
ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO COM USO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

ANALYSIS OF CONCRETE PROPERTIES USING IRON ORE TAILING

*Lucas Thadeu da Silva Ramos*¹
*Hélvius de Castro Bicalho Ferreira*¹
*Elvys Dias Reis*¹
*André Barroso Mourão*¹
*Ivan Batista Moraes*¹
*Flávia Spitale Jacques Poggiali*¹

Resumo: Este estudo avaliou as propriedades do concreto com substituição parcial do agregado miúdo por rejeito de minério de ferro (RMF), visando contribuir para a sustentabilidade na construção civil e reduzir o impacto ambiental da mineração. Especificamente, foram investigadas a resistência à compressão (f_c), módulo de elasticidade (E), massa específica real (ρ_{real}), absorção de água (Abs) e índice de vazios (i_{vazios}) em amostras com RMF em diferentes teores (30% e 50%) e idades (7, 28 e 150 dias). Foi constatado que 30% de RMF melhoram a f_c em até 50% após 150 dias, enquanto 50% de RMF a diminuem, sugerindo que há um limite ótimo para a substituição que beneficia a integridade estrutural. A incorporação de RMF também reduziu o E e a Abs nas amostras com 30% de RMF, indicando que o RMF pode atuar eficientemente como um filler até esse teor de substituição. O estudo sugere que o RMF é uma alternativa viável que pode reduzir a extração de recursos naturais, diminuir os custos de produção e contribuir para a economia circular na construção civil, com potencial para mudanças significativas no consumo de materiais convencionais e na gestão de resíduos de mineração.

Palavras-chaves: Agregados; Concreto; Mineração; Rejeito de minério de ferro; Resíduos.

Abstract: *This study evaluated the properties of concrete with partial replacement of fine aggregate with iron ore tailings (IOT) to contribute to sustainability in civil construction and reduce the environmental impact of mining. Specifically, the compressive strength (f_c), modulus of elasticity (E), the real specific mass (ρ_{real}), water absorption (Abs), and voids index (i_{vazios}) of samples with IOT at different contents (30% and 50%) and ages (7, 28 and 150 days) were investigated. It was found that 30% IOT improves the f_c by up to 50% after 150 days, while 50% IOT decreases it, suggesting that there is an optimum limit for substitution that benefits structural integrity. Incorporating IOT also reduced E and Abs in samples with 30% IOT, indicating that IOT can act efficiently as a filler up to this substitution level. The study suggests that IOT is a viable alternative that can reduce the extraction of natural resources, lower production costs, and contribute to the circular economy in construction, with the potential for significant changes in the consumption of conventional materials and the management of mining waste.*

Keywords: *Aggregates; Concrete; Mining; Iron ore tailings; Waste.*

¹ *Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Gameleira, Belo Horizonte, MG – Brasil, e-mails: lucas.ramos@cefetmg.br, helviusdecastro@outlook.com, elvys@cefetmg.br, andrebmourao@cefetmg.br, ivan@cefetmg.br, flaviaspitale@cefetmg.br*

1 Introdução

Devido à finitude dos recursos disponíveis para o desenvolvimento das atividades de engenharia, a atuação sustentável na construção civil consolida-se como uma nova fronteira para o desenvolvimento científico, tecnológico, acadêmico e mercadológico. A reutilização de materiais, bem como o aproveitamento de resíduos ou rejeitos como substituições ou adições em produtos da construção civil, vem crescendo, acompanhando a expansão da consciência ecológica das sociedades humanas (Ramos et al., 2024).

Com o crescimento da urbanização mundial, a necessidade de desenvolvimento de infraestrutura urbana e a manutenção da taxa de consumo das populações implicam no aumento do consumo de recursos naturais, como os metais e minerais. Isso acarreta a geração de resíduos de mineração e emissões de gases de efeito estufa, provenientes de atividades humanas. Entre estas, a produção de cimento para a construção civil é responsável pela emissão anual de 3,4 bilhões de toneladas de CO₂ a nível mundial. Considerando que a produção mundial de cimento alcança 4,1 bilhões de toneladas anuais, o concreto se torna o segundo material mais utilizado no planeta (Adesina, 2020; Forster et al., 2020; USGS, 2023). Dada a expressividade de resíduos produzidos pela mineração e construção civil, aliada à intensa demanda por materiais, destaca-se a urgência em reavaliar o ciclo de vida das operações desses setores.

Nesse contexto, a busca por interação entre os setores de mineração e construção, na qual os resíduos do primeiro são utilizados para suprir os recursos demandados pelo segundo, pode contribuir para o desenvolvimento sustentável. Isso se deve à possibilidade de usar rejeitos de minério de ferro (RMF) como substitutos na produção de diversos materiais de construção (Ramos et al., 2024). Como substituição de agregados na produção de concretos, os teores ideais de RMF estão entre 30% e 40% (Shettima et al., 2016; Zhang et al., 2020; Zhao; Fan; Sun, 2014). Verifica-se que esta medida pode inicialmente melhorar a resistência à compressão do concreto, porém esse benefício tende a diminuir à medida que a proporção de substituição aumenta (Li et al., 2022; Lv; Jiang; Liang, 2022).

Com esta perspectiva, esta pesquisa experimental visa avaliar as propriedades mecânicas e físicas do concreto com substituição parcial de agregado miúdo por RMF em diferentes teores e idades. Especificamente, foram investigadas a resistência à compressão, módulo de elasticidade, massa específica real, absorção de água e índice de vazios.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Utilizou-se Cimento Portland do tipo CP II-E-32 devido à sua alta disponibilidade e consumo no território nacional. Sua produção é estabelecida pela NBR 16697 (ABNT, 2018). Trata-se de um cimento composto, produzido a partir de silicatos de cálcio, alumínio e ferro, sulfato de cálcio e filler carbonático, com uma baixa adição de escória de alto-forno, o que garante elevadas resistências iniciais. A **Tabela 1** apresenta sua caracterização.

Tabela 1: Caracterização do CP II-E-32

<i>Densidade</i>	<i>Massa específica aparente</i>	<i>Índice de finura</i>	<i>Início e fim de pega</i>	<i>Composição percentual</i>
2,99 g/cm ³	1,2 g/cm ³	24%	> 60 min e < 600 min	Clínquer e gesso: 51–94% Escória granulada de alto forno: 6–34% Material carbonático: 0,15%

Fonte: (CSN, 2023)

O RMF utilizado na pesquisa (**Figura 1**) é oriundo da região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais e foi obtido da etapa de filtragem, realizada previamente a sua disposição em barragem. Foram obtidos 300 kg de material, seguindo os procedimentos da NBR 9604 (ABNT, 2016). A composição granulométrica deste material, apresentada na **Tabela 2**, indica um elevado percentual de material passante pela peneira de 75 µm, classificando-o como filler, de acordo com Shettima *et al.* (2016) e Zhang *et al.* (2020).

Tabela 2: Composição granulométrica do RMF.

<i>Abertura da peneira (mm)</i>	<i>Retido (%)</i>	<i>Retido acumulado (%)</i>
4,75	0,00	0,00
2,36	0,00	0,00
1,18	0,03	0,03
0,6	0,04	0,07
0,425	0,02	0,10
0,3	0,17	0,27
0,25	0,32	0,59
0,15	3,72	4,31
0,075	28,01	32,33
Fundo	67,67	100,00
Total	100,00	
Módulo de Finura		0,05
Massa Específica		2,87 g/cm ³



Figura 1: Rejeito de minério de ferro em estado úmido (esquerda) e em estado seco (direita). Fonte: próprios autores (2024)

A caracterização dos agregados gráudo e miúdo foi conduzida no Laboratório Geotécnico da Chammas Engenharia. Provenientes de Itabirito-MG, esses agregados foram analisados de acordo com as normas NBR NM 17054 (ABNT,2022), NBR NM 16917 (ABNT, 2021) e NBR 7211 (ABNT, 2022). A **Figura 2** e a **Figura 3** apresentam, respectivamente, a granulometria do agregado miúdo e gráudo utilizados. Ambos estão em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas aplicáveis.

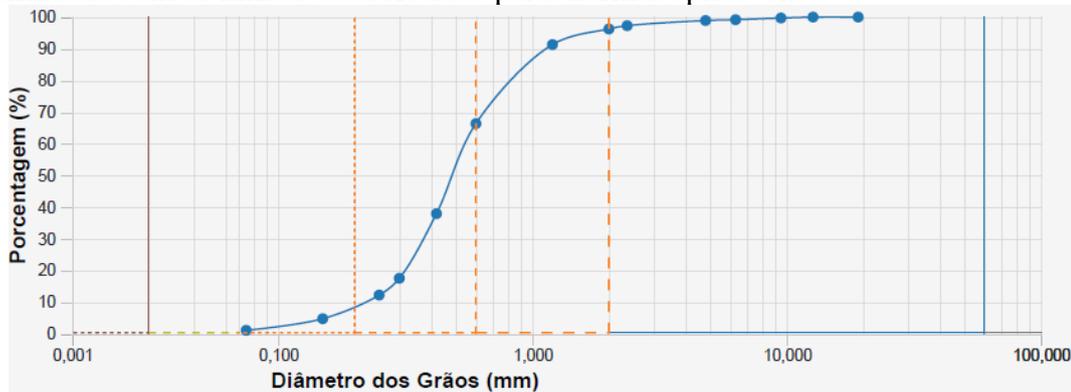


Figura 2: Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo. Fonte: próprios autores (2024)

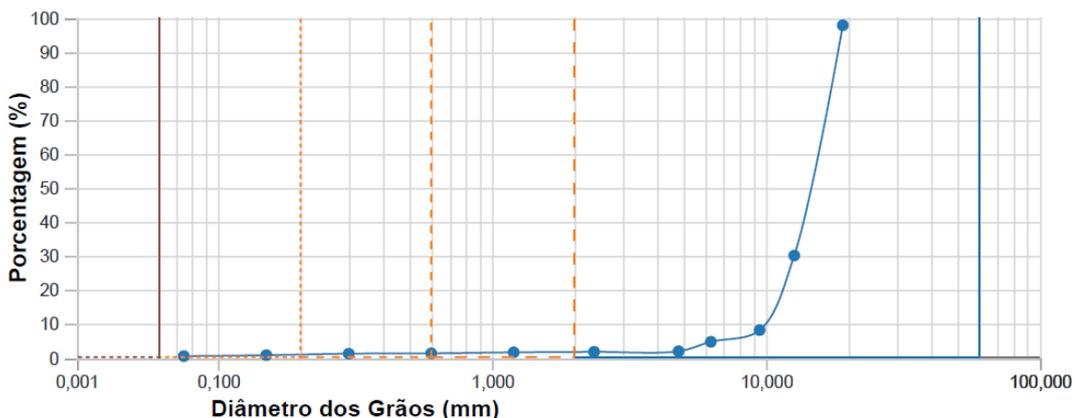


Figura 3: Curva de distribuição granulométrica do agregado gráudo. Fonte: próprios autores (2024)

Dois aditivos foram utilizados na produção dos concretos: 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.

2.2 Dosagens, Mistura e Ensaios Experimentais

Três amostras de concreto foram produzidas nesta pesquisa: concreto de referência, sem uso de RMF (C0), concreto com 30% de substituição de areia por RMF (C30) e concreto com 50% de substituição de areia por RMF (C50). A mistura entre a areia e o RMF foi feita antes da concretagem, obtendo-se teores de umidade de 3,50%, 6,40% e 8,40% para as amostras C0, C30 e C50, respectivamente.

A definição dos traços a serem utilizados na produção dos concretos seguiu a metodologia da ABCP (2020), que emprega a curva de Walz. Foram considerados um desvio

padrão de 4,0 MPa, como fator de segurança na preparação do traço, e uma resistência característica do concreto (f_{ck}) de 25 MPa aos 28 dias. Esses parâmetros possibilitaram a produção de 13 corpos de prova por traço, mantendo-se constante o fator água/cimento (a/c) em 0,47 para todos os traços. O processo de mistura seguiu as etapas da **Figura 4**.



Figura 4: Procedimento de mistura do concreto em laboratório. Fonte: próprios autores (2024)

Foram realizados ensaios de consistência (*slump test*), conforme as recomendações da NBR NM 67 (ABNT, 1998), para avaliar a trabalhabilidade das amostras no estado fresco, tanto com quanto sem o uso dos aditivos. A ausência de aditivos, inclusive no traço de referência, revelou-se inviável com o fator a/c utilizado. Assim, tornou-se necessário aplicar aditivos em todas as misturas, seguindo as proporções de polifuncional e hiperplastificante: 0,10% / 0,10% para a amostra C0, 0,20% / 0,10% para a amostra C30 e 0,40% / 0,30% para a amostra C50. A **Figura 5** ilustra os resultados dos ensaios para os três grupos, que foram de 82 mm (C0), 74 mm (C30) e 77 mm (C50), respectivamente.



(a) Concreto C0

(b) Concreto C30

(c) Concreto C50

Figura 5: Resultado do *slump test* das três amostras. Fonte: próprios autores (2024)

Por fim, foram analisadas as propriedades mecânicas e físicas do concreto no estado endurecido, nomeadamente resistência à compressão, módulo de elasticidade, massa específica real e absorção de água. Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos aos 7, 28 e 150 dias, seguindo a NBR 5739 (ABNT, 2018). A massa específica e a absorção de água foram avaliadas em corpos de prova aos 28 dias, conforme NBR 9778 (ABNT, 1987), e o módulo de elasticidade, aos 150 dias, de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2021).

3 Resultados e Discussões

A **Figura 6** apresenta os resultados de resistência à compressão (f_c) em diferentes idades das amostras de concreto com variação no percentual de substituição de RMF.

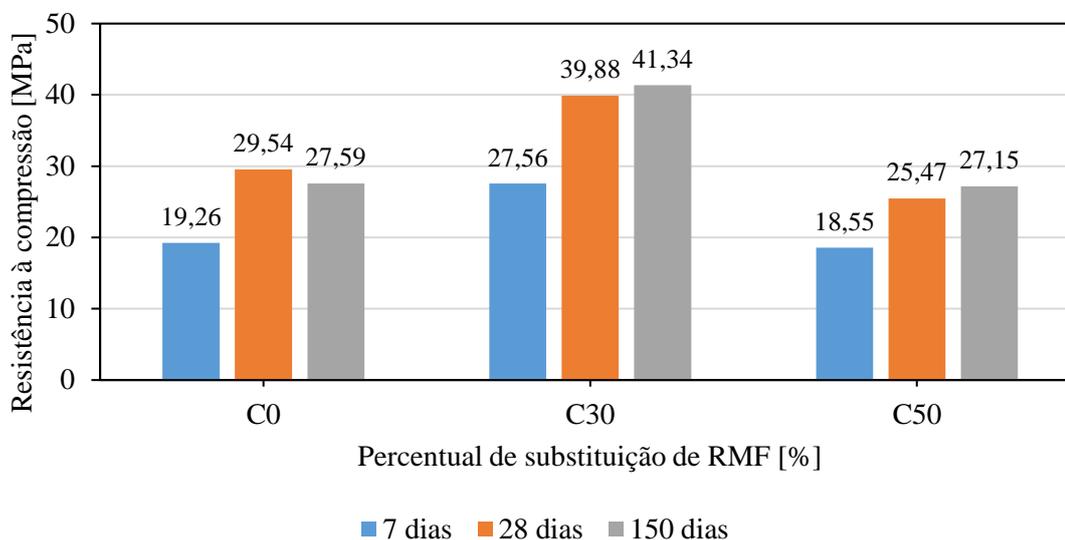


Figura 6: Resistência à compressão (f_c) das amostras de concreto em diferentes idades. Fonte: próprios autores (2024)

Observa-se que o teor de 30% de RMF resultou em aumentos de f_c entre aproximadamente 35% (28 dias) e 50% (150 dias), enquanto o teor de 50% de RMF levou a perdas entre cerca de 2% (150 dias) e 14% (28 dias) em relação às amostras de referência (C0). Esses dados permitem inferir que um percentual de substituição de RMF de 30% parece ser benéfico para a f_c a longo prazo, enquanto o teor de 50% pode não ser tão eficaz, resultando em uma f_c menor do que a das demais amostras. Isso sugere que existe um ponto ótimo de substituição de RMF que maximiza a f_c do concreto, e que um percentual mais alto de substituição pode ter efeitos adversos.

Desses resultados, entende-se que o RMF atua como *filler*, em acordo com a literatura, melhorando o preenchimento de espaços em quantidades menores. No entanto, seu aumento exige mais água de amassamento devido à sua grande área superficial. Com o fator a/c fixo para este estudo, isso resulta em uma menor disponibilidade de água para as reações iniciais com o clínquer, afetando negativamente a formação de produtos de hidratação e, conseqüentemente, diminuindo a resistência.

Ainda em relação à caracterização mecânica, os valores do módulo de elasticidade (E) das amostras C0, C30 e C50 foram de 33,54 GPa, 26,09 GPa e 30,55 GPa, respectivamente. Nota-se que a incorporação de RMF resultou em uma maior flexibilidade da matriz do concreto, evidenciada pela diminuição do E . Essa redução é inversamente proporcional ao percentual de RMF utilizado na substituição do agregado miúdo. Uma possível explicação para esse fenômeno é que o RMF, sendo mais fino que o agregado miúdo tradicional, pode não contribuir tanto para a rigidez da matriz devido à sua menor capacidade de transferir tensões. Além disso, a maior finura do RMF pode levar a uma distribuição menos eficiente das forças aplicadas, resultando em um comportamento mais flexível do material composto.

Na caracterização física do concreto, a amostra de referência apresentou massa específica real (ρ_{real}) de 2,50 g/cm³, enquanto as com 30% e 40% de RMF apresentaram,

respectivamente, 2,52 g/cm³ e 2,51 g/cm³. Todos estes materiais são entendidos como concretos de densidade normal por se manterem na faixa entre 2,00 g/cm³ e 2,80 g/cm³.

A **Figura 7** apresenta os resultados de absorção de água (*Abs*) e índice de vazios (*i_{vazios}*) das amostras de concreto com diferentes teores de RMF.

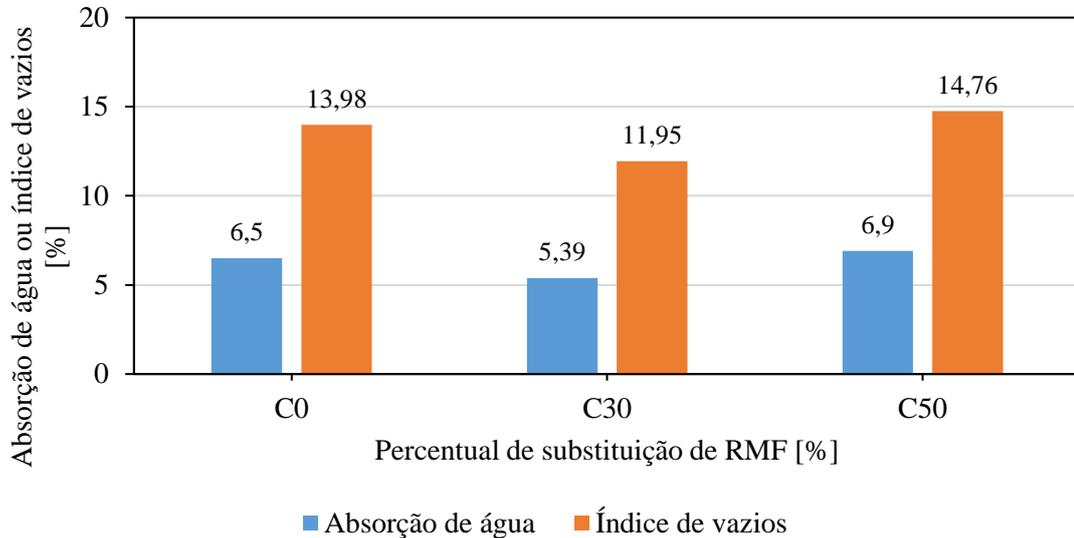


Figura 7: Absorção de água (*Abs*) e índice de vazios (*i_{vazios}*) das amostras de concreto aos 28 dias. Fonte: próprios autores (2024)

A análise desses resultados sugere que a substituição de uma parte dos agregados pelo RMF até certo ponto pode diminuir a porosidade do concreto (indicado pela diminuição do *i_{vazios}* da amostra C30), o que pode ser uma das razões para a menor *Abs*. No entanto, uma substituição maior de RMF (50%) parece aumentar a porosidade, o que pode explicar o aumento tanto na *Abs* quanto no *i_{vazios}*. Este comportamento pode estar relacionado com a capacidade do RMF de atuar como um filler até determinado limite, após o qual, talvez devido à demanda de mais água para a hidratação ou devido a uma distribuição menos otimizada da granulometria, a estrutura se torna mais porosa.

4 Conclusões

Este trabalho investigou as propriedades mecânicas e físicas do concreto (*f_c*, *E*, *Abs* e *i_{vazios}*) com substituição parcial de agregado miúdo por RMF em diferentes teores (30% e 50%) e idades (7, 28 e 150 dias). As seguintes conclusões foram obtidas:

(i) A amostra com 30% de RMF teve aumento na *f_c* (+50%) aos 150 dias, enquanto o teor de 50% reduziu a *f_c* (-14%) aos 28 dias, com uma leve recuperação aos 150 dias. Portanto, considerando a faixa de teores analisada, tem-se indícios de que 30% de RMF é ideal para melhorar a *f_c* do concreto, enquanto níveis maiores de substituição podem comprometer a integridade estrutural do material.

(ii) Houve redução do *E* do concreto com a adição de RMF, sendo menor em amostras com 30% de RMF e maior em amostras com 50% de RMF em comparação ao concreto de referência. Esse resultado pode ser devido à menor transferência de tensões pelo RMF em relação ao agregado miúdo convencional, afetando a distribuição de forças e resultando em menor rigidez.

(iii) O teor de substituição de RMF de 30% reduziu a *Abs* e o *i_{vazios}* do concreto, enquanto o teor de 50% de RMF aumentou ambas as propriedades. Infere-se que o RMF

funciona eficazmente como um filler até um certo nível de substituição, após o qual contribui para uma estrutura mais porosa devido a uma possível maior necessidade de água e a uma granulometria menos eficiente.

Portanto, esta pesquisa indica que o concreto com RMF, tanto com teores de 30% ou 50%, produzem propriedades comparáveis ao concreto de referência, sugerindo que o RMF pode ser uma matéria-prima alternativa viável na construção civil. Sua utilização pode reduzir o descarte em barragens, diminuir a extração de recursos naturais e, potencialmente, os custos de produção de concreto, contribuindo para a economia circular e a sustentabilidade do setor.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por seu apoio com infraestrutura de equipamentos [Convênio: APQ-01425-22, APQ-03739-16 e RED-00191-23], à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por seu apoio com infraestrutura de equipamentos [Convênio: P&D ANEEL CEMIG GT 331] e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo de produtividade em pesquisa [Convênio: PQ316846/2023-6], bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

- ADESINA, A. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*, v. 1, p. 100004, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917: Agregado Graúdo - Determinação Da Densidade E Da Absorção De Água**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados - determinação da composição granulométrica - método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — procedimento**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Dosagem do Concreto Pelo Método ABCP**. 2020. 51 slides, color. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Metodo_Dosagem_Concreto_ABCPonLINE_22.07.2020.pdf. Acesso em: 15 ago. 2020.
- LI, Y. et al. Compressive strength and composite pore structure parameters of iron ore tailings ball concrete. *Construction and Building Materials*, v. 347, p. 128611, 2022.

LV, Z.; JIANG, A.; LIANG, B. Development of eco-efficiency concrete containing diatomite and iron ore tailings: Mechanical properties and strength prediction using deep learning. **Construction and Building Materials**, v. 327, p. 126930, 2022.

FORSTER, P. M. et al. Current and future global climate impacts resulting from COVID-19. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 10, p. 913-919, 2020.

RAMOS, L. T. et al. Iron ore tailings as a new product: A review-based analysis of its potential incorporation capacity by the construction sector. **Cleaner Waste Systems**, p. 100137, 2024.

SHETTIMA, A. U. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72-79, 2016.

USGS. **Mineral Commodity Summaries 2023**, St. Louis, 2023. [Online].

ZHANG, W. et al. Effects of iron ore tailings on the compressive strength and permeability of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119917, 2020.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540-548, 2014.