



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO HIDRÓXIDO DE SÓDIO COMO ATIVADOR NA
MOAGEM DA ESCÓRIA DE FERRO-LIGAS MANGANÊS**

Autor: **Lucca Silva Mattera**

Orientadora: M.Sc. **Mariana Caroline Andrade Silva**

Ouro Preto

Agosto de 2023

Universidade Federal de Ouro Preto

Departamento de Engenharia de Minas

Lucca Silva Mattera

lucca.mattera@aluno.ufop.edu.br

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO HIDRÓXIDO DE SÓDIO COMO ATIVADOR NA
MOAGEM DA ESCÓRIA DE FERRO-LIGAS MANGANÊS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como exigência para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: M.Sc. **Mariana Caroline Andrade Silva**

Ouro Preto
Agosto de 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M435a Mattera, Lucca Silva.

Avaliação da influência do hidróxido de sódio como ativador na moagem da escória de ferro-ligas manganês. [manuscrito] / Lucca Silva Mattera. - 2023.

47 f.

Orientadora: Dra. Mariana Caroline Andrade Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Beneficiamento de minério - Moagem. 2. Escória (Metalurgia) - Alto Forno. 3. Manganês. 4. Hidróxido de sódio. 5. Granulometria. I. Silva, Mariana Caroline Andrade. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.73

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucca Silva Mattera

Avaliação da influência do hidróxido de sódio como ativador na moagem da escória de ferro-ligas manganês

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em 21 de dezembro de 2023

Membros da banca

M. Sc. Mariana Caroline Andrade Silva - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. de Minas Lucas Jean Wurzner (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral - UFOP)
Eng. de Minas Evandro Luiz de Oliveira Leite (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral - UFOP)

M. Sc. Mariana Caroline Andrade Silva, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/12/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Mariana Caroline Andrade Silva, TECNICO EM MINERACAO**, em 26/12/2023, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0647823** e o código CRC **2A0C30A0**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer à minha orientadora Mariana Andrade, pela orientação valiosa, paciência e conhecimento compartilhado. Suas sugestões e conselhos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, e estou verdadeiramente grato por sua dedicação.

Agradeço também aos meus amigos e colegas de curso, que estiveram ao meu lado durante todo o processo de pesquisa e elaboração deste TCC. Suas contribuições e discussões enriqueceram meu trabalho e tornaram essa jornada acadêmica mais significativa.

À minha família, especialmente aos meus pais Luiz Fernando Mattera e Valéria Mattera, quero expressar meu profundo agradecimento. Sem seu amor, apoio incondicional e encorajamento, este projeto não teria sido possível. Vocês são minha fonte constante de motivação.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto por proporcionar o ambiente acadêmico propício para o aprendizado e crescimento. Agradeço também a todos os professores que compartilharam seu conhecimento e experiência ao longo deste curso.

Por fim, dedico este trabalho à memória de Vilma Barreiro, que infelizmente não pôde estar presente para ver a conclusão deste projeto. Seu espírito e inspiração continuam a guiar meus esforços.

Mais uma vez, obrigado a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Suas influências e apoio foram essenciais para alcançar este marco em minha jornada acadêmica.

Com profunda gratidão,

Lucca Silva Mattera

RESUMO

A moagem de escória refere-se ao processo de redução do tamanho de partículas de escória, um subproduto resultante da produção de metais, especialmente do processo de fabricação de aço. A escória é composta principalmente por substâncias indesejadas, como impurezas e materiais não metálicos, e sua gestão eficiente é crucial para minimizar o impacto ambiental da indústria metalúrgica. Nesta pesquisa, estudou-se a influência do hidróxido de sódio como ativador na moagem de uma amostra de escória de ferro-liga de manganês. As amostras estudadas passaram por etapas de britagem e moagem com durações de 30, 60 e 120 minutos com e sem a presença do hidróxido de sódio. Os produtos foram avaliados de acordo com a análise granulométrica obtida a partir de peneiramento a úmido e granulômetro a laser, possibilitando comparar os dados das duas caracterizações. Maiores tempos de moagem acarretaram em menores diâmetros de D_{50} e D_{80} em ambos os cenários avaliados (com e sem NaOH). Apenas as moagens de 120 minutos obtiveram material na faixa granulométrica adequada para a produção de geopolímeros. Ficou evidente que a presença do hidróxido de sódio foi prejudicial para a eficiência da moagem, devido à sua alta reatividade com a água, o que causa aglutinação no material mais fino, dificultando a sua moagem em parcelas menores de tamanho.

Palavras-chave: Escória de Alto Forno; Manganês; Hidróxido de Sódio; Granulometria

ABSTRACT

Slag grinding refers to the process of reducing the particle size of slag, a byproduct resulting from the production of metals, especially the steel manufacturing process. Slag is mainly composed of unwanted substances, such as impurities and non-metallic materials, and its efficient management is crucial to minimizing the environmental impact of the metallurgical industry. In this research, we studied the influence of sodium hydroxide as an activator in the grinding of a sample of ferro-manganese alloy slag. The samples studied went through crushing and grinding stages lasting 30, 60 and 120 minutes with and without the presence of sodium hydroxide. The products were evaluated according to the granulometric analysis obtained from wet sieving and laser granulometry, making it possible to compare the data from the two characterizations. Longer grinding times resulted in smaller diameters of D50 and D80 in both scenarios evaluated (with and without NaOH). Only 120-minute grindings obtained material in the particle size range suitable for the production of geopolymers. It was evident that the presence of sodium hydroxide was detrimental to the grinding efficiency, due to its high reactivity with water, or that it causes agglutination in the finer material, making it difficult to grind into smaller portions.

Keywords: Blast Furnace Slag; Manganese; Sodium Hydroxide; Granulometry

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de produção de escória siderúrgica em forno elétrico	14
Figura 2: Gráfico resultante da moagem sem NaOH e da alimentação.....	26
Figura 3: Gráfico resultante da moagem com NaOH e da alimentação	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de diâmetro e massa das bolas do moinho	23
Tabela 2: Valores de D50 e D80 da alimentação e das moagens sem NaOH e com NaOH.	28
Tabela 3: Distribuição granulométrica da escória britada antes da moagem	40
Tabela 4: Distribuição granulométrica da escória móida sem NaOH em 30 minutos.....	41
Tabela 5: Distribuição granulométrica da escória móida sem NaOH em 60 minutos.....	42
Tabela 6: Distribuição granulométrica da escória móida sem NaOH em 120 minutos.....	43
Tabela 7: Distribuição granulométrica da escória móida com NaOH em 30 minutos	44
Tabela 8: Distribuição granulométrica da escória móida com NaOH em 60 minutos	45
Tabela 9: Distribuição granulométrica da escória móida com NaOH em 120 minutos	46

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO.....	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1 Objetivos específicos	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 Escória.....	11
3.1.1 Produção e processo industrial	11
3.1.2 Escória de ferro-ligas de manganês	13
3.1.3 Aplicações industriais de aproveitamento de escória	15
3.2 Geopolímero	17
3.2.2 Matérias-primas e produção de geopolímeros.....	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 Britagem	22
4.2 Moagem.....	22
4.3 Peneiramento.....	24
5. RESULTADOS	25
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	29
7. CONCLUSÕES	32
REFERÊNCIAS	33
APÊNDICE	38
Apêndice A – Fórmulas utilizadas e cálculos realizados.....	38
Apêndice B – Tabelas de distribuição granulométrica	40

1. INTRODUÇÃO

A moagem de escória de ferro-ligas desempenha um papel significativo na indústria, destacando-se não apenas pela produção de materiais finos para diversas aplicações, mas também pela relevância crescente da utilização de resíduos como subprodutos. A transformação eficiente desses subprodutos, como a escória, não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, reduzindo a quantidade de resíduos depositados em aterros, mas também oferece oportunidades para a obtenção de materiais de alto valor (MURARI; SIDDIQUE; JAIN, 2014).

A produção eficiente de geopolímeros advindos da escória de ferro-ligas de manganês demanda uma cuidadosa abordagem no processamento da escória resultante. Dentre as variáveis que impactam esse processo, a escolha de ativadores desempenha um papel crucial. (NAVARRO *et al.*, 2017).

A utilização do hidróxido de sódio como ativador em processos de moagem tem sido objeto de investigação devido às implicações nas propriedades finais do produto. Este trabalho tem como foco a avaliação da influência do hidróxido de sódio como ativador na etapa de moagem da escória de ferro-ligas de manganês. Ao explorar este agente ativador, almeja-se compreender de que forma sua presença influencia a granulometria da escória, buscando otimizar a eficiência do processo.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a influência do hidróxido de sódio na moagem de uma amostra de escória advinda da produção de ferro-ligas de manganês, a partir da análise granulométrica dos produtos.

2.1 Objetivos específicos

- a) Realizar a caracterização granulométrica (via peneiramento a úmido de 3360 a 38 μm , avaliando as partículas inferiores via granulômetro a laser) da amostra de escória de ferro-ligas de manganês antes e após a moagem (em tempos de 30, 60 e 120 minutos), com e sem hidróxido de sódio (na proporção de 6 molar);
- b) Comparar e confrontar os dados obtidos entre as moagens com e sem hidróxido de sódio;
- c) Avaliar a influência do hidróxido de sódio como ativador na moagem, de forma a determinar se sua adição foi positiva ou negativa ao processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Escória

3.1.1 Produção e processo industrial

A escória pode ter origem no processo de redução, durante a fundição do minério de ferro para obtenção do ferro-gusa, como também pode ser oriunda do alto-forno, durante o processo siderúrgico, ou seja, na oficina de fundição ou aciaria (DAVIDOVITS, 2011). Outro processo que gera a escória como subproduto é a produção de ferro-ligas de manganês a partir da fusão e redução das matérias-primas utilizadas. O manganês é usualmente produzido a partir da combinação de minério de manganês, coque e calcário, em um alto-forno ou forno elétrico de arco submerso (BUSCHOW *et al.*, 2001).

Quimicamente, a escória consiste de uma mistura de óxidos metálicos, principalmente óxido de manganês, cálcio, alumínio e magnésio, além do dióxido de silício. É importante salientar que a sua denominação como “rejeito” ou “resíduo” é relativa, pois pode depender de seu uso ou não em outros processos de produção (DAVIDOVITS, 2011).

Existem diferentes métodos de redução com conseqüente geração de escória, e o processo específico pode variar dependendo da tecnologia e do tipo de forno utilizado. O processo inicia-se com a preparação das matérias-primas, onde o minério de manganês é extraído e preparado para o processo de redução. Isso pode incluir a moagem do minério em partículas menores e a remoção de impurezas através de processos de concentração, o minério preparado é então carregado em um alto-forno ou outro tipo de forno metalúrgico. Juntamente com o minério, podem ser adicionados materiais auxiliares, como coque (uma forma de carvão que atua como agente redutor, reagindo com o minério para remover o oxigênio e produzir ferro metálico), o carvão vegetal e fundentes, que reduzem a temperatura de fusão das matérias-primas (AHINDRA GHOSH; AMIT CHATTERJEE, 2015).

O coque é um material obtido a partir do aquecimento do carvão em altas temperaturas, para eliminar impurezas voláteis. O coque é amplamente utilizado como agente redutor na siderurgia porque é rico em carbono. Durante o processo de redução, o carbono do coque reage com o oxigênio presente nos óxidos de ferro, resultando na formação de dióxido de carbono (CO₂) e ferro metálico (AHINDRA GHOSH; AMIT CHATTERJEE, 2015).

O carvão vegetal também pode ser usado como agente redutor na produção de ferro em alguns processos siderúrgicos. Ele é produzido pela queima controlada de madeira ou outros materiais vegetais. Assim como o coque, o carvão vegetal contém carbono, que atua como agente redutor durante o processo de redução (AHINDRA GHOSH; AMIT CHATTERJEE, 2015).

Outro importante componente do processo de produção da escória são os fundentes, que são responsáveis por diminuir as temperaturas de fusão de ligas, o que conseqüentemente gera uma menor demanda de energia pelos fornos usados no processo. De acordo com Silveira *et al.* (1980), a composição apropriada de produção de escória, há de dispor de altas quantidades de cal e magnésia, assim como baixo conteúdo de sílica.

Além da composição das matérias-primas, a temperatura do processo também é importante, sendo da ordem de 1200°C, quando as matérias-primas atingem a temperatura de fusão, separando assim a escória da liga ou ferro metálico: devido à diferença de densidades dos produtos depositados nos cadinhos, a escória é periodicamente coletada por meio de aberturas para vazamento no forno (SENGUPTA, GHOSH, BHATTACHARYA e DAS., 2008)

3.1.2 Escória de ferro-ligas de manganês

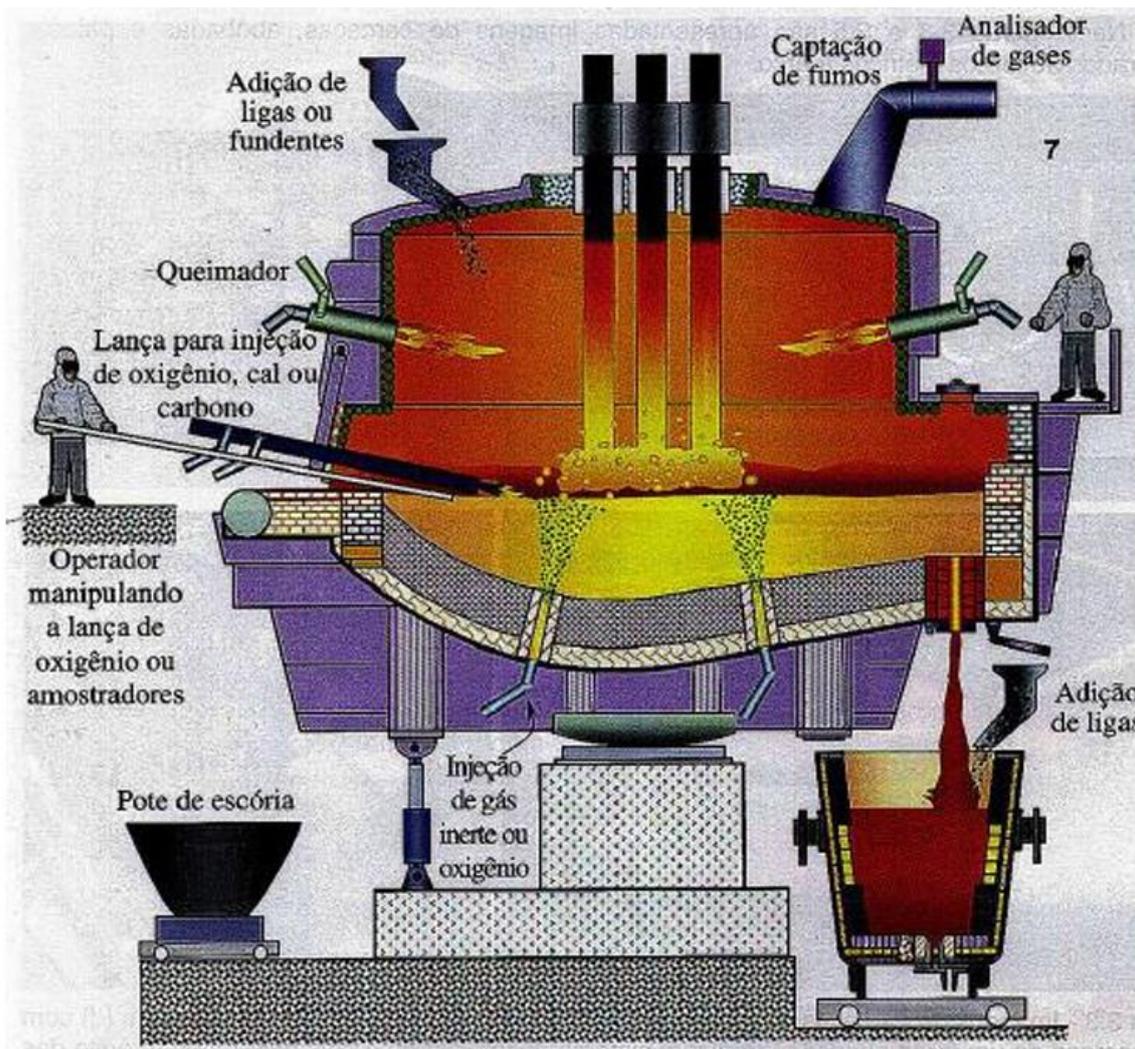
O processo de produção das ferro-ligas de manganês envolve a fusão de minério de manganês com minério de ferro e carbono em fornos elétricos ou altos-fornos. A reação química resultante produz a ferro-liga de manganês e a escória, que é um subproduto (OLSEN *et al.*, 2007). Essa liga metálica possui diversos fins industriais, sendo comumente adicionada ao aço para melhorar suas propriedades, como resistência à corrosão, dureza e resistência ao desgaste (TOTTEN, 2007).

A escória é formada pela combinação dos resíduos e impurezas presentes nos minérios, bem como pelo material fundido durante o processo. É uma substância de composição complexa, geralmente rica em óxidos de ferro, manganês, silício, alumínio e outros elementos presentes nos minérios (OLSEN *et al.*, 2007).

As principais matérias-primas utilizadas na produção de escórias de ferro-ligas de manganês são o minério de manganês, o minério de ferro, que é um componente essencial das ligas de ferro-ligas de manganês, o coque, utilizado como combustível e fonte de carbono para a redução dos minérios, e os fundentes (MERETE TANGSTAD, 2013). Esses materiais são combinados e aquecidos a temperaturas da ordem de 1200°C, na qual ocorre a fusão e geração dos produtos (GHOSH, CHATTERJEE, 2008).

A Figura 1 ilustra o processo de formação de escória em um forno elétrico. Os resíduos sólidos presentes na carga metálica, como minérios e impurezas, reagem com os óxidos presentes no fundente adicionado ao forno. Essa reação provoca a fusão dos resíduos sólidos e a formação de uma substância líquida e vítreo-cristalina, conhecida como escória, que flutua sobre o metal líquido, ajudando a purificar o metal e protegê-lo da oxidação (AHINDRA GHOSH; AMIT CHATTERJEE, 2015).

Figura 1: Esquema de produção de escória siderúrgica em forno elétrico



Fonte: RAMOS, 2013

Na separação, fase posterior a fusão, a escória líquida, que contém impurezas e subprodutos indesejáveis, é separada do metal líquido através de processos de separação física, como a gravidade ou a utilização de dispositivos de separação, como painéis de escória. Após essa etapa, ocorre o resfriamento e solidificação, onde a escória líquida é resfriada e solidificada, geralmente em grandes piscinas ou em tambores resfriados. Isso resulta na formação de escória sólida (MERETE TANGSTAD, 2013).

O maquinário utilizado na produção de escórias de ferro-ligas de manganês pode variar dependendo da escala da operação e das preferências da empresa. Alguns exemplos de equipamentos que podem ser utilizados incluem alto-fornos, fornos elétricos, painéis de escória, tambores resfriados, entre outros (MERETE TANGSTAD, 2013).

3.1.3 Aplicações industriais de aproveitamento de escória

Em 2016, na China, a produção de escória atingiu mais de 100 milhões de toneladas, mas sua taxa de utilização é de apenas 29,5%. A partir de 2016, mais de 300 milhões de toneladas de escória de aço não foram usadas de forma eficaz. Grandes emissões de escória de aço estão causando problemas ambientais para no país. A taxa de utilização da escória de aço da China é baixa em comparação com a de outros países: a taxa de utilização é de 98,4% no Japão, 87,0% na Europa e 84,4% nos Estados Unidos (GUO; BAO; WANG, 2018).

Dentre as opções para a disposição final desses resíduos, a aplicação em outro segmento industrial é a opção mais interessante, abrangendo benefícios econômicos, ambientais e frequentemente sociais. Entretanto, no Brasil, a destinação mais comum ainda é por meio de sua disposição em aterros, sendo classificados como passivo ambiental (PIRES & MATTIAZZO., 2008).

A escória siderúrgica tem apresentado bom desempenho no que diz respeito ao tratamento ambiental. Trata-se de um recurso acessível e relativamente eficaz para aprimorar o tratamento de água, corrigir solos e controlar as emissões de gases do efeito estufa. No entanto, é importante ressaltar que sua aplicação na área ambiental ainda está em estágio inicial, sendo necessários esforços adicionais para ampliar e aprofundar seu uso (ZHANG *et al.*, 2019).

A escória siderúrgica, possui diversas aplicações industriais, como em agregados para construção civil, sendo utilizada como um substituto parcial do agregado natural em concreto e argamassa. Isso melhora as propriedades mecânicas e durabilidade desses materiais (IVANKA NETINGER GRUBEŠA et al., 2016).

A escória de alto-forno também pode ser empregada na fabricação de cimento, implicando em melhores propriedades físicas, como resistência à compressão e durabilidade (LIU; YU; WANG, 2020). A escória siderúrgica também pode ser usada como material de pavimentação em estradas. Ela contribui para a resistência mecânica e durabilidade do pavimento. Na Alemanha, em 1998, cerca de 97% das escórias de aço produzidas foram usadas como agregados para construção de estradas (por exemplo, como camada superficial, base de estradas e sub-base para estradas de alto tráfego), caminhos, terraplenagem e pedras blindadas para estruturas hidráulicas (MOTZ; GEISELER, 2001).

Na fabricação de fertilizantes, a escória siderúrgica pode ser tratada e utilizada como um fertilizante rico em nutrientes para o solo. Isso promove o crescimento das plantas e melhora a qualidade do solo. A aplicação de escória de siderurgia reduz a acidez do solo, aumentando a disponibilidade de silício para as plantas, promovendo o seu desenvolvimento (NING *et al.*, 2016). Outra aplicação desse material no segmento agrícola diz respeito à remediação de solos contaminados por metais pesados, atuando como um agente adsorvente, removendo os contaminantes do solo e aumentando significativamente os valores de pH do solo (GU *et al.*, 2013).

As escórias ainda têm uso na indústria de transporte, em vez de se utilizar agregados naturais e contribuir para o esgotamento dos recursos, é possível empregar subprodutos industriais, como a escória de aço, como alternativa viável. A escória de aço possui características proeminentes que a tornam um agregado ideal para materiais de superfície asfáltica e tratamentos de estradas (LIM *et al.*, 2016).

Tratando-se exclusivamente da escória de aciaria, avalia-se sua aplicação em misturas de construção rodoviária, acarretando em melhores índices termos de estabilidade, rigidez e durabilidade. Além disso, a utilização da escória asfáltica influencia positivamente na redução de ruído, aumento da resistência à fissuração em baixas temperaturas, desempenho notável em rugosidade e uma sólida resistência à permeabilidade à água, como era esperado (LIM *et al.*, 2016).

3.2 Geopolímeros

3.2.1 Origem e aplicações

O termo geopolímero foi concebido por Joseph Davidovits, cientista de materiais francês, durante a década de 1970, considerado o pai da química dos geopolímeros. O prefixo “geo” advém do fato do geopolímero ser um material constituído principalmente de aluminossilicatos junto da circunstância de que a crosta terrestre é predominantemente composta de alumínio e silicato. O sufixo “polímero” faz referência ao processo de produção do geopolímero, conhecido como polimerização (DAVIDOVITS, 2011).

Os geopolímeros são materiais inorgânicos poliméricos de origem mineral, resultantes de reações químicas, composto por uma rede de aluminossilicatos, podendo ser fabricados por qualquer material que tenha quantidades suficientes de silício e alumínio. Com forma similar aos polímeros comuns, os geopolímeros são constituídos por longas cadeias que acabam por se repetir por toda a extensão de sua estrutura. Se caracterizam pela elevada resistência mecânica ao fogo, ao congelamento e descongelamento, além de alta inércia química; sendo interessantes para diversos segmentos industriais, como a construção civil (PROVIS; DEVENTER, 2009).

No contexto atual, é essencial ressaltar o papel do cimento geopolimérico, também conhecido como geopolímero ou polímero inorgânico, como um material promissor e sustentável. Ao contrário do cimento Portland convencional, o cimento geopolimérico é composto por elementos precursores derivados de resíduos industriais ou materiais pozolânicos, juntamente com ativadores alcalinos. Esses betões geopoliméricos são considerados ligantes de alto desempenho (CABALLERO, 2017).

De acordo com Alves (2013), a produção de cimentos geopoliméricos requer, em média, 90% menos energia do que a produção de cimento Portland, além de resultar em baixas emissões de carbono na atmosfera. Essa redução significativa no consumo de energia e nas emissões de carbono faz do cimento geopolimérico uma escolha vantajosa e ecologicamente sustentável em comparação com o cimento convencional.

O concreto geopolimérico pode ser produzido a partir de materiais reciclados, como cinzas volantes, o que torna uma opção sustentável para a construção de estruturas de edifícios, substituindo o concreto convencional. Ele oferece resistência mecânica e durabilidade comparáveis, além de uma vida útil mais longa devido à sua alta resistência química. Esse material também possui considerável resistência ao fogo, tornando-se uma opção atraente para a construção de edifícios mais seguros (SHEHATA *et al.*, 2022). Esse material também tem aplicações promissoras na pavimentação de estradas e rodovias (devido à resistência mecânica e durabilidade), bem como na construção de pontes, túneis e barragens, que envolvem exposição à água e agentes químicos (HARDJITO, *et al.*, 1991; DAVIDOVITS, 2011).

3.2.2 Matérias-primas e produção de geopolímeros

Os geopolímeros se caracterizam pela estrutura semicristalina obtida a partir o processo de polimerização de duas principais classes de matérias-primas: os precursores, que atuam como fonte de aluminossilicatos; e os ativadores alcalinos que podem ser o silicato de sódio ou hidróxido de metais alcalinos (DAVIDOVITS, 1991).

Tratando-se dos precursores, pertencem a esse grupo: as cinzas volantes (subprodutos da queima de carvão em usinas termoelétricas, contêm sílica e alumina), as escórias de alto-forno (subproduto da produção de ferro em alto-forno, contendo óxidos de cálcio, sílica e alumina), as escórias da produção de ferro-ligas (podem ser utilizadas como precursores de geopolímeros através de um processo de ativação alcalina) e o metacaulim (pode ser um subproduto da indústria cimenteira, material pulverulento derivado da calcinação de caulim, é rico em sílica e alumina (DAVIDOVITS, 1991; PROVIS, DEVENTER, 2009).

Quanto aos ativadores, têm-se os materiais alcalinos, como hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃). Esses materiais são geralmente fornecidos na forma líquida ou em pó. No caso do hidróxido de sódio em pó, por exemplo, a granulometria pode variar de acordo com o fabricante, mas é comum encontrar tamanhos de partículas na faixa de 100 a 500 micrômetros (PROVIS; BERNAL, 2014). As proporções e combinações desses materiais podem variar dependendo da aplicação desejada e das características desejadas do geopolímero final.

Os ativadores atuam na superfície dos precursores por meio de um processo chamado ativação alcalina. Por serem geralmente soluções alcalinas, os ativadores entram em contato com os precursores e causam uma reação química que leva à formação da matriz do geopolímero. Essa ativação é essencial para iniciar as reações de polimerização e reticulação, resultando em um material sólido com características de resistência mecânica e durabilidade (PROVIS; JAN VAN DEVENTER, 2009).

Durante o processo de ativação, na reação dos ativadores com os precursores, formam-se cadeias poliméricas tridimensionais, semelhantes às encontradas na estrutura de materiais à base de cimento convencionais. A principal diferença é que os geopolímeros são formados em condições alcalinas, enquanto os cimentos tradicionais são produzidos em meio ácido. Essa alcalinidade é proporcionada pelos ativadores e é fundamental para a obtenção das propriedades desejadas nos geopolímeros (DAVIDOVITS, 2011).

Durante a ativação alcalina superficial, ocorre também a dissolução de íons de silício e alumínio presentes nos materiais iniciais, formando espécies químicas que são precursoras da rede polimérica. Essas espécies são, então, polimerizadas através de reações químicas, como a condensação de silanol (Si-OH) e a condensação de alumínio (Al-OH), resultando em ligações Si-O-Al. Esse processo de polimerização é facilitado pelos íons alcalinos presentes nos ativadores, que atuam como catalisadores das reações (HARDJITO, *et al.*, 2004).

A granulometria dos materiais usados para a produção de geopolímeros pode variar dependendo da aplicação específica e dos requisitos do projeto (DAVIDOVITS, 1991). Os materiais aluminossilicatos, como cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim, geralmente possuem uma granulometria média menor que 100 micrômetros (HARDJITO; RANGAN, 2005).

Quando se trata de geopolímeros, é essencial obter uma granulometria adequada para garantir a reatividade e a eficiência do processo de formação do geopolímero (DAVIDOVITS, 1991). A granulometria ideal para geopolímeros alcalinos envolve o uso de partículas com um tamanho médio inferior a 63 micrômetros. Isso permite uma distribuição mais homogênea das partículas no sistema, melhorando as propriedades do geopolímero (GRANT NORTON; PROVIS, 2020). Uma granulometria inadequada pode levar a problemas como segregação de partículas, dificuldade na dispersão das partículas na matriz e influência negativa nas propriedades finais do geopolímero (DJWANTORO HARDJITO; RANGAN, 2005).

A moagem dos materiais é realizada para reduzir o tamanho das partículas e obter uma distribuição mais uniforme. Isso aumenta a área superficial disponível para reações químicas e melhora a reatividade dos materiais durante a formação do geopolímero. Além disso, a moagem adequada ajuda a garantir a homogeneidade da mistura, o que é essencial para a obtenção de propriedades consistentes e controladas nos geopolímeros (PROVIS; JAN VAN DEVENTER, 2009).

O estudo conduzido por Pacheco-Torgal *et al* (2008) aborda a evolução da pesquisa sobre ativação alcalina, enfatizando a contribuição significativa de Purdon (1940) na promoção desse tópico. Purdon (1940) desenvolveu um sistema de álcali ativo empregando escória de alto-forno e hidróxido de sódio. Com base nas propriedades dessa combinação, a reação entre as substâncias ocorria em duas fases distintas: (I) a liberação de silicato de alumínio, hidróxido de cálcio e sódio; e (II) a formação de óxidos de silício e alumínio, juntamente com a regeneração da solução alcalina. De acordo com Provis & Bernal (2014), Purdon comercializou esses materiais na Bélgica durante a década de 1950, contribuindo para a construção de diversos edifícios que ainda permanecem de pé até os dias atuais, completando 60 anos desde sua construção.

Além da ativação alcalina, os geopolímeros podem ser produzidos utilizando outros mecanismos, como a ativação ácida, a ativação híbrida e a ativação térmica (PROVIS; JAN VAN DEVENTER, 2009). A produção de geopolímeros por meio da ativação ácida envolve a reação de um material precursor, geralmente uma cinza volante rica em sílica e alumina, com um ácido, como o ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou o ácido clorídrico (HCl). Essa reação ácido-base leva à formação de ligações químicas tridimensionais, resultando em uma matriz geopolimérica sólida. A ativação ácida geralmente requer temperaturas elevadas para promover a reação e a formação dos geopolímeros (BAKHAREV, 2005).

A ativação híbrida combina a ativação alcalina e ácida para produzir geopolímeros. Nesse processo, o material precursor é ativado primeiro com uma solução alcalina, como uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH), seguido pela adição de um ácido, como ácido sulfúrico ou ácido clorídrico. A combinação dessas duas etapas de ativação ajuda a otimizar as propriedades dos geopolímeros resultantes, como a resistência mecânica e a estabilidade química (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ; PALOMO, 2005).

Em um estudo realizado por Woshington da Silva Brito *et al.* (2020), foi observado que a adição de NaOH em concentrações de 5M e 15 molares durante a síntese resultou em uma maior resistência à compressão. No entanto, concentrações mais altas, como 30 e 40 molares, interferiram negativamente na reação, resultando em geopolímeros com baixa resistência à compressão.

A ativação térmica envolve o aquecimento do material precursor a temperaturas elevadas, geralmente acima de 800°C, sem a adição de reagentes ativadores externos. Durante o processo de aquecimento, ocorrem reações de desidratação e polimerização, levando à formação de geopolímeros. A ativação térmica é comumente utilizada para transformar argilas ricas em alumina e sílica em geopolímeros (GRANT NORTON; PROVIS, 2020).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais utilizados e os métodos empregados na realização deste estudo, com o intuito de fornecer uma base sólida para a compreensão das etapas seguidas durante a pesquisa.

O objetivo deste capítulo é permitir a reprodução e validação dos resultados, além de proporcionar uma visão geral das técnicas e instrumentos utilizados. Serão apresentados tanto os materiais empregados para a coleta de dados quanto os métodos de análise adotados para extrair informações relevantes.

4.1 Britagem

Inicialmente, a escória de ferro-ligas de manganês foi submetida ao processo de britagem, utilizando os britadores de mandíbulas (abertura de 11 mm) e rolos lisos (abertura de 5 mm), para redução do tamanho das partículas. Toda a amostra foi britada, como forma de preparação para a etapa subsequente que foi o alvo desse trabalho, a moagem.

Foi realizado um peneiramento com uma amostra da escória britada, antes de ser levada à etapa de moagem, onde foi realizada a análise granulométrica do peneiramento. A etapa de britagem foi realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN – UFOP).

4.2 Moagem

Após a britagem, a amostra britada foi submetida à moagem em um moinho de bolas em dois cenários: com e sem adição de hidróxido de sódio (NaOH). A quantidade de NaOH usada foi de 154,2 gramas, em estado sólido. Essa quantidade de NaOH utilizada é baseada no trabalho de Kumar *et al.* (2013), onde a escória foi ativada com NaOH na concentração equivalente a 6M, com uma relação entre sólido e líquido de 0,3. Os cálculos para a determinação na quantidade de NaOH estão no Apêndice A.

Foram calculadas as massas de bolas e escória necessárias, considerando-se um percentual de enchimento de 30%, conforme apresentado no Apêndice A.

Os diâmetros das bolas utilizadas foram escolhidos considerando mecanismos de quebra de cisalhamento, impacto e abrasão. Diâmetros diferentes de bolas são utilizados em moinhos para otimizar a eficiência da moagem e controlar o tipo de mecanismo de quebra predominante (WILLS; FINCH, 2016).

Bolas maiores possuem maior energia cinética quando colidem com o material a ser moído. Essas colisões de alta energia resultam em um mecanismo de quebra por impacto, onde a energia da colisão é transferida para o material, causando fraturas. Bolas maiores têm maior capacidade de quebrar partículas maiores e mais resistentes (WILLS; FINCH, 2016).

Bolas menores, por outro lado, podem se alojar entre as partículas de material e causar um processo de quebra mais suave por cisalhamento. O cisalhamento ocorre quando as bolas pequenas aplicam forças tangenciais às partículas, causando sua separação em camadas ou fissuras. Esse mecanismo é especialmente eficaz para materiais frágeis ou quebradiços (WILLS; FINCH, 2016).

Além dos mecanismos de impacto e cisalhamento, bolas menores também podem promover desgaste e abrasão nas partículas de material. À medida que as bolas rolam e deslizam ao longo do material, elas podem remover camadas superficiais, resultando na quebra gradual das partículas. Isso é mais eficaz com bolas menores devido à maior área de contato (WILLS; FINCH, 2016).

Logo, considerando os mecanismos de impacto, cisalhamento e abrasão, foram escolhidos os diâmetros e as massas correspondentes de cada diâmetro de bola. A relação está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Relação de diâmetro e massa das bolas do moinho

Diâmetro (mm)	Massa (g)
22	3024
19	2000
15	2000
12	700

Foram considerados três níveis para a variável tempo de moagem: 30, 60 e 120 minutos. A velocidade utilizada foi de 66 rpm, como 70% da velocidade crítica e considerando a fórmula consolidada de velocidade crítica (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). O cálculo da velocidade crítica encontra-se no Apêndice A.

Após cada moagem, retirou-se a amostra do moinho, para se realizar o quarteamento do material resultante, de forma a se obter uma amostra representativa que foi usada nas posteriores análises granulométricas.

Os ensaios de moagem foram realizados no Laboratório de Tratamento de Minérios (DEMIN – UFOP).

4.3 Peneiramento

Para avaliar o desempenho das etapas de britagem e moagem, os respectivos produtos foram submetidos ao processo de peneiramento a úmido, utilizando uma série de peneiras com aberturas de 2000 a 38 μm . As amostras retidas em cada peneira foram coletadas e pesadas para determinação da distribuição granulométrica. As frações inferiores a 38 μm foram analisadas no granulômetro a laser Cilas 1064, do Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN – UFOP).

5. RESULTADOS

Os dados referentes à análise granulométrica dos produtos nas condições com e sem NaOH, além da análise granulométrica da escória britada (alimentação da moagem), foram organizados nas tabelas apresentadas no Apêndice B, a partir do qual foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras 2 e 3.

A Figura 2 apresenta o gráfico resultante da moagem sem NaOH, apresentados de maneira comparativa com a análise granulométrica da alimentação do processo. Nota-se que, após britada, a amostra de escória apresentava 80% das partículas com diâmetro inferior a 2850 μm ($d_{80} = 2850 \mu\text{m}$), enquanto 50% das partículas eram inferiores a 1100 μm ($d_{50} = 1100 \mu\text{m}$). Após 30 minutos de moagem, os novos números obtidos para d_{80} e d_{50} foram de, respectivamente, 900 e 275 μm . Para a moagem com tempo de 60 minutos, a amostra mostrou o valor de d_{80} como sendo de 600 μm e de d_{50} como sendo de 125 μm , enquanto para a moagem com duração de 120 minutos, os valores de d_{80} e d_{50} foram de 100 μm e de 48 μm , respectivamente.

Na Figura 3, o gráfico resultante da moagem com o uso de NaOH é comparado à análise granulométrica da alimentação do processo. Observa-se que, após a britagem, 80% das partículas na amostra de escória tinham um diâmetro inferior a 2850 μm ($d_{80} = 2850 \mu\text{m}$), sendo que 50% das partículas eram menores que 1100 μm ($d_{50} = 1100 \mu\text{m}$). Após 30 minutos de moagem, os novos valores para d_{80} e d_{50} foram, respectivamente, 1000 μm e 575 μm . Para a moagem de 60 minutos, a amostra apresentou d_{80} de 800 μm e d_{50} de 175 μm , enquanto a moagem de 120 minutos resultou em valores de d_{80} e d_{50} de 200 μm e 80 μm , respectivamente.

Figura 2: Gráfico resultante da moagem sem NaOH e da alimentação

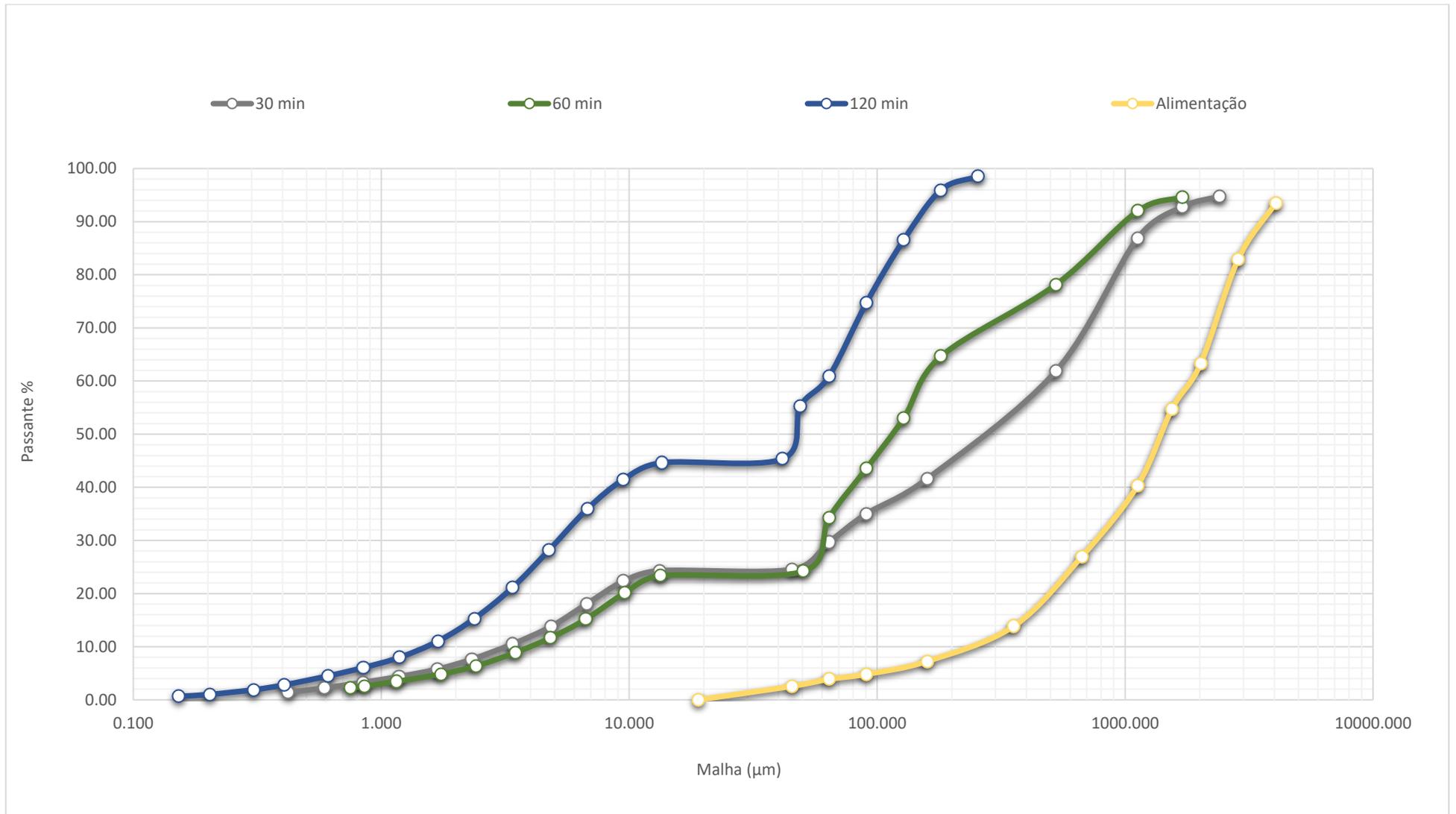
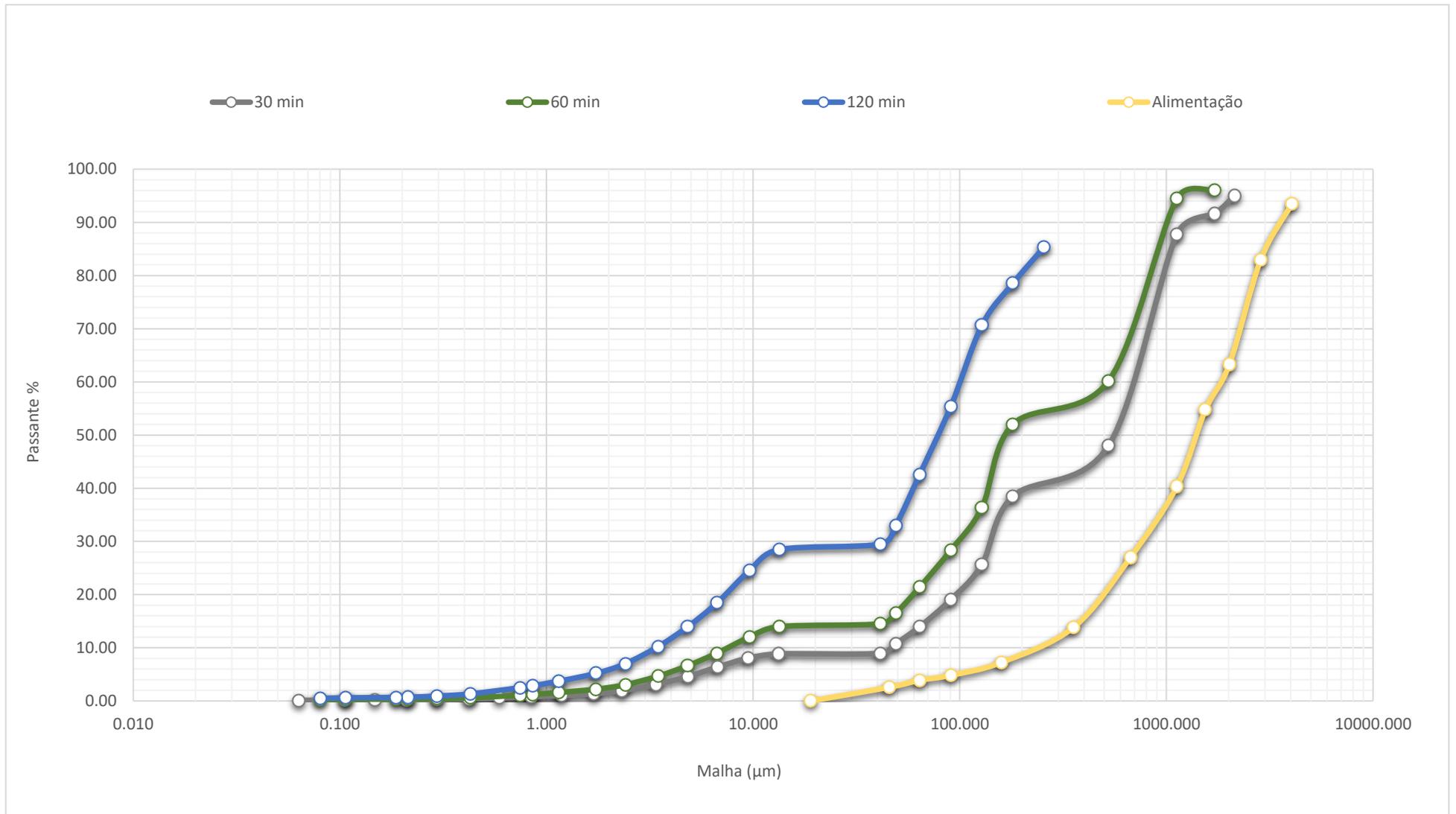


Figura 3: Gráfico resultante da moagem com NaOH e da alimentação



A partir dos gráficos apresentado na Figura 2 e 3, foi possível conceber uma tabela com os valores de d_{50} e d_{80} das moagens sem NaOH e com NaOH, assim como o da alimentação. Os dados estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de D50 e D80 da alimentação e das moagens sem NaOH e com NaOH.

Parâmetros de moagem	d_{50} (μm)	d_{80} (μm)
Alimentação da moagem	2850	1100
30 min sem NaOH	275	800
60 min sem NaOH	125	600
120 min sem NaOH	48	100
30 min com NaOH	575	1000
60 min com NaOH	175	800
120 min com NaOH	80	200

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A granulometria ideal para a produção de geopolímeros a partir de escória pode variar dependendo das características específicas da escória e dos requisitos do projeto. No entanto, geralmente existem faixas de distribuição granulométrica que são consideradas adequadas para a produção de geopolímeros. As especificações exatas podem variar com base no tipo de escória, no processo de fabricação e nas propriedades desejadas do geopolímero final. Uma faixa de tamanho de partículas entre 0,1 μm e 100 μm é a mais apropriada para a produção de geopolímeros com cinzas volantes e metacaulim, por exemplo (DAVIDOVITS, 1991).

De acordo com Zhang *et al.* (2020), o geopolímero feito com escória granulada de alto forno moída (GAFM) e resíduos de vidro de tamanho de partícula menor ($d_{50} = 49,2 \mu\text{m}$) alcançou maior resistência à compressão. Em outro estudo de Huang *et al.* (2015), descobriu-se que o tamanho das partículas dos pós de escória de alto forno entre 0,053 mm e 0,075 mm, influenciava de maneira positiva no parâmetro resistência à compressão do geopolímero. Furlani *et al.* (2018), também observaram que o uso de pós finos de escória de aço levou a um melhor desempenho em geopolímeros.

Para muitos casos de uso de geopolímeros, uma faixa de d_{50} entre 20 e 55 micrômetros é comum. Essa faixa de tamanho de partícula é geralmente considerada adequada para promover uma reação eficaz entre a escória e os ativadores alcalinos na fabricação do geopolímero. Outros estudos indicam granulometrias menores que 10 micrômetros, mas tudo depende das especificações do projeto (KOHOUT *et al.*, 2023; MEHMET EMIN KÜÇÜK *et al.*, 2021).

No que diz respeito ao D_{80} , valores entre 110 μm e 60 μm são considerados adequados para produzir compósitos geopoliméricos devido ao sua alta área superficial específica com tamanhos de partículas correspondentemente pequenos (MEHMET EMIN KÜÇÜK *et al.*, 2021).

Em ambos os gráficos (Figuras 2 e 3) foi analisado a porcentagem de material que estava abaixo de 20 micrômetros, visto que esta fração está mais indicada para produção de geopolímeros. No gráfico de distribuição granulométrica para a moagem sem NaOH, as porcentagens foram de 25%, 25% e 45% para os tempos de 30, 60 e 120 minutos respectivamente. No gráfico da moagem com o NaOH, as porcentagens foram de 9%, 14% e 29% para os tempos de 30, 60 e 120 minutos respectivamente. A amostra da alimentação apresentou 0% do material abaixo de 20 μm .

Notou-se que maiores tempos de moagem acarretaram em menores valores de d_{80} e d_{50} , independente da presença ou não do ativador hidróxido de sódio. Quanto à influência do NaOH, observou-se que a presença do ativador influenciou negativamente nos valores de d_{80} e d_{50} .

Outro ponto a se destacar na análise do gráfico da moagem sem NaOH é a semelhança das curvas de 30 minutos e 60 minutos, com as curvas sendo praticamente idênticas até a malha de 70 μm . As curvas distanciam-se de 70 μm até 1000 μm , quando voltam a se aproximar na fração mais grossa.

Nas curvas do gráfico da moagem com NaOH, as curvas de 30 e 60 minutos não se assemelham como na moagem sem NaOH, porém ficam bem próximas na fração de 700 μm até 1000 μm .

Confrontando os dois gráficos obtidos, nas curvas de 120 minutos, percebe-se que a porcentagem de passante na fração de 256 μm é maior na moagem sem NaOH do que na moagem com NaOH, com diferença de 13,18 %.

As curvas de 30 e 60 minutos, quando confrontadas, apresentam menores porcentagens nas frações mais finas na moagem com NaOH do que na moagem sem NaOH, porém a moagem sem NaOH mostra frações menores de passante, quando comparada com a moagem com NaOH.

Analisando as porcentagens de material de ambas as moagens que se encaixam na faixa granulométrica ótima para a produção de geopolímeros, que vai de 0,1 μm até 100 μm , de acordo com Davidovits (1991), percebe-se que apenas a moagem de 120 minutos sem NaOH apresenta d_{80} no valor de 100 μm . Na moagem de 120 minutos com NaOH, o d_{50} foi de 80 μm , que se encaixa na faixa ótima, atendendo a granulometria ótima para a produção de geopolímeros.

Ficou evidente que o hidróxido de sódio influenciou de maneira negativa na moagem da escória. De acordo com Brown e Lufaso (2019), o hidróxido de sódio é uma substância altamente higroscópica, o que significa que tem uma afinidade natural pela água e absorve umidade do ambiente. Isso ocorre devido à sua natureza iônica e à formação de ligações de hidrogênio com as moléculas de água.

Um estudo por Saramak e Kleiv (2013) mostra que é necessária uma quantidade limitada de umidade na alimentação para maximizar a taxa de redução do circuito de moagem. A existência de um valor ótimo é demonstrada, uma vez que a umidade excessiva produz claramente uma rápida diminuição nas taxas de redução do tamanho de partículas.

7. CONCLUSÕES

A moagem de escória desempenha um papel vital na indústria, especialmente na produção de cimento, onde a escória, um subproduto da metalurgia, revela propriedades cimentícias valiosas. A moagem eficiente da escória não só aprimora as características do cimento, como resistência e durabilidade, mas também contribui para a sustentabilidade, reduzindo a demanda por recursos naturais e mitigando as emissões de CO₂ associadas à produção de cimento. A incorporação da escória moída maximiza o aproveitamento de resíduos industriais, alinhando-se com os princípios ambientais essenciais para a indústria da construção.

Ao confrontar os dados da caracterização das moagens com e sem NaOH, observa-se que a moagem com NaOH foi menos efetiva em durações e condições equivalentes. Isso pode ser atribuído às propriedades higroscópicas do hidróxido de sódio, tornando-o menos eficaz. Além disso, a necessidade de uma quantidade específica de umidade para maximizar a efetividade da moagem, conforme indicado pelo trabalho de Saramak e Kleiv (2013), pode ter contribuído para a menor efetividade do NaOH.

É evidente que o controle preciso das condições do processo, incluindo a taxa de umidade, é crucial para otimizar a eficiência da moagem. A observação de que apenas as moagens de 120 minutos atingiram material abaixo de 100 µm, conforme a faixa ótima definida por Davidovits (1991), destaca a importância de ajustar cuidadosamente esses parâmetros. Assim, a busca por uma taxa de umidade ótima emerge como um ponto crítico, exigindo uma abordagem mais refinada para alcançar resultados mais consistentes e melhorar a compreensão do processo de moagem de escória.

REFERÊNCIAS

- AHINDRA GHOSH; AMIT CHATTERJEE. Ironmaking and steelmaking: theory and practice. New Delhi: Prentice-Hall Of India, 2015.
- ALMEIDA, G. M., 2014. Utilização de escória produzida em alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, Belém.
- ALMEIDA, G. M., 2014. Utilização de escória produzida em alto-forno a carvão vegetal como agregado graúdo e miúdo para concreto. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, Belém.
- ALMEIDA, M. C. A., 2017. Powder de Escória de Aciaria em Concreto de Alto Desempenho. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- ALVES, T.M.R.; Potencial refratário de concretos geopoliméricos. Trabalho de conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.
- AMÉLIA M.M. PIRES; MARIA EMÍLIA MATTIAZZO. Avaliação da viabilidade do uso de resíduos na agricultura . 18 dez. 2008.
- BANNISTER, T. C.; GIEDION, S. Space, Time and Architecture, the Growth of a New Tradition. The Art Bulletin, v. 26, n. 2, p. 134, jun. 1944.
- BEZERRA, I. M. T., COSTA, D. L., VITORINO, J. P. M., MENEZES, R. R., NEVES, G. A., 2013. Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v.8.2 (2013) 101 –105. www.dema.ufcg.edu.br.
- BAKHAREV, T. (2005). Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack. Cement and Concrete Research, 35, 658-670. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>
- BRITO, W. S.; RACANELLI, L. DE A.; SOUZA, J. A. DA S. Geopolimerização de lama vermelha: influência da concentração de naoh na síntese à temperatura ambiente. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 1, 2020.
- BROWN, T. L.; LUFASO, M. W. Chemistry: the central science. Harlow, Essex: Pearson, 2019.
- BUSCHOW, K. H. J. Encyclopedia of materials : science and technology. Oxford: Elsevier, 2001.
- CABALLERO, L. R. Comportamento Físico-Mecânico de matrizes geopoliméricas à base de metacaulim reforçadas com fibra de aço. pantheon.ufrj.br, 1 nov. 2017.
- CASTRO, V. G., 2021. Cimento Portland. In: Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro [online]. Mossoró: EdUFERSA, pp. 13-21. ISBN: 978-65-87108-26-1. <https://doi.org/10.7476/9786587108612.0002>.
- DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and calorimetry**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.
- DAVIDOVITS, J. Geopolymer: Chemistry & Applications. 2011.

DJWANTORO HARDJITO; RANGAN, B. V. DEVELOPMENT AND PROPERTIES OF LOW-CALCIUM FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE. 1 jan. 2005.

FATTORE, E., et al. 2020. Air Pollution from Industrial Waste Incineration. In: Air Quality in Eastern Europe. Springer, Cham.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 10, p. 1984–1992, out. 2005.

FUERSTENAU, D. W.; ABOUZEID, A.-Z..M. Role of feed moisture in high-pressure roll mill comminution. International Journal of Mineral Processing, v. 82, n. 4, p. 203–210, jun. 2007.

FURLANI, E. et al. Synthesis and characterization of geopolymers containing blends of unprocessed steel slag and metakaolin: The role of slag particle size. Ceramics International, v. 44, n. 5, p. 5226–5232, abr. 2018.

GHOSH, A.; CHATTERJEE, A. IRON MAKING AND STEELMAKING: THEORY AND PRACTICE. [s.l.] PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.

GLIGANIĆ, V. S., JOVANOVIĆ, S. Z., KOSTIĆ, R. LJ., 2012. Slag composition of a new low-carbon vanadium-bearing ferroalloy. Metallurgical and Materials Engineering, 18(1), 57–67.

GRANT NORTON, M.; PROVIS, J. L. 1000 at 1000: Geopolymer technology—the current state of the art. Journal of Materials Science, v. 55, n. 28, p. 13487–13489, 25 jun. 2020.

GU, H. H. et al. Remediation Effects of Steel Slag and Fly Ash on Heavy Metal Contaminated Acidic Soil. Advanced Materials Research, v. 647, p. 726–731, jan. 2013.

GUO, J.; BAO, Y.; WANG, M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. Waste Management, v. 78, p. 318–330, ago. 2018.

HARDJITO, D; RANGAN, B. V. Development And Properties Of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. 2005.

HARDJITO, D; WALLAH, S. E; SUMAJOUW, D. M. J; RANGAN, B. V. On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. ACI Materials Journal, v. 101, n. 6, 2004.

HUANG, X. et al. Preparation and properties of geopolymer from blast furnace slag. Materials Research Innovations, v. 19, n. sup10, p. S10-413S10-419, 14 dez. 2015.

IVANKA NETINGER GRUBEŠA et al. Characteristics and uses of steel slag in building construction. Amsterdam: Woodhead Publishing Is An Imprint Of Elsevier, 2016.

JANSON, H. W.; JANSON, A. F. History of art. London: Thames And Hudson, 1997.

KOHOUT, J. et al. Effect of Aluminosilicates' Particle Size Distribution on the Microstructural and Mechanical Properties of Metakaolinite-Based Geopolymers. Materials, v. 16, n. 14, p. 5008, 1 jan. 2023.

KUMAR, S. et al. Development of alkali activated cement from mechanically activated silico-manganese (SiMn) slag. Cement and Concrete Composites, v. 40, p. 7–13, jul. 2013.

LEHNER, M. The complete pyramids. London: Thames & Hudson, Cop, 2008.

- LIANG, Y. et al. Biochar- and phosphate-induced immobilization of heavy metals in contaminated soil and water: implication on simultaneous remediation of contaminated soil and groundwater. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, n. 6, p. 4665–4674, 19 dez. 2013.
- LIM, J. W. et al. Overview of Steel Slag Application and Utilization. *MATEC Web of Conferences*, v. 74, p. 00026, 2016.
- LIU, J.; YU, B.; WANG, Q. Application of steel slag in cement treated aggregate base course. *Journal of Cleaner Production*, v. 269, p. 121733, out. 2020.
- LUZ, A. B. DA; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. [s.l.] CETEM/MCT, 2010.
- MEHMET EMIN KÜÇÜK et al. Characterisation of Industrial Side Streams and Their Application for the Production of Geopolymer Composites. *Minerals*, v. 11, n. 6, p. 593–593, 31 maio 2021.
- MELLAART, J. Çatal Hüyük. [s.l.] London: Thames and Hudson, 1967.
- MERETE TANGSTAD. Handbook of Ferroalloys. [s.l.] Elsevier Inc. Chapters, 2013.
- MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste Management*, v. 21, n. 3, p. 285–293, jun. 2001.
- MURARI, K.; SIDDIQUE, R.; JAIN, K. K. Use of waste copper slag, a sustainable material. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 17, n. 1, p. 13–26, 3 maio 2014.
- NAVARRO, R. et al. Optimization of the alkali activation conditions of ground granulated SiMn slag. *Construction and Building Materials*, v. 150, p. 781–791, set. 2017.
- NEIRA, M.; PRÜSS-USTÜN, A. Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the environmental burden of disease. *Toxicology Letters*, v. 259, p. S1, out. 2016.
- NEVES, M. S., 2018. Aproveitamento da escória de aciaria nas indústrias. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos) - Graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- NING, D. et al. Impacts of Steel-Slag-Based Silicate Fertilizer on Soil Acidity and Silicon Availability and Metals-Immobilization in a Paddy Soil. *PLOS ONE*, v. 11, n. 12, p. e0168163, 14 dez. 2016.
- OLSEN, S. E. et al. Production of Manganese Ferroalloys. [s.l.] Tapir Academic Press, 2007.
- PACHECO-TORGAL, F., CASTRO-GOMES, J. AND JALALI, S. (2008). Alkali-Activated Binders: A Review Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products. *Construction and Building Materials*, 22, 1305-1314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>
- PIMENTEL, M. G., VASCONCELOS, A. L. R., PICANÇO, M. S., SOUZA, J. V. B., MACÊDO, A. N., 2017. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. Pará.
- PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, v. 44, n. 1, p. 299–327, jul. 2014.

PROVIS, J. L.; JAN VAN DEVENTER. Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications. [s.l.: s.n.].

PROVIS, J. L.; DEVENTER, VAN. Geopolymers. [s.l.] Elsevier, 2009.

QUEIROZ, L. C., 2019. Cimentação de Areia a Partir de Sistemas Ligantes Álcali-Ativados. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Mestrado em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RAMOS, R. UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA CARACTERIZAÇÃO DO PÓ DE ACIARIA ELÉTRICA E ESTUDO DA VIABILIDADE DE PROCESSOS DE APROVEITAMENTO. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.repositoriobib.ufc.br/000021/0000212b.pdf>. Acesso em: 19 set. 2023.

SARAMAK, D.; KLEIV, R. A. The effect of feed moisture on the comminution efficiency of HPGR circuits. Minerals Engineering, v. 43-44, p. 105–111, abr. 2013.

SCHAEFER, M.; WELDON, K. S.; UNITED STATES. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. OFFICE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT. Industrial wastewater. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office Of Research And Development; Cincinnati, Ohio, 1980.

SENGUPTA, B., GHOSHR. N., BHATTACHARYA, A., DAS, S., 2008. Quantitative determination of metallic iron in steelmaking slag by oxidation-reduction and EDTA titration. Ironmaking & Steelmaking, 35(2), 162-168.

SHEHATA, N. et al. Geopolymer concrete as green building materials: Recent applications, sustainable development and circular economy potentials. Science of The Total Environment, v. 836, p. 155577, ago. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155577>.

SILVA, J. V., 2019. Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrogênio. Dissertação (Pós-Graduação em Construção Civil) – Mestrado em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVA, V. C., 2014. Estudo da viabilidade da utilização da escória de aciaria como matéria prima alternativa em novos produtos. Minas Gerais

SILVEIRA, E. C. V., 2022. Desenvolvimento e avaliação de geopolímeros utilizando rejeito de alumínio e microssílica. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVEIRA, R.C., LUCIO, A., MINES, C.R.C, FIGUEIRA, R.M., SAMPAIO, R.S., CASTRO, L. F. A., 1980. Metalurgia dos ferro-ligas. Capítulo 8 – Análise dos processos de produção das ligas de manganês. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Belo Horizonte, Minas Gerais, vol.II, 331-509.

SOBRAL, M. F., NASCIMENTO, C. W. A., CUNHA, K. P. V., FERREIRA, H. A., SILVA, A. J., SILVA, F. B. V., 2011. Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. Rev. bras. eng. agríc. Ambient, Campina Grande, agosto, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800015>.

TOTTEN, G. E. Steel heat treatment handbook. Boca Raton, Flor.: Taylor & Francis, 2007.

WARD-PERKINS, J. B. Roman imperial architecture. New Haven Conn; London: Yale University Press, 1994.

WILLS, B. A.; FINCH, J. A. Wills' mineral processing technology : an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 8. ed. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2016.

ZHANG, X. et al. The potential utilization of slag generated from iron- and steelmaking industries: a review. v. 42, n. 5, p. 1321–1334, 29 out. 2019.

ZHANG, Y. et al. Effect of particle size and curing temperature on mechanical and microstructural properties of waste glass-slag-based and waste glass-fly ash-based geopolymers. Journal of Cleaner Production, v. 273, p. 122970, nov. 2020.

APÊNDICE

Apêndice A – Fórmulas utilizadas e cálculos realizados

Velocidade Crítica

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}}$$

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{20}} = 94,58 \text{ rpm}$$

$$V = 0,7 * V_c = 66 \text{ rpm}$$

$V_c =$ Velocidade crítica; $D =$ Diâmetro = 20 cm; $V =$ Velocidade

Cálculo da quantidade de NaOH

$$1 \text{ mol de NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

$$6 \text{ mol de NaOH} = 240 \text{ g/L}$$

$$\frac{V_{NaOH}}{M_{escória}} = 0,3$$

$$\frac{V_{NaOH}}{2141,6} = 0,3$$

$$V_{NaOH} = 642,48 \text{ ml}$$

$$\frac{240}{1} = \frac{M_{NaOH}}{642,48}$$

$$M_{NaOH} = 154,2 \text{ g}$$

$V_{NaOH} =$ Volume de NaOH; $M_{escória} =$ Massa de escória;

$M_{NaOH} =$ Massa de NaOH

Cálculo da massa de escória

$$V_M = \pi r^2 h = \pi * 10^2 * 20 = 6283,2 \text{ cm}^3$$

Porcentagem de enchimento é de 30%

$$V_W = 0,3 * V_M = 1885 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{aparente} = 4,1 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho = \frac{M}{v} = 4,1 = \frac{M_{bolas}}{1885} \rightarrow M_{bolas} = 7728,3 \text{ g}$$

$$7,7 = \frac{7728,3 \text{ g}}{v_{real}} \rightarrow v_{real} = 1003,7 \text{ cm}^3$$

$$v_{vazio} = V_W - v_{real} = 1885 - 1003,7 = 881,3 \text{ cm}^3 = V_{escória}$$

$$\rho = \frac{M}{v} \rightarrow 2,43 = \frac{M_{escória}}{881,3} \rightarrow M_{escória} = 2141,6 \text{ g}$$

V_M = Volume do moinho; r = Raio; V_W = Volume útil;

ρ = Densidade; M = Massa; v = Volume

Apêndice B – Tabelas de distribuição granulométrica

Tabela 3: Distribuição granulométrica da escória britada antes da moagem

ABERTURA DA MALHA (μm)	DIÂMETRO MÉDIO (μm)	PESO SECO (gramas)	DISTRIBUIÇÃO (%)		
			RET. SIMPLES	MASSA ACUMULADO	PASSANTE
3360	4055,879	14,23	6,44	6,44	93,56
2360	2860	23,44	10,62	17,06	82,94
1680	2020	43,33	19,62	36,68	63,32
1410	1545	18,93	8,57	45,25	54,75
840	1125	31,74	14,38	59,63	40,37
500	670	29,54	13,38	73,01	26,99
212	356	28,97	13,12	86,13	13,87
106	159	14,62	6,62	92,75	7,25
75	90,5	5,36	2,43	95,18	4,82
53	64	2,06	0,93	96,11	3,89
38	45,5	2,92	1,32	97,43	2,57
<38	19	5,66	2,56	100	0
Total		220,8	100		

Tabela 4: Distribuição granulométrica da escória móida sem NaOH em 30 minutos

ABERTURA DA MALHA (μm)	DIÂMETRO MÉDIO (μm)	DIÂMETRO MÉDIO CILAS (μm)	PESO SECO (gramas)	DISTRIBUIÇÃO (%)		
				RET. SIMPLES	ACUMULADO	PASSANTE
2000	2414,214		8,26	5,23	5,23	94,77
1410	1705		3,11	1,97	7,2	92,8
840	1125		9,29	5,88	13,08	86,92
212	526		39,59	25,06	38,14	61,86
106	159		32,04	20,28	58,41	41,59
75	90,5		10,39	6,58	64,99	35,01
53	64		8,39	5,31	70,3	29,7
38	45,5		8,15	5,16	75,46	24,54
<38	19	90				
	13,3	63	0,38	0,24	75,7	24,3
	9,5	45	3,08	1,95	77,65	22,35
	6,7556	32	6,76	4,28	81,93	18,07
	4,8556	23	6,69	4,24	86,16	13,84
	3,3778	16	5,31	3,36	89,52	10,48
	2,3222	11	4,48	2,83	92,35	7,65
	1,6889	8	2,94	1,86	94,21	5,79
	1,1822	5,6	2,22	1,41	95,62	4,38
	0,8444	4	1,71	1,08	96,7	3,3
	0,5911	2,8	1,66	1,05	97,76	2,24
	0,4222	2	1,27	0,8	98,56	1,44
	<0,4222	<2,000	2,28	1,44	100	0
	Total			158	100	

Tabela 5: Distribuição granulométrica da escória móida sem NaOH em 60 minutos

ABERTURA DA MALHA (μm)	DIÂMETRO MÉDIO (μm)	DIÂMETRO MÉDIO CILAS	PESO SECO (gramas)	DISTRIBUIÇÃO (%)		
				RET. SIMPLES	ACUMULADO	PASSANTE
1410	1705		6,87	5,37	5,37	94,63
840	1125		3,37	2,63	8	92
212	526		17,74	13,86	21,86	78,14
150	181		17,27	13,49	35,35	64,65
106	128		14,9	11,64	47	53,01
75	90,5		12,12	9,47	56,46	43,54
53	64		11,88	9,28	65,75	34,26
38	50,5		12,85	10,04	75,78	24,22
<38	19	71	0	0	75,78	24,22
	13,3803	50	1,11	0,86	76,65	23,35
	9,6338	36	4,09	3,19	79,84	20,16
	6,6901	25	6,37	4,98	84,82	15,18
	4,8169	18	4,48	3,5	88,31	11,69
	3,4789	13	3,56	2,78	91,1	8,9
	2,4085	9	3,26	2,55	93,64	6,36
	1,7394	6,5	1,95	1,52	95,17	4,83
	1,1507	4,3	1,76	1,38	96,54	3,46
	0,8563	3,2	1,14	0,89	97,43	2,57
	0,7493	2,8	0,48	0,38	97,81	2,19
	<0,7493	<2,8000	2,81	2,19	100	0
Total			128	100		

Tabela 6: Distribuição granulométrica da escória móida sem NaOH em 120 minutos

ABERTURA DA MALHA (μm)	DIÂMETRO MÉDIO (μm)	DIÂMETRO MÉDIO CILAS	PESO SECO (gramas)	DISTRIBUIÇÃO (%)		
				RET. SIMPLES	ACUMULADO	PASSANTE
212	256		1,66	1,48	1,48	98,52
150	181		2,86	2,55	4,03	95,97
106	128		10,54	9,41	13,44	86,56
75	90,5		13,28	11,86	25,3	74,7
53	64		15,46	13,8	39,11	60,9
45	49		6,3	5,63	44,73	55,27
38	41,5		11,13	9,94	54,67	45,33
<38	19	112	0	0	54,67	45,33
	13,5714	80	0,78	0,7	55,37	44,63
	9,5	56	3,51	3,13	58,5	41,5
	6,7857	40	6,22	5,55	64,05	35,95
	4,75	28	8,7	7,77	71,82	28,18
	3,3929	20	7,84	7	78,82	21,18
	2,375	14	6,6	5,89	84,71	15,29
	1,6964	10	4,74	4,23	88,94	11,06
	1,1875	7	3,43	3,06	92	8
	0,8482	5	2,16	1,93	93,93	6,07
	0,6107	3,6	1,76	1,57	95,5	4,5
	0,4071	2,4	1,88	1,68	97,18	2,82
	0,3054	1,8	1,04	0,93	98,11	1,89
	0,2036	1,2	0,97	0,87	98,98	1,02
	0,1527	0,9	0,41	0,37	99,35	0,65
	<0,1527	<0,9000	0,73	0,65	100	0
Total			112	100		

Tabela 7: Distribuição granulométrica da escória móida com NaOH em 30 minutos

ABERTURA DA MALHA (μm)	DIÂMETRO MÉDIO (μm)	DIÂMETRO MÉDIO CILAS	PESO SECO (gramas)	DISTRIBUIÇÃO (%)		
				RET. SIMPLES	ACUMULADO	PASSANTE
2000	2141,214		4,68	5,03	5,03	94,97
1410	1705		3,13	3,36	8,39	91,61
840	1125		3,56	3,83	12,22	87,78
212	526		36,96	39,72	51,94	48,06
150	181		8,9	9,56	61,51	38,49
106	128		11,95	12,84	74,35	25,65
75	90,5		6,14	6,6	80,95	19,05
53	64		4,73	5,08	86,03	13,97
45	49		3	3,22	89,25	10,75
38	41,5		1,66	1,78	91,04	8,96
<38	19	90	0	0	91,04	8,96
	13,3	63	0,11	0,11	91,15	8,85
	9,5	45	0,72	0,78	91,93	8,07
	6,756	32	1,56	1,67	93,6	6,4
	4,856	23	1,65	1,78	95,38	4,62
	3,378	16	1,44	1,55	96,92	3,08
	2,322	11	1,07	1,15	98,08	1,92
	1,689	8	0,55	0,59	98,67	1,33
	1,182	5,6	0,32	0,34	99,01	0,99
	0,844	4	0,2	0,22	99,23	0,77
	0,591	2,8	0,2	0,21	99,44	0,56
	0,422	2	0,16	0,17	99,61	0,39
	0,296	1,4	0,11	0,12	99,73	0,27
	0,211	1	0,06	0,07	99,8	0,2
	0,148	0,7	0,04	0,04	99,84	0,16
	0,106	0,5	0,01	0,01	99,85	0,15
0,063	0,3	0,03	0,03	99,88	0,12	
	<0,063	<0,3	0,11	0,12	100	0
Total			93,05	100		

Tabela 8: Distribuição granulométrica da escória móida com NaOH em 60 minutos

ABERTURA DA MALHA (μm)	DIÂMETRO MÉDIO (μm)	DIÂMETRO MÉDIO CILAS	PESO SECO (gramas)	DISTRIBUIÇÃO (%) MASSA		
				RET. SIMPLES	ACUMULADO	PASSANTE
1410	1705		4,03	3,95	3,95	96,05
840	1125		1,58	1,55	5,5	94,5
212	526		34,98	34,27	39,77	60,23
150	181		8,37	8,2	47,97	52,03
106	128		16	15,68	63,65	36,35
75	90,5		8,17	8,01	71,66	28,34
53	64		7,07	6,93	78,58	21,42
45	49		5,01	4,91	83,49	16,51
38	41,5		2,04	2	85,49	14,51
<38	19	71	0	0	85,49	14,51
	13,38	50	0,54	0,53	86,02	13,98
	9,634	36	1,97	1,93	87,94	12,06
	6,69	25	3,12	3,05	91	9
	4,817	18	2,42	2,37	93,37	6,63
	3,479	13	1,99	1,95	95,32	4,68
	2,408	9	1,66	1,63	96,95	3,05
	1,739	6,5	0,85	0,83	97,78	2,22
	1,151	4,3	0,64	0,63	98,41	1,59
	0,856	3,2	0,37	0,36	98,77	1,23
	0,749	2,8	0,16	0,15	98,92	1,08
	0,428	1,6	0,5	0,49	99,41	0,59
	0,294	1,1	0,17	0,17	99,58	0,42
	0,214	0,8	0,08	0,08	99,66	0,34
	0,187	0,7	0,02	0,02	99,68	0,32
	0,107	0,4	0,03	0,02	99,7	0,3
	0,08	0,3	0,15	0,14	99,84	0,16
	<0,080	<0,3000	0,16	0,16	100	0
Total			102,06	100		

Tabela 9: Distribuição granulométrica da escória móida com NaOH em 120 minutos

ABERTURA DA MALHA (μm)	DIÂMETRO MÉDIO (μm)	DIÂMETRO MÉDIO CILAS	PESO SECO (gramas)	DISTRIBUIÇÃO (%)		
				RET. SIMPLES	ACUMULADO	PASSANTE
212	256		16,32	14,66	14,66	85,34
150	181		7,57	6,8	21,46	78,54
106	128		8,79	7,9	29,36	70,64
75	90,5		17	15,27	44,63	55,37
53	64		14,22	12,78	57,41	42,59
45	49		10,67	9,59	66,99	33,01
38	41,5		3,9	3,5	70,5	29,5
<38	19	71	0	0	70,5	29,5
	13,38	50	1,16	1,04	71,54	28,46
	9,634	36	4,33	3,89	75,42	24,58
	6,69	25	6,82	6,13	81,55	18,45
	4,817	18	5,02	4,51	86,07	13,93
	3,479	13	4,1	3,68	89,74	10,26
	2,408	9	3,61	3,24	92,99	7,01
	1,739	6,5	2,02	1,82	94,8	5,2
	1,151	4,3	1,63	1,47	96,27	3,73
	0,856	3,2	0,96	0,86	97,13	2,87
	0,749	2,8	0,4	0,36	97,49	2,51
	0,428	1,6	1,31	1,18	98,67	1,33
	0,294	1,1	0,47	0,42	99,09	0,91
	0,214	0,8	0,22	0,2	99,29	0,71
	0,187	0,7	0,06	0,05	99,35	0,65
	0,107	0,4	0,08	0,07	99,42	0,58
	0,08	0,3	0,11	0,1	99,52	0,48
	<0,080	<0,3000	0,54	0,48	100	0
Total			111,31	100		