

EFEITO COMBINADO DO ANTIMÔNIO E COBRE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FERRO FUNDIDO NODULAR¹

Adriano Luis Koerich²
Kassim Shamil Al-Rubaie³

Resumo

Os ferros fundidos nodulares são materiais de longa tradição e de ampla aplicação em diversos processos de fabricação. Este trabalho visa avaliar o efeito combinado do antimônio e cobre, afim de otimizar o processo de obtenção de classes com elevada resistência mecânica. Neste trabalho são apresentados resultados referentes a adições combinadas entre 0,02% a 0,46% de antimônio (Sb), 0,3% a 0,6% de cobre (Cu) em um ferro fundido nodular ferrítico hipereutético com carbono de 3,50% a 3,70% e silício de 2,40% a 2,70%. As crescentes adições combinadas de antimônio e cobre resultaram no aumento da resistência mecânica e diminuição da tenacidade. As quantidades combinadas de antimônio e cobre resultaram na obtenção de um ferro fundido nodular com maior resistência mecânica, se comparado a apenas a utilização do antimônio e com custo até 30% menor se comparado com a utilização de cobre apenas.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular; Antimônio; Cobre; Perlitizante; Propriedades mecânicas.

COMBINED EFFECT OF ANTIMONY AND COPPER ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF NODULAR CAST IRON

Abstract

Nodular cast irons are long-tradition materials and have been widely applied in many manufacturing processes. This study aims to evaluate the combined effect of antimony and copper, in order to optimize the process of getting classes with high mechanical strength. This paper presents results for the combined additions of 0.02% to 0.46% antimony (Sb), 0.3% to 0.6% copper (Cu) in a hypereutectic ferritic nodular cast iron with carbon content from 3.50% to 3.70% and silicon content from 2.40% to 2.70%. The increasing combined additions of antimony and copper resulted in increased mechanical strength and decreased toughness. The combined amounts of antimony and copper resulted in obtaining a nodular cast iron with a greater mechanical strength when compared to that in which only antimony was used, and 30% less cost in comparison with the use of copper alone.

Key words: Ductile iron; Antimony; Copper; Mechanical properties; Pearlite.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng.^o de Fundição e Msc em Engenharia Mecânica, Embraco Fundição, Joinville, SC, Brasil.

³ Ph.D. em Engenharia Mecânica, Professor Dr. no Instituto Superior Tupy, Sociesc, Joinville, SC, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Novos desenvolvimentos são resultantes de necessidades em áreas específicas de aplicação, para redução de custos a fim de tornar a empresa competitiva no mercado ou ainda a fim de otimizar os recursos naturais. Entre vários elementos de liga estudados e aplicados na indústria de fundição, encontram-se os elementos de liga conhecidos como perlitizantes, que modificam da microestrutura do ferro fundido, promovendo microconstituintes de duas fases chamado perlita, atuando durante o processo de solidificação na difusão do carbono, a fim de evitar a formação de um microconstituente com baixo carbono, como a ferrita, que é caracterizado por alto percentual de alongamento, porém com baixa resistência mecânica. Os elementos perlitizantes mais conhecidos da indústria de fundição são o cobre e o estanho, onde este último leva vantagem na aplicação devido ao melhor custo-benefício. Esses elementos são mundialmente conhecidos, assim como seus efeitos benéficos e deletérios nos ferros fundidos.⁽¹⁾

Porém o antimônio, ainda pouco conhecido e pouco utilizado, com poder de perlitização de 2 vezes a 4 vezes maior que o do estanho. Sua utilização como elemento perlitizante é pequena nas indústrias de fundição e há poucos estudos relacionados à influência deste elemento sobre ferros fundidos.⁽²⁾

Este elemento é particularmente efetivo em seções onde grafitas do tipo B, D ou E são inevitáveis. Além do efeito perlitizante, é usado na prevenção da quebra da perlita em altas temperaturas. Quanto a influência sobre as propriedades mecânicas, mostra-se que há aumento de dureza, resistência à tração e cisalhamento⁽³⁾. Uma das possíveis causas desse ganho em ambas as propriedades pode estar relacionada ao fato do antimônio ser altamente solúvel na austenita, formando solução sólida substitucional na austenita promovendo o efeito de barreira durante a difusão do carbono na solidificação. Esse efeito de barreira impossibilita a saída do carbono da austenita, onde durante a reação eutetóide, forma a perlita. Logo, o fato de ser altamente solúvel na austenita, reduz a tendência à formação de carboneto no contorno de célula eutética. Não se trabalha com teores acima de 0,16%, onde teores efetivos finais ficam na faixa de 0,02% a 0,06%.⁽⁴⁾ O antimônio quando presente em concentrações superiores a 50 ppm a 100 ppm (0,005% a 0,010% Sb) causaria degenerescência da grafita esferoidal.⁽⁵⁾

Na prática é relevada que concentrações superiores a 0,020% de Sb mantiveram os nódulos com as mesmas características do material sem a presença deste elemento, o que confirma que os teores que causam degeneração da grafita são mais elevados. Para adições de 40 ppm a 80 ppm de Sb, em geral, mais de 80% de grafita esferoidal na microestrutura. Para 100 ppm de Sb a menor incidência de grafita nodular foi de 70%, enquanto para 160 ppm de Sb resultaram de 55% a 85% desse tipo de grafita na estrutura correspondente às diferentes posições examinadas nos corpos-de-prova.⁽⁶⁾

Uma vantagem que chama a atenção para a utilização deste elemento é o custo-benefício, tendo em vista que este material atualmente tem um custo menor do que outros elementos perlitizantes se comparado às adições necessárias.

Para verificar e esclarecer estas afirmações, bem como avaliar o comportamento e a eficiência deste elemento de liga sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido, desenvolveu-se este projeto de pesquisa.

Para avaliar de uma forma mais aprofundada a atuação deste elemento de liga, optou-se pela realização do teste em uma liga com microestrutura predominantemente ferrítica.

O objetivo deste trabalho é determinar os teores ideais da mistura de antimônio e cobre para obter elevadas propriedades mecânicas com o menor custo no ferro fundido nodular.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Fusão e Vazamento

Os experimentos desta pesquisa, como fusão dos materiais metálicos e vazamento nos corpos de prova, foram realizados na Whirpool S.A. - Unidade Embraco Fundição. Com o objetivo de obter amostras para realização de ensaios que pudessem fornecer dados para identificação de material e observação do mecanismo da influência do antimônio sobre a estrutura do metal em estudo, optou-se pela fusão de uma liga de ferro fundido nodular ferrítica da classe ABNT 42012, cuja composição química obtida está descrita na Tabela 1.⁽⁷⁾

A composição da carga para obtenção do ferro fundido nodular foi de 30% de ferro gusa, 30% de sucata de aço e 40% de retorno de ferro fundido nodular. A liga base foi obtida em forno a indução elétrica sem núcleo magnético com capacidade para até 4.300 kg de metal. Definiu-se como bloco de prova padrão para essa liga, o bloco de prova tipo "Y" (Figura 1), vazado em molde de areia ligada quimicamente, conforme norma ABNT NBR 6916.⁽⁷⁾

Tabela 1. Composição química obtida (% em peso)

Teste	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	As	Cu	Sn	Mg	Sb	Ceq
Base	3,560	2,590	0,2140	0,0321	0,0161	0,0181	0,0145	0,0032	0,1940	0,0024	0,0442	0,0017	4,423
C-01	3,510	2,510	0,2390	0,0301	0,0223	0,0187	0,0110	0,0028	0,2940	0,0024	0,0480	0,0184	4,347
C-02	3,490	2,540	0,2410	0,0289	0,0194	0,0183	0,0099	0,0022	0,5340	0,0023	0,0421	0,0190	4,337
C-03	3,470	2,510	0,2410	0,0272	0,0188	0,0184	0,0092	0,0024	0,2980	0,0023	0,0380	0,0366	4,307
C-04	3,490	2,680	0,2390	0,0316	0,0178	0,0188	0,0117	0,0040	0,6240	0,0025	0,0524	0,0461	4,383

A Figura 1 demonstra as dimensões do bloco de prova tipo "Y" utilizado para obtenção dos corpos de prova a serem ensaiados.

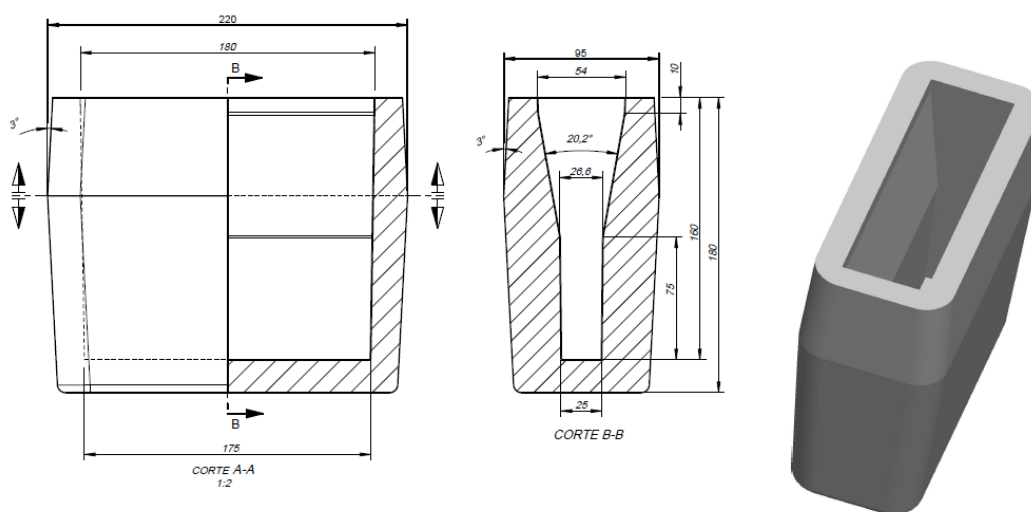


Figura 1. Corpo de prova modelo "Y".⁽⁷⁾

Após obtenção do metal líquido, o mesmo foi transferido para a panela de nodularização do tipo "sandwich" com tampa intermediária, onde a liga nodularizante

utilizada foi a liga FeSiMg +Ca + Al no percentual de aproximadamente 1,5% sobre o peso de metal líquido.

Os blocos de prova foram vazados na temperatura entre 1.380°C e 1.400°C. A fim de evitar fadiga do inoculante ou da liga nodularizante, bem como heterogeneidade de composição, os blocos de prova foram vazados até 60 segundos após o metal ter sido transferido para a panela de vazamento.

O objetivo a ser estudado consistiu em adicionar ao metal líquido o material antimônio, sob forma de ferro liga britada com granulometria de 0,35 mm a 2,5 mm com 99,6% de Sb em sua composição, no fundo da panela a ser utilizada como panela de vazamento, que recebeu o metal líquido da panela de nodularização. O objetivo de se adicionar o antimônio no fundo da panela foi para uma dissolução completa no metal líquido e a homogeneização do banho com este elemento pela turbulência do metal durante o enchimento da panela de vazamento.

A desmoldagem dos blocos de prova ocorreu 1 hora após o vazamento dos moldes. Uma informação importante que deve ser levada em consideração no momento da análise da composição química e principalmente para avaliar a microestrutura do material é que o silício para inoculação foi adicionado no momento do processo de nodularização da liga e não no vazamento como é comumente utilizado.

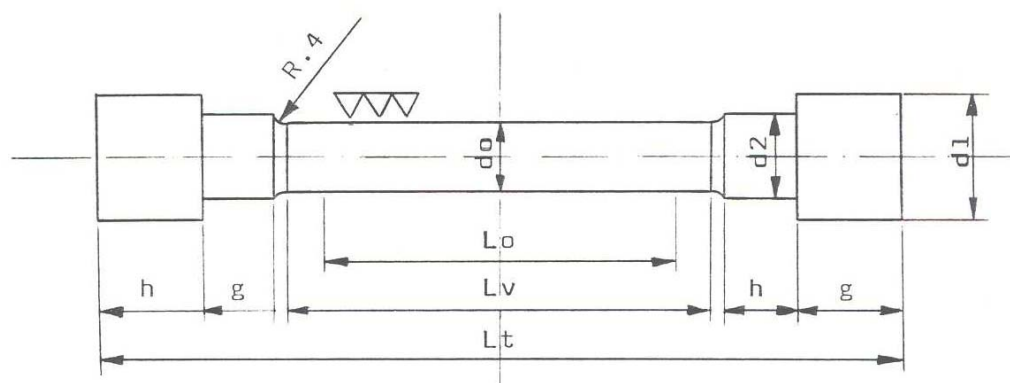
2.2 Metalografia

A metalografia quantitativa realizada através de microscópio ótico acoplado ao analisador de imagens foi utilizada para avaliar porcentagem de ferrita e perlita, grau de nodularização, número de nódulos, forma e tamanho dos nódulos. O analisador utilizado foi o Image Pro-Plus. Para cada percentual estudado foi feito 6 imagens aleatoriamente escolhidas para a quantificação. A análise do número, quantidade e tamanho de nódulos foi feita sem ataque com aumento de 100x. Enquanto a análise de porcentagem da matriz metálica foi feita com ataque (nital 3%) e aumento de 100x.

2.3 Ensaios Mecânicos

O ensaio de dureza Brinell foi realizado no equipamento Durômetro EMCOTest Automatic, utilizando esfera de 5 mm de Tungstênio com carga de 750 kgf. Uma amostra de cada liga utilizada para realização do ensaio, onde foi retirado para a análise de dureza a parte superior do corpo de prova utilizado para ensaio de tração, há cerca de 5 mm da superfície. Para cada teste foram realizados 10 ensaios de dureza, os valores da média de dureza estão descritos no item resultados.

O ensaio de tração foi realizado na Máquina Universal de Tração EMIC DL30000N, cedido pela Sociesc, onde foram ensaiados 5 corpos de prova para cada liga. As dimensões do corpo de prova padrão para o teste de tração estão definidas na Figura 2. O valor da média de 5 ensaios estão descritos no item resultados, seguindo a norma NBR 6916.⁽⁷⁾



Diâmetro de Ensaio (d_0)	Diâmetro do Ressalto (d_2)	Diâmetro da cabeça (d_1)	Altura da cabeça (h)	Compr. Ressalto (g)	Compr. Útil (L_0)	Compr. Ensaio (L_v)	Compr. Total (L_t)
14	17	25	19	14	70	84	160

Figura 2. Dimensões utilizadas para o corpo de prova padrão para ensaio de tração.

O ensaio de resistência ao impacto consiste em submeter um corpo de prova a uma força brusca e repentina, que deve rompê-lo. Para cada percentual de antimônio foram retirados cinco blocos de prova. Destes, foi selecionado um bloco de onde foram extraídos quatro corpos de prova padrão tipo Charpy, para ensaio de resistência ao impacto. O bloco de prova foi fresado até se obter um corpo de prova conhecido como Charpy, com entalhe. O desenho do corpo de prova utilizado está descrito na Figura 3 segundo a norma ASTM E-23.⁽⁸⁾

Os corpos de prova foram ensaiados no laboratório da empresa Tupy S.A., na Máquina Universal de Impacto, tipo PW30/15K da marca Otto Wolpert (L800.00 mm) com carga de 15 kg. O valor da média de 4 ensaios está descrito no item resultados.

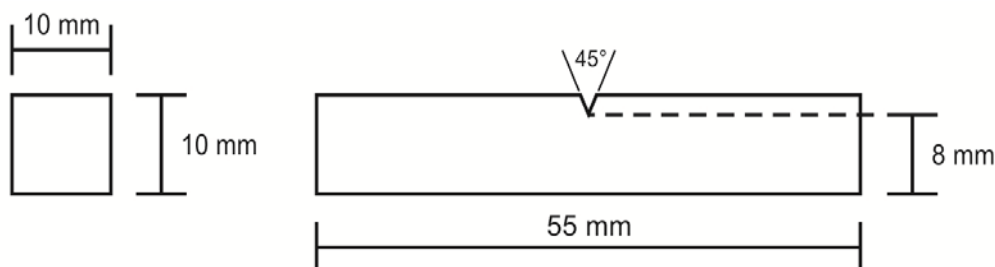


Figura 3. Dimensões utilizadas para o corpo de prova padrão Charpy.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Microscopia Óptica

Nas Figuras 4 e 5 estão relacionadas à amostra da liga base, com a presença residual de 0,0017% de antimônio e 0,0194% de cobre na composição do material. Na amostra sem ataque químico é mostrada a formação e disposição das grafitas bem como na figura com ataque é evidenciado a matriz ferrítica-perlítica.

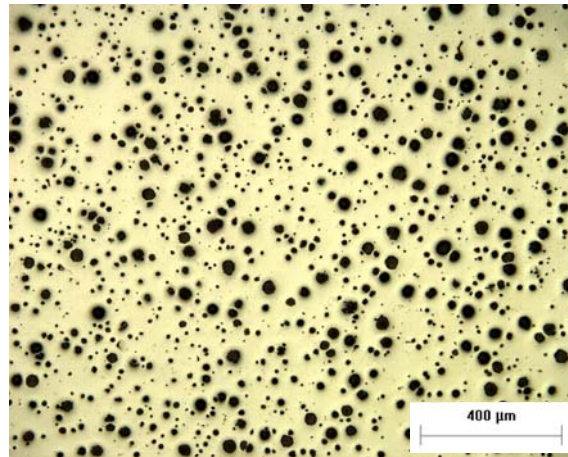


Figura 4. Liga Base - Micrografia da liga base de ferro fundido sem ataque e com aumento de 100x.

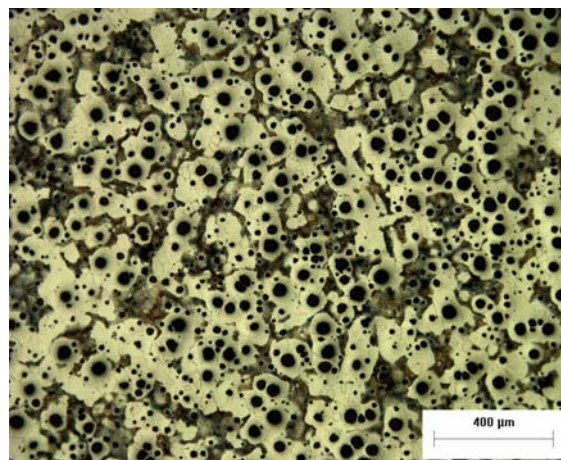


Figura 5. Liga Base - Micrografia da liga base de ferro fundido com ataque Nital 3%, aumento de 100x.

Nas Figuras de 6 a 13 é observado a microestrutura do ferro fundido nodular com adição de cobre em conjunto com antimônio. Nestes experimentos foram adicionados apenas algumas combinações dos menores teores e os mais usuais de cada material, tendo em vista os prejuízos à microestrutura causado pelo antimônio quando adicionado em excesso e a inviabilidade econômica em adicionar teores excessivos de cobre.

Nas Figuras 6 e 7 observa-se a amostra com o menor teor de cobre e antimônio em uma faixa utilizável, nesta amostra é evidenciado uma boa quantidade e qualidade dos nódulos e redução na quantidade de ferrita. Os benefícios da adição combinada destes elementos perlitzantes podem ser observados nas propriedades mecânicas do material.

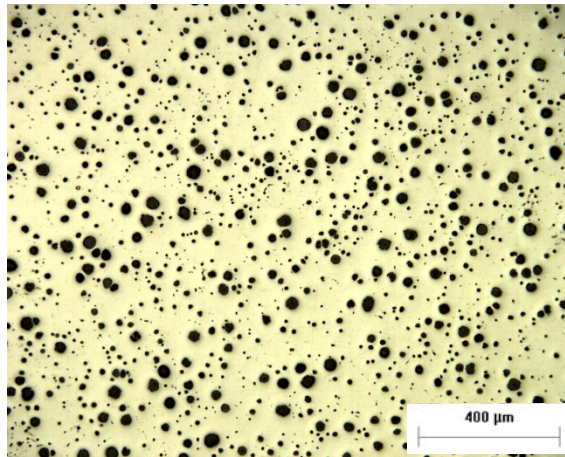


Figura 6. C-01 - Micrografia da liga com 0,294%Cu e 0,0184%Sb sem ataque e com aumento de 100x.

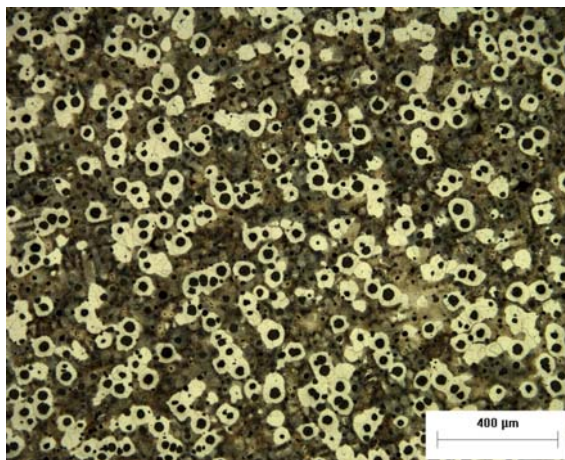


Figura 7. C-01 - Micrografia da liga com 0,294%Cu e 0,0184%Sb com ataque nital 3%, aumento de 100x.

As Figuras 8 e 9 mostram a liga com cobre intermediário e com baixo teor de antimônio onde com pequeno aumento de cobre na liga, se comparado a Figura 7, teve um acréscimo na perlita e conseqüentemente na redução da ferrita, que favorece o aumento da resistência mecânica do material.

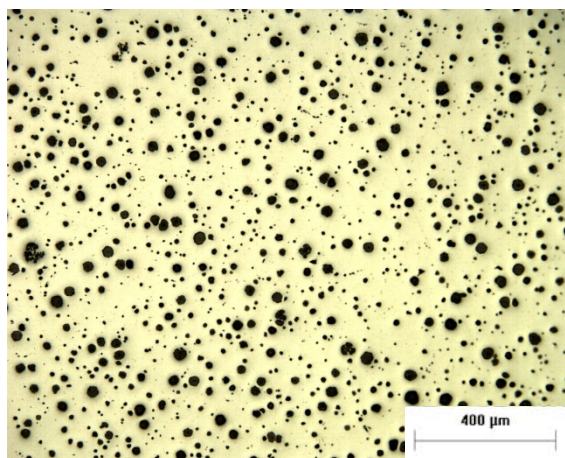


Figura 8. C-02 - Micrografia da liga com 0,534%Cu e 0,019% Sb sem ataque e com aumento de 100x.

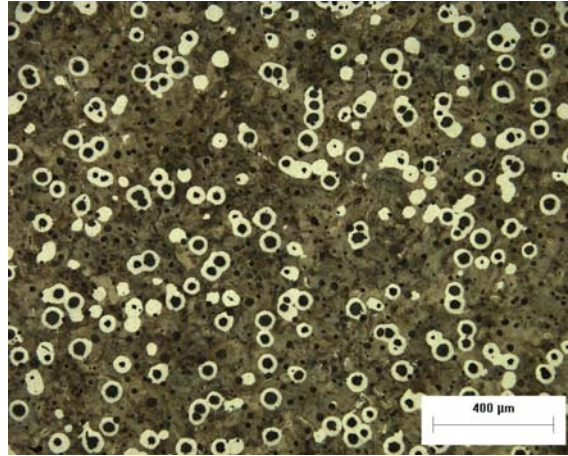


Figura 9. C-02 - Micrografia da liga com 0,534%Cu e 0,019%Sb com ataque nital 3%, aumento de 100x.

Semelhante ao teste C-02 (Figuras 8 e 9) é observado no teste C-03 (Figuras 10 e 11), porém com pequeno aumento na quantidade de ferrita podendo haver um decréscimo na resistência mecânica do material.

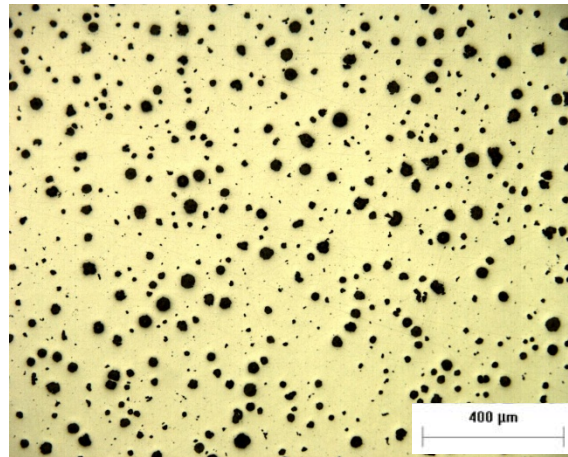


Figura 10. C-03 - Micrografia da liga com 0,298%Cu e 0,0366%Sb sem ataque e com aumento de 100x.

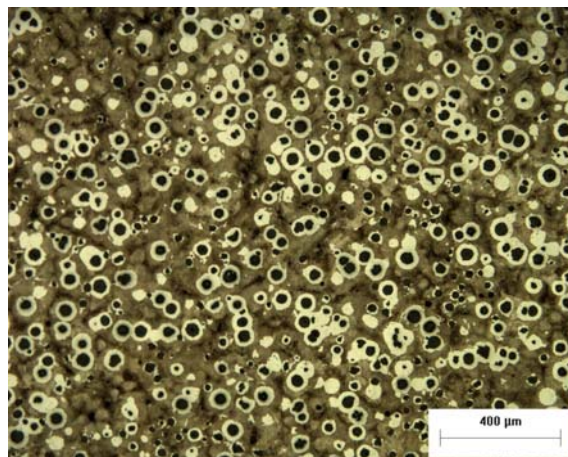


Figura 11. C-03 - Micrografia da liga com 0,298%Cu e 0,0366%Sb com ataque nital 3%, aumento de 100x.

As Figuras 12 e 13 mostram o último teste realizado utilizando teores nominais mais usuais de cobre e antimônio, até então utilizados separadamente, na produção de ferro fundido nodular perlítico. O que se pode observar é que com estes teores obteve-se maior quantidade de perlita do que os demais testes sem prejuízos a microestrutura do material.

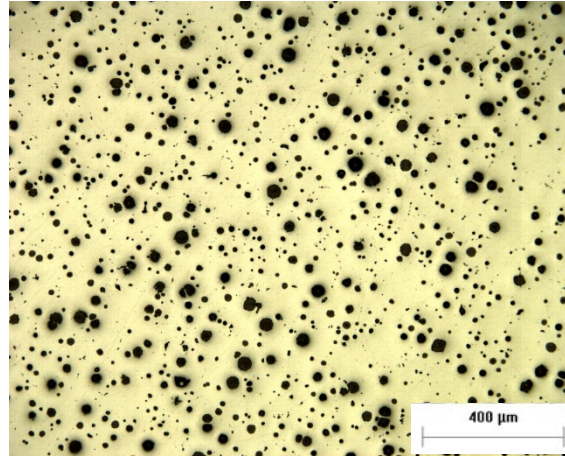


Figura 12. C-04 - Micrografia da liga com 0,624%Cu e 0,0461%Sb sem ataque e com aumento de 100x.

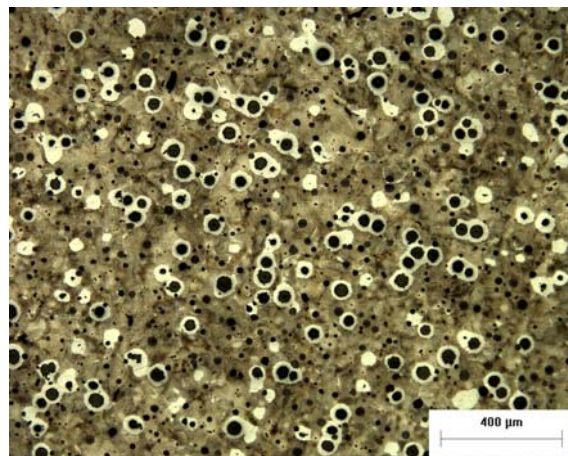


Figura 13. C-04 - Micrografia da liga com 0,624%Cu e 0,0461%Sb com ataque nital 3%, aumento de 100x.

3.2 Microestrutura

Nas Figuras 14 e 15 é representada a qualidade e quantidade de nódulos de grafita em 4 diferentes situações de adição combinada de antimônio e cobre comparando com a liga base. É observado que a quantidade de nódulos/mm² sofre uma pequena variação na amostra C-03, tendo em vista que dos testes realizados é a que apresenta o menor teor de carbono.

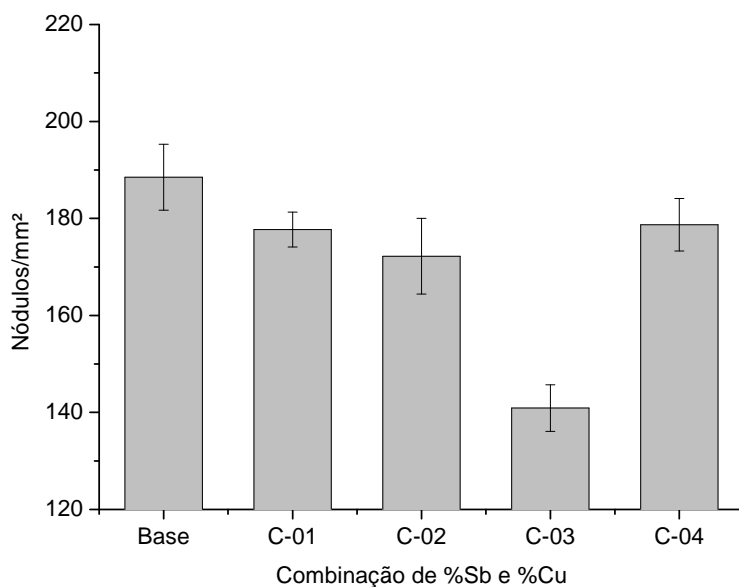


Figura 14. Gráfico representando a quantidade de nódulos por área após adição combinada de antimônio e cobre na liga.

O grau de nodularização (Figura 15), que demonstra a qualidade das grafitas, se mantém nas ligas com menor teor de antimônio com pouca ou sem influência de degeneração de grafita, porém nos teores seguintes esse percentual diminuiu em virtude da presença de algumas grafitas degeneradas.

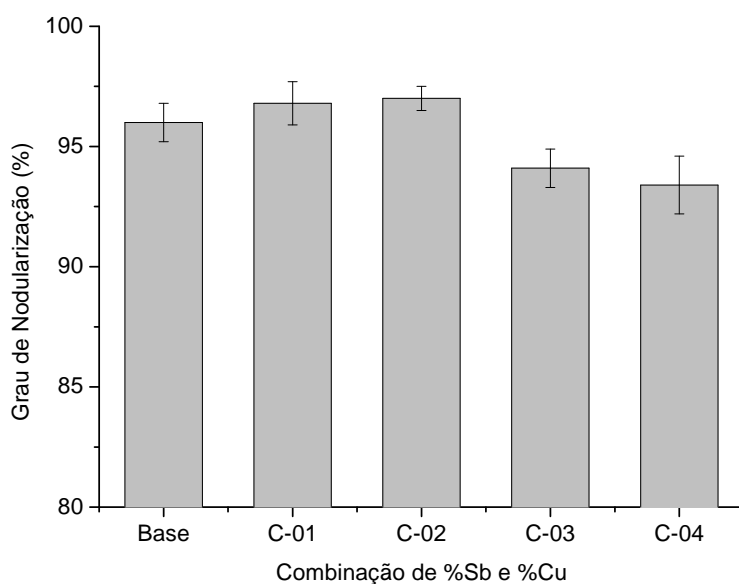


Figura 15. Gráfico representando o grau de nodularização após adição combinada de antimônio e cobre na liga.

Observando a influência da adição combinada de antimônio e cobre na formação de microconstituintes como perlita e ferrita se notam que o aumento da quantidade tanto de antimônio quanto de cobre sempre influencia no aumento da perlita, ou seja, um elemento não prejudica a ação do outro.

Analisando os valores adicionados de antimônio e cobre e relacionando com os percentuais de perlita atingidos (Figura 16), tem-se que o percentual em peso de aumento na composição química foi muito parecido para ambos elementos e com resultados semelhantes de quantidade de perlita.

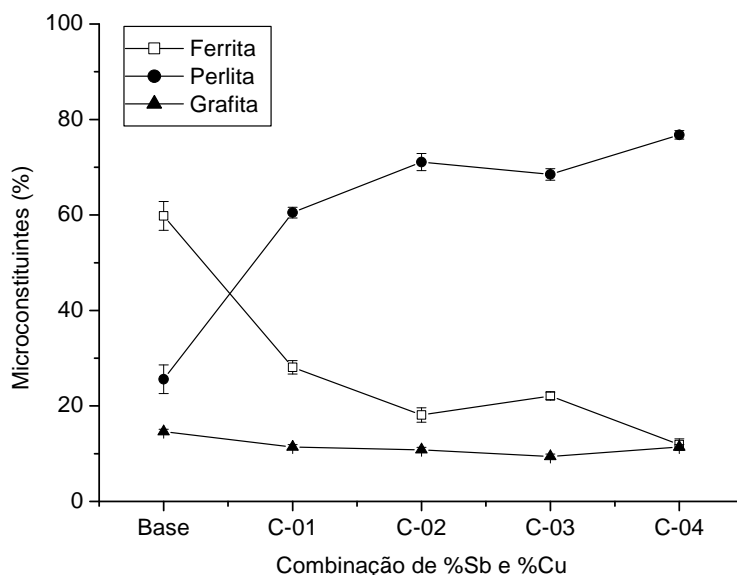


Figura 16. Gráfico representando os microconstituintes das amostras com adição combinada de antimônio e cobre.

3.3 Ensaio de Dureza Brinell

Na Figura 17 é observado o efeito da adição combinada de antimônio e cobre na dureza da liga, nota-se que o efeito do aumento do antimônio é mais representativo na dureza se comparado ao cobre devido aumentar a quantidade de perlita conforme Figura 16.

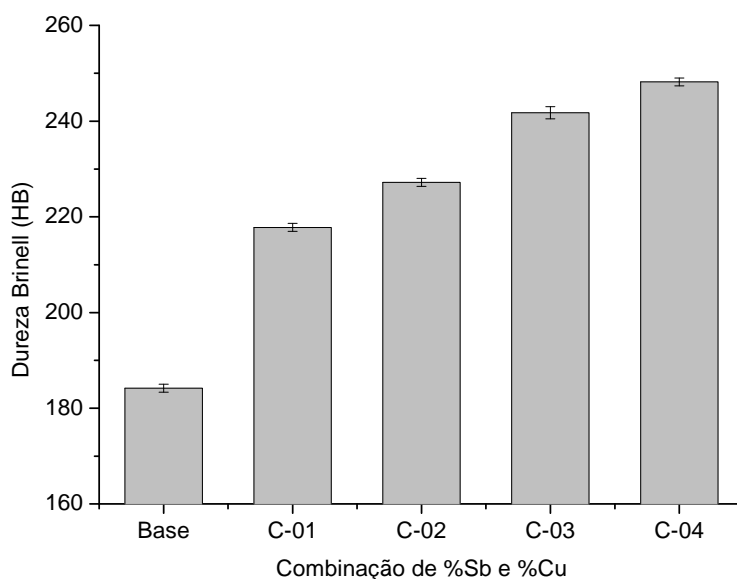


Figura 17. Gráfico do comportamento da dureza no material com adição de antimônio e cobre.

3.4 Ensaio de Resistência à Tração

A Figura 18 mostra os efeitos do antimônio e cobre na resistência a tração da liga, onde se obteve resultados de elevada resistência com adições de mínimas quantidades de cada elemento. Exceto na primeira adição, todas as demais alcançaram a classe ABNT NBR 6916/1981 FE7002,⁽⁷⁾ tanto nos ensaios de

resistência a tração, quanto no alongamento que se manteve constante em todos os testes com antimônio e cobre (Figura 19).

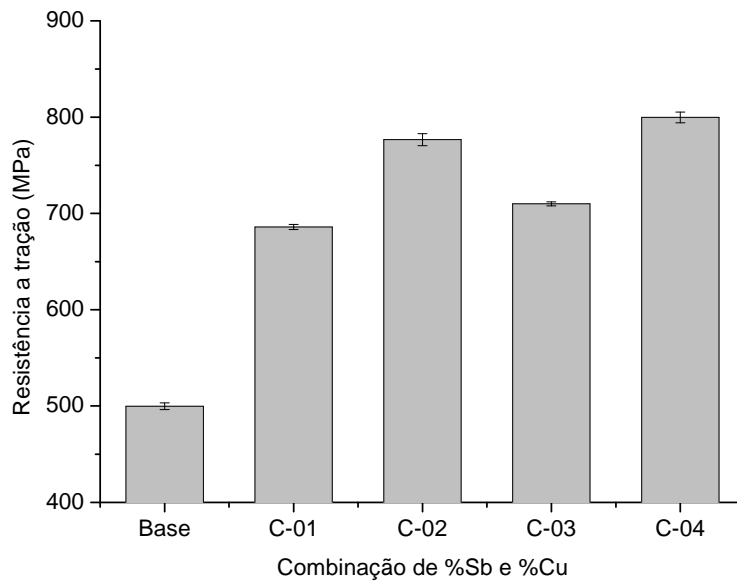


Figura 18. Gráfico do comportamento da resistência a tração no material mediante adição de antimônio e cobre.

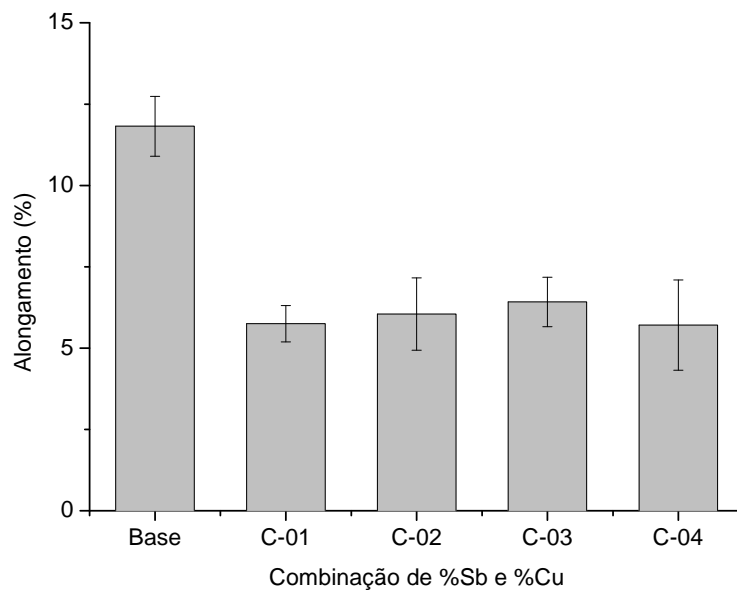


Figura 19. Gráfico do comportamento do alongamento no material mediante adição de antimônio e cobre.

3.5 Ensaio de Resistência ao Impacto Charpy

Em ferros fundidos nodulares o teor de silício tem uma considerável influencia na absorção de energia no ensaio de resistência ao impacto. Entre 2,1% e 2,7% de Si quanto maior o percentual, maior a quantidade de energia absorvida⁽⁹⁾. Isso explica a variação encontrada na Figura 20, onde na última amostra se observa o aumento da energia absorvida diretamente relacionada com o aumento do teor de silício da liga. Outro ponto a ser observado é que em nenhuma das amostras analisadas anteriormente, inclusive a amostra da liga base, foi observado uma energia absorvida como da amostra C-04 que ultrapassou os 5 J.

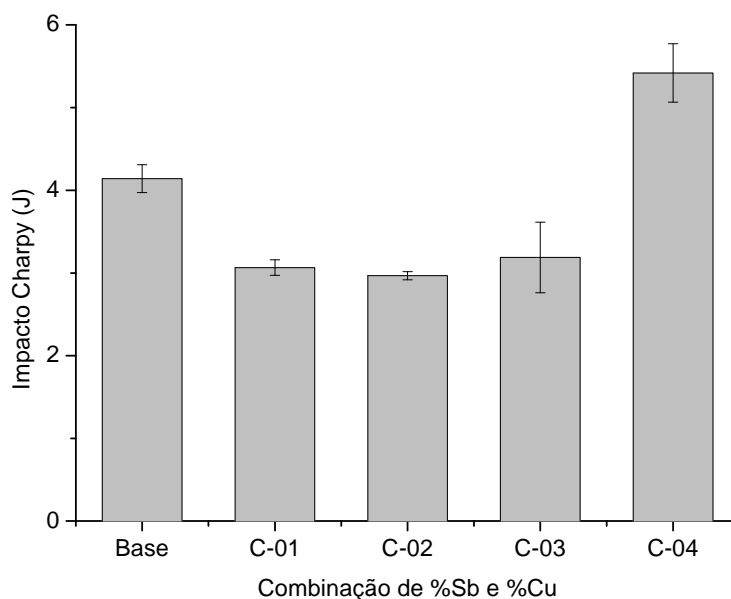


Figura 20. Gráfico do comportamento da resistência ao impacto no material mediante adição de antimônio e cobre.

3.6 Análise de Viabilidade Econômica

Um dos principais objetivos desta pesquisa foi viabilizar tecnicamente um elemento perlitizante que se trouxe uma redução no custo da peça fundida de alta resistência mecânica.

Para análise de comparação de custo foram utilizados valores sem incidência de impostos. Na comparação realizada foram relacionados custos informados por fornecedores da Whirlpool S.A. - Unidade Embraco Fundição. Para preservar os dados da empresa, as comparações serão apresentadas em percentual.

Através dos testes realizados e informações de teores ideais identificados por literaturas, foi definido que para atingir as propriedades mínimas exigidas pela Classe FE70002 segundo a norma ABNT NBR 6916⁽⁷⁾ é de aproximadamente 0,75% de cobre e de 0,05% de antimônio.

Para realizar os cálculos e comparar os valores foi encontrado a quantidade de elemento perlitizante necessário para cada kg de metal vazado e segundo esta comparação, aplicando os custos de cada material, o antimônio seria aproximadamente 81% mais barato se comparado ao cobre, porém com nenhum teor de antimônio atingiu-se os requisitos mínimos para uma Classe FE70002.⁽⁷⁾

Tabela 2. Definições para cálculo de redução de custo

Elemento	Faixa de Trabalho		% na Liga	kg Perlitizante /kg de metal
	Mín. (%)	Max. (%)		
Cobre	0,60	0,90	0,75	0,007895
Antimônio	0,04	0,06	0,05	0,000526

Na Tabela é observado o percentual de redução das combinações de antimônio e cobre se comparado a utilização apenas de cobre.

Tabela 3. Comparativo das combinações realizadas na pesquisa

Combinação	Elemento	% utilizado	kg Perlitizante /kg de metal	Redução de custo(%)*
C-01	Cobre	0,294	0,0031	53,6
	Antimônio	0,018	0,0002	
C-02	Cobre	0,534	0,0056	21,4
	Antimônio	0,019	0,0002	
C-03	Cobre	0,298	0,0031	46,0
	Antimônio	0,037	0,0004	
C-04	Cobre	0,624	0,0066	-1,1
	Antimônio	0,046	0,0005	

* % de redução comparado a utilização de cobre apenas.

4 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos através dos experimentos de adição de antimônio, cobre ou a combinação destes numa liga de ferro fundido nodular predominantemente ferrítica é retirado as seguintes conclusões:

- nas adições combinadas de antimônio e cobre, não foi observado degeneração de grafita considerável ou outro defeito que pudesse causar prejuízo à microestrutura da liga. Foi observado uma pequena redução no grau de nodularização nos testes com teores mais elevados de antimônio, porém não reduziram a resistência do material;
- a combinação de antimônio e cobre mostrou resultados positivos referentes a resistência a tração, sendo que dos quatro testes realizados apenas um, com os menores valores de antimônio e cobre não atenderam a classe ABNT NBR FE70002 que exige mínimo de 700 MPa de resistência a tração, onde ficou com aproximadamente 682 MPa, os demais testes tiveram valores superiores chegando próximos a 800 MPa de resistência a tração. Outro ponto positivo mostrado pela combinação de antimônio e cobre foi o alongamento da liga, onde a norma exige para uma classe FE70002, mínimo de 2% de alongamento e foi atingido aproximadamente 6% em todas as amostras;
- foi observado que as combinações podem ser realizadas a qualquer mistura de antimônio entre 0,020% a 0,045% com o cobre de 0,30% a 0,65%, sendo que os maiores valores de resistência mecânica encontrados foram com adições de 0,0461% Sb combinado com 0,624% Cu e a combinação economicamente viável na relação propriedades mecânicas e custo foi com 0,037% Sb combinado com 0,298% Cu; e
- com base nos resultados experimentais e na análise de viabilidade econômica realizada no item 3.6, conclui-se que para atingir a classe ABNT NBR FE70002⁽⁵⁾ a melhor opção de custo é utilizar a mistura de antimônio e cobre do que apenas cobre que é utilizando na maioria das fundições. A mistura que ocasionou o menor custo do material foi a utilização de 0,037% de Sb e 0,298% de Cu com uma redução estimada em 46% no custo do perlitzante. Mesmo se comparado esta condição ideal de mistura do antimônio e cobre com a adição mínima necessária de cobre para atender os requisitos da norma (0,60% Cu), ainda há uma redução em torno de 30% no custo do elemento perlitzante.

REFERÊNCIAS

- 1 PIESKE, A. E. A. Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade. 4^a. ed. Joinville: 1985.
- 2 MODERN CASTING. Stabilizing pearlite in gray cast iron, Novembro 2000.
- 3 BATES, C. E.; WALLACE, J. F. Trace elements in gray iron. AFS Transactions 75, 1966. 815-838.
- 4 FOUNDRYMEN'S GUIDE TO DUCTILE IRON MICROSTRUCTURE. Des Plaines, Illinois: 1984.
- 5 SOUZA SANTOS, A. B. Um processo de nodulização de ferros fundidos. Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 275. 1984.
- 6 PAN, E. N.; CHENG, C. Y. Effects of Bi and Sb on graphite structure of heavy section ductile cast iron. AFS Transactions, 1996.
- 7 ABNT NBR 6916. Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal. 1981.
- 8 ASTM. E23-05 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2005.
- 9 BRZOSTEK, J. A. Estuda e maximização da tenacidade em ferros fundidos nodulares ferríticos brutos de fundição. Florianópolis: UFSC, 2000.