

Produção, caracterização microestrutural e mecânica de ferros fundidos nodulares com altos teores de silício

José B. Rodrigues¹, Luiz C. Casteletti²

¹Universidade de São Paulo, Instituto de Materiais de São Carlos, SP, Brasil
e-mail: jbtosoni@usp.br

Resumo

Neste trabalho foram produzidos e caracterizados ferros fundidos nodulares com altos teores de silício. Foram desenvolvidas duas ligas de referência e quatro ligas variando-se o teor de silício, que foram caracterizadas por meio de ensaios mecânicos de tração, dureza e microestrutural. Obtiveram-se limites de resistência equivalentes aos dos ferros fundidos nodulares de matriz perlítica e superiores aos dos ferros fundidos nodulares de matriz ferrítica, com teores de silício na faixa convencional.

Palavras chave: Ferros fundidos nodulares, Alto silício; Produção; Caracterização.

Introdução

Em função da crescente competitividade industrial, o desenvolvimento de novos materiais e aperfeiçoamentos dos existentes torna-se inevitável. Para os ferros fundidos nodulares, o aumento do teor de silício pode resultar em melhoramento das propriedades mecânicas.

As melhorias nas propriedades são decorrentes da inclusão do átomo de silício na rede cristalina do ferro, permitida pela proximidade dos raios atômicos do ferro e do silício [1,2]. Essa substituição mantém a dureza constante e a matriz homogênea [3]. Até cerca de 4,3% de silício, uma relação linear pode ser encontrada entre o percentual de silício e a resistência a tração, com o alongamento elevado. Acima desse limite, ocorre uma queda brusca no alongamento, uma vez que a segregação de

silício enfraquece a interface entre a matriz e os nódulos de grafita com a consequente diminuição das propriedades mecânicas [4].

Em ferros fundidos nodulares com predominância de matriz ferrítica, o material possui alta ductilidade com resistência mecânica limitada, nos casos com matriz predominantemente perlítica, ocorrem altos limites de resistência e baixa ductilidade [5]. A mistura dessas fases na matriz em proporções variadas não garante a homogeneidade das propriedades. As ligas com altos teores de silício garantem uma matriz totalmente ferrítica e propriedades homogêneas em todas as seções da peça, com pequena influência da espessura de parede e da taxa de resfriamento mantendo frações de perlita até de 5% [6].

As possíveis desvantagens são a deterioração da forma da grafita que pode ocorrer. Mesmo assim, há um interesse crescente pelos ferros fundidos alto silício, devido as suas boas combinações de propriedades de tração, microestrutura homogênea [7].

Procedimento Experimental

Foram fundidos corpos de provas de ferros nodulares conforme norma ASTM A536 de duas ligas de referência, uma com matriz ferrítica (Liga 1), uma com uma matriz perlítica (Liga 6), ambas com o percentual de silício na faixa 2,5 (convencional) e 4 ligas com maiores teores de silício, variando até 4,4%. Os teores de carbono e silício foram balanceados de maneira a se manter o carbono equivalente próximo ao eutético, visando um maior número de nódulo [3].

Os corpos de prova para os ensaios de tração e de dureza foram confeccionados de acordo com as normas ASTM E8 e E10, respectivamente. Todos os casos a classificação da nodularidade e da norma da grafita foram realizadas conforme ASTM A247.

Resultados e Discussão

As composições químicas das amostras fundidas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composições químicas das ligas(% em peso).

LIGA	C	Si	Mn	Cu	Mg	CE
1	3,50	2,80	0,48	0,04	0,0282	4,440
2	3,32	3,29	0,28	0,09	0,0380	4,431
3	3,14	3,58	0,50	0,04	0,0350	4,344
4	2,93	3,94	0,47	0,03	0,0281	4,26
5	3,00	4,39	0,43	0,03	0,0338	4,48
6	3,42	2,84	0,45	0,71	0,0274	4,388

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios de tração (média de 03 ensaios) e desvios padrão.

Tabela 2 – Resultados de tração.

LIGA	L. E (Mpa)		LRT (Mpa)		ALONG. (%)	
	Méd.	σ	Méd.	σ	Méd.	σ
Liga 1	341,7	2,2	476,3	2,9	12,03	1,40
Liga 2	380,0	10,0	509,8	5,8	11,1	0,80
Liga 3	430,0	5,0	536,6	9,2	10,3	1,10
Liga 4	456,7	7,6	550,0	12,5	9,3	0,90
Liga 5	455,0	5,0	531,6	3,2	4,1	0,60
Liga 6	380,0	14,0	527,3	15	2,8	0,50

Os resultados dos ensaios de dureza estão apresentados na tabela 3 (média de 03 ensaios) e desvios padrão.

Tabela 3 – Resultados de dureza.

MATERIAL	Liga 1	Liga 2	Liga 3	Liga 4	Liga 5	Liga 6
DUREZA (HB)	167	171	183	189	196	244
σ	3	4	3	5	3	4

São apresentadas na Figura 1 as micrografias dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração.

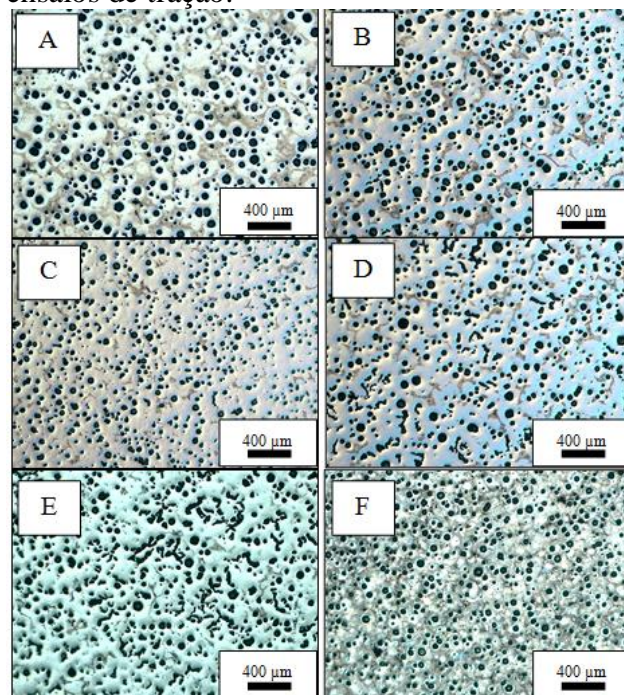


Figura 1 - Metalografia dos corpos de prova. (A) Liga 1-Si 2,80%. Grafita tipo I e II, nodularidade 90%. Matriz ferrítica/perlítica. (B) Liga 2-Si 3,29%. Grafita tipo I e II, nodularidade 90%. Matriz ferrítica com redução no percentual de perlita. (C) Liga 3-Si 3,58%. Grafita tipo I e II, nodularidade 80%. Matriz predominate ferrítica. (D) Liga 4-Si 3,94%. Grafita tipo II e IV, nodularidade 70%. Matriz ferrítica. (E) Liga 5-Si 4,39%. Grafita tipo II e IV, nodularidade 50%. Matriz ferrítica. (F) Liga 6-Si 2,84%. Grafita tipo I e II, nodularidade 90%. Matriz perlítica. Ataque químico com Nital 3%.

Observa-se que as ligas com maiores teores de silício apresentam uma fração menor de perlita, evidenciando o efeito ferritizante desse elemento até o percentual de 3,6% [8]. Acima desse teor de silício o percentual de perlita manteve-se constante [9].

O aumento no limite de escoamento ocorre até 4,3% de silício, após esse teor esse efeito não é alcançado, somente um pequeno aumento no limite de resistência a tração, insignificativo para a maioria das aplicações mecânicas. Essa



interrupção no aumento das propriedades mecânicas corrobora com a teoria estudada, relacionado com o decréscimo de nodularidade e na forma da grafita [4].

A liga 2 atingiu o limite de escoamento igual ao da liga 5, com inferioridade no limite de resistência de ruptura, porém com maior alongamento. Já a liga 3 supera os limites de resistência a tração e limite de escoamento do material perlítico (liga 6) mantendo superioridade no alongamento.

Conclusões

Obteve-se um incremento nas propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares com altos teores de silício, alcançando valores de resistência equivalentes aos dos ferros fundidos perlíticos, com superioridade no alongamento. Com teores de Si superiores 3,6% se inicia a degeneração da grafita, promovendo uma tendência de ferro fundido vermicular.

Também foi evidenciado que os corpos de prova com as mesmas geometrias, as ligas com incremento no teor de silício apresentaram menor fração de perlita, garantindo uma matriz mais homogênea.

Agradecimentos

A empresa Baldan Implementos Agrícolas pelo fornecimento e fundição das ligas.

Referências

- [1] SINHA, A. K. Physical metallurgy handbook. [s.l.] McGraw-Hill Professional Publishing, 2003.
- [2] ABBASCHIAN, REZA; REED-HILL, R. E. **Physical Metallurgy Principles**. 4th. ed. [s.l.] Cengage Learning, 2008.
- [3] GLAVAS, Z.; STRKALJ, A.; STOJAKOVIC, A. The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons. *Metalurgija*, v. 55, n. 3, p. 293–296, 2016.

- [4] ALHUSSEIN, A. et al. Materials Science & Engineering A Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron. *Materials Science and Engineering: A*, v. 605, p. 222–228, 2014.

- [5] BORSATO, T. et al. Mechanical and Fatigue Properties of Heavy Section Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron Castings. *Advanced Engineering Materials*, v. 18, n. 12, p. 2070–2075, 2016.

- [6] SCRUTON, J.; LICAVOLI, J.; SANDERS, P. Solid Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron (SSFDI) Effects and Limitations of Residual Alloying Elements. Houghton: [s.n.]. Disponível em:

<<https://www.ductile.org/wp-content/uploads/Michigan-Tech-DIS-SSFDI.pdf>>.

- [7] DUIT, B.; DEGIRMENCI, S.; ŞIRIN, B. EN 1563 – NEW GENERATION DUCTILE IRONS (Solid Solution Strengthened Ductile Irons). 7th INTERNATIONAL ANKIROS FOUNDRY CONGRESS. Anais...Istanbul: 2014

- [8] GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, R. et al. Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part I – Microstructure. *Materials Science and Engineering A*, v. 712, p. 794–802, 2018.

- [9] LABRECQUE, C.; GAGNÉ, M. Ductile Iron: Fifty Years of Continuous Development. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 37, n. 5, p. 343–378, 1998.