



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

GABRIEL ANDRADE VALENÇA PEREIRA RANGEL

**ANÁLISE DA ESCÓRIA DE CONVERSOR DO PROCESSO BAOSTEEL SLAG SHORT
FLOW (BSSF) POR ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER**

FORTALEZA

2022

GABRIEL ANDRADE VALENÇA PEREIRA RANGEL

ANÁLISE DA ESCÓRIA DE CONVERSOR DO PROCESSO BAOSTEEL SLAG SHORT
FLOW (BSSF) POR ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica
do Centro de Tecnologia da Universidade Fede-
ral do Ceará, como requisito parcial à obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Jeferson Lean-
dro Klug

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R154a Rangel, Gabriel Andrade Valença Pereira.

Análise da escória de conversor do processo Baosteel Slag Short Flow (BSSF) por espectroscopia Mössbauer / Gabriel Andrade Valença Pereira Rangel. – 2022.
41 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

1. Espectroscopia Mössbauer. 2. Processo BSSF. 3. . Sustentabilidade. I. Título.

CDD 669

GABRIEL ANDRADE VALENÇA PEREIRA RANGEL

ANÁLISE DA ESCÓRIA DE CONVERSOR DO PROCESSO BAOSTEEL SLAG SHORT
FLOW (BSSF) POR ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: 16 / fevereiro / 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Maurício de Sousa Pereira
Centro Universitário (UNINTA)

Msc. Pedro Henrique Nogueira Garcia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à minha família por todo apoio que me forneceram para enfrentar este desafio. Em todos os dias de cansaço e dúvidas sobre a minha capacidade eles estiveram presentes para me motivar. Mãe, Pai, este trabalho é fruto dos seus cuidados e dedicação exemplar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos derramadas sobre mim durante esta jornada.

Aos meus pais Gláucio Valença Pereira Rangel e Neide Aparecida Andrade Valença Rangel, por serem tão dedicados e presentes na minha vida e por todo o suporte e amor incalculáveis que têm me dado.

Ao meu Professor Orientador Dr.-Ing. Jeferson Leandro Klug, coordenador do Laboratório de Fundição, pelos conselhos compartilhados, pela paciência, dedicação e pelo incentivo para encarar este desafio.

Ao Professor Dr. Igor Frota de Vasconcelos, coordenador do Laboratório de Materiais Avançados, pelo auxílio e disponibilidade para usarmos espectrômetro Mössbauer.

Ao Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais e Químico Industrial Samuel Lucas Santos Medeiros, pela magnífica colaboração com o conteúdo da técnica Mössbauer e prontidão exemplar no auxílio durante esta pesquisa.

Ao Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais Pedro Henrique Nogueira Garcia, pelo fornecimento das amostras e orientações que foram de fundamental importância para este trabalho.

À minha namorada Melina Gomes, por todo o amor, apoio e pela confiança na minha capacidade, fez total diferença em me motivar.

Aos meus amigos Leoni Laerth, Felipe Fonseca e Emili Borges, por todas as dificuldades e maravilhas que enfrentamos juntos neste percurso.

Aos meus colegas de curso que contribuíram nos momentos de dúvidas urgentes ou com conversas descontraídas entre as disciplinas.

“O segredo do seu futuro está escondido na sua rotina diária”

(Elon Musk)

RESUMO

Os processos industriais produzem basicamente tudo que fundamenta a vida moderna como conhecemos atualmente e sabe-se que as indústrias afetam fortemente o meio ambiente, seja por uma empresa de extração de matéria-prima ou por uma empresa de fabricação e tratamento de produtos acabados, o meio ambiente é afetado de modo direto no decorrer de todas as etapas industriais, pois não se trata de um processo natural ou espontâneo e sim uma alteração da natureza em prol do desenvolvimento social. A escória de conversor tratada pelo processo *Baosteel Slag Short Flow* (BSSF) é um subproduto siderúrgico de grande volume de obtenção, no qual não deseja-se encontrar ferro metálico e por isso deve-se tratá-la. Dessa forma, o presente trabalho fez uso da análise química por espectroscopia Mössbauer com fonte radioativa de cobalto ($^{57}_{27}\text{Co}$), tanto na amostra de escória BSSF quanto na amostra de escória convencional a título de comparação, e determinou 3 (três) diferentes sinais para ambas as amostras a partir do refino dos resultados realizado pelo programa *Normos* com 95% de precisão em seus cálculos, indicando a presença de isótopos do íon de ferro metálico ($^{57}_{26}\text{Fe}$) em ambas as amostras. A cada Lorentziana foi atribuída uma componente mineral a partir de dados cruzados da literatura científica e de análises químicas complementares como a Fluorescência de Raios-X (FRX) e a Difração de Raios-X (DRX), o que permitiu confirmar fases minerais comuns, tais como wustita e magnetita, além de fases minerais não tão comuns, devido às baixas porcentagens de concentração, como a srebrodolskita e a goetita. Conclui-se que a análise por espectroscopia Mössbauer fornece informações importantes a respeito dos sítios de ferro o que permite diferenciar fases minerais não detectadas por outros tipos de análises químicas em virtude de nuances sutis quanto às características químicas de cada mineral.

Palavras-chave: Espectroscopia Mössbauer. Processo BSSF. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Industrial processes basically produce everything that ground modern life as we know it today and it's known that industries strongly affect the environment, whether by a raw material extraction or by a company that manufactures and treat finished products, the environment is directly affected during all industrial stages, as it is not a natural or spontaneous process, but an alteration of nature in favor of social development. The converter slag from the *Baosteel Slag Short Flow* (BSSF) process is a large volume by-product of siderurgy in which there is no desire of finding metallic iron, therefore it must be treated. Thus, the present work made use of Mössbauer spectroscopy chemical analysis with a radioactive source of cobalt ($^{57}_{27}\text{Co}$), both in BSSF slag sample and conventional slag sample by way of comparing the two, and 3 distinct signs were found for each sample after results refinement by *Normos* software with 95% of precision in it's calculations, indicating the presence of isotopes of pure iron ($^{57}_{26}\text{Fe}$) in both samples. To each Lorentzian was attributed a mineral compound based on the cross-data references in the scientific literature and based on complementary chemical analysis such as X-Ray Fluorescence (XRF) and X-Ray Diffraction (XRD), allowing to confirm a couple of common mineral phases, such as wustite and magnetite, in addition to a couple of not so common mineral phases, being srebrodolskite and goethite. In conclusion, the Mössbauer spectroscopy analysis provides very important information about the iron ions and makes possible to differentiate mineral phases that aren't detected in other types of chemical analysis due to it's subtle chemical nuances between each mineral.

Keywords: Mössbauer Spectroscopy. BSSF process. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama exemplificando o funcionamento da economia circular.	15
Figura 2 – Fluxograma do processo de fabricação do aço resumindo as duas categorias de usinas siderúrgicas existentes.	18
Figura 3 – Fluxograma do processo BSSF para tratamento de escória.	19
Figura 4 – Diagrama de transição de energia nuclear do átomo de cobalto ($^{57}_{27}\text{Co}$) para um átomo de ferro ($^{57}_{26}\text{Fe}$).	21
Figura 5 – Esquema de decaimento do átomo de cobalto ($^{57}_{27}\text{Co}$) para um átomo de ferro ($^{57}_{26}\text{Fe}$).	21
Figura 6 – Esquema representativo da configuração do ensaio de espectroscopia Mössbauer.	23
Figura 7 – Esquemático da curva de relação entre a intensidade e a energia gerada pelo equipamento para um hipotética amostra de ferro puro.	24
Figura 8 – Esquemático das três distintas curvas de intensidade radioativa transmitida que podem ser obtidas pelo espectrômetro Mössbauer.	25
Figura 9 – Gráfico do espalhamento quadrupolar versus transição isomérica para determinar a valência dos íons de ferro nas amostras.	26
Figura 10 – Exemplificação da variedade de granulometria presente na amostragem de escória BSSF.	27
Figura 11 – Exemplificação da variedade de granulometria presente na amostragem de escória convencional.	28
Figura 12 – Moinho pulverizador da marca EMEF, modelo AMP1-M usado para atingir a granulometria de 200 mesh.	28
Figura 13 – Escória BSSF em (a); e escória convencional em (b). Ambas em granulometria de 200 mesh.	29
Figura 14 – Aparelhagem completa para a funcionalidade do espectrômetro Mössbauer do Laboratório de Materiais Avançados.	29
Figura 15 – Caixa de confinamento onde o espectrômetro Mössbauer está montado. . . .	30
Figura 16 – Contagens de sinais transmitidos para a amostra de escória BSSF.	31
Figura 17 – Contagens de sinais transmitidos para a amostra de escória convencional. . .	31
Figura 18 – Gráfico de sinais transmitidos refinados da amostra de escória BSSF.	32
Figura 19 – Gráfico de sinais transmitidos refinados da amostra de escória convencional. .	33

Figura 20 – Resultado da análise DRX produzida a partir de amostras de escória BSSF da mesma empresa siderúrgica.	36
Figura 21 – Tabela de elementos que podem ser observados pelo efeito Mössbauer. . . .	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos cálculos do programa de refino de dados para a escória BSSF.	33
Tabela 2 – Resultados dos cálculos do programa de refino de dados para a escória convencional.	33
Tabela 3 – Resumo dos dados encontrados na literatura e correlação com os valores obtidos na análise Mössbauer deste trabalho.	35
Tabela 4 – Tabela de resultados da análise química por FRX em percentual mássico (wt%).	35
Tabela 5 – Atualização final do resumo dos dados encontrados na literatura e suas atribuições aos sinais Mössbauer desta pesquisa.	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BSSF	<i>Baosteel Slag Short Flow</i>
FRX	Fluorescência de Raios-X
DRX	Difração de Raios-X
FEA	Forno Elétrico a Arco
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>
LD	Linz-Donawitz
IS	Transição Isomérica
QS	Espalhamento Quadrupolar
Bhf	Interações Magnéticas Hiperfinas
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

E_r	Energia de recuo
E_γ	Energia dos raios γ
E_0	Energia de transição do núcleo
I	Intensidade energética
I_g	Intensidade no estado fundamental
I_e	Intensidade no estado excitado
Γ	Largura da curva Lorentziana à 1/2 de I
c	Velocidade da Luz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Panorama do setor siderúrgico	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Aciaria	17
2.2	Escória convencional	18
2.3	O método BSSF	19
2.4	A espectroscopia Mössbauer	20
2.4.1	<i>Efeito Mössbauer</i>	20
2.4.2	<i>Efeito Doppler e o Efeito Mössbauer</i>	22
2.4.3	<i>O Espectrômetro Mössbauer</i>	23
2.4.4	<i>Interpretações do ensaio</i>	23
3	METODOLOGIA	27
3.1	Amostragem	27
3.1.1	<i>Redução granulométrica</i>	27
3.2	Ensaio Mössbauer	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Espectroscopia Mössbauer	31
4.2	Análises químicas complementares	34
4.2.1	<i>Fluorescência de raios-x</i>	35
4.2.2	<i>Difração de raios-x</i>	35
4.3	Resultados finais	36
5	CONCLUSÕES	38
	REFERÊNCIAS	39
	ANEXOS	41
	ANEXO A – TABELA DE ELEMENTOS QUÍMICOS DO EFEITO MÖSSBAUER	42

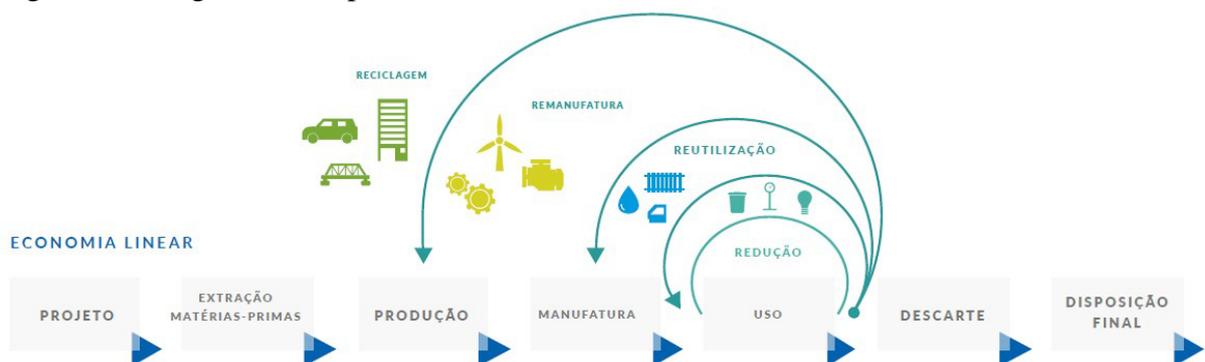
1 INTRODUÇÃO

1.1 Panorama do setor siderúrgico

O processo de manipulação do ferro e fabricação do aço é denominado de siderurgia (DICIO, 2009), e, como todo processo industrial, a siderurgia também gera muitos resíduos e subprodutos. No ano de 2020, foram produzidos 1,877 bilhões de toneladas de aço bruto em todo o mundo, sendo que o consumo per capita de aço bruto do Brasil para o mesmo ano foi de 112 kg/hab, onde a produção brasileira na etapa da aciaria foi de 31.415 kt, segundo o IABr (2021a). A escória é um dos principais subprodutos gerados pela siderurgia, sendo que o volume de escória depende da quantidade de matéria-prima e da qualidade da mesma que foi inserida no forno, mas estima-se que para cada tonelada de aço refinado na aciaria, cerca 10% a 15% de escória é gerada (MOURÃO, 2007), isso nos dá, como exemplo prático para o dado apresentado anteriormente, um total de 47,115 kt de escória gerada no ano de 2020 apenas pelo Brasil.

Neste sentido, as emissões de gases nocivos para a atmosfera terrestre, bem como a geração de resíduos industriais tal qual a escória de aciaria, são problemas ambientais enfrentados pelas empresas de diversos setores e são constantemente guiados pela busca da sustentabilidade e de uma economia circular (sendo este em âmbito nacional). A Figura 1 traz uma representação visual resumida de como funciona o novo modelo econômico proposto.

Figura 1 – Diagrama exemplificando o funcionamento da economia circular.



Fonte: IABr (2021b).

Como solução alternativa à problemática ambiental, *Baoshan Iron & Steel Co., Ltd.* desenvolveu um processo de tratamento de escória de aciaria denominado como o método BSSF, que consiste no resfriamento, moagem e coleta de gases emitidos pela escória ainda na fase líquida, de modo a controlar os seus efeitos na atmosfera, dispensando a necessidade de pátios de resfriamento e permitindo a separação de óxidos de ferro e óxidos brancos.

A espectroscopia Mössbauer é uma técnica que pode ser utilizada na análise de resíduos siderúrgicos, tendo como princípio a emissão de raios- γ através de uma fonte que se movimenta com velocidade definida em relação à amostra a ser estudada, de modo a medir a intensidade de radiação absorvida pelo corpo de prova por meio de um detector que fornecerá um espectro de contagens o qual denominamos de espectro Mössbauer. Segundo Herber (2012), Dyar *et al.* (2006) essa técnica é muito útil para identificar os isótopos do elemento ferro (a partir de uma fonte de cobalto) e por isso, torna-se muito importante para a indústria siderúrgica, sendo um meio de determinar a eficiência de seus fornos convertedores.

No Capítulo 2 serão apresentados todos os embasamentos teóricos necessários para o melhor entendimento de como dar-se-á o estudo da escória de aciaria produzida pelo método BSSF, para melhor reutilizá-la e assim evitar a grande geração de resíduos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Diante da motivação econômica e ambiental apresentada, este trabalho tem por objetivo estudar de que forma o elemento ferro (Fe) encontra-se distribuído na escória de aciaria BSSF, a partir da análise química por espectroscopia Mössbauer.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar a distribuição granulométrica das amostras;
- Realizar a redução em tamanho de 200 mesh para executar a espectroscopia Mössbauer;
- Identificar as fases minerais presentes nas amostras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aço é um dos indicadores de desenvolvimento dos países e por isso, torna-se um dos focos de abordagem da nova economia para mitigar as demandas de recursos naturais, criando um sistema econômico em que quase tudo é reaproveitado, e o aço é um forte candidato para empregar essa sistemática, obtendo mais de 90% dos seus coprodutos e resíduos reaproveitados (IABr, 2021b). Nesse contexto, a produção do aço tem muitos pontos com alto potencial de aproveitamento, sendo um deles a utilização de escória, tanto de alto-forno quanto de aciaria, como agregado na mistura de produção do concreto (GAGG, 2014) e também na utilização de aditivos de concreto em pavimentação asfáltica segundo os autores Maltez *et al.* (2017), Wang e Chen (2016).

2.1 Aciaria

Na siderurgia, o processo de fabricação do aço é classificado em duas categorias de usinas, sendo elas:

- Usinas integradas: apresentam 4 principais etapas de produção: redução, refino, lingotamento e conformação do aço.
- Usinas semi-integradas: apresentam 3 principais etapas de produção: refino, lingotamento e conformação.

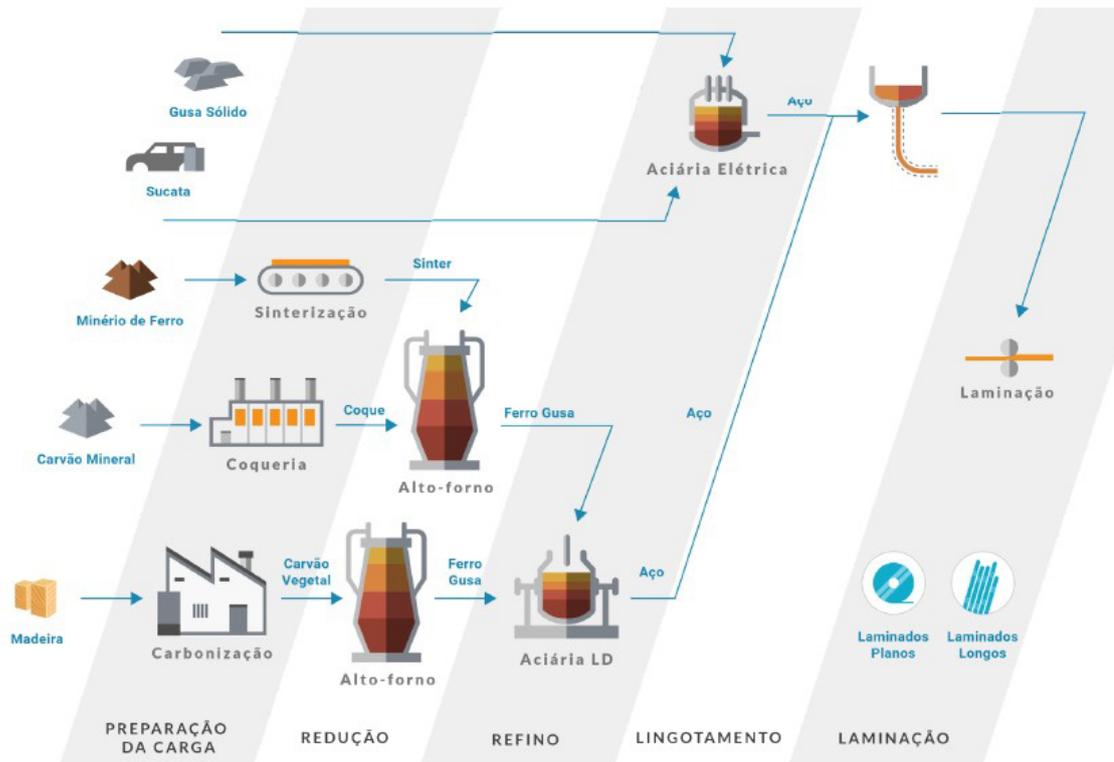
Nas usinas semi-integradas a etapa de redução não se aplica pois parte da reutilização e reciclagem do aço, onde por meio da utilização de sucata, principalmente, estes "*mini-mills*" produzem aço com menor rendimento do que as usinas integradas devido à eficácia do Forno Elétrico a Arco (FEA), além de dependerem fortemente do consumo de aço do país no qual estão inseridos.

Já na etapa do refino das usinas integradas, ocorre a transformação do ferro-gusa proveniente do alto-forno em aço por meio de reações químicas predominantemente exotérmicas no forno básico a oxigênio, ou, em inglês, *Basic Oxygen Furnace* (BOF), que é o novo nome dado aos fornos conversores do tipo Linz-Donawitz (LD) (GHOSH; CHATTERJEE, 2008).

A Figura 2 traz um esquemático com a exemplificação das duas rotas de obtenção do aço e como suas respectivas etapas.

No processo de refino que ocorre dentro do BOF, as reações exotérmicas de redução ajudam a melhorar a eficiência do processo e, alinhados à agitação interna provocada pelo

Figura 2 – Fluxograma do processo de fabricação do aço resumindo as duas categorias de usinas siderúrgicas existentes.



Fonte: IABr (2021b).

sopro supersônico da lança de oxigênio, garantem que o refino ocorra em menos de 60 minutos, garantindo as concentrações ideais de carbono para a obtenção do aço (GHOSH; CHATTERJEE, 2008; MOURÃO, 2007).

2.2 Escória convencional

O que denominamos de escória convencional neste trabalho, é a escória de aciaria que não passa pelo processo BSSF, isto é, uma vez concluída a etapa de refino primário na aciaria é vazado o aço líquido de modo a separá-lo da escória, deixando no BOF apenas a escória para ser vazada em outro recipiente transportador.

Essa escória é então transportada até um pátio de resfriamento e passa por processos de solidificação, resfriamento e britagem para reduzir as concentrações de cal livre nela presentes, pois esta atrapalha a futura usabilidade da mesma devido à sua alta expansibilidade originada pelos níveis de cal livre (SOUZA, 2016).

Segundo Ghosh e Chatterjee (2008), a composição estimada de uma escória de aciaria em um processo de produção voltado para a obtenção de aços carbono e aços de baixa liga, é predominantemente de 40 a 60% de CaO , 10 a 28% de SiO_2 , 5 a 35% de $FeO_{(total)}$, 1

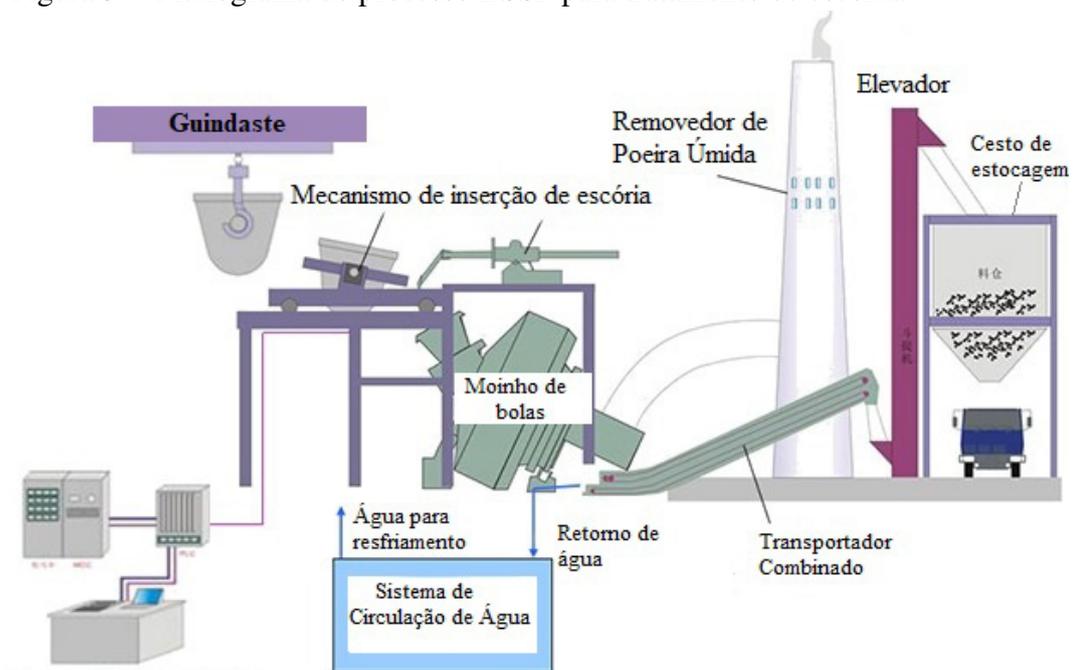
a 3% de P_2O_5 , 2 a 8% de MgO , 1 a 8% de MnO , 1 a 2% de Al_2O_3 , 0 a 2% de CaF_2 , além de porções ínfimas (0,1 a 0,2%) de enxofre e demais componentes mínimos.

2.3 O método BSSF

Desenvolvido pela empresa *Baoshan Iron & Steel Co., Ltd.* desde o ano de 1995 segundo Yin e Xinbing (2011), o processo de tratamento da escória proveniente das aciarias conhecido como método BSSF tem sido uma inovação no ramo siderúrgico e veio sendo aprimorado ao longo dos tempos, atingindo as condições ideais de funcionamento conhecidas atualmente por volta do ano de 2010.

O método tem por finalidade processar a escória líquida oriunda do processo LD em um moinho de bolas, que nada mais é do que um tambor giratório que promoverá o resfriamento, moagem e separação da escória de eventuais concentrações de aço remanescentes devido aos diferentes pontos de fusão entre eles (SOUZA, 2016). Este processo visa gerar um produto de baixa granulometria, dispensar a necessidade de pátios de resfriamento, reduzir o tempo de permanência da escória na planta de produção, mitigar as emissões de partículas durante o processamento da mesma e garantir a diminuição das concentrações de cal livre (YIN; XINBING, 2011).

Figura 3 – Fluxograma do processo BSSF para tratamento de escória.



Fonte: Baowu (2018).

2.4 A espectroscopia Mössbauer

Experimentos fundamentados na emissão e absorção de radiação gama (γ) por meio da ressonância dos núcleos absorvedores haviam sido realizados desde 1929, porém, em 1951 é que pode-se observar pela primeira vez a absorção ressonante por núcleos. Foi em 1958 que Rudolf Ludwig Mössbauer descobriu uma forma de realizar o mesmo efeito sem o recuo do átomo absorvedor, dando origem ao efeito Mössbauer (ALVES, 2011).

O fundamento teórico do efeito Mössbauer é mesmo do citado no parágrafo anterior, com apenas o diferencial de que o núcleo absorvedor da radiação não sofre perda energética por recuo devido à rede cristalina do material, inovando a usabilidade deste efeito. A absorção sem recuo ocorre em diversos elementos, conforme podemos observar no Anexo A, Figura 21 segundo Stevens (1970), sendo que o ferro é apenas um destes elementos. O que define qual elemento poderá ser observado é a fonte emissora de radiação, isto é, o elemento instável que emite os raios γ que serão absorvidos pela amostra.

Nas seções subsequentes teremos um melhor detalhamento desse efeito, bem como iremos entender de que maneira se dá a sua interpretação e representação gráfica.

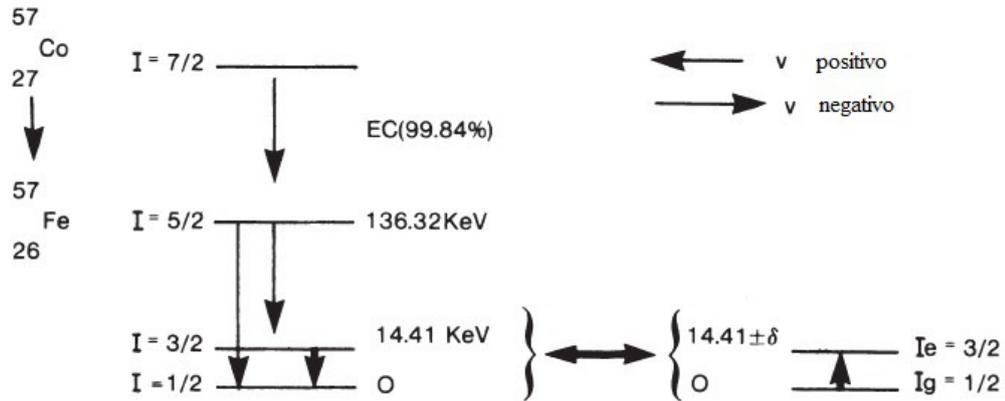
2.4.1 Efeito Mössbauer

O efeito Mössbauer envolve dois princípios básicos de origem, sendo eles a transição de estado do núcleo do átomo, isto é, a mudança entre estado fundamental, estado excitado, e a atividade do núcleo absorvedor, sendo essa denominada de atividade Mössbauer e é relacionada com a intensidade tal que para cada tipo de transição, teremos diferentes valores de intensidade, das quais, segundo Herber (2012) são denominadas I_g a intensidade para o estado fundamental e I_e a intensidade para o estado excitado.

Nesse sentido, temos que átomos instáveis funcionam como fonte de radiação a partir do momento em que absorvem elétrons da camada energética mais interna (camada K), desencadeando uma série de transformações no núcleo do átomo emissor, conforme podemos observar no diagrama de transição energética nuclear representado na Figura 4.

Ao absorver o elétron, o núcleo do átomo instável sofre transições no seu interior, onde o próton é transformado em nêutron emitindo neutrino para a atmosfera gerando um átomo de número atômico menor que o anterior em uma unidade. Para o caso apresentado na Figura 5, o cobalto ao decair para ferro, gera um átomo de ferro em estado excitado de energia, átomo esse

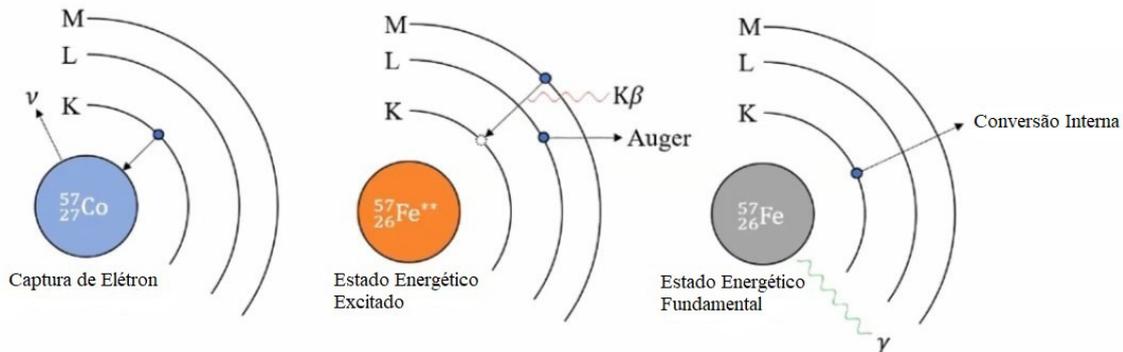
Figura 4 – Diagrama de transição de energia nuclear do átomo de cobalto ($^{57}_{27}\text{Co}$) para um átomo de ferro ($^{57}_{26}\text{Fe}$).



Fonte: Herber (2012, p. 2).

que emitirá radiação γ ao mudar do estado energético excitado (Fe^{**}) para o estado fundamental (Fe), denomina-se a fluorescência de raios gama.

Figura 5 – Esquema de decaimento do átomo de cobalto ($^{57}_{27}\text{Co}$) para um átomo de ferro ($^{57}_{26}\text{Fe}$).



Fonte: Neale (2020).

Na Figura 4, pode-se observar que o núcleo emissor de radiação possui duas combinações de intensidades energéticas que são emitidas até que seja alcançado o estado fundamental de energia. O núcleo da amostra que será observada só irá interagir com a radiação gama se for da exata mesma natureza que o núcleo emissor, sendo observado o fenômeno de ressonância de raios gama a partir do salto energético realizado pelo átomo da amostra. Com isso, a energia da radiação incidente será utilizada tanto para a transição energética do átomo da amostra quanto para superar a energia de recuo do mesmo. Podemos, então, quantificar essas energias de acordo com a Equação 2.1.

$$E_r = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \quad (2.1)$$

Sendo E_r a energia de recuo, E_γ a energia da radiação gama incidente, M a massa do núcleo da amostra e c a velocidade da luz, conforme demonstrado por Greenwood (2012).

Da interpretação da Equação 2.1, podemos concluir que quanto maior for a massa do núcleo da amostra, menor será a quantidade de energia perdida pelo recuo do núcleo e teremos assim uma totalidade de energia da radiação incidente sendo utilizada para realizar a transição do estado fundamental para o estado excitado da amostra em ressonância.

O que Mössbauer descobriu foi que para garantir que a massa do núcleo seja a maior possível, deve-se utilizar um átomo preso em uma rede cristalina, onde os átomos que o circundam, não necessariamente de mesma natureza que o átomo em estudo, irão garantir que a sua posição seja inalterada por meio de interações químicas e eletromagnéticas da microestrutura ao dissiparem parte da energia da radiação gama que seria convertida em recuo do átomo ressonante, minimizando ou anulando a componente E_r da Equação 2.1. Justificando, assim, o porquê de o efeito Mössbauer só poder ser realizado em partículas sólidas e não em gases e líquidos.

2.4.2 Efeito Doppler e o Efeito Mössbauer

Conforme discutido na Seção 2.4.1, o átomo que interage com a radiação gama emitida pelo decaimento do cobalto 57 é apenas o átomo de ferro 57, sendo que este tem abundância de aproximadamente 2,2% (POITRASSON, 2011), ou seja, muito pouco será observado em amostras puramente de ferro.

Uma forma de ampliar o espectro de interações ressonantes dos raios γ é mover o átomo emissor para frente e para trás, fazendo-o oscilar de modo a emitir raios com maior frequência quando o movimento oscilatório se dá em direção ao corpo de prova, e emitindo raios de menor frequência quando se afasta do corpo de prova, concretizando uma combinação do efeito Doppler com o efeito Mössbauer como um amplificador da técnica.

O efeito Doppler garante tal aplicação ao fornecer mais energia, quando em movimento positivo, na direção da amostra, e reduzindo a energia, quando em movimento negativo, afastando-se da amostra. Essa modificação permite alcançar diferentes intensidades energéticas para realizar o salto de transição em todos os possíveis isótopos do átomo emissor de radiação por simples modificação na velocidade de emissão da mesma (HERBER, 2012).

Com isso, temos que a energia dos raios gama pode ser quantificada em relação ao efeito Doppler de acordo com a Equação 2.2.

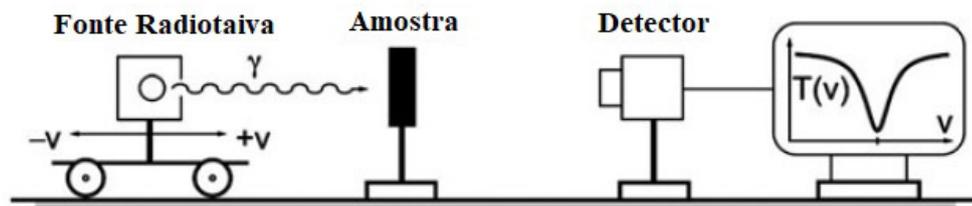
$$E_{\gamma} = E_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (2.2)$$

Sendo E_0 a energia de transição do núcleo e v a velocidade da fonte (não confundir com a indicação do neutrino na Figura 5), de acordo com o autores Alves (2011), Gütlich *et al.* (2010).

2.4.3 O Espectrômetro Mössbauer

Semelhante ao fundamento dos equipamentos de radiografia, a configuração do Espectrômetro Mössbauer consiste de uma fonte emissora de radiação γ , uma peça ou corpo de prova a ser estudado, e um detector, conforme podemos observar na Figura 6.

Figura 6 – Esquema representativo da configuração do ensaio de espectroscopia Mössbauer.



Fonte: Gütlich *et al.* (2010, p. 19).

Constituído de uma fonte eletrônica que acomoda o isótopo emissor de radiação γ , o equipamento oscila em movimento positivo e negativo em relação ao corpo a ser estudado de modo a ampliar o espectro de ressonância do emissor, de acordo com o explicado na seção 2.4.2.

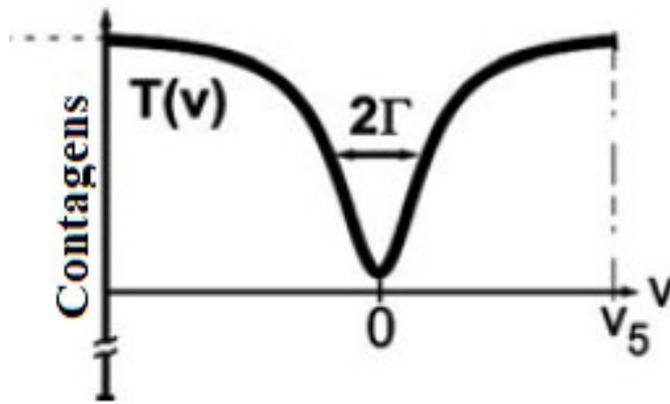
2.4.4 Interpretações do ensaio

O Ensaio Mössbauer nos fornece como resultado imediato uma representação compilada de contagem de sinais de radiação transmitida em função da velocidade de oscilação do emissor, formando assim, uma curva Lorentziana tal qual representado na Figura 7, onde $T(v)$ é o espectro de transmissão em função da velocidade de oscilação da fonte. As curvas Lorentzianas, têm por fórmula o que se apresenta na Equação 2.3, que possui como largura mínima de acordo com o princípio da incerteza de Heisenberg apresentado na Equação 2.4, onde $T_{\frac{1}{2}}$ é a meia vida do átomo emissor de radiação, conforme apresentado por Murad e Cashion (2004).

$$I(E) = \frac{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \quad (2.3)$$

$$\Gamma = \frac{\hbar \ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} \quad (2.4)$$

Figura 7 – Esquemático da curva de relação entre a intensidade e a energia gerada pelo equipamento para um hipotética amostra de ferro puro.



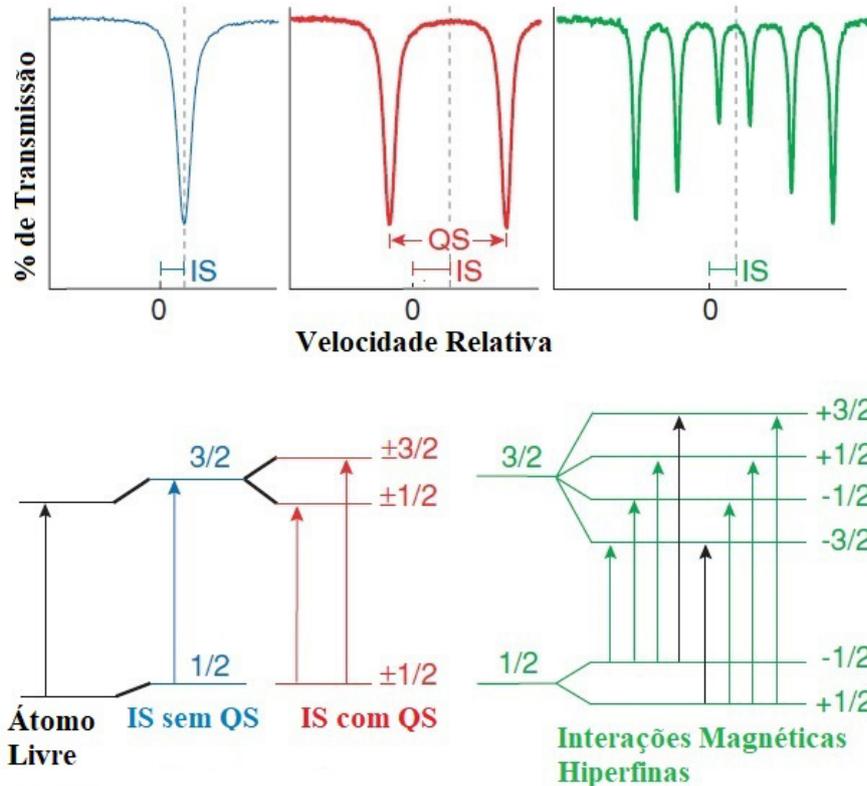
Fonte: Gütlich *et al.* (2010, p. 19).

Na Figura 7 podemos observar uma região com área descrita acima da curva, na qual o termo 2Γ está inserido. Sobre esta região, Neale *et al.* (2020) apresentam uma relação entre a área da curva e a concentração mássica do isótopo para o qual a Lorentziana representa e que está contida na amostra, sendo este um parâmetro muito importante para quantificar cada tipo de isótopo encontrado bem como as suas respectivas concentrações molares no composto.

O que torna a espectroscopia Mössbauer útil no meio científico, apesar da sua limitação, é a possibilidade de distinguir os isótopos com base nas suas características do isômero em estudo, conforme apresentado pelos autores, Neale (2020), Dyar *et al.* (2006), Murad e Cashion (2004).

Dessa forma, há três tipos de sinais que podem ser obtidos pela técnica Mössbauer, sendo o primeiro e o mais simples denominado de Transição Isomérica (IS), definido pelas características das ligações dos íons de ferro que resultarão em um deslocamento do sinal para a esquerda (negativa) ou para a direita (positiva), dependendo da natureza das ligações. Para o caso de ferro metálico, o sinal retornado pelo aparelho será similar ao apresentado na Figura 7, com o pico da curva coincidindo com a velocidade de 0 mm/s.

Figura 8 – Esquemático das três distintas curvas de intensidade radioativa transmitida que podem ser obtidas pelo espectrômetro Mössbauer.



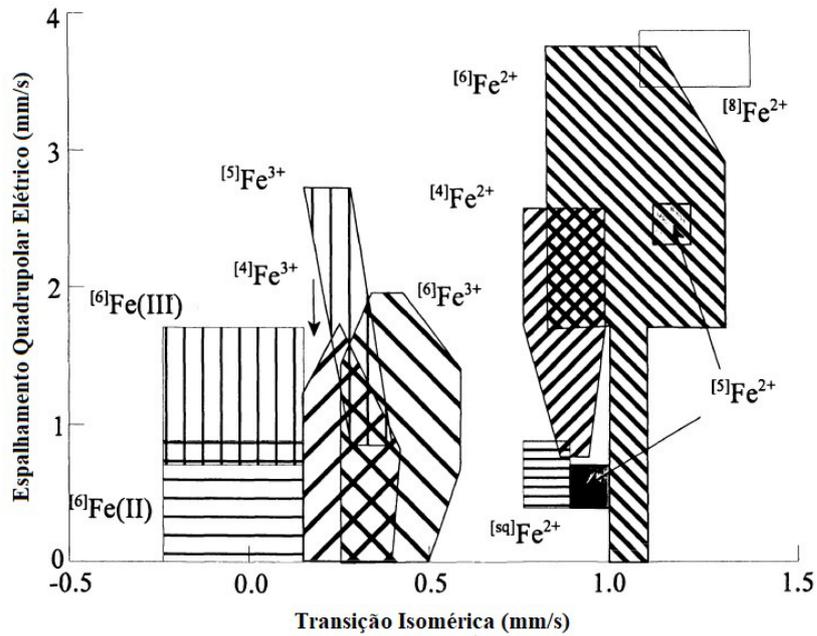
Fonte: Dyar *et al.* (2006, p. 92).

O segundo tipo de sinal é denominado de Espalhamento Quadrupolar (QS) elétrico, o qual tem por característica a divisão de um singlete em dois picos, dubleto, devido ao gradiente de campo elétrico ser assimétrico por causa da distribuição eletrônica na camada de valência do isótopo e das interações entre os elétrons ligantes da estrutura química na qual o mesmo se encontra. Quando o gradiente de campo elétrico é 0, *i. e.* simétrico, o sinal será um singlete (Figuras 7 e Figura 8 gráfico azul), ou, se for assimétrico, será dividido em dois sinais espaçados tal qual o representado pela curva vermelha na Figura 8.

Por fim, as Interações Magnéticas Hiperfinas (Bhf) que ocorrem devido ao fato de o núcleo do elemento ferro possuir momento magnético e este, ao interagir com um campo magnético externo aplicado, desdobra-se em seis sinais distintos e proporcionais, sexteto com taxas de proporcionalidade de Γ da ordem de 3:2:1:1:2:3, de acordo com o espalhamento magnético hiperfino por efeito Zeeman, resultando em picos de larguras iguais porém de intensidades diferentes, muito embora as intensidades dependam de diversos fatores, segundo Silva (1977), conforme o ilustrado na curva verde da Figura 8.

Comparações entre a transição isomérica e o espalhamento quadrupolar permitem

Figura 9 – Gráfico do espalhamento quadrupolar versus transição isomérica para determinar a valência dos íons de ferro nas amostras.



Fonte: Murad e Cashion (2004, p. 55).

plotar um gráfico QS x IS tal qual a Figura 9 ilustra, nos permitindo identificar quais são os estados de valência para o ferro presentes na amostra em estudo. O gráfico da Figura 9 foi construído com resultados empíricos de estudos de espectroscopia Mössbauer ao longo dos anos e apresentado por Murad e Cashion (2004).

3 METODOLOGIA

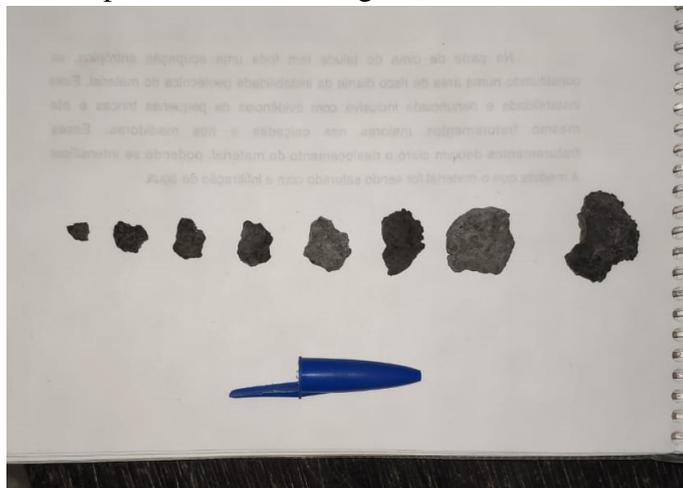
3.1 Amostragem

A amostra de escória BSSF, bem como a amostra de escória convencional, foram fornecidas para a equipe de pesquisa do Laboratório de Fundição da Universidade Federal do Ceará (UFC) por uma indústria siderúrgica localizada no estado do Ceará. A partir das amostras entregues, foram realizadas a homogeneização e o quarteamento dos dois tipos de escória separadamente.

3.1.1 Redução granulométrica

A amostra de escória BSSF apresenta uma ampla variedade de granulometrias porém com certa proximidade entre elas, como consequência do processamento do método BSSF, tal qual pode-se observar na Figura 10 e, a título de comparação, a diferença com a escória convencional, que apresenta maior disparidade nos tamanho encontrados, conforme a Figura 11.

Figura 10 – Exemplificação da variedade de granulometria presente na amostragem de escória BSSF.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para alcançar a granulometria indicada para inserção no equipamento de espectroscopia Mössbauer foi utilizado um Moinho Pulverizador de Painela, de acordo com o apresentado na Figura 12, o qual promoveu a redução granulométrica por meio de golpes mecânicos promovidos pela a agitação simultânea dos grãos da amostra com os componentes internos da painela.

O referido moinho forneceu um material particulado fino que foi posteriormente selecionado por uma peneira da marca Granutest com abertura de 0,074 mm (ou ABNT 200,

Figura 11 – Exemplificação da variedade de granulometria presente na amostragem de escória convencional.



Fonte: Produzido pelo autor.

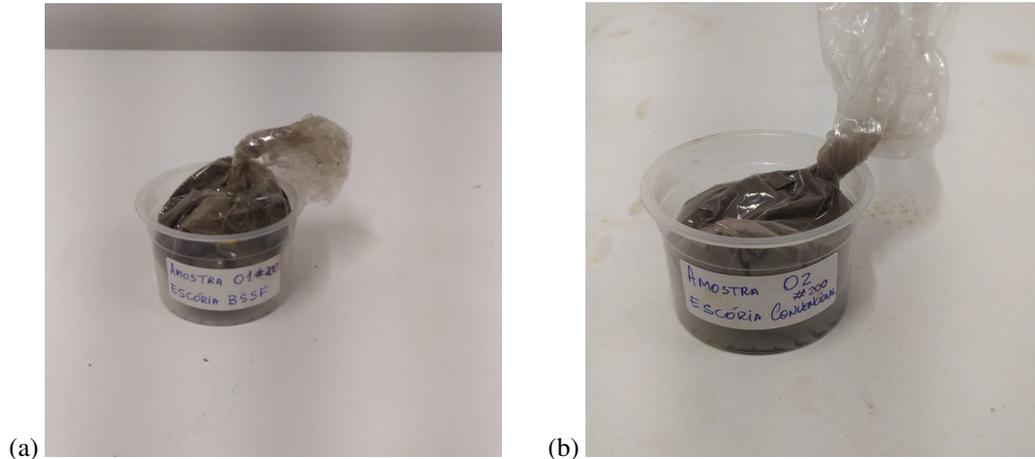
Figura 12 – Moinho pulverizador da marca EMEF, modelo AMP1-M usado para atingir a granulometria de 200 mesh.



Fonte: Produzido pelo autor.

200 mesh), tal qual o representado na Figura 13. Deste montante, uma amostra de 5 gramas de cada tipo de escória foi selecionada, armazenada em tubo do tipo Eppendorf e encaminhada para o Laboratório de Materiais Avançados da UFC, onde foi realizado o ensaio de espectroscopia Mössbauer.

Figura 13 – Escória BSSF em (a); e escória convencional em (b). Ambas em granulometria de 200 mesh.



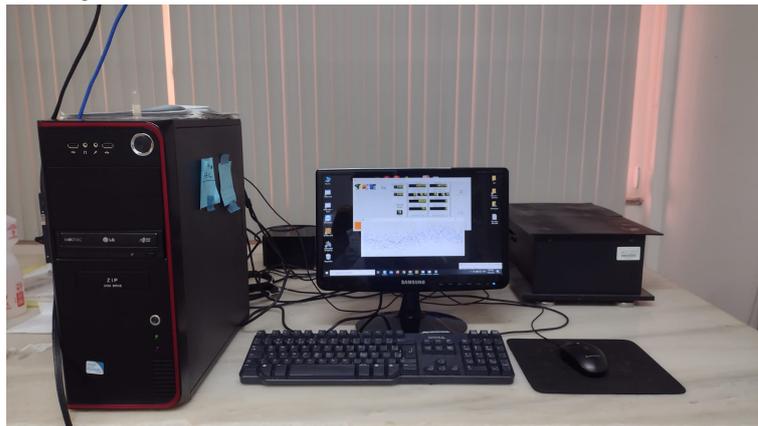
(a)
Fonte: Produzido pelo autor.

(b)

3.2 Ensaio Mössbauer

As amostras foram ensaiadas e pré analisadas pela equipe do Laboratório de Materiais Avançados e permaneceram um total de 3 dias em exposição no equipamento (Figura 14) para garantir uma quantidade suficiente e significativa de sinais, de modo a levar os resultados à um programa de pós processamento das amostras.

Figura 14 – Aparelhagem completa para a funcionalidade do espectrômetro Mössbauer do Laboratório de Materiais Avançados.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 14 temos uma visão geral do equipamento que coleta a contagem de radiação transmitida pela amostra em função da velocidade, mas o espectrômetro encontra-se confinado na caixa preta ao lado direito da tela do computador mostrado na Figura 14, o qual pode ser melhor identificado na Figura 15, que não pode ser aberto devido à medidas de segurança em razão da radiação- γ gerada no processo.

Figura 15 – Caixa de confinamento onde o espectrômetro Mössbauer está montado.



Fonte: Produzido pelo autor.

O equipamento foi calibrado com uma fonte de cobalto 57 e um absorvedor de ferro metálico puro, e durante a calibração notou-se o deslocamento isomérico em $-0,11$ mm/s, quando na realidade deveria ter coincidido com o valor de 0 mm/s. Dessa forma, foi somado $0,11$ mm/s como valor de correção apenas para a transição isomérica das amostras.

Os corpos de prova que foram inseridos no equipamento foram montados em quantidades pequenas sobre a face aderente de uma fita adesiva comum. Esta ação se fez necessária devido à amostra ser de granulometria muito pequena (200 mesh) e não ser possível montá-la entre os dois anéis de fixação que serão acoplados na região de inserção de amostras do espectrômetro. Assim, com porções do pó fixados em pedaços de fita adesiva, foi possível preparar um corpo de prova espesso e sem espaços vazios aparentes, de modo que o bombardeamento de radiação- γ ocorrerá tal qual as normas do ensaio especificam.

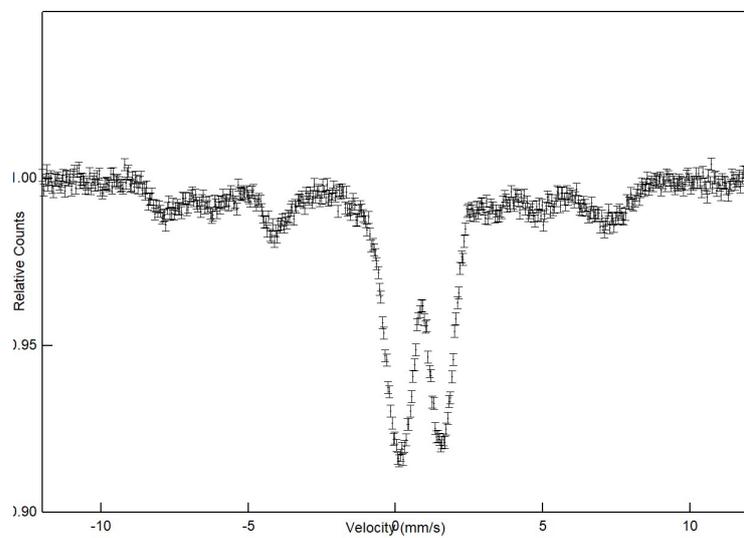
O refino dos resultados após o ensaio foi realizado pela equipe do Laboratório de Materiais Avançados por meio do programa *Normos Mössbauer Fitting Program*, versão 20.05.1995 e fornecido ao autor deste trabalho com algumas considerações prévias para realizar as devidas identificações qualitativas e demais análises dos isótopos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Espectroscopia Mössbauer

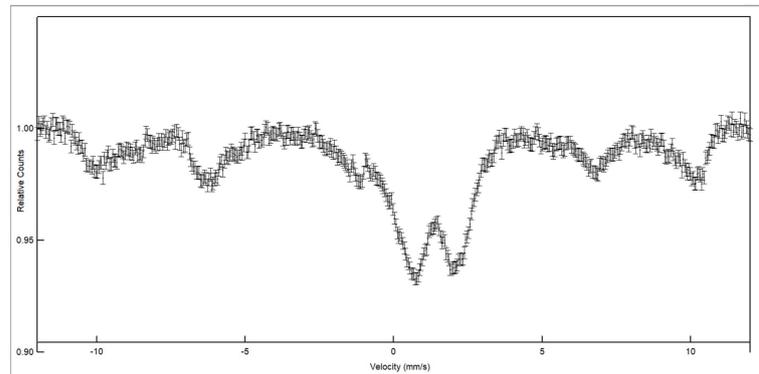
O espectrômetro forneceu os gráficos de contagem de transmissão de sinais através da amostra pela variação da velocidade do emissor para a escória BSSF, totalizando 302.600 contagens (Figura 16) e para a escória convencional, totalizando 227.600 contagens (Figura 17).

Figura 16 – Contagens de sinais transmitidos para a amostra de escória BSSF.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 17 – Contagens de sinais transmitidos para a amostra de escória convencional.



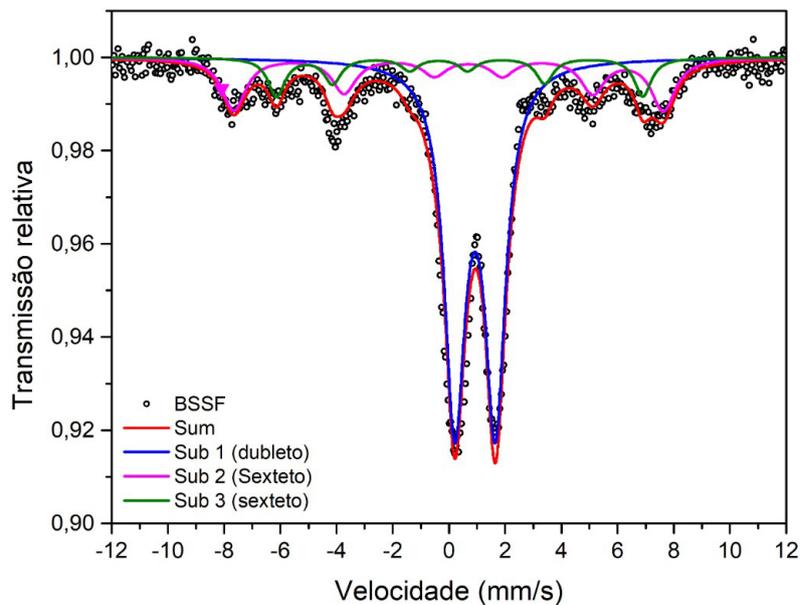
Fonte: Produzido pelo autor.

É importante notar que nestes casos, o simples gráfico de contagens por variação de velocidade não nos fornece muitos detalhes sobre os sinais além de permitir identificar as transições isoméricas, acusando não termos ferro metálico na amostra, a existência de pelo

menos um sinais de espalhamento quadrupolar (um dubleto) e pelo menos uma reação de interferência por campo magnético (um sexteto), para cada uma das amostras. Porém, essas observações sobre estes gráficos em específico são totalmente especulativas e incertas (SILVA, 1977; HERBER, 2012; MURAD; CASHION, 2004), pois o gráfico de contagens nos fornece uma visão geral do somatório das intensidades de radiação- γ transmitidas o que não é muito útil sem um pós-processamento de cálculos realizados por um *software* confiável.

Com o refino destes dados, temos como resultado uma situação bem diferente, conforme o ilustrado pelas Figuras 18 e 19, onde foram evidenciadas a existência de um dubleto e dois sextetos para ambas as amostras.

Figura 18 – Gráfico de sinais transmitidos refinados da amostra de escória BSSF.

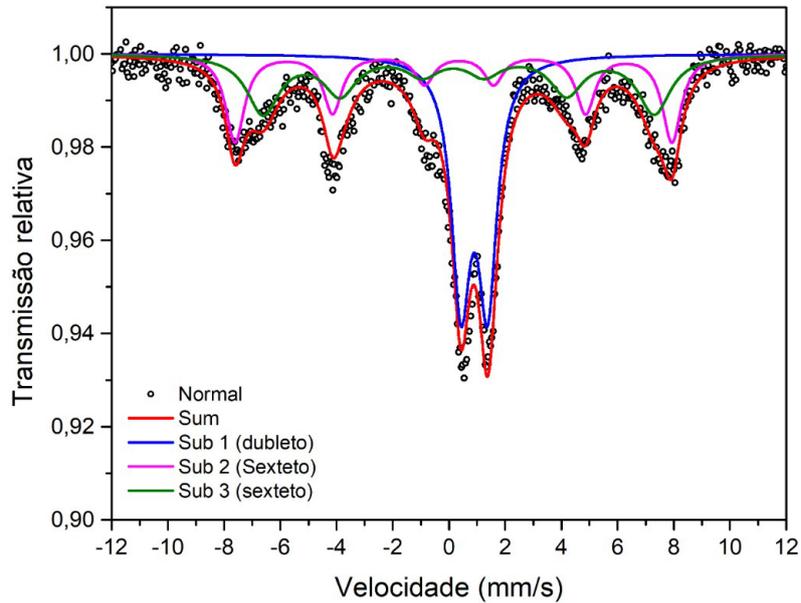


Fonte: Produzido pelo autor.

A partir dos gráficos refinados fornecido pelo programa *Normos* com 95% de precisão nos cálculos, podemos afirmar que há alguma similaridade química entre as duas amostras devido aos tipos de Lorentzianas apresentadas nas duas ocasiões, porém, evidencia-se, também, as suas diferenças de intensidade transmitida e nas larguras (Γ) das Lorentzianas, indicando fases distintas mas com íons de ferro com valências semelhantes.

O algoritmo forneceu os devidos cálculos com base nas larguras das linhas (Γ), IS e QS em mm/s, Bhf em tesla (T), e nas áreas equivalentes (concentração) em porcentagem, que são apresentados nas Tabelas 1 e 2 para a escória BSSF e para a escória convencional respectivamente.

Figura 19 – Gráfico de sinais transmitidos refinados da amostra de escória convencional.



Fonte: Produzido pelo autor.

As curvas "Sub 2" e "Sub 3" correspondem ao "sexteto 1" e "sexteto 2", respectivamente.

Tabela 1 – Resultados dos cálculos do programa de refino de dados para a escória BSSF.

BSSF					
	Γ (mm/s)	IS (mm/s)	QS (mm/s)	Bhf (T)	Área (%)
Dubleto	0,88	1,04	1,44	-	65,67%
Sexteto 1	1,03	0,45	-0,71	47,38	22,57%
Sexteto 2	0,72	0,12	0,75	40,43	11,76%

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 2 – Resultados dos cálculos do programa de refino de dados para a escória convencional.

Convencional					
	Γ (mm/s)	IS (mm/s)	QS (mm/s)	Bhf (T)	Área (%)
Dubleto:	0,80	1,01	0,95	-	38,30%
Sexteto 1	0,81	0,37	-0,20	48,20	28,68%
Sexteto 2	1,40	0,36	0,19	43,16	33,02%

Fonte: Produzido pelo autor.

Dos valores descritos nas Tabelas 1 e 2, foi possível consultar a literatura em busca entender quais eram as possíveis espécies químicas presentes em cada uma das amostras.

Inicialmente, foi consultada a imagem apresentada por Murad e Cashion (2004, p. 55), a qual já foi discutida neste trabalho e corresponde à Figura 9. A finalidade desta consulta foi identificar quais eram as valências e os sítios dos íons presentes em cada um dos sinais e, chegou-se a conclusão que, para a escória BSSF, o dubleto corresponde a um íon do tipo $^{[4]}Fe^{2+}$ e o segundo sexteto corresponde ao $^{[6]}Fe^{2+}$. Já para a amostra convencional, o dubleto foi caracterizado como $^{[6]}Fe^{2+}$ e o segundo sexteto como $^{[4]}$ ou $^{[6]}Fe^{3+}$, sendo os números entre colchetes referentes à geometria das ligações, onde [4] são os sítios tetraédricos e [6] os sítios octaédricos. A incerteza para o segundo sexteto, íon Fe^{3+} , da amostra convencional é devida à região aproximada no diagrama que consiste de uma sobreposição para as geometrias dos sítios tetraédricos e octaédricos.

O primeiro sexteto de cada uma das amostras não foi possível de caracterizar devido aos valores negativos dos quadrupolos que não são contemplados com base no diagrama da Figura 9. Portanto, foram utilizadas as tabelas classificativas apresentadas tanto pelo autor Ribeiro (2010, p. 45) quanto pela autora Silva (1977, p. 38) para estipular a valência dos mesmos com base apenas nas suas IS, resultando em Fe^{3+} para ambos, sem a possibilidade de identificação da geometria das ligações.

Com as identificações parciais feitas e de acordo com Stevens *et al.* (2002), que apresenta um compilado de dados de ensaios Mössbauer, foi realizada uma consulta comparativa com base nos valores IS, QS e Bhf, com os dados empíricos que mais se aproximam com aqueles encontrados neste trabalho. A Tabela 3 resume os valores encontrados na literatura e a correspondência (coluna "Associação") com os sinais presentes na amostra deste trabalho. Para os valores em parênteses presentes na células correspondentes à IS, QS e Bhf, temos o módulo da variação dos resultados informados pelas referências citadas por Stevens *et al.* (2002), de modo a facilitar a comparação entre os demais.

4.2 Análises químicas complementares

De acordo com Murad e Cashion (2004), Dyar *et al.* (2006), Herber (2012), a técnica de espectroscopia Mössbauer, assim como todo tipo de espectroscopia, não é absoluta ou suficiente para afirmar por si só, e com precisão, quais os tipos de fases encontradas bem como as concentrações de cada íon. Sendo ela uma técnica complementar e que deve ser tratada como tal. Este fato é importante pois devido à situação pandêmica na qual esta pesquisa foi elaborada, não foi possível realizar análises químicas de DRX e FRX para ajudar a prever com

Tabela 3 – Resumo dos dados encontrados na literatura e correlação com os valores obtidos na análise Mössbauer deste trabalho.

	Nome	Composição química	IS (mm/s)	QS (mm/s)	Bhf (Koe)	Associação
BSSF	Vesuvianita	$Ca_{10}(Mg, Fe)_2 Al_4(SiO_4)_5 (Si_2O_7)_2 (OH)_4$	1,01 (0,02)	1,44 (0,02)	-	Dubleto
	Goetita	$\alpha - FeOOH$	0,44	-0,6 (0,08)	530	Sexteto 1
	-	-	-	-	-	Sexteto 2
Convencional	-	-	-	-	-	Dubleto
	Hematita	$\alpha - Fe_2O_3$	0,34 (0,05)	-0,15(0,05)	488 (5)	Sexteto 1
	Magnetita	Fe_3O_4	0,28 (0,15)	0,1 (0,2)	480 (40)	Sexteto 2

Fonte: Produzido pelo autor.

mais exatidão as fases na qual os íons de ferro estão presentes.

Com isso, foram fornecidos dados de análises de DRX e FRX do trabalho pré-publicado do autor Klug *et al.* (2022), cujas amostras de escória BSSF são originadas da mesma indústria siderúrgica daquelas usadas no presente trabalho, afim de fornecer uma base comparativa mínima de modo a justificar as fases que não foram possíveis de identificar com base no livro Mössbauer *Mineral Handbook* e confirmar, possivelmente, aquelas fases que já foram identificadas.

4.2.1 Fluorescência de raios-x

Tabela 4 – Tabela de resultados da análise química por FRX em percentual mássico (wt%).

Fe_{Total}	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	MnO	TiO ₂
27.42	42.14	8.86	8.68	1.75	1.98	1.95	0.26

Fonte: Klug *et al.* (2022)

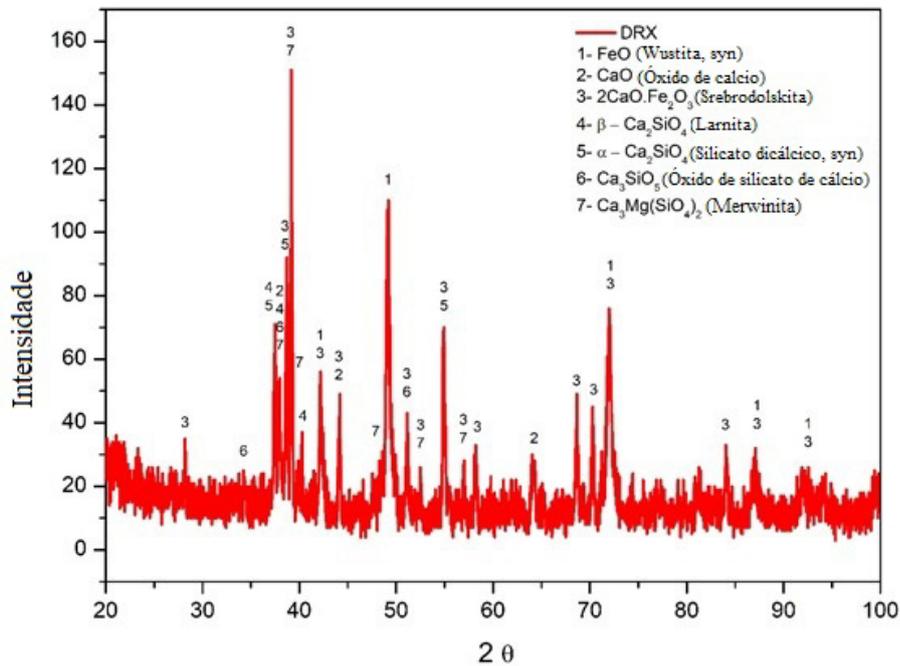
Os valores da análise química por FRX fornecidos para comparação encontram-se na Tabela 4 e indicam que há um total de 27,42% de ferro, que é o elemento de maior relevância para o presente estudo, bem como elevada concentração de cálcio (CaO), 42,14%, sendo estas as duas maiores concentrações em toda a amostra.

4.2.2 Difração de raios-x

O resultado da análise DRX encontra-se na Figura 20 e confirma a existência de grandes quantidades de srebrodolskita ($2CaFe_2O_3$), a qual não consta nos dados apresentados por Stevens *et al.* (2002, p. 587–634), e wustita (FeO) em menores quantidades (KLUG *et al.*, 2022).

As fases encontradas estão em conformidade com aquelas identificadas pela literatura para o mesmo tipo de escória (BSSF), apresentando merwinita, olivina ($2MgO.2FeOSiO_2$), silicato dicálcico α ($4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$) e β ($2CaOFe_2O_3$), cal livre (CaO), MgO, wustita (FeO), haturita e uma solução sólida de (CaO-FeO-MnO-MgO) (YILDIRIM; PREZZI, 2011 apud KLUG *et al.*, 2022).

Figura 20 – Resultado da análise DRX produzida a partir de amostras de escória BSSF da mesma empresa siderúrgica.



Fonte: Klug *et al.* (2022).

4.3 Resultados finais

Tabela 5 – Atualização final do resumo dos dados encontrados na literatura e suas atribuições aos sinais Mössbauer desta pesquisa.

	Nome	Composição química	IS (mm/s)	QS (mm/s)	Bhf (KOe)	Associação
BSSF	Vesuvianita	$Ca_{10}(Mg,Fe)_2Al_4(SiO_4)_5(Si_2O_7)_2(OH)_4$	1,01 (0,02)	1,44 (0,02)	-	Dubleto
	Goetita	$\alpha - FeOOH$	0,44	-0,6 (0,08)	530	Sexteto 1
	Srebrodolskita	$2CaFe_2O_3$	0,18	0,72	43,2	Sexteto 2
Convencional	Wustita	FeO	1,01	0,99	-	Dubleto
	Hematita	$\alpha - Fe_2O_3$	0,34 (0,05)	-0,15(0,05)	488 (5)	Sexteto 1
	Magnetita	Fe_3O_4	0,28 (0,15)	0,1 (0,2)	480 (40)	Sexteto 2

Fonte: Produzido pelo autor.

De posse das informações fornecidas pelos dados complementares temos que os dois sinais faltantes são, possivelmente, srebrodolskita ($2CaFe_2O_3$) para o sexteto 2 da escória BSSF, e wustita (FeO) para a escória convencional. Devido à ausência de informações para a sebrodoskita na literatura base, foi utilizado como parâmetro comparativo o encontrado pelo autor Amorim (2011, p. 59), resultando em um composto de geometria tetraédrica para o íon Fe^{3+} que foi assim confirmado para o sexteto 2. De forma análoga, a confirmação da fase wustita (FeO) para o dubleto presente na amostra de escória convencional pode ser feita a partir da mesma tabela apresentada por Amorim (2011) e pela vasta gama de valores para a mesma fase apresentados por Stevens *et al.* (2002), comprovando a forte correspondência entre os resultados.

Os valores das associações completas encontram-se na Tabela 5 a qual representa uma atualização cronológica da Tabela 3.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho nos permite concluir que a análise química por espectroscopia Mössbauer fornece informações específicas e importantes a respeito dos íons do elemento ferro distribuídos nas escórias de fornos convertedores. Porém, tal qual a literatura informa, esta é uma análise que não é suficiente por si só para caracterizar as fases dos referidos íons, sendo, assim, uma técnica complementar para o enriquecimento das análises.

É importante destacar o elevado teor de óxidos de ferro presentes em ambos os tipos de escórias e nenhum sinal da fase de ferro metálico foi encontrada, sinalizando uma ótima separação entre a corrida de escória e a corrida de aço. Ademais, temos que os objetivos do trabalho foram alcançados com sucesso e as fases identificadas possuem respaldo teórico e significado prático para ambas as amostras.

Para trabalhos futuros, a presente pesquisa oferece as seguintes possibilidades:

- Realização de análises químicas elementares de DRX e FRX nas mesmas amostras fornecidas ao presente estudo (Em andamento);
- Pesquisar possíveis alterações no processo industrial de modo a reduzir ainda mais as concentrações de ferro nas escórias.

Por fim, o presente trabalho é de grande relevância para a comunidade acadêmica por caracterizar as fases minerais encontradas na escória do processo BSSF e servir como base para estudos semelhantes.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. C. P. **Determinação por espectroscopia mössbauer dos sítios de ferro em matérias primas geopoliméricas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/15988>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- AMORIM, B. F. **Síntese e caracterização estrutural e magnética da ferrita de cálcio.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18594>. Acesso em: 11 fev. 2022.
- BAOWU, S. G. **The BAT steel slag treatment technology.** 2018. Disponível em: <http://rd.baosteel.com/zypt/en/ability/see/abilityDetailsBSSF/2/4c2fba8dd97746f2a990c44e19857106>. Acesso em: 6 mar. 2021.
- DICIO. **Dicionário Online de Português.** 2009. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/siderurgia/>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- DYAR, M.; AGRESTI, D.; SCHAEFER, M.; GRANT, C.; SKLUTE, E. Mössbauer spectroscopy of earth and planetary materials. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 34, p. 83–125, 04 2006. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.earth.34.031405.125049>. Acesso em: 28 jan. 2022.
- GAGG, C. R. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. **Engineering Failure Analysis**, v. 40, p. 114–140, 2014. ISSN 1350-6307. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630714000387>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- GHOSH, A.; CHATTERJEE, A. **Iron making and steelmaking: theory and practice.** [S. l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2008.
- GREENWOOD, N. N. **Mössbauer spectroscopy.** [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- GÜTLICH, P.; BILL, E.; TRAUTWEIN, A. X. **Mössbauer spectroscopy and transition metal chemistry: fundamentals and applications.** [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2010.
- HERBER, R. H. **Chemical Mössbauer Spectroscopy.** [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- IABr. **Anuário estatístico 2021.** Rio de Janeiro, RJ; Brasil: Instituto Aço Brasil, 2021. ISSN 1806-3195. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2021/07/Anuario_Completo_2021.pdf. Acesso em: 19 nov. 2021.
- IABr. **Relatório de sustentabilidade 2020.** 12. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2021. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/index.htm>. Acesso em: 27 nov. 2021.
- KLUG, J. L.; MEDEIROS, S. L. S.; CALDAS, H.; BENTES, M.; BEKER, H. Separation of iron and calcium from a bssf steelmaking slag through acid leaching. **Materials Research**, 2 2022. Em fase de pré-publicação.

MALTEZ, N. G.; PAULINO, G. M.; JANUZZI, R. V.; CARNEIRO, L. Potencialidade do uso da escória de aciaria na produção de blocos de concreto para pavimentação. **69ª Reunião Anual da SBPC-16 a**, v. 22, 2017. Disponível em: http://www.sbpcnet.org.br/livro/69ra/resumos/resumos/2200_16ec9ae1b918268ba125439b2bfc7248.pdf. Acesso em: 25 nov. 2021.

MOURÃO, M. B. **Introdução à siderurgia**. Rua Antonio Comparato, 218 - Campo Belo 04605-030 - São Paulo - SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. ISBN 85-7737-01 5-1.

MURAD, E.; CASHION, J. **Mossbauer Spectroscopy of Environmental Materials and Their Industrial Utilization**. 1. ed. [S. l.]: Springer Science & Business Media New York, 2004. ISBN 978-1-4020-7726-5.

NEALE, Z. G. **Mossbauer Spectroscopy Overview**. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=v1TSYnFJP-c>. Acesso em: 27 nov. 2021.

NEALE, Z. G.; LIU, C.; CAO, G. Effect of synthesis ph and edta on iron hexacyanoferrate for sodium-ion batteries. **Sustainable Energy & Fuels**, Royal Society of Chemistry, v. 4, n. 6, p. 2884–2891, 2020. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/se/d0se00120a>. Acesso em: 27 nov. 2021.

POITRASSON, F. **Encyclopedia of Astrobiology**. Berlin, Heidelber: Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-11274-4. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-11274-4_811. Acesso em: 12 dez. 2021.

RIBEIRO, T. S. **Caracterização por difração de raios-X e espectroscopia Mössbauer de nanopartículas de SnO₂ dopadas com ferro**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

SILVA, M. T. X. **Aplicação do efeito Mössbauer à análise de amostras de basalto**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/150029>. Acesso em: 12 dez. 2021.

SOUZA, T. V. d. P. **Caracterização de escória de conversor a oxigênio obtida no processo BSSF antes e após tratamento hidrometalúrgico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, dezembro 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/22587>. Acesso em: 27 nov. 2021.

STEVENS, J. G. **Mössbauer Effect Data Index: Covering the 1969 Literature**. 1. ed. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 1970. ISBN 13: 978-1-4684-6074-2.

STEVENS, J. G.; KHASANOV, A. M.; MILLER, J. W.; POLLAK, H.; ZHE, L. **Mössbauer mineral handbook**. Mössbauer Effect Data Center Asheville, 2002. ISSN 0272-2755. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/36660904/MineralHandbook.pdf>. Acesso em: 4 fev. 2022.

WANG, H.-Y.; CHEN, K.-W. A study of the engineering properties of clsm with a new type of slag. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 102, p. 422–427, 2016.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. **Advances in civil engineering**, Hindawi, v. 2011, 2011. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2011/463638/>. Acesso em: 10 fev. 2022.

YIN, L.; XINBING, W. Application of the bssf molten steel slag processing technology in posco. **Baosteel Technical Research**, Baosteel Technical Research, v. 5, n. 2, p. 20, 2011. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/8b6e128d5d72430a43444549d1d49702/1?pq-origsite=gscholar&cbl=237368>. Acesso em: 3 nov. 2021.

