

EFEITOS DO COBRE E ESTANHO NA MICROESTRUTURA E NAS PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO NODULAR¹

Valdir Friedemann²
Orlando Preti³
Kassim Shamil Fadhil Al-Rubaie⁴

Resumo

O objetivo de se estudar o efeito de adições individuais e combinadas de cobre e estanho é avaliar o efeito sinérgico e se o estanho com um percentual acima de 0,08% tende a reduzir as resistências a tração e impacto. Também é apresentada a influência das adições individuais e combinadas de cobre e estanho sob a microestrutura e propriedades do ferro fundido nodular, partindo de uma liga ferrítica (FE 42012). Usando-se um ferro fundido eutético com um percentual de 3,40% a 3,50% de carbono. Os resultados mostram que o cobre atinge uma resistência final maior, enquanto o estanho tem acima de 0,08% uma perda de resistência e uma grande queda no alongamento e resistência ao impacto. A combinação do cobre e estanho, apresenta uma tendência intermediária. Apesar de o estanho ser economicamente o mais viável, o seu efeito de segregação inviabiliza a obtenção de ferros fundidos brutos de fusão com uma alta resistência a tração, desta forma o uso combinado do estanho e cobre tem uma vantagem técnica e é economicamente mais atrativo com o uso isolado do cobre.

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

EFFECTS OF COPPER AND TIN AT THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF DUCTILE CAST IRON

Abstract

The purpose of studying the effect of individual and combined additions of copper and tin is to evaluate the synergistic effect and if the tin with a percentage above 0.08% tends to reduce the tensile strength and impact due to the segregation effect, while copper has an graphitizing effect. This paper presents the influence of individual and combined additions of copper and tin on the microstructure and properties of ductile iron, from a ferritic alloy (FE 42012). The analyzed additions have a equivalent of 0.2% to 1.6% in a eutectic cast iron with 3.40% to 3.50% carbon. The results show that copper reaches a higher strength, but with a higher cost, while tin up 0.08% causes a loss in strength and a big drop in elongation and impact resistance. The combination shows a middle tendency.

Key words: Ductile iron; Tin; Copper; Mechanical properties.

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

² Mestrando em Engenharia Mecânica, IST, Joinville, SC, Brasil, valdir.friedemann@tupy.com.br

³ Mestrado em Engenharia de Materiais, Professor, IST Joinville, SC, Brasil, preti@sociesc.org.br

⁴ Ph.D. em Engenharia Mecânica, Professor-Pesquisador, IST Joinville, SC, Brasil, kassim.alrubaie@sociesc.org.br

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, têm-se buscado insistentemente melhorias dos processos e procedimentos aplicados à indústria de fundição, aliando à crescente e exigente demanda por materiais com maior desempenho mecânico, por exemplo.

Diante destes desafios surge, cada vez mais, a necessidade de estudos relacionados à obtenção e ou maximização das propriedades mecânicas para atender a estas exigências. Algumas classes de ferro fundido nodular recebem determinadas porcentagens de elementos de liga além do carbono e silício a fim de aumentar determinadas propriedades, dependendo da aplicação da peças fundida. Dentre os vários elementos de liga estudados e aplicados na indústria de fundição, encontram-se os elementos de liga conhecidos como perlitizantes, que promovem a formação de perlita, atuando durante a solidificação no processo de difusão do carbono, assim garantindo uma resistência semelhante à de alguns tipos de aços, mas com um custo de produção menor.

Os elementos perlitizantes mais conhecidos da indústria de fundição são o cobre e o estanho, onde o estanho leva vantagem na utilização devido ao melhor custo-benefício, segundo Pieske⁽¹⁾. Esses elementos são mundialmente conhecidos, assim como seus efeitos benéficos e deletérios nos ferros fundidos.

O estanho, conforme descrito no Ductile Iron Data⁽²⁾ começa a interferir negativamente nas propriedades com aproximadamente 0,08% devido a segregação para o contorno de grão, enquanto o cobre, segundo Kanno⁽³⁾, é um elemento grafitizante e aumenta em 4,1°C a diferença entre as temperaturas do eutético estável e metaestável e tende a concentrar na austenita. Os dois elementos aumentam a dureza e a resistência ao escoamento.

Os elementos perlitizantes também têm uma influência diferenciada conforme Guesser⁽⁴⁾ e baseado nisso foi desenvolvida uma fórmula com o objetivo de tentar unificar as informações através de um valor único chamado de cobre equivalente, que é obtida da fórmula resumida: $\%Cu + 10 \times \%Sn + 0,5 \times \%Mn$ (1).

A fim de verificar e esclarecer as afirmações citadas, bem como avaliar o comportamento e eficiência destes elementos de liga sobre a estrutura da matriz e propriedades mecânicas do ferro fundido, desenvolveu-se este projeto de pesquisa.

Para avaliar a atuação destes elementos de liga, optou-se pela realização dos testes partindo de uma liga com matriz ferrítica, da classe ABNT 42012 da NBR 6916, 1981 (Norma de classificação dos ferros fundidos cinzentos e nodulares).

O objetivo é avaliar o comportamento sobre a micro estrutura e propriedades mecânicas de adições crescentes de cobre e estanho separados e em forma combinada, em um ferro fundido ferrítico com carbono de 3,40% a 3,50% e silício de 2,50% a 2,80%. As adições de cobre e estanho obedeceram um cobre equivalente (Cu_{eq}) comum para as três séries de ligas, buscando identificar teores que possam gerar alguma perda em propriedades mecânicas e formar uma relação entre o cobre equivalente e custo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução da parte experimental do presente trabalho, realizada na Fundição da EMBRACO em Joinville-SC, confeccionou-se machos para a obtenção de corpos de prova bloco “Y” 25 mm, conforme norma ASTM A-536 (especificação padrão para ferro fundidos nodulares), utilizando o processo de caixa fria.

A fusão foi efetuada em um forno a indução, com 4 toneladas de capacidade, trabalhando em média frequência e 3.000 KW de potência.

A carga do forno constituiu-se dos materiais citados na Tabela 1.

Tabela 1. Composição da carga metálica da fusão para obtenção dos corpos de prova

Sucata de aço (kg)	3.400
Gusa para ferro fundido nodular (kg)	500
Carburante (kg)	130

No procedimento de fusão, houve um superaquecimento do metal líquido a 1.550°C por 15 minutos, para uma total destruição dos núcleos existentes e posterior homogeneização do banho.

Para o vazamento dos corpos de prova trabalhou-se com duas placas, uma de transferência, na qual se pesou a quantidade de 30 kg de metal por placa com o auxílio de uma empilhadeira provida de balança e outra placa de nodularização, onde foram depositados os materiais utilizados no processo, isto é, ferro-silício-magnésio (1,8%) e inoculante de ferro-silício 75 (0,6%). A temperatura de vazamento foi na faixa de 1.400°C a 1.420°C.

A composição final de cada liga é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química das ligas estudadas

Ligas	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %	Sn %	Mg %	C _{eq} %	Cu _{eq} %
Liga Base	3,52	2,62	0,21	0,023	0,020	0,01	0,004	0,050	4,40	0,15
Sn 1	3,51	2,68	0,21	0,023	0,019	0,02	0,022	0,051	4,41	0,34
Sn 2	3,47	2,86	0,21	0,023	0,019	0,01	0,042	0,052	4,43	0,54
Sn 3	3,49	2,78	0,20	0,024	0,015	0,01	0,072	0,057	4,42	0,84
Sn 4	3,48	2,62	0,21	0,023	0,019	0,02	0,107	0,049	4,36	1,19
Sn 5	3,47	2,60	0,21	0,024	0,002	0,02	0,160	0,053	4,34	1,72
Cu 1	3,47	2,58	0,21	0,024	0,020	0,18	0,007	0,041	4,34	0,35
Cu 2	3,46	2,55	0,20	0,024	0,002	0,41	0,005	0,047	4,32	0,56
Cu 3	3,45	2,47	0,20	0,023	0,010	0,58	0,004	0,057	4,28	0,72
Cu 4	3,45	2,62	0,20	0,024	0,019	1,08	0,004	0,051	4,33	1,22
Cu 5	3,44	2,55	0,20	0,024	0,018	1,58	0,004	0,054	4,30	1,72
SnCu 1	3,45	2,72	0,20	0,024	0,022	0,15	0,013	0,049	4,36	0,38
SnCu 2	3,43	2,80	0,20	0,024	0,019	0,20	0,021	0,048	4,37	0,51
SnCu 3	3,42	2,56	0,21	0,024	0,020	0,38	0,039	0,052	4,28	0,86
SnCu 4	3,41	2,75	0,20	0,023	0,020	0,48	0,048	0,049	4,33	1,06
SnCu 5	3,40	2,34	0,20	0,022	0,018	0,72	0,074	0,040	4,19	1,56

Após a transferência e posterior término da reação procedia-se ao vazamento de 4 blocos “Y” correspondentes a cada liga.

Os blocos permaneceram no molde por 2,5 h até atingirem uma temperatura de 270°C, então foram desmoldados manualmente e armazenados para o posterior corte e usinagem dos corpos de prova para ensaios.

O ensaio de dureza Brinell foi realizado com o auxílio de um durômetro digital, da marca Encontest com esfera de 5 mm de diâmetro e 750 kg de carga, sendo feitas 9 impressões liga.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração com capacidade de 20 toneladas de força da marca EMIC, sendo usinados (Figura 1) três corpos de prova para cada liga.

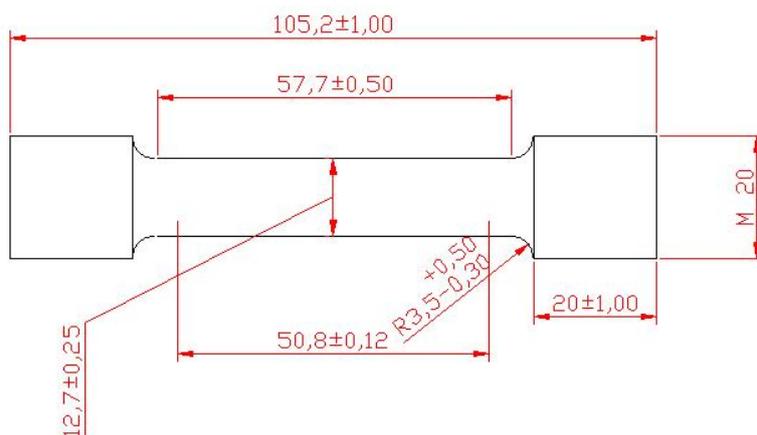


Figura 1. Corpo de prova padrão utilizado para determinação das propriedades mecânicas, segundo a norma ASTM A-536.

Para o ensaio Charpy foram usinados 6 corpos de prova (Figura 2), optando-se pelo uso do corpo de prova sem entalhe, por se tratar de um material frágil, e que conseqüentemente absorve pouca energia e dificultaria a leitura dos resultados.

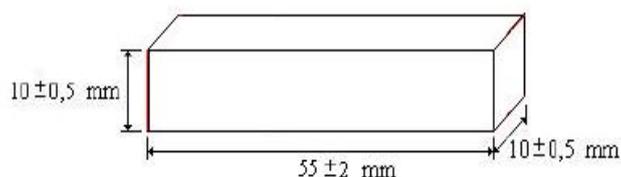


Figura 2. Corpo de prova padrão, sem entalhe utilizado para determinação da resistência ao impacto.

Para os ensaios metalográficos, as amostras foram preparadas seguindo o procedimento padrão de lixamento com posterior ataque de Nital a 4% e tempo necessário para revelação da microestrutura.

A metalografia foi realizada em um microscópio óptico da marca Olympus, com uma câmera acoplada que direciona a imagem para um programa de análise de imagens, (Image Pro Plus) no qual foram realizadas todas as análises de fases e contagem de nódulos, sendo feito uma média de 9 análises por liga e extraído um valor médio.

3 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos experimentos relacionados a análise metalográfica e propriedades mecânicas.

3.1 Micrografias

A Tabela 3 apresenta os valores da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy e o número de nódulos por milímetro quadrado, encontrados nas amostras.

Tabela 3. Número de nódulos e energia absorvida no ensaio de impacto Charpy sem entalhe

Liga	Base	Sn 1	Sn 2	Sn 3	Sn 4	Sn 5
Nº de nódulos/mm ²	336	295	295	350	293	312
Energia absorvida (J)	124	116	108	48	36	8
Liga	-	Cu 1	Cu 2	Cu 3	Cu 4	Cu 5
Nº de nódulos/mm ²	-	193	318	302	329	315
Energia absorvida (J)	-	140	121	59	54	52
Liga	-	SnCu 1	SnCu 2	SnCu 3	SnCu 4	SnCu 5
Nº de nódulos/mm ²	-	315	275	251	226	261
Energia absorvida (J)	-	158	139	52	25	10

A evolução do percentual de perlita para cada liga é apresentado na Figura 3.

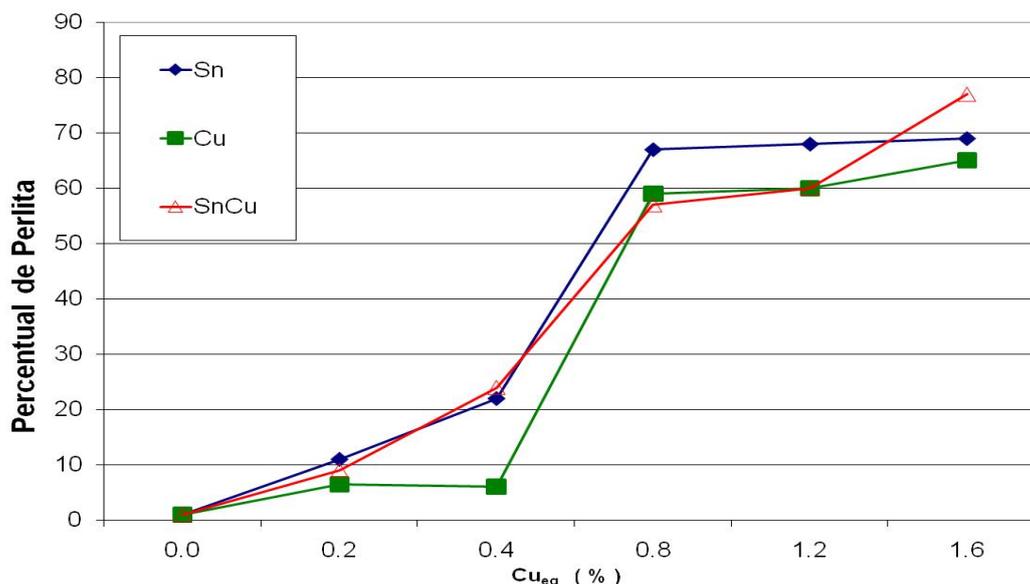


Figura 3. Gráfico comparativo de percentual de perlita para cada série de corpos de prova.

A seguir apresenta-se em forma de micrografias, a relação do perfil da quantidade de perlita e ferrita com teores crescentes de cobre, de estanho e de cobre mais estanho nas amostras.

As adições foram na liga cuja matriz inicial apresenta-se predominantemente ferrítica (Figura 4), fato que favorece o estudo para evidenciar aumento do percentual de perlita em função dos teores crescentes de cobre e estanho.

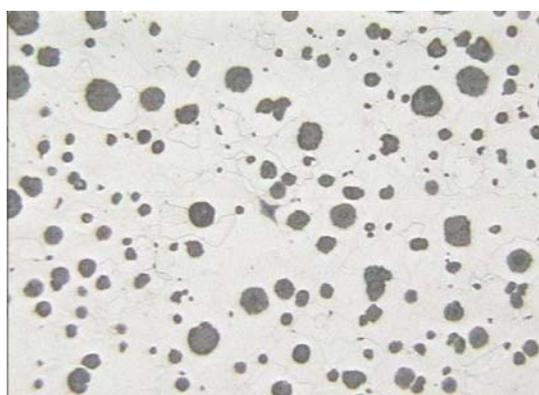


Figura 4. Micrografia da liga base, 100x, ataque Nital 4%.

Na sequência são apresentados os resultados micrográficos representativos a evolução do percentual de perlita para as ligas Sn, Cu e Cu_{eq} (Figuras 5 a 9).

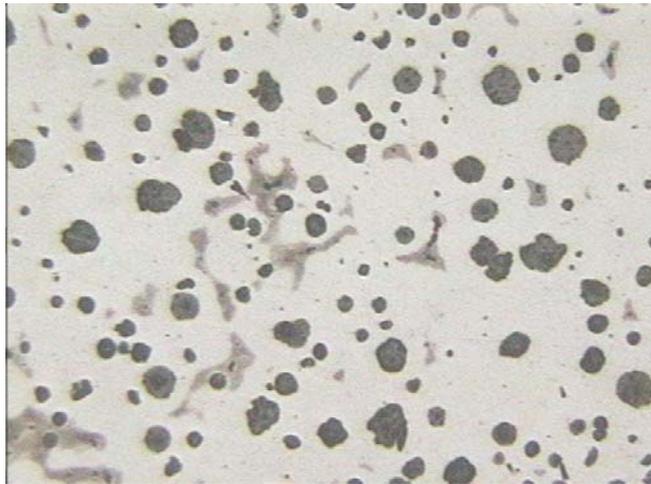


Figura 5. Micrografia 1, 100x, ataque Nital 4%.

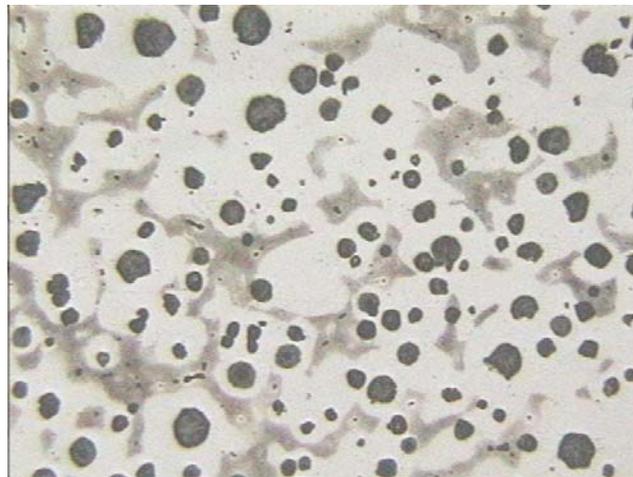


Figura 6. Micrografia 2, 100x, ataque Nital 4%.

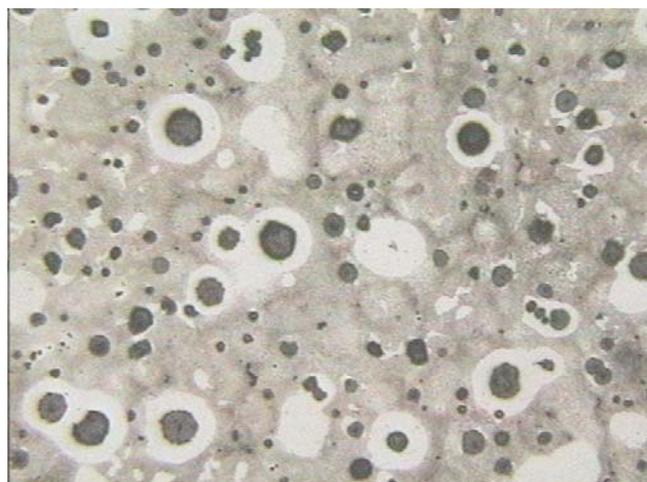


Figura 7. Micrografia 3, 100x, ataque Nital 4%.

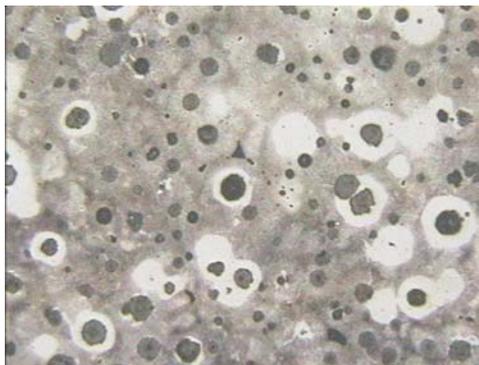


Figura 8. Micrografia 4, 100x de aumento, ataque Nital 4%.

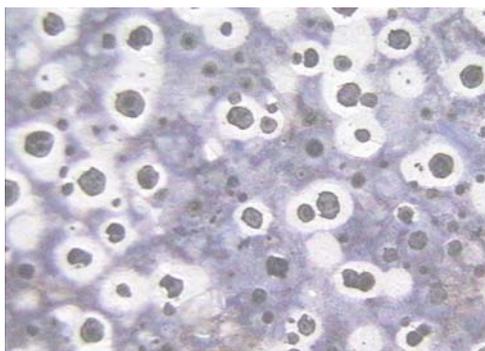


Figura 9. Micrografia 5, 100x, ataque Nital 4%.

3.2 Propriedades Mecânicas

Nas Figuras 10 a 12 apresenta-se graficamente a influência das adições individuais de cobre, estanho e da adição de cobre mais estanho sob as propriedades mecânicas das ligas estudadas.

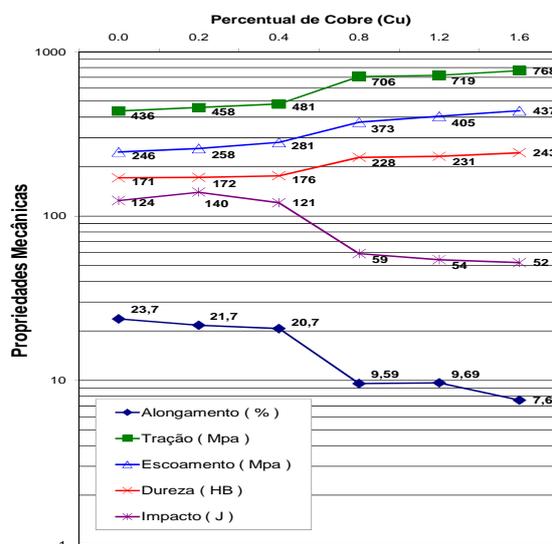


Figura 10. Influência do cobre nas propriedades mecânicas.

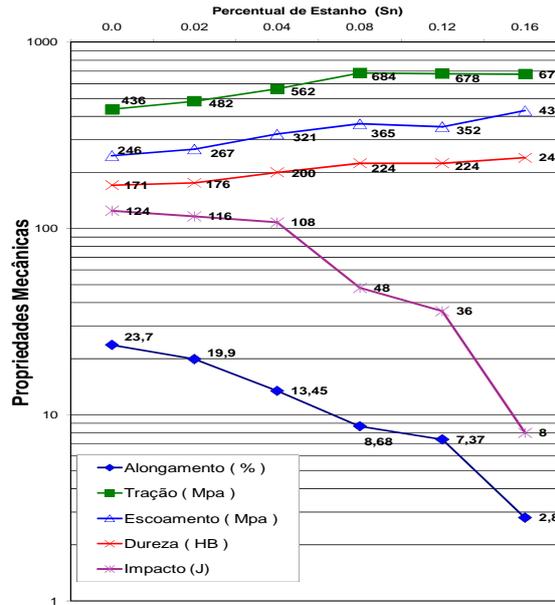


Figura 11. Influência do estanho nas propriedades mecânicas.

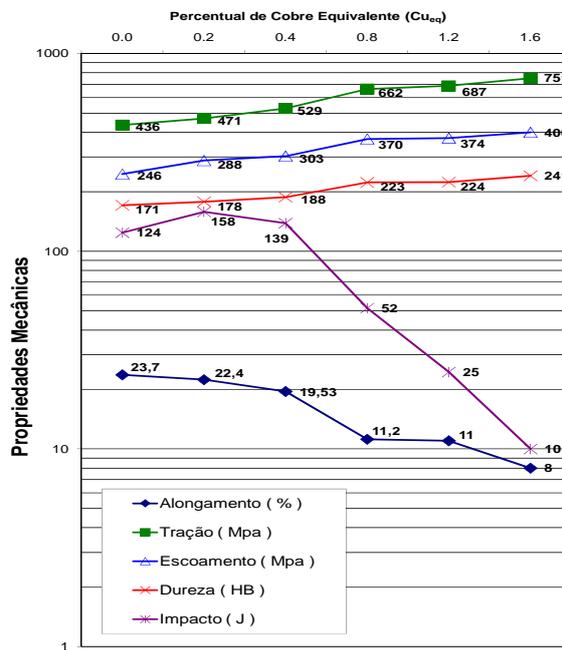


Figura 12. Influência do cobre combinado com o estanho nas propriedades mecânicas.

4 DISCUSSÃO

4.1 Ligas com Adição de Cobre

O diferencial entre as ligas Cu 3 e Cu 4 é que a liga Cu 3 apesar de ter um percentual menor de Si e um percentual maior de Mg (0,057%), o qual pode estar segregando para contorno de grão conforme evidenciado por Zhou Jiyang⁽⁵⁾ e assim fazendo que a liga Cu 3 tenha um menor alongamento, apesar de ter um percentual menor de cobre e um mesmo percentual de perlita.

Da liga com 0,4% para 0,8% temos um grande salto nas propriedades de tração e escoamento, mas perdendo muito na tenacidade e alongamento, isso relacionado com o aumento do percentual de perlita (Figuras 6 e 7).

O cobre é pior nos percentuais de até 0,4%, quando comparado ao estanho, isso porque o estanho mostrou-se um perlitzante mais poderoso que o cobre em todas ligas, e justificado no trabalho de Zhou Jiyang⁽⁵⁾ porque o estanho segrega no contorno das grafitas e impede a difusão do carbono e por isso é mais efetivo que o cobre. Essas diferenças no percentual de perlita podem ser observadas na Figura 3. O cobre tende a aumentar continuamente a tração, dureza e escoamento nos percentuais estudados, isso devido ao aumento da fase perlítica na matriz e o endurecimento da ferrita por solução sólida.

O alongamento e resistência ao impacto tendem a piorar devido aos mesmos motivos citados acima, mas se comparamos com as ligas de estanho o alongamento final ficou 63% maior, isto provavelmente devido a segregação para contorno de grão do estanho.

O cobre nas ligas a partir de 0,8% apresenta uma dureza maior, mesmo com um percentual menor de perlita, isto deve ser provavelmente devido a uma grande quantidade de átomos de cobre em solução sólida.

Acima de 0,8% de cobre o percentual de perlita manteve-se praticamente estável, o que quer dizer que o elemento já está saturado e não tem mais o efeito desejado, assim está sendo adicionado em excesso e ainda prejudicando as propriedades de alongamento.

O alto número de nódulos por mm² também foi um fator importante na presença de ferrita, até ligas com alto percentual de cobre e estanho. Um exemplo disso são as ligas com 0,2% e 0,4% de cobre, onde a com 0,4% de cobre tem um percentual menor de perlita, isso por ter 100 nódulos por mm² a mais que a liga com 0,2% de cobre. Assim podemos afirmar que o número de nódulos tem fundamental influência nas propriedades mecânicas e percentuais das fases presentes.

4.2 Ligas com Adição de Estanho

A liga Sn 3 tem um percentual menor de Si e Mg que a liga Sn4, isto pode justificar o menor escoamento, pois o Si aumenta o escoamento e reduz o alongamento por ficar em solução sólida, conforme já citado por C. Labrecque⁽⁶⁾.

A partir da tração máxima (liga Sn 3) já é evidenciado o efeito fragilizante do estanho em função de sua segregação para os contornos de grão. Mas acredita-se que esta foi atenuada devido a grande quantidade de nódulos por mm², o que distribui melhor a segregação.

O efeito fragilizante do estanho é bem mais visível no alongamento, principalmente se compararmos com as ligas de cobre e a combinação estanho mais cobre (Figuras 10 a 12).

Apesar de um ponto duvidoso na liga Sn 4 com relação ao escoamento, a tendência é um aumento constante no limite de escoamento, devido o aumento constante do estanho em solução sólida.

A tração tende a subir até um ponto máximo (0,08%) e cair por causa do efeito fragilizante do estanho.

Nas ligas de estanho o alongamento tem uma queda bem mais acentuada e contínua do que nas ligas de cobre e estanho mais cobre, devido ao seu efeito fragilizante por causa de sua segregação para o contorno de grão.

4.3 Ligas com Adição de cobre e Estanho

O alongamento desta liga de forma geral mostrou-se melhor que as ligas de cobre e estanho, que pode ser devido ao emprego em menores quantidades de ambos os elementos em relação a adições individuais, isto é, menos elementos em solução sólida, com isso temos as propriedades de resistência a tração e escoamento em linhas gerais com um comportamento intermediário, quando comparamos as adições individuais de cobre e estanho.

Em linhas gerais as ligas de estanho mais cobre tem um comportamento intermediário entra as ligas de estanho e cobre, com exceção da tração que a partir de 0,8% de Cu_{eq} fica melhor a que liga de estanho, isto porque não foi ultrapassado o limite de 0,08% de estanho, como nas ligas com adições individuais de estanho, isto provavelmente também devido ao uso de uma menor quantidade de elementos de liga, pois temos uma menor saturação da austenita quando falamos de cobre e uma menor segregação para os contornos de grão quando falamos do estanho.

O “aumento” de resistência ao impacto das ligas Cu 1 e SnCu 1 na verdade pode ser um efeito do volume de grafita, pois a liga base é a com maior área ocupada por grafitas (Tabela 3), o que acabada dando características mais frágeis a essas ligas e desta forma reduzindo a energia absorvida. As liga de SnCu 1 chega a ter 7 pontos percentuais a menos de área de grafita do que a liga base.

4.4 Análise de Custos

Em um breve comparativo relacionado aos custos de produção de ferro fundido nodular com adição de cobre, de estanho e cobre/estanho (Figura 13), nota-se uma diferença considerável, quando comparamos as ligas de estanho e cobre, o cobre aumenta até 13 pontos percentuais o custo das ligas com o Cu_{eq} mais elevado em relação as ligas de estanho. A combinação do cobre e estanho na liga mais cara, com 1,6% de Cu_{eq} aumenta 10% o custo da liga, o que é menos que os 16% das ligas Cu e mais do que os 3% das ligas Sn, mas como visto anteriormente, acima de 0,08% de estanho temos perdas de propriedades e conseqüentemente é necessário partir para o uso combinado.

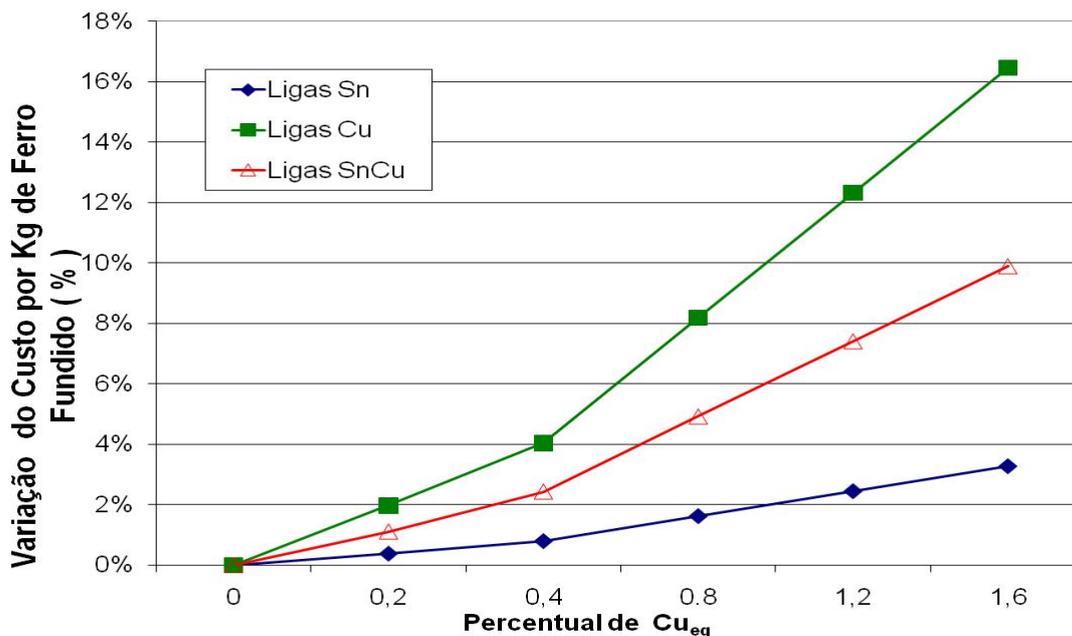


Figura 13. Aumento do custo por kg das ligas com diferentes adições.

5 CONCLUSÕES

Economicamente o estanho é vantajoso em todas as composições (Figura 13), mas acima de 0,08% começa a fragilizar o fundido, assim limitando seu uso. A composição de 0,08% de estanho pode ainda ser menor para o início da fragilização quando usado em conjunto com o manganês, por exemplo, pois são dois elementos que tendem a segregar para os contornos dos grãos, mas de uma forma geral o estanho não é recomendado em percentuais maiores que 0,08%.

Mas quando resistências maiores são requeridas a combinação SnCu mostra-se bem vantajosa pelo fato de ter um custo menor que o cobre e possuir propriedades similares.

Para resistências de até 700 MPa o Sn torna-se o elemento mais interessante, mas com uma perda acentuada na tenacidade e alongamento.

O cobre atingiu resistências finais mais altas (768 MPa) contra a combinação SnCu (751 MPa).

As ligas SnCu tem um comportamento bem similar as ligas de cobre, isto é, nas composições estudadas com exceção do alongamento as duas ligas podem ser consideradas com o mesmo desempenho.

REFERÊNCIAS

- 1 PIESKE, A. Ferros fundidos cinzentos de alta qualidade. **Sociedade educacional de Santa Catarina**, 4^a edição, 1985.
- 2 DUCTILE IRON DATA FOR DESIGN ENGINEERS. Section XII. Specifications Disponível em:< <http://www.ductile.org>> Acesso em: 25 ago 2005, 05:14:20.
- 3 Kanno, T ET.al. Effect of Alloying Elements on the Eutectic Temperatures in Cast Iron, **AFS Transactions**, 2005.
- 4 GUESSER,W.L. & HILÁRIO,D.G. Ferros fundidos nodulares perlíticos. **Trabalho apresentado na CONAF 99 – ABIFA**, São Paulo, out 1999. 1
- 5 JIYANG, ZHOU. Colour Metallography of Cast Iron. China Foundry. Volume 6, número 4. 2009.
- 6 LABRECQUE,C. & GAGNÉ, M. Review ductile iron:fifty years of continuous development. **Canadian metallurgical quarterly**, vol. 37, n° 5, pp.343-378, 1998. Canadian institute of mining and metallurgy. Published by Elsevier Science Ltd. Printed in Great Britain.

BIBLIOGRAFIA

- 1 BERTOLI,C. & RÖHRING,K. Seleção e efeitos gerais de elementos de liga em ferros cinzentos e nodulares. **Informativo 29 CIF, revista fundição e serviço**, março 1981.
- 2 BCIRA, Broadsheet 211-8. Effects of tin in nodular (SG) iron.
- 3 DUCTILE IRON HANDBOOK. **American Foundrymens Society**, a Inc. Copyright 1992, revised in 1993. reprinted 1999
- 4 GUESSER,W.L. Análise comparativa entre processos de nodulização. **Seminário “Inoculação e nodulização de ferros fundidos”**. São Paulo, setembro 1990.
- 5 GUESSER,W.L. & HILÁRIO,D.G. A produção dos ferros fundidos nodulares perlíticos. **Revista fundição e serviços**, novembro 2000.
- 6 HASSE,S. & RÖHRING,K. Como obter ferros fundidos nodulares de alta resistência. **Revista fundição e serviços**, agosto 2000.
- 7 LOPER JR.,C.R. Como os inoculantes atuam sobre a microestrutura dos ferros fundidos. **Revista fundição e serviços**, março 1998.
- 8 NASCIMENTO,D. & WARMLING,G. Apostila de ferros fundidos. Sociedade educacional de Santa Catarina. **Escola técnica Tupy**. Departamento de materiais. Joinville, fevereiro 1998.
- 9 SKALAND, T. Developments in cast iron metallurgical treatments, **Elkem ASA**, research, Kristiansand, Norway.
- 10 SOUZA SANTOS, A.B. Efeitos da composição química na produção de ferros fundidos nodulares. **Trabalho apresentado no 55° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM**. Junho 2000 – Rio de Janeiro.
- 11 SOUZA SANTOS,A.B. & CASTELLO BRANCO,C.H. Metalurgia dos ferros fundidos cinzento e nodulares. São Paulo, **IPT**, 1977. 241p. (Publicação IPT n° 1100)