

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ADIÇÃO DE NIÓBIO EM SUBSTITUIÇÃO AO ESTANHO NA ESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FERRO FUNDIDO CINZENTO

M. P., MEIRA¹, E. P., LIMA², F. M. P., DO NASCIMENTO³

^{1,2} Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química; ³ METAPROL consultoria

RESUMO – O nióbio tem sido considerado um elemento de liga para ferros fundidos que apresenta melhorias na resistência mecânica e fadiga térmica. Neste estudo conclui-se que a adição de nióbio pode substituir ou contribuir como perlitizante no ferro fundido cinzento tendo em sua característica o forte potencial de formação de carbonetos do tipo NbC, os resultados de resistência a tração do corpo de prova contendo 0,24% de nióbio foi 33 e 38 % superior aos resultados obtidos nos corpos de prova padrão e padrão com redução do teor de estanho respectivamente. O aumento da dureza também foi evidenciado, no corpo de prova contendo nióbio, a dureza foi 22% superior aos corpos de prova padrão com redução de estanho e 4% maior que o resultado obtido no corpo de prova padrão. Este resultado indica que o ferro fundido cinzento com adição de nióbio proporciona uma maior resistência ao material, substituído o potencial perlitizante do estanho. A microestrutura do ferro fundido cinzento com adição de nióbio apresenta uma matriz perlítica com precipitados de carbeto de nióbio dispersos, grafitas refinadas com aumento no número de células eutéticas em 46,9 % cel/cm², o refino da grafita na amostra de ferro fundido com adição de Nb pode contribuir na elevação da condutividade térmica.

Palavras-chave: *Ferro fundido Cinzento, Nióbio, Grafita lamelar, Propriedades mecânicas.*

ABSTRACT – Niobium has been considered an alloying element for cast iron that has improved mechanical strength and thermal fatigue. In this study, it is concluded that the addition of niobium can replace or contribute as a pearlitizer in gray cast iron, having in its characteristic the strong potential of formation of NbC carbides, the results of tensile strength of the specimen containing 0.24% of niobium was 33 and 38% higher than the results obtained in the standard and standard specimens with reduced tin content, respectively. The increase in hardness was also evidenced, in the specimen containing niobium, the hardness was 22% higher than the standard specimens with tin reduction and 4% higher than the result obtained in the standard specimen. This result indicates that gray cast iron with the addition of niobium provides greater strength to the material, replacing the pearlizing potential of tin. The microstructure of gray cast iron with addition of niobium presents a pearlitic matrix with dispersed niobium carbide precipitates, refined graphites with an increase in the number of eutectic cells by 46.9% cel/cm², the refining of graphite in the cast iron sample with addition of Nb can contribute to increase the thermal conductivity.

Keywords: *Gray cast iron, niobium, Lamellar graphite, mechanical properties.*

1. INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos são as ligas metálicas que possuem elevada produção de peças fundidas no mundo, principalmente no seguimento automotivo. O Brasil é o 7º produtor de fundidos baseando-se nos dados de 2014, com um total de 1.778.330 toneladas de materiais fundidos produzidos em 2017 (ABIFA, 2017).

O desenvolvimento de novos produtos é necessário pela necessidade constante de aumento do desempenho, segurança e conforto associado a redução de custo. Para isto, a tecnologia tem buscado recursos e métodos inovadores, no segmento de materiais fundidos.

Ferros fundidos são ligas de ferro-carbono-silício, tipicamente contendo 2-4% C e 0,5-3% Si, são amplamente utilizados na indústria automobilística em peças submetidas ao desgaste e fadiga térmica como bloco de motor, cabeçote, capas de mancais, disco de freios, componentes que necessitam de usinagem posterior à fundição.

Os ferros fundidos passam pela reação eutética durante a solidificação e possuem microestrutura com grafitas e uma matriz ferrítica ou perlítica, a grafita possui resistência mecânica muito baixa. A matriz metálica constituída de Ferrita (ferrítica) apresenta valores baixos de resistência a tração associados a altos valores de ductilidade e tenacidade, já a matriz constituída de perlita (perlítica) apresenta valores altos de resistência associados a baixos valores de ductilidade e tenacidade. Guessser (2009).

Com relação a composição química os elementos básicos que influem nas propriedades mecânicas são o carbono e o silício, entretanto alguns elementos de liga como o Cu, S, Mn, Ni, Ti, Cr, Sn, Nb e V são adicionados nos ferros fundidos grafiticos a fim de aumentar as propriedades mecânicas. A adição de elementos de liga baseia-se no aumento da quantidade de perlita na estrutura e diminuição do espaçamento interlamelar, sendo o estanho um dos principais elementos adicionados que possui um forte comportamento perlitizante muito acentuado o que permite propriedades mecânicas bem elevadas, entretanto seu efeito na formação das células eutéticas deve ser estudada. A adição de elementos de liga vem se tornando uma prática usual, por permitir não só obter resistências com o carbono equivalente mais elevado (4 a 4,3% C), como redução da variabilidade da qualidade da microestrutura conforme variações da espessura da peça. (CHIAVERINI, 2015).

O nióbio tem sido considerado como um elemento de liga para ferros fundidos que apresenta melhorias na resistência mecânica e fadiga térmica, vários autores investigaram a influência da adição de nióbio para ferros fundidos principalmente a classe dos cinzentos, onde proporciona o refino de células eutéticas e diminuição do espaçamento interlamelar, (MOHRBACHER AND Q. ZHAI, 2011).

O Objetivo deste trabalho será avaliado a adição de Nb em ferro fundido cinzento como substituinte do elemento estanho, avaliando às propriedades químicas e mecânicas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para a fabricação do ferro fundido cinzento foi adotado uma especificação da liga base conforme Tabela 1, e com o objetivo de reduzir a variabilidade da matéria prima utilizada foi elaborado uma a liga base utilizando sucata, retorno de ferro fundido nodular, sucata de aço e a realização das devidas correções nos demais elementos conforme Tabela 2.

A análise química foi realizada em espectrômetro de emissão ótica conforme norma ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTN A 751:2014

Tabela 1 – composição química especificada da liga base

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Nb	Sn	Ni
Liga base	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	3,75	1,65	0,40	-	0,09	0,15	0,55	-	0,03	0,10

Fonte: o Autor (2018)

Tabela 2 – composição química dos matérias utilizados para a fabricação da liga base

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Nb	Sn	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Gusa	4,393	0,64	0,58	0,08	0,015	-	-	-	-	-
Sucata de aço	0,079	0,02	-	0,019	0,008	-	-	-	-	-
Retorno de nodular	3,500	2,60	-	0,005	0,015	0,06	0,01	-	0,01	-

Fonte: o Autor (2018)

Foi elaborado três especificações conforme tabela 03, para avaliação da adição de nióbio e seus efeitos em substituição ao estanho.

Tabela 3 - Composição químicas das fundições de liga de ferro fundido cinzento

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Nb	Sn	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
FC Padrão	3,75	1,74	0,45	0,06	0,10	0,18	0,54	-	0,03	0,12
FC Padrão – Sn	3,75	1,74	0,45	0,06	0,10	0,18	0,54	-	0,008	0,12
FC Padrão – Sn + Nb	3,75	1,74	0,45	0,06	0,10	0,18	0,54	0,20-0,24	0,008	0,12

Fonte: o Autor (2018)

2.2 Método

A produção da liga base foi realizada em forno a indução com cadinho de 300 kg, a Figura 1 apresenta o detalhamento da fundição da liga base.

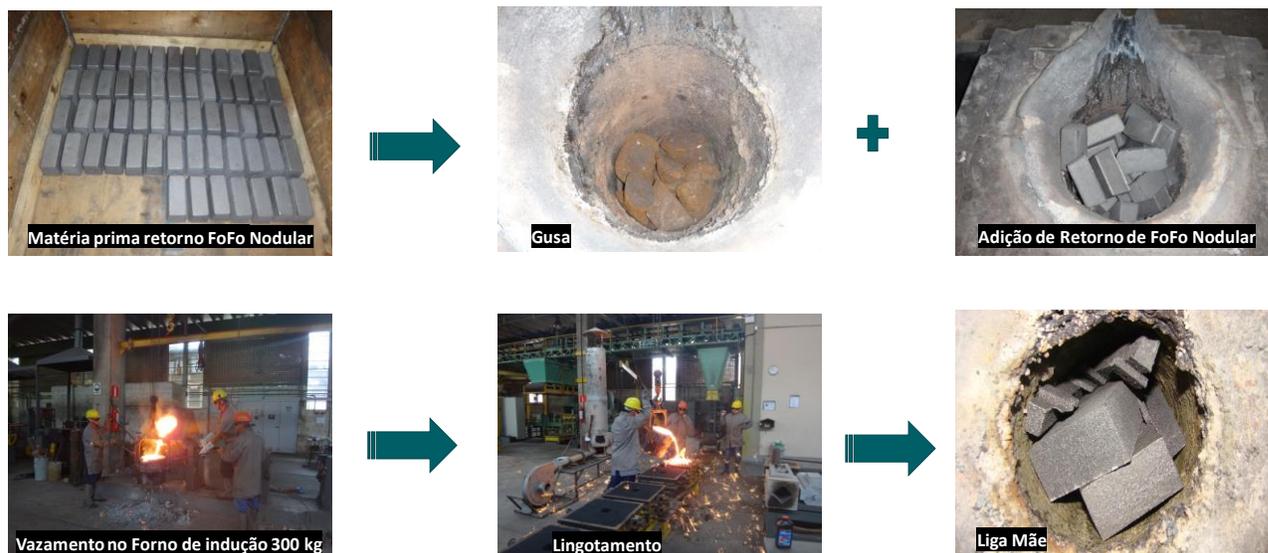


Figura 1- Preparação e fusões de liga base em forno a indução com cadinho de 300 kg

Fonte: o Autor (2018)

Os materiais da liga foram fundidos em aproximadamente 1480° C em forno a indução, com carga de 50 kg. O vazamento foi realizado primeiramente em uma panela refrataria pré-aquecida, seguindo para o vazamento em moldes de areia verde. A temperatura de vazamento panela molde foi de aproximadamente 1440°C. O corpo de prova foi moldado conforme norma DIN EN 1561

A Inoculação foi realizada no vazamento forno panela, o inoculante utilizado foi Ferro Silício 75% na granulometria de 1,0 a 3,0 mm.

O nióbio foi adicionado no final da fusão das ligas na granulometria de 1 a 5mm, com teor de Nb contido de 65 %, o tempo dissolução do nióbio foi de 5 mim.

Foram gerados 3 corpos de prova para cada caracterização química, ensaios mecânicos de dureza (HBW), tração (MPa) e ensaios de metalografia óptica para determinação da qualidade da grafita e contagem de células eutéticas.

A Figura 2 apresenta fundição dos corpos de prova de ferro fundido cinzento conforme norma DIN EM 1561.



Figura 2 - Fundição de corpos de prova de ferro fundido cinzento conforme procedimento pré-estabelecido pelos autores para fabricação de corpos de prova

Fonte: o Autor (2018)

A caracterização estrutural foi realizada utilizando microscópio óptico Axio bserver da marca ZEISS e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) equipamento Quanta-450 da marca FEI acoplado a uma sonda EDS (resultados semi quantitativos).

Primeiramente as amostras foram cortadas utilizando equipamento Brillant-250 da marca ATM. Em seguida, foi realizada a preparação metalográfica das mesmas, que consiste no lixamento utilizando lixas de carbetto de silício grana 220, 320, 400, 600 e 1000 e posteriormente polimento com diamante em suspensão de 6 μm , 3 μm e 1 μm .

A contagem de células eutéticas foi determinado em campos aleatórios das amostras, utilizado como padrão, a norma NBR-6849. O reagente utilizado para o ataque das amostras foram MARBLE, verificando a área de visualização com a menor lente ocular do microscópio (25X), a área de identificação deve aproximar a 1cm².

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta os resultados das composições químicas obtidos na fundição dos corpos de prova de diâmetro de 30 mm de ferro fundido cinzento

Considerando os resultados da Tabela 4, os materiais apresentaram composição química dentro das especificações objetivadas.

Tabela 4 - Composição químicas das fundições de liga de ferro fundido cinzento

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Nb	Sn	Ni	CEq
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
FC Padrão	3,75	1,74	0,45	0,06	0,10	0,18	0,54	-	0,03	0,12	4,35
FC Padrão – Sn	3,75	1,69	0,45	0,06	0,09	0,17	0,57	-	0,008	0,11	4,33
FC Padrão – Sn + Nb	3,67	1,73	0,46	0,06	0,09	0,17	0,56	0,24	0,008	0,11	4,27

Fonte: Fonte: o Autor (2018)

Realizado ensaio de dureza HB e tração MPa para avaliação das propriedades mecânicas, a Tabela 5 apresenta os resultados.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas

Material	Tração					Dureza			
	MPa					HB			
Corpo de prova	01	02	03	04	Média	01	02	03	Média
FC Padrão	105	113	*	*	109	173	172	169	171
FC Padrão com redução Sn	104	109	117	121	113	149	142	143	145
FC Padrão com redução Sn + Nb	174	153	137	141	151	178	178	179	178

*corpos de prova com defeito de fundição

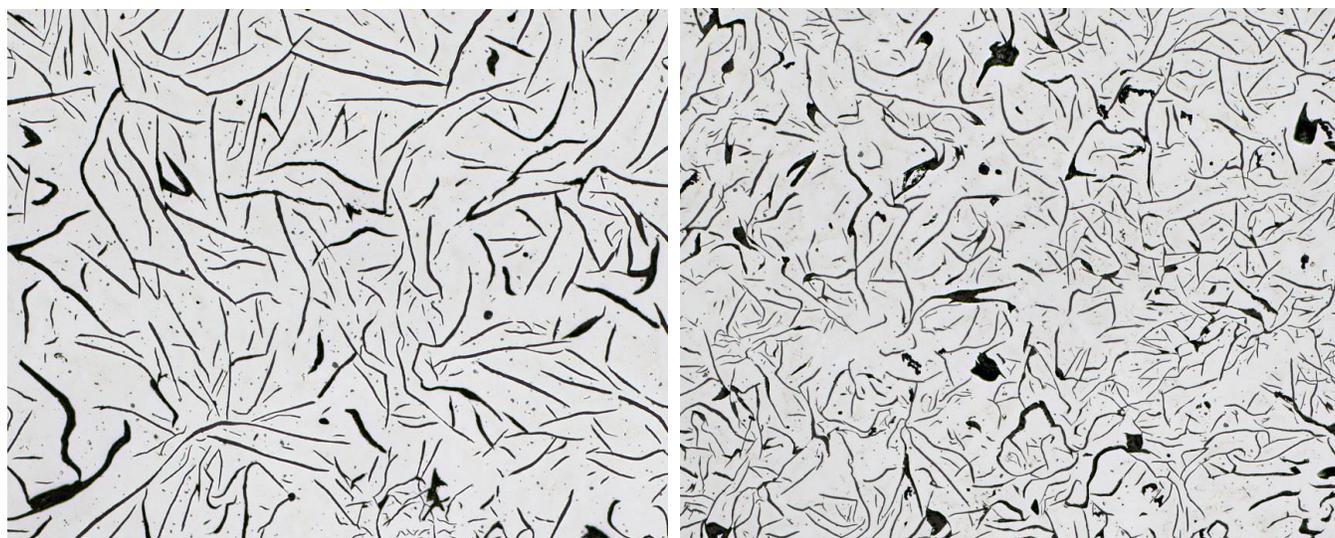
Fonte: Fonte: o Autor (2018)

Os resultados de resistência a tração do corpo de prova contendo nióbio foi 38 e 42 MPa superior aos resultados obtidos nos corpos de prova padrão e padrão com redução do teor de estanho respectivamente. O aumento da dureza também foi evidenciado, no corpo de prova contendo nióbio a dureza foi 33 HB superior aos corpos de prova padrão com redução de estanho e ligeiramente superior (09 HB) ao corpo de prova padrão. Este resultado indica que o ferro fundido cinzento com adição de nióbio proporciona uma maior resistência ao material, substituído o potencial perlitizante do estanho.

3.1 Resultado microscopia óptica e eletrônica de varredura

Os testes apresentaram matrizes metálicas perlíticas com pequenas quantidades de ferrita apresentando grafita tipo A predominantemente. A amostra FC Padrão com adição de nióbio apresentou precipitados de NbC dispersos na matriz o que pode ter contribuído significativamente para aumento da dureza e resistência a tração deste material.

A grafita do tipo A tem melhor resistência mecânica é uma grafita formada de baixo resfriamento, o refino da grafita na amostra de ferro fundido padrão com adição de Nb foi evidenciado, fato que pode contribuir na elevação da condutividade térmica.



A – FC Padrão com redução Sn

B – FC Padrão com redução Sn e adição Nb

Figura 4 – Microscopia Ótica amostras FC Padrão com redução de Sn e FC Padrão com redução de Sn e adição de Nb

Fonte: By CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração

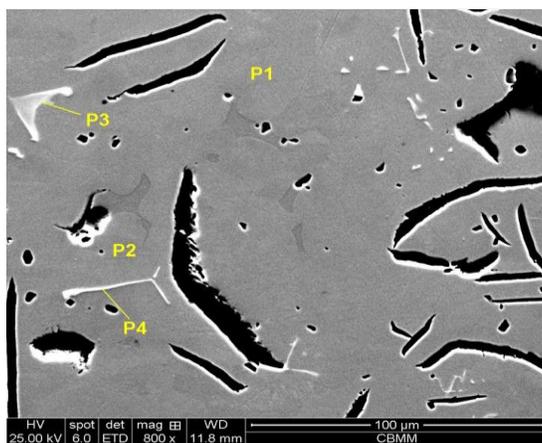


Tabela 6- Propriedades obtidas na microscopia de varredura (MEV)

FC Padrão + Nb	Ponto 01		Ponto 02		Ponto 03		Ponto 04	
	Wt	At	Wt	At	Wt	At	Wt	At
	%	%	%	%	%	%	%	%
Si	1,7	3,2	0,9	1,6	1,0	2,4	-	-
Cr	0,3	0,3	2,7	2,7	0,8	1,0	0,5	0,7
Mn	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	-	-
Fe	97,7	96,1	88,9	83,0	57,5	67,1	20,9	29,9
P	-	-	7,4	12,5	-	-	-	-
Nb	-	-	-	-	39,1	27,4	76,4	65,7

Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) amostras FC Padrão com Sn reduzido e FC Padrão com redução de estanho e adição de Nb, Fonte: o Autor (2018)

4. CONCLUSÃO

Pode-se observar que inovações em projetos metalúrgicos aplicados aos ferros fundidos cinzentos permitem oferecer opções para a seleção de materiais.

As adições de elementos de ligas proporcionam melhorias nas propriedades mecânicas e térmicas dos ferros fundidos. Neste estudo os materiais de desenvolvimento apresentaram composição química dentro das especificações objetivadas, com adição de nióbio de 0,20% e redução de estanho de 0,03%.

Os resultados de resistência a tração do corpo de prova contendo nióbio foi 33 e 38 % superior aos resultados obtidos nos corpos de prova padrão e padrão com redução do teor de estanho respectivamente. O aumento da dureza também foi evidenciado, no corpo de prova contendo nióbio a dureza foi 22% superior aos corpos de prova padrão com redução de estanho e 4% maior que o resultado obtido no corpo de prova padrão. Este resultado indica que o ferro fundido cinzento com adição de nióbio proporciona uma maior resistência ao material, substituído o potencial perlitizante do estanho.

Os testes apresentaram matrizes metálicas perlíticas com pequenas quantidades de ferrita apresentando grafita tipo A predominantemente. A amostra FC Padrão com adição de nióbio apresentou precipitados de NbC dispersos na matriz o que pode ter influenciado no aumento da dureza do material.

Com o aumento das propriedades mecânicas e microscópicas obtidas com a adição de nióbio em ferro fundido cinzento pode -se concluir que o nióbio obtém um forte potencial perlitizante, proporciona o refino da célula eutética e do espaçamento interlamelar perlítico, podendo apresentar melhorias significativas em peças que são submetidas a trabalhos em alta temperatura substituindo o estanho que tem um efeito negativo, reduzindo a resistência ao choque, mesmo sendo um excelente estabilizador da perlita (perlitizante forte).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM).

5. REFERÊNCIAS

ASHBY, M, SHERCLIFF, H and CEBON, D, **Materials: Engineering science processing and design**, UK: Butterworth-Heinemann, 2007.

A.O. DEVECILI, R. YAKUT, **The effect of Nb supplement on material characteristics of iron with lamellar graphite**, Adv. Mater. Sci. Eng. 2014 (2014) 1–5.

ASM HANDBOOK, Volume 15: Casting D.M. Stefanescu, editor, p 168-181 DOI: 10.1361, 2003

DIN EM 1561 **Grey cast Iron, European Standard EN 1561: 1997 has de status of the DIN Standard**, Page 08 Tensile Test.

CALLISTER, W. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**: fabricação de metais. Rio de Janeiro: LTC livros técnicos e científicos editora S.A, 2002.

CHIAVERINI, V. **Aço e Ferros Fundido**: Ferro Fundido. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2015, 515 – 530.

COPAERT, H, **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**, 3ª edição São Paulo, 2004.

CUEVA G, SINATORA A, GUESSER W L and CHIPTSCHIN A P. **Wear resistance of cast irons used in brake disc rotor**. *Wear*, 2003, 255: 1256-1260.

GUESSER, W L, **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Blucher, 2009.

H. MOHRBACHER, Q. ZHAI, **Niobium alloying in grey cast iron for vehicle brake discs**, 2011. in: TMS conf. Proceedings Materials Science and Technology (MS & T), San Diego, California, the USA, 2011, pp. 434–445.

MOHRBACHER, H. **Grain size control by niobium microalloying in gear steel during high temperature carburizing**. Artigo - NiobelCon bvba, Belgium, 2007.