CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ESCÓRIA DE ACIARIA BSSF PARA APLICAÇÕES NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Physical characterization of BSSF steel slag for applications in civil construction

Ellen Mirley Medeiros Torres
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | ellen.torres@alu.ufc.br

Thayná da Silva Neri Ripardo
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | thaynaneri@alu.ufc.br

Pedro Henrique Nogueira Garcia
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | pedro.nogueira.garcia@gmail.com

Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | eduardo.cabral@ufc.br

Alexandre Araújo Bertini
Universidade Federal do Ceará | Fortaleza, Ceará | bertini@ufc.br

RESUMO

A busca por soluções sustentáveis na construção civil tem incentivado pesquisas sobre o aproveitamento de coprodutos industriais como materiais alternativos. Este estudo avalia as propriedades físicas da escória de aciaria BSSF para sua aplicação na construção civil. Para isso, foram realizados ensaios físicos e comparações com materiais convencionais. Os resultados indicaram que a escória BSSF apresenta granulometria e massa unitária semelhantes às da areia e brita 0, amplamente utilizadas no setor. No entanto, sua massa específica e índice de absorção foram superiores aos dos agregados naturais. O teor de material pulverulento permaneceu dentro dos limites normativos. De maneira geral, os resultados evidenciam o potencial da escória BSSF como alternativa viável para a substituição parcial ou total de agregados na construção civil, contribuindo para a valorização de resíduos siderúrgicos e a redução do impacto ambiental do setor.

Palavras-chave: Propriedades; Materiais alternativos; Sustentabilidade; Indústria siderúrgica.

ABSTRACT

The search for sustainable solutions in civil construction has encouraged research into the use of industrial co-products as alternative materials. This study evaluates the physical properties of BSSF steel slag for its application in civil construction. For this, physical tests and comparisons were carried out with conventional materials. The results indicated that BSSF slag has a particle size and unit mass similar to those of sand and crushed stone, widely used in the sector. However, its specific mass and absorption index were higher than those of natural aggregates. The content of powdery material remained within regulatory limits. In general, the results highlight the potential of BSSF slag as a viable alternative for the partial or total replacement of aggregates in civil construction, contributing to the valorization of steel waste and the reduction of the environmental impact of the sector.

Keywords: Properties; Alternative materials; Sustainability; Steel industry.

1 INTRODUÇÃO

A escória de aciaria, coproduto da siderurgia, tem sido estudada como material alternativo na construção civil. Sua principal limitação técnica é a expansibilidade volumétrica, causada pela presença de óxidos livres de cálcio (CaO) e magnésio (MgO), que reagem com a umidade, resultando em aumento de volume ao longo do tempo. Embora existam tratamentos físico-químicos para mitigar essa reatividade, o método mais utilizado é a estabilização natural por exposição prolongada ao ambiente, podendo ser acelerada por molhagem e aeração (Polese *et al*., 2006).

No método utilizado pela *Baoshan Iron & Steel Co*., *Ltd,* nomeado *Baosteel Slag Short Flow* (BSSF), a escória líquida do conversor LD é resfriada rapidamente por jatos de água e fragmentada mecanicamente em tambor giratório, reduzindo a presença de cal livre e a reatividade expansiva. Além disso, elimina a necessidade de pátios de resfriamento, reduz o tempo de processamento e as emissões de partículas, tornando a escória mais estável para uso na construção civil (Yin; Xinbing, 2011 *apud* Rangel, 2022).

Diversos estudos destacam o potencial da escória BSSF como alternativa sustentável na construção civil, seja como substituto de materiais convencionais. Em argamassas, aumentou a massa específica e o módulo de elasticidade dinâmica, ainda que exigindo mais água para manter a trabalhabilidade (Amâncio *et al*., 2021; 2020). Como material cimentício sem adição de cimento Portland, atingiu até 70 MPa de resistência à compressão, com baixa permeabilidade e carbonatação insignificante (Liu *et al*., 2018). No concreto, sua substituição parcial ao cimento melhorou propriedades mecânicas e de durabilidade, exigindo mais aditivos para manter a consistência (Oliveira *et al*., 2020). Resultados positivos também foram observados em blocos de vedação (Benittez *et al.,* 2022) e concretos sustentáveis com agregados naturais parcialmente substituídos (Cartaxo *et al*., 2022). Além disso, mostrou-se viável em misturas Asfálticas (HOLANDA; SILVA; BASTOS, 2023).

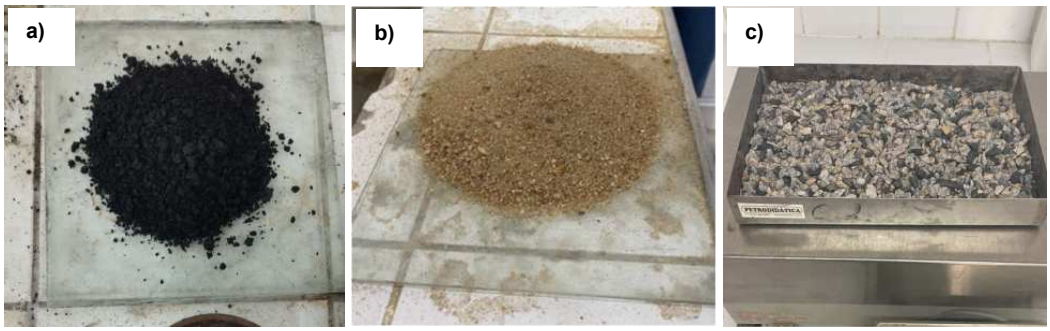
Dessa forma, a escória BSSF surge como alternativa promissora para a sustentabilidade na construção civil, reduzindo o uso de recursos naturais e promovendo o reaproveitamento de resíduos siderúrgicos. Este trabalho tem como objetivo caracterizar fisicamente a escória BSSF por meio de ensaios laboratoriais normatizados, comparando seus resultados com os critérios técnicos vigentes e com materiais tradicionalmente empregados na construção civil, de modo a subsidiar seu uso em larga escala no setor construtivo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

3 2.1 MÉTODOS

Este estudo realizou a caracterização física da escória de aciaria BSSF com base em ensaios laboratoriais normatizados. Foram analisadas as propriedades de granulometria, massa específica, absorção de água, massa unitária, teor de material pulverulento e forma dos grãos. Os mesmos ensaios foram aplicados à areia e brita naturais, permitindo a comparação do desempenho da escória com materiais amplamente utilizados na construção civil. Os resultados foram interpretados segundo critérios estabelecidos por normas técnicas vigentes. As Figuras 1 a), b), c) apresenta os materiais analisados: escória BSSF, areia e brita.

Figura 1: Materiais utilizados no estudo



Fonte: Autores.

As amostras de escória BSSF foram fornecidas por uma usina siderúrgica no estado do Ceará, enquanto as amostras de areia e brita foram obtidas em fornecedores locais. A preparação das amostras seguiu os procedimentos descritos na ABNT NBR 16915:2021, que estabelece diretrizes para a amostragem de agregados, incluindo etapas como homogeneização, quarteamento e secagem em estufa a 105 ± 5 °C.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A análise granulométrica seguiu a NBR 17054 (ABNT, 202)2, com classificação conforme a NBR 7211(ABNT, 2022). Utilizou-se agitador mecânico e peneiras normalizadas (ABNT NBR 17054:2022) para determinação da distribuição das partículas. A curva resultante permitiu classificar os materiais quanto ao tamanho e adequação como agregados miúdos ou graúdos.

A massa específica e a absorção de água foram determinadas conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021) e NBR 16917 (ABNT, 2021). As amostras secas foram imersas em água por 24 horas e, posteriormente, levadas à condição de saturação com superfície seca (SSS). A massa unitária foi obtida de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021), utilizando recipiente padronizado e utilizando o método C evidenciado na norma.

A quantificação do material fino foi feita conforme a NBR 16973 (ABNT, 2021), por lavagem do agregado em peneira com abertura de 75 µm e medição do resíduo retido.

A morfologia dos grãos foi avaliada por meio do sistema AIMS (*Aggregate Image Measurement System*), conforme especificações do DNIT (BRASIL, 2018). As imagens são capturadas com rotação automatizada das partículas, mensurando forma 2D, angularidade, esfericidade, textura e lamelaridade. Valores baixos de forma 2D indicam partículas mais arredondadas, enquanto valores altos de angularidade revelam bordas irregulares. Esses dados auxiliam na previsão do desempenho dos agregados em misturas cimentícias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, apresentam-se os resultados dos ensaios físicos da escória BSSF, comparados aos agregados naturais (areia e brita). A análise considerou os limites normativos vigentes, avaliando a conformidade e o potencial da escória como material alternativo na construção civil.

3.1 GRANULOMETRIA

A granulometria influencia propriedades como trabalhabilidade, resistência e durabilidade das estruturas. Seu controle adequado assegura proporções ideais entre partículas finas e grossas, otimizando o desempenho do concreto (Mehta, Monteiro, 2008). O Quadro 1 mostra a distribuição granulométrica do material.

Quadro 1: Granulometria da escória BSSF

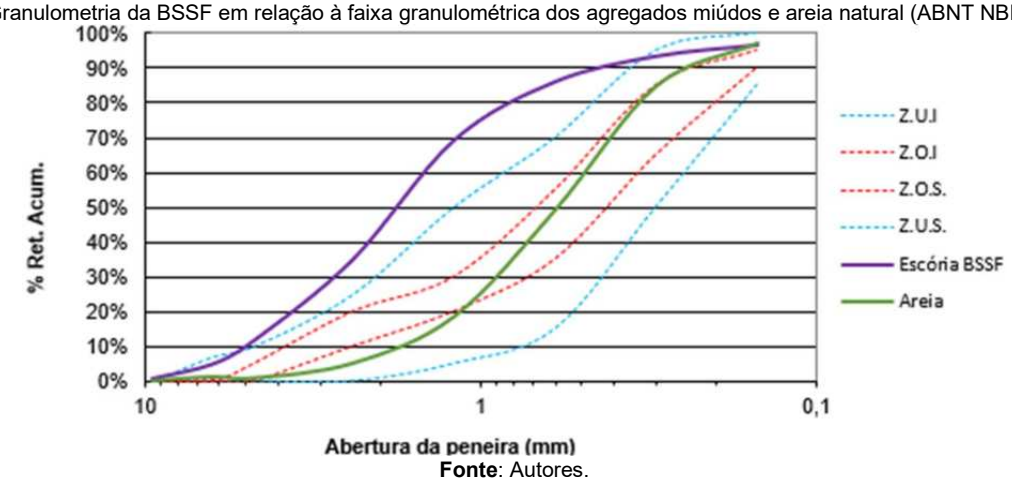
Peneira (mm)	% Retida Amostra 1	% Retida Amostra 2	% Ret. Média	% Ret. Acum.
25	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0 %
19	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0 %
12,5	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0 %
9,5	0,5 %	0,7 %	0,6 %	1 %
6,3	5,5 %	2,8 %	4,1 %	5 %
4,75	7,8 %	5,6 %	6,7 %	11 %
2,4	26,4 %	20,5 %	23,5 %	35 %
1,2	33,6 %	35,1 %	34,4 %	69 %
0,6	15,2 %	18,6 %	16,9 %	86 %
0,3	6,1 %	8,6 %	7,3 %	94 %
0,15	2,5 %	3,9 %	3,2 %	97 %
Fundo	2,3 %	4,0 %	3,2 %	100 %
MÓDULO DE FINURA			3,93	
DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA			6,3 mm	

Fonte: Autores.

A NBR 17054 (ABNT, 2022) classifica os agregados conforme a dimensão máxima característica (Dmáx) em miúdos (Dmáx < 4,75 mm) ou graúdos (Dmáx ≥ 4,75 mm). Assim, a escória BSSF se enquadra como agregado graúdo. Contudo, ao analisar as Zonas Ótimas e Usuais granulométricas da NBR 7211 (ABNT, 2022), observa-se que sua distribuição é intermediária entre as faixas de agregados miúdos e graúdos. As Figuras 2 e 3 comparam a curva granulométrica da escória BSSF com agregados convencionais e limites normativos para concreto pela NBR 7211 (ABNT, 2022).

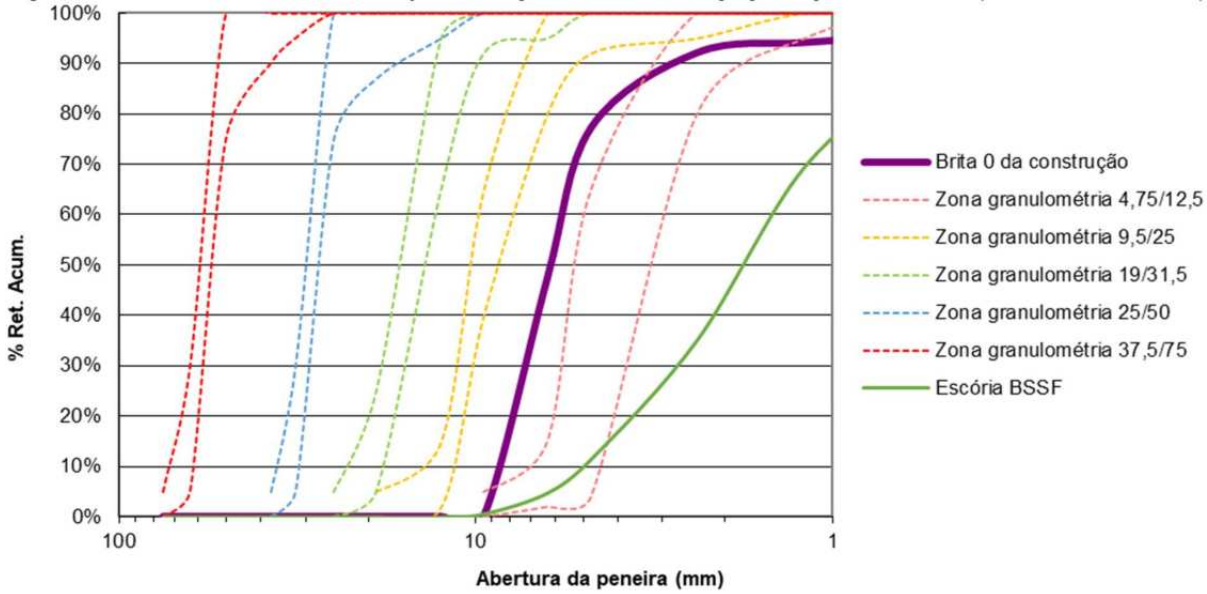
Os resultados indicam que a granulometria da BSSF está fora dos limites normativos para agregados, uma vez que apresenta partículas maiores que a areia e menores que as da brita 0, sugerindo a necessidade de moagem ou peneiramento para ajuste às faixas usuais para se adequar como substituto de agregados convencionais. Além disso, o peneiramento pode permitir que a BSSF atinja uma granulometria compatível tanto com a de agregado miúdo quanto com a de agregado graúdo.

Figura 2: Granulometria da BSSF em relação à faixa granulométrica dos agregados miúdos e areia natural (ABNT NBR 7211:2022)



Fonte: Autores.

Figura 3: Granulometria da BSSF em relação à faixa granulométrica dos agregados graúdos e brita 0 (ABNT NBR 7211:2022)



Fonte: Autores.

3.2 MASSA ESPECÍFICA, MASSA UNITÁRIA E ABSORÇÃO

A massa específica, a massa unitária e a absorção são propriedades fundamentais dos agregados, pois influenciam na dosagem e no desempenho das misturas cimentícias. Esses ensaios permitem otimizar a proporção de materiais e controlar a relação água/cimento. Os resultados obtidos foram organizados em gráficos comparativos, apresentados nas Figuras 4 e 5 (Mehta, Monteiro, 2008).

Os resultados indicam que a escória apresenta maior massa específica, massa unitária e absorção em comparação aos agregados convencionais analisados. Além disso, a comparação com a literatura, incluindo os estudos de Amâncio *et a*l. (2021), Oliveira *et al*. (2020) e Cartaxo *et al*. (2022), revelou semelhanças nos achados. Nesses trabalhos, a substituição dos materiais convencionais por escória resultou em uma maior demanda de água para alcançar a mesma consistência, além de uma maior densidade dos materiais finais.

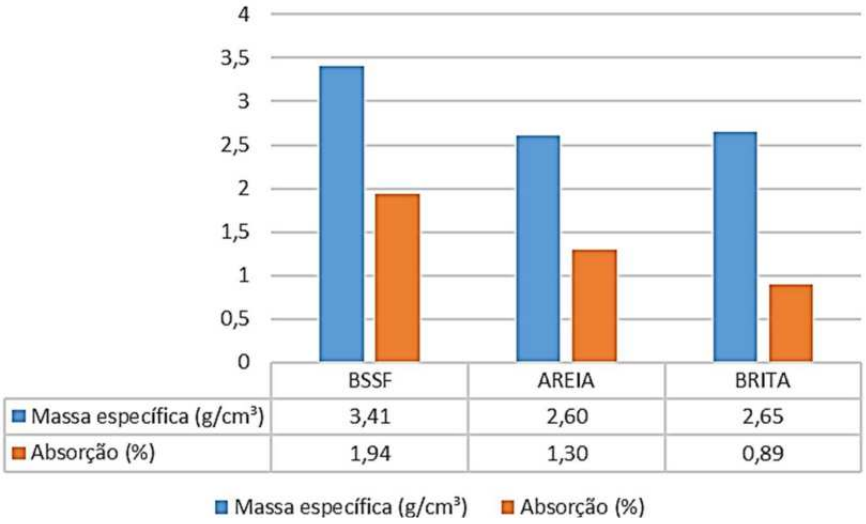
3.3 MATERIAL PULVERULENTO

O teor de material pulverulento representa a fração inferior a 75 µm. Em excesso, pode prejudicar a aderência da pasta de cimento, aumentando a demanda de água e gerando fissuras, embora partículas inertes finas possam contribuir para a resistência (Bauer, 2008). A NBR 7211 (ABNT, 2022) define limites para garantir a qualidade dos agregados. O Quadro 2 apresenta os resultados.

O teor de partículas finas na BSSF ficou próximo aos valores encontrados na literatura. Amâncio *et al.* (2020) e Silva *et al.* (2019) reportaram 1,13% e 1,3%, respectivamente, em argamassas. Benittez *et al.* (2021)

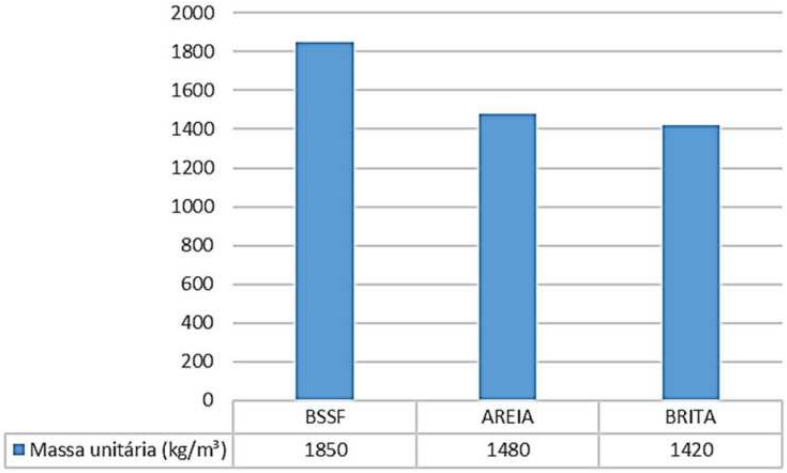
verificaram 1,74% em blocos de concreto. Mehta e Monteiro (2008) indicam limites entre 3% e 5%, dependendo da aplicação.

Figura 4: Massa específica e absorção de água da BSSF em comparação aos agregados convencionais



Fonte: Autores.

Figura 5: Massa unitária da BSSF em comparação aos agregados convencionais



Fonte: Autores.

Quadro 2: Teor de material pulverulento

Massa (g)	Amostra 1	Amostra 2
Inicial	300	300
Final	298	297
Teor de Material Pulverulento	0,67%	1%
Média	0,83%	

Fonte: Autores.

3.4 FORMA DOS GRÃOS

No Quadro 3, é apresentado o perfil de concentração dos grãos para a classificação de forma 2D e angularidade, sendo que o parâmetro de forma 2D avalia o grau de semelhança das partículas com um círculo perfeito, classificando os grãos como circular, semicircular, semialongado ou alongado. A classificação da escória BSSF quanto à forma 2D também está indicada no referido quadro.

De acordo com esse parâmetro, os grãos da BSSF são, em geral, classificados como semialongados, seguidos pelos semicirculares. Quanto à angularidade, predominam os grãos subarredondados. Estudos indicam que a forma dos grãos influencia significativamente a trabalhabilidade e o desempenho mecânico do concreto. Fabro *et al*. (2011) destacam que agregados mais angulosos e alongados aumentam a demanda por água e pasta de cimento devido à maior área superficial, embora favoreçam o entrelaçamento das

partículas e melhorem a resistência mecânica do compósito endurecido. Costa (2015) reforça a importância da forma 2D e angularidade na avaliação do desempenho do agregado, o que evidencia a necessidade de controle da morfologia em materiais alternativos como a escória BSSF. Assim, a escória BSSF apresenta forma de grãos compatível com o uso em concretos e argamassas, desde que o traço seja ajustado e, se necessário, sejam utilizados aditivos superplastificantes para manter a trabalhabilidade.

Quadro 3: Classificação de forma 2D e angularidade da BSSF

Parâmetro	Concentração (%)			
Forma 2D	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado
	27,0%	31,7%	34,2%	7,1%
Angularidade	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular
	14,1%	43,9%	27,7%	14,3%

Fonte: Autores.

5 CONCLUSÃO

A caracterização física da escória de aciaria BSSF indicou propriedades relevantes para seu potencial uso como agregado na construção civil, destacando-se a granulometria ajustável, onde a a BSSF pode atingir faixas granulométricas compatíveis com as de areia e brita. Alta massa específica, massa unitária e absorção, que podem aumentar a densidade da mistura, o teor de material pulverulento ficou dentro dos limites normativos, e os grãos apresentaram forma predominantemente semialongada e semicircular, que podem afetar o empacotamento e a trabalhabilidade do concreto. Contudo, a viabilidade técnica de seu uso não pode ser afirmada apenas com base nesses ensaios. Fatores estabilidade volumétrica, presença de compostos expansivos e o teor de ferro residual não foram abordados, embora sejam cruciais, especialmente em concretos armados. Assim, este estudo representa uma etapa preliminar de avaliação física da BSSF, sendo imprescindível a continuidade das investigações para validar seu uso como material alternativo em aplicações estruturais.

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa ArcelorMittal pelo fornecimento da escória de aciaria BSSF, insumo fundamental para a realização deste trabalho. A colaboração da empresa foi essencial para o desenvolvimento das análises e experimentações aqui apresentadas, contribuindo significativamente para o avanço da pesquisa e para a avaliação do potencial de reaproveitamento de coprodutos siderúrgicos na construção civil. Reconhecemos e valorizamos o apoio técnico e institucional disponibilizado, que reforça o compromisso da ArcelorMittal com a inovação, a sustentabilidade e o fortalecimento da relação entre indústria e academia.

REFERÊNCIAS

AMANCIO, F. A.; *et al.* Evaluation of mortars produced with Baosteel slag short flow (BSSF) steel slag as fine aggregate. **Cerâmica**, [S.L.], v. 67, n. 381, p. 48-57, mar. 2021. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132021673812977.

AMANCIO, F. A. *et al.* Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (baosteel's slag short flow). **Matéria** (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 25, n. 1, 2020. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0887.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16915**: Agregados - amostragem. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

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 16972**: Agregados - determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973**: Agregados - determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. 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 7211**: Agregados para concreto – requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

BENITTEZ, L. H. *et al.* Bloco de concreto com incorporação de escória de aciaria BSSF: um estudo para substituição de agregados naturais. **Revista Principia**, [S. l.], v. 59, n. 3, p. 785–801, 2022. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id5214. Disponível em: https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/5214.

CARTAXO, F. M. *et al.* Propriedades mecânicas de concretos sustentáveis com incorporação de escória de aciaria BSSF em substituição aos agregados naturais. **Revista Principia**, [S. l.], v. 60, n. 4, p. 1413–1433, 2023. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id6647. Disponível em: https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/6647.

COSTA, H. N. Caracterização de areias de britagem de pedreiras da Região Metropolitana de Fortaleza e avaliação da sua aplicação no concreto. 2015. 135 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

DIAS, A. R.O.; *et al.* Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Matéria** (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 25, n. 4, 2020. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1190.

FABRO, F. *et al.* Influência da forma dos agregados miúdos nas propriedades do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 191–212, 2011. DOI: 10.1590/S1983-41952011000200003

HOLANDA, Y. S.*et al.* Avaliação comparativa do comportamento mecânico de misturas asfálticas com fíleres sustentáveis versus fíleres tradicionais. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 37., 2023, Santos. **Anais** . Santos: Anpet, 2023. p. 1-12.

LIU, A.; SHAO, G.; LUO, X.; WANG, C.; WANG, W. Preparation and application of the cement-free steel slag cementitious material. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 417-424, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.186.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Revista Matéria**, v. 25, n. 4, e-1190, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200004.1190.

POLESE, M.O. *et al.* Caracterização microestrutural da escória de aciaria. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 442-452, dez. 2006. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/s1517-70762006000400011

RANGEL, G. A. V. P. Análise da escória de conversor do processo Baosteel Slag Short Flow (BSSF) por espectroscopia Mössbauer. 2022. 41 f. **Monografia** (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.