



Concreto de alto desempenho (CAD) com utilização de rejeito magnético de minério fosfático

Gabriela Brenda de Lima Ribeiro ^{1*} 

Alexander Martin Silveira Gimenez ² 

Marcela Maira Nascimento de Souza Soares ² 

Augusto Cesar da Silva Bezerra ³ 

Resumo

A busca por materiais sustentáveis fornece motivação para utilização de rejeito magnético como agregado na produção de concreto, que é o material mais utilizado na construção civil originado da mistura de aglomerante, água e agregados. Este estudo desenvolveu três dosagens de concreto de alto desempenho (CAD), um referência e dois com substituição parcial do agregado miúdo por material com granulometria semelhante – rejeito magnético proveniente do processamento de rocha fosfática em Araxá-MG. Almejou-se melhorar a estrutura de poros do concreto através da otimização do empacotamento de partículas e incorporação de uma adição mineral (sílica ativa), bem como adequar a trabalhabilidade com uso de aditivo químico (superplastificante). As propriedades dos concretos foram avaliadas utilizando os ensaios de resistência mecânica à compressão, absorção de água, massa específica e durabilidade frente ao ataque por ácido sulfúrico. A resistência à compressão aumentou com o aumento da porcentagem da substituição proposta. Todos os concretos apresentaram boa durabilidade e a substituição proposta reduziu a vulnerabilidade do concreto ao ataque ácido. Quanto à massa específica, todos os concretos foram classificados como normal. A metodologia de dosagem aplicada foi eficaz, produzindo CAD com incorporação de rejeito magnético.

Palavras-chave: Concreto de alto desempenho; Rejeito magnético; Agregado miúdo; Empacotamento de partículas.

High-performance concrete (HPC) using phosphate ore magnetic tailings

Abstract

The pursuit of sustainable materials provides motivation for using magnetic tailings as an aggregate in the concrete production, which is the most used material in civil construction and is originated from the mixture of binder, water and aggregates. This study developed three dosages of high-performance concrete (HPC), one reference and two with partial replacement of the fine aggregate by a material with similar granulometry - magnetic tailings derived from the phosphate rock beneficiation process in Araxá-MG. The aim was to improve the pore structure of concrete by optimizing the particle packing of granular materials and incorporating a mineral admixture (silica fume), as well as adjusting the workability using a chemical admixture (superplasticizer). The properties of the concretes were evaluated using the tests: compressive strength, water absorption, specific mass and durability against sulfuric acid attack. The compressive strength increased with the increase in the proposed replacement percentage. All concretes had good durability, and the proposed replacement reduced the vulnerability of the concrete to acid attack. Regarding the specific mass, all concretes were classified as normal. The concrete dosage methodology applied was effective, producing high-performance concrete with the incorporation of magnetic tailings.

Keywords: High-performance concrete; Magnetic tailings; Fine aggregate; Particle packing.

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, PPGEMIN, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Araxá, MG, Brasil.

²Departamento de Minas e Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Araxá, MG, Brasil.

³Departamento de Engenharia de Transporte, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

*Autor correspondente: gdelimaribeiro@gmail.com



1 Introdução

A atividade de extração mineral se relaciona diretamente com o meio ambiente devido ao grande volume de material que é extraído, gerando grande volume de rejeitos. Um desafio das empresas mineradoras é encontrar destinações para materiais que seriam descartados no ambiente [1].

De maneira paralela, a busca por construções com métodos e materiais sustentáveis tem aumentado com a evolução da humanidade, devido à necessidade de mitigar efeitos prejudiciais de resíduos industriais [2]. Dentre os materiais de construção civil, o concreto é o mais utilizado devido à alta disponibilidade de seus componentes, alta resistência mecânica, durabilidade e baixo custo de manutenção. Um elevado volume de concreto tem sido produzido levantando preocupações relacionadas ao alto consumo de materiais [3]. A indústria de construção consome quantidades crescentes de agregado natural, e o uso de areia natural para projetos de construção tem causado uma série de problemas ambientais [4].

A utilização de materiais alternativos como substituição parcial aos componentes do concreto tem se tornado crescente devido ao benefício ambiental gerado pela destinação de materiais residuais com potencial poluidor, além da melhora que podem proporcionar às características do mesmo [1,5-10].

O concreto convencional (CC) algumas vezes não atende aos requisitos exigidos para utilização em determinadas aplicações, sobretudo estruturais. Por este motivo, foram desenvolvidos concretos especiais com características aprimoradas e propriedades superiores, chamados concretos de alta resistência (CAR), concretos de alto desempenho (CAD), e, ainda, concretos de ultra-alto desempenho (CUAD). A inclusão de elementos no concreto, como adições minerais e aditivos químicos, aliada à diferentes técnicas de execução, permitem produzir concretos especiais capazes de atender solicitações de projeto mais exigentes, que possibilitam execuções com segurança e durabilidade [11].

O rejeito magnético de minério fosfático, material utilizado nesse estudo, foi proveniente das atividades mineradoras da Mosaic Fertilizantes do Complexo Minerquímico de Araxá-MG onde se processa rocha fosfática. Esse material possui possível potencial para utilização na produção de concreto, como substituinte parcial do agregado miúdo, por possuir características físicas, à princípio, compatíveis à este componente.

Este trabalho analisou a utilização do rejeito magnético em substituição parcial ao agregado miúdo, em diferentes porcentagens, a fim de obter com essa destinação um concreto resistente e durável. O trabalho se justifica pela necessidade da redução de impactos ambientais gerados pelo depósito

de rejeitos em pilhas e barragens e pelo alto consumo de agregado miúdo natural, além da busca pela produção de um concreto com propriedades superiores aplicando o conceito de alta densidade de empacotamento de partículas na otimização de concretos de alto desempenho.

2 Materiais e métodos

O fluxograma da Figura 1 apresenta o procedimento experimental do trabalho. Inicialmente, foi realizada a seleção dos materiais utilizados, e, logo depois, as caracterizações necessárias. Em seguida, o método de dosagem a ser empregado foi definido. Posteriormente, os corpos de prova (CPs) foram produzidos. Depois, foram feitas as caracterizações mecânicas e físicas (a partir dos ensaios de resistência à compressão, de absorção de água; durabilidade frente ao ataque por ácido sulfúrico). A influência da substituição proposta na massa específica do concreto produzido foi analisada. Por fim, a análise dos resultados foi realizada.

2.1 Materiais

A Tabela 1 apresenta a caracterização dos agregados miúdos (rejeito magnético, areia de rio média e grossa) e do agregado graúdo (brita 0 de origem basáltica) utilizados. A nomenclatura das areias refere-se à especificação de compra e não à caracterização.

Observou-se que os agregados apresentaram características dentro dos limites normalizados, exceto pelo material pulverulento do rejeito magnético que foi superior ao limite que a norma NBR 16973 [12] estabelece ($\leq 3\%$). Uma forma de reduzir a quantidade de pó e substâncias deletérias presentes na superfície dos agregados, fortalecendo a aderência na ligação agregado-pasta, seria através da lavagem que pode ocasionar ganhos na resistência à compressão de até 8% [13].

A Tabela 2 apresenta a composição química do rejeito magnético, obtida por espectrometria de fluorescência de raios X.

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) com massa específica de 3,08 g/cm³, corroborando com os parâmetros encontrados na literatura [14]. A adição mineral utilizada nos concretos foi a sílica ativa com massa específica de 2,07 g/cm³, um valor coerente pois se aproxima do valor indicado na ficha técnica do produto (2,22 g/cm³). O aditivo químico foi um superplastificante à base de éter policarboxílico e a água foi proveniente do sistema de abastecimento local.

Tabela 1. Caracterização dos agregados

Parâmetro	Rejeito magnético	Areia média	Areia grossa	Brita 0
Dimensão máxima característica	2,36 mm	4,75 mm	2,36 mm	9,50 mm
Módulo de finura	2, 06	2, 13	2, 42	5,74
Massa específica	4, 63 g/cm ³	2,32 g/cm ³	2,47 g/cm ³	2,79 g/cm ³
Massa unitária	2,51 g/cm ³	1,42 g/cm ³	1,38 g/cm ³	1,52 g/cm ³
Material pulverulento	4,29%	2,10%	0,67%	0,82%

Tabela 2. Análise química da amostra de rejeito magnético e replicata (REP) em porcentagem

Óxidos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	MnO
1	1,63	0,36	84,8	2,25	1,65	5,78	1,88	0,18	0,05	0,6
REP	1,67	0,37	85,7	2,29	1,67	5,88	1,9	0,2	0,05	

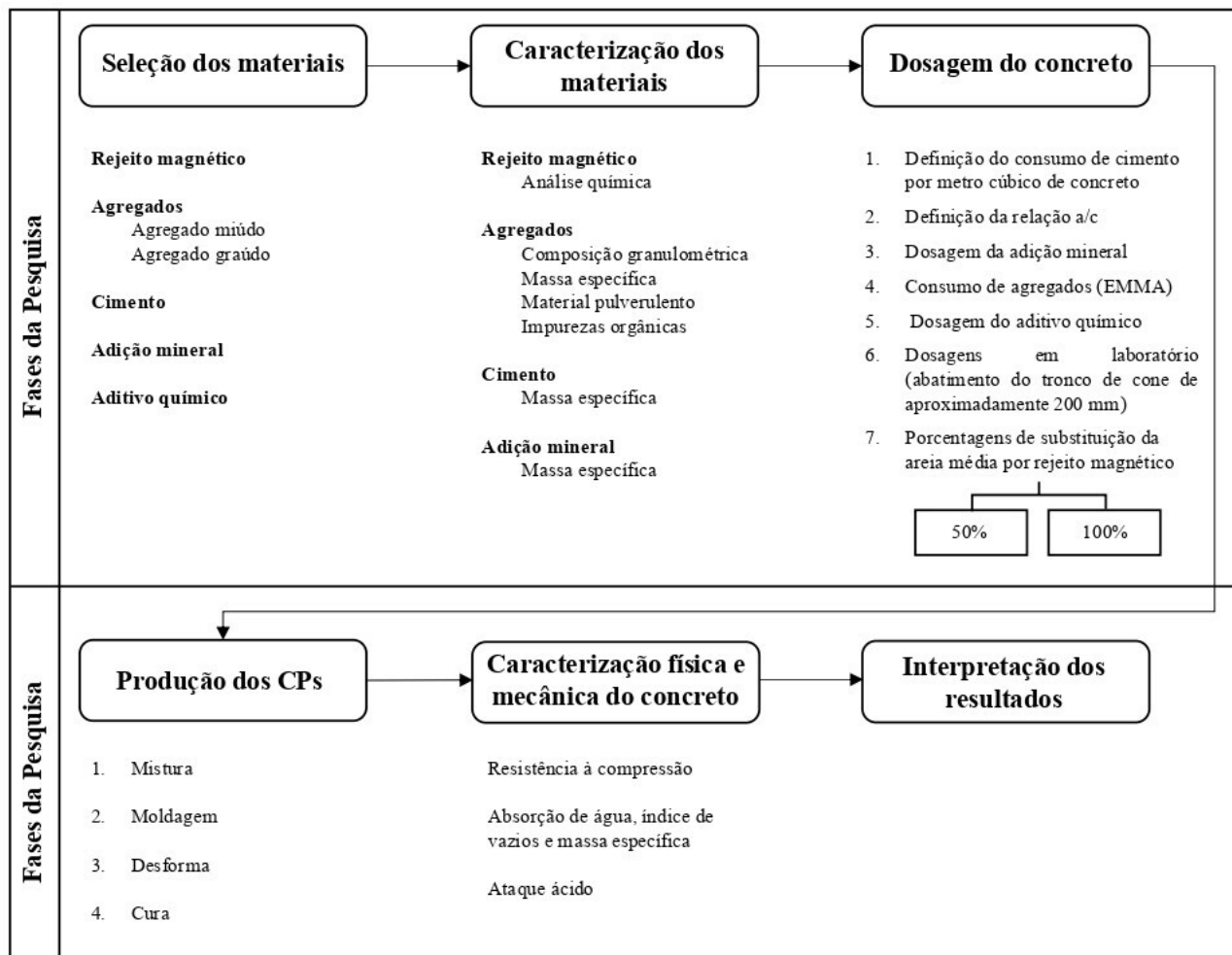


Figura 1. Fluxograma explicativo da metodologia empregada na pesquisa.

2.2 Método de dosagem

Para avaliar os concretos contendo rejeito magnético, um concreto sem rejeito magnético (referência) e concretos contendo 50 e 100% de rejeito magnético em substituição, em volume, à areia média foram produzidos.

A dosagem de materiais do concreto referência foi realizada seguindo os seguintes passos:

1. Definição do consumo de cimento por metro cúbico de concreto;
2. Definição da relação água/cimento;
3. Definição da quantidade de sílica ativa;

4. Cálculo do consumo de agregados com o auxílio do software Elkem Materials Mixture Analyzer (EMMA), para otimização do empacotamento de agregados da mistura;
5. Definição do teor de aditivo superplastificante;
6. Dosagens em laboratório para ajustes na mistura experimental com objetivo de atingir para o concreto referência abatimento do tronco de cone igual ou superior a 200 mm. Segundo Baccin [15], o CAD é frequentemente utilizado em elementos estruturais com alta taxa de armadura, implicando a necessidade de obter concretos com abatimento próximo ao adotado (200 mm ou mais).

O consumo de cimento por metro cúbico de concreto, foi definido inicialmente como 700 kg/m³ de concreto, visando alcançar alta resistência à compressão [14]. A relação a/c foi de 0,30, para garantir o valor mínimo necessário de água para que ocorra a hidratação do cimento [16]. A sílica ativa foi adicionada na dosagem em 10% em relação à massa de cimento, conforme sugerido por Aïtcin [17], que definiu como máximo esse valor em função da otimização da eficiência desta adição.

Para a determinação da proporção ótima dos demais materiais particulados do concreto referência foi utilizado o software EMMA, empregando o modelo de Andreasen e adotando o valor- q inicial de 0,29, conforme indicação de Oliveira et al. [18], sendo ajustado para 0,30 para melhor ajuste das curvas teórica e ideal. Após ajustada a curva de distribuição granulométrica, verificou-se que ela havia fornecido uma mistura com volume total inferior a 1 m³, então foi realizado ajuste proporcional dos componentes de forma a obter dosagem para 1 m³ de concreto. A Figura 2 apresenta a curva de distribuição granulométrica otimizada, linha em azul, com base no conceito de empacotamento de partículas. A linha vermelha representa a distribuição granulométrica ideal sugerida pelo software.

O aditivo superplastificante foi utilizado na dosagem de 1% sobre o peso de cimento, conforme indicação do fabricante e conferência por meio de testes em laboratório dessa dosagem, proporcionando um abatimento igual a 225 mm próximo ao alvo (200 mm).

O rejeito magnético foi utilizado como substituição parcial da areia média, por possuir granulometria similar a este componente, nas porcentagens de 50 e 100%. A composição dos concretos está apresentada na Tabela 3.

A quantidade de cimento, a relação a/c, a quantidade de sílica ativa, de agregado graúdo e o teor de superplastificante se mantiveram iguais nas três dosagens, para efeito de comparação dos resultados.

2.3 Produção dos corpos de prova

Os materiais foram pesados separadamente em uma balança de precisão. Para o processo de mistura do concreto foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado que teve seu interior molhado para evitar a absorção de água da mistura por suas paredes internas. Depois, foram inseridos os constituintes da mistura permanecendo por tempo suficiente para sua completa homogeneização.

Imediatamente após a mistura, o concreto foi removido do misturador e o abatimento do tronco de cone foi realizado para determinação da consistência, conforme orientações da norma NBR 16889 [19].

Para cada dosagem, amostras cilíndricas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (seis para os ensaios de resistência à compressão, três para absorção de água e ataque por ácido sulfúrico) foram moldadas. As amostras foram desmoldadas após 24 horas mantidas em ambiente de laboratório e, então, submetidas ao processo de cura úmida em um tanque com água e saturada com hidróxido de cálcio durante 50 dias.

Após esse período, os corpos de prova foram armazenados em recipientes com serragem para proteção durante o transporte até o laboratório, permanecendo assim até o dia dos ensaios de caracterização.

2.4 Caracterização física e mecânica do concreto

Para avaliação do estado endurecido do concreto, o ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova foi realizado em equipamento universal de ensaios servo controlado, conforme orientações da NBR 5739 [20] para a idade de 63 dias. O índice de absorção de água dos concretos produzidos foi calculado de acordo com a NBR 9778 [21]. O índice de vazios e a massa específica das amostras também foram calculados em conformidade com a NBR 9778 [21]. As massas específicas dos CADs com rejeito magnético nas duas porcentagens de substituição foram calculadas e comparadas com a massa específica do concreto referência.

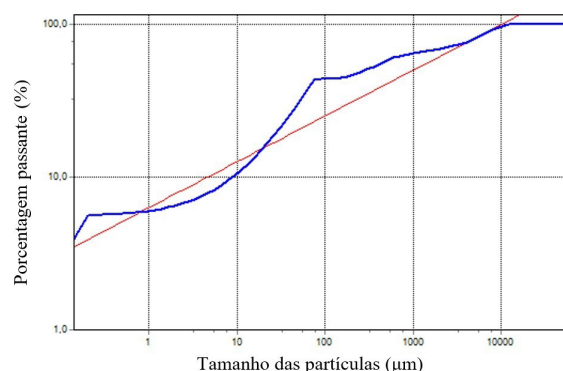


Figura 2. Curva de empacotamento dos materiais granulares do concreto referência, $q = 0,30$.

Tabela 3. Composição dos concretos

Dosagem	Consumo de materiais (kg/m ³ de concreto)						
	Cimento	Sílica ativa	Agregado miúdo			Agregado graúdo	Água
			Areia média	Rejeito magnético	Areia grossa	Brita 0	
Referência	842,8	84,3	314,3	-	180,6	602,0	261,3
50%	842,8	84,3	157,1	277,7	180,6	602,0	261,3
100%	842,8	84,3	-	555,5	180,6	602,0	261,3

Para avaliar a resistência ao ataque ácido, os CPs curados foram secos em estufa, pesados e imersos em solução de 5% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) em relação à água destilada, por 7 dias, simulando de maneira acelerada a deterioração em concretos ocasionada pela exposição a meios agressivos. Após retirados da solução, os CPs foram lavados em água corrente com escova de cerdas poliméricas, secos em estufa e pesados novamente para determinar a perda de massa. Além disso, a degradação superficial foi avaliada por inspeção visual, antes e depois do ataque. Este ensaio foi realizado conforme metodologia do estudo de Magalhães et al. [22].

3 Resultados e discussão

3.1 Abatimento do tronco de cone

Para o concreto referência o abatimento do tronco de cone foi de 225 mm, para o concreto com substituição de 50% da areia média por rejeito magnético foi de 230 mm e para o concreto com substituição total de areia média por rejeito magnético foi de 120 mm. Observou-se que a substituição de 50% da areia média por rejeito magnético pouco alterou a trabalhabilidade do concreto. Já a substituição total de areia média por rejeito magnético diminuiu o abatimento do concreto em 105 mm, produzindo um concreto menos fluido.

A forma dos grãos dos agregados utilizados na mistura é um fator que influencia na consistência do concreto [23]. A redução do abatimento do concreto com 100% de substituição da areia média por rejeito magnético pode ser atribuída à forma mais angular das partículas de rejeito magnético, pois angulosidades elevadas reduzem a trabalhabilidade da mistura, conforme apontado por

Fabro et al. [23] e corroborado pelos resultados obtidos nesta pesquisa. De forma geral, as areias naturais são formadas por atrito, processo que causa a perda de vértices das partículas, resultando em grãos mais arredondados [24] que proporcionam concretos de maior fluidez.

O concreto referência e o concreto com substituição de 50% da areia média por rejeito magnético se enquadram na classe S220 da norma NBR 8953 [25], sendo considerados concretos fluidos e podendo ser utilizados em elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armadura. O concreto com substituição total de areia média por rejeito magnético se enquadra na classe S100, sendo considerado concreto de aplicação normal e podendo ser utilizado em elementos estruturais com lançamento convencional.

3.2 Caracterização física e mecânica do concreto

3.2.1 Absorção de água, índice de vazios, massa específica e resistência à compressão

A Figura 3 apresenta um gráfico com os valores de massa específica, absorção, índice de vazios e resistência à compressão dos resultados para comparação das três diferentes dosagens de concreto.

A absorção de água dos três concretos foi inferior a 10%, sendo considerados de boa qualidade conforme Neville e Brooks [26].

Quanto à massa específica, todos os concretos produzidos foram classificados como concreto normal conforme norma NBR 8953 [25]. O aumento percentual da massa específica com relação ao CAD referência foi de 4,95% para a substituição de 50% de areia média por rejeito magnético e de 12,16% para a substituição de 100% de areia média por rejeito magnético.

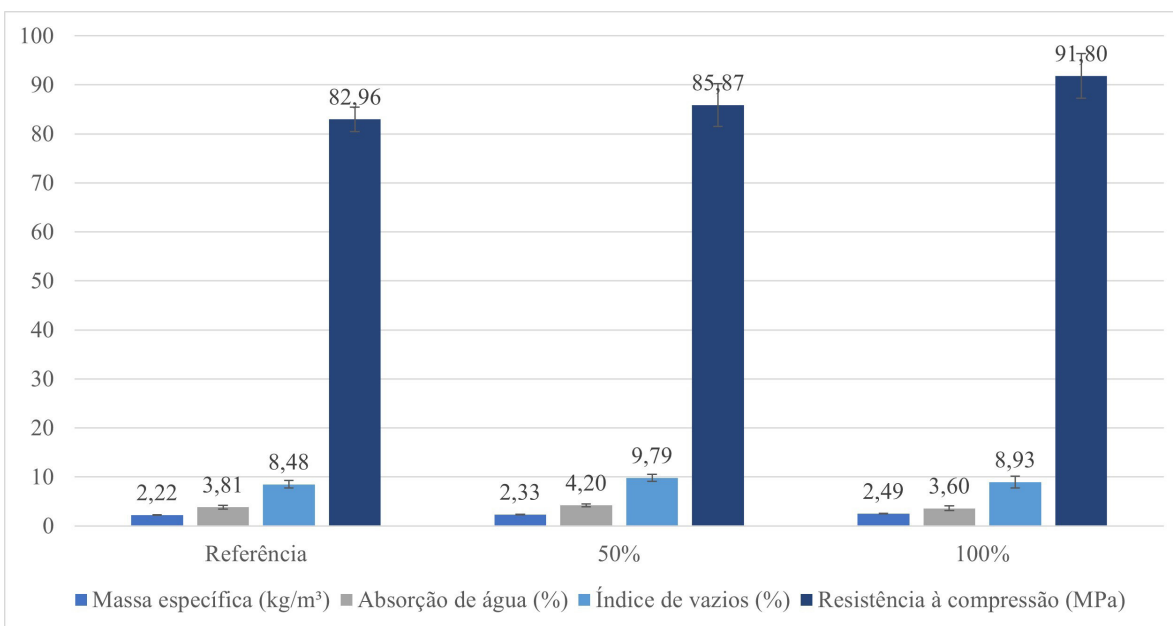


Figura 3. Massa específica, absorção, índice de vazios e resistência à compressão dos concretos produzidos.

Notou-se que as três dosagens atingiram resistência à compressão superior a 60 MPa, sendo, portanto, considerados concretos de alta resistência. A resistência à compressão aumentou com o aumento percentual da substituição de areia média por rejeito magnético, apresentando um ganho de 3,51% com a substituição de 50%, e um ganho de 10,66% com a substituição de 100% em comparação ao concreto referência. O ganho é esperado pela incorporação de magnetita no concreto que resulta em melhorias na resistência do material, devido às suas excelentes propriedades mecânicas com elevada resistência à compressão e maior durabilidade [27].

Resultados de trabalhos que avaliaram a adição de rejeito magnético ao concreto indicaram que sua utilização pode melhorar a resistência à compressão. Silva et al. [10], concluíram que a substituição de areia por magnetita (nas porcentagens de 10, 20 e 30%) aumentou consideravelmente a resistência à compressão do concreto.

Observou-se que apesar de aumentar a resistência à compressão com o aumento da porcentagem de substituição de areia média por rejeito magnético, houve também aumento do índice de vazios, o que pode reduzir a durabilidade desses concretos. Vale ressaltar que a otimização do empacotamento das partículas granulares foi realizada apenas para o concreto referência a fim de comparar as três dosagens. Como a granulometria do rejeito magnético não foi exatamente igual à da areia média, a interação geométrica das partículas nos concretos com substituição pode ter sido responsável pela alteração na densidade da matriz dos concretos com rejeito magnético.

3.2.2 Ataque por ácido sulfúrico

A Tabela 4 mostra os valores da perda de massa dos três concretos produzidos após o ataque por ácido sulfúrico.

Este ácido foi escolhido devido à sua alta acidez, sendo extremamente agressivo aos compostos cimentícios [22].

A resistência ao ataque está relacionada à distribuição do tamanho dos poros [28], além da química do cimento e dos agregados envolvidos. Pelos resultados, é possível observar que a perda de massa foi menor nos concretos produzidos com substituição de areia média por rejeito magnético, em comparação ao concreto referência, sendo o menor valor obtido com a porcentagem de substituição de 50%. Portanto, pode-se concluir que a substituição proposta reduziu a vulnerabilidade do concreto ao ataque ácido. De forma similar, Magalhães et al. [22] constataram que cimentos compostos com rejeito de minério de ferro também foram mais duráveis sob severo ataque ácido; a presença do rejeito inibiu a formação de fases nocivas aumentando durabilidade. Conforme Gutberlet et al. [29], a adição de rejeito de minério de ferro reduz a quantidade de Ca(OH)_2 gerado na reação de hidratação do cimento reduzindo a vulnerabilidade do concreto a ataque ácido.

As Figuras 4, 5 e 6 mostram os concretos antes e depois do ataque ácido, sendo possível observar a degradação superficial ocorrida. Todos os concretos em contato com ácido sulfúrico apresentaram aumento da rugosidade superficial e exposição de agregados.

Tabela 4. Perda de massa dos concretos após o ataque ácido

Dosagem	Perda de massa (%)
Referência	8,25
50%	7,65
100%	7,69

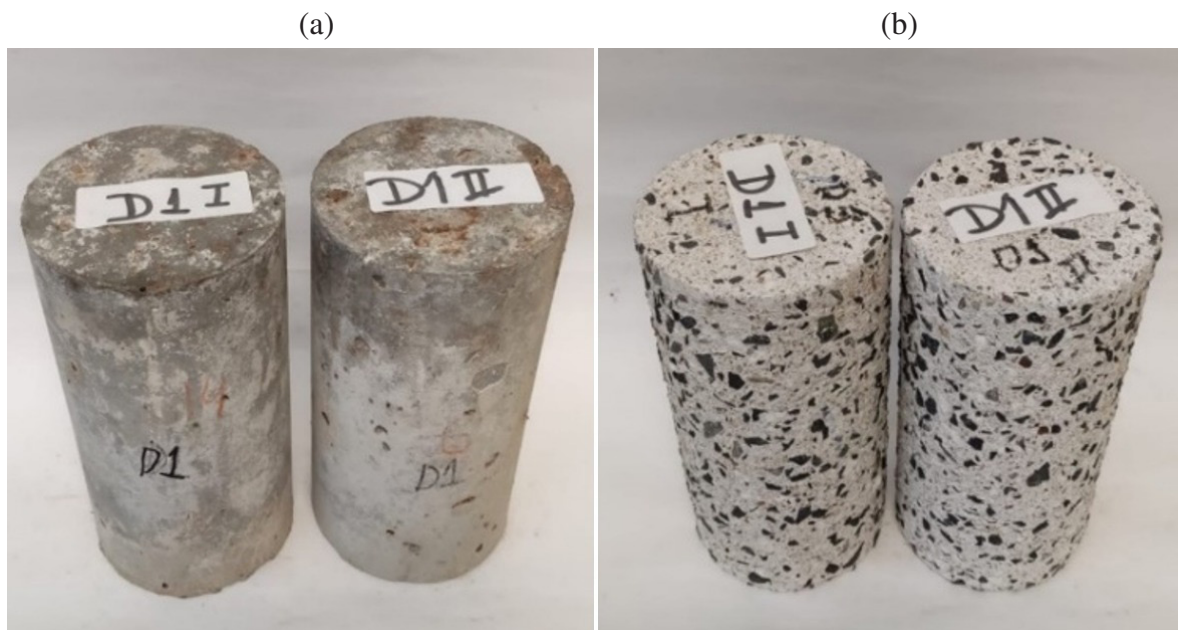


Figura 4. Concreto referência (a) antes e (b) depois do ataque ácido.

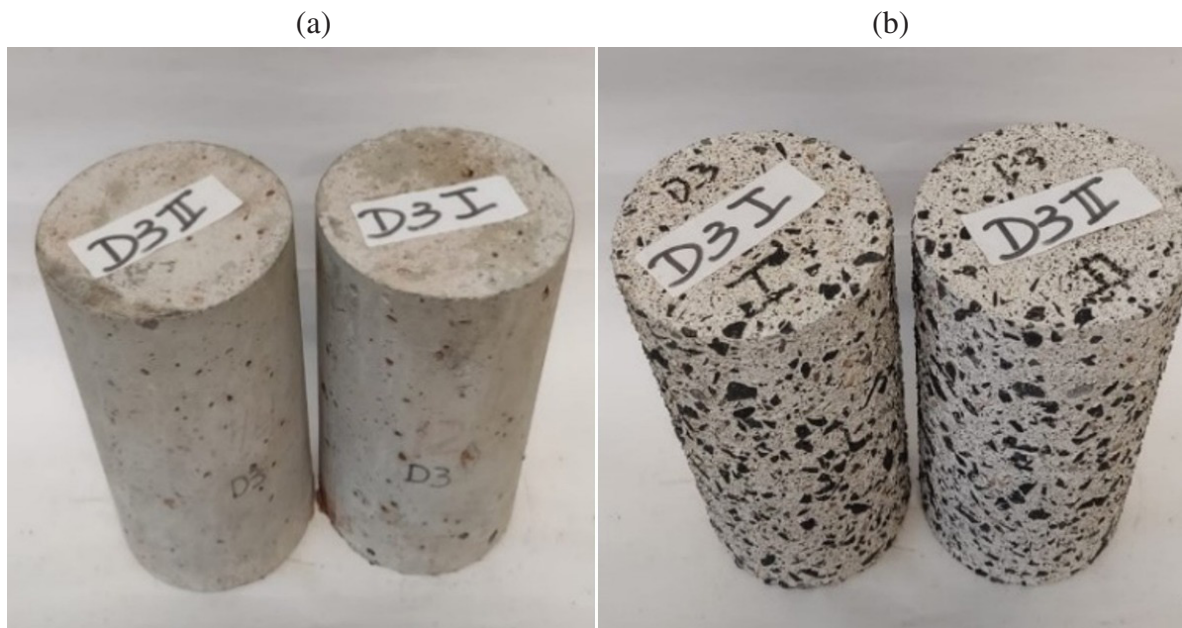


Figura 5. Concreto com substituição de 50% de areia média por rejeito magnético (a) antes e (b) depois do ataque ácido.

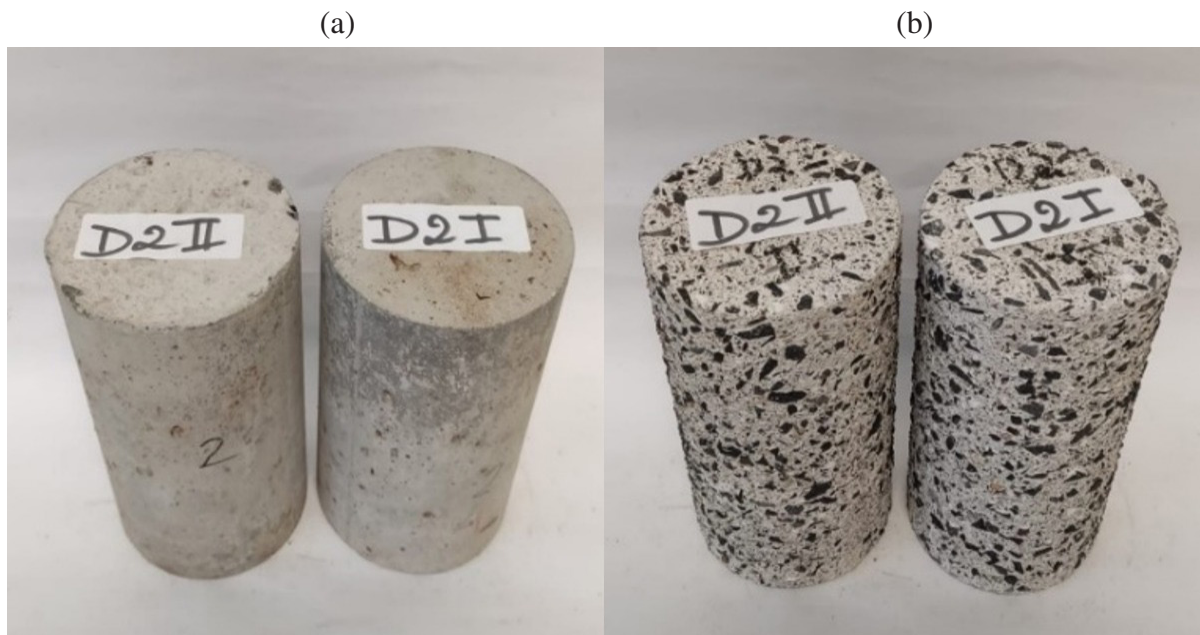


Figura 6. Concreto com substituição de 100% de areia média por rejeito magnético (a) antes e (b) depois do ataque ácido.

4 Conclusão

Com relação à consistência, o concreto com substituição de 50% da areia média por rejeito magnético e o concreto referência foram considerados concretos fluidos (S220). O concreto com substituição total de areia média por rejeito magnético produziu um concreto com consistência menos

fluida no estado fresco sendo considerado concreto de aplicação normal (S100).

Os três concretos produzidos foram considerados concreto de alta resistência, uma vez que a resistência à compressão de todos foi superior a 60 MPa, e a resistência à compressão aumentou com o aumento percentual da substituição de areia média por rejeito magnético.

Os três concretos apresentaram boa durabilidade, pois a absorção de água foi inferior a 10% e a substituição proposta reduziu a vulnerabilidade do concreto ao ataque ácido.

Houve aumento da massa específica dos concretos com o aumento percentual da substituição de areia média por rejeito magnético, porém, todos os concretos produzidos são classificados como concreto normal.

A metodologia de dosagem de concreto aplicada foi eficaz, conforme verificado com a análise dos resultados, uma vez que produziu concretos de alto desempenho com incorporação de rejeito magnético.

Agradecimentos

Os autores agradecem à agência de fomento Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) pela bolsa de estudos de mestrado. Aos Laboratórios de Tratamento de Minérios e de Solos do CEFET-MG – Campus Araxá e ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e Tecnologia dos Materiais Sustentáveis do CEFET-MG – Campus Nova Suíça. À Mosaic Fertilizantes pela doação de amostra de material utilizado na pesquisa.

Referências

- Zhang W, Gu X, Qiu J, Liu J, Zhao Y, Li X. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. *Construction & Building Materials*. 2020;260:119917.
- Liew KM, Sojobi AO, Zhang LW. Green concrete: prospects and challenges. *Construction & Building Materials*. 2017;156:1063-1095.
- Rashad AM. A preliminary study on the effect of fine aggregate replacement with metakaolin on strength and abrasion resistance of concrete. *Construction & Building Materials*. 2013;44:487-495.
- Prabhu GG, Hyun JH, Kim YY. Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production. *Construction & Building Materials*. 2014;70:514-521.
- AlKhatib A, Maslehuddin M, Al-Dulaijan SU. Development of high-performance concrete using industrial waste materials and nano-silica. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):6696-6711.
- Fares G, Albaroud MH, Khan MI. Fine limestone dust from ornamental stone factories: a potential filler in the production of High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. *Construction & Building Materials*. 2020;262:120009.
- Makul N. Cost-benefit analysis of the production of ready-mixed high-performance concrete made with recycled concrete aggregate: a case study in Thailand. *Heliyon*. 2020;6(6):e04135.
- Mustapha FA, Sulaiman A, Mohamed RN, Umara SA. The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021;39:965-969.
- Ostrowski K, Stefaniuk D, Sadowski Ł, Krzywiński K, Gicala M, Róžańska M. Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete. *Construction & Building Materials*. 2020;238:117794.
- Silva AC, Mendes MVA, Silva EMS. Substituição de areia por magnetita na formulação do concreto. *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2016;13(3):265-269.
- Abdullah MH, Abuelgasim R, Rashid ASA, Mohdyunus NZ. Engineering properties of tanjung bin bottom ash. *MATEC Web of Conferences*. 2018;250:0100.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 16973: agregados: determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT; 2021.
- Mendes SES. Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2002.
- Lu D, Zhong J, Yan B, Gong J, He Z, Zhang G, et al. Effects of curing conditions on the mechanical and microstructural properties of ultra-high-performance concrete (UHPC) incorporating iron tailing powder. *Materials*. 2021;14(1):215.
- Baccin AGC. Fundamentos do concreto de alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares [dissertação]. São Carlos: Universidade de São Paulo; 1998.
- Neville AM. Propriedades do concreto. 5ª ed. São Paulo: Pini; 2016.
- Aïtcin PC. Concreto de alto desempenho. São Paulo: Pini; 2000.
- Oliveira CO, Maciel GDF, Castro ALD, Barbosa MP, Campos RS. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. *Matéria*. 2018;23(1):e11962.

- 19 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 16889/2020: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT; 2020.
- 20 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 5739/2018: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT; 2018.
- 21 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 9778/2009: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT; 2009.
- 22 Magalhães LF, França S, Oliveira MS, Peixoto RAF, Bessa SAL, Bezerra ACS. Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements. *Journal of Cleaner Production*. 2020;274:123260.
- 23 Fabro F, Gava GP, Grigoli HB, Meneghetti LC. Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2011;4(2):191-212.
- 24 Metha PK, Monteiro PJM. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 3ª ed. São Paulo: Ibracon; 2008.
- 25 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 8953/2015: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT; 2015.
- 26 Neville AM, Brooks JJ. *Tecnologia do concreto*. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman; 2013.
- 27 Ferrazzo ST, Bragagnolo L, Korf EP. Caracterização tecnológica e reaproveitamento de resíduos de magnetita em misturas asfálticas e em concreto: uma revisão. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*. 2019;(54):69-89.
- 28 Zivica V, Bajza A. Acidic attack of cement based materials: a review. Part 1: principle of acidic attack. *Construction & Building Materials*. 2001;15(8):331-340.
- 29 Gutberlet T, Hilbig H, Beddoe RE. Acid attack on hydrated cement: effect of mineral acids on the degradation process. *Cement and Concrete Research*. 2015;74:35-43.

Recebido em: 10 Jun. 2023

Aceito em: 10 Ago. 2023