

CORRELAÇÃO DE CONDIÇÕES DE SOLIDIFICAÇÃO COM PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS DA LIGA DE LATÃO 60/40

Vita Mateso ¹

Vinicius Karlinski de Barcellos ²

Carlos Raimundo Frick Ferreira ³

Carlos Alexandre dos Santos ⁴

Jaime Alvares Spim ⁵

Resumo

O presente trabalho investiga as características de solidificação e suas influências nas propriedades mecânicas e metalúrgicas de ligas de latão. Foram analisados parâmetros microestruturais: espaçamentos dendríticos secundários (EDS), e parâmetros da cinética de solidificação: gradiente térmico, velocidade de solidificação e taxa de resfriamento, os quais foram obtidos experimentalmente. Os espaçamentos dendríticos secundários foram correlacionados com propriedades mecânicas, como resistência à tração e dureza (HRB e HV). A liga de latão 60/40 foi vazada em molde de areia com base de cobre objetivando uma condição de solidificação unidirecional. O monitoramento de temperaturas foi realizado utilizando-se termopares do Tipo K posicionados ao longo da altura do lingote. O lingote solidificado foi dividido em várias seções ao longo de sua altura, e para cada seção foram retirados corpos de provas para análises metalográficas e ensaios de tração, segundo a norma da ASTM e 8M-97. Foram obtidas expressões empíricas do tipo $\sigma_u = f(\lambda_2)$, $HRB = f(\lambda_2)$, $HV = f(\lambda_2)$ e $\sigma_u = f(HRB)$.

Palavras-chave: Solidificação; Microestrutura; Propriedades mecânicas.

CORRELATION OF SOLIDIFICATION CONDITIONS WITH MECHANICAL AND METALLURGICAL PROPERTIES OF BRASS ALLOY 60/40

Abstract

The present paper investigates the solidification characteristics and their influence in mechanical and metallurgical properties in brass alloy (60/40). The solidification micro structural parameter, secondary dendritic arm spacing, was analyzed with solidification parameters, such as thermal gradient, solidification rate and cooling rate, which were obtained experimentally. The mechanical behavior such as tensile strength and hardness (Brinell and Vickers) were correlated with the secondary dendritic spacing. The brass alloy 60/40 was poured in a sand mould with a cooled copper base to provide a unidirectional solidification. The monitoring of temperatures was carried out by k-type thermocouples which were placed along the ingot height. The brass ingot was divided in different sections along its height and the specimens for metallographic analysis and mechanical tests were taken in accordance with the norm of ASTM E 8M – 97. Empirically expressions for $\sigma_u = f(\lambda_2)$, $HRB = f(\lambda_2)$, $HV = f(\lambda_2)$ and $\sigma_u = f(HRB)$ were taken.

Key words: Solidification; Microstructure; Mechanical properties.

I INTRODUÇÃO

O latão, liga de cobre e de zinco, é desde muito tempo produzido, transformado e utilizado em vários domínios. Um dos mais importantes acontecimentos das operações de fundição de um metal é sua transição do estado líquido ao estado sólido. Boettinger et al.⁽¹⁾ mostram que a forma da estrutura de solidificação depende das condições de resfriamento, da composição da liga, e

as fases resultantes são função da nucleação, do crescimento ou pela combinação de ambas.

As propriedades metalúrgicas e mecânicas de um metal sólido dependem essencialmente dos fenômenos e parâmetros associados com esta transição.⁽²⁾ Segundo Gialanella e Lutterott,⁽³⁾ para um mesmo metal, inúmeras variações no agrupamento e arranjo dos cristais podem ser

¹ Mestrando LAFUN/PPGEM/ UFRGS (vitamateso@ufrgs.br)

² Mestrando LAFUN/PPGEM/UFRGS (vinicius.karlinski@ufrgs.br)

³ Doutorando Pesquisador LAFUN / PPGEM / UFRGS (frick@ufrgs.br)

⁴ Prof. Adjunto NUCLEMAT / PGETEMA / FENG / PUCRS (carlos.santos@pucrs.br)

⁵ Prof. Adjunto LAFUN / PPGEM / UFRGS (spim@ct.ufrgs.br)

produzidas por alterações no modo de transição do estado líquido para o sólido e os diversos arranjos obtidos possuem propriedades diferentes.

Neste trabalho, buscou-se a correlação das características de solidificação com as propriedades mecânicas e metalúrgicas da liga 60/40. Existem vários parâmetros que afetam a solidificação desta liga, e nesse trabalho foram considerados: a geometria e material do molde, direção e condição de resfriamento e temperatura de vazamento. As propriedades mecânicas e metalúrgicas finais da peça dependem diretamente desses parâmetros.^(1,4)

2 MATERIAL E MÉTODOS

Fez-se uma revisão bibliográfica sobre a solidificação e propriedades mecânicas das ligas de latão, baseadas nas produções de Rowley⁽⁵⁾ e Bradaschia.⁽⁶⁾

O metal fundido foi a liga de latão 60/40, padrão comercial. O molde empregado possuía geometria cilíndrica e constituído de dois materiais: paredes de areia e base de cobre refrigerada a água para proporcionar a solidificação unidirecional, conforme mostra a Figura 1a. O monitoramento de temperaturas foi realizado a partir de um sistema de aquisição de dados utilizando-se de termopares do Tipo K posicionados ao longo da altura do lingote, mostrado na Figura 1b, permitindo dessa forma fazer uma análise térmica do lingote com condições de contorno previamente definidas.

O lingote solidificado foi dividido em várias seções ao longo de sua altura, sendo retiradas amostras para as diferentes análises e ensaios, a citar análises químicas, ensaios mecânicos (tração e dureza) e análises metalográficas.

A análise química foi realizada para determinar os elementos presentes na liga e usando a expressão do cálculo do zinco equivalente proposto por Coutinho,⁽⁷⁾ mostrado na Equação 1. Identificou-se no diagrama de fases Cu-Zn apresentado na Figura 2, a composição resultante da liga do trabalho e a microestrutura esperada.

$$Zn_{eqv} = \%Zn + (1 * \%Pb) + (2 * \%Sn) + (0,5 * \%Mn) + (0,9 * \%Fe) + (10 * \%Si) + (6 * \%Al) - (1,2 * \%Ni) \quad (1)$$

O corte e preparação das amostras para os ensaios de tração e dureza, assim como as dimensões destes, apresentados na Figura 3a foram realizados segundo a norma ASTM E 8M-97.⁽⁸⁾ Para as análises metalográficas, as amostras foram retiradas na direção perpendicular ao do crescimento das dendritas primárias, conforme o esquema da Figura 3b. Desta maneira,

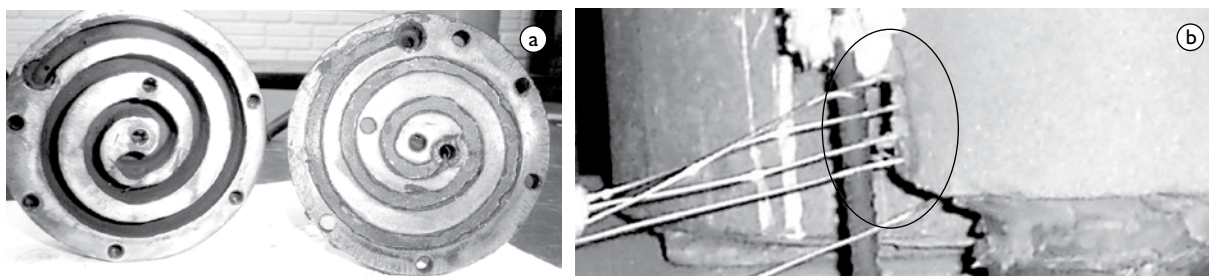


Figura 1. a) Detalhes interno da base com serpentina para refrigeração; e b) Molde de areia com o detalhe dos termopares inseridos na parede.

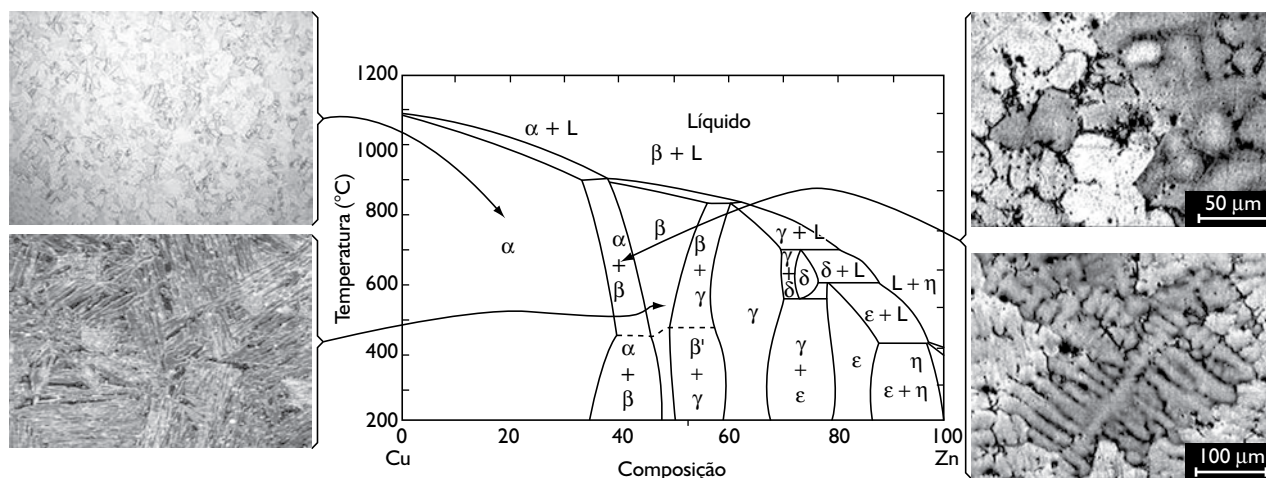


Figura 2. Diagrama de fases Cu-Zn com as estruturas bruta de fusão das principais fases (adaptado Rowley 1984).⁽⁵⁾

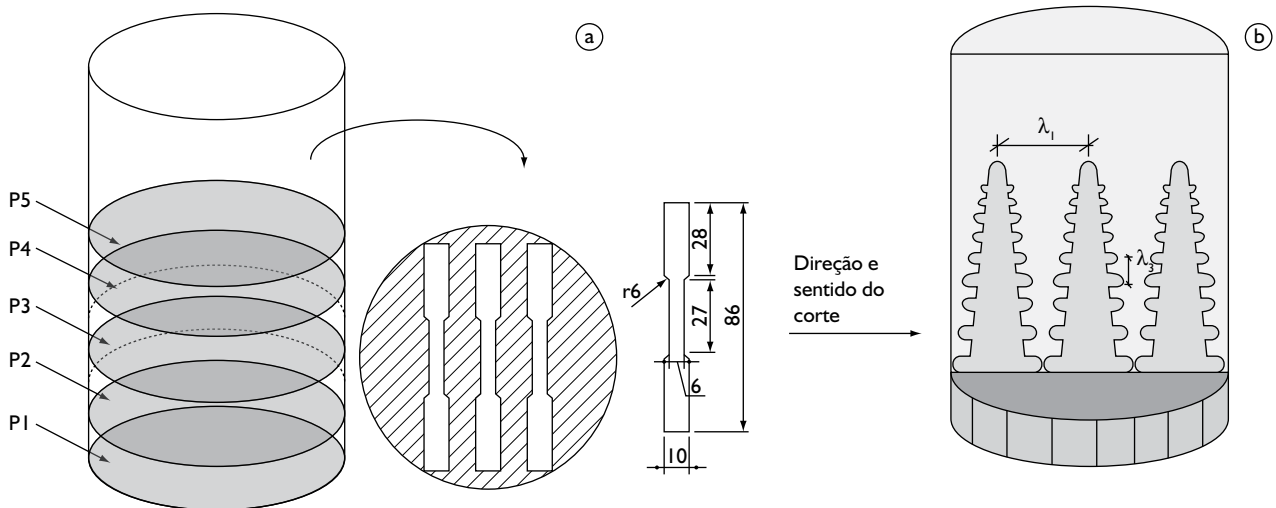


Figura 3. Esquema representando: a) Região das amostras; e b) sentido e orientação do corte das amostras.

objetivou-se garantir uma mínima dispersão do espaçamento dendrítico secundário (EDS) em cada amostra.

As análises metalográficas foram realizadas segundo as normas ASTM E112-96⁽⁹⁾ e atacadas com a solução de HNO₃ 50% de concentração para revelação das macroestruturas e NH₄OH (20 ml), H₂O (8 ml-20 ml) e H₂O₂ com 3% de concentração para as microestruturas, visualização no microscópio ótico e aquisição das imagens.

Medidas de EDS (λ_2) foram realizadas nos corpos de provas nas regiões indicadas na Figura 3a observando as coordenadas X e Y de cada dendrita a partir da interface metal/molde de acordo com o esquema mostrado nas Figuras 4a e b.

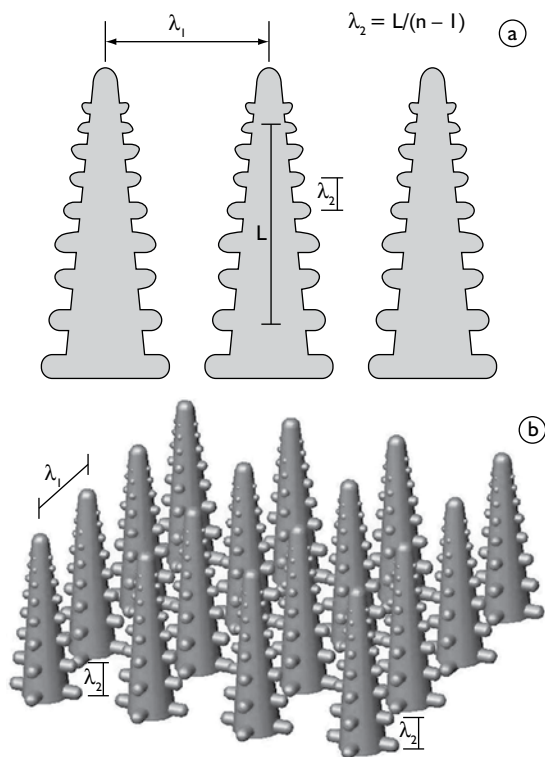


Figura 4. a) arranjo de dendritas bidimensionais; e b) dendritas tridimensionais.

O respectivo método se baseia em calcular o valor de EDS pela média das distâncias entre os braços adjacentes (ramificações secundárias), sobre a seção longitudinal (paralela ao fluxo de calor ou a direção de crescimento), de uma dendrita primária onde, n é o número de braços secundários (Figura 5).

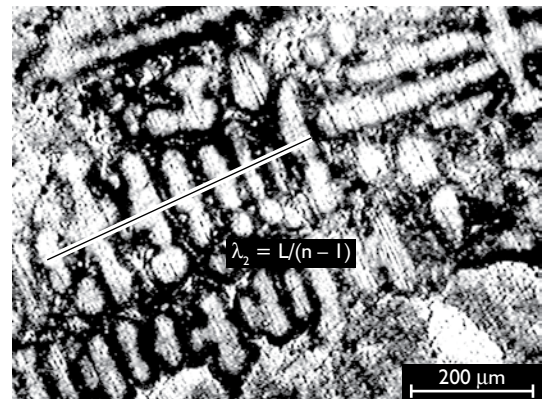


Figura 5. Esquema representativo da técnica utilizada para quantificar os espaçamentos dendríticos secundários.

Para a medição da microdureza, as amostras foram preparadas de acordo com a norma ASTM E 92 – 82.⁽¹⁰⁾

Neste método foram realizados de 15 a 25 medições de EDS para cada lingote. Para a medição da microdureza, a amostra foi preparada e colocada na platina do microscópio, a carga de ensaio selecionada e então aplicada sobre a área de medição por cerca de dez segundos a 30 segundos, segundo a norma do ensaio. O penetrador foi retirado, fez-se então a medição das diagonais da penetração. O resultado obtido desta medição foi lido diretamente em tabelas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta as estruturas brutas de fusão obtidas respectivamente nas amostras nas posições 1, 2, 3, 4 e 5 no lingote. As micrografias revelaram a presença de duas fases, sendo uma fase dendrítica e outra interdendrítica. Os resultados dos ensaios da microdureza e dureza Rockwell B correspondentes estão resumidos na Tabela 1. Estes resultados confirmaram a interpretação da análise metalográfica com a diferença de microdureza entre duas regiões da mesma posição. Segundo Gialanella e Lutterott,⁽³⁾ e Stanford,⁽¹¹⁾ a fase escura representa a fase precipitada α , e a clara, a fase β mais dura, a matriz. As medidas dos EDS são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Dureza das amostras.

Corpo de prova/dureza	Dureza Wickers (HV)			Dureza Rockwell (HRB)
	Fase dendrítica	Fase interdendrítica	Média	
CP1	143,73 ± 5,26	183,17 ± 5,56	163,42 ± 5,40	56,17 ± 4,12
CP2	127,53 ± 1,73	163,37 ± 7,94	145,38 ± 4,83	43,33 ± 1,86
CP3	124,56 ± 5,14	151,57 ± 6,30	137,75 ± 5,72	42,50 ± 1,64
CP4	106,76 ± 4,12	142,20 ± 3,66	124,48 ± 8,89	40,17 ± 0,98
CP5	81,22 ± 1,36	132,63 ± 15,60	106,88 ± 8,47	36,17 ± 0,98

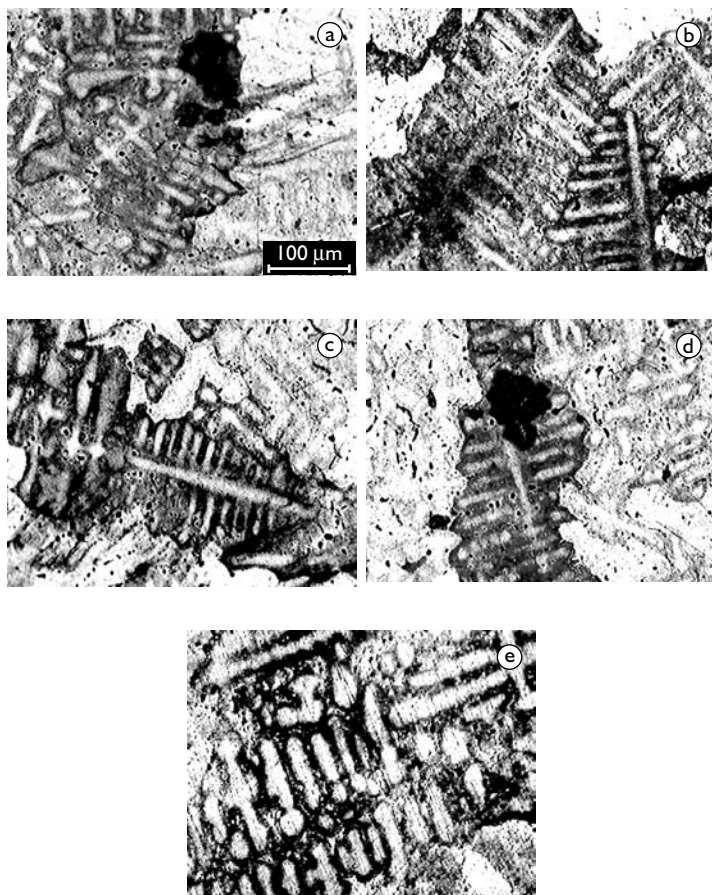


Figura 6. Estruturas bruta de fusão: a) CP 1; b) CP 2; c) CP 3; d) CP 4; e) CP 5.

Tabela 2. EDS das amostras.

Corpo de prova/EDS	λ (μm)			Des.P.
	λ_{max}	λ_{min}	$\lambda_{\text{méd.}}$	
CP1	33,33	26,67	26,74	±1,03
CP2	44,44	28,57	30,03	± 0,87
CP3	44,51	30,78	34,42	± 1,41
CP4	80,28	40,05	55,12	± 1,62
CP5	133,33	50,38	63,27	± 1,90

As medidas dos EDS são apresentadas na Tabela 2. Vê-se a diferença do EDS das diferentes amostras. Esta diferença é diretamente relacionada a região onde foi retirada cada amostra. O zinco equivalente foi calculado a partir dos resultados obtidos nas análises químicas apresentados na Tabela 3 e interpretado no diagrama de fase Cu-Zn. A leitura do diagrama confirmou a presença das fases α e β .

Tabela 3. Análise química feita no Laboratório de Fundição da UFRGS (2005).

Zn	30,42
Pb	2,11
Sn	0,616
P	0,005
Mn	0,096
Fe	0,528
Ni	0,362
Si	0,091
Sb	0,031
Al	0,492
S	0,001
Cu	65,19
Zneq	37,05

A Figura 7a mostra a resistência mecânica de cada amostra e seu comportamento durante o ensaio de tração. A liga apresenta uma boa tenacidade para amostras localizadas nas regiões mais próximas da base, ou seja, a tenacidade aumenta com a diminuição do EDS. A Figura 7b mostra um alongamento maior para EDS menor. Relacionando a Figura 7a com a 7b, observa-se que o CP1, com menor EDS, apresenta a melhor ductilidade, rompe com a maior tensão e alongou-se mais do que os outros, ou seja, as regiões mais próximas da base são as mais tenazes. Os resultados obtidos são compatíveis com os apresentados por Gronostajski⁽¹²⁾ e Corrêa, Aguilar e Cetlin.⁽¹³⁾

A Figura 8a ilustra a variação da microdureza Vickers em relação ao EDS. A microdureza diminuiu com o crescimento do EDS. A correlação entre os resultados experimentais do limite de resistência à tração (σ_u), e os correspondentes

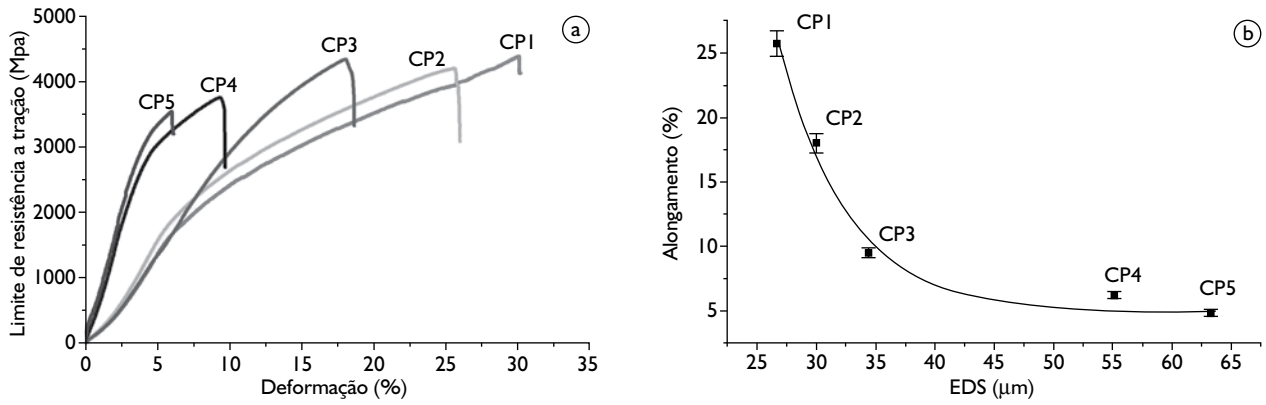


Figura 7. Propriedades mecânicas da liga 60/40: a) Limite de resistência a tração (σ_u); e b) alongamento.

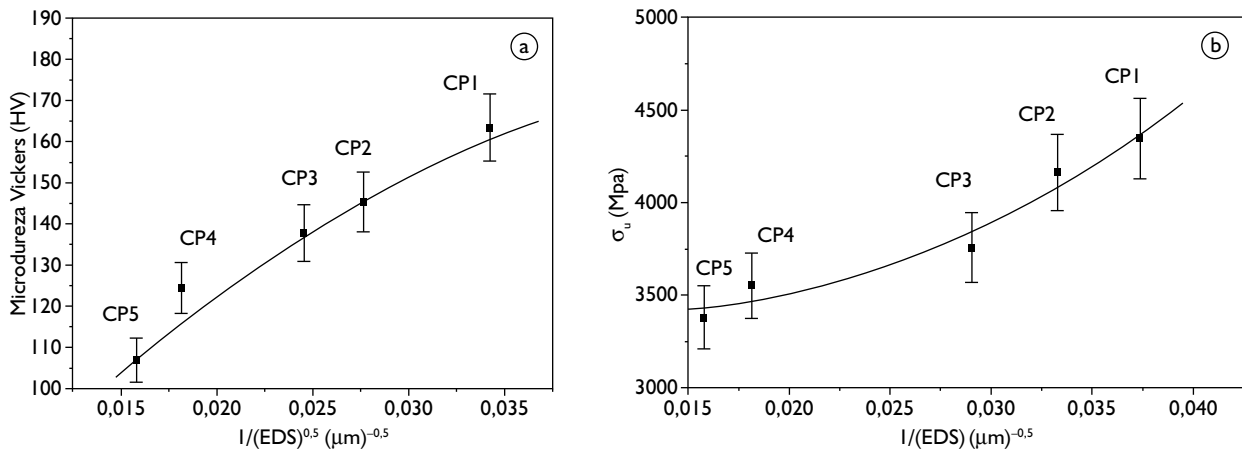


Figura 8. a) Relação entre HV e EDS; e b) Relação de σ_u com EDS.

valores médios dos EDS observados em cada corpo de prova, é mostrada na Figura 8b. Pode-se notar a nítida tendência de crescimento de σ_u com a diminuição de EDS, tendência que pode ser refletida por expressões semelhantes, na forma conhecida da equação de Hall-Petch:

$$\sigma_E = \sigma_0 + K.(D^{-0.5}) \quad (2)$$

onde (σ_E) é o limite de escoamento, K é uma constante que representa uma medida da extensão do empilhamento de discordâncias e D o tamanho de grão médio.

Analisando os dados mostrados nas Figuras 8a e 8b, obtêm-se duas correlações entre o limite de resistência a tração e a microdureza com EDS nas formas apresentadas nas Equações 3 e 4:

$$\sigma_u = 363 - 3646 \times (EDS) + 1,50 \times (1/(EDS))^2 \quad (3)$$

$$HV = 35,55 + 5565,70 \times (EDS) - 54712,32 (1/(EDS))^2 \quad (4)$$

Comparando a dureza Rockwell B com EDS conforme mostra a Figura 9a, observou-se semelhança com o comportamento da HV, onde a dureza é inversamente proporcional ao crescimento do EDS. Na Figura 9b é mostrado a relação entre o σ_u com HRB. A liga apresentou maior resistência a tração e a dureza, nas regiões mais próximas a base, ou seja, as melhores propriedades mecânicas são diretamente relacionadas com EDS. Assim, podem-se

representar essas correlações por expressões empíricas conforme as Equações 5 e 6.

Extrapolando, pode-se relacionar σ_u com HRB com a seguinte expressão empírica:

$$HRB = 40,28 - 460,64 \times \frac{1}{(EDS) + 18290,01 \times 1/(EDS)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_u = 71,3 + 7,4 \times (HRB) \quad (6)$$

A liga apresentou maior resistência à tração nas regiões com maior dureza. Assim, quando se deseja uma liga com maior dureza e resistência a tração, é recomendada as propriedades características da região I da liga estudada.

4 CONCLUSÃO

- Os ensaios mecânicos de tração e dureza apresentaram resultados compatíveis com aqueles relatados na literatura;
- os resultados mostraram uma correlação entre os parâmetros de solidificação com as propriedades mecânicas de tração e dureza;

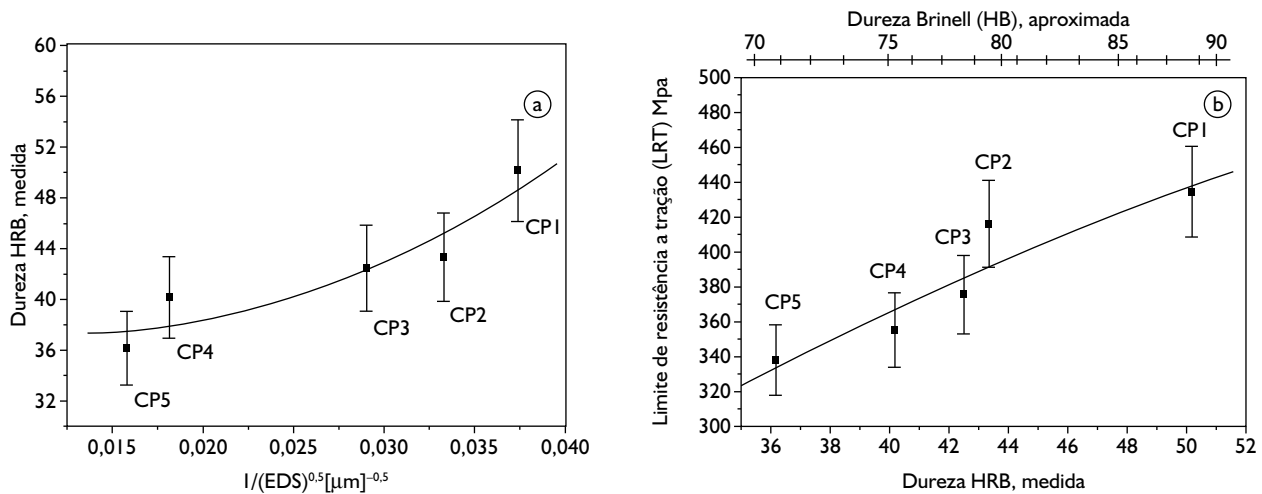


Figura 9. a) Relação entre HRB e EDS; e b) Relação do σ_u com HRB.

- a resistência à tração e a dureza diminuíram com o crescimento do EDS. Esta correlação foi mostrada sob forma das expressões empíricas através das equações 3, 4, 5 e 6; e
- com os resultados obtidos foi possível estabelecer equações empíricas correlacionando às propriedades mecânicas com as características das microestruturas obtidas na solidificação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPERGS e à CAPES pelas bolsas e auxílio técnico. Agradecimentos a empresa Nautiluz Metais Ind. e Com. Ltda pelos materiais fornecidos.

REFERÊNCIAS

- 1 BOETTINGER, W. J., CORIELL, S. R., GREER, A. L., KARMA, A., KURZ, W., RAPPAPZ, M., TRIVEDI, R. Solidification microstructures: recent developments, future directions. **Acta Materialia**, v. 48, n. 1, p. 43-70, Jan. 2000.
- 2 KURZ, W., BEZENÇON, C; GÄUMANN, M. Columnar to equiaxed transition in solidification processing. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 2, n.1, p.185-191, Mar. 2001.
- 3 GIALANELLA, S., LUTTEROTTI, L. Metastable structure in α - β' brass. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 317-318, p. 479-484, April 2001.
- 4 MAHAPATRA, R. B., WEINBERG, F. The columnar to equiaxed transition in tin-lead alloys. **Metallurgical Transactions**, v.18B, n. 2, p. 425-432, June 1987.
- 5 ROWLEY, M. T. **Casting copper-base alloys**. Illinois: American Foundrymen's Society, 1984.
- 6 BRADASCHIA, C. Cobre e ligas de cobre para fundição: tipos, propriedades, aplicações. Porto Alegre, 1974. [Palestras]
- 7 COUTINHO, T. A. **Metalografia de não ferrosos: análise e prática**. São Paulo: Edgar Blücher, 1980.
- 8 **ASTM E8M-97**: Standart test methods tension testing of metallic materials. Annual Book of ASTM Standards, v. 03.01, 1997. p. 77-97.
- 9 **ASTM E112-96**: Standard test methods for determining average grain size. Annual Book of ASTM Standards, v. 03.01, 1998. p. 229-251.
- 10 **ASTM E92-82**: Standard test method for vickers hardness of metallic materials. Annual Book of ASTM Standards, v.03.01, 1992. p. 1-9.
- 11 STANFORD, N.; BATE, P. S. Crystallographic variant selection in α - β brass. **Acta Materialia**, v. 53, n. 3, p. 859-867, Feb. 2005.
- 12 GRONOSTAJSKI, Z. J. Correlation between stress-strain relation and phase transformation in copper alloys. **Materials Processing Technology**, v.119, n. 1, p. 244-250, Dec. 2001.
- 13 CORRÊA, E. C. S., AGUILAR, M. T. P., CETLIN, P. R. The effect tension/torsion strain path changes on the work hardening of Cu-Zn brass. **Materials Processing Technology**, v.124, n. 3, p. 384-388, June 2002.

Recebido em: 22/01/07

Aceito em: 22/06/07

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro. São Paulo: ABM, 2006.