

AValiação DO ÍNDICE ERICHSEN EM LIGAS DE COBRE, LATÃO E BRONZE

Leandro de Almeida, lealmeida@paranapanema.com.br¹

Gustavo Tressia de Andrade, gustavo.tressia@paranapanema.com.br¹

Victor Caso Moreira, victor.moreira@paranapanema.com.br¹

Ronaldo Ferreira da Silva, ronaldo.silva@paranapanema.com.br¹

¹PARANAPANEMA S.A., Rua: Felipe Camarão, Nº 500, Utinga, Santo André – SP.

Resumo: O cobre e suas ligas apresentam excelentes características para fabricação de peças por meio do processo de estampagem, sendo essas amplamente utilizadas em aplicações que necessitam de alta condutividade elétrica como por exemplo conectores e terminais elétricos, cabos corrugados para guias de onda, casquilhos de lâmpadas entre outras. Adições de zinco e estanho no cobre são efetuadas com o intuito de aumentar a resistência mecânica e consecutivamente a ductilidade, possibilitando maiores deformações para o processo de estampagem profunda. O ensaio Erichsen é um dos métodos mais utilizados para avaliação da estampabilidade dos materiais. Neste trabalho objetiva-se avaliar a influência dos teores de zinco e estanho na estampabilidade de ligas de cobre, latão e bronze em função da espessura e do tamanho de grão das chapas. A estampabilidade será avaliada através dos índices Erichsen obtidos. Conclui-se que com a faixa ideal de trabalho para o teor de zinco é 30% a 37% e para o estanho é de 4,8% a 6,95%, obtendo assim uma melhor combinação de limite de resistência a tração e índice Erichsen.

Palavras-chave: cobre, latão, bronze, estampabilidade, Erichsen

1. INTRODUÇÃO

O ensaio de embutimento, conhecido como Erichsen, foi desenvolvido pelo engenheiro Alemão Abraham M. Erichsen em meados de 1910 e patentado em 1913 (Erichsen, 2016), desde então vindo sendo utilizado para avaliação da estampabilidade de chapas planas produzidas pelas Usinas de metais ferrosos e não ferrosos, visto que sua rapidez e simplicidade operacional possibilitam obter boa reprodutibilidade e pouca ou quase nenhuma influência do analista nos valores médios detectados (Usiminas, 1999). O ensaio Erichsen é um dos únicos ensaios de embutimento padronizado segundo as normas ABNT, ASTM e ISO. O ensaio consiste em conformar uma amostra lubrificada pela movimentação do punção de baixo para cima através do anel de fixação e da matriz superior, dando forma à calota produzida no ensaio, obtendo-se desta forma o índice Erichsen que é a altura alcançada pela chapa após o processo de conformação e consecutivamente seu rompimento, conforme apresentado na Fig. (1).

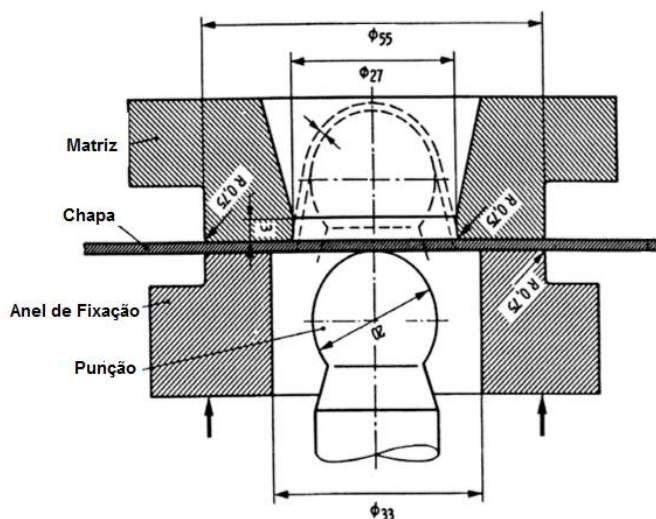


Figura 1. Ensaio Erichsen, demonstração da formação da calota (adaptado de GAVRUS et al. 2010).

O principal objetivo do ensaio é detectar a altura deformada, caracterizada como ductilidade, sendo mais dúctil o material que apresenta maior índice e consecutivamente possuirá maior estampabilidade em condições de tensão biaxial no plano, porém, o ensaio também é utilizado para verificar a rugosidade superficial do material após a conformação em

função do tamanho de grão obtido para a chapa, sendo mais rugosa a superfície do material quanto maior for o tamanho de grão obtido (Souza, 1982).

Algumas características do material e do ensaio influenciam nos índices obtidos, desta forma torna-se importante a análise de algumas variáveis antes mesmo da realização dos ensaios, sendo a avaliação da espessura, coeficiente de encruamento n , tamanho de grão e índice de anisotropia r .

Assim como a maioria dos materiais, as ligas de cobre possuem características específicas em função de sua composição química. A condutividade elétrica, principal característica das ligas de cobre é influenciada pelo teor de zinco contido na liga, conforme demonstrado na Fig. (2), bem como as propriedades mecânicas e consecutivamente a estampabilidade dessas ligas.

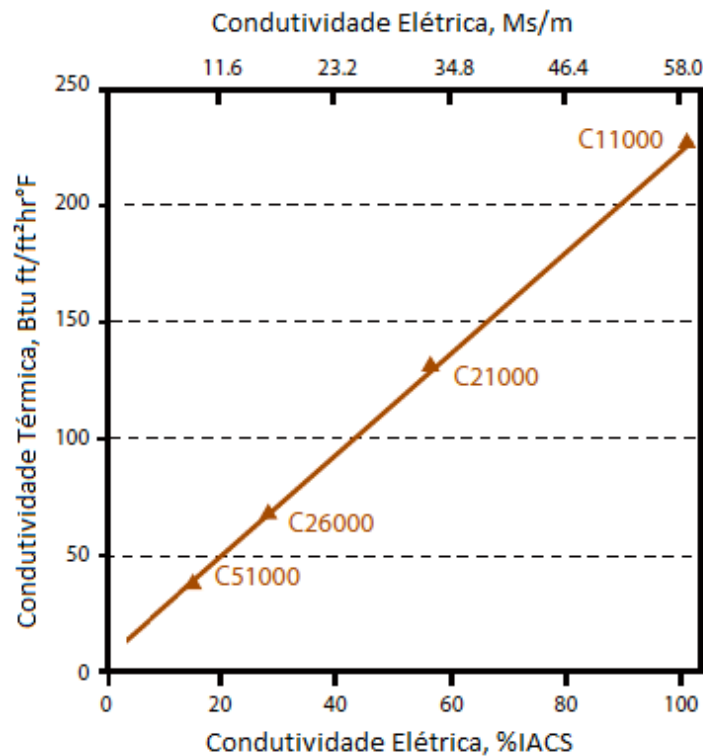


Figura 2. Condutividade elétrica em função da liga (adaptado de Borough, 1961).

Tiras e chapas de cobre, com no mínimo 99,90% deste elemento, são produzidas em conformidade com a norma ASTM B-152, utilizadas na fabricação de conectores elétricos, blindagem de cabos e transformadores, cabos guia de onda e componente de radiadores. As ligas contendo cobre e zinco são denominadas como latão e a norma que rege as suas características para a fabricação de tiras e chapas é a ASTM B-36. Os bronzes fósforosos são ligas que contêm cobre, estanho e pequenas porcentagens de fósforo e zinco, inferiores a 0,35%, são produzidas em conformidade com a norma ASTM B-103 e a adição de estanho no cobre aumenta significativamente a resistência mecânica e a resistência à corrosão. Assim como os latões, os bronzes apresentam baixa condutividade elétrica quando comparados com as ligas que contêm apenas cobre. As principais aplicações do latão são para fabricação de projéteis, casquilho de lampadas, peças automotivas e componentes da indústria elétrica. Já as ligas de bronze são utilizadas na fabricação de conectores elétricos que necessitam de alta vida à fadiga, instrumentos musicais e ornamentos decorativos. As ligas de cobre UNS C11000 e UNS C14400, as ligas de latão UNS C22000, UNS C26000, UNS C26800, UNS C27200, UNS C28000 e as ligas de bronze UNS C51000, UNS C51100, UNS C51900, UNS C52100 são estudadas no presente trabalho visando avaliar a influência dos teores de zinco e estanho contidos em ligas de cobre com relação aos índices Erichsen e as propriedades mecânicas alcançadas.

Assim como a maioria dos materiais ferrosos e não ferrosos as impurezas presentes nas ligas de cobre prejudicam algumas propriedades e consecutivamente etapas do processo de produção, como por exemplo o tratamento térmico, afetando a temperatura de recristalização. Davis (2001) apresenta em seu trabalho a influência de impurezas na temperatura de recristalização, ou seja, impurezas como As, Ag, Sn, Cr, Fe, Zn e Ni influenciam no aumento da temperatura de recristalização das ligas de cobre, desta forma torna-se necessário ajustes nas temperaturas utilizadas nos processos de fabricação dos materiais. A condutividade elétrica também é influenciada pela presença destas impurezas, com exceção da Ag, apresentando uma redução de seu valor, conforme exposto na Fig. (3).

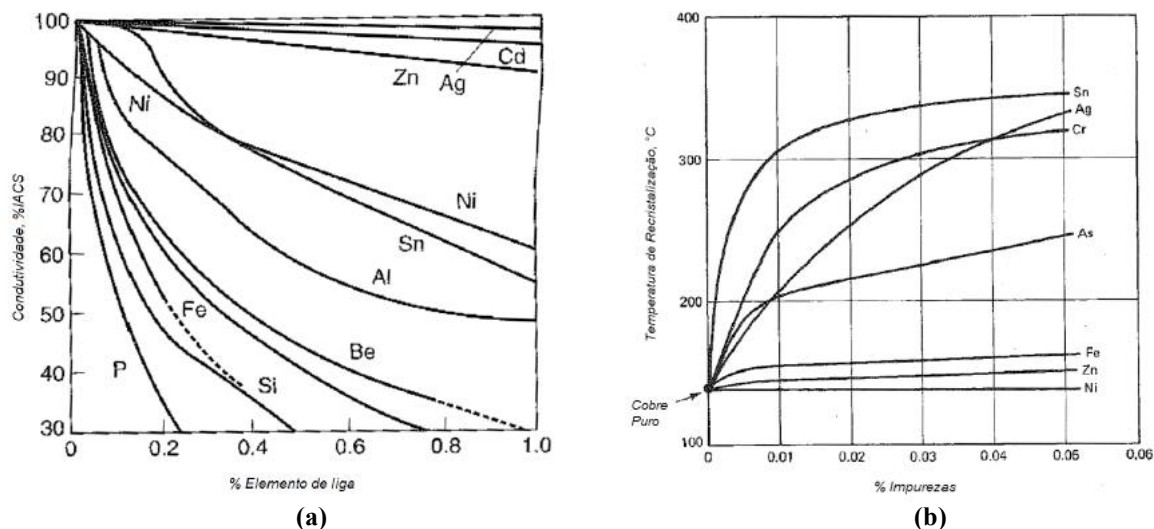


Figura 3. Influência de impurezas no cobre puro na: (a) condutividade elétrica do cobre puro (b) temperatura de recristalização (adaptado de Davis 2001).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As produções dos materiais foram divididas em duas etapas. A primeira etapa de fabricação das ligas de cobre e latão foi realizadas industrialmente por meio da fusão das placas e posterior laminação a quente seguido de fresamento superficial com remoção de aproximadamente 1,0 mm da camada superficial oxidada.

Para as amostras de bronze a primeira etapa foi realizada industrialmente por meio do processo de fundição contínua com posterior fresamento de aproximadamente 1,0 mm.

Durante o processo de fusão das placas e bobinas, retirou-se amostras para análise de composição química antes do vazamento do metal líquido na lingoteira e no molde. Posteriormente as amostras foram então usinadas em torno horizontal para remoção do óxido proveniente da solidificação do metal e por fim, com o espectrômetro de raio-x realizou-se a análise de composição química dos materiais.

Após o fresamento, para todas ligas iniciou-se o processo de laminação a frio impondo uma redução de espessura de 86%, até uma espessura de 2,0 mm, sendo por fim recozidas em forno estático objetivando-se tamanho de grão de 45 μm . Para cada liga adotou-se uma temperatura de recozimento, visto que cada liga possui características distintas, como temperatura de fusão e consecutivamente temperatura de recristalização. A segunda etapa foi conduzida em escala laboratorial, ou seja, utilizou-se um laminador a frio tipo de “ourives” impondo uma redução total de espessura de 50% nas amostras, laminando placas de 100x2 mm para 104x1 mm em 6 passes com redução de 10% entre os passes em função da capacidade de redução do laminador utilizado. O recozimento foi efetuado no forno tipo mufla com diferentes temperaturas, conforme Tab. (1), devido às ligas utilizadas objetivando sempre tamanho de grão de 30 μm .

Tabela 1. Temperaturas utilizadas nos tratamentos térmicos.

Liga	Temperatura	Tempo
UNS C11000	490°C	3 Horas
UNS C22000, UNS C51000, UNS C51900 e UNS C52100	540°C	3 Horas
UNS C26000	530°C	3 Horas
UNS C26800	525°C	3 Horas
UNS C27200	525°C	3 Horas
UNS C14400 e UNS C28000	505°C	3 Horas

Após os recozimentos as amostras foram submetidas a uma limpeza superficial em uma solução contendo 12% de H_2SO_4 para posterior realização dos ensaios de tamanho de grão, propriedades mecânicas e levantamento do índice Erichsen (I.E.). A análise do tamanho de grão foi efetuada de acordo com a metodologia proposta pela norma ASTM E-112, denominado como método comparativo. As amostras foram cortadas no sentido de laminação e de superfície conforme a Fig. (4). Posteriormente realizou-se lixamento variando de #120 a #1000. O polimento posterior ao lixamento foi executado com pasta de diamante de 9 a 1 μm . Para revelação da microestrutura foi realizado ataque químico das amostras com trióxido de cromo por 5 segundos.

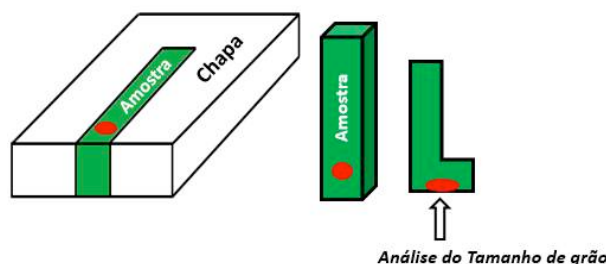


Figura 4. Esquema de retirada de amostra para análise de tamanho de grão.

Os ensaios de propriedades mecânicas foram efetuados de acordo com a norma ASTM E-8 e os corpos de prova foram fabricados pelo processo de fresamento. Foram então realizados ensaios em máquina de tração com velocidade inicial de 3 mm/min até que seja atingido a tensão de 8 MPa, 8 mm/min até que se atinja a deformação de 0,02%, 15 m/min até que se seja removido o extensômetro e 30 m/min até o final do ensaio.

As amostras de 90x90 mm utilizadas para a obtenção dos índices Erichsen, foram lubrificadas com vaselina industrial sólida, e ensaiadas na máquina Erichsen. Os parâmetros utilizados nos ensaios foram: velocidade de 4 mm/min e força da prensa fitas de 2,4 KN.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As composições químicas dos materiais analisados no presente estudo são demonstradas nas Tab. (2), Tab. (3) e Tab. (4), sendo divididos respectivamente pelas ligas de cobre, latões (Cu + Zn) e bronzes (Cu + Sn). As somatórias de impurezas das ligas de cobre são compostas por P, O₂ e Ni, já a somatória de impurezas das ligas de latão são compostas por Cd, Cr, Sn e P. A norma ASTM B-103 pertinente à fabricação de bronzes fosforosos especifica uma quantidade de impureza para um número maior de elementos químicos, portanto, a Tab. (4) contém todos os elementos especificados pela norma e analisados no presente estudo.

Tabela 2. Composição química das amostras de cobre.

Liga	% Cobre (Cu)	% Zinco (Zn)	% Ferro (Fe)	% Chumbo (Pb)	% Estanho (Sn)	% Σ Impurezas
UNS C11000	99,96	0,0147	0,0021	0,0045	0,004	0,014
UNS C14400	99,71	0,0600	0,0100	0,0100	0,1232	0,0790

Tabela 3. Composição química das amostras de latão.

Liga	% Cobre (Cu)	% Zinco (Zn)	% Ferro (Fe)	% Chumbo (Pb)	% Σ Impurezas
UNS C22000	89,67	10,318	0,0024	0	0,010
UNS C26800	69,11	30,860	0,0071	0,0022	0,021
UNS C26000	66,22	33,750	0,0067	0,0034	0,020
UNS C27200	63,16	36,807	0,0089	0,0013	0,022
UNS C28000	59,45	40,509	0,0073	0,0028	0,030

Tabela 4. Composição química das amostras de bronze.

Liga	% Cobre (Cu)	% Estanho (Sn)	% Zinco (Zn)	% Ferro (Fe)	% Chumbo (Pb)	% Níquel (Ni)	% Fósforo (P)	% Cromo (Cr)
UNS C51000	95,05	4,6716	0,1379	0,0021	0	0,0041	0,1261	0,0024
UNS C51900	92,91	6,862	0,1219	0,0106	0	0	0,0895	0
UNS C52100	92,32	7,414	0,1325	0,0034	0	0	0,1274	0,002

O grau de impureza detectado na liga UNS C11000 deve ser considerado baixo, visto que a norma ASTM B-152 especifica para o cobre mínimo de 99,90% e detectou-se 99,96%, sendo a maior impureza detectada o teor de zinco com

0,0147%, a qual exerce pouca influência sobre a temperatura de recristalização e na condutividade elétrica conforme demonstrado por Davis (2001) na Fig. (3). A liga UNS C14400 apresentou uma quantidade de impureza superior, porém, sua aplicação industrial e comercial não objetiva-se condutividade elétrica, portanto, a impureza presente não terá influência significativa. As ligas de latão e bronze apresentaram impurezas consideradas baixas, sem exercer influência maior que o soluto zinco e estanho nas ligas.

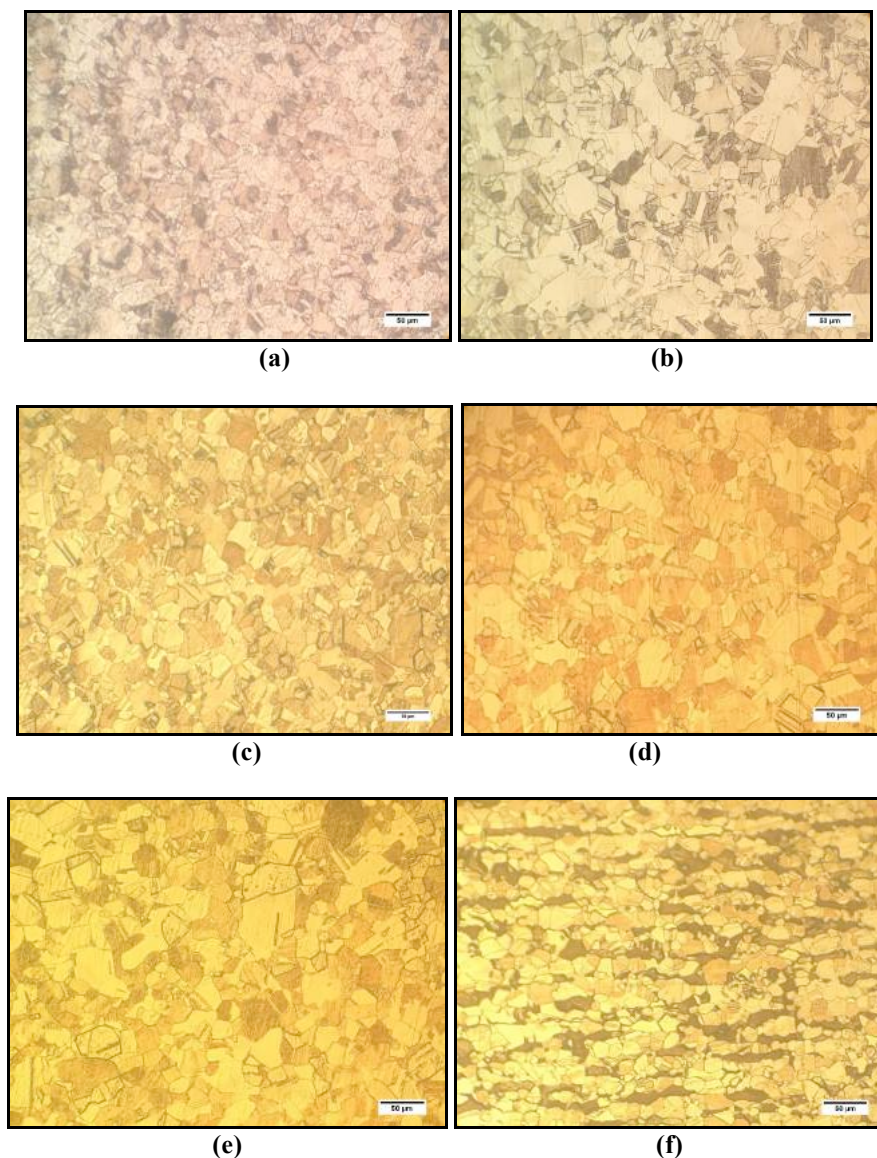


Figura 5. Microestrutura das ligas de cobre e latão analisadas (a) UNS C11000, (b) UNS C22000, (c) UNS C26000, (d) UNS C26800, (e) UNS C27200 e (f) UNS C28000.

Os tamanhos de grão das amostras foram determinados por meio do método comparativo, ou seja, as microestruturas são avaliadas comparando-se com uma imagem padrão que a norma disponibiliza permitindo obter um tamanho grão médio, sendo este detectado para todas as amostras do presente estudo 30 µm (0,030 mm) na média.

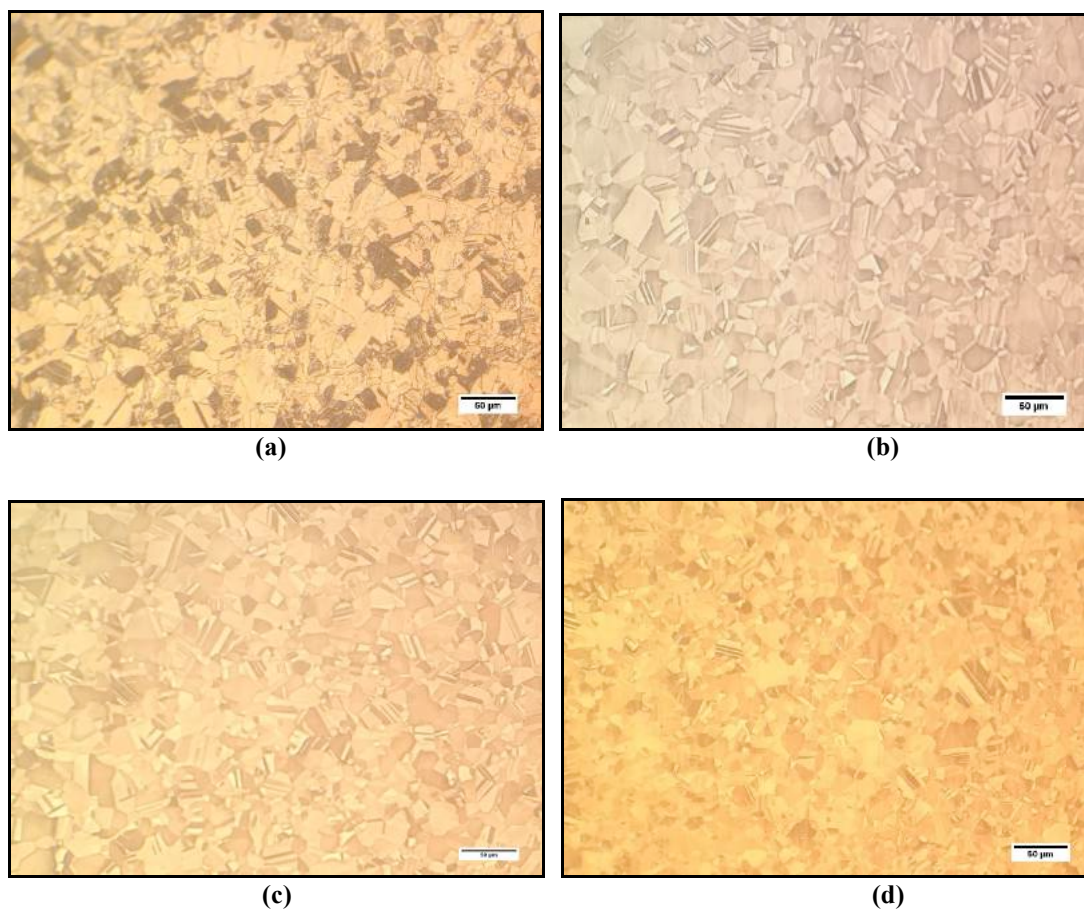


Figura 6. Microestrutura das ligas de cobre e bronze analisadas (a) UNS C14400, (b) UNS C51000, (c) UNS C51900 e (d) UNS C52100.

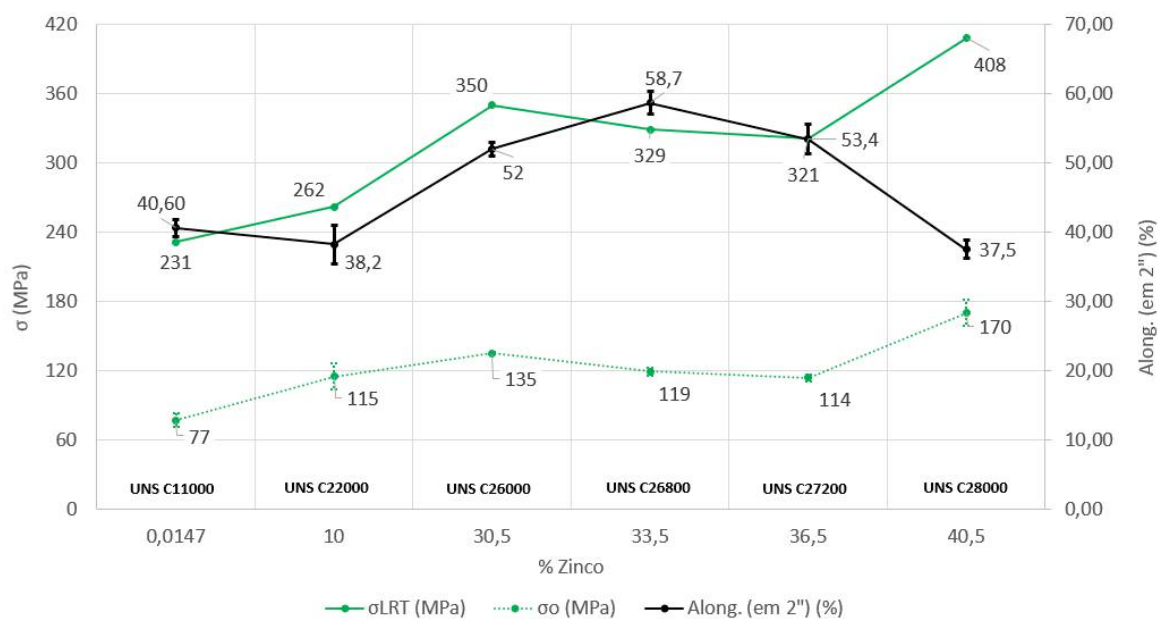


Figura 7. Propriedades mecânicas das ligas de cobre e latão.

O aumento do teor zinco (soluto) contido nas ligas aumentou significativamente o limite de resistência à tração e o limite de escoamento. Dentre as ligas de latão, a UNS C26000 foi a que apresentou melhor combinação de limite de resistência à tração e alongamento. As ligas UNS C26000, UNS C26800 e UNS C27200 apresentaram uma pequena

diferença entre os limites de resistência a tração detectados, 8% entre as ligas UNS C26000 e UNS C27200 e 6% entre as ligas UNS C26000 e UNS C26800.

A liga UNS C28000 foi o latão que apresentou maior limite de resistência à tração em função do percentual de zinco contida na liga e consecutivamente da presença da fase β' .

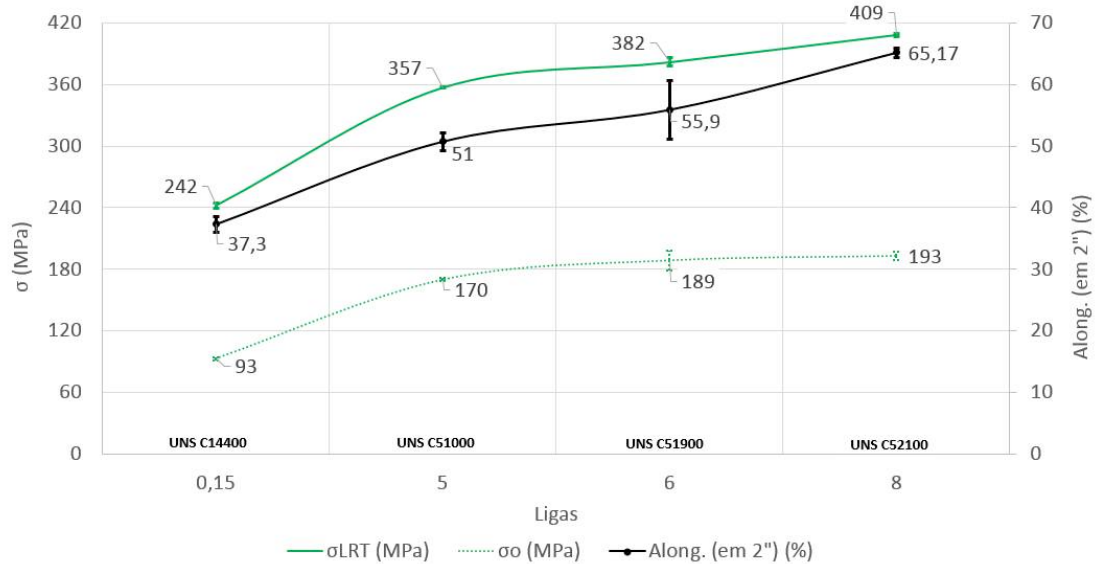


Figura 8. Propriedades mecânicas das ligas de cobre e bronze.

Para as ligas de bronze o aumento do teor de estanho promoveu aumento do limite de resistência à tração e do alongamento, ao contrário dos latões que apresentaram maior limite de resistência à tração e uma diminuição do alongamento. Esse resultado para o bronze contradiz o encontrado por Davis (2001), em que foi apresentado uma redução do alongamento em função do aumento do teor de estanho contido na liga. Entre as ligas de bronze analisadas a que apresentou melhor limite de resistência à tração e alongamento foi a liga UNS C52100.

A adição de 40% de zinco na liga de cobre aumentou o limite de resistência à tração em 43,2% e diminuiu o alongamento em torno de 7,6%. Os bronzes apresentaram um aumento de estanho em torno de 8% e um aumento de limite de resistência à tração de 43,3%.

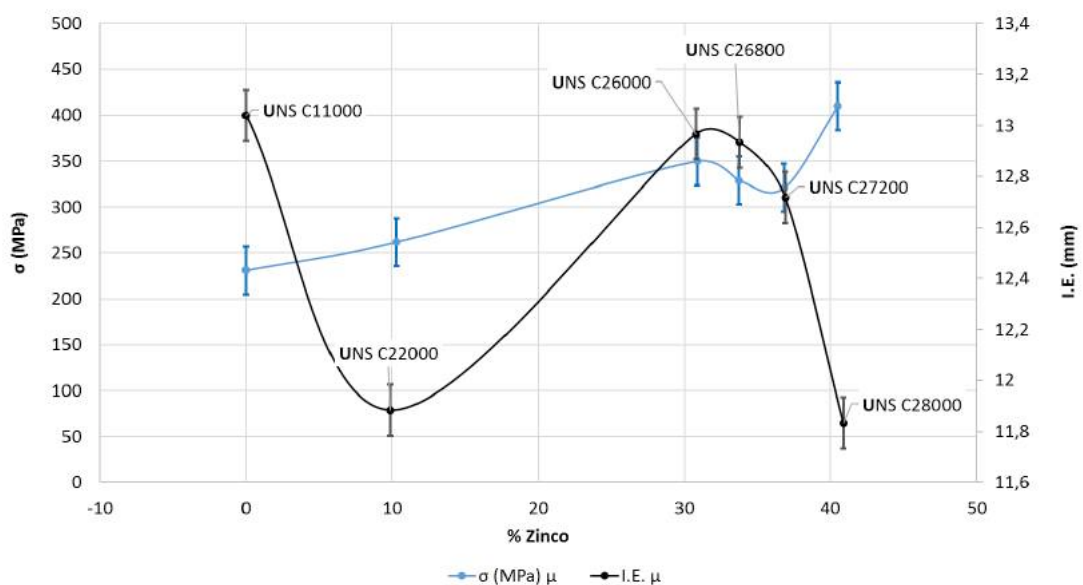


Figura 9. Limite de resistência à tração (σ) e índice Erichsen em função da % de zinco presente nas ligas de latão.

Os índices Erichsen apresentados para as ligas de latão apresentaram-se diferentes com relação às outras propriedades analisadas. Com o aumento de zinco em torno de 10% o índice diminuiu e com o aumento de zinco próximo a 30% o índice aumenta em conjunto com o limite de resistência a tração, desta forma pode-se verificar que a liga UNS C26000 apresenta maior índice Erichsen e maior limite de resistência à tração quando comparado com os demais latões, porém, pelos desvios padrões apresentados para as ligas UNS C26000, UNS C26800 e UNS C27200, pode-se verificar uma certa similaridade entre os índices obtidos.

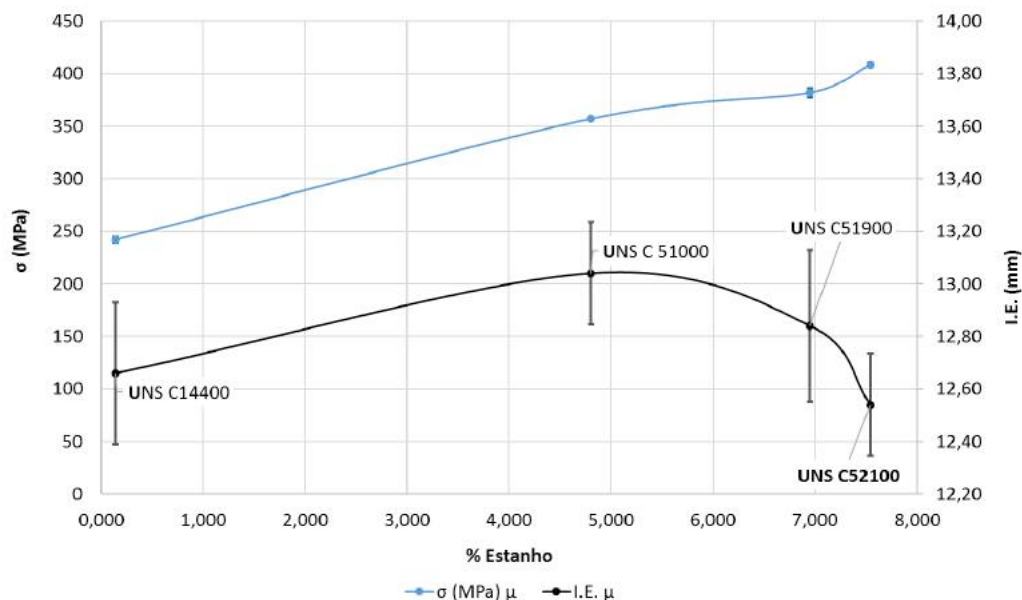


Figura 10. Limite de resistência à tração (σ) e índice Erichsen em função da % de estanho presente nas ligas de bronze.

As ligas de bronze apresentaram comportamentos distintos com relação às ligas de latão, para a obtenção dos índices Erichsen. Os índices Erichsen mais altos foram obtidos para as ligas com teores de 4,80 a 6,95% de estanho, apresentando um I.E. em torno de 13,00 mm, sendo que na média a liga UNS C51000 apresentou um valor superior em torno de 2,3% em relação a liga UNS C51900 e de devido aos desvios padrão pode-se afirmar que essas duas ligas apresentam característica semelhantes.

4. CONCLUSÕES

Pelos resultados de limite de resistência a tração e desvio padrão obtidos para as ligas UNS C26000, UNS C26800 e UNS C27200, os valores detectados variaram em no máximo 8,3%. Para os resultados dos índices Erichsen entre essas ligas a maior variação encontrado foi de 1,6%, podendo assim concluir que nas condições avaliadas essa diferença não é significativa dependendo da aplicação do material.

Para as ligas de bronze C51000 e UNS C51900, a maior diferença encontrada para o limite de resistência a tração foi de 7,0%, já os índices Erichsen apresentaram variação máxima de 1,5%, também não apresentando uma diferença significativa dos resultados.

O aumento de 40% de zinco e o aumento de 8% de estanho aumentaram aproximadamente 43 % do limite de resistência à tração, porém, as ligas de bronze apresentaram alongamentos superiores, o que para o processo de estampagem se torna mais interessante, porém é valido lembrar que os bronzes apresentam maior custo em comparação aos latões.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Paranapanema SA por permitir e incentivar ao desenvolvimento de pesquisas tecnológicas.

6. REFERÊNCIAS

ASTM INTERNATIONAL. E 8-15: 2015, "Standard Test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken", 23p.

- ASTM INTERNATIONAL. E 112-13: 2013, “Standard Test methods for determining average grain size. West Conshohocken”, 28p.
- ASTM INTERNATIONAL. B 152-13: 2013, “Standard Specification for copper sheet, strip, plate, and rolled bar. West Conshohocken”, 6p.
- ASTM INTERNATIONAL. B 103-15: 2015, “Standard Specification for phosphor bronze plate, sheet, strip, and rolled bar. West Conshohocken”, 7p.
- ASTM INTERNATIONAL. B 36-13: 2013, “Standard Specification for brass plate, sheet, strip, and rolled bar. West Conshohocken”, 9p.
- Borough, J. W., 1961, “The Effect of Zinc on the Conductivity of Copper”, Transactions of the Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. Vol. 221 , pp. 1274.
- DAVIS, J.R., 2001, “Copper and copper alloys. ASM Specialty handbook”, ASM Handbook, 652 p.
- Erichsen, B., 2016, “Testing Equipment for Quality Management, Sheet Metal Testing”, EN 08, pp. 16.
- Gravus, A., Banu, M., Ragneau, E., Maier, C., 2010, “An inverse analysis of the Erichsen test applied for the automatic identification of sheet materials behavior”, Science Research, Vol. 2, pp. 471 - 476
- Reddy, M.R.N., Theja, M.S., Tilak, M.G., 2013, “Modified Erichsen Cupping Test for Copper, Brass, Aluminium and Stainless Steel”, The SIJ Transaction on Industrial, Financial & Business Management, Vol. 1. N^o. 2, pp. 52-57.
- Şener, B., Kayali, E.S., 2013, “Effectiveness of Stamping Lubricants in Erichsen Test”, Key Engineering Materials, Vol. 549, Switzerland, pp. 325-332.
- Souza, S.A., 1982, “Ensaio mecânicos de materiais metálicos fundamentos teóricos e práticos”, 5º Edição, Editora Blucher, pp. 250.
- USIMINAS, 1999, “Conformação na prensa – fascículo de informações técnica”. n 6. 58 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EVALUATION OF THE ERICHSEN INDEX IN COPPER, BRASS AND BRONZE

Leandro de Almeida, lealmeida@paranapanema.com.br¹

Gustavo Tressia de Andrade, gustavo.tressia@paranapanema.com.br¹

Victor Caso Moreira, victor.moreira@paranapanema.com.br¹

Ronaldo Ferreira da Silva, ronaldo.silva@paranapanema.com.br¹

¹PARANAPANEMA S.A., Rua: Felipe Camarão, N° 500, Utinga, Santo André – SP.

Abstract: Copper and its alloys have excellent characteristics for the manufacture of parts by means of the stamping process, these being widely used in applications that require high electrical conductivity such as connectors and electrical terminals, corrugated cables for wave guides, bushings of lamps among other applications. Additions of zinc and tin in the copper are carried out with the purpose of increasing the mechanical strength and consequently the ductility, allowing greater deformations for the deep stamping process. The Erichsen test is one of the most widely used methods for evaluating the punchability of materials. This work aims to evaluate the influence of zinc and tin contents on the stampability of copper, brass and bronze alloys as a function of the thickness and grain size of the sheets. The stampability will be evaluated through the obtained Erichsen indices. It is concluded that with the ideal working range for the zinc content is 30% to 37% and for tin it is from 4.8% to 6.95%, thus obtaining a better combination of tensile strength and index Erichsen.

Palavras-chave: copper, brass, bronze, stamping, Erichsen