ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Durabilidade de concretos produzidos com substituição de areia por rejeito de minério de ferro

Durability of concrete produced by replacing sand with iron ore tailings

Lucas Thadeu da Silva Ramos
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | lucas.ramos@cefetmg.br
André Barroso Mourão
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | andrebmourao@cefetmg.br
Ivan Batista Morais
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | ivan@cefetmg.br
Hélvius de Castro Bicalho Ferreira
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | helviusdecastro@outlook.com
Augusto Cesar da Silva Bezerra
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil |augustobezerra@cefetmg.br
Flávia Spitale Jacques Poggiali
CEFET-MG | Belo Horizonte | Brasil | flaviaspitale@cefetmg.br

Resumo

A substituição de areia por rejeito de minério de ferro (RMF) visa contribuir para a sustentabilidade na construção civil e reduzir o impacto ambiental da mineração. O estudo produziu e ensaiou espécimes de referência e com substituição de 30% e de 50% para as idades de 7 e 28 dias. Foram realizados ensaios de absorção de água (*Abs*), índice de vazios (i_{vazios}), carbonatação acelerada e ataque ácido. Os experimentos mostraram que, para a resistência mecânica, a substituição de 30% implica em ganhos de até 1/3 em comparação à referência, enquanto a substituição de 50% apresentou perdas de até 30% na resistência. A incorporação de RMF apresentou menor ganho de massa para a carbonatação com 30% de substituição, assim como menor (*Abs*) e (i_{vazios}), mas a perda de massa no ataque ácido foi maior nessa faixa de substituição. O estudo sugere que o RMF é uma alternativa viável para a sustentabilidade, dada a capacidade de reduzir a extração de recursos naturais, com potencial para mudanças significativas no consumo de materiais convencionais e na gestão de resíduos de mineração.

Palavras-chave: Concreto. Rejeito de Minério de Ferro (RMF). Durabilidade. Sustentabilidade.

Abstract

Replacing sand with iron ore tailings (IOT) aims to contribute to sustainability in civil construction and reduce the environmental impact of mining. The replacement range between 30% and 50% presents the best results for compressive strength. This study produced and tested reference specimens and specimens with IOT replacement of 30% and 50% for ages 7 and 28

days. Water absorption tests (Abs), void ratio (R-void), accelerated carbonation, and acid attack were carried out. The compressive resistance experiments showed that the 30% replacement rate leads to up to 1/3 in gains when compared to the reference, while the 50% replacement resulted in losses of 30% in resistance. The incorporation of IOT showed a similar pattern for durability properties; there is less mass gain for carbonation with 30% replacement, as well as lower (Abs) and (R-void); however, the mass loss is more significant at 30% for the acid attack test. The study suggests that IOT is a viable alternative for sustainability, given the ability to reduce the extraction of natural resources with the potential for significant changes in the consumption of conventional materials and the management of mining waste.

Keywords: Concrete. Iron Ore Tailings (IOT). Durability Sustainability.

INTRODUÇÃO

A garantia da dignidade da vida humana é um dos direcionadores do que se propõe como os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Dentre os 17 objetivos listados, 3 podem ser diretamente associados às tecnologias relacionadas ao ambiente construído, sendo eles o ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis e ODS 12 – Produção e Consumo Responsáveis [1]. Em contrapartida a essa busca direcionada pelos ODS's, vê-se que o rápido desenvolvimento industrial em áreas tangentes à construção civil reporta a geração de massiva de resíduos anualmente. Dentre esses resíduos vemos os resíduos da própria construção civil, bem como o de outras indústrias como na siderurgia e na produção de minério de ferro.

Bilhões de toneladas de rejeito de minério de ferro (RMF) são geradas globalmente e esse valor tende a crescer [2]. Juntamente da geração de resíduos industrias, a construção civil apresenta crescimento no consumo de matérias primas para a produção de seus produtos [3]. Sendo assim, o reuso de resíduos como RMF e a busca por matérias primas alternativas para a produção na construção civil são relevantes para a sustentabilidade na continuidade das atividades humanas [4], [5].

O uso de RMF's pela construção civil apresenta possibilidades de aplicação em substituição de diversos materiais, como agregados, argilas e cimentos [6]–[8]. Seu uso em substituição à agregados pode representar uma alternativa para a disposição destes mesmos, uma vez que a geração RMF ocorre em um volume substâncial, compatível com a demanda desse tipo de agregado pela construção civil [3]. Observa-se que o uso de RMF como substituição de agregados finos apresenta melhores resultados quando esta substituição se dá entre 30% e 50% seja em concretos comuns, ou de alta performance [9]–[13]. Contudo, grande parte desses estudos focam na avaliação das propriedades mecânicas dos concretos com RMF (CRMF) apenas [2], [3], [9], [14], sendo que a propriedade de maior interesse acaba sendo a resistência à compressão, seguida por outras resistências como à tração ou flexão. Esta predileção é esperada, uma vez que a resistência à compressão é a principal característica dos concretos, contudo ela não deve ser observada de maneira isolada de outras de suas características, pois estas irão influir em maior ou menor grau na obtenção de suas resistências.

Este trabalho visa expandir a avaliação das propriedades mecânicas de CRMF's, investigando também propriedades de durabilidade com a utilização do tipo de cimento e agregados mais comumente empregados nas construções em território nacional. A resistência à compressão (*fcu*), a absorção de água (*Abs*), o índice de vazios (i_{vazios}), a capacidade de carbonatação (*Cap-C*) e a perda de massa por ataque ácido (*Perda-M*) foram investigados. Análises e comparações entre os resultados e fatores geradores foram apresentados visando suportar e explicar os resultados obtidos.

DETALHAMENTO EXPERIMENTAL

MATERIAIS

Cimento Portland e Agregados Naturais

Foi utilizado o cimento Portland CP-II-E-32, composto com silicatos de cálcio, ferro e alumínio, sulfato de cálcio, material carbonático e uma baixa quantidade de escória de alto-forno [15] e sua caracterização encontra-se na **Tabela 1**, sendo essa realizada conforme as NBR 16605 e NBR 11579 [16], [17].

Os agregados utilizados foram obtidos na região de Itabirito-MG, sendo brita gnaisse e areia de rio média lavada, cuja caracterização está na **Tabela 1**, sendo essa realizada conforme as NBR 17054, NBR NM 52, NBR NM 16917 e NBR 6458 [18]–[21].

Tabela 1: Caracterização física dos materiais sólidos

Material	Massa Específica	Finura		Dimensão máxima
		Módulo	Índice	
CP-II-E-32	2,99 g/cm³	-	24%	-
Agregado miúdo	2,71 g/cm³	2,24	-	2,00 mm
Agregado graúdo	2,70 g/cm³	6,84	-	19,10 mm

Fonte: o autor.

Rejeito de Minério de Ferro (RMF)

O RMF utilizado no trabalho foi coletado em abril de 2023, oriundo da etapa de filtragem disposta em barragem de mineração no quadrilátero ferrífero em MG. O procedimento de coleta foi realizado conforme a NBR 9604 [22], donde obteve-se 300 kg de material. A inspeção tátil-visual do mesmo o caracteriza como siltoso, de cor marron. O ensaio de granulometria performado em via úmida por granulômetro a laser do modelo CILAS 1090 apresentou resultado médio, d_{50}, de 45,13 µm para uma testagem de três amostras.

A constituição químicado RMF utilizado neste trabalho, obtida por Espectroscopia de energia dispersiva de raio X, utilizando-se de detecção de óxidos, atmosfera de vácuo, feita via 2 canais (Ti-U e Na-Sc), colimador de 10 mm, 2048 pontos por amostra, amplitude 0 – 40,96 e passo de 0,02. As três amostras utilizadas para este ensaio foram obtidas dos 300kg de material coletado da fonte e preparado conforme NBR 6457 [23]. Como resultado obteve-se um percentual de Fe_2O_3 de 26%, demonstrando que o processo de extração do óxido de ferro aplicado é comparável ao de países como China e Austrália, onde o conteúdo desse óxido no RMF fica em torno de 25% [24]. Sendo que 70% do RMF utilizado é SiO_2, o que favorece sua utilização como substituição do

agregado miúdo, sendo areia natural ou artificial. O RMF ainda apresenta massa específica de 2,87 g/cm³, corroborando resultados da literatua [12].

Aditivos

Os aditivos utilizados na produção dos concretos foram o polifuncional redutor de água e retardador de pega (CLARENA® MR4215) e o hiperplastificante redutor de água (MAXIFLUID® 960H), com intuito de aumentar a trabalhabilidade dos materiais e incrementar sua fluidez, garantindo a moldagem dos corpos de prova. Estes aditivos tem como percentual de uso indicado pelos respectivos fabricantes os valores de 0,6% da massa de ciment para o CLARENA® MR4215 e também 0,6% da massa de cimento para o MAXIFLUID® 960H.

PROPORÇÃO DE MISTURA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para esta pesquisa foram definidos 3 níveis de substituição de agregado miúdo por RMF, sendo 0%, 30% e 50%, visando avaliar a influência do RMF nas proporiedades dos concretos. As razões de mistura dos 3 níveis de substituição estão apresentadas na **Tabela 2**.

Tabela 2: Proporções de mistura (kg/m³)

Traço	CP-II-E-32	Areia	RMF	Brita	Água	Polifuncional	Hiperplastificante
CRMF0	357,44	668,73	-	876,44	152,15	0,36	0,36
CRMF30	357,44	451,00	193,29	876,44	140,24	1,07	0,36
CRMF50	357,44	334,01	334,01	876,44	130,33	1,43	1,07

Fonte: o autor.

Os traços aplicados nesta pesquisa foram determidados pela metodologia ABCP com a curva de Walz para um fck de 25 MPa aos 28 dias, com nível de controle rigoroso, onde o Sd foi de 4,0MPa [25]. Foram produzidos 21 corpos de prova de cada traço mantendo-se um fator água-cimento (a/c) de 0,47.

O procedimento de mistura consistiu na mistura na betoneira do agregado graúdo mais 1/3 da água por 30 segundos, em seguida adicionou-se o CP-II-E-32 mais 1/3 da água por mais 30 segundos, então adicionou-se a fração de agregado miúdo (areia junto do RMF em substituição) mais o último terço da água e misturou-se por 3 minutos. Seguiu-se com um descanso para avaliar a trabalhabilidade, então foram adicionados os aditivos e a mistura foi agitada por mais 2 minutos. Em seguida o material foi moldado em corpos de prova (CP's) cilíndricos de 10 cm X 20 cm.

Quanto ao seu armazenamento, estes corpos de prova foram curados em tanque com água saturada com cal, à temperatura ambiente, por até 180 dias. Os CP's foram removidos em tempos diversos, a depender da necessidade de cada ensaio, e seu tratamento de secagem não contou com sazonamento da umidade. Todos os ensaios foram realizados de forma aleatorizada, vizando dispersar erros passiveis de ocorrência durante a performance dos ensaios.

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

As resistências à compressão dos CP's foram determinadas conforme NBR 5739 [26] e o ensaio foi realizado em uma Máquina de Ensaios de Compressão eletrônico-

hidráulica, modelo EMIC PC 200 ligada à uma Máquina Universal de Ensaios, modelo EMIC DL 30000. O ensaio foi realizado com uma taxa de incremento de 0,5 MPa por segundo e foram ensaiados para cada traço, 15 CP's inalterados divididos nas idades de 7, 28 e 150 dias.

A absorção de água (*Abs*) e a análise do índice de vazios (i_{vazios}) foram realizadas conforme NBR 9778 [27]. Para isto foram utilizados 3 CP's de cada traço, com idade de 28 dias, além de estufa elétrica de capacidade de temperatura de 100±5 °C, balança higroscópica de precisão, modelo BEL 2202H e recipiente para saturação de água e imersão para pesagem higroscópica.

O ensaio de carbonatação acelerada, conforme explanado por Gomes *et al.* [28], foi realizado com 3 CP's de cada traço, com idade de 180 dias, em uma Câmara Climática de Envelhecimento do modelo Bass UUC-RH-STD - CO2-200/2018. O processo de carbonatação foi realizado com os parâmetros de umidade de 65% e CO_2 a 5% por 28 dias à 30°C. Antes do processo de carbonatação os CP's foram secos em estufa à temperatura de 100±5 °C por 72h e pesados em balança de precisão, o mesmo foi feito após o processo de carbonatação acelerada para avaliação do ganho de massa obtido, denominado: capacidade de carbonatação [29]. Posteriormente os CP's foram ensaiados para avaliação da frente de carbonatação com uso de fenolftaleína.

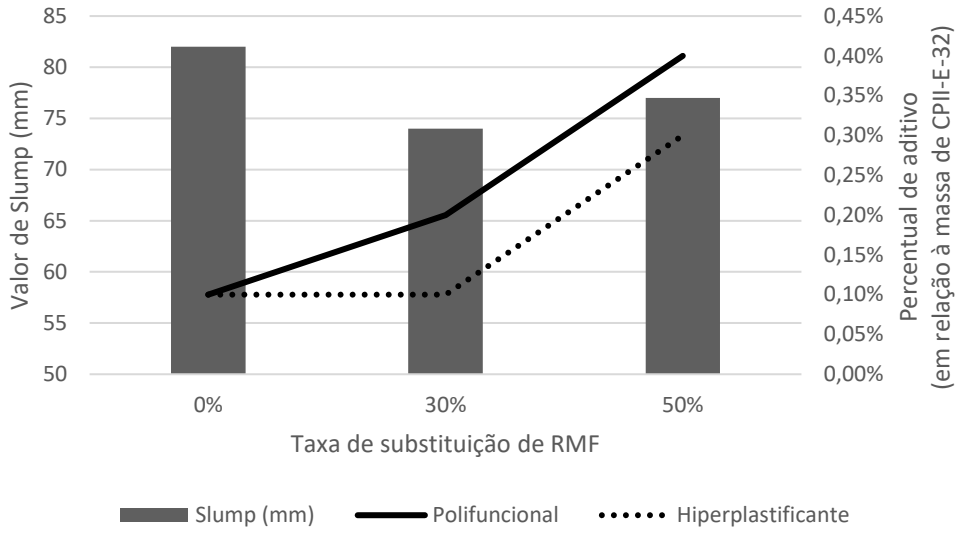
A avaliação de perda de massa foi feita por ataque ácido utilizando-se H_2SO_4. Este ensaio foi realizado tendo como referência os trabalhos de Reis *et al.* [30] e Kangning Liu *et al.* [2]. Foram utilizados 3 CP's de cada traço com idade de 180 dias, todos secados em estufa, à 100±5 °C por 72h e pesados, em seguida foram imersos em uma solução de H_2SO_4 com 5% de concentração por 7 dias, então foram removidos e escovados em água corrente para a retirada de material não-aderido à superfície, secados em estufa à 100±5 °C novamente e por fim pesados para comparação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

TRABALHABILIDADE DOS CRMF'S

A trabalhabilidade dos concretos é normatizada no Brasil pela NBR 16889. Sua avaliação é feita pelo teste de abatimento de tronco de cone (*slump*) e os resultados do mesmo estão apresentados na **Figura 1**. Há uma queda perceptível nos valores de *slump* com o aumento do conteúdo de RMF. A utilização de um fator a/c fixo implicou na necessidade de aplicação de diferentes concentrações nos aditivos utilizados, de forma a garantir baixa variação na trabalhabilidade do material. Entende-se que a queda proporcionada na trabalhabilidade e o aumento na demanda dos aditivos se dá devido ao impacto proporcionado pelo RMF na mistura. Os principais fatores são a grande área superficial, baixo módulo de finura, aspereza da superfície do material, formato da párticula (observado via Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV) e grande absorção de água, quando comparados com a areia comum [12], [31]. Portanto, pode-se concluir que a adição de RMF prejudica a trabalhabilidade do concreto.

Figura 1: Resultados das médias do teste de abatimento do tronco de cone

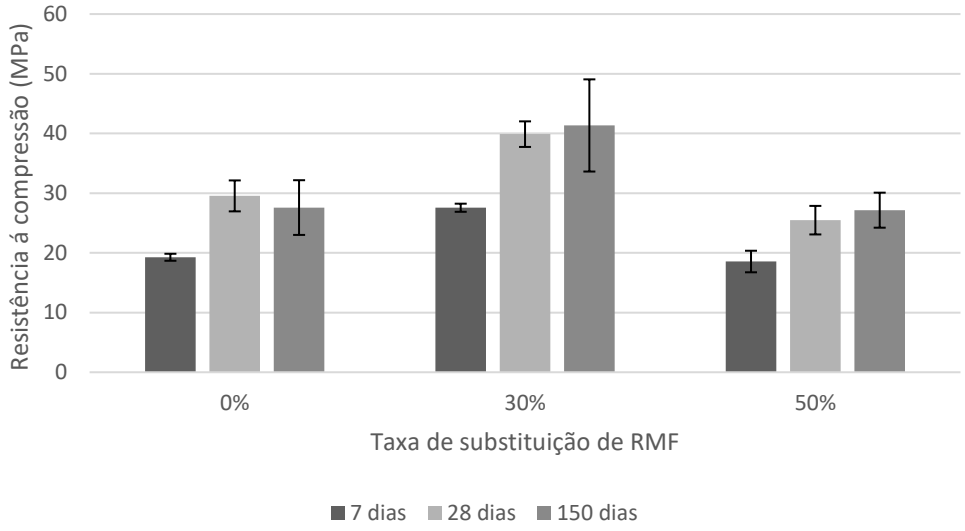


Fonte: o autor.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados das médias de resistência à compressão estão apresentados na **Figura 2**. Identificou-se que a adição de RMF apresentou um ganho médio de resistência na ordem de 43% para a substituição de 30% da areia. Enquanto que para uma substituição de 50% foi observada uma perda média de 6% na resistência dos CP's. Este padrão de ganho de resistência com baixos teores de substituição e perda com altos teores de substituição é observado na literatura e costuma apresentar seu ponto de inflexão para substituições de 40%, conforme [2]. O ganho de resistência pode ser explicado devido à capacidade das finas partículas de RMF preencherem poros na matriz cimentícia em conjunto com a rugosidade de sua superfície, favorecendo a formação de ligações com os produtos de hidratação. Já a perda de resistência, decorrente do excesso de RMF, se dá pelo crescimento da área superficial dos agregados, o que reduz a capacidade dos produtos do cimento ligarem fortemente todos os agregados, e também devido ao empobrecimento da distribuição granulométrica dos agregados, o que favorece o surgimento de defeitos, porosidade e microfissuras.

Figura 2: Resultados das médias do teste de resistência à compressão por idade



Fonte: o autor.

Observou-se também, para os CRMF's, o ganho de resistência com o crescimento da idade do corpo de prova, comum para concretos devido à continuidade da formação dos produtos de hidratação com o passar do tempo.

No entanto, o concreto de referência apresentou redução na média das resistências com o crescimento da idade. Uma análise estatística dos valores das resistências à 7, 28, e 150 dias foi realizada. O teste de ANOVA retornou P-valor 0,1732, o que implica na impossibilidade de rejeitar que as médias dos resultados observados sejam iguais. Em seguida realizou-se o teste de Tukey que demonstrou que os resultados de 150 dias não são significantemente diferentes nem dos resultados de 7 dias, nem dos de 28 dias. Isso pode ser explicado pela elevação no desvio padrão das amostras com maiores idades.

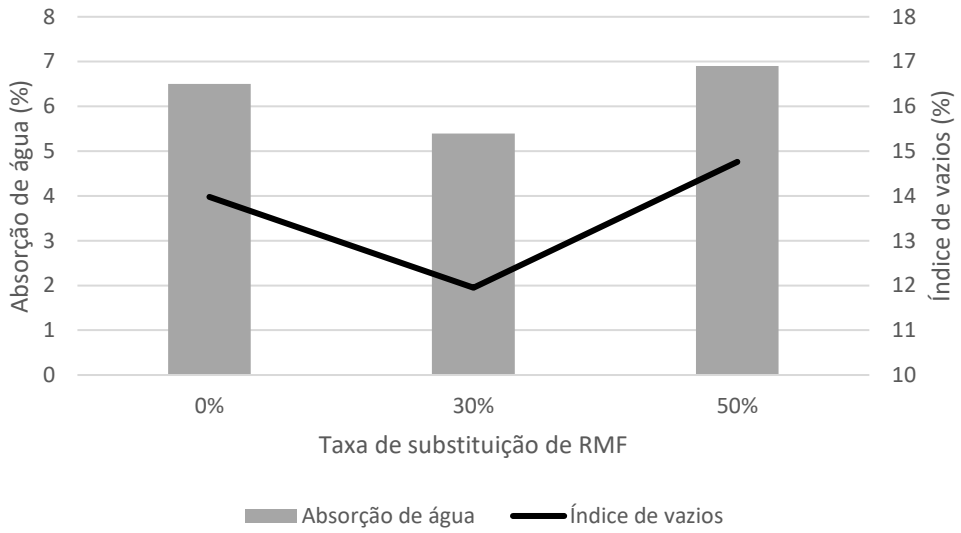
Este crescimento no desvio padrão, bem como a redução observada na média da resistência dos concretos de referência, pode estar relacionada ao processo de retração sofrido pelo concreto, uma vez que buscou-se manter uma trabalhabilidade constante, utilizando-se um par de aditivos. Este processo pode não ter sido notado nos concretos com a adição de RMF, pois a presença deste material implica em uma maior demanda de água pela mistura, o que reduz sua possibilidade de movimentação no concreto [32]. É importante também ressaltar que o cimento utilizado foi um CP-II-E-32, portanto há menor disponibilidade de clínqueres para ganho de resistência em idades mais avançadas com os produtos de hidratação.

ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

A absorção de água (*Abs*) e o índice de vazios (i_{vazios}) apresentaram os resultados demonstrados na **Figura 3**. Este teste demonstrou que o uso de RMF como substituição em teores de 30% implica na redução do i_{vazios}, o que implica na redução da *Abs*. Contudo a situação se inverteu para os resultados de substituição de 50%. Este comportamento pode estar associado, no caso da redução desses parâmetros, à

existência de menos espaços disponíveis para a entrada de água [30]. Isto pode ser devido ao efeito *filler* do RMF, dada a dimensão de suas partículas, capazes de preencher os poros na matriz cimentícia, acarretando assim em um provável melhor empacotamento dos agregados, favorecendo a criação de ligações na matriz, o que implica nos melhores resultados de resistência à compressão vistos na **Figura 2**. Já o excesso de RMF, devido à elevação da área superficial dos agregados, passa a demandar mais água, o que impacta na formação dos hidratos nas fases iniciais, acarretando em mais falhas na matriz cimentícia, que facilitam o ingresso de água no concreto.

Figura 3: Resultados das médias da absorção de água e índice de vazios aos 28 dias

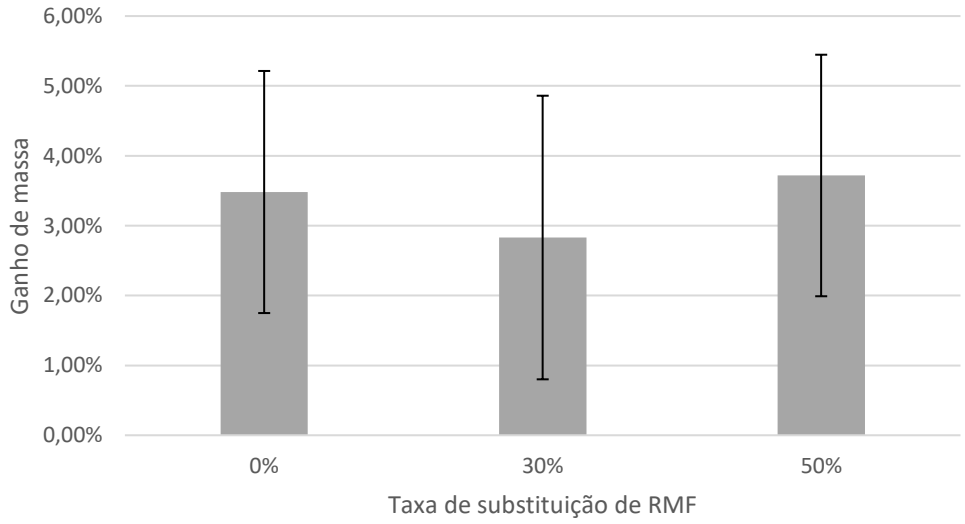


Fonte: o autor.

CARBONATAÇÃO ACELERADA

Os resultados do ensaio de carbonatação acelerada estão apresentados na **Figura 4** e condizem com os valores da literatura [33], [34]. A adição de RMF apresentou uma redução na média total da capacidade de carbonatação à uma taxa de substituição de 30%. Contudo, à uma taxa de substituição de 50% passa-se a ter aumento na capacidade de carbonatação. Essa variação pode ser explicada pelos mesmos mecanismos apresentados para a variação da resistência à compressão, onde uma taxa menor de RMF passa a auxiliar o preenchimento de poros e facilita a formação de ligações dos produtos de hidratação devido ao fato de preencher lacunas da granulometria dos agregados, dificultando o acesso do CO_2 à matriz cimentícia para reagir com $Ca(OH)_2$ ou o silicato de cálcio hidratado (C–S–H) [28]. Já com o excesso do RMF a granulometria da matriz fica fragilizada, há maior necessidade de água devido ao aumento da área superficial, implicando na criação de mais fragilidades, poros e microfissuras, o que facilita o acesso do CO_2 à matriz cimentícia.

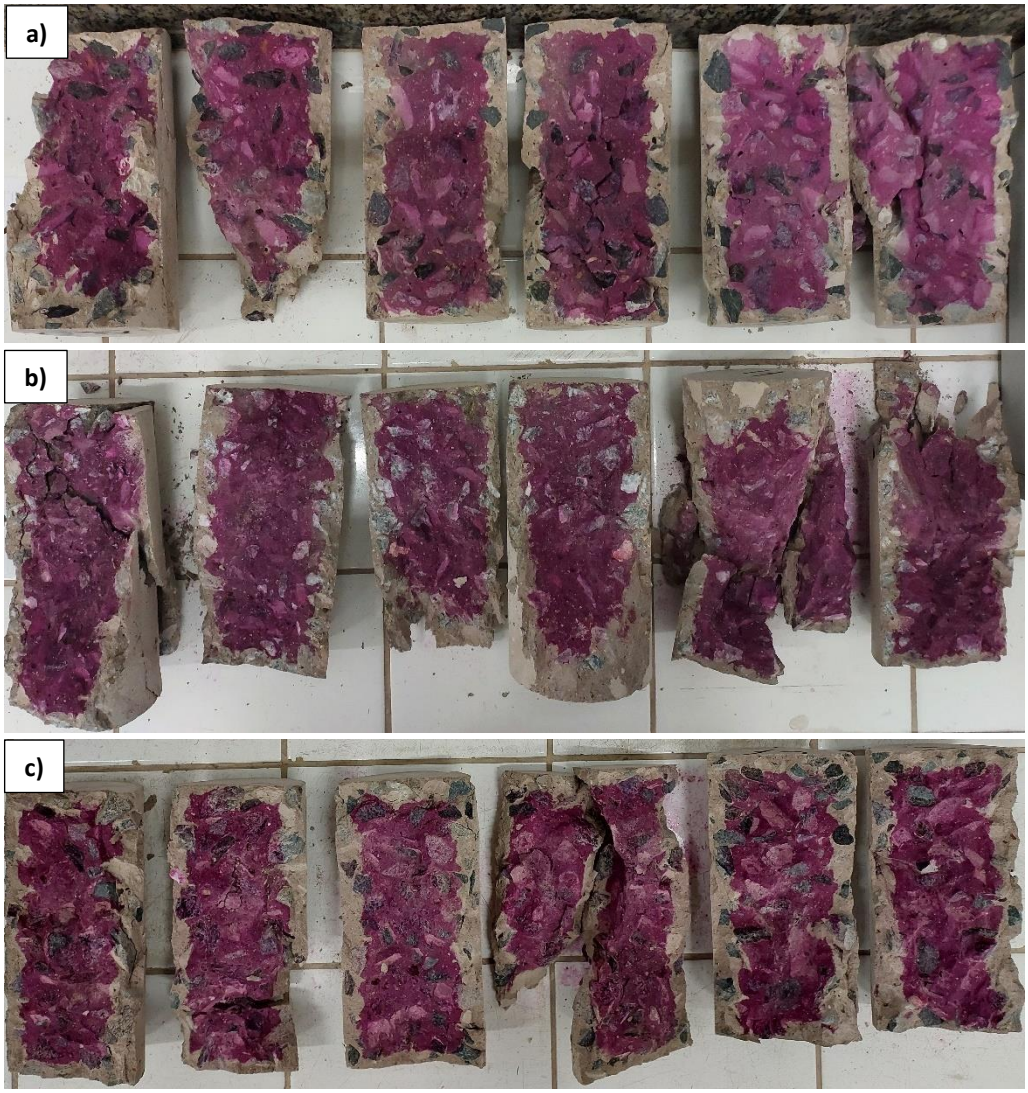
Figura 4: Ganho de massa aos 180 dias



Fonte: o autor.

Por fim os CP's foram testados com solução de fenolftaleína para avalição visual do avanço da frente de carbonatação, conforme apresentado na **Figura 5**. Em corroboração aos resultados da capacidade de carbonatação dos 3 diferentes traços de concreto, observou-se menor frente de carbonatação nos concretos com 30% de RMF, enquanto que o concreto com 50% de substituição apresentou resultados similares aos do traço de referência. O que pode ser explicado pelo mesmo mecanismo responsável pela variação na capacidade de carbonatação, ou seja, a presença do RMF torna o CRMF menos poroso, dificultando assim a permeabilidade e penetração do CO_2.

Figura 5: Teste de avanço da frente de carbonatação por fenolftaleína



a) Substituição de RMF: 0%, b) Substituição de RMF: 30%, c) Substituição de RMF: 50%. Fonte: o autor.

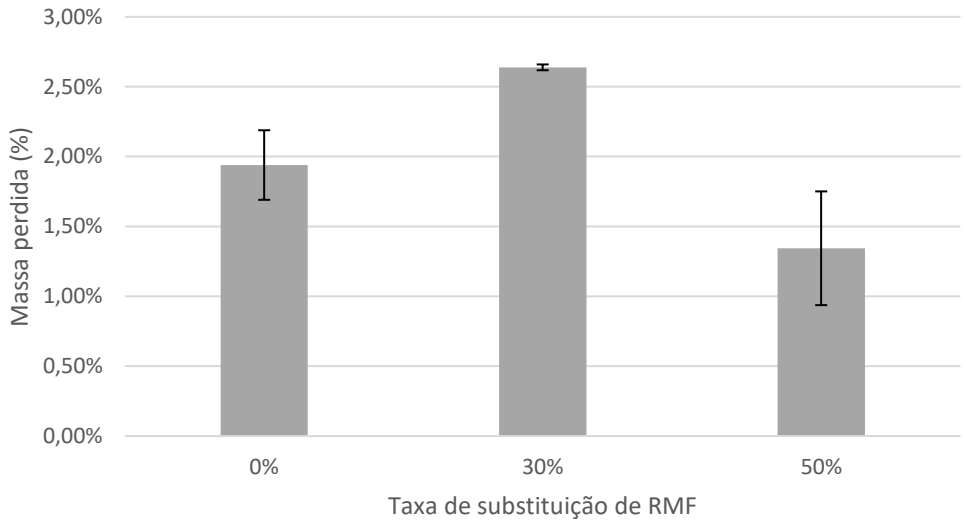
PERDA DE MASSA POR ATAQUE ÁCIDO

Por fim, o ensaio de perda de massa sob ataque ácido foi realizado para a avaliação da durabilidade dos CRMF's e seu resultado encontra-se na **Figura 6**. Os resultados apontam para um aumento na perda de massa de 0,7% da massa total, para a substituição de 30% de RMF, enquanto que a substituição de 50% apresentou redução da perda de massa na mesma ordem, sendo 0,6% da massa total. Esta diferença nas perdas pode ser reflexo da diferença de massa entre as amostras, uma vez que a média de massa das amostras de substituição de 30% antes do ensaio era 2,5% superior à média das amostras de referência, enquanto que a méida de massa das amostras de substituição de 50% era 1,2% inferior à referência.

Este fenômeno de maiores perdas quando há menores substituições de RMF pode ser explicado pelo fato de que a corrosão proporcionada pelo ácido sulfúrico se dá em ambientes de maior alcalinidade. Isso ocorre no concreto devido à presença dos hidratos de cálcio, os mesmos responsáveis pelo maior ganho de resistência destes concretos [35]. Como a substituição de 30% de RMF favorece a formação dos produtos

de hidratação nos CRMF's, este traço também sofre maiores perdas de massa com a ação do ácido sulfúrico. A redução da perda de massa se dará pelo mesmo motivo, uma vez que a presença excessiva de RMF dificulta a disponibilidade de água para a formação dos produtos de hidratação nos concretos de 50% de substituição.

Figura 6: Perda de massa aos 180 dias



Fonte: o autor.

ANÁLISE DOS TRAÇOS

Com base nos resultados observados (**Tabela 3**) para os ensaios performados, visando avaliar propriedades dos concretos com substituição de agregado miúdo por RMF, entende-se que a substituição de 30% demonstra um melhor desempenho quando comparada à outra taxa de substituição e mesmo em relação à referência.

Tabela 3: Síntese dos resultados

Traço	Abatimento (mm)	Res. Comp. 28d (Mpa)	Abs (%)	i_{vazios} (%)	Ganho Massa	Frente Carbon.	Perda Massa
CRMF0	82	29,54	6,50	13,98	3,48%	-	1,94%
CRMF30	74	39,58	5,39	11,95	2,83%	< CRMF0	2,64%
CRMF50	77	25,47	6,90	14,76	3,72%	≅ CRMF0	1,34%

Fonte: o autor.

O uso de uma substituição de 30% valeu-se da uma menor quantidade de aditivos aplicados para melhoria da trabalhabilidade do que o traço de 50%. Essa quantidade para o CRMF50 chega a superar o dobro da usada para o CRMF30 para ambos obterem abatimentos muito próximos ao traço de referência, sendo que o CRMF30 utiliza-se quase que da mesma quantidade necessária ao referência para que este obtivesse uma trabalhabilidade mínima. Portanto o traço do CRMF30 se mostra mais vantajoso nesse aspecto.

Essa vantegm se extende com a observação dos resultados de resistência à compressão, uma vez que a maior resistência foi obtida com o CRMF30, sendo 25,37% superior ao traço de referência e 35,65% superior ao CRMF50. Sendo assim a substituição do RMF limitada à 30% proporciona ganhos consideráveis para a resistência dos concretos.

Quanto à absorção de água e índice de vazios, o traço CRMF30 apresentou valores menores que o CRMF50 e o próprio traço de referência. Isto permite inferir que um uso de 30% de RMF como substituição no traço pode garantir melhoria no desempenho de durabilidade desses concretos. Uma vez que é uma indicação de um concreto mais coeso, menos poroso. O que é corroborado pelo resultado da carbonatação acelerada, onde viu-se um menor ganho de massa para o CRMF30 do que os demais, além de que sua frente de carbonatação foi inferior, inclusive, do que a do traço de referência.

Dentre os fatores observados, o único que se mostrou desvantajoso para uma substituião de 30% de RMF foi a perda de massa quando do ataque ácido.

CONCLUSÕES

A influência do RMF como substituição do agregado miúdo em concretos apresenta diferenças com a variação desse teor para propriedades mecânicas e de durabilidade dos mesmos. Desta análise, algumas conclusões foram obtidas:

(1) As características físicas do RMF indicam sua possibilidade em ser utilizado como substituto de agregados miúdos naturais na produção de CRMF’s. As propriedades mecânicas dos CRMF’s melhoram e depois pioram com o crescimento na adição do RMF, dada a avaliação de 30% e 50%.

(2) As propriedades de durabilidade investigadas demonstram que a taxa de substituição de 30% apresenta maior favorecimento para os CRMF’s, com exceção da perda de massa. Recomenda-se a expansão da avaliação de outros parâmetros de durabilidade dos CRMF’s, tais como a retração, abrasão, teor de cloretos, resistividade elétrica, módulo de elasticidade e inspeção via microscopia eletrônica de varredura.

(3) As características físicas do RMF, como dimensão de partícula, aspecto da superfície, conforme verificado via MEV pela literatura, e massa específica se mostraram como fatores relevantes para os impactos avaliados nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos CRMF’s. Recomenda-se a avaliação de suas características de composição e morfologia para o melhor entendimento desses impactos e para que possam ser feitas comparações com outros CRMF’s com menor grau de incertezas.

(4) Os principais resultados observados pelos ensaios realizados (resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios, carbonatação acelerada e perda de massa por ataque ácido) podem ser explicados pela capacidade do RMF atuar como um agente que favorece o empacotamento de partículas em um nível de substituição, observado aqui como até 30%. Já quando esse limite de substituição é excedido os CRMF's passam a ser mais porosos, implicando nas variações observadas nas propriedades analisadas.

A utilização de 30% de RMF em substituição ao agregado miúdo natural na produção de CRMF's apresentou resultados promissores, demonstrando performance superior em todos os ensaios, com exceção da perda de massa por ataque ácido. Estes resultados indicam a possibilidade de utilização desse tipo de substituição para artefatos de concreto com propriedades estruturais, além de corroborar no incentivo de redução da exploração de recursos naturais para a produção de produtos da construção civil. Os resultados desta pesquisa contribuem para a relevância da utilização de RMF em concretos.

Recomenda-se que seja expandida a avaliação para mais faixas de substituição de RMF na produção de CRMF's, bem como que sejam realizadas pesquisas com a utilização de CP-V, visando reduzir o nível de incerteza proporcionado por possíveis interações de outras adições dos cimentos compostos com o RMF.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio para participação no evento e com infraestrutura de equipamentos [Convênio: PCE-00405-24, APQ-01425-22 e RED-00191-23], e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ 316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] Brasil, “Relatório Nacional Voluntário sobre os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável,” Brasilia, 2017. [Online]. Available: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/15801Brazil_Portuguese.pdf

[2] K. Liu *et al.*, “Effect of iron ore tailings industrial by-product as eco-friendly aggregate on mechanical properties, pore structure, and sulfate attack and dry-wet cycles resistance of concrete,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01472.

[3] L. T. da Silva Ramos, R. C. de Azevedo, A. C. da Silva Bezerra, L. M. do Amaral, and R. D. Oliveira, “Iron ore tailings as a new product: A review-based analysis of its potential incorporation capacity by the construction sector,” *Clean. Waste Syst.*, vol. 7, 2024, doi: 10.1016/j.clwas.2024.100137.

[4] Z. Ma, J. Shen, C. Wang, and H. Wu, “Characterization of sustainable mortar containing high-quality recycled manufactured sand crushed from recycled coarse aggregate,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 132, 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104629.

[5] H. Wu, R. Hu, D. Yang, and Z. Ma, “Micro-macro characterizations of mortar containing construction waste fines as replacement of cement and sand: A comparative study,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 383, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131328.

[6] X. Huang, R. Ranade, and V. C. Li, “Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 7, pp. 923–931, 2013, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000674.

[7] X. Huang, R. Ranade, W. Ni, and V. C. Li, “Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 757–764, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.088.

[8] L. Weishi, L. Guoyuan, X. Ya, and H. Qifei, “The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings,” *J. Clean. Prod.*, vol. 204, pp. 685–692, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.309.

[9] M. M. Arbili, M. Alqurashi, A. Majdi, J. Ahmad, and A. F. Deifalla, “Concrete Made with Iron Ore Tailings as a Fine Aggregate: A Step towards Sustainable Concrete,” *Materials (Basel).*, vol. 15, no. 18, 2022, doi: 10.3390/ma15186236.

[10] A. U. Shettima, M. W. Hussin, Y. Ahmad, and J. Mirza, “Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 120, pp. 72–79, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095.

[11] M. Yellishetty, V. Karpe, E. H. Reddy, K. N. Subhash, and P. G. Ranjith, “Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, no. 11, pp. 1283–1289, 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.07.007.

[12] W. Zhang, X. Gu, J. Qiu, J. Liu, Y. Zhao, and X. Li, “Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119917.

[13] S. Zhao, J. Fan, and W. Sun, “Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 540–548, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019.

[14] R. Mandal, S. K. Panda, and S. Nayak, “Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future prospectives,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 392, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132007.

[15] C. S. N. (CSN), “Cimentos,” *CSN*, 2023. https://www.csn.com.br/homepage/cimentos/ (accessed Apr. 15, 2024).

[16] ABNT, “NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica,” 2017.

[17] ABNT, “NBR 11579: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200),” 2012.

[18] ABNT, “NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio,” 17054, 2022

[19] ABNT, “NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente,” NM 52, 2021

[20] ABNT, “NBR NM 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água,” 16917, 2021

[21] ABNT, “NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água,” 6458, 2016

[22] ABNT, “NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento,” 9604, 2024

[23] ABNT, “NBR 6457: Solos — Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade,” 6457, 2024

[24] N. C. N. Faria, V. M. Pereira, T. R. S. Nobre, R. Cesar de O. Romano, A. C. Vieira Coelho, and S. C. Angulo, “Clinker Portland with iron ore tailing and its characterization by integrated laboratory methods,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 402, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132958.

[25] ABCP, “Método de dosagem de concreto,” *ABCP*, 2020. https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Metodo_Dosagem_Concreto_ABCPonLINE_22.07.2020.pdf (accessed Aug. 15, 2020).

[26] ABNT, “NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos,” 5739, 2018

[27] ABNT, “NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica,” 9778, 2005

[28] H. C. Gomes, E. D. Reis, R. C. de Azevedo, C. de S. Rodrigues, and F. S. J. Poggiali, “Carbonation of Aggregates from Construction and Demolition Waste Applied to Concrete: A Review,” *Buildings*, vol. 13, no. 4, 2023, [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2075-5309/13/4/1097

[29] L. Li and M. Wu, “An overview of utilizing CO2for accelerated carbonation treatment in the concrete industry,” *J. CO2 Util.*, vol. 60, 2022, doi:

10.1016/j.jcou.2022.102000.

[30] E. D. Reis *et al.*, “Assessment of physical and mechanical properties of concrete with carbon nanotubes pre-dispersed in cement,” *J. Build. Eng.*, vol. 89, 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109255.

[31] Z.-X. Tian, Z.-H. Zhao, C.-Q. Dai, and S.-J. Liu, “Experimental Study on the Properties of Concrete Mixed with Iron Ore Tailings,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/8606505.

[32] F. A. P. Recena, *Retração do Concreto*, 1st ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2023.

[33] D. Xuan, B. Zhan, and C. S. Poon, “Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 65, pp. 67–74, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018.

[34] B. Zhan, C. S. Poon, Q. Liu, S. Kou, and C. Shi, “Experimental study on CO2 curing for enhancement of recycled aggregate properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 3–7, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.008.

[35] Y. M. Carvalho, B. S. Pinheiro, V. G. Pinto, and E. M. F. Brandt, “Performance of blended concrete with supplementary cementitious materials under sulfuric acid-a systematic review,” *Rev. Mater.*, vol. 27, no. 2, 2022, doi: 10.1590/s1517-707620220002.1311.