

Avaliação da eficácia da técnica de difração de raios-X para caracterizar fases presentes em dois ferros fundidos cinzentos perlíticos com diferentes adições de nióbio

Bárbara C. Mendanha Reis^{1,2}, G. Lúcio de Faria², Mirian B. O. Bortoluzzi³, Natália F.S. Pereira¹, Denílson J. do Carmo^{4,5}, Anderson J. dos Santos^{1,6}, Marcelo Araújo Câmara¹

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brasil.

² Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Universitário do Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, CEP: 35400-000, Brasil.

³ Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campus Nova Andradina, Nova Andradina, CEP 79750-000, MS, Brasil.

⁴ Centro Tecnológico de Fundição Marcelino Corradi–SENAI–CETEF–Itaúna CEP 35680-270, MG, Brasil.

⁵ Universidade de Itaúna, Itaúna CEP 35680-142, MG, Brasil

⁶ Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, Campus Muriaé, Muriaé, CEP 36884-036, MG, Brasil.

E-mails: barbara.reis@ufop.edu.br

DOI: <https://doi.org/10.30609/jeti.v4i03.13153>



Abstract. This work aims to present a brief state of the art regarding the characterization techniques currently used to evaluate the effects of fabrication processes on the structure of gray cast iron, as well as to evaluate the effectiveness of the X-ray diffraction technique (XRD) to identify and quantify the phases present in two types of gray cast iron: one with low (0.02% by weight) and the other with high niobium content (0.21-0.24% by weight). For both samples, the three main phases were identified: graphite-G, ferrite-Fe(α) and cementite-Fe₃C. However, not even for the sample with the highest niobium content, niobium carbide (NbC) was identified by this technique, a fact justified by the detection limit of the conventional diffractometer used and the small fraction of this carbide in the analyzed samples. The modification in the niobium concentration was not enough to promote significant differences in the diffractograms. The fluorescence of iron excited mainly by Cu K α radiation resulted in a high level of noise in the measurements and made it impossible to quantify the phases by means of Rietveld refinement. Thus, for the analyzed niobium contents and limitations of the instrumental conditions used in this work to minimize these iron fluorescence effects in the samples (but usual operating conditions of copper tube equipment in routine operation), it is concluded that the Cu tube XRD technique is not effective for quantifying phase fractions nor for identifying NbC in gray cast iron.

Keywords: Gray Cast Iron; Niobium; XRD; phases.

Resumo. Este trabalho tem como objetivo apresentar um breve estado da arte a respeito das técnicas de caracterização atualmente utilizadas para se avaliar efeitos de processos de fabricação sobre a estrutura de ferros fundidos cinzentos, assim como avaliar a efetividade da técnica de difração de raios-X (XRD) para identificar e quantificar as fases presentes em dois tipos de ferros fundidos cinzentos: um com baixo (0,02% em peso) e outro com alto teor de nióbio (0,21-0,24% em peso). Para ambas as amostras, as três fases principais foram identificadas: grafita-G, ferrita- Fe(α) e cementita- Fe₃C. Porém, nem mesmo para a amostra com maior teor de nióbio, o carboneto de nióbio (NbC) foi identificado por essa técnica, fato justificado pelo limite de detecção do difratômetro convencional utilizado e da pequena fração deste carboneto nas amostras analisadas. A modificação na concentração de nióbio não foi suficiente para promover diferenças significativas nos difratogramas. A fluorescência do ferro excitado principalmente pela radiação Cu K α resultou em alto nível de ruído nas medições e impossibilitou quantificar as fases por meio do refinamento de Rietveld. Dessa forma, para os teores de nióbio analisados e limitações das condições instrumentais utilizadas neste trabalho para minimizar esses efeitos de fluorescência do ferro nas amostras (mas condições usuais de operação de equipamentos com tubo de cobre em operação de rotina), conclui-se que a técnica de XRD com tubo de Cu não é eficaz para a quantificação de frações de fases e nem para a identificação de NbC em ferros fundidos cinzentos.

Palavras-chave: Ferro fundido cinzento; nióbio; XRD; fases

1. Introduction

Aço e ferro fundido, nessa ordem, são os dois materiais metálicos mais produzidos mundialmente (ELORZ; GONZÁLEZ e VERDEJA, 2018). O ferro fundido cinzento pode ser destacado como uma das principais famílias de ferro fundido: constituiu 47% das ligas metálicas fundidas no ano de 2019 e, no contexto nacional, respondeu por 55% da produção brasileira de fundidos nesse mesmo ano (MODERN CASTING STAFF REPORT, 2021). Atualmente, aplicações em diversos componentes da indústria automobilística (polias, carcaças, discos e tambores de freio, por exemplo) justificam sua elevada produção. Neste contexto, observar as relações entre processos de fabricação, microestrutura e propriedades mecânicas é de fundamental importância, tendo em vista que, para aplicações específicas, propriedades diferentes serão requeridas para os produtos manufaturados a partir desses materiais.

Nesse sentido, buscou-se verificar a relevância desse tema por meio da análise de publicações em uma das bases de dados mais utilizadas para pesquisas, a *ISI Web of Science*

entre os anos 2000 e 2021 a fim de verificar quais as técnicas têm sido mais empregadas para estudar microestruturas de ferros fundidos cinzentos. Conforme descrito na Figura 1, foram estabelecidos três níveis para a pesquisa. A relação entre termos do mesmo nível foi estabelecida pelo conector lógico “or”, ao passo que, relações entre distintos níveis foram construídas a partir do conector “and”. As técnicas de caracterização e análise buscadas foram microscopia eletrônica de varredura (SEM, do inglês *Scanning Electron Microscopy*), espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS, do inglês *Energy Dispersive Spectroscopy*), difração de raios-X (XDR, do inglês X-Ray Diffraction), microscopia óptica (OM, do inglês *Optical Microscopy*), mapeamento químico (do inglês *Chemical Mapping*) e microscopia eletrônica de transmissão (TEM, do inglês *Transmission Electron Microscopy*).

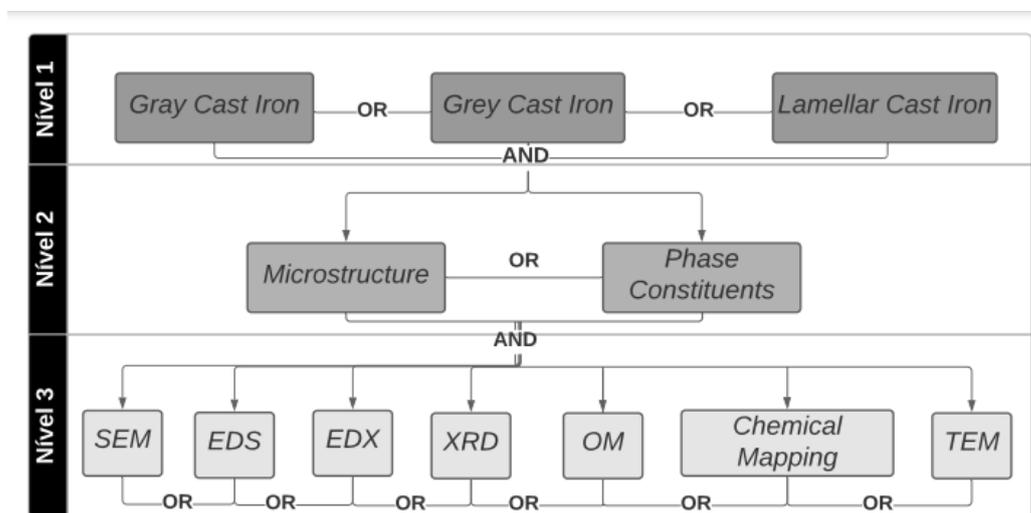


Figura 1- Estrutura de busca de artigos na base *ISI Web of Science* entre os anos 2000 e 2021. Fonte: os autores (2021)

Foram encontrados 72 artigos, 4 trabalhos classificados como artigos e *proceedings paper* e 8 somente como *proceedings paper*. A partir da construção de nuvens de palavras com maior frequência nos resumos desses trabalhos, Figura 2, pode ser verificado que os esforços no desenvolvimento do ferro fundido cinzento têm levado a alterações de parâmetros de resfriamento, tratamentos térmicos, reformulações das composições químicas e introdução de elementos de liga, por exemplo. Tais ações sugerem ser respostas para a necessidade da engenharia de redução de peso e aumento de vida, por meio da diminuição de espessuras das seções transversais de componentes e redução de desgaste. Nesse sentido, essas modificações têm sido conduzidas como alternativas de equilíbrio entre propriedades mecânicas e térmicas desse material. Ademais, no âmbito das técnicas de caracterização

microestrutural e quantificação de fases, palavras associadas às técnicas SEM, OM e XRD são destacadas. Por fim, o termo carboneto de nióbio (NbC) também pode ser ressaltado dessa nuvem de palavras, dado que alguns trabalhos relatam o uso de nióbio como elemento de liga para a formação de uma segunda fase dura (DEVECILI; YAKUT, 2014) e outros destacam o uso deste carboneto como uma camada de revestimento (ZHAO; XU; FU, 2017; AMAYA; PIAMBA; OLAYA, 2018) como tentativa de melhorar o desempenho em corrosão e desgaste em componentes da indústria automobilística. Em ambos os tipos de trabalho, a técnica XRD é uma alternativa para a descrição e quantificação de fases.

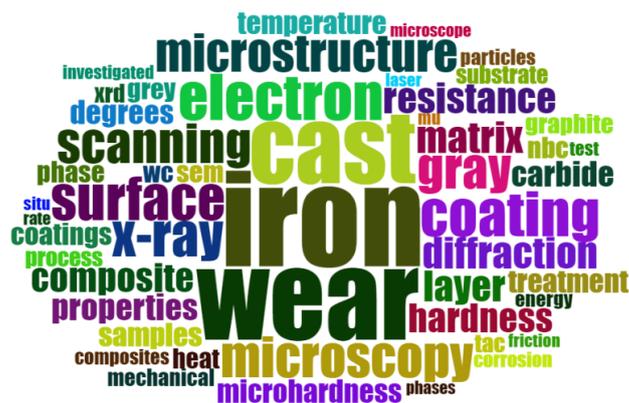


Figura 2- Nuvem de palavras dos artigos encontrados na base *ISI Web of Science* entre os anos 2000 e 2021. Fonte: os autores (2021)

Abd Ali *et al.* (2021) estudaram o efeito de um tratamento térmico superficial com pulso laser na modificação da microestrutura do ferro fundido cinzento ASTM A48 classe 30. Esses autores utilizaram a técnica de XRD para somente identificar as fases presentes nos materiais antes e após o procedimento de modificação da superfície. Abd Ali *et al.* (2021) relataram as fases Fe₃C (cementita), G (grafita) e principalmente Fe(α) (ferrita) para a amostra não tratada, ao passo que, a fase Fe₃C foi predominante para as amostras submetidas ao tratamento com pulso de laser.

Oloyede, Cochrane e Mullis (2017) analisaram a solidificação rápida de ferros fundidos cinzentos comerciais de baixa liga em dois meios (nitrogênio-N₂ e hélio- He) usando um tubo de gotas de alto vácuo. O experimento variou as taxas de resfriamento: entre 200 K. s⁻¹ e 16.000 K. s⁻¹ para N₂ e 700 K. s⁻¹ a 80.000 K. s⁻¹ para He. Esses autores não descreveram o equipamento de XRD utilizado, o tipo de tubo e as condições de medição para tal análise. As análises de XRD buscaram somente a identificação de fases e apontaram que a amostra base era composta predominantemente por Fe(α) (grafita também estava

presente, mas os picos ocorreram para $2\theta < 20^\circ$). Com o aumento da taxa de resfriamento, a austenita (γ) retida tornou-se uma fase constituinte, junto com Fe_3C , que provavelmente coexistia com $\text{Fe}(\alpha)$ na forma de perlita. Para as maiores taxas de resfriamento, Oloyede, Cochrane e Mullis (2017) explicaram que $\text{Fe}(\alpha)$ parecia estar se transformando $\text{Fe}(\alpha')$ (martensita), transformação essa que essencialmente completava nas taxas de resfriamento mais altas.

Zhong *et al.* (2011) utilizaram um ferro fundido cinzento (4,22C– 0,58Si - 0,268Mn - 0,224P - 0,024S % em peso) e hastes de nióbio (0,7 mm) com pureza de 99,99% como fonte de nióbio para síntese *in situ* de carbonetos de nióbio na matriz de ferro. As peças obtidas foram submetidas a diferentes intervalos de tempo (0, 15, 20 e 25 min) de tratamento isotérmico a 1172 °C em distintas durações em um forno tubular horizontal com um pequeno fluxo de argônio e resfriado naturalmente até a temperatura ambiente. Os autores utilizaram um difratômetro Philips® modelo PW1730 com tubo $\text{CuK}\alpha$ (40 kV e 40 mA) para caracterizar as fases presentes em cada amostra após tratamento isotérmico para diferentes durações. Os difratogramas de raios-X indicaram a presença NbC reforçando a matriz metálica. As fases G, $\text{Fe}(\alpha)$, Nb e NbC foram identificadas para as amostras submetidas aos tratamentos térmicos de 0, 15, e 20 minutos. Para as amostras submetidas ao tratamento térmico de maior duração, 25 minutos, as fases G, $\text{Fe}(\alpha)$ e NbC foram detectadas. Com o aumento do tempo de tratamento térmico, a intensidade do pico Nb diminuiu, enquanto a intensidade do pico NbC aumentou, e os picos de ferro foram relativamente inalterados. O desaparecimento do pico de Nb após o tratamento térmico a 1172 °C por 25 minutos sugeriu que os átomos de nióbio reagiram com o carbono e apenas uma pequena quantidade de grafita não reagida permaneceu dispersa na matriz metálica. Por fim, destaca-se que Zhong *et al.* (2011) não quantificaram essas fases descritas.

Zhao, Xu e Fu (2017) estudaram um revestimento de NbC em uma matriz de ferro, sintetizado por meio de uma placa de Nb pura e ferro fundido cinzento (HT300). Uma das técnicas utilizadas para analisar a constituição do revestimento foi a difração de Raio-X. Os autores utilizaram um difratômetro Shimadzu® modelo 7000 com radiação $\text{CuK}\alpha$ em 40 kV e 40 mA para um intervalo de varredura entre 20° e 90° para o ângulo 2θ . As intensidades de pico de NbC para 2θ ocorreram nos ângulos de $34,72^\circ$, $40,32^\circ$, $58,34^\circ$, $69,72^\circ$, $73,31^\circ$ e $87,14^\circ$ correspondendo à estrutura cristalina cúbica. Além disso, foram observados três pequenos picos de difração, pertencentes a $\text{Fe}(\alpha)$. Nenhuma outra fase de impureza foi observada na superfície de revestimento. Zhao, Xu e Fu (2017) não quantificaram as fases.

Devecili e Yakut (2014) relataram que pequenas adições de Nb (<0,5% em peso) em ferro fundido cinzento ajudariam no refinamento da grafita quanto da perlita e na formação de precipitados de nióbio (C, N) relativamente pequenos, contribuindo assim para o aumento de dureza e resistência à tração. Dessa maneira, esses autores propuseram caracterizar as fases presentes no ferro fundido cinzento com adições de 0,019, 0,151, 0,431 e 0,646% de Nb em peso por meio da técnica de XRD. Os autores utilizaram um difratômetro Rigaku D[®] modelo Max 2200 o qual é equipado com um tubo de Cr. Os resultados comprovaram a presença de Fe(α) para todas as composições, porém, a fase NbC foi detectada somente para a amostra com o maior percentual de Nb. Por fim, destaca-se que Devecili e Yakut (2014) não quantificaram as fases.

Dos trabalhos apresentados, observa-se que a maioria observada e descrita utilizou equipamentos XRD com tubo de Cu (40 kV e 40 mA) e intervalo de varredura 2θ entre 20°-90° para o estudo das fases em ferros fundidos cinzentos. No entanto, foi encontrado o trabalho de Devecili e Yakut (2014) que reportou o uso de equipamento XRD distinto (raios-X CrK α 2,29 Å) sugerindo alternativa para materiais que podem apresentar fluorescência forte nos instrumentos convencionais (CuK α 1,54 Å, CoK α 1,79 Å) e/ou pequenas frações de fases. A justificativa para os resultados de Devecili e Yakut (2014) reside no fato que as intensidades difratadas para esse tipo de sistema (CrK α) apresenta apenas uma fração (cerca de dois quintos) daquelas obtidas para um sistema equivalente utilizando tubo de Cu. Isso reduz as intensidades e conseqüentemente efeitos de fluorescência, principalmente para amostras com Fe. Destaca-se que efeitos semelhantes podem ser obtidos utilizando monocromadores em tubos de Cu. Ademais, destaca-se que nenhum trabalho relacionado apresentou a quantificação das fases. Nesse contexto, este estudo busca avaliar se a técnica de XRD, por meio da utilização de um difratômetro Philips-Panalytical[®] modelo PW 1710 com tubo de Cu é eficiente para a caracterização e quantificação das frações de fases presentes em ferro fundido cinzento com distintos percentuais de nióbio em sua composição: baixo (0,02% em peso) e alto (0,21-0,24% em peso). Logo, o desenvolvimento de pesquisas sobre uso dessa técnica em novas ligas de ferros fundidos colabora para a evolução do estado da arte bem como às necessidades do mercado.

2. Materiais e Métodos

Os ferros fundidos cinzentos perlíticos estudados nesse trabalho foram os mesmos descritos por Reis *et al.* (2020). O destaque das amostras é o conteúdo de nióbio: nas amostras com baixo teor de Nb (0,02% em peso) esse elemento químico foi considerado

uma impureza; no entanto, nas amostras com alto teor de Nb (0,21-0,24% em peso) o nióbio foi classificado como um elemento de liga.

Para o estudo das fases cristalinas presentes e tentativa de quantificação das frações de fases presentes nos corpos de prova, foi utilizada a difração de raios-X por meio do equipamento Philips-Panalytical® modelo PW 1710. O modelo do tubo utilizado foi PW 2273/20, anodo de cobre, foco fino longo, 2200W, 60kV. Material em pó (10 gramas) foi obtido para cada teor de nióbio estudado. Os parâmetros de varredura utilizados foram: (i) radiação Cu-K α 1 ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$); (ii) tensão de tubo de 50 kV; (iii) corrente de 35 mA (constatação empírica de condição ótima) (iv) cristal monocromador de grafita; (v) intervalo de varredura: ângulo inicial (2θ): 10° ; ângulo final (2θ): 120° ; (vi) espaçamento (*scan speed*): $0,02^\circ/\text{s}$ e geometria Bragg-Brentano. A fenda de divergência (*divergence slit*) foi variável, não apresentando um valor fixo. As fendas de recepção (*receiving slit*) foram $0,2$ e 1° . A acumulação foi feita via scans. Os difratogramas foram construídos e analisados por meio dos *softwares* Origin® e HighScore Plus®.

3. Resultados

As estruturas cristalinas das amostras com baixo e alto teor de nióbio foram analisadas por meio da técnica de difração de raios-X. Na Figura 3(a) e 3(b), foram apresentados os difratogramas obtidos, respectivamente e, em ambas as amostras, três fases principais foram identificadas: grafita (G), Fe(α) e cementita (Fe₃C). A modificação na concentração de nióbio não foi suficiente para promover diferenças significativas nos difratogramas. Devido ao nível de ruído nas medições, resultante da fluorescência do ferro excitado principalmente pela radiação Cu K α , não foi possível quantificar as fases por meio do refinamento de Rietveld. Oloyede *et al.* (2016) e Pereira (2005) reportaram resultados similares.

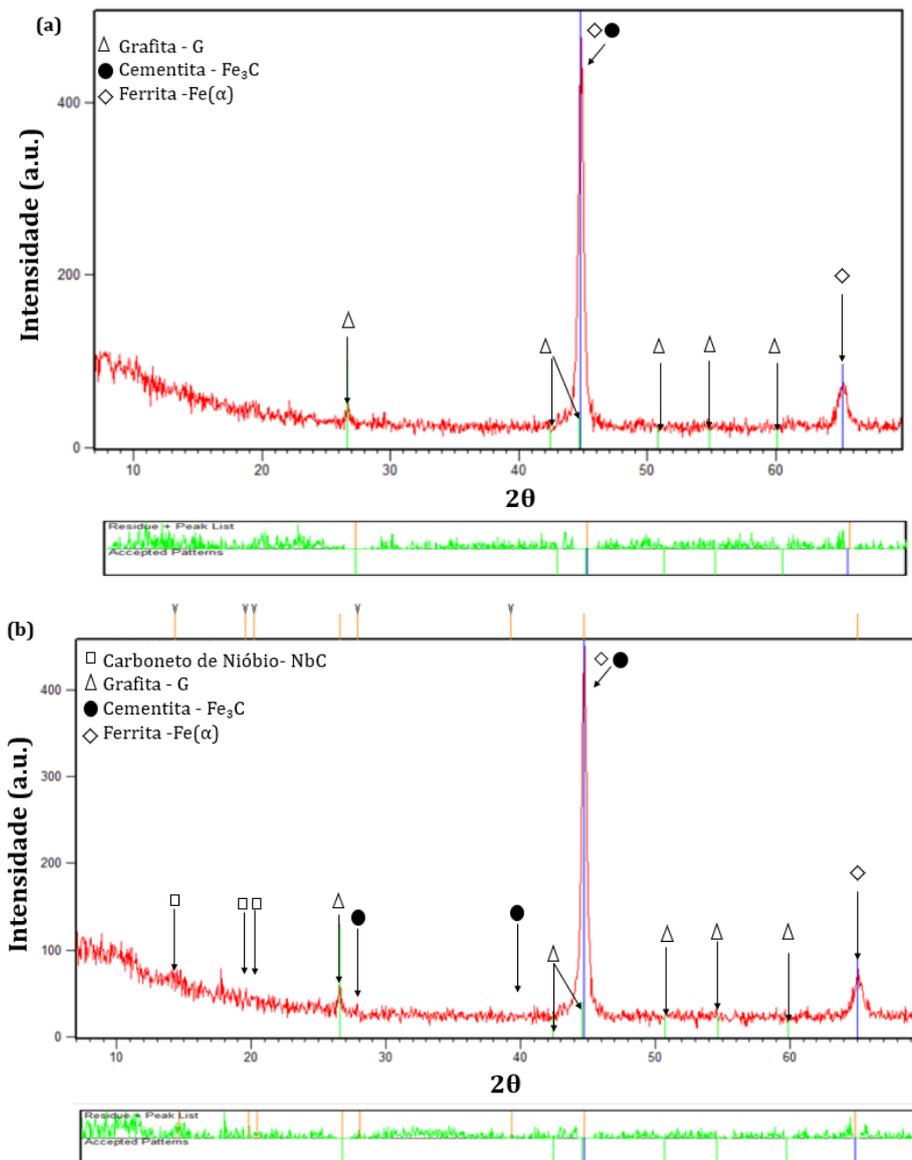


Figura 3- XRD para ferro fundido cinzento: (a) amostra com baixo teor de nióbio; (b) amostra com alto teor de nióbio. Fonte: os autores (2021).

O pico de maior intensidade da grafita está em 2θ próximo de $26,6^\circ$, conforme descreveu o trabalho de Boulet-Roblin *et al.* (2017). Este pico apresentou uma base larga, apesar de baixa intensidade. Tal fato é indício de sobreposição de picos. O trabalho de Wood *et al.* (2004) apontou que a cementita tem um pico correspondente a uma interferência construtiva em $26,59^\circ$. Portanto, como foi utilizado o tubo de cobre durante o ensaio, esse pico pequeno e mais largo pode ser uma sobreposição dos planos (002) da cementita e (002) da grafita, que possuem distâncias interplanares muito semelhantes $3,36\text{\AA}$ e $3,35\text{\AA}$ respectivamente. Tal fato foi confirmado pelo difratograma da amostra com alto teor de nióbio que indicou esse pico da cementita.

Em relação à ferrita, o principal pico desta fase está em torno de $44,7^\circ$ (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards -JCPDS*, número do cartão 6-696). De maneira similar à pesquisa de Oloyede *et al.* (2016), em ambos difratogramas, esses picos também possuem bases largas. O trabalho de Wood *et al.* (2004) indicou inúmeros picos da cementita em torno 37° a 50° . O principal pico desta fase está em torno de $45,2^\circ$ (JCPDS 44-1290). Portanto, os picos referentes à cementita também estão nessas regiões dos difratogramas, porém sobrepostos ao pico principal da ferrita. Situação similar ocorreu na região 2θ em torno de 65° .

Por fim, a fase NbC não foi identificada claramente por meio da técnica de XRD utilizada, o que pode ser justificado a partir do limite de detecção em torno de 3-5% para um difratômetro convencional e a relativa baixa fração desse precipitado nas amostras analisadas. Esse resultado sugere que a difração de raios-X pode não possuir sensibilidade para identificação de frações muito pequenas, corroborando os resultados de Deveceli e Yakut (2014). Melo *et al.* (2020) descreveu experiência semelhante para um teor de 0,5% de nióbio em peso em uma liga de ferro fundido alto cromo. O trabalho de Skripov *et al.* (2009) retratou o principal pico da fase Nb₆C₅ em aproximadamente 35° para o intervalo de alta intensidade (0 a 17000 a.u.). Porém, ao estratificar o intervalo para menores intensidades (0 a 500 a.u.), os difratogramas apresentados por Skripov *et al.* (2009), Deveceli e Yakut (2014) apontaram três pequenos picos de baixa intensidade entre 15° e 20° . No cartão JCPDS 37-1201, esses picos são característicos da fase de carboneto de nióbio. Somente no difratograma da amostra FC 0,23%Nb Nesse sentido, no sumário de resíduos e lista de picos da Figura 3(b) podem ser verificados picos abaixo de 20° não verificados na Figura 3(a) sugerindo que nessas regiões pode haver algo diferente, no entanto, mais uma vez, devido ao ruído é difícil identificar os picos de baixa intensidade no difratograma da Figura 3(b) que estariam associados aos carbonetos de nióbio. Por fim, atribui-se a dificuldade na identificação dos principais picos da fase Nb₆C₅, aproximadamente na região 35° - 40° 2θ , ao fato de que, nesta região, também é possível identificar picos característicos da cementita e essa fase está presente em uma quantidade maior comparada à baixa fração de carbonetos de nióbio.

4. Conclusões

Por meio dos resultados das análises de XRD de ferros fundidos cinzentos perlíticos com diferentes teores de nióbio, são descritas algumas considerações:

- a maioria dos trabalhos apresentados no estado da arte utilizaram equipamentos XRD com tubo de Cu (40 kV e 40 mA) e intervalo de varredura 2θ entre 20° - 90° para o estudo de fases em ferros fundidos. Todos os trabalhos identificaram as fases encontradas, porém quantificação de fases não foi apresentada em nenhum desses trabalhos.
- a técnica de XRD, por meio da utilização de um difratômetro Philips-Panalytical® modelo PW 1710 com tubo de Cu foi eficiente para a caracterização das três fases principais (grafita- pico principal estava em 2θ próximo de $26,6^\circ$, ferrita- - pico principal estava em 2θ próximo de $44,7^\circ$ e cementita- pico principal estava em 2θ próximo de $45,2^\circ$) dos ferros fundidos cinzentos amostrados.
- a modificação na concentração de nióbio não foi suficiente para promover diferenças significativas nos difratogramas considerando-se as condições experimentais utilizadas neste trabalho.
- devido ao nível de ruído nas medições em decorrência da utilização de um tubo de Cu, não foi possível quantificar as fases por meio do refinamento de Rietveld.

5. Referências Bibliográficas

1. ABD ALI, H.R. *et al.* Effect of Fibre Laser Surface Treatment on Wear Resistance of Gray Cast Iron Astm A48. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**, v.44, p. 141-149, 2021.
2. AMAYA, A.; PIAMBA, O.; OLAYA, J. Improvement of corrosion resistance for gray cast iron in palm biodiesel application using thermoreactive diffusion niobium carbide (NbC) coating. **Coatings**, v. 8, n. 6, p. 216, 2018.
3. BOULET-ROBLIN, L.; SHEPTYAKOV, D.; BOREL, P.; TESSIER, C.; NOVÁK, P.; VILLEVIEILLE, C. Crystal structure evolution via operando neutron diffraction during long-term cycling of a customized 5 V full Li-ion cylindrical cell LiNi 0.5 Mn 1.5 O 4 vs. graphite. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 5, n. 48, p. 25574-25582, 2017.
4. DEVECILI, A.O; YAKUT, R. The effect of Nb supplement on material characteristics of iron with lamellar graphite. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2014.
5. ELORZ, J.A.P.S.; GONZÁLEZ, D.F.; VERDEJA, L.P. **Physical Metallurgy of Cast Irons**. Springer, 2018.
6. MELO, I. N.R. de *et al.* Effect of niobium addition on the properties and microstructure of a high chromium cast iron alloy. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 2, 2020.
7. MODERN CASTING STAFF REPORT. Faircast's Fresh Start, **Modern Casting**. American Foundry Society, 2021.
8. OLOYEDE, O.; COCHRANE, R. F.; MULLIS, A. M. Effect of rapid solidification on the microstructure and microhardness of BS1452 grade 250 hypoeutectic grey cast iron. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 707, p. 347-350, 2017.

9. OLOYEDE, O.; BIGG, T. D.; COCHRANE, R. F.; MULLIS, A. M. Microstructure evolution and mechanical properties of drop-tube processed, rapidly solidified grey cast iron. **Materials Science and Engineering: A**, v. 654, p. 143-150, 2016.
10. PEREIRA, A.A. Influência do teor de enxofre na microestrutura, nas propriedades mecânicas e na usinabilidade do ferro fundido cinzento FC 25. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/103069/213498.pdf?sequence=1> Acesso em: 12/01/2021.
11. REIS, B. C.M. *et al.* Análise das superfícies de saída e de folga de ferramentas de corte empregadas no torneamento de ferro fundido cinzento perlítico com diferentes adições de nióbio. **Journal of Experimental Techniques and Instrumentation**, v. 4, n. 01, p. 26-38, 2020.
12. SKRIPOV, A. V.; WU, H.; UDOVIC, T. J.; HUANG, Q.; HEMPELMANN, R.; SOLONININ, A. V.; ...; GUSEV, A. I. Hydrogen in nonstoichiometric cubic niobium carbides: Neutron vibrational spectroscopy and neutron diffraction studies. **Journal of alloys and compounds**, v. 478, n. 1-2, p. 68-74, 2009.
13. WOOD, I. G.; VOČADLO, L.; KNIGHT, K. S.; DOBSON, D. P.; MARSHALL, W. G.; PRICE, G. D.; BRODHOLT, J. Thermal expansion and crystal structure of cementite, Fe₃C, between 4 and 600 K determined by time-of-flight neutron powder diffraction. **Journal of Applied Crystallography**, v. 37, n. 1, p. 82-90, 2004.
14. ZHAO, N.; XU, Y.; FU, Y.. Mechanical properties of one-step in situ synthesized NbC-Fe composite coating. **Surface and Coatings Technology**, v. 309, p. 1105-1110, 2017.
15. ZHONG, L. *et al.* Study on NbC particulate-reinforced iron matrix composite produced in situ. **Journal of Materials Science**, v. 46, n. 8, p. 2814-2819, 2011.

Agradecimentos

À Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração pela cessão das ligas. Ao SENAI Itaúna CETEF e ao Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) pela infraestrutura física disponibilizada para a realização dos ensaios.