Influência do preparo de amostras de minério de ferro na análise de fluorescência de raio-x.

Eduarda Alexandra Mariano[1], Thais Cristina da Silva Correa[2], Camila Oliveira Campelo Belém[3], Carolina Queiroz Ribeiro[4]

Professor orientador: Denilson de Jesus Assis

Coordenação de curso de Engenharia Química

Resumo

Na indústria de mineração, o controle de qualidade é fundamental para que o material seja entregue nas especificações corretas. Para isso o controle de qualidade usa de técnicas apropriadas, dentre essas a Espectrometria de Fluorescência por raio x. Entretanto, essa técnica dispõe de duas formas de preparo das amostras, a prensada e a fundida. O presente trabalho se empenhou em avaliar a influência do preparo de amostra no desempenho da técnica. Os dados compilados mostram que tanto a metodologia fundida quanto a prensada apresentam resultados semelhantes, podendo ser aplicadas de forma confiável no controle de qualidade do minério de ferro, devendo ser analisada a precisão, exatidão e custo, sendo indicado o método com fundição.

Palavras-chave: Espectrometria, fluorescência, minério de ferro, prensada, fundida.

1. Introdução

O ferro é um metal abundante na Terra, sendo o elemento que constitui cerca de 5% em massa na crosta terrestre. O depósito mineral de ferro mais importante é formado por hematita (Fe_2O_3). A hematita possui 70% de ferro em sua forma pura. (BOSSI et. al., 2020). Segundo dados mais recentes do IBGE sobre o minério de ferro, em 2021 o minério de ferro foi o produto de maior receita com R$242,1 bilhões de receita e participação de 5,6% na indústria brasileira, podendo ser considerado o mineral mais importante para a economia no Brasil.

A análise quantitativa de fases minerais constituintes de minérios de ferro é importante para avaliar a qualidade do mesmo, e principalmente, para controlar as misturas na produção de sínter feed de boa qualidade (TAKEHARA et al, 2009). Para fazer essa quantificação algumas técnicas podem ser usadas, dentre elas microscopias ótica e eletrônica de varredura, difração por fluorescência de raio x (XRF), análises térmicas e químicas. As técnicas térmicas e químicas são muito demoradas e difíceis, portanto por agilidade são menos utilizadas, enquanto isso, as

técnicas de microscopia e espectrometria são mais fáceis e demandam menos tempo, por tanto mais preferíveis para indústrias, conforme aponta Oliveira (2019). Além disso, essas técnicas são performadas em equipamentos robustos, de alta sensibilidade e associados a softwares, o que minimiza os erros e aumenta a exatidão e precisão dos resultados.

A Espectrometria de Fluorescência de raio X funciona usando as radiações eletromagnéticas para identificar os componentes (SKOOG et al., 2009). A partir das regiões de absorção do raio x, e conhecendo a região de absorção do padrão do analito e dos componentes presentes, é possível identificar a composição da amostra.

Existem dois métodos de preparo da amostra sólidas, o método em que a amostra é prensada ou fundida, e na Espectrometria de Fluorescência de raio X é muito importante o preparo pois as diferenças de homogeneidade e tamanho da partícula podem afetar nos resultados. A escolha do método depende da finalidade do uso da amostra e sua composição (MACUÁCUA, 2011).

O método da amostra prensada é realizado prensando a amostra já pulverizada utilizando prensas hidráulicas ou mecânicas, já no método de preparo da amostra fundida, é utilizado um material fundente que geralmente é o tetraborato de lítio ou sódio, esse material é colocado em cadinhos de platina onde será aquecido até ser fundida e é moldada em uma placa de platina. A diferença dos métodos resulta em diferenças de estrutura mineralógica, tamanho da partícula, homogeneidade e custo (COELHO, 2001). O custo do método fundido é alto, ao contrário do método prensado que possui um custo baixo. Porém o fato de o método prensado apresentar uma homogeneidade baixa pode resultar em diferenças nos resultados obtidos no método fluorescência de raio x.

O objetivo do presente trabalho é compreender qual o melhor método de preparação de amostra para determinar ferro em minério. Complementarmente, analisar as vantagens e desvantagens de cada método de preparação de amostra, o fator do custo em contrapartida ao fator da interferência de efeitos mineralógicos nos resultados.

2. Referencial Teórico

2.1 Minério de Ferro

Segundo Carvalho (2014) em sua publicação na biblioteca digital Minérios de Ferro do BNDS, o ferro é quarto elemento mais abundante na crosta terrestre, sendo o Brasil é um dos principais depósitos do mineral mundial. As principais regiões produtoras de minério de ferro no Brasil são o Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, a Província Mineral de Carajás no Pará e a região de Corumbá no Mato Grosso do Sul.

O ferro está presente em várias composições minerais, no entanto somente os óxidos de ferro (Tabela 1) são formações geológicas que apresentam ser viáveis para extração e comercialização. Estes são minérios que possuem alto teor de ferro e poucas concentrações de contaminantes indesejados como fósforo (CAXITO, 2018).

Tabela 1: Óxidos de Ferro.

Mineral	Fórmula Química	Conteúdo teórico de ferro
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Goethita	$Fe_2O_3.H_2O$	62,9
Limonita	$3Fe_2O_3.3H_2O$	59,8
Ilmenita	$FeTiO_3$	36,8
Siderita	$FeCO_3$	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Ptirrotita	Fe(1-x)S	61,0

Fonte:(Carvalho et, al, 2014).

O minério de ferro é considerado o minério mais importante para a economia de um país, o Brasil é um dos maiores exportadores de minério de ferro do mundo, ficando atrás apenas da China e da Austrália (SILVA et al., 2019). Em 2021, o minério de ferro rendeu uma receita de R$242,1 bilhões de receita, segundo dados mais recentes do IBGE, por isso a importância industrial desse minério para a economia.

2.1.1 Aspectos produtivos

Antes de ser comercializado o minério de ferro precisa passar pelo processo de beneficiamento, atingindo granulometria e teores químicos adequados. O minério de ferro bruto passa pelas usinas de beneficiamento, sendo britado, peneirado, lavado e classificado de acordo com a granulometria. Existem três classificações possíveis: Granulado, Sínter Feed e Pellet Feed. O minério com partículas acima de 6,3 mm são os granulados, já o minério com granulometria intermediária entre 0,150mm e 6,3mm é classificado com sínter feed. E o Pellet Feed é o material com granulometria abaixo de 0,150mm (TAKEHARA et al, 2009).

O controle de qualidade em minério de ferro é composto por análises físicas e químicas, e se faz essencial para avaliação de performance das operações de extração, beneficiamento e comercialização da commodity. Para garantir a qualidade vendida e apoiar as usinas de beneficiamento, são realizadas amostragens de pontos estratégicos da área a ser lavrada e do minério durante e após o processo de beneficiamento (PAIVA et, al, 2018).

Na análise laboratorial a amostra é enviada ao laboratório onde vai ser homogeneizada, quarteada e separada em alíquotas destinadas a três análises essenciais: ensaio granulométrico, umidade e análise química (Figura 1).

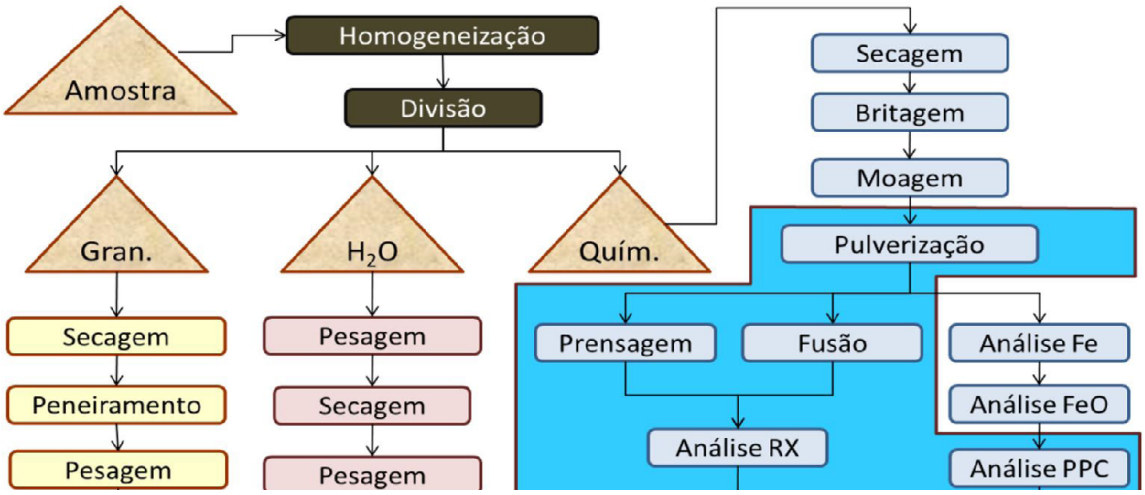
Os ensaios de granulometria e umidade são análises físicas, para atestar o tamanho médio dos grãos do minério e a quantidade de água retida no produto. O ensaio de umidade é um dos principais parâmetros físicos determinados em laboratórios de qualidade e sua correta quantificação tem grande relevância no controle de beneficiamento industrial e para os estudos de mineralogia, assim como para a comercialização do produto, tendo em vista que caso o teor de umidade estiver muito alto o transporte e embarque para exportação é proibido, por causar risco de tombar o navio com o desprendimento da água acumulada dentro dos porões (Alvares et, al, 2018).

Assim como o estudo da umidade, a análise granulométrica tem importância comercial sendo um dos parâmetros definidos para a venda, e é de extrema importância para o monitoramento e manutenção da etapa de britagem do

beneficiamento mineral, garantindo a maximização da taxa de produção e qualidade fornecida (Souza, 2020).

Já a análise química é destinada a definir os teores de Ferro e de contaminantes como SiO2 (Sílica); P (Fósforo); Al2O3 (Alumina); Mn (Manganês), entre outros. Dentro das análises químicas temos a Fluorescência de raio x (FRX), a análise por fluorescência de raios-X pode ter fins qualitativos ou quantitativos (Santos et, al, 2013). O FRX utiliza-se da medição da faixa de comprimento de ondas para analisar os compostos presentes na amostra através do conhecimento da faixa do comprimento de onda de padrões desses compostos. Sendo assim, a importância do FRX é identificar qual tipo de amostra de minério está lidando, qual sua composição e seus teores de Ferro e contaminantes.

Figura 1: Ilustração de processo de controle de qualidade de minério de ferro.



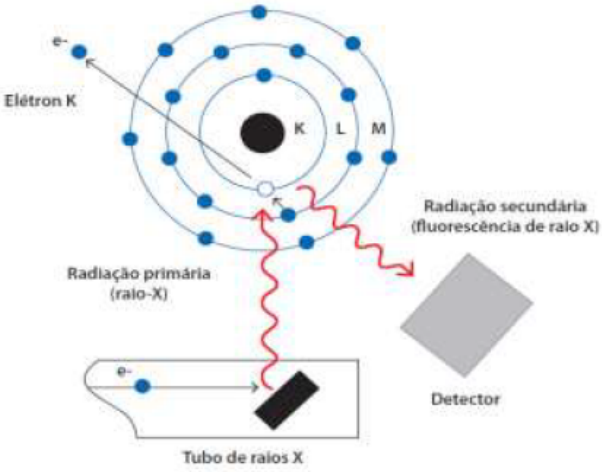
Fonte: Adaptado (PAIVA, 2018).

2.2 Fluorescência de Raio-x

A espectrometria de Fluorescência de raio x (XRF), é uma técnica não destrutiva que usa a detecção dos raios x para identificar e quantificar a composição química de um material. (Urbano et al., 2013).

A técnica se baseia na emissão de radiação primária de alta energia por uma fonte de tubo de raio-x. Ao receber a radiação do tubo, os átomos que constituem a amostra irão fluorescer ocorrendo o salto quântico, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2: Ilustração do princípio de medição por XRF.

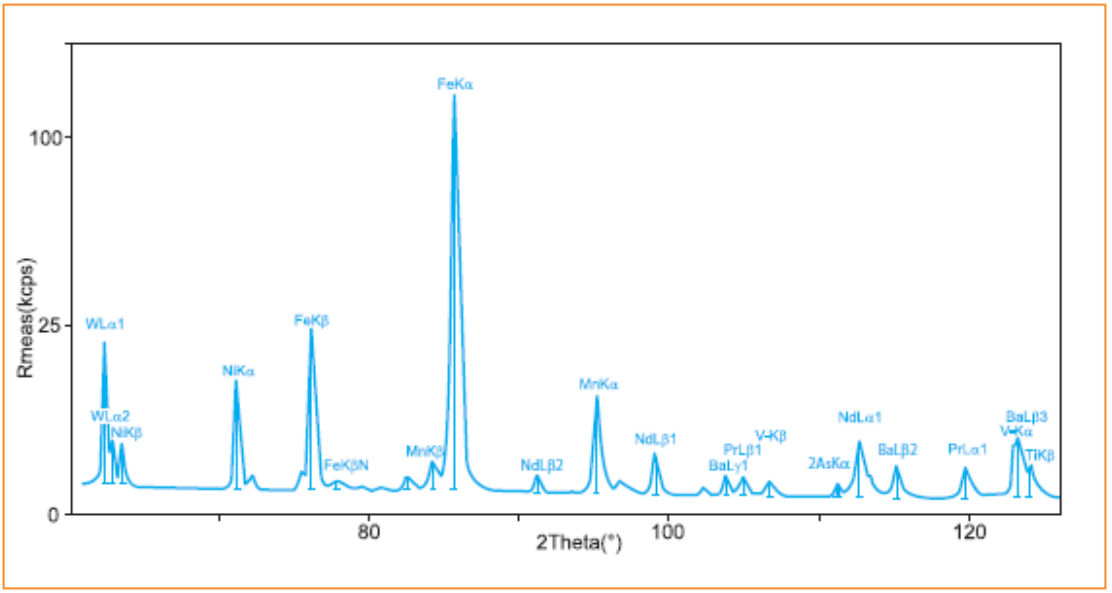


Fonte: (Fontes, 2019).

O esquema da figura mostra que os elétrons mais próximos ao núcleo são ejetados de sua posição, abrindo vacâncias que serão preenchidas pelos elétrons de camadas mais externas, dessa forma liberando energia na forma de fótons de raio-x, que são capturados pelo detector do equipamento. (SCHOLTZ; UHLIG, 2006).

Os comprimentos de onda emitidos por cada átomo e a energia de radiação é característica para cada elemento. Dessa forma, é possível reconhecer quais elementos estão presentes na amostra e em que concentração se encontram distribuídos (PANALYTICAL, 2010). Na Figura 3 está representado um espectro de XRF para uma amostra qualquer, onde cada pico corresponde a um elemento a altura do pico representa a concentração de cada elemento na amostra.

Figura 3: Espectro de Raio-x.



Fonte: (Panalytical, 2010).

2.3 Preparação de amostras

No XRF a preparação de amostras é um fator essencial para análise, pois o tamanho da partícula e homogeneidade do material influenciam diretamente os resultados obtidos, uma vez que a técnica atinge apenas a superfície da amostra. Os equipamentos de raio-x podem ler amostras líquidas ou sólidas e a preparação vai depender das características de cada material (MACUÁCUA et. al., 2011).

No caso de minerais sólidos, existem dois tipos de preparação mais comuns de pastilhas, as prensadas e as fundidas ou pérolas. As vantagens e desvantagens de cada método de preparação estão apresentados na Tabela 2 e devem ser levadas em consideração para o processo, sendo necessária a avaliação de qual método se aplica melhor ao produto a ser analisado.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens de cada método de preparação

Fatores	Pastilhas Prensadas	Pérolas
Estrutura mineralógica	Grande influência	Nula
Tamanho de partícula	Grande influência	Nula
Efeito matriz	Grande influência	Pouca influência

Equipamentos	Prensa	Máquina de fusão
Homogeneidade	Boa	Muito boa
Custo	Baixo	Alto
Facilidade de manejo	Muito boa	Boa
Consumo de reativos	Baixo	Moderado
Elementos voláteis	Analisáveis	Não analisáveis

Fonte: (COELHO, 2001).

Além de ser um método de preparação mais simples e rápido, as pastilhas prensadas apresentam baixa diluição, aumentando as contagens para elementos traços que se apresentam em baixas concentrações e para elementos voláteis por não expor o material ao calor. No entanto, apresentam efeitos mineralógicos e de tamanho de partículas que podem causar interferências nos resultados, uma vez que os grãos das amostras estão apenas conformados no disco. Estes efeitos só são efetivamente corrigidos pela fusão, quando a amostra é transformada em um disco de vidro homogêneo. No entanto, as pastilhas fundidas apresentam menor capacidade de detecção para elementos traços e leves, por serem mais diluídas (COELHO, 2001).

3. Metodologia

3.1 Amostra de minério

Foram coletadas 20 amostras de minério de ferro itabirito com concentrações desconhecidas, doadas no ano de 2023, por empresas mineradoras da região de Itatiaiuçu e Igarapé, localizadas no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais . Cada amostra foi previamente identificada e numerada, homogeneizada, seca e pulverizada com passante em 0,106mm e acondicionadas em pacotes de papel craft. Após este processo, as amostras foram prensadas e fundidas para leitura no raio-x.

3.2 Preparação das amostras

Para preparação das pastilhas prensadas (Figura 4) foi utilizado a cera Waxx da Merkel como aglomerante, na proporção de 20g para 2g de cera. Os itens foram pesados, transferidos para um recipiente de homogeneização e levados então, para a prensa elétrica HTP-40 com força de 150kN por 5 segundos. Cada pastilha foi então identificada e direcionada para análise no raio-x.

Figura 4: Imagem pastilha prensada.

Fonte: Autores (2023).

Para o preparo das pastilhas fundidas foi utilizado o tetraborato de sódio, por apresentar ponto de fusão baixo sendo bem aplicado a amostras de minério de ferro apesar de ser higroscópico, devendo ser pesado na hora da fusão. O fundente utilizado foi da fabricante Claisse na proporção de 7:1 de fundente por amostra. E adicionado Iodeto de potássio para desmoldar a pastilha. Após a pesagem, o material foi colocado em cadinhos compostos por 95% de platina e 5% de ouro, homogeneizado e levado a máquina de fusão elétrica The-ox da fabricante Claisse a temperatura de 1050ºC por 15 minutos. Após o resfriamento das pastilhas foi realizada a leitura no raio-x.

Figura 5: Imagem pastilha fundida.

Fonte: Autores (2023).

3.3 Análise por FRX

O equipamento utilizado para análise quantitativa das amostras foi o raio-x Axios da fabricante Panalytical, com tubo de ródio a 4kW.

Foi previamente realizada a calibração de duas aplicações, uma fundida e uma prensada com padrões de minério de ferro MRC (Material de referência certificado). A utilização de padrões de boa qualidade e com referência conferem maior confiabilidade de uma boa calibração das curvas analíticas e são imprescindíveis para que não haja interferências nos resultados das amostras. Após a finalização das curvas analíticas para os compostos Fe, SiO_2, P, Mn, Al2O3, MgO e CaO em cada aplicação foi realizada a conferência com amostras padrão.

3.4 Tratamento dos dados

Para avaliação das diferenças entre as metodologias de preparo foram coletados e analisados para realização da pesquisa apenas os resultados de Ferro (Fe) de cada amostra, uma vez que é o composto maior interesse para o processo de produção e venda do mineral. Os dados obtidos foram processados com auxílio do Microsoft Excel.

4. Resultados e Discussão

Foram obtidos os resultados de concentração em % para o Ferro e as diferenças em cada amostra (Tabela 3). O maior valor de Fe foi de 66,79% na amostra 7 e o menor valor obtido foi de 51,60% na amostra 18. Revelando que a faixa das

amostras analisadas foi de 50 a 70%, que pode ser considerado um material rico em concentração de Ferro.

A diferença metodológica foi representada como o resultado da pastilha prensada menos a fundida. Sendo que a maior variação foi encontrada na amostra 1 com diferença de 1,84 e a menor variação foi de 0,02 na amostra 17.

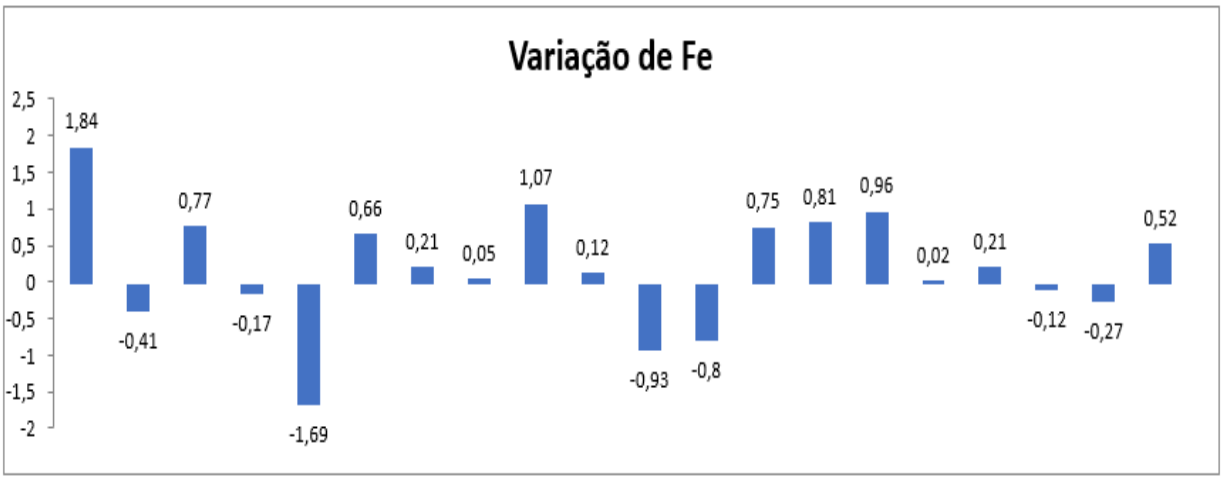
Tabela 3: Resultados e diferenças por amostra analisada.

Análise Fe (%)										
Amostra	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Prensada	64,09	63,57	65,54	53,50	54,24	64,08	66,79	66,69	61,76	57,97
Fundida	62,25	63,98	64,77	53,67	55,93	63,42	66,58	66,64	60,69	57,85
Diferença	1,84	-0,41	0,77	-0,17	-1,69	0,66	0,21	0,05	1,07	0,12
Amostra	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
Prensada	57,39	56,04	57,03	57,51	57,80	62,20	60,04	51,60	55,22	52,18
Fundida	58,32	56,84	56,28	56,70	56,84	62,18	59,83	51,72	55,49	51,66
Diferença	-0,93	-0,8	0,75	0,81	0,96	0,02	0,21	-0,12	-0,27	0,52

Fonte: Autores (2023).

A partir do gráfico da Figura 6, pode-se observar que a variação das diferenças não apresentou tendencia, o que demonstra que não houve interferência da calibração do equipamento no experimento. Se os valores apresentassem tendencia a serem sempre maiores ou menores para determinado tipo de amostra poderia indicar problemas na calibração das curvas analíticas do instrumento de raio-x, sendo necessário uma recalibração ou avaliação dos padrões utilizados.

Figura 6: Variação de Fe



Fonte: Autores (2023).

Observa-se que apesar da diferença metodológica de preparo e análise as amostras prensadas e fundidas apresentaram resultados semelhantes. A diferença encontrada no grupo de amostras analisadas pode ser considerada pequena, por se tratar de amostras com altas concentrações do metal, isso decorre pela estrutura mineralógica e da baixa concentração de contaminantes na matriz mineral.

Em casos de amostras com baixo teor de ferro essa diferença poderia ser maior causando problemas na detecção de ferro, uma vez que a estrutura mineralógica seria composta por maiores teores de contaminantes como sílica e alumina, fazendo com que o efeito de tamanho de partículas e de matriz interferisse nos resultados das pastilhas prensadas.

Em caso de necessidade de uma precisão maior como em produtos finais e em materiais com matriz mineralógica com teores variáveis ou desconhecidos é bom que se use as pastilhas fundidas, pois apesar de serem mais caras e mais demoradas elas garantem uma confiabilidade maior.

Já as pastilhas prensadas apesar de possuir uma precisão um pouco menor, em caso de concentrações maiores com as utilizadas entre 50 e 70% de Fe e em matrizes bem definidas com poucos contaminantes, chega bem próxima da precisão das fundidas, por isso podem ser usadas em processos de qualidade do minério,

pois apresentam baixo custo e são mais rápidas de serem realizadas, o que garante uma agilidade maior no processo de qualidade do minério.

5. Conclusão

Os dados compilados mostram que tanto a metodologia fundida quanto a prensada apresentam resultados semelhantes, podendo ser aplicadas de forma confiável no controle de qualidade do minério de ferro, devendo ser analisado os prós e os contras para a escolha do método a ser utilizado.

A pastilha fundida, por eliminar os efeitos de tamanho de partículas, sofre menores interferências nos resultados, sendo mais precisas que as prensadas. Então, em casos em que se deseja maior precisão e exatidão do resultado, a fusão é a mais indicada.

No entanto, outro fator a ser considerado na escolha do método é o custo de análise e manutenção. As pastilhas prensadas apresentam custo menor comparado ao processo de fusão, uma vez que usam pouco aglomerante e que as prensas são equipamentos mecânicos ou elétricos gastando pouca manutenção.

A partir dos resultados obtidos e das análises realizadas, chega-se a conclusão que as indústrias podem utilizar desse método de análise para confirmar qual método melhor a ser utilizado no caso das análises realizadas em seu estabelecimento. E também pode ser usada essa metodologia para fazer uma triagem e garantir que independentemente do método utilizado será obtido um resultado que condiz com a expectativa da indústria, ou para que seja garantido o melhor método a ser utilizado.

6. Referências bibliográficas

ALVARES, Maira R.N et, al. **Redução da umidade do minério de ferro pelo tratamento por plasma de hexametildissiloxano. Cetem**, [s. l.], 2018. Disponível em: https://www.cetem.gov.br/antigo/images/congressos/2018/CAC0032.pdf. Acesso em: 9 dez. 2023.

BOSSI, Ernesto Tadeu; VILAR, Lúcio Flávio de Souza**. Caracterização química e mineralógica de rejeitos de minério de ferro de diferentes percentagens de finos. Engenharia e Geotecnia: princípios fundamentais**, [s. l.], 3ºed., p.196-211, janeiro, 2020. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Andre-Zingano/publication/342857518_Caracterizacao_do_Backfill_Cimentado_para_a_Mina_Aguilar/links/5f4b898892851c6cfd017e67/Caracterizacao-do-Backfill-Cimentado-para-a-Mina-Aguilar.pdf#page=200. Acesso em: 14/11/2023

CARVALHO, P. S. L. de et al. **Minério de ferro. BNDES** Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014. Disponivel em: http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4802. Aceso: 28 nov.2023.

CAXITO, Fabrício; DIAS, Tatiana. **Ferro. Recursos Minerais de Minas Gerais**. Belo Horizonte. 2018. Disponível em http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ferro/. Acesso em 24 nov.2023.

COELHO, C. Damazio. **Influência dos parâmetros de preparação de amostras na análise química elementar de minerais por fluorescência de raios x.** 2001. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/81707/182970.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 2 nov. 2023.

IBGE. PIA-Produto 2021: minério de ferro permanece o principal produto e indústria alimentícia lidera entre as atividades industriais. **Agência IBGE Notícias**, 2021. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37247-pia-produto-2021-minerio-de-ferro-permanece-o-principal-produto-e-industria-alimenticia-lidera-entre-as-atividades-industriais. Acesso em: 14/11/2023

MACUÁCUA, Pascoal Leonardo. **Determinação do Ca, Fe, Na, Si e V em amostras de alumina usando dois tratamentos distintos (fundido/prensado) por XRF**. In: DETERMINAÇÃO do Ca, Fe, Na, Si e V em amostras de alumina usando dois tratamentos distintos (fundido/prensado) por XRF. 2011. Trabalho de licenciatura (Quimica) - Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, 2011. Disponível em: http://monografias.uem.mz/bitstream/123456789/1108/1/2011%20--%20Macu%c3%a1cua%2c%20Pascoal%20Leonardo.pdf. Acesso em: 4 out. 2023.

OLIVEIRA, V. Jaqueline, et al. **VIII Jornada do Programa de Capacitação Institucional – PCI/CETEM**, [s. l.], 3ºed., p.190-197, outubro, 2019. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2317/1/Jaqueline%20Veloso%20de%20Oliveira.pdf Acesso em: 14/11/2023.

PAIVA, Fernando et al. **Automação de laboratório de análises de amostras de minério de ferro. ABM Week 2018**, [s. l.], 2018. Disponível em: https://doi.org/10.4322/2176-1523.20191460. Acesso em: 22 nov. 2023.

PANALYTICAL (Holanda); BROUWER, Peter. **Theory of XRF: Getting acquanteid with the principles**. 3º edição. ed. Holanda: PANalytical B.V, 2010.

PIZZETA, Fernando. **Preparação de amostra para XRF**. [S. l.]: **Química brasileira, 2018**. Disponível em: https://marcas.quimicabrasileira.com.br/e-book-preparacao-de-amostra-para-xrf. Acesso em: 14 nov. 2023.

SCHLOTZ, Reinhold; UHLIG, Stefan**. Introduction to X-ray Fluorescence Analysis (XRF)**. Alemanha: Bruker AXS GmbH, 2006. Disponível em: https://www.fem.unicamp.br/~liqcqits/facilities/xrf/%5BBruker_2006%5D%20Introduction%20to%20X-ray%20Fluorescence%20(XRF).pdf. Acesso em: 22 nov. 2023.

SILVA, M. Lucas. et al. **O desempenho da exportação de minério de ferro em relação a produção para consumo interno no Brasil. Revista LICEU Online, São Paulo**, n. 1, p. 47-59, jan/julho. 2019. Disponivel em: https://liceu.emnuvens.com.br/LICEU_ON-LINE/article/viewFile/1804/1055 Aceso: 30 nov.2023.

TAKEHARA, L.; VASCOCELOS, et al. **Phase Quantification in Iron Ore. Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C),** vol. 118, no 3, p. 169-174, 2009.

SOUZA, Lucas. **Medição de granulometria de minério de ferro através de imagens em circuito de britagem primária**. Orientador: Prof. Dr. Gustavo Pessin. 2020. Dissertação (Pós-graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2020. Disponível em: http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/13298. Acesso em: 9 dez. 2023.

THOMSOM. **Fundamentos de Química Analítica**, 8. ed. [S. l.], 2006. 1026 p.

URBANO, Emilio E. M. C.; GOMES, Maria E. P.; BRANDÃO, Paulo R. G. **Estudo de Caso sobre Aplicação de FRX Portátil no Controle de Qualidade de Minério de Ferro do Brasil. Livro Actas**, [s. l.], 4 out. 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/5217285/Estudo_de_Caso_sobre_Aplica%C3%A7%C3%A3o_de_FRX_Port%C3%A1til_no_Controle_de_Qualidade_de_Min%C3%A9rio_de_Ferro_do_Brasil. Acesso em: 4 out. 2023.