

PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR E DETERMINAÇÃO DE SUAS PROPRIEDADES COM E SEM A PRESENÇA DE NIÓBIO

Roberto César Resende

O ferro fundido nodular apresenta ampla aplicação industrial devido à combinação de resistência mecânica, ductilidade e capacidade de fabricação por processos de fundição. Nesse contexto, a adição de elementos de liga constitui uma estratégia para modificar a microestrutura e ampliar o desempenho do material. Este trabalho avaliou o efeito da adição de nióbio, nas concentrações de 0,18%, 0,25% e 0,34% em massa, sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular produzido em condições industriais. Foram realizadas análises químicas, caracterização microestrutural por microscopia óptica, MEV/EDS e determinação das propriedades mecânicas por ensaios de tração, dureza Brinell e impacto Charpy. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando o teste F com nível de confiança de 95%, para avaliar a significância das diferenças entre as concentrações de nióbio, complementada pelo teste de Fisher para comparações entre os grupos. Os resultados indicaram que o aumento do teor de Nb promoveu alterações na matriz metálica, com aumento da fração perlítica e presença de precipitados ricos em Nb, acompanhados por aumento da resistência à tração, do limite de escoamento e da dureza. Para a condição com 0,34% Nb, foram observados aumentos aproximados de 30% na resistência à tração, 28% no limite de escoamento e 20% na dureza, em comparação com a condição sem Nb, enquanto o alongamento apresentou redução. O ensaio de impacto apresentou comportamento não monotônico, com maior energia absorvida na condição intermediária de adição de Nb. A análise estatística confirmou que a variação do teor de nióbio influenciou significativamente as propriedades mecânicas avaliadas. Os resultados demonstram que o nióbio apresenta potencial para elevar a resistência mecânica do ferro fundido nodular produzido em condições industriais, embora o teor adicionado deva ser definido considerando o compromisso entre resistência e ductilidade.

Palavras-chave: Nióbio; Ferro Fundido Nodular; Propriedades Mecânicas; Microestrutura; Fundição Industrial.

1 INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos são classificados em diferentes famílias, principalmente de acordo com a morfologia do grafite e os aspectos de sua fratura. Dentre eles, os ferros fundidos nodulares destacam-se pela presença de grafita em forma de nódulos esferoidais, característica que proporciona ao material níveis superiores de ductilidade e resistência mecânica (GUESSER, 2019).

Para atender às crescentes exigências de projetos de engenharia, as propriedades dos ferros fundidos podem ser modificadas pela incorporação de elementos de liga (NASCIMENTO, 2003). Nesse contexto, o nióbio (Nb) apresenta relevância estratégica e tecnológica, destacando-se o Brasil como principal produtor mundial desse elemento. A utilização do Nb em ligas metálicas tem despertado interesse devido ao seu potencial de modificar a microestrutura e elevar o desempenho mecânico dos materiais (CORGULHO; SANTOS; NUNES, 2024).

Do ponto de vista metalúrgico, estudos indicam que a adição de Nb ao ferro fundido nodular pode promover aumentos na resistência à tração, no limite de escoamento e na dureza (SOUZA, 2012). Entretanto, grande parte dos estudos disponíveis foi realizada em escala laboratorial, sendo relevante avaliar como essas alterações se comportam sob as condições de uma linha de produção industrial.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da adição de Nb, nas concentrações de 0,18%, 0,25% e 0,34% em massa, sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular produzido em condições industriais. Investigou-se a influência do Nb na matriz metálica e na formação de precipitados, correlacionando as alterações microestruturais com o desempenho mecânico e sua significância estatística, visando avaliar o potencial de aplicação do Nb em componentes de engenharia.

2 MATERIAS E MÉTODOS

2.1 Material e composição química

Para a avaliação do efeito do nióbio sobre o ferro fundido nodular, foram produzidas quatro condições experimentais, correspondentes aos teores de 0%, 0,18%, 0,25% e 0,34% de Nb em massa, sendo a condição sem adição utilizada como referência. A liga base foi o ferro fundido nodular GGG50, produzido a partir de ferro gusa, sucata de aço, FeSi 75%, grafite carburante, sucata de cobre, retorno de GGG50 e ferro-nióbio (FeNb).

O FeNb utilizado apresentava aproximadamente 64,78% Nb, sendo incorporado diretamente ao metal líquido do forno. A composição da liga base GGG50 e dos demais materiais utilizados na carga foi determinada por espectrometria óptica ou obtida a partir dos certificados dos fornecedores.

Tabela 1 – Composição química das ligas produzidas

Lote	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Cu	% P	% S	% Sn	% Mg	% Nb	% Al	% CE	% Fe
1	3,77	2,49	0,38	0,027	0,4	0,014	0,015	0,02	0,045	0	0,014	4,60	Restante
2	3,49	2,64	0,31	0,036	0,31	0,049	0,015	0,001	0,046	0,18	0,03	4,39	Restante
3	3,57	2,61	0,32	0,045	0,34	0,04	0,015	0,002	0,045	0,25	0,022	4,45	Restante
4	3,73	2,38	0,35	0,107	0,32	0,049	0,012	0,012	0,05	0,347	0,11	4,54	Restante

A composição química final das ligas foi determinada por espectrometria óptica utilizando equipamento AMETEK, modelo SPECTROMAX. Os teores efetivamente obtidos de Nb foram 0%, 0,18%, 0,25% e 0,34%, com carbono equivalente variando entre 4,39% e 4,60%. O carbono equivalente foi calculado pela relação abaixo.

$$CE = \%C + \%Si/3 + \%P/3.$$

2.2 Produção das ligas e moldagem

A produção das ligas foi realizada em condições industriais, utilizando moldes de areia de sílica revestida com resina fenólica uretânica, pelo processo de cura a frio. Para a produção dos corpos de prova foram utilizados blocos Y, conforme geometria recomendada pela ASTM A897/A897M-06.

Para cada condição de composição foram realizadas três fusões. Após a obtenção do metal líquido, aproximadamente 30% do metal base foi transferido para uma panela previamente aquecida, sendo o FeNb adicionado ao metal remanescente no forno. Posteriormente, o metal previamente transferido foi reintegrado ao forno, visando favorecer a dissolução e homogeneização do ferro-nióbio. Após a fusão, o metal foi transferido para uma panela de nodularização contendo 5 kg de FeSiMg, empregando-se o método *sandwich*. Na sequência, o metal nodularizado foi transferido para panelas de vazamento previamente aquecidas, sendo realizada a inoculação no jato de metal com 0,5 kg de inoculante por panela. O vazamento foi realizado a aproximadamente 1380 °C, com tempo médio de enchimento de 14 s por molde. Após o vazamento, os moldes permaneceram em repouso por 12 h antes da desmoldagem.

2.3 Preparação e caracterização dos corpos de prova

Foram produzidos blocos Y para cada condição experimental, sendo utilizada a região útil do bloco para a obtenção dos corpos de prova. A região superior do bloco, destinada à alimentação durante a solidificação, foi descartada. Foram preparados corpos de prova para os ensaios de resistência à tração, limite de escoamento, alongamento, dureza e impacto. Para cada condição foram considerados 20 corpos de prova para os ensaios mecânicos.

Antes da realização dos ensaios, os blocos Y foram submetidos à avaliação de sanidade por inspeção visual e ultrassom, utilizando equipamento OLYMPUS, modelo EPOCH LT, para verificar a presença de defeitos internos que pudessem interferir nos resultados.

Para a caracterização microestrutural, as amostras foram preparadas por corte, lixamento, polimento e ataque químico com Nital 3%. As análises foram realizadas por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG). A composição dos constituintes e dos precipitados foi investigada por espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS), utilizando detector Oxford X-Max50.



Figura 1 – Conjunto peças e canais após desmoldagem

2.4 Ensaaios mecânicos

A dureza foi determinada pelo método de indentação Brinell utilizando durômetro YADOYA, modelo RG-280, sendo realizadas três indentações em cada amostra. Os ensaios de tração foram realizados em máquina universal ARMS-FIND, modelo Arotec, com capacidade de 200 kN. Os ensaios de impacto foram realizados em máquina VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig. Foram utilizados corpos de prova com dimensões de 10 × 10 × 55 mm, sem entalhe, seguindo o método estabelecido pela ABNT NBR ISO 148-1. Foram avaliadas as seguintes propriedades: resistência à tração, limite de escoamento, alongamento após ruptura, dureza Brinell e energia absorvida no impacto Charpy.

2.5 Análise estatística

Os resultados dos ensaios mecânicos foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), considerando nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). O teste F foi empregado para avaliar se as diferenças observadas entre as médias das quatro condições de teor de Nb eram estatisticamente significativas. Quando identificadas diferenças significativas, foram realizadas comparações entre os grupos pelo teste de Fisher.

3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Composição química e sanidade

A composição química das ligas produzidas apresentou variações nos teores de nióbio de 0%, 0,18%, 0,25% e 0,34% em massa. O carbono equivalente variou entre 4,39% e 4,60%, indicando condições próximas entre as ligas quanto à composição de base. A diferença principal entre as condições experimentais esteve, portanto, associada à adição de Nb.

A inspeção visual e a avaliação ultrassônica dos blocos Y não indicaram a presença de descontinuidades relevantes que pudessem comprometer a avaliação das propriedades mecânicas. Dessa forma, as diferenças observadas nos resultados podem ser analisadas principalmente em função das alterações microestruturais associadas à adição de nióbio.

3.2 Caracterização microestrutural

A análise por microscopia óptica mostrou que a adição de nióbio não impediu a formação da estrutura característica do ferro fundido nodular. Em todas as condições foram observados nódulos de grafita distribuídos em uma matriz perlítica-ferrítica. A avaliação do grau de nodularização não permitiu estabelecer uma relação estatisticamente ou visualmente consistente entre o aumento do teor de Nb e a nodularidade. As faixas de variação obtidas nas diferentes regiões analisadas apresentaram sobreposição, indicando que o efeito do nióbio sobre essa característica foi, nas condições estudadas, menos evidente que sua influência sobre a matriz metálica.

Em relação à quantidade de nódulos de grafita por unidade de área, observou-se redução dos valores médios com a adição de nióbio em comparação com a liga de referência. Entretanto, a variabilidade dos resultados não permitiu estabelecer uma tendência linear com o aumento da concentração de Nb. Esse comportamento pode estar relacionado à precipitação de carbonetos ricos em Nb durante a solidificação, que pode alterar a disponibilidade de carbono para a formação da grafita. Por outro lado, a condição com 0,34% Nb apresentou aumento da quantidade de nódulos em relação às concentrações intermediárias, possivelmente associado ao seu maior carbono equivalente.

A alteração mais evidente da microestrutura ocorreu na relação entre ferrita e perlita. Com o aumento da concentração de Nb, observou-se aumento da fração de perlita e consequente redução da fração de ferrita. Esse comportamento também é

reportado na literatura para ferros fundidos nodulares ligados ao nióbio e é particularmente relevante para interpretar os resultados mecânicos obtidos neste trabalho.

Assim, os resultados indicam que o principal efeito microestrutural associado ao aumento do Nb foi a modificação da matriz metálica, com deslocamento para uma condição de maior participação perlítica. Essa alteração fornece uma possível explicação para o aumento subsequente da resistência mecânica e da dureza observado nas ligas.

3.3 Caracterização por MEV e EDS

As análises por microscopia eletrônica de varredura evidenciaram a presença de nódulos de grafita, matriz perlítica-ferrítica e partículas precipitadas nas ligas contendo nióbio. Os precipitados ricos em Nb e carbono apresentaram morfologias predominantemente trapezoidais e retangulares, semelhantes às descritas na literatura para carbonetos de nióbio.

As análises por EDS permitiram identificar regiões enriquecidas em nióbio e carbono, confirmando a presença de precipitados ricos em Nb. Por outro lado, não foi identificada quantidade significativa de Nb dissolvido na matriz metálica, comportamento associado à baixa solubilidade desse elemento na matriz ferrosa. Não foi observada uma relação clara entre o aumento do teor de Nb e o tamanho individual dos precipitados. Entretanto, a análise das diferentes condições sugere a ocorrência de maior quantidade de precipitados com o aumento do teor de Nb, embora essa hipótese não tenha sido quantitativamente comprovada no trabalho. Também foram observadas regiões de agrupamento (*clusters*) de carbonetos.

Dessa forma, os resultados de MEV/EDS devem ser interpretados conjuntamente com a alteração da matriz. A presença de precipitados ricos em Nb e o aumento da fração perlítica constituem mecanismos que podem contribuir para o aumento da resistência à deformação plástica e da dureza do material.

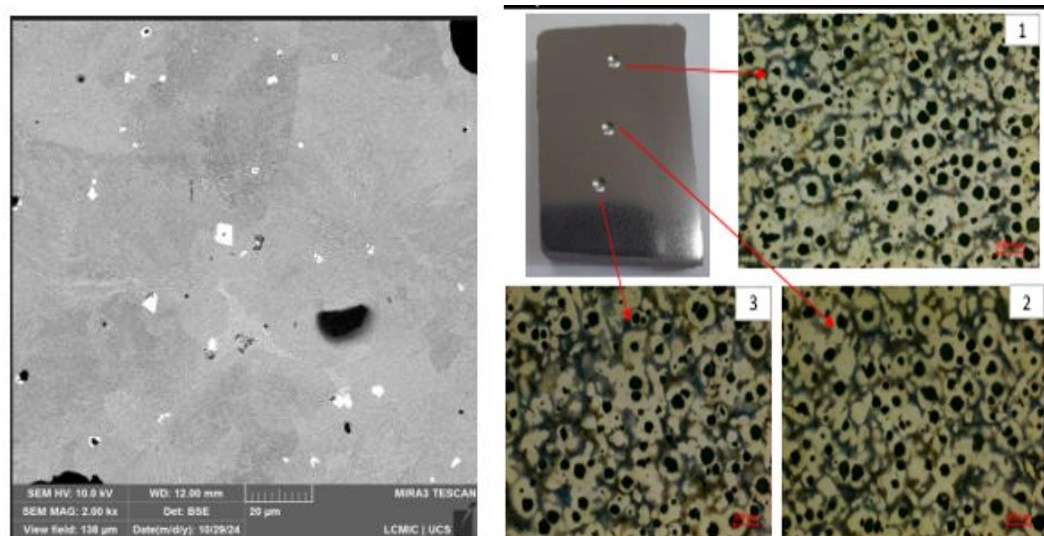


Figura 2 – Microestrutura com 0,34 % de Nb

3.4 Resistência à tração e limite de escoamento

A resistência à tração apresentou aumento progressivo com a adição de nióbio. Os valores médios calculados a partir dos resultados experimentais foram de 577,6 MPa, 635,6 MPa, 702,5 MPa e 757,1 MPa para as condições de 0%, 0,18%, 0,25% e 0,34% Nb, respectivamente. Os resultados individuais encontram-se apresentados na dissertação. Em relação à liga sem Nb, o aumento da resistência à tração atingiu aproximadamente 31% para 0,34% Nb. Esse comportamento está associado principalmente ao aumento da fração perlítica observado na caracterização microestrutural, combinado à presença de precipitados ricos em Nb.

O limite de escoamento apresentou comportamento semelhante. Os valores médios foram de 361,8 MPa, 378,6 MPa, 423,5 MPa e 464,1 MPa para 0%, 0,18%, 0,25% e 0,34% Nb, respectivamente.

Para o limite de escoamento, o aumento entre a condição sem Nb e 0,34% Nb foi de aproximadamente 28%. A ANOVA indicou diferenças significativas entre as condições experimentais, com valor de F superior ao valor crítico e valor-p inferior a 0,05. As comparações entre as concentrações também indicaram diferenças estatisticamente significativas. Esse comportamento demonstra que o aumento do teor de Nb promoveu não apenas maior resistência à ruptura, mas também maior resistência à deformação plástica. A combinação entre maior participação de perlita e precipitados ricos em Nb constitui a principal hipótese para explicar esse comportamento.

3.5 Alongamento

O aumento da resistência mecânica foi acompanhado por redução progressiva do alongamento. Os valores médios foram de 12,12%, 10,21%, 6,73% e 6,10% para as condições de 0%, 0,18%, 0,25% e 0,34% Nb, respectivamente. A redução do alongamento evidencia o compromisso entre resistência mecânica e ductilidade provocado pela adição de Nb. Enquanto a condição sem Nb apresentou maior capacidade de deformação plástica, a maior concentração de Nb apresentou simultaneamente maior resistência e menor alongamento.

A análise estatística confirmou diferenças significativas entre a maioria das condições. Para a comparação entre 0,25% e 0,34% Nb, entretanto, o valor-p informado foi 0,048, próximo ao limite de significância de 0,05. Esse resultado indica que a diferença entre essas duas concentrações deve ser interpretada com maior cautela. Esse resultado é importante para a aplicação industrial, pois demonstra que o aumento do teor de Nb não deve ser analisado exclusivamente pelo ganho de resistência. A seleção da concentração deve considerar simultaneamente resistência, ductilidade e os requisitos específicos do componente.

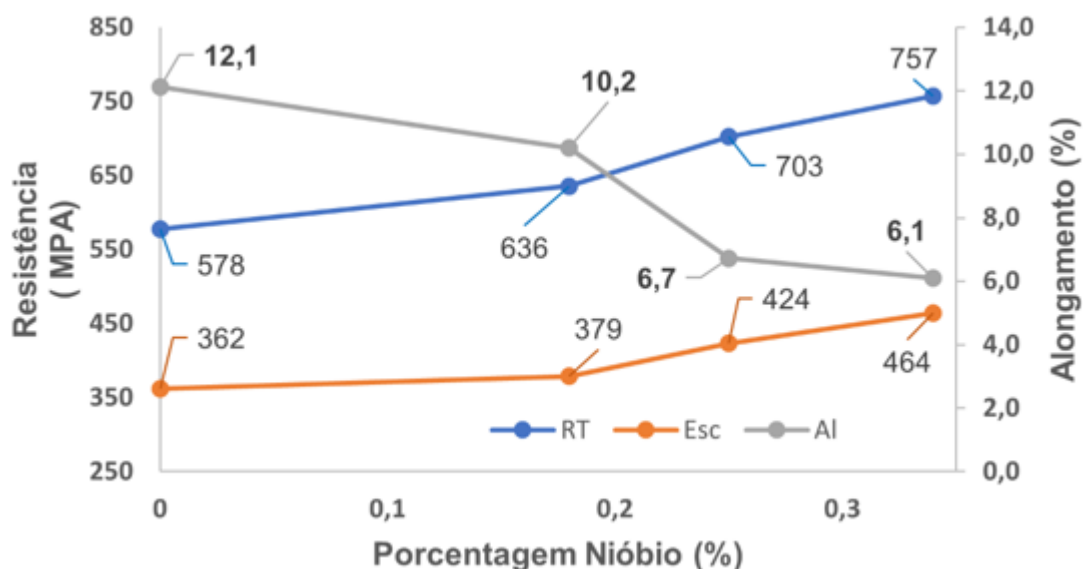


Figura 3 – Resistência à tração, Resistência ao escoamento e Alongamento

3.6 Dureza Brinell

A dureza apresentou aumento consistente com a elevação do teor de Nb. Os valores médios obtidos foram de 206,9 HB, 222,3 HB, 238,4 HB e 249,6 HB para 0%, 0,18%, 0,25% e 0,34% Nb, respectivamente. A condição com 0,34% Nb apresentou aumento de aproximadamente 21% em relação à liga sem nióbio. Esse comportamento está de acordo com a alteração observada na matriz, caracterizada

pelo aumento da fração perlítica, e com a presença de precipitados ricos em Nb identificados por MEV/EDS.

A ANOVA indicou influência significativa da concentração de Nb sobre a dureza, enquanto as comparações entre as concentrações também apresentaram diferenças estatisticamente significativas. O aumento da dureza indica potencial para aplicações que demandem maior resistência à deformação superficial. Entretanto, como não foram realizados ensaios específicos de desgaste, não é possível afirmar diretamente que o aumento da dureza resulte em maior vida útil do componente.

3.7 Energia absorvida no impacto Charpy

O comportamento da energia absorvida no ensaio Charpy diferiu daquele observado para resistência à tração, limite de escoamento e dureza. Os valores médios foram de 15,46 J/cm², 39,65 J/cm², 50,57 J/cm² e 27,29 J/cm² para 0%, 0,18%, 0,25% e 0,34% Nb, respectivamente. Observou-se, portanto, aumento expressivo da energia absorvida até a concentração de 0,25% Nb, seguido de redução para 0,34% Nb. A condição de 0,25% apresentou o maior valor médio, aproximadamente 227% superior à condição sem Nb.

A ANOVA indicou diferenças estatisticamente significativas entre as condições avaliadas, e as comparações entre os grupos também identificaram diferenças significativas. A redução da energia absorvida observada em 0,34% Nb, após o máximo obtido em 0,25%, indica que o aumento do teor de Nb não produz uma resposta monotônica para todas as propriedades. Esse comportamento pode estar relacionado à maior quantidade de precipitados ricos em Nb e às alterações da matriz metálica. Entretanto, como não foi realizada uma quantificação completa da fração volumétrica dos precipitados, essa relação deve ser considerada como uma possível explicação e não como mecanismo definitivamente comprovado.

Esse resultado evidencia a existência de um compromisso entre resistência mecânica e tenacidade, sendo a concentração de 0,25% particularmente relevante quando a capacidade de absorção de energia é considerada

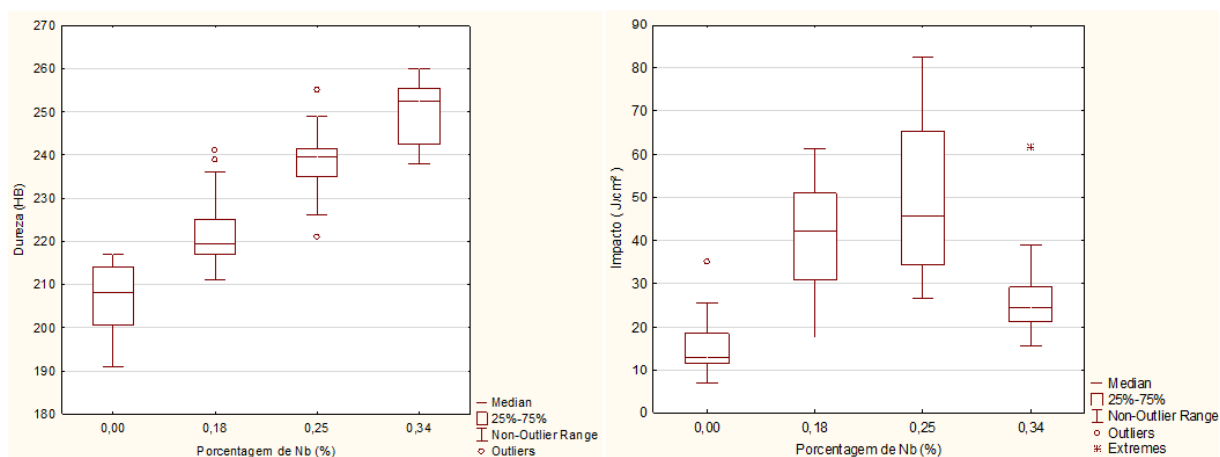


Figura 4 – Ensaio de dureza e Impacto

4 CONCLUSÕES

A adição de nióbio ao ferro fundido nodular, nas concentrações avaliadas de 0,18%, 0,25% e 0,34% em massa, promoveu alterações significativas na microestrutura e nas propriedades mecânicas do material produzido em condições industriais. O aumento do teor de Nb esteve associado ao aumento da fração perlítica e à presença de precipitados ricos em Nb identificados por MEV/EDS, evidenciando a influência do elemento sobre a constituição da matriz metálica.

Os resultados mecânicos demonstraram aumento significativo da resistência à tração, do limite de escoamento e da dureza com o incremento do teor de Nb. Na condição de 0,34% Nb, foram obtidos aumentos aproximados de 31% na resistência à tração, 28% no limite de escoamento e 21% na dureza em relação à condição sem adição de Nb. A análise estatística por ANOVA e teste F, considerando nível de significância de 5%, confirmou que as diferenças observadas nas principais propriedades mecânicas foram estatisticamente significativas.

O aumento da resistência mecânica foi acompanhado pela redução do alongamento, evidenciando um compromisso entre resistência e ductilidade à medida que o teor de Nb foi elevado. Esse comportamento está relacionado às alterações da matriz metálica e à presença de precipitados ricos em Nb, que contribuem para o aumento da resistência, mas podem limitar a deformação plástica.

O comportamento ao impacto apresentou resposta não linear em relação ao teor de Nb, com maior energia absorvida na condição de 0,25% Nb e redução para 0,34% Nb. Esse resultado demonstra que o maior teor de Nb não necessariamente proporciona o melhor desempenho para todas as propriedades, sendo necessário

considerar os requisitos específicos de resistência, ductilidade e absorção de energia na definição da composição. De forma geral, os resultados demonstram que baixos teores de nióbio constituem uma alternativa tecnicamente viável para aumentar a resistência mecânica e a dureza do ferro fundido nodular produzido em condições industriais. Entre as condições avaliadas, o teor de 0,34% Nb apresentou o maior ganho de resistência, enquanto 0,25% Nb apresentou o comportamento mais favorável quanto à energia absorvida no impacto, evidenciando que a seleção do teor de Nb deve considerar o equilíbrio entre as propriedades requeridas para cada aplicação.

5 REFERÊNCIAS

AHMED, M.; SOLIMAN, M.; YOUSSEF, M.; BÄHR, R.; NOFAL, A. Effect of Niobium on the Microstructure and Mechanical Properties of Alloyed Ductile Irons and Austempered Ductile Irons. **Metals**, v. 11, n. 5, p. 703, maio 2021. DOI 10.3390/met11050703. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/5/703>. Acesso em: 11 maio 2024

BEDOLLA-JACUINDE, A.; SOLIS, E.; HERNANDEZ, B. Effect of niobium in medium alloyed ductile cast irons. **International Journal of Cast Metals Research**, v. 16, n. 5, p. 481–486, 1 nov. 2003. DOI 10.1080/13640461.2003.11819625. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13640461.2003.11819625>. Acesso em: 15 jun. 2024.

SANTOS, A. B. de S. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e Nodulares**. 1º. São Paulo- Brasil: [s. n.], 1987.

SOUZA, T. N. F.; NOGUEIRA, R. A. P. S.; FRANCO, F. J. S.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Mechanical and microstructural characterization of Nodular Cast Iron (NCI) with Niobium Additions. **Materials Research**, v. 17, p. 1167–1172, out. 2014. DOI <https://doi.org/10.1590/1516-1439.249413>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/zrYNRvfJ7qzZKRf8ttnSrJp/?lang=en>. Acesso em: 10 fev. 2025

SOUZA, T. N. F. **Produção e caracterização física e mecânica de ferros fundidos nodulares e ferros fundidos nodulares austemperados com adição de nióbio**. 2012. 1–166 f. Dissertação (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.