

CORRELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE SOLIDIFICAÇÃO COM AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS DA LIGA DE LATÃO 60/40¹

Vita Mateso²
Vinicius Karlinski de Barcellos³
Carlos Raimundo Frick Ferreira⁴
Carlos Alexandre dos Santos⁵
Jaime Alvares Spim⁶

Resumo

O presente trabalho investiga as características de solidificação e suas influências nas propriedades mecânicas e metalúrgicas de ligas de latão. Os resultados da solidificação, como por exemplo, o espaçamento dendrítico secundário foi correlacionado com o comportamento da transferência de calor no sistema, tomando como parâmetros o gradiente térmico, a velocidade da interface (S/L) e a taxa de resfriamento, os quais foram obtidos experimentalmente. Estas características do processo metalúrgico e os resultados da solidificação foram correlacionados com as propriedades mecânicas como por exemplo a resistência à tração e a 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 segundo a norma da ASTM E 8M-97. Foram obtidas, empiricamente, expressões do tipo $\sigma_u = f(\lambda_2)$, $HRB = f(\lambda_2)$, $HV = f(\lambda_2)$ e $\sigma_u = f(HRB)$ e os resultados se mostraram coerentes com as apresentadas por Hall-Petch.

Palavras-chave: Solidificação; Microestrutura; Transformação de fase; Espaçamento dendrítico secundário.

CORRELATION OF SOLIDIFICATION CHARACTERISTICS 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 results of solidification phenomenon such as secondary dendritic spacing arms were correlated with heat transfer behavior as for example thermal gradient, solidification interface speed (solid/liquid) and the cooling rate which were obtained experimentally. The mechanical behavior such as tensile strength and hardness (Brinell and Vickers) were correlated with the solidification results. The brass alloy 60/40 was poured in a sand mould with copper base to provide a condition of 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 mechanical tests and metallographic analysis were taken from each section 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. These expressions showed themselves coherent with the ones presented by Hall – Petch.

Key words: Solidification; Microstructure; Phase transformation; Mechanical properties.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Mestrando LAFUN/PPGEM/ UFRGS – vitamateso@ufrgs.br

³ Mestrando LAFUN/PPGEM/ UFRGS – vkbeng@yahoo.com.br

⁴ Doutorando Pesquisador LAFUN / PPGEM / UFRGS - frick@ufrgs.br

⁵ Prof. Adjunto NUCLEMAT/DEMM/FENG/PUCRS – carlos.santos@puccrs.br

⁶ Prof. Adjunto LAFUN / PPGEM / UFRGS - spim@ct.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

O latão, liga de cobre e de zinco, são 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 das transformações 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⁾ Assim, segundo Gialanella e Lutterott,⁽³⁾ para um mesmo metal, inúmeras variações no agrupamento e arranjo dos cristais podem ser 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 fenômenos e parâmetros que afetam a solidificação desta liga, e nesse trabalho foram considerados os principais como: geometria e material do molde, direção e condição de solidificação e temperatura de vazamento. As propriedades mecânicas e metalúrgicas finais da peça dependem diretamente dos parâmetros citados acima.^(1,4)

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 usado foi a liga de latão 60/40, padrão comercial. O molde aplicado 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 as Figuras 1 (a) e (b). 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 1 (b), permitindo dessa forma fazer uma análise térmica do lingote com condições de contorno previamente definidas.

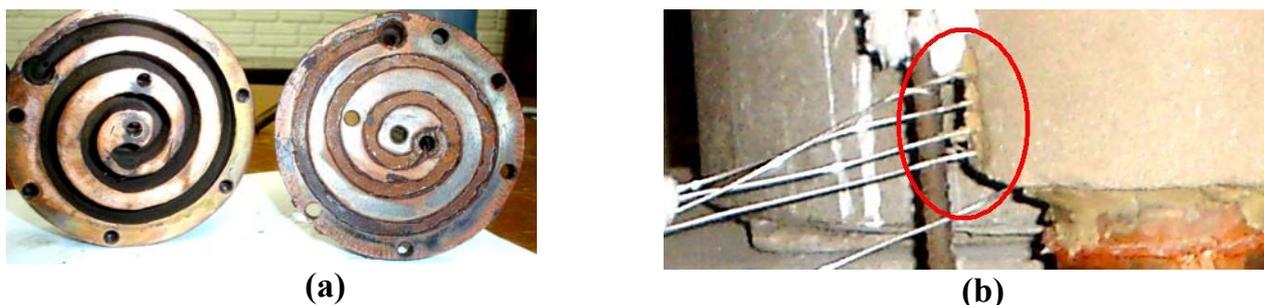


Figura 1. (a) Detalhes interno da base com serpentina para refrigeração e (b) molde de areia com o detalhe dos termopares colocado na parede.

O lingote solidificado foi dividido em várias seções ao longo de sua altura. A Figura 2 (a) mostra as regiões do lingote onde foram retiradas as amostras para os diferentes ensaios e análises. O corte e preparação das amostras assim que as dimensões destes foram realizadas segundo a norma da ASTM E 8M-97 para os ensaios mecânicos (tração e dureza) e análise metalográfica. As amostras foram retiradas na direção perpendicular ao do crescimento das dendritas primárias conforme o esquema da Figura 2 (b). Desta maneira, objetivou-se garantir uma mínima dispersão do espaçamento dendrítico secundário em cada amostra.⁽²⁾

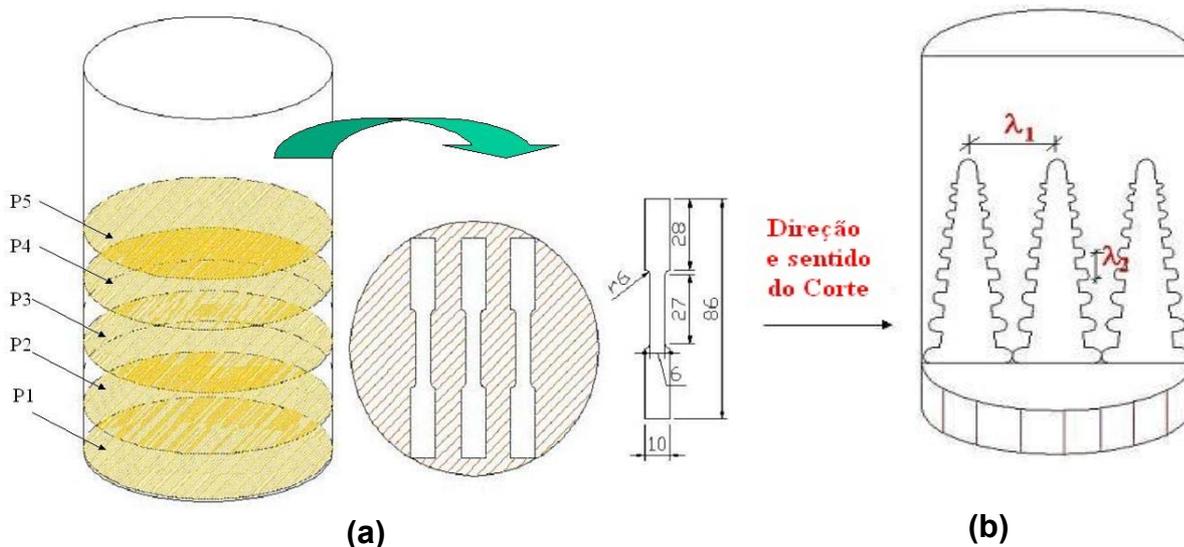


Figura 2. Esquema representando: (a) a região das amostras e (b) o sentido e orientação do corte das amostras.

Foram realizados ensaios mecânicos (tração e dureza), análises metalográficas e químicas das amostras obtidas a cada região do lingote. Os ensaios mecânicos de tração e dureza objetivaram correlacionar às propriedades mecânicas com os parâmetros operacionais de solidificação obtidos na análise térmica. As análises metalográficas foram realizadas segundo as normas ASTM E 112,⁽⁷⁾ segundo a metodologia: escolha da região a ser analisada, corte, embutimento, identificação da amostra, lixamento, polimento com lixa folha de granulometria 1000 e com Alumina, ataques com a solução de HNO₃ 50% de concentração para revelação das macroestruturas e NH₄OH (20 ml), H₂O (8 - 20 ml) e H₂O₂ com 3% de concentração para as microestruturas, visualização no microscópio ótico e aquisição das imagens.

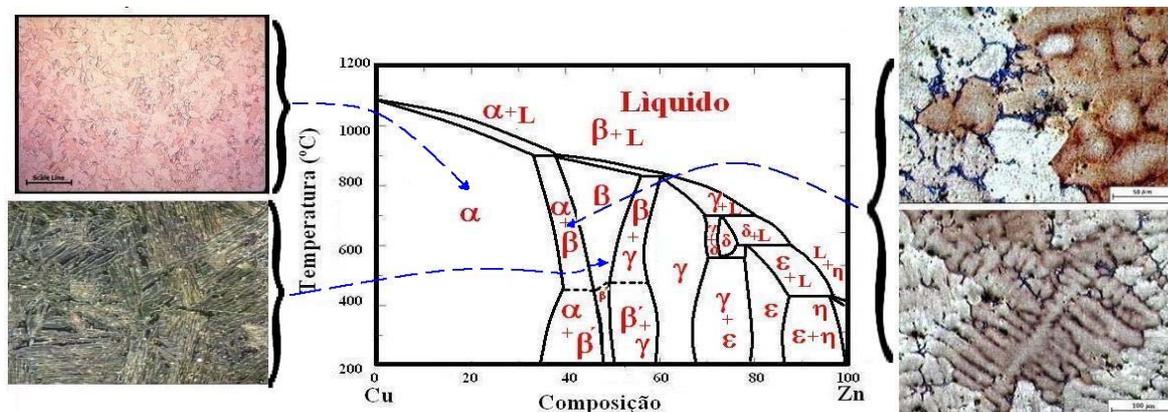


Figura 3. Diagrama de fases Cu-Zn com as estruturas bruta de fusão das principais fases (adaptado Rowley 1984).

A análise química foi realizada para determinar os elementos presentes na liga e usando a expressão do cálculo do zinco equivalente proposto por Coutinho,⁽⁸⁾ mostrado na equação 1. Identificou-se no diagrama de fases Cu-Zn apresentado na Figura 3, a composição resultante da liga do trabalho e a microestrutura esperada .

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

Medidas de EDS (λ_2) foram realizadas nos corpos de provas nas regiões indicadas na Figura 2 (a) observando as coordenadas X e Y de cada dendrita a partir da interface metal/molde de acordo com o esquema mostrado nas Figuras 4 (a) e (b) .

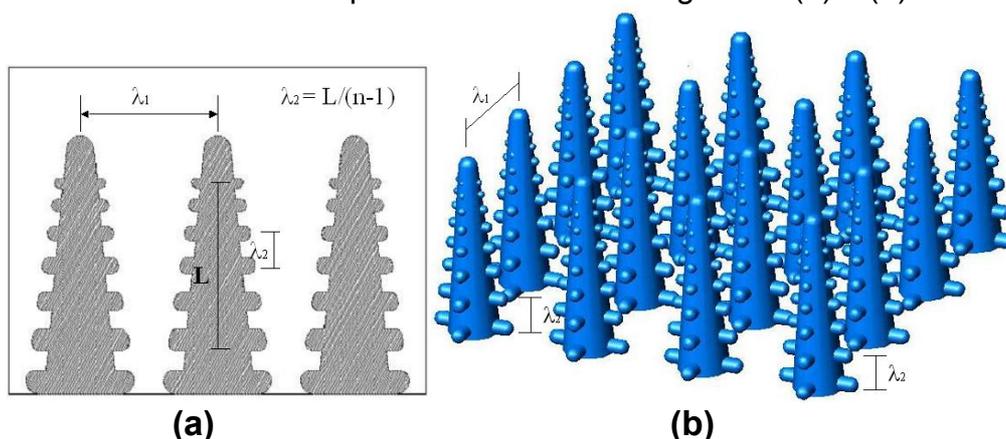


Figura 4. (a) Arranjo de dendritas bidimensionais e (b) dendritas tridimensionais

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).

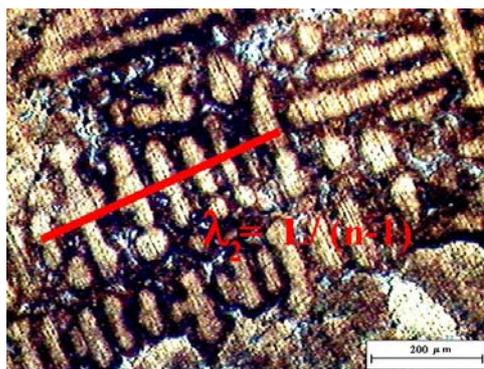


Figura 5. Esquema representativo da técnica utilizada para quantificar os espaçamentos dendríticos secundários

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 é selecionada e então foi aplicada sobre a área de medição por cerca de 10 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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 6 (a), (b), (c), (d) e (e) apresentam as estruturas brutas de fusão obtidas respectivamente das amostras nas posições 1, 2, 3, 4 e 5 retiradas 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 rockell B correspondentes estão resumidos nas Tabelas 1 a 5. 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,⁽⁸⁾ a fase escura representa a fase precipitada α , e a clara, a fase β mais dura, a matriz.

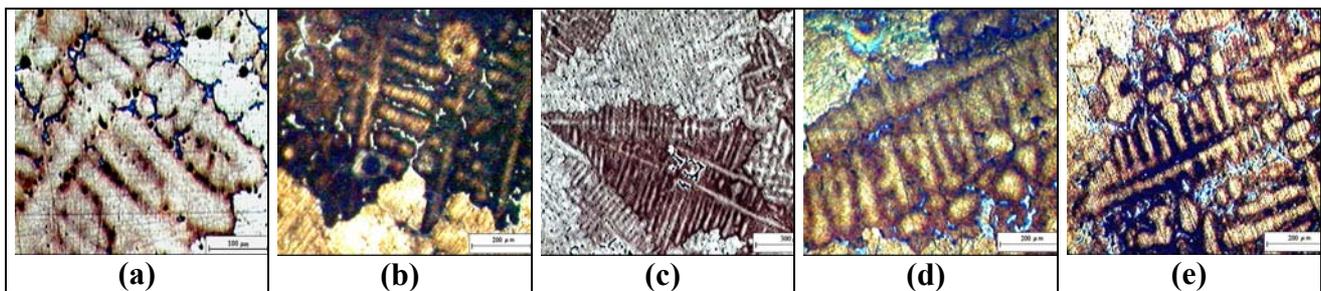


Figura 6. Estruturas bruta de fusão: (a) CP 1, (b) CP 2, (c) CP 3, (d) CP 4, (e) CP 5.

Tabela 1. Dureza da amostra 1

Fases	Valores $\pm \delta$
Dendrítico (HV)	143,73 \pm 5,26
Interdendrítico (HV)	183,17 \pm 5,56
Médio. (HV)	<u>163,42 \pm 5,41</u>
HRB	<u>56,17 \pm 4,12</u>

Tabela 2. Dureza da amostra 2

Fases	Valores $\pm \delta$
Dendrítico (HV)	127,53 \pm 1,73
Interdendrítico (HV)	163,37 \pm 7,94
Médio. (HV)	<u>145,38 \pm 4,83</u>
HRB	<u>43,33 \pm 1,86</u>

Tabela 3. Dureza da amostra 3

Fases	Valores $\pm \delta$
Dendrítico (HV)	124,56 \pm 5,14
Interdendrítico (HV)	151,57 \pm 6,30
Médio. (HV)	<u>137,75 \pm 5,72</u>
HRB	<u>42,50 \pm 1,64</u>

Tabela 4. Dureza da amostra 4

Fases	Valores $\pm \delta$
Dendrítico (HV)	106,76 \pm 4,12
Interdendrítico (HV)	142,20 \pm 3,66
Médio. (HV)	<u>124,48 \pm 8,89</u>
HRB	<u>40,17 \pm 0,98</u>

Tabela 5. Dureza da amostra 5

Fases	Valores $\pm \delta$
Dendrítico (HV)	81,22 \pm 1,36
Interdendrítico (HV)	132,63 \pm 15,60
Médio. (HV)	<u>106,88 \pm 8,47</u>
HRB	<u>36,17 \pm 0,98</u>

Tabela 6. EDS das amostras

λ (μm)	λ_{max}	λ_{min}	$\lambda_{\text{méd.}}$	Des.P.
CP 1	33,33	26,67	<u>26,74</u>	\pm 1,03
CP 2	44,44	28,57	<u>30,03</u>	\pm 0,87
CP 3	44,51	30,78	<u>34,42</u>	\pm 1,41
CP 4	80,28	40,05	<u>55,12</u>	\pm 1,62
CP 5	133,33	50,38	<u>63,27</u>	\pm 1,90

As medidas dos EDS são apresentadas na Tabela 6. 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 7 e interpretado no diagrama de fase Cu-Zn. A leitura do diagrama confirmou a presença das fases α e β .

Tabela 7. Análise Química feita no Laboratório de Fundição da UFRGS (2005)

Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Sb	Al	S	Cu	Zn _{eq}
30.42	2.11	0.616	0.005	0.096	0.528	0.362	0.091	0.031	0.492	0.001	65.19	37.05

A Figura 7 (a) 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 7 (b) mostra um alongamento maior para EDS menor. Relacionando a Figura 7 (a) com 7 (b), 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⁽⁹⁾ e Corrêa.⁽¹⁰⁾

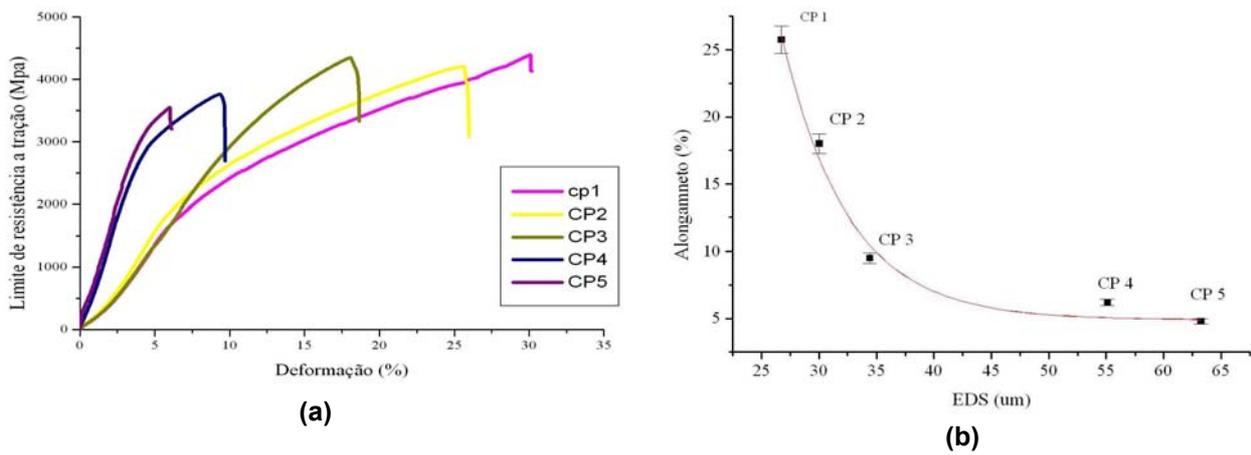


Figura 7. Propriedades mecânicas da liga 60/40: (a) limite de resistência a tração (σ_u) e (b) alongamento

A Figura 8 (a) 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 valores médios dos EDS observados em cada corpo de prova, é mostrada na Figura 8 (b). 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 (Hall, 1951; Petch, 1953):

$$\sigma_u = \sigma_{u0} + d \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{0.5} \quad (2)$$

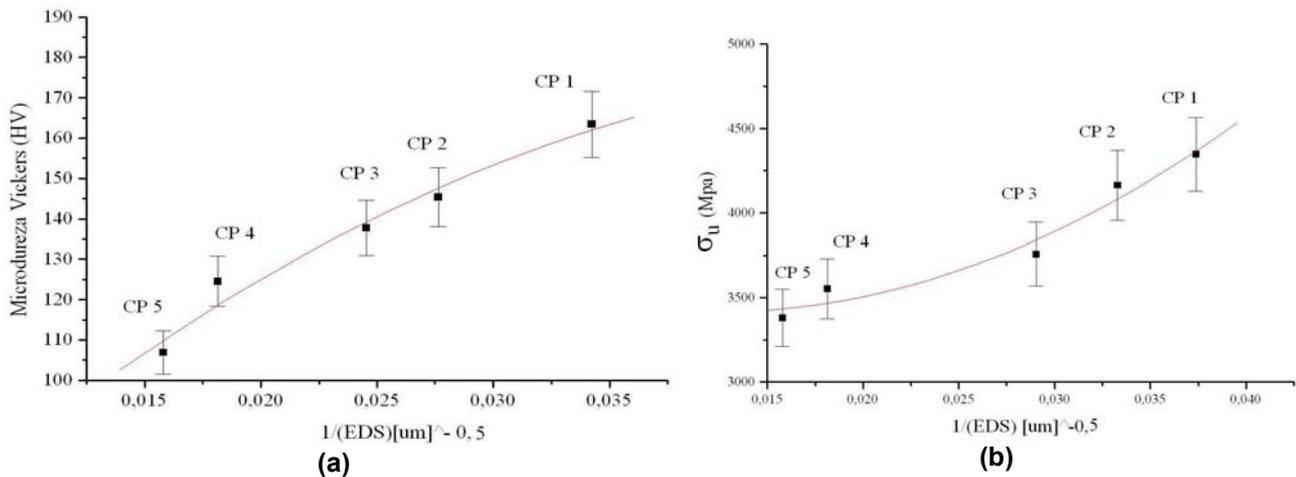


Figura 8. (a) Relação entre HV e EDS e (b) relação do σ_u com EDS.

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

$$\sigma_u = 3637,03 - 36461,25 \times (\text{EDS}) + 1,50 \times (1/(\text{EDS}))^2 \quad (3)$$

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

Comparando a dureza rockell B com EDS conforme mostra a Figura 9 (a) , observou-se semelhança com o comportamento da HV, onde a dureza é inversamente proporcional ao crescimento do EDS. Na Figura 9 (b) 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 sobre forme de expressões empíricas conforme as equações (5) e (6).

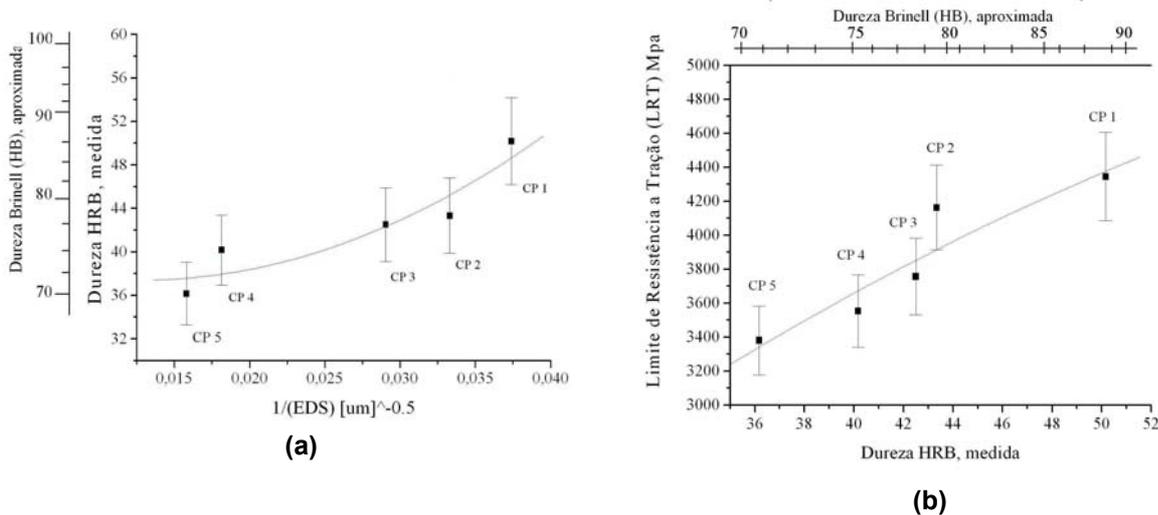


Figura 9. (a) Relação entre HRB e EDS e (b) relação do σ_u com HRB

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

$$\sigma_u = 678,57 + 74,24 \times (HRB) \quad (6)$$

CONCLUSÃO

- Os resultados obtidos foram compatíveis com a literatura.^(1,9-11)
- Os resultados mostraram uma correlação entre os parâmetros de solidificação, com as propriedades mecânicas.
- 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 (3.2),(3.3),(3.4) e (3.5).

Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPq, a FAPERGS e a CAPES pelas bolsas e recursos técnicos. Agradecimentos a Náuticos Metais Ind. e Com. Ltda pelos materiais fornecidos.

REFERÊNCIAS

- 1 BOETTINGER, W.J. et al. "Solidification Microstructures: Recent Developments, Future Directions", **Acta Materialia**, V.48, pp.43-70, 2000.
- 2 KURZ, W., BEZENÇON, C; GÄUMANN, M., "Columnar to equiaxed transition in solidification processing", **Science and Technology of Advanced Materials**, V.2, p.185-191, 2001
- 3 GIALANELLA, S., LUTTEROTTI, L. "Metastable structure in α - β' brass", **Journal of Alloys and Compounds**, V.317, p. 317-318, 2001.
- 4 MAHAPATRA, R.B.; WEINBERG, F., "The Columnar to Equiaxed transition in tin-lead alloys", **Materials Science and Engineering**, V.18, p. 425-432, 1987.
- 5 ROWLEY, M.T. **Casting Copper-Base Alloys**. American Foundrymen's Society, Illinois, U.S.A, 1984.
- 6 BRADASCHIA, C. **Cobre e ligas de cobre para fundição**: Tipos, Propriedades, Aplicações. In: PALESTRAS REALISADAS SOBRE FUNDIÇÃO DE COBRE E LIGAS DE COBRE, 1974, Porto alegre.
- 7 METALS HANDBOOK – Metallography and Microstructures, **ASM International**, V.9, Metals Park, OH, 1998.
- 8 COUTINHO, T.A. **Metalografia de Não Ferrosos – Análise e Prática**. São Paulo: Edgar Blücher SP, 1980.
- 9 GRONOSTAJSKI, Z.J, "Correlation between stress-strain relation and phase transformation in copper alloys", **Materials Processing Technology**, V. 119, p. 244-250, 2001.
- 10 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, p. 384-388, 2002.
- 11 GANDIN, C.A., "From constrained to unconstrained growth during directional solidification", **Acta Materialia**, V.48, p. 2483-2501, 2000.