40	604,80	182,40	100

Em todos os ensaios realizados para o microconcreto foram utilizados corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O concreto foi misturado em uma betoneira de 120 L e a sequência de colocação dos materiais foi: 100% do agregado graúdo, 25% da água, mistura por 90 s, 100% do agregado miúdo, 25% da água, mistura por 90 s, 100% do cimento, 50% da água e mistura por mais 120 s. A moldagem foi realizada por compactação manual, os corpos de prova foram desmoldados depois de 24h e colocados em cura úmida por submersão até a idade de ensaio.

Para o ensaio de resistência à compressão foram moldados seis corpos de prova para cada idade de ruptura, 7 e 28 dias, segundo a NBR 5739 [45]. Os corpos de provas foram rompidos no equipamento universal de ensaios da marca EMIC e os resultados processados com os softwares TESC e Vmaq. O equipamento foi calibrado para utilizar taxa de incremento de tensão de 0,25 MPa/s. Após os resultados dessa primeira etapa, foi possível determinar o valor mais adequado de substituição da areia pelo RMF, considerando a máxima utilização de RMF com a menor interferência na resistência à compressão do microconcreto.

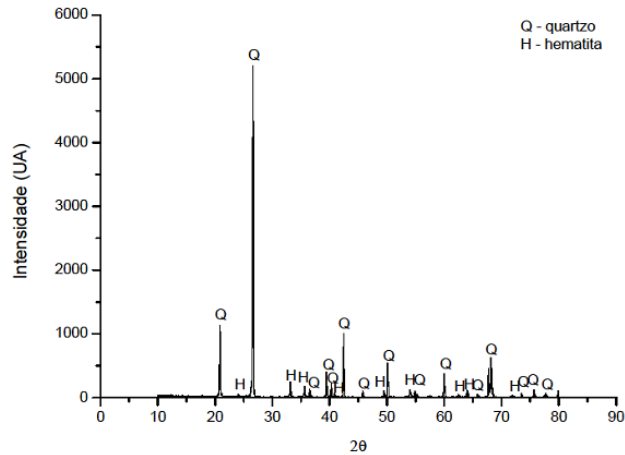


Figura 4: Difratograma do Rejeito de Minério de Ferro



Figura 5: Abatimento do microconcreto

Na segunda etapa de análises foram moldados três corpos de prova para o ensaio de massa específica, índice de vazios e absorção [38] para cada traço escolhido na primeira etapa, ambos os ensaios realizados aos 28 dias de idade. Segundo a definição da NBR 9778 [46], a absorção é o processo em que a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo poroso. A absorção (A) é obtida a partir do seguinte cálculo:

$$A = \frac{(m_{sat} - m_s)}{m_s} \times 100 \tag{1}$$

Onde:

- A = absorção (%)
- $m_{sat}$  = massa da amostra saturada (kg)
- $m_s$  = massa da amostra seca (kg)

A relação entre o volume de poros permeáveis do CP analisado e o seu volume total resulta no índice de vazios ( $I_v$ ). Em resumo, é a porcentagem do número de poros do CP, que é obtido a partir do cálculo:

$$I_v = \frac{(m_{sat} - m_s)}{(m_{sat} - m_i)} \times 100 \tag{2}$$

No qual:

- $I_v$  = índice de vazios (%)
- $m_{sat}$  = massa da amostra saturada (kg)
- $m_s$  = massa da amostra seca (kg)
- $m_i$  = massa da amostra imersa (kg)

A massa específica real ( $\rho_r$ ) é a relação entre a massa do CP seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis. O seguinte cálculo resulta na massa específica:



$$\rho_r = \frac{m_s}{(m_s - m_i)} \quad (3)$$

Onde:

$\rho_r$  = massa específica real

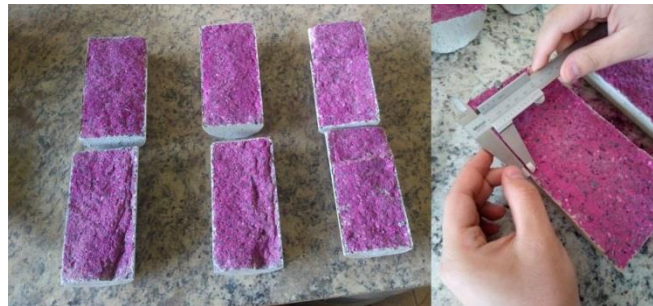
$m_s$  = massa da amostra seca (kg)

$m_i$  = massa da amostra imersa (kg)

Para a avaliação da durabilidade foram realizados ensaios de carbonatação (natural e acelerada) e de resistência ao ataque ácido nos microconcretos escolhidos na primeira etapa. Para o ensaio de carbonatação natural, os corpos de prova foram retirados da água na idade de 28 dias, e permaneceram em ambiente de laboratório até a data de aferição aos 60, 120 e 180 dias. No ensaio de carbonatação acelerada, os corpos de prova foram retirados da água, também na idade de 28 dias, e colocados na estufa ( $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) por 24 h para que perdessem a umidade excedente, a fim de que o início da carbonatação na câmara, não fosse retardado. Os corpos de prova foram dispostos em câmara de carbonatação a 5% de  $\text{CO}_2$  e umidade relativa de 65%. Metade dos corpos de prova ficou por 28 dias e a outra metade permaneceu 56 dias na câmara. No total, foram moldados 24 espécimes para o ensaio de carbonatação natural e 16 para o ensaio de carbonatação acelerada.

Nas datas do ensaio, os corpos de prova foram rompidos ao meio e foi aspergida na superfície uma solução de 1% de fenolftaleína diluída em álcool isopropílico, segundo especificação da RILEM [47]. O hidróxido de cálcio (CH) adquire uma tonalidade avermelhada (componente básico,  $\text{pH} > 8,0$ ), enquanto a parte que sofreu carbonatação (componente ácido,  $\text{pH} < 8,0$ ) permanece incolor.

De um modo geral, a fenolftaleína é o indicador de pH mais utilizado no meio científico devido à facilidade de uso, rapidez na realização do ensaio, custo baixo e precisão relativamente boa. Deve-se lembrar que a cor avermelhada pode indicar a presença de CH, mas não a ausência total de carbonatação. A frente de carbonatação não pode ser considerada rígida, mas gradual [48]. A frente de carbonatação foi medida com o auxílio de um paquímetro, em seis pontos em cada metade do corpo de prova rompido (Figura 6).



**Figura 6:** Medição da frente de carbonatação

A análise de durabilidade por meio do ataque ácido é um ensaio qualitativo que ainda não possui norma reguladora no Brasil, mas que se trata de uma simulação de um dos mecanismos de degradação mais conhecidos [21, 33]. O ensaio proposto consiste em deixar os corpos de prova em uma solução de ácido sulfúrico por alguns dias após a cura úmida,. Para a realização do ensaio, os corpos de prova foram curados por 56 dias, quando foram colocados em estufa por 24 h ( $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) para perder a umidade. Após serem retirados da estufa, esfriaram por 2 horas antes de serem colocados em uma solução de ácido sulfúrico com concentração de 5%, e permaneceram por sete dias (Figura 7).



**Figura 7:** Abrasão do corpo de prova com escova de aço após 7 dias

Após este período, os corpos de prova foram lavados e escovados, o que simula um desgaste por abrasão [49-51]. Depois retornaram para a estufa e permaneceram por mais 24 h. Após esse período, a massa dos corpos de prova foi novamente aferida e feita a correlação da perda de massa que ocorreu nos corpos de prova.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos microconcretos estão apresentados na Tabela 4. Os valores mostraram que a substituição do agregado miúdo por RMF não alterou significativamente os valores da resistência à compressão, em ambas as idades analisadas. Os valores do coeficiente de variação (CV) ficaram abaixo de 6,00, com exceção do TR-75 aos 28 dias, o que é um valor considerado “razoável” para o ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos [45].

**Tabela 4:** Resistência a compressão dos microconcretos

Idade	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				
	TR-0	TR-25	TR-50	TR-75	TR-100
7 dias	22,04	22,91	21,81	23,26	21,23
Desvio padrão	0,65	0,85	0,75	0,47	0,47
CV (%)	2,96	3,70	3,43	2,00	2,22
28 dias	32,32	31,58	29,08	30,30	30,36
Desvio padrão	1,89	1,77	1,72	1,93	1,32
CV (%)	5,83	5,60	5,92	6,38	4,36

Como os valores das médias se apresentaram bem próximos entre si, variando em torno de 30 MPa, foi realizada uma análise estatística do tipo “Teste t de student para duas amostras independentes” entre os valores individuais e as médias do TR-0 e do TR-100, na idade de 28 dias. As análises foram realizadas utilizando o software Excel e com nível de significância de 5%. O objetivo da análise foi de não rejeitar a hipótese de igualdade entre os valores de resistência à compressão desses dois traços [52]. Como resultado, o valor P ficou em 0,065, o valor de T-teste em 2,53 e o T-crítico no valor de 2,77. Portanto, a hipótese de igualdade não pode ser rejeitada.

A substituição total de areia pelo RMF não alterou de forma significativa a resistência à compressão dos microconcretos produzidos. SHETTIMA *et al.* [27] também encontraram valores próximos para os concretos com 0% e com 100% de RMF em substituição à areia. Outros autores atribuíram valores menores de substituição da areia pelo RMF. ZHANG *et al.* [53] reportaram que o *slump* dos concretos com 60% de RMF são iguais aos do concreto produzido com areia natural. TIAN *et al.* [26] atestaram que o desempenho de concretos com 35% de RMF são equivalentes ao concreto produzido com areia convencional.

Cabe destacar que não foram utilizados aditivos superplastificantes e que os valores de resistência à compressão dos microconcretos com RMF ficaram acima dos 25 MPa, aos 28 dias. Assim, o TR-100 foi escolhido por utilizar a maior quantidade de rejeito e ainda contribuir com ganhos ambientais e econômicos. Outros autores determinaram valores ótimos de substituição da areia pelo RMF, visando o máximo de resistência à compressão [14, 15, 27-30], o que não é o objetivo deste estudo. Desta forma, os ensaios realizados na segunda parte das análises foram realizados com os microconcretos TR-0 e TR-100.



Os resultados do ensaio de absorção e índice de vazios são apresentados na Tabela 5. Pode-se observar que os valores de absorção para o TR-100 é 13% maior que o valor de TR-0, mas ainda abaixo dos 10% indicados por Neville com relação aos concretos estruturais [54].

**Tabela 5:** Absorção, índice de vazios e massa específica dos microconcretos.

PARÂMETROS	TR-0	TR-100
Absorção (%)	6,53	7,53
DP	0,41	0,37
CV (%)	6,27	4,93
Índice de vazios (%)	15,84	19,02
DP	0,80	1,22
CV (%)	5,06	6,43
Massa específica ( $\rho_r$ )	2,88	3,12
DP	0,04	0,10
CV (%)	1,25	3,12

Os coeficientes de variação das amostras TR-0 e TR-100 ficaram compatíveis entre si, para um mesmo ensaio. Os valores de absorção do TR-100 são 15% maiores que o TR-0 e nota-se, também, um aumento de 16% do índice de vazios do TR-100 em relação ao TR-0, o que pode ser identificado como uma correlação entre a absorção de água e quantidade de poros permeáveis. Ainda assim, a massa específica do microconcreto TR-100 apresentou valores 8% maiores que o TR-0, o que indica que, apesar da porosidade um pouco mais elevada, a matriz no microconcreto com RMF é mais densa, pois o rejeito tem a capacidade de preencher os meso e microporos, devido a granulometria reduzida quando comparada à areia (efeito fíler) [15, 27]. YU *et al.* [55] observaram uma melhor distribuição do tamanho dos poros nas argamassas produzidas com 100% de RMF como agregado miúdo.

Os resultados do ensaio de carbonatação natural e acelerado são apresentados na Tabela 6. Nota-se que aos valores da carbonatação dos microconcretos com RMF estão, em ambos os ensaios, maiores que os valores do TR-0, sendo mais proeminentes no ensaio acelerado. Ainda assim, para avaliar se há, de fato, diferença entre as médias, foi realizada uma análise estatística do tipo “Teste t de *student* para duas amostras independentes” para categorizar os conjuntos de valores obtidos em cada grupo [52].

**Tabela 6:** Carbonatação natural e acelerada dos microconcretos.

CARBONATAÇÃO ACELERADA	TR-0	TR-100
28 dias	5,61	6,54
Desvio Padrão	0,90	1,04
CV (%)	16,29	15,88
56 dias	8,97	10,71
Desvio Padrão	1,16	1,73
CV (%)	13,04	16,20
CARBONATAÇÃO NATURAL		
60 dias (outubro)	1,57	1,64
Desvio Padrão	0,22	0,23
CV (%)	13,88	14,18
120 dias (dezembro)	2,59	2,72
Desvio Padrão	0,40	0,42
CV (%)	15,15	15,41
180 dias (fevereiro)	3,49	3,52
Desvio Padrão	0,48	0,54
CV (%)	14,03	15,49

As análises foram realizadas utilizando o software Excel e com nível de significância de 5%. Como resultado, para a carbonatação acelerada aos 56 dias, o valor do T-teste ficou em 5,63, acima do T-crítico,

que ficou em 2,03. Portanto, a hipótese de igualdade deve ser rejeitada. Para a análise dos valores da carbonatação natural, aos 180 dias, o valor do T-teste ficou em 0,54, o T-crítico em 2,04, com o valor p dentro do intervalo de confiança, o que indica que não se deve rejeitar a igualdade entre as médias dos traços TR-0 e TR-100. Dessa forma, não é possível afirmar que o uso do RMF como agregado miúdo acentue a carbonatação nos microconcretos.

BASHEER *et al.* [56] já haviam notado que a profundidade de carbonatação é proporcional ao tamanho do agregado e à porosidade da peça [56]. GARCIA-LODEIRO *et al.* [32] atestaram que, ainda que a porosidade inicial da peça influencie na taxa de carbonatação, esse processo depende fortemente do tipo de cimento e de suas interações com outros fatores. O que se observa é uma tendência de que a carbonatação no TR-100 acompanhe os resultados da porosidade acessível à água (absorção), com efeitos bem mais suavizados devido a maior densidade da matriz [32]. SHETTIMA *et al.* [26] também encontraram valores semelhantes na carbonatação de concretos com 0% e com 100% de RMF em substituição a areia.

O que pode ter contribuído para uma diferença maior nos valores de carbonatação no ensaio acelerado foi a presença constante de umidade ( $U = 65\%$ ), já que o ensaio de carbonatação natural foi realizado entre os meses de agosto e fevereiro. Na cidade de Belo Horizonte/ MG (Zona Bioclimática 3, de acordo com a NBR 15220 [57]), na estação seca (que vai até final de outubro) observam-se valores baixos de umidade do ar ao longo do dia (20-50%), cenário que muda drasticamente quando começam as chuvas (a partir de novembro) e que se estende até o final de março. Como os corpos de prova ficaram em laboratório, protegidos das intempéries, mas em ambiente ventilado e com abertura para o exterior, a carbonatação teve influência da sazonalidade do clima, como acontece em situações reais. A carbonatação em componentes construtivos externos, não deve ocorrer de forma homogênea durante todo o ano e essa situação é mais bem exemplificada pelo ensaio de carbonatação natural.

Os resultados do ensaio de ataque ácido estão apresentados na Tabela 7. Em geral, o TR-100 apresentou menor perda de massa do que o TR-0, apesar de os valores estarem próximos. Visualmente, os corpos de prova permaneceram íntegros após o ensaio (Figura 8).

**Tabela 7:** Perda de massa após o ataque ácido

PERDA DE MASSA (%)	TR-0	TR-100
CP1	3,05	2,40
CP2	3,05	2,38
CP3	3,07	2,37
Média	3,06	2,38
Desvio padrão	0,011	0,014
CV (%)	0,353	0,595



**Figura 8:** Corpos de prova após perda de massa por ataque ácido (TR-0, à esquerda; TR-100, à direita)

O processo de deterioração do cimento pode ocorrer por alterações físicas, como alterações bruscas de temperatura, ou por interação química entre agentes agressivos do ambiente e os constituintes da pasta de cimento [49]. A degradação do concreto ocorre principalmente pela percolação de substâncias líquidas ou dissolvidas na água. Segundo alguns autores, a durabilidade do concreto está intimamente relacionada com a porosidade e permeabilidade [49, 58].

No entanto, neste ensaio, a perda de massa não foi proporcional ao índice de vazios, o que pode ser justificado pelo fato de que o microconcreto produzido com RMF possui estrutura mais densa e estável, fato esse reforçado pelos valores de massa específica, maiores para o TR-100 (Tabela 5). Essa característica da matriz faz com que o concreto seja mais resistente à corrosão/ degradação, com zona de transição mais densa e estável [55]. SHETTIMA *et al.* [27] também encontraram valores de corrosão por ataque ácido abaixo de

3% para os concretos com 100% de RMF como agregado miúdo, aos 7 dias.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, mesmo sem determinar um teor ótimo de substituição, foi possível aferir que a incorporação de 100% de RMF, como agregado miúdo, não afetou os valores de resistência à compressão nos microconcretos, aos 28 dias. Foi realizada uma análise estatística entre os valores individuais e as médias do TR-0 e do TR-100, com nível de significância de 5%, e não foi possível rejeitar a hipótese de igualdade entre os valores analisados.

Os valores referentes ao índice de vazios e a absorção dos microconcretos TR-100 ficaram acima dos encontrados no TR-0, mas o mesmo não foi observado em relação à massa específica, que ficou maior no TR-100; apesar da porosidade um pouco mais elevada no TR-100, há uma tendência da matriz no microconcreto com RMF ser mais densa por conta do refinamento dos poros.

Os valores de carbonatação acelerada foram maiores para o TR-100 que para o TR-0, mas na análise da carbonatação natural a incorporação de 100% de RMF não afetou de forma significativa os valores observados no TR-0 e no TR-100, aos 180 dias. Pela análise estatística entre o TR-0 e o TR-100, com nível de significância de 5%, não foi possível rejeitar a hipótese de igualdade entre os valores analisados.

Em relação ao ensaio de resistência ao ataque ácido, foram observados valores menores de perda de massa no microconcreto TR-100 em relação ao TR-0, o que pode ser atribuído, também, à matriz mais densa por conta do RMF.

Em síntese, afirma-se que é viável a produção de microconcretos com rejeito de minério de ferro como substituto ao agregado miúdo, tendo em vista as seguintes aspectos: sua incorporação não afetou os valores de resistência à compressão aos 28 dias; o índice de vazios e a absorção ficaram acima dos encontrados no traço de referência sem uso de RMF (TR-0); a incorporação de 100% de RMF não afetou de forma significativa os valores para a carbonatação natural e implicou em menores valores de perda de massa em relação ao traço de referência. Portanto, é possível que componentes construtivos sejam produzidos com microconcretos com RMF em substituição ao agregado miúdo e que tenham durabilidade compatível com os exemplares convencionais, ainda que expostos ao ambiente externo sem revestimento e sujeitos ao intemperismo.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro (Processo APQ-00368-17).

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, IBRAM, *Relatório Anual de Atividades*. Julho de 2018-Junho de 2019. <http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2019/07/relatorio-anual-2018-2019.pdf/>, acessado em maio de 2020.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM, *Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas-2018*, Brasília, 2019. [http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb\\_2018.pdf](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2018.pdf) acessado em maio de 2020.
- [3] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MME, *Boletim do setor mineral: Outubro 2019*, Brasília, 2019.
- [4] SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE MINAS GERAIS, SEMAD, <http://www.meioambiente.mg.gov.br/component/content/article/13-informativo/2879-desastre-ambiental-em-mariana-e-recuperacao-da-bacia-do-rio-doce>, acessado em maio de 2020.
- [5] SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE MINAS GERAIS, SEMAD, <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/1/3759-nota-de-esclarecimento-15--barragem-b1>, acessado em maio de 2020.
- [6] MIRANDA, M.A., ARRUDA, E.A.M., BESSA, S.A.L., *et al.*, “Análise da produção de elementos vazados: microconcretos com rejeito de minério de ferro”, In: XXIII Congresso de Escolas e Faculdades Públicas de Arquitetura da América do Sul, pp. 1-15, Belo Horizonte, Oct 2019. <https://proceedings.science/arquisur-2019/papers/analise-da-producao-de-elementos-vazados--microconcretos-com-rejeito-de-minerio-de-ferro-?lang=pt-br> acessado em maio de 2020.
- [7] JUNIA, N.L.D.C., SILVA, R.C.F., BRANDÃO, P. R. G. “Caracterização tecnológica e mineralógica dos itabiritos quartzo-dolomítico e dolomítico da mina de jangada, e uso da separação magnética como método de concentração”. [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_195\\_206](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_195_206) acessado em maio de 2020. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, vol. 41, 2018, p. 195-206.

- [8] Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais, SEMAD, “Mineiros conhecem modelo chinês de economia circular na mineração”. <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/3704-mineiros-conhecem-modelo-chines-de-economia-circular-na-mineracao>, acessado em maio de 2020.
- [9] VIEIRA, E. G.; REZENDE, E. N. Mineração de areia e meio ambiente: é possível harmonizar? Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5433/1980-511X.2015v10n3p181> Acesso em: 20 abr. 2020. *Revista do Direito Público*, Londrina, v.10, n.3, p.181-212, set./dez.2015.
- [10] PAIVA, C. T.; CANÇADO, R. Z. L. “Melhoria da qualidade da água em bacias de decantação localizadas em áreas de extração de areia”. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000300008> acessado em maio 2021. *Mineração REM: R. Esc. Minas*, Ouro Preto, 61(3): 309-315, jul. set. 2008.
- [11] SANTOS, R. F. C.; CASTRO, A. L.; GONÇALVES, K. M. “Produção de concreto autoadensável incorporado com resíduo da indústria de cerâmica vermelha”. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0500> acessado em maio 2021. *Revista Matéria*, v.23, n.3, 2018.
- [12] ALMEIDA, D.H.; GRILLO, R.H.F.; MAESTRELLI, S.C., et al. “Properties of concrete manufactured with use of ceramic sanitary ware waste as aggregate”. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0665> acessado em maio 2021. *Revista Matéria*, v.24, n.2, 2019.
- [13] PASSOS, L.; MORENO JUNIOR, A. L.; GOMES, C. E. M. “Durabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo proveniente de resíduo de cerâmica vermelha”. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1076> acessado em maio 2021. *Revista Matéria*, v.25, n.2, 2020.
- [14] FONTES, W. C.; FONTES, G. G.; COSTA, E. C. P.; *et al.*, “Rejeito de barragem de minério de ferro na produção de ladrilhos hidráulicos: uma análise de valor para sustentabilidade de edificações”. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400312> acessado em maio 2021. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 395-412, out./dez. 2018.
- [15] MEDEIROS, A.B.Z.; INGUNZA, M.P.D.; GALINDO, A.C., *et al.*, “Avaliação de resíduos de mineração de rochas cristalinas para uso como agregado em concreto segundo sua petrografia, índices físicos e resistência mecânica”. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1195> acessado em maio 2021. *Revista Matéria*, v.25, n.4, 2020.
- [16] AMARAL, I.B.C.; PRAT, B.V.; REIS, A.B. “Effect of iron mining tailings as a red ceramic additive for decreased sintering temperature”. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1157> acessado em maio 2021. *Revista Matéria*, v.25, n.4, 2020.
- [17] ZHAO, Y., ZHANG, Y., CHEN, T., *et al.*, “Preparation of high strength autoclaved bricks from hematite tailings”, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.078> acessado em maio de 2020. *Construction and Building Materials*. v. 28, pp. 450-455, Mar. 2012.
- [18] WEISHI, L., GUOYUAN, L., YA, Z., *et al.*, “The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings”, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.309> acessado em maio de 2020. *Journal of Cleaner Production*. v. 204, pp. 685-692, Dec. 2018.
- [19] FREITAS, S.M.A.C., SOUSA, L.N., DINIZ, P., *et al.*, “Steel slag and iron ore tailings to produce solid brick”, <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1513-7> acessado em maio de 2020. *Clean Technologies and Environmental Policy*. v. 20, n. 5 pp. 1087-1095, Jul. 2018.
- [20] FONTES, W.C., MENDES, J.C., SILVA, S.N., *et al.*, “Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams”, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027> acessado em maio de 2020. *Construction and Building Materials*. v. 112, pp. 988-995, Jun. 2016.
- [21] BARROS, S.V.A.; NEVES, G.A.; MENEZES, R.R., *et al.* “Mechanical behavior and durability of mortars with quartzite and Portland cement after sulfate attack”. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190004.0855> acessado em maio de 2021. *Revista Matéria*, v.24, n.4, 2019.
- [22] MENDES, J.C., BARRETO, R.R., CASTRO, A.S.S., *et al.*, “Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based mortars”, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117597> acessado em maio de 2020. *Construction and Building Materials*. v. 237, 117597, Mar. 2020.
- [23] LIU, K., WANG, Z., JIN, C., *et al.*, “An experimental study on thermal conductivity of iron ore sand cement mortar”, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.108> acessado em maio de 2020. *Construction and Building Materials*. v. 101, pp. 932-941, Dec. 2015.
- [24] CHINNAPPA, G.B., KARRA, R.C., “Experimental and statistical evaluations of strength properties of concrete with iron ore tailings as fine aggregate”, <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29HZ.2153-5515.0000480> acessado em maio de 2020. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. v. 24, n. 1, 04019038, Jan. 2020.
- [25] LI, T., WANG, S., XU, F., *et al.*, “Study of the basic mechanical properties and degradation mechanism of recycled concrete with tailings before and after carbonation”, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120923> acessado em maio de 2020. *Journal of Cleaner Production*. v. 259, 120923, Jun. 2020.
- [26] TIAN, Z., ZHAO, Z., DAI, C., *et al.*, “Experimental Study on the Properties of Concrete Mixed with Iron Ore Tailings”, <https://doi.org/10.1155/2016/8606505> acessado em maio de 2020. *Advances in Materials Science and Engineering*. v. 2016, 8606505, May. 2016.

- [27] SHETTIMA, A.U., HUSSIN, M.W., AHMAD, Y., *et al.*, “Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete”, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095> acessado em maio de 2020. *Construction and Building Materials*. v. 120, pp. 72-79, Sep. 2016.
- [28] KURANCHIE, F.A., SHUKLA, S.K., HABIBI, D., *et al.*, “Utilization of iron ore tailings as aggregates in concrete”, <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1083137> acessado em maio de 2020. *Cogent Engineering*. v. 2, n. 1, 1083137, Sep. 2015.
- [29] ZHU, Z., LI, B., ZHOU, M., “The influences of iron ore tailings as fine aggregate on the strength of ultra-high-performance concrete”, <https://doi.org/10.1155/2015/412878> acessado em maio de 2020. *Advances in Materials Science and Engineering*. v. 2015, 412878, Oct. 2015.
- [30] ZHAO, S., FAN, J., SUN, W., “Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete”, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019> acessado em maio de 2020. *Construction and Building Materials*. v. 50, pp. 540-548, Jan. 2014.
- [31] 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”, <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212011000200014> acessado em maio de 2020. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 201-212, Abr./jun. 2011.
- [32] GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, J.G.; PALOMO, A.; *et al.*, “A statistical approach to the study of concrete carbonation”, <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00413> acessado em maio de 2020. *Materiales de Construcción*. v. 64, n. 313, Jan-mar, 2014.
- [33] GAY, H., MEYNET, T., COLOMBANI, J. “Local study of the corrosion kinetics of hardened Portland cement under acid attack.”, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.09.007> acessado em maio de 2020. *Cement and Concrete Research*, n. 90, p. 36-42, 2016.
- [34] MIRANDA, M. A., CAMACHO, D., SACTH, H. M., *et al.* “Breve histórico do uso e os aspectos técnicos dos elementos vazados na arquitetura brasileira nos últimos 20 anos”, In: 3º Congresso Internacional de História da Construção Luso-brasileira, pp. 708-721, Salvador, Sep. 2019.
- [35] CAMACHO, D.O.J., SACTH, H.M., VETTORAZZI, E., “De los elementos perforados al cobogó: histórico de uso en la arquitectura brasilera y consideraciones sobre su adaptación al clima”, <https://doi.org/10.20396/parc.v8i3.8650237> acessado em maio de 2020. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*. v. 8, n. 3, pp. 205-216, Sep. 2017.
- [36] ABNT (2017), *NBR 15270-1*: Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [37] AMN (2000), *NM 23*: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, AMN - Associação Mercosul de Normalização.
- [38] AMN (2002), *NM 52*: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, AMN - Associação Mercosul de Normalização.
- [39] ABNT (2009), *NBR 7211*: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [40] AMN (2009), *NM 53*: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, AMN - Associação Mercosul de Normalização.
- [41] ABNT (2003), *NBR NM 248*: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [42] CARVALHO, J.M.F., MELO, T.V., FONTES, W.C., *et al.* “More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials”, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.054> acessado em maio de 2020. *Construction and Building Materials*. v. 206, pp. 397-409, May. 2019.
- [43] AMN (1998), *NM 67*: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, AMN - Associação Mercosul de Normalização.
- [44] ABNT (2015), *NBR 12655*: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [45] ABNT (2018), *NBR 5739*: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [46] ABNT (2005), *NBR 9778*: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [47] RILEM, “Measurement of hardened concrete carbonation depth”, *Materials and Structures*. v. 17, n. 102, pp. 435-440, Jan. 1984.
- [48] VILLAIN, G., THIERY, M., PLATRET, G. “Measurement methods of carbonation profiles in concrete: thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry.” <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.015> acessado em maio de 2020. *Cement and Concrete Research*, v. 37, p. 1182-1192, 2007.



- [49] MAGALHÃES, L.F., MORAIS, I.S., ESTEVES JUNIOR, M. A., et al., “Resistência ao ataque ácido de cimento Portland com adição de rejeito de minério de ferro”, In: 59º Congresso Brasileiro de Concreto, Bento Gonçalves, Oct. 2017.
- [50] GUTBERLET, T., HILBIG, H., BEDDOE, R. E. “Acid attack on hydrated cement — Effect of mineral acids on the degradation process.” <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.011> acessado em maio de 2020. *Cement and Concrete Research*. v. 74, p. 35–43, Abr. 2015.
- [51] YELLISHETTY, M., KARPE, V., REDDY, E.H., et al. “Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study”, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.07.007> acessado em maio de 2020. *Resources, Conservation and Recycling*. v. 52, n. 11, pp. 1283-1289, Sep. 2008.
- [52] TRIOLA, M. F., *Introdução à estatística*, 12 ed, Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- [53] ZHANG, G.D., ZHANG, X.Z., ZHOU, Z.H., et al., “Preparation and properties of concrete containing iron tailings/manufactured sand as fine aggregate” <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.838-841.152> acessado em maio de 2020. *Advanced Materials Research*. v. 838-841, p. 152–155, Nov. 2013.
- [54] NEVILLE, A.M., *Properties of Concrete*, 5 ed., Londres. Pearson Education Limited, 2011.
- [55] YU, L., ZHANG, J.X., MU, K., “Relationships between compressive strength and microstructure in mortars with iron ore tailings as fine aggregate”, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.188.211> acessado em maio de 2020. *Applied Mechanics and Materials*, v. 188, p. 211–218, 2012.
- [56] BASHEER, L., BASHER, P.A.M., LONG, A.E. “Influence of coarse aggregate on the permeation, durability, and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete”, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.022> acessado em maio de 2020. *Construction and Building Materials*. v. 19, pp. 682-690, Nov. 2005.
- [57] ABNT (2005), *NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [58] YUAN, H., DANGLA, P., CHATELLIER, P., et al. “Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack”. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.002> acessado em maio de 2020. *Cement and Concrete Research*, v. 53, p. 267–277, nov. 2013.

#### ORCID

Mariana Alves Miranda	<a href="https://orcid.org/0000-0001-6474-3602">https://orcid.org/0000-0001-6474-3602</a>
Eduardo Archetti Martins Arruda	<a href="https://orcid.org/0000-0002-5132-836X">https://orcid.org/0000-0002-5132-836X</a>
Augusto César da Silva Bezerra	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1670-2376">https://orcid.org/0000-0003-1670-2376</a>
Helenice Maria Sacht	<a href="https://orcid.org/0000-0002-4674-9629">https://orcid.org/0000-0002-4674-9629</a>
Sofia Araújo Lima Bessa	<a href="https://orcid.org/0000-0003-1883-1251">https://orcid.org/0000-0003-1883-1251</a>