

Influência da taxa de solidificação na morfologia das fases da liga eutetóide Zn-22%Al

(Influence of solidification rate on the phases morphology of the Zn-22%Al eutectoid alloy)

Bárbara Mager

Mestre, PGETEMA - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais - FENG - PUCRS
E-mail: barabara_mager@hotmail.com

Sofia Stella

Graduanda, FENG - Faculdade de Engenharia - PUCRS. E-mail: sofia.stella07@hotmail.com

Berenice Anina Dedavid

Professora, FENG - PGETEMA - PUCRS. E-mail: berenice@pucls.br

Carlos Alexandre dos Santos

Professor, FENG - PGETEMA - PUCRS. E-mail: carlos.santos@pucls.br

Eleani Maria da Costa

Professora, FENG - PGETEMA - PUCRS. E-mail: eleani@pucls.br

Resumo

A liga Zn-22%Al apresenta uma microestrutura complexa, tanto no estado bruto de fusão, como após envelhecimento, devido à transformação eutetóide ($\beta \rightarrow \alpha + \eta$). O objetivo desse trabalho é relacionar a morfologia das fases presentes em lingotes brutos de fusão e após envelhecimento com a taxa de solidificação. Amostras dos lingotes da liga Zn-22%Al foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). A estrutura $\alpha + \eta$ com morfologia lamelar em amostras brutas de fusão transforma-se em uma textura refinada tendendo a globular-equiaxial após o envelhecimento. Observou-se que a dureza das amostras está fortemente relacionada com a morfologia da estrutura $\alpha + \eta$. Por outro lado, a composição e a morfologia das fases são conseqüências da taxa de solidificação e resfriamento.

Palavras-chave: Ligas zinco-alumínio, solidificação, transformação de fase.

Abstract

The Zn22wt%Al alloy has a complex microstructure due to eutectoid transformation ($\beta \rightarrow \alpha + \eta$) in cases of as-casting and after quench-aging conditions. The objective of this work was to investigate the relationship between the solidification rate and the morphology of α and η phases, before and after quench-aging. The samples of the Zn-22wt%Al alloy were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and by EDS (Energy Dispersive Spectroscopy). The as-casting samples presented a lamellar structure while the as-aged ones exhibited a quasi-globular morphology. The results showed that the hardness of the samples strongly depends on the $\alpha + \eta$ phase morphology. On the other side, the chemical composition and morphology of the phases depends on the solidification and cooling rates.

Keywords: Zinc-aluminum alloys, solidification, phase transformation.

1. Introdução

Ligas de zinco-alumínio aliam alta resistência mecânica e à corrosão ao baixo custo de produção. Possuem alta fluidez, o que permite a obtenção de uma série de produtos, desde formas simples como as bem complexas, pelos processos de fundição convencionais (Savaskan et al., 2003).

Importantes trabalhos foram publicados visando ao entendimento da relação entre as propriedades mecânicas e a microestrutura da liga antes e após envelhecimento (El-Khair et al., 2004; Zhu, et al., 2002; Ying et al., 2006; Chou et al., 2007). Porém existe uma lacuna nas informações sobre o comportamento microestrutural da liga Zn-22%Al em diferentes taxas de solidificação, as quais simulam situações reais de produção. É notório que, por mais simples que seja o molde utilizado para vaziar o metal durante a fundição, variações térmicas complexas sempre estarão presentes (Muller, 2002). Neste contexto, solidificou-se a liga Zn-22%Al com taxas diferenciadas de resfriamento para verificar a influência das taxas de solidificação e resfriamento na microestrutura bruta de fusão e na microestrutura após tratamento térmico.

2. Procedimento experimental

Para a obtenção da liga, o alumínio foi fundido em primeiro lugar e o zinco adicionado lentamente, ao mesmo tempo a temperatura do forno era sistematicamente reduzida. A liga foi vazada lentamente ao atingir 580°C em um molde de grafite em forma de barqueta para minimizar a ação da gravidade na composição, devido à grande diferença entre as densidades dos componentes (Zhang et al., 2006).

Os lingotes de aproximadamente 275 mm de comprimento e 20 mm de altura foram refundidos dentro de um forno resistivo tubular, sob atmosfera de argônio. Duas condições ou taxas de resfriamento foram estabelecidas para dez lingotes: cinco lingotes foram solidificados dentro do forno (Figura 1a) e cinco solidificados fora do forno (Figura 1b). Dados sobre a taxa de resfriamento durante os experimentos foram adquiridos e processados pelo método de análise térmica CA-CCA (*computer-aided cooling curve analysis*).

No tratamento térmico, amostras retiradas dos lingotes resfriados dentro e fora do forno foram aquecidas a 370°C,

durante 30 minutos. Logo após, as amostras foram resfriadas em uma mistura de água e gelo e imediatamente deixadas em repouso para envelhecer, em ambiente isolado termicamente (com o uso de manta térmica).

Procedimentos metalográficos convencionais foram utilizados para a preparação de amostras para a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microanálise por EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*).

O comportamento mecânico da liga foi avaliado a partir de ensaios de dureza Brinell e microdureza Vickers.

3. Resultados

As condições de solidificação e resfriamento dos lingotes de dentro e fora do forno são mostradas na Tabela 1.

A Figura 2 mostra imagens obtidas com MEV, no modo BSE (*backscattering electrons*), em amostras solidificadas (a) fora do forno e (b) dentro do forno. Nas imagens obtidas por MEV no modo BSE, a parte escura indica concentrações mais elevadas de alumínio e a parte branca concentrações mais elevadas de zinco.

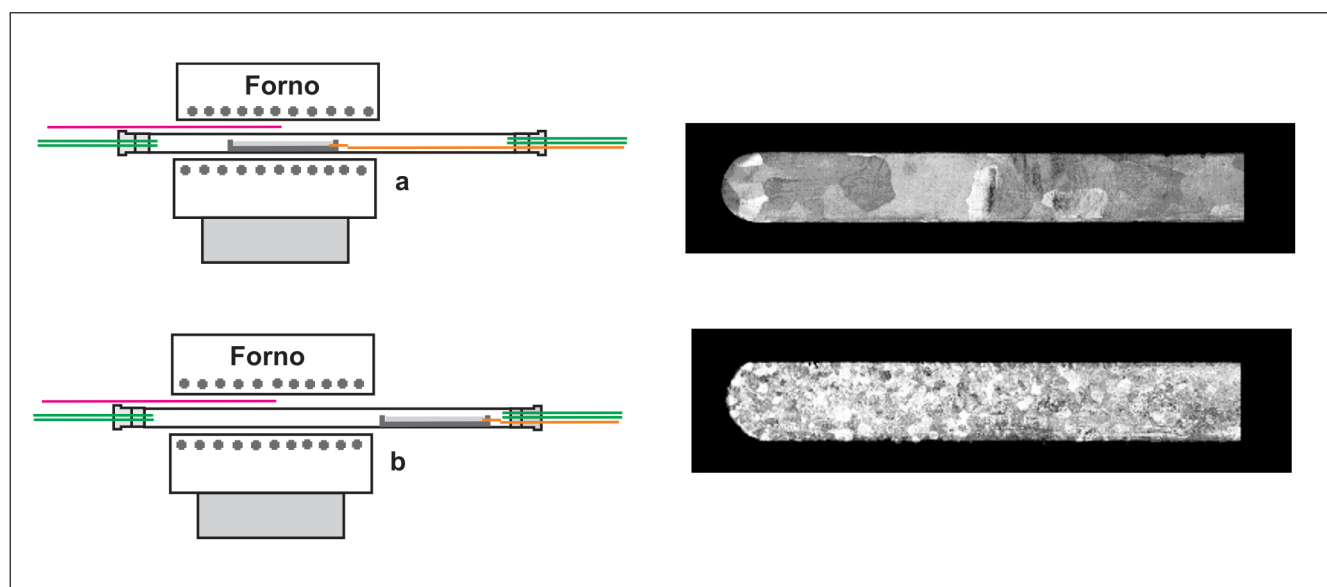


Figura 1 - Esquema ilustrativo das duas condições de solidificação da liga em forno tubular. À direita, macrografia correspondente ao lingote: (a) resfriado dentro do forno e (b) resfriado fora do forno. Ataque: HCl 50% em água, 10 s.

No ponto eutetóide, correspondendo a 22% de alumínio em peso, era esperada uma microestrutura completamente lamelar, formada apenas pelas fases α -alumínio (fcc) e η -zinco (hcp). Contudo observam-se grandes quantidades da fase α e da fase η em uma estrutura tipicamente dendrítica. Os níveis de cinza correspondem às lamelas da fase ($\alpha+\eta$). As tonalidades da cor cinza indicam variações nas concentrações de alumínio e de zinco, na formação lamelar. Nos lingotes resfriados fora do forno (Figura 2a), as áreas com alta concentração de alumínio (escuras) são mais evidentes quando comparadas com as áreas brancas (ricas em zinco).

As regiões η apresentam-se mais concentradas nos lingotes solidificados dentro do forno (Figura 2b), apesar do tempo maior disponível para a difusão dos constituintes. Porém as análises de EDS sobre a fase η mostraram concentrações diferenciadas de alumínio. Pontos escuros (tipo *Al-spots*) menores que um μm , encontrados apenas em amostras de lingotes resfriados fora do forno, apresentaram quantidades mais elevadas de alumínio do que a matriz η (Figura 3).

As microestruturas das amostras, após os tratamentos térmicos, são mostradas na Figura 4. Observa-se que a estrutura dendrítica existente antes do envelhecimento se conserva parcialmente, porém apresenta-se mais homogênea.

A fase α rica em alumínio (regiões escuras) diminui consideravelmente com o tratamento térmico, como observado também por Kitazono e Takiguchi (2006).

A microestrutura $\alpha+\eta$ da amostra bruta de fusão que apresentava lamelas de espessuras variadas, transformou-se em uma textura refinada, uniforme, tendendo à globular após o envelhecimento, relatada como equiaxial por Chou (2007), Zhu (2004) e colaboradores.

A fase η (branca) adquire aparência densa, com contornos mais bem definidos quando comparada com amostras brutas de fusão. Os pontos escuros de alumínio encontrados na fase η , em amostras resfriadas fora do forno, não foram detectados após o tratamento térmico.

Lingotes solidificados dentro e fora do forno, após o envelhecimento, apre-

sentaram composições significativamente iguais para as fases η e α segundo a microanálise (Tabela 2).

Amostras solidificadas dentro do forno apresentaram grãos maiores (Figura 1) e, conseqüentemente, valores menores de dureza (Tabela 3). Relacionando a dureza antes e após o envelhecimento, verifica-se uma diminuição mais significativa nos lingotes resfriados fora do forno. Após tratamento térmico, as durezas das amostras resfriadas fora e dentro do forno mostraram-se semelhantes.

Na Tabela 4, verifica-se que ambas as microestruturas $\alpha+\eta$ e η apresentaram-se mais duras nas amostras brutas de fusão. Após o envelhecimento, as durezas apresentaram valores muito semelhantes para amostras resfriadas fora do forno, conforme a Tabela 4.

Tabela 1 - Condições de resfriamento para a liga Zn-22%Al.

Condição	Resfriamento	Solidificação	Solidificação
	$\Delta T/\Delta t$ ($^{\circ}\text{C/s}$)	$\Delta T/\Delta t$ ($^{\circ}\text{C/s}$)	Δt em s
Tec-tip	0,24	0,23	360
Dentro do forno	0,03	0,02	3600
Fora do forno	0,52	0,45	252

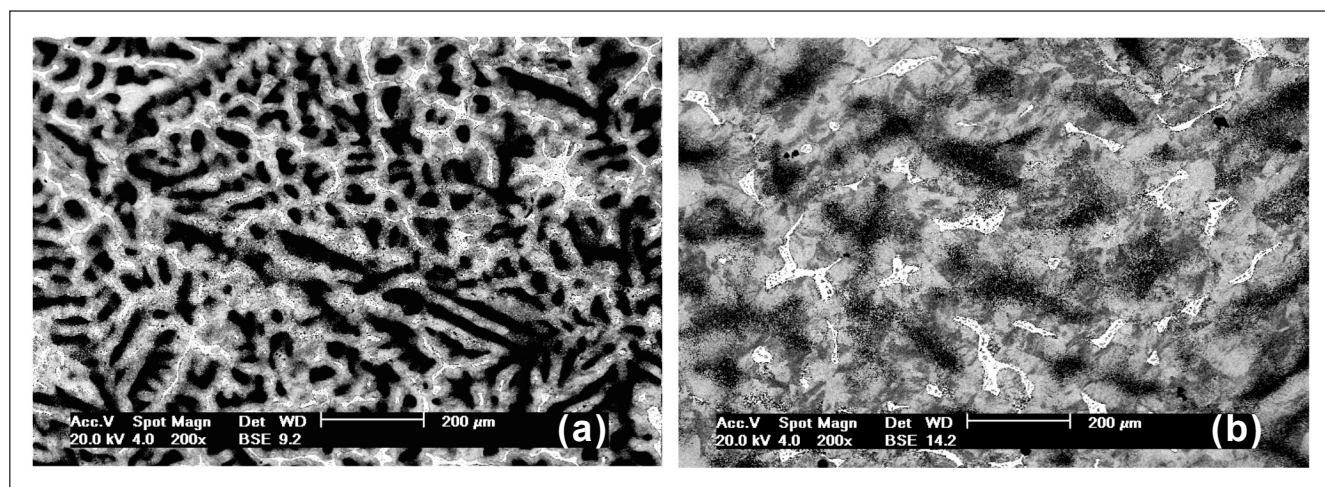


Figura 2 - Imagem MEV, no modo BSE, de amostras brutas de fusão solidificadas: (a) fora do forno e (b) dentro do forno. Ataque: HF 3% em água, 4s.

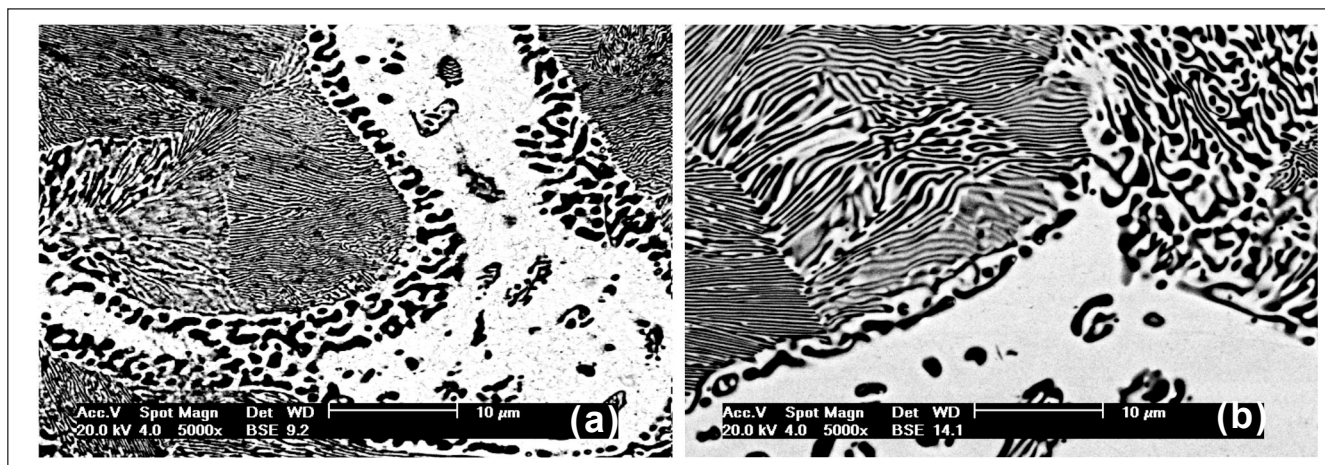


Figura 3 - Imagem MEV, no modo BSE, detalhando as imagens da Figura 2.

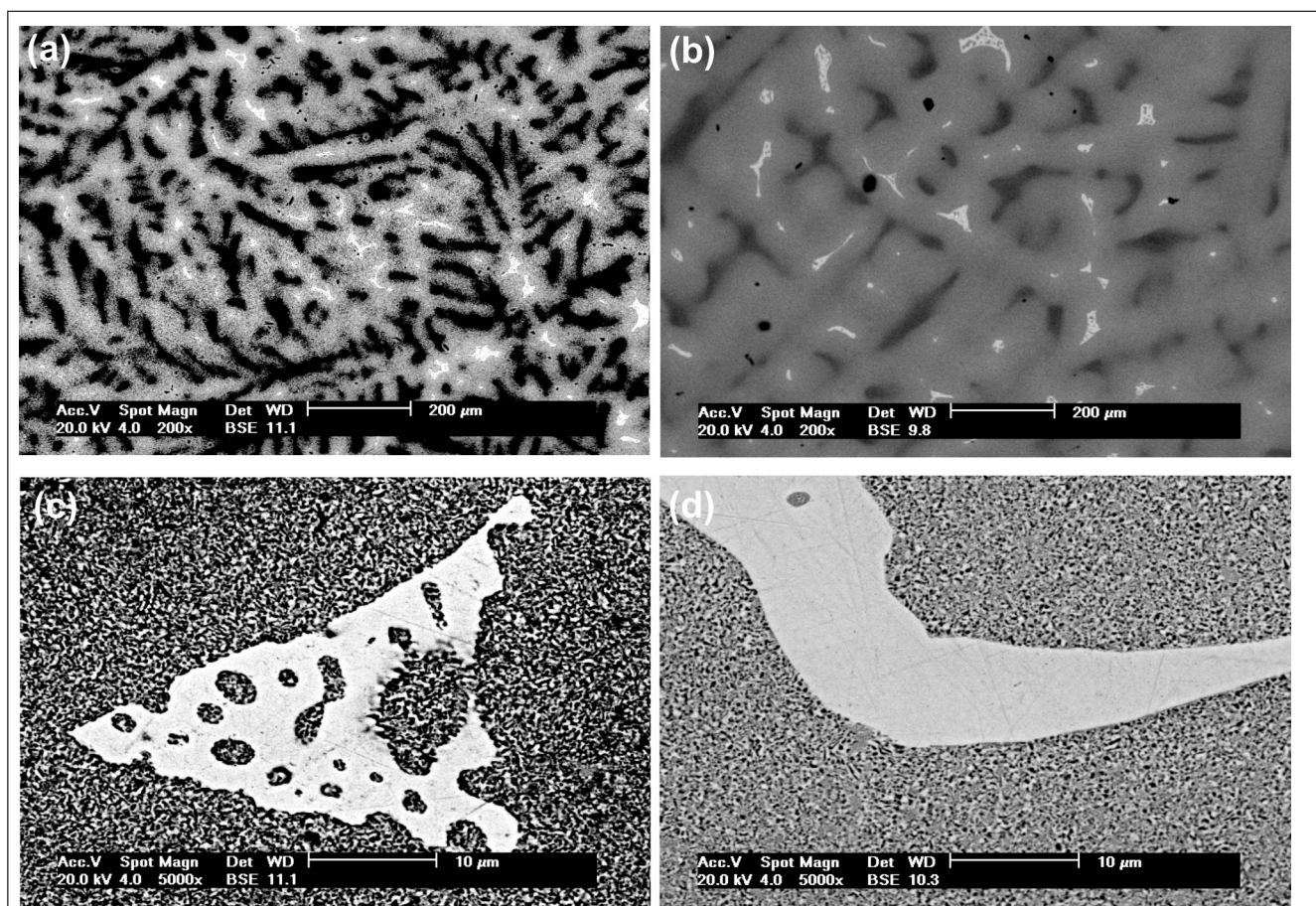


Figura 4 - Imagem MEV, no modo BSE, de amostras após tratamento térmico, solidificada (a) e (c) fora do forno; (b) e (d) dentro do forno. Ataque: HF 3% em água, 4s.

Tabela 2 - Microanálise qualitativa nas fases α e η em Zn-22%Al bruta de fusão.

Fase	Dentro do forno	Fora do forno	Dentro do forno com TT	Fora do forno com TT
% média em α	89% Al-10%Zn	100% Al	85% Al-15%Zn	88%Al-10%Zn
% média em η	100% Zn	98%Zn-2% Al	100% Zn	100% Al

Tabela 3 - Valores de dureza Brinell para as amostras solidificadas dentro e fora do forno.

Solidificadas		Após envelhecimento	
Dentro do forno	Fora do forno	Dentro do forno	Fora do forno
67,5HB	79,3HB	40,6HB	35,5HB

Tabela 4 - Microdureza Vickers das fases em amostras da liga Zn-22%Al, antes e após tratamento térmico (TT).

Microdureza (HV)	Dentro do forno	Fora do forno	Dentro do forno com TT	Fora do forno com TT
η	62,4	66,3	57	55
$(\alpha+\eta)$	65,2	72	52,6	54

4. Discussão

A solidificação muito lenta de 0,02°C/s, dos lingotes resfriados dentro do forno, facilitou a formação de maior quantidade do eutetóide $\alpha+\eta$, porém não foi suficiente para homogeneizar completamente a microestrutura. A fase α , é a primeira a ser formada a partir do líquido. Contornando a fase α surge a fase β , que se transforma em $(\alpha+\eta)$ abaixo de 275°C. A estrutura branca, fase η , rica em zinco, forma-se por último como consequência da segregação do alumínio durante o resfriamento, também observada por ZHU e colaboradores (2002). A largura das lamelas nas regiões $\alpha+\eta$ é função dos processos difusivos que ocorrem durante o resfriamento da liga.

Os pontos (*Al-spots*) na fase η , observados somente nas amostras resfriadas fora do forno, provavelmente são decorrentes da estrutura eutética ($\beta+\eta'$) formada a 382°C, após o final da solidificação da liga. O eutético $\beta+\eta'$ possui concentrações maiores de alumínio do que a fase η e forma-se em temperatura mais elevada que $\alpha+\eta$. A solidificação e o resfriamento processados com maior rapidez devem inibir a segregação do alumínio do eutético, favorecendo, assim, a formação dos *Al-spots*.

A morfologia do eutetóide $\alpha+\eta$ após o tratamento térmico pode ser atribuída à tentativa de retorno da microestrutura $\alpha+\eta$ ao formato lamelar. O eutetóide $\alpha+\eta$ após o envelhecimento apresentou-se mais refinado nas amostras resfriadas dentro do forno, o qual apre-

sentou maior quantidade de lamelas quando bruta de fusão. A diminuição considerável da dureza da liga após o tratamento térmico está fortemente relacionada com a mudança morfológica de $\alpha+\eta$ após o envelhecimento, passando de uma estrutura lamelar para uma estrutura tendendo a globular. Analisando as Tabelas 3 e 4, observa-se que a dureza depende da morfologia e da composição das fases presentes e do eutetóide $\alpha+\eta$, cuja quantidade está relacionada à taxa de solidificação e resfriamento dos lingotes. A diminuição da dureza da microestrutura $\alpha+\eta$ solidificada fora do forno de 72 HV para 54 HV, mostrada na Tabela 4, provavelmente está relacionada com a melhor distribuição do alumínio durante o tratamento térmico, como observado nas micrografias da Figura 4.

5. Conclusão

Taxas maiores de resfriamento favorecem a ocorrência mais acentuada das fases α (rica em alumínio) e da fase η (rica em zinco). O refinamento da estrutura $\alpha+\eta$ após envelhecimento está relacionado à quantidade do eutetóide da microestrutura bruta de fusão. A diminuição considerável da dureza após o tratamento térmico está fortemente relacionada com a mudança de morfologia da estrutura $\alpha+\eta$ após o envelhecimento da liga. Estudos estão sendo realizados para uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos durante as transformações de fases e correlação com propriedades.

6. Referências bibliográficas

- CHOU, C-Y., LEE, S-L., LIN, J-C., HSU, C-M. Effects of cross-channel extrusion on the microstructures and super-plasticity of a Zn-22%Al eutectoid alloy. *Scripta Materialia*, v.57, p 972-975, 2007.
- EL-KHAIR, M.T.A., DAOUD, A., ISMAIL, A. Effect of different Al contents on the microstructure, tensile and wear properties of Zn-based alloy. *Materials Letters*, v.58, n.11, p.1754-1760, 2004.
- KITAZONO, K., TAKIGUCHI, Y. Strain rate sensitivity and energy absorption of Zn-22Al foams. *Scripta Materialia*, v.55, p.501-504, 2006.
- MULLER, A. *Solidificação e análise térmica dos metais*. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2002. 278p.
- SAVASKAN, T., TURHAL, M. S., Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn-Al-Cu alloys. *Materials Characterization*, v.51, p. 259-270, 2003.
- YING, M., HONGJUN, L., YUAN, L., FENGYUN, Y. Competitive growth of grains in ZA alloys during continuous casting with heated mould. *International Journal of Cast Metals Research*, v.18, p. 55-58, 2006.
- ZHU, H. Y., HINOJOSA, J., YUE, T.M., LEE, W.B. Structural evolution in a continuously cast eutectoid Zn-Al-based alloy. *Materials Characterization*, v.48, p.315-322, 2002.
- ZHU, Y. H., CHUNG, C. Y., LEE, W. B. Nanophase decomposition in eutectoid Zn-Al based alloy films. *Materials Science and Engineering A*, v. 374, p.145-152, 2004.
- ZHANG, M. X., KELLY, P.M. Understanding the crystallography of the eutectoid microstructure in a Zn-Al alloy using the edge-to-edge matching model. *Scripta Materialia*, v.55, p. 577-580, 2006.

Artigo recebido em 13/08/2008 e
aprovado em 11/02/2009.