XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8248

Caracterização de argila e escória de alto-forno para potencial utilização em blocos cerâmicos

Characterization of clay and blast furnace slag for potential use in ceramic blocks

Antônio Teodoro Dutra Júnior
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade | Brasil
antonioteodorodutra@gmail.com
Marília Dias de Souza Inácio
Centro Federal de Educação Tecnológica | Belo Horizonte | Brasil
mariliadiasmestrado@gmail.com
Rafaela de Jesus Paula
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto | Brasil
rjpaula.94@gmail.com
Fabiane Leocádia da Silva
Universidade do Estado de Minas Gerais | João Monlevade | Brasil
fabiane.silva@uemg.br

Resumo

A construção civil e a mineração, pilares da indústria brasileira, movimentam altos volumes de insumos e geram resíduos significativos. Uma alternativa para suprir a demanda do setor e reutilizar subprodutos minero-metalúrgicos é a produção de blocos cerâmicos com adição de resíduos. Este trabalho objetiva a caracterização cristalográfica e mineralógica de argila e escória de alto-forno, via granulometria, MEV, FRX e DRX. Os resultados indicam complementaridade granulométrica, favorecendo o empacotamento granular. Adicionalmente, a composição química da escória aponta para a atuação como potencial agente fundente, cujos óxidos constituintes tendem a auxiliar na formação de fase líquida e na vitrificação do sistema. Conclui-se que a caracterização físico-química realizada valida a compatibilidade e o potencial tecnológico da interação entre os materiais estudados para a formação de matrizes cerâmicas sustentáveis.

Palavras-chave: Economia circular. Materiais cerâmicos. Argila. Escória de alto-forno. Resíduos industriais.

Abstract

As pillars of the Brazilian industry, the construction and mining sectors handle vast volumes of raw materials and generate significant waste. To meet market demands while recycling mineral-metallurgical by-products, incorporating waste into ceramic block production has emerged as a viable alternative. This study aims to conduct a crystallographic and mineralogical characterization of clay and blast furnace slag using particle size analysis, SEM, XRF, and XRD. The results demonstrate particle size complementarity, which enhances granular packing. Furthermore, the chemical composition of the slag indicates its potential as a fluxing agent, where its constituent oxides facilitate liquid-phase formation and system vitrification.

Ultimately, the physicochemical characterization confirms the compatibility and technological feasibility of the interaction between the studied materials for developing sustainable ceramic matrices. matrices.

Keywords: Circular economy. Ceramic materials. Clay. Blast furnace slag. Industrial waste.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o cenário industrial global passou a integrar o conceito de sustentabilidade como uma estratégia essencial para minimizar os impactos ambientais associado tanto à produção quanto ao descarte final dos resíduos gerados [1].

Diante disso, o uso sustentável dos recursos naturais, a mitigação das alterações climáticas e a incorporação de subprodutos em processos produtivos que no contexto da economia circular consolidaram-se como os principais desafios globais para a preservação do planeta [2].

Enquanto o modelo tradicional de economia circular fundamenta-se na extração, transformação, consumo e descarte de insumos primários, a economia circular surge para preencher essa lacuna estrutural. Esse novo paradigma enfatiza o desenvolvimento de bens duráveis e a reintegração de resíduos industriais na cadeia de suprimentos, convertendo subprodutos em matérias-primas de valor agregado para novos ciclos de processamento industrial.

A mineração é uma das atividades produtivas mais antigas na história, e reflete o desenvolvimento de uma sociedade, possibilitando dessa forma uma enorme variedade de produtos. O setor mineral no Brasil faturou, no ano de 2023, R$ 248,2 bilhões, gerando mais de 210 mil empregos diretos e exportando aproximadamente 392 milhões de toneladas de produtos minerais [3]. Os valores exportados em 2023, representam um aumento de 9,5% em relação ao ano de 2022, totalizando aproximadamente US$ 43 bilhões, um aumento de 3,1% em relação ao ano de 2022 [3].

Já no setor de produção de aços e ligas ferrosas, o Brasil se destaca como grande fornecedor e consumidor dessa determinada liga metálica. O país apresenta 31 usinas siderúrgicas, administradas por 11 diferentes grupos empresariais, que apresentaram no ano de 2022, um faturamento líquido de R$ 209,1 bilhões de reais, o que coloca o país na nona posição mundial em produção de aço bruto, com 34,1 milhões de toneladas produzidas, quantia essa que representa 1,8% de todo o aço produzido no mundo [4].

Segundo Das *et al* [5], para se produzir 1 tonelada de aço são gerados de 2 a 4 toneladas de resíduos. Esses resíduos se apresentam das mais diferentes formas como escórias, lamas, poeiras, carepas decorrentes do processo produtivo.

Diante do exposto, este trabalho objetiva a caracterização cristalográfica de argila e escória de alto-forno, através dos ensaios de granulometria, MEV, FRX e DRX. Os resultados indicam que os materiais estudados possuem complementaridade granulométrica, fator que favorece o empacotamento granular das partículas, além

disso, a escória possui potencial fundente favorecendo o ganho de resistência mecânico em materiais cerâmicos.

2 MÉTODO

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E AQUISIÇÃO DAS AMOSTRAS

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e objetivos de caráter experimental e descritivo. A justificativa metodológica está baseada na necessidade de determinar as propriedades físico-químicas, mineralógicas e microestruturais da escória de alto-forno, um subproduto industrial e matérias-primas regionais, a argila, validando a tecnologia e viabilidade de sua interação prévia em matrizes cerâmicas sustentáveis.

O delineamento experimental do trabalho foi estruturado nas seguintes sequências lógicas: (i) aquisição e preparação das amostras; (ii) caracterização física, química e mineralógica, via granulometria, FRX, DRX e MEV; e (iii) análise comparativa dos potenciais de empacotamento granular e ação fundente dos materiais estabilizados.

Inicialmente, o trabalho envolveu a obtenção das amostras. A argila advém do município de Grão Mongol, região do norte de Minas Gerais. A escória de alto-forno é subproduto da produção de ferro gusa, oriunda da Arcelor Mittal de João Monlevade/MG. A escória utilizada é denominada de escória granulada. As matérias-primas utilizadas neste trabalho estão mostradas na Figura 1.

Figura 1: Amostras analisadas: argila e escória de alto-forno.



Fonte: O autor.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA E DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

A morfologia superficial da argila e da escória de alto-forno foram observadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um microscópio modelo Vega 3 LMU, após etapa de metalização com uma camada fina de ouro-paládio.

Para identificar os compostos minerais que constituíam tanto a argila quanto a escória de alto-forno, foram utilizadas as técnicas de difração de raios-X e fluorescência de

raios-X. Na difração de raios-X foi utilizado um difratômetro da marca Bruker, modelo D2 Phaser, com tubo de cobre (* = 1,5418Å) e varredura de 0,5 */min, de 2o a 80o, para tensões de 30 kV e correntes de 10 mA. As identificações das fases presentes foram feitas utilizando o banco de dados Match 2. Na fluorescência de raios-X foi utilizado o equipamento da marca Panalytical, modelo Vulcan 6Ma, Zetium.

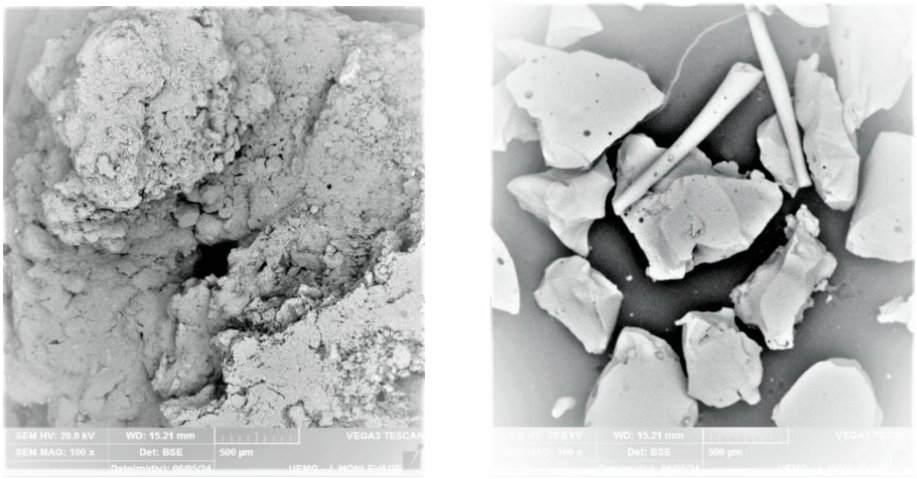
Foi ainda obtida via peneiramento a úmido, a curva de classificação granulométrica da argila e via peneiramento a seco a curva de classificação granulométrica da escória de alto-forno, utilizando para isso um conjunto de peneiras que variaram da abertura de 5 a 400 mesh [6].

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ARGILA E DA ESCÓRIA DE ALTO-FORNO

A Figura 2 apresenta a imagem obtida via MEV das morfologias superficiais das amostras de argila e da escória de alto-forno.

Figura 2: Morfologia das partículas de argila (a) e de escória de alto-forno (b).



Fonte: O autor.

Ao analisar a imagem da Figura 2a observa-se que a argila apresenta uma morfologia mais porosa ao contrário da morfologia observada para a partícula de escória de alto-forno (2b) que apresenta uma estrutura mais facetada com planos de clivagem mais bem definidos, característicos de materiais que apresentam algum grau de vitrificação.

3.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

Os resultados obtidos para os ensaios de FRX estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores dos principais compostos minerais obtidos no ensaio de fluorescência de raios-X.

Compostos (%) /Amostras	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	SO_3	PPC	Total
Argila	1.06	71.05	16.8	0.16	0.33	0.3	*	5.95	95.65
Escória	1.86	43.76	10.31	35.83	5.09	0.46	1.18	*	98.49

Fonte: O autor.

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 1 verifica-se altos teores de Al_2O_3 para as duas matérias-primas analisadas. Outro fato a ser observado são os baixos teores de Fe_2O_3 encontrados tanto na argila quanto na escória de alto-forno.

Destaca-se também os altos valores de concentração encontrados na escória de alto-forno para os compostos CaO e MgO (35,83% e 5,09% respectivamente). Tais compostos são utilizados como fundentes no tratamento de redução do minério de ferro no alto-forno. O CaO e o MgO são adicionados no alto-forno como fundentes sob a forma de calcita e dolomita, respectivamente, e tem por objetivo a formação de escória e, além disso, a escória formada apresenta uma menor temperatura de fusão. A escória analisada pode ser classificada como ácida, pois apresenta a relação CaO/SiO_2 igual a 0,82, portanto inferior a 1.

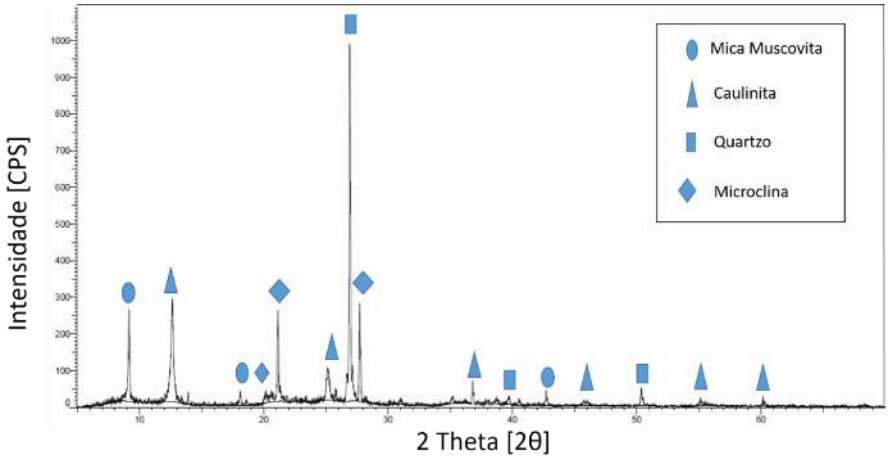
Pode-se observar ainda que o principal óxido presente na argila é o SiO_2 com teores acima de 70%. Essa composição indica a presença de silicatos e sílica livre. Os silicatos estão presentes nos argilominerais, feldspatos e nas micas. A sílica livre apresenta como principal característica a redução da plasticidade da argila.

Outro óxido a ser analisado é o óxido de ferro (Fe_2O_3) que apresenta teores de aproximadamente 1%. Em função dessa baixa concentração de Fe_2O_3, a argila apresenta coloração clara após a queima [7].

3.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A Figura 3 apresenta o difratograma obtido para a amostra de argila, enquanto a Figura 4 apresenta o difratograma obtido para a amostra de escória de alto-forno.

Figura 3: Difratograma da amostra de argila.

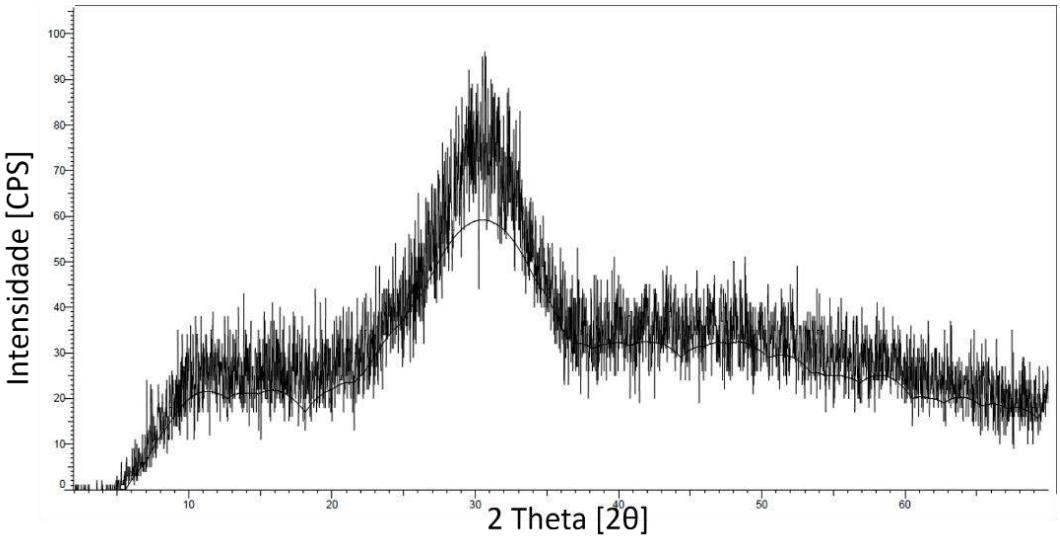


Fonte: O autor.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8248

Ao analisar o difratograma apresentado na Figura 3, observa-se que a argila é composta pelos minerais mica moscovita ($KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OHF)_2$), caulinita ($Si_2Al_2O_5(OH)_4$), quartzo ($SiO_2$) e microclina ($K(AlSi_3O_8)$).

Figura 4: Difratograma da amostra de escória de alto-forno.



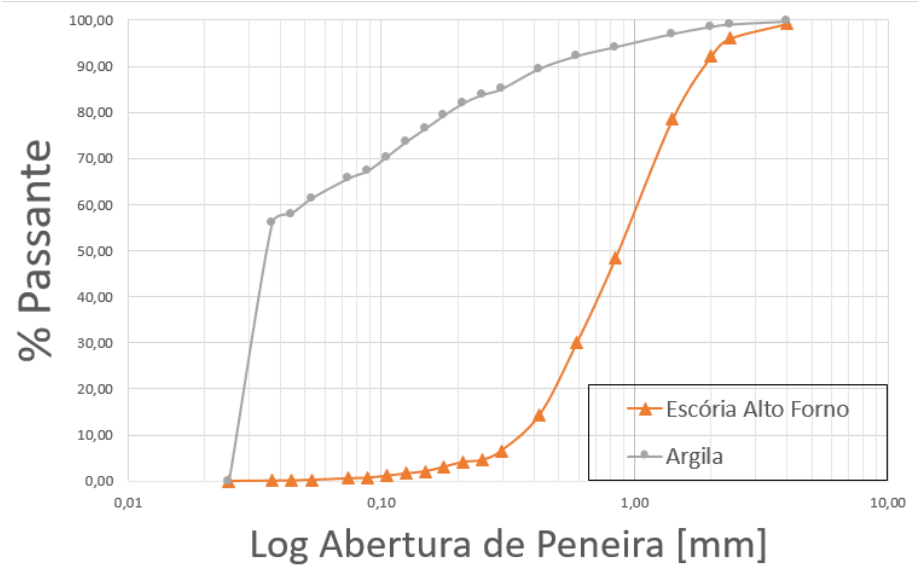
Fonte: O autor.

Analisando o difratograma da Figura 4 pode-se perceber que a escória de alto-forno, apresenta-se como um material amorfo, sem apresentar picos de difração e com a presença de halo vítreo de não cristalinidade, decorrente do tipo de resfriamento brusco sofrido pela amostra. Esse halo encontra-se próximo a 2θ igual a 30^0 [8].

3.4 CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMETRICA

A curva de distribuição granulométrica tem por finalidade analisar a distribuição dos tamanhos das partículas em um material proporcionalmente ao peso total da amostra, e assim obter uma visão ampla das variações de granulometria e sua distribuição na amostra analisada ao longo de uma sequência de aberturas de peneiras. A Figura 5 apresenta a curva de granulometria obtida tanto para a argila quanto para a escória de alto-forno.

Figura 5: Curva de distribuição granulométrica da argila da escória de alto-forno.



Fonte: O autor.

Os resultados apresentados na Figura 5 mostram que a escória de alto-forno apresenta granulação mais grosseira em comparação com argila. A argila apresenta fração passante na peneira de 400# (0,037 mm) de 56,02% enquanto a escória apresentou fração passante nessa mesma malha de apenas 0,07%. Obteve-se para a escória de alto-forno os valores de 2,86 para o coeficiente de uniformidade (CU) e 1,03 para o coeficiente de curvatura (CC), possibilitando classificar a escória como sendo um material uniforme bem graduado.

De posse dos dados obtidos da Figura 5, foi possível classificar as porcentagens das amostras de argila e da escória de alto-forno [9], conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2: Análise granulométrica dos materiais.

Classificação granulométrica - NBR 6502/2022					
Material	Pedregulho (%)	Argila + Silte (%)	Areia (%)		
			Grossa	Média	Fina
Argila	1.43	61.32	6.36	10.25	20.65
Escória	7.83	0.24	62.15	25.87	3.9

Fonte: O autor.

Essa diferença de distribuição granulométrica apresenta um potencial benéfico para a fabricação de blocos cerâmico, visto que as partículas mais finas de argila tendem a ocupa os vazios intergranulares deixados pela escória, elevando o fator de empacotamento do sistema. Adicionalmente, quando submetido a altas temperaturas, espera-se que o material promova a formação de fase líquida através da escória, envolvendo dessa forma as partículas de argila e atuando diretamente no incremento da resistência mecânica das cerâmicas, conforme os princípios de vitrificação descritos na literatura.

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que:

- Resultados da argila: A argila apresentou coloração clara devido ao baixo teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) contido nela, fato constatado e validado pelo ensaio de eflorescência de raios-X;

- Resultados da escória: A escória apresentou estrutura cristalina amorfa, evidenciado pelo halo característico localizado no gráfico de difração de raios X, em torno de 30° (2θ) no difratograma. Essa característica decorre do processo de rápido resfriamento a que o subproduto é submetido após aquecimento em alto-forno;

- Potencial fundente: A presença dos óxidos de cálcio (35,83%) e magnésio (5,09%) qualifica a escória como um potencial agente fundente. Teoricamente, em altas temperaturas de queima, esses óxidos reagem com a sílica e a alumina da argila, favorecendo a formação de fase líquida e a vitrificação, facilitando a sinterização das matrizes cerâmicas;

- Complementariedade granulométrica: A integração e a diferença na distribuição granulométrica entre a argila e a escória indicam uma complementariedade granulométrica promissora. Sob a ótica da teoria de empacotamento granular da literatura, essa diferença na granulometria favorece o preenchimento de vazios, o que tende a otimizar a densificação física e, consequentemente, as propriedades mecânicas dos blocos cerâmicos após a queima.

- Contribuição científica e relevância: A principal contribuição científica desse trabalho reside na avaliação da compatibilidade mineralógica e física inicial entre a argila e a escória de alto-forno. Demonstra-se que a substituição parcial de matérias-primas naturais por resíduos da indústria siderúrgica é uma estratégia viável para o desenvolvimento das matrizes cerâmicas sustentáveis, alinhando o setor da mineração ao setor da construção civil aos preceitos da economia circular, ao converter um subproduto industrial em um recurso de valor agregado.

- Limitações do estudo e perspectivas futuras: Embora a caracterização inicial comprove a compatibilidade e potencial tecnológico da utilização da escória em blocos cerâmicos, o presente estudo limitou-se à investigação das propriedades intrínsecas das matérias-primas isoladas e de sua interação granulométrica teórica. Diante disso, como perspectiva para trabalhos futuros propõe-se:

(i) Produzir corpos de prova variando os percentuais de substituição da argila por escória;

(ii) Avaliar a influência de diferentes temperaturas de sinterização na formação de fases vítreas e cristalinas;

(iii) Mensurar experimentalmente as propriedades dos tijolos, tais como absorção de água, retração linear e resistência à compressão, validando as hipóteses geradas pela caracterização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), ao Centro tecnológico (CTec) da UEMG, ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas

Gerais – (CEFET/MG) e a Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP - pela disponibilidade de utilização do laboratório para realização dos ensaios.

Declaração de uso de IA generativa

Durante a preparação deste artigo, o segundo autor utilizou a ferramenta GEMINI (Google), versão gratuita, para a tradução do resumo para a língua inglesa e para melhorias de escrita e coesão do texto. Após a utilização da ferramenta, o autor revisou e editou o conteúdo conforme necessário e assume total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] BABISK, M.P. *et al.* Evaluation and application of sinstered red mud and its incorporated Clay ceramics as materials for building construction. **Journal of Materials Research and Tecnology,** v.9, n. 2, p. 2195-2195, 2020.

[2] SUESCUM-MORALES, David *et al.* Accelerated carbonation of fresh cement-based products containing recycled masonry aggregates for CO_2 sequestration. **Journal of CO_2 Utilization,** v. 46, 2021.

[3] Instituto Brasileiro de Mineração. **Sumário Executivo Setor Mineral 2023.** p. 40.

[4] Instituto Aço Brasil. **Aço e Sustentabilidade 2023.** p. 11.

[5] DAS, B; S. *et al.* An Overview of Utilization of Slag and Sludge from Steel Industries. **Resources, Conservation and Recycling.** v.50. p. 40–57. 2007.

[6] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Divisão de Capacitação Tecnológico. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNER-ME 083/98: Agregados – Análise Granulométrica** – Norma Rodoviária. Rio de Janeiro: IPR. 5 p.

[7] MONTEIRO, F. M. *et al.* Caracterização de Argila Caulinítica da Região Metropolitana de Natal-RN-Parte 1. **Congresso Anual da ABM**, 71., 2017, São Paulo. p. 3658-3669.

[8] JÚNIOR, L. A. B. P. *et al.* Caracterização da Mistura de resíduos de Granito e Escória de Aciaria LD. **Metalurgia e Materiais – Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n.2, p. 169-174, abr/jun 2011.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**. Solos e Rochas – Terminologia. Rio de Janeiro. ABNT, 2022.