

EFEITO DO CONTEÚDO DE MAGNÉSIO NA FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA E DUREZA DA LIGA ZN-4AL-3CU ¹

Eleani Maria da Costa ²
Felipe Dalla Vecchia ³
Maurício Scherer ⁴
Carlos Alexandre dos Santos ⁵
Berenice Anina Dedavid ²

Resumo

Neste trabalho investiga-se a influência do teor de magnésio nas propriedades microestruturais e dureza da liga Zn-4Al-3Cu. As ligas experimentais foram produzidas adicionando-se magnésio na forma elementar diretamente ao banho nos seguintes percentuais em peso 0,5%, 1% e 2%. Informações sobre as características de solidificação foram obtidas pelo método CA-CCA (*Computer-Aided Cooling Curve Analysis*). A microestrutura foi investigada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a identificação das fases e as respectivas composições químicas foram feitas por EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). A dureza das amostras também foi determinada com o objetivo de obter informações sobre propriedades mecânicas. A adição de magnésio tem influência significativa na formação da fase ZnCu₄, na morfologia e percentual relativo das partículas primárias e nas estruturas eutética e eutetóide. Além disso, em conjunto com o cobre o magnésio aumenta a dureza da liga, no entanto a adição de magnésio em elevados teores, como é o caso da liga 2% de magnésio, promove um decréscimo na dureza.

Palavras-chave: Ligas Zn-Al-Cu; Adição de magnésio; Solidificação; Microestrutura.

FORMATION AND HARDNESS OF THE Zn-4Al-3Cu ALLOY

Abstracts

In this work the influence of magnesium content in the microstructure formation and hardness of Zn-4Al-3Cu alloy was investigated. The experimental alloys were produced by adding magnesium in the elementary form directly to the melt in the following amounts 0.5%, 1% e 2% in weight. The information about the solidification characteristics were obtained by using the method CA-CCA (*Computer-Aided Cooling Curve Analysis*). The alloy microstructures were investigated by scanning electron microscopy (SEM) and the identification of phases and its chemical composition were done by EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*). Also the Brinell hardness of the samples was measured with the purpose of obtain information about the mechanical properties. The addiction of extra magnesium has a significant influence on the ZnCu₄ phase formation, on the primary particles morphology and in the relative content of primary particles and in the eutectic and eutectoid structures. In addition, the magnesium in the presence of copper promotes an increasing on the hardness of the alloy; however the addiction of high magnesium amounts, as in the case of the alloy with 2% of magnesium, can promote a decreasing on hardeness.

Key words: Zn-Al alloys; Magnesium addiction; Solidification; Microstructure formation.

¹ *Contribuição técnica ao XXXIX Seminário de Aciaria – Internacional, 12 a 16 de maio de 2008, Curitiba, PR, Brasil*

² *Professor Adjunto – NUCLEMAT / FENG / PGETEMA / PUCRS*

³ *Mestrando – NUCLEMAT / FENG / PGETEMA / PUCRS*

⁴ *Graduando – Eng. Mecânica / FENG / PGETEMA / PUCRS*

⁵ *Professor Titular – NUCLEMAT / FENG / PGETEMA / PUCRS*

1 INTRODUÇÃO

As ligas hipoeutéticas a base de zinco e alumínio Zn-Al, conhecidas como ligas zamac, foram uma das primeiras ligas de zinco desenvolvidas para serem usadas na fabricação de acessórios de bolsas e calçados, bijuterias, miniaturas, etc. Recentemente, essas ligas ressurgiram como ligas de grande potencial para aplicações em engenharia, uma vez que as mesmas apresentam baixo custo, baixo calor latente de fusão, baixo ponto de fusão e não são poluentes. Considerando esse novo contexto, surge a necessidade de otimização da composição química e microestrutura dessas ligas para melhorar suas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e propriedades tribológicas. A principal rota adotada pelos pesquisadores para a otimização das propriedades das ligas a base de Zn-Al tem sido a adição de elementos de liga, tais como o cobre, o silício, o magnésio, a prata e alguns elementos terras raras, em teores bastante variados, seguida ou não de tratamentos térmicos.⁽¹⁻¹⁰⁾

Nas ligas zamac, o magnésio é adicionado para diminuir a susceptibilidade de formação de corrosão intergranular, pois sendo mais eletronegativo que o zinco e, associando-se ao eutético de chumbo, cádmio e estanho nos contornos dos grãos, reduzem a diferença de potencial entre o zinco e o eutético. A quantidade presente nessas ligas não deve exceder muito o limite de 0,08% em peso, pois o excesso deste metal diminui a fluidez, aumenta a dureza, diminui a elongação e tende a provocar fragilidade à quente na peça fundida. Contudo, o magnésio em teores superiores, em conjunto principalmente com o cobre, tem sido testado com sucesso em muitas ligas experimentais. O magnésio modifica as temperaturas das transformações de fase das ligas Zn-Al, bem como as quantidades relativas e composição química dessas fases, além de promover a precipitação de uma nova fase rica neste elemento. A adição tanto de cobre quanto magnésio baixam a temperatura do eutético,^(4,11) Efeitos da adição de magnésio (2% em peso) e de elementos terras raras (0,8% em peso) na microestrutura da liga de zinco hipereutética ZA27, no estado semi-sólido (460°C), foi investigada por Chen et al.⁽⁴⁾ Os resultados mostraram que a adição desses elementos diminuiu o tamanho das partículas da fase primária e aumentou a uniformidade do tamanho dessas partículas, mas não mudou a morfologia das mesmas. A adição de magnésio diminuiu a fração sólida e aumentou a distância entre as partículas da fase primária.

Neste trabalho estuda-se a influência da adição de 0,5%, 1%, 2% em peso de magnésio na microestrutura e dureza da liga Zn-4Al-3Cu.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para este estudo foram elaboradas a liga binária Zn-4Al, as ligas ternárias Zn-4Al-3Cu, Zn-4Al-1Mg e as ligas quaternárias Zn-4Al-3Cu-0,5Mg, Zn-4Al-3Cu-1,0Mg, Zn-4Al-3Cu-2,0Mg.

As curvas de solidificação típicas das ligas estudadas foram obtidas pelo método CA-CCA (*Computer-Aided Cooling Curve Analysis*),^(12,13) utilizando um sistema de aquisição de dados Lynx. Para tal, as ligas foram vazadas em moldes retangulares de areia, de dimensões de 25 mm x 25 mm e altura de 75 mm, cujo termopar tipo K encapsulado com cerâmica, encontrava-se localizado no centro dos mesmos. O sistema foi previamente calibrado com alumínio puro. A temperatura de vazamento foi de aproximadamente 100°C acima da temperatura da linha liquidus.

Para análise da microestrutura por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as amostras foram preparadas usando técnicas metalográficas convencionais. O ataque químico das amostras foi realizado com o reagente Nital (5% em volume de ácido nítrico em álcool), durante alguns segundos e em seguida foram enxaguadas em água corrente, seguida de álcool e secas em ar aquecido. A identificação dos elementos químicos presentes nas fases foi obtida através da análise EDX (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) com o uso do MEV.

Foi realizado o ensaio de dureza Brinell para obter informações sobre propriedades mecânicas das ligas estudadas, utilizando esfera de 5 mm e carga de 250 Kg. Os valores foram obtidos a partir da média de cinco penetrações efetuadas na região próxima ao termopar.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Características Microestruturais das Ligas

De acordo com o diagrama binário Zn-Al da Figura 1, há três transformações de fase importantes: uma transformação peritética a 28,4% em peso de alumínio a 443°C, uma transformação eutética a 5,1% em peso de alumínio a 382°C e uma transformação eutetóide a 22% de alumínio a 275°C. À medida que uma liga hipoeutética típica solidifica (%Al < 5,1), observa-se a formação de cristais primários de uma fase rica em zinco (dendritas da fase η) com 98,86% Zn à 382°C, que apresenta estrutura cristalina hexagonal. Abaixo desta temperatura, a fase η fica envolta por um eutético constituído por esta mesma fase e de uma segunda fase, de estrutura cúbica, denominada fase β . A fase β possui 22% de alumínio e prevalece até a temperatura de 275°C quando sofre reação eutetóide, transformando-se em $\eta + \alpha$, sendo α uma fase com aproximadamente 90% de alumínio.

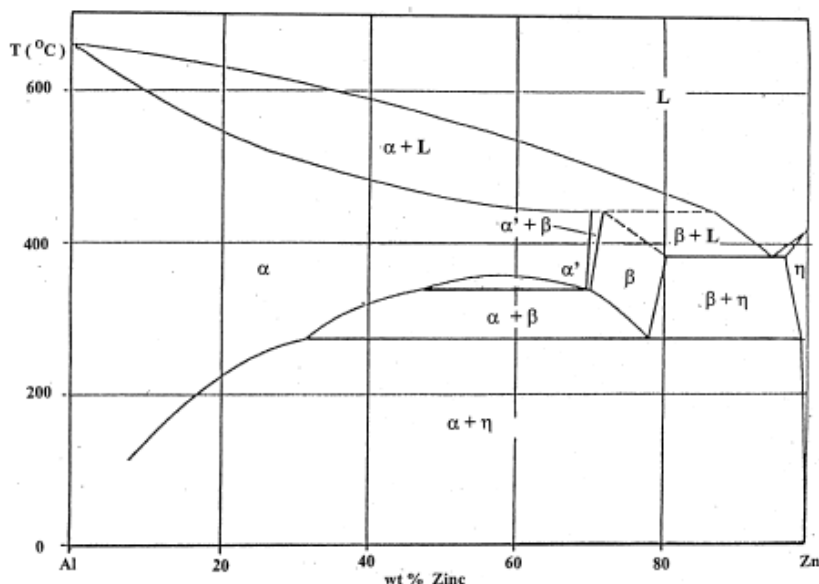


Figura 1. Diagrama de equilíbrio Alumínio-Zinco.⁽⁹⁾

A Figura 2 apresenta a microestrutura típica da liga Zn-4Al produzida experimentalmente, na qual se observa as dendritas da fase primária (fase η) e a estrutura eutetóide (lamelas das fases $\eta + \alpha$), com as respectivas indicações das composições químicas determinadas por EDS, sendo que esta última estrutura

encontra-se dentro da estrutura eutética. As microestruturas das fases eutetóides ($\eta + \alpha$) estão provavelmente associadas à transformação da fase β . Os valores apresentados para EDS referem-se a média de cinco análises em diferentes posições. A matriz apresentou-se extremamente rica em zinco com pouco alumínio em solução sólida, o que está de acordo com o diagrama de fases da Figura 1. A fase eutetóide lamelar tem teor de alumínio em torno de 26% em peso, ligeiramente superior ao previsto no diagrama, o que se deve a rejeição de soluto durante a solidificação.

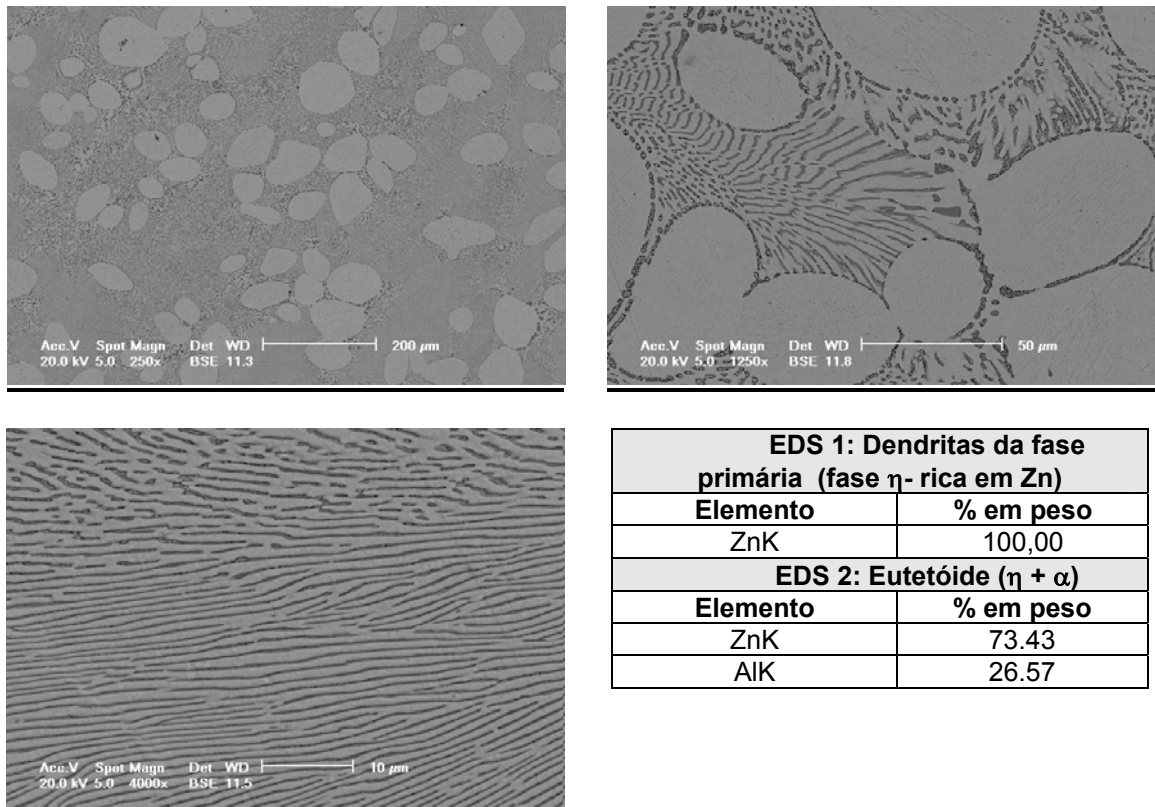
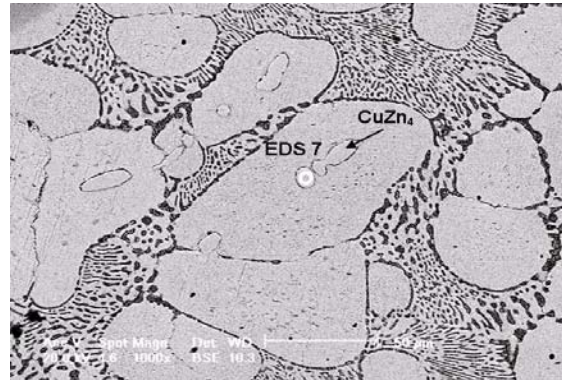
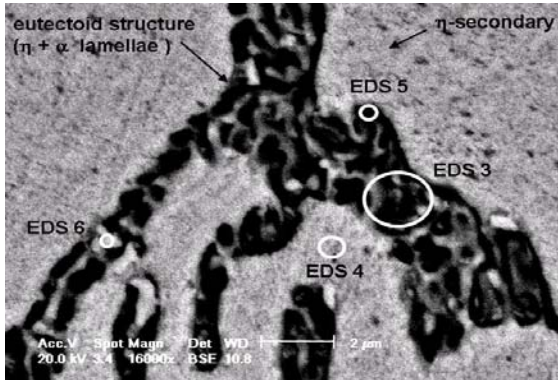
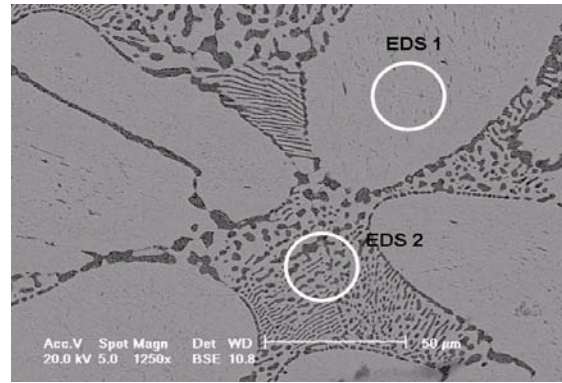
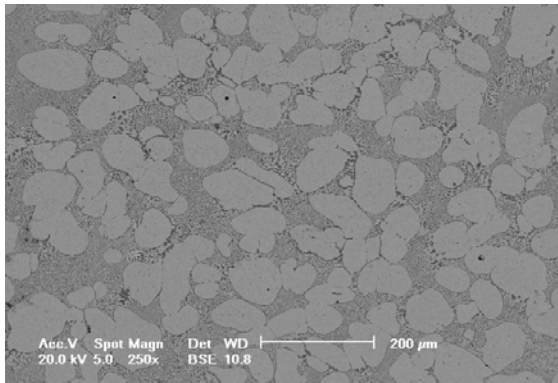


Figura 2. Microestruturas da liga binária Zn-4Al bruta de fusão e os respectivos EDS.

A Figura 3 apresenta a microestrutura da liga ternária de Zn-4Al-3Cu. A microestrutura dessa liga consiste também de dendritas da fase primária (fase η) e de duas estruturas: uma eutética ($\eta +$ eutetóide) e outra eutetóide (lamelas das fases $\eta + \alpha$). A presença de cobre nessa liga produz a formação de precipitados ricos nesse elemento, provavelmente a fase ϵ (composto intermetálico CuZn_4),⁽⁴⁾ uma vez que o EDS indicou somente a presença dos elementos Cu e Zn nessa região. Esta fase é uma fase metaestável e tende a se decompor com tratamento térmico. Empregando ampliações maiores, analisou-se a região eutética formada pela fase primária e lamelas espessas do eutetóide. Na região do eutetóide, analisou-se também as lamelas claras e escuras da fase eutetóide, verificando se tratar da fase η (rica em zinco) e da fase α (rica em alumínio).

Conforme observa-se pelas imagens e pelos resultados do EDS, a adição de cobre ao binário Zn-Al modifica muito pouco a microestrutura básica da liga, sendo o cobre dissolvido em solução sólida na fase primária e também na fase eutética, predominantemente na fase η , não sendo notada a presença do cobre na lamela escura da fase eutetóide (fase α). A presença da fase CuZn_4 foi observada principalmente nas regiões dendríticas, ou seja, no interior da fase primária.

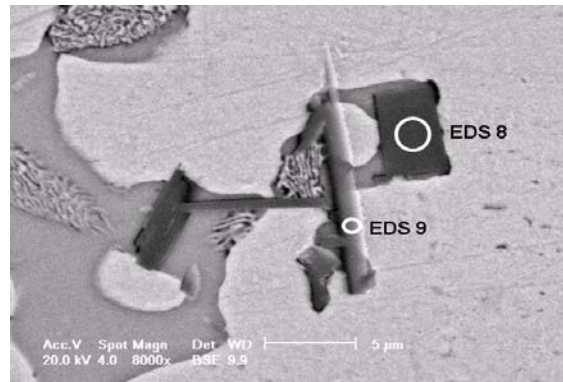
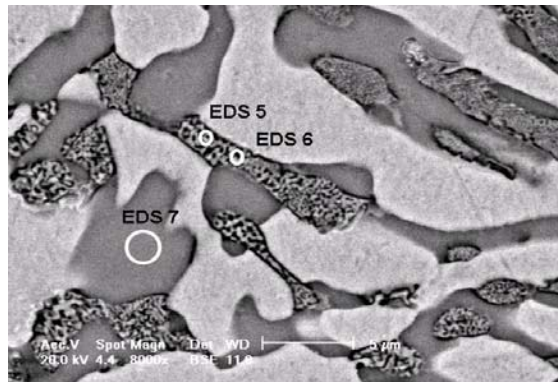
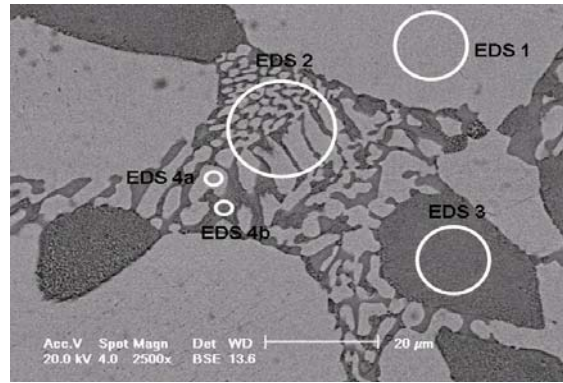
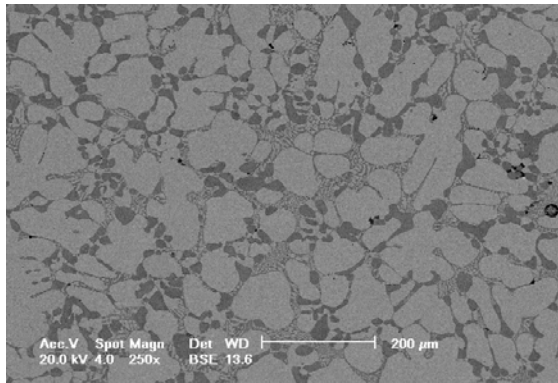


EDS 1: Dendritas da fase primária (fase η- rica em Zn)	
Elemento	% em peso
ZnK	92,21
AlK	4,06
CuK	3,73
EDS 3: Estrutura eutetóide (fases η + α)	
Elemento	% em peso
ZnK	94,01
AlK	29,19
CuK	2,74
EDS 5: Lamelas escuras do eutetóide (α)	
Elemento	% em peso
AlK	60,02
ZnK	39,08
EDS 7: CuZn ₄ (ε)	
Elemento	% em peso
ZnK	82,59
CuK	17,41

EDS 2: Estrutura eutética interdendrítica (fase η + eutetóide)	
Elemento	% em peso
ZnK	83,70
AlK	12,79
CuK	3,52
EDS 4: Fase η da estrutura eutética	
Elemento	% em peso
ZnK	94,01
CuK	4,57
AlK	1,41
EDS 6: Lamelas claras do eutetóide (η)	
Elemento	% em peso
ZnK	78,28
AlK	14,67
CuK	7,05

Figura 3. Microestruturas da liga ternária Zn-4Al-3Cu bruta de fusão e os respectivos EDS.

A Figura 4 mostra a microestrutura e os EDSs para a liga ternária Zn-4Al-1Mg, a qual consiste de dendritas da fase primária (fase η) rica em zinco, uma estrutura eutética (η + eutetoide), uma estrutura eutetóide isolada (lamelas das fases η + α) e de uma fase rica em magnésio que se encontra na região da estrutura eutética. A adição de magnésio provocou a formação de grandes colônias isoladas de eutetóide predominantemente nas regiões interdendríticas, circundadas geralmente pela fase rica em magnésio.



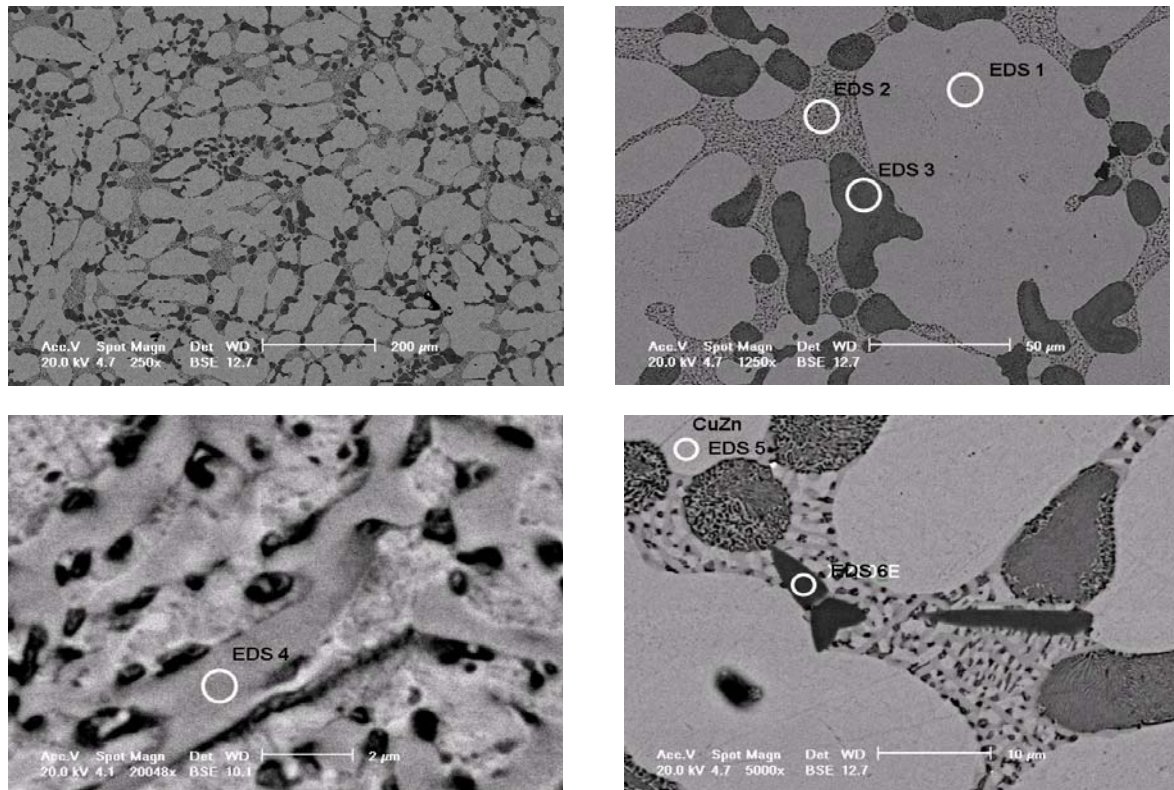
EDS 1: Dendritas da fase primária (fase η- rica em Zn)	
Elemento	% em peso
ZnK	97,50
AlK	2,50
EDS 3: Estrutura eutetóide isolada ($\eta + \alpha$)	
Elemento	% em peso
ZnK	75,80
AlK	22,62
MgK	1,58
EDS 5: Lamelas escuras do eutetóide (α)	
Elemento	% em peso
AlK	77,66
ZnK	14,45
MgK	7,90
EDS 7: Fase rica em Mg	
Elemento	% em peso
ZnK	84,01
MgK	14,67
AlK	1,32

EDS 2: Estrutura eutética interdendrítica (fase $\eta +$ eutetóide)	
Elemento	% em peso
ZnK	88,4
AlK	7,90
MgK	3,70
EDS 4: Fase η da estrutura eutética	
Elemento	% em peso
ZnK	97,49
AlK	2,51
EDS 6: Lamelas claras do eutetóide (η)	
Elemento	% em peso
ZnK	98,09
AlK	1,91
EDS 8: Impurezas	
Elemento	% em peso
AlK	51,52
SiK	3,09
MnK	1,51
EDS 9: Impurezas	
Elemento	% em peso
AlK	35,36
MnK	1,57
SiK	1,51

Figura 4. Microestruturas da liga ternária Zn-4Al-1Mg bruta de fusão e os respectivos EDS.

A microestrutura de todas as ligas quaternárias (ver Figuras 5, 6 e 7) é formada pela matriz que corresponde a solução sólida rica em zinco (dendritas da fase η), uma estrutura eutética lamelar grosseira que contém Zn, Al, Cu and Mg, uma estrutura eutetóide contendo somente Zn, Al and Cu presente na região do eutético e de uma estrutura eutetóide isolada. Na liga Zn-4Al-3Cu-0,5Mg foi possível

identificar a presença da fase ϵ (CuZn_4), enquanto que nas demais ligas com 1% e 2% de magnésio não foi observada a mesma, o que pode indicar que a presença do magnésio tende a suprimir a precipitação dessa fase que é responsável pela instabilidade dimensional das ligas ricas em cobre.



EDS 1: Dendritas da fase primária (fase η - rica em Zn)	
Elemento	% em peso
ZnK	93,01
CuK	4,01
AlK	2,98
EDS 3: Estrutura eutetóide isolada ($\eta + \alpha$)	
Elemento	% em peso
ZnK	71,23
AlK	27,72
CuK	1,05
EDS 5: CuZn_4 (ϵ)	
Elemento	% em peso
ZnK	94,22
CuK	5,78

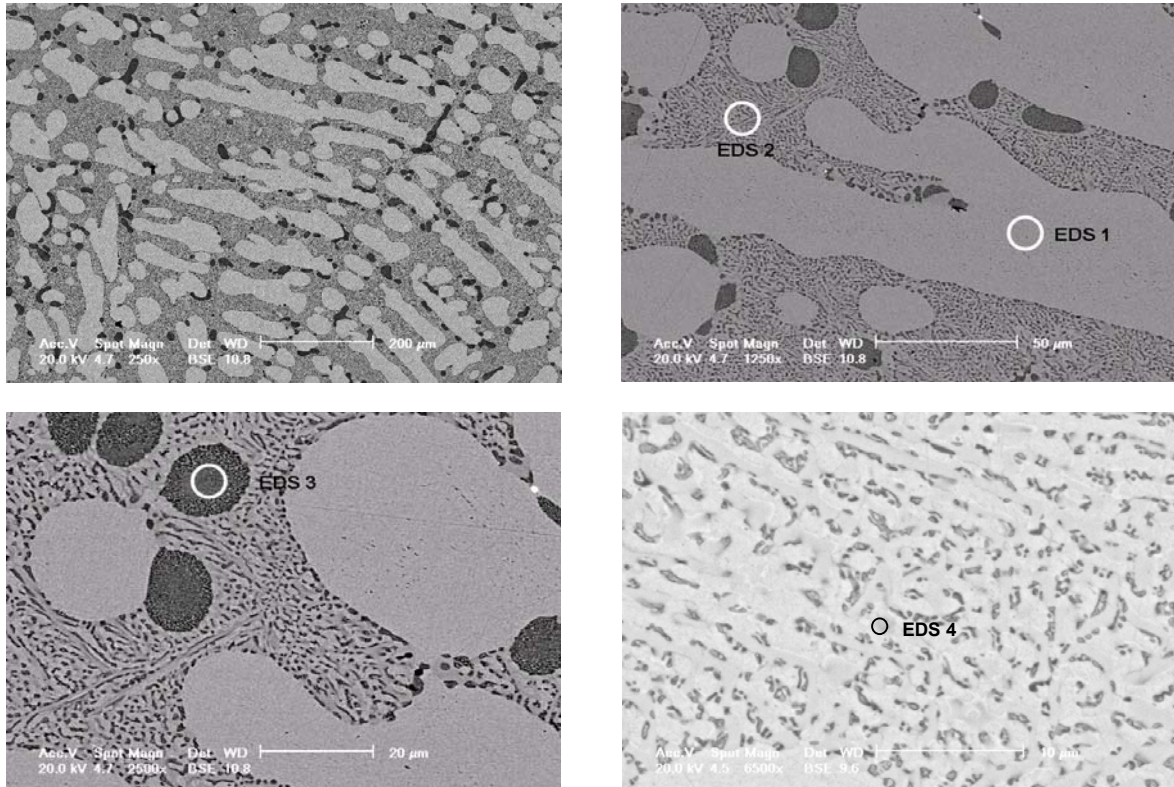
EDS 2: Estrutura eutética interdendrítica (fase $\eta +$ eutetóide)	
Elemento	% em peso
ZnK	87,58
AlK	7,32
CuK	2,96
MgK	2,14
EDS 4: Fase rica em Mg	
Elemento	% em peso
ZnK	82,91
MgK	6,34
CuK	5,76
AlK	4,99
EDS 6: Impurezas	
Elemento	% em peso
AlK	37,67
CuK	34,35
NiK	21,24
ZnK	11,75

Figura 5. Microestruturas da liga quaternária Zn-4Al-3Cu-0,5Mg bruta de fusão e os respectivos EDS.

Pode-se observar que a adição de magnésio modificou a morfologia das partículas da fase primária e diminuiu o seu percentual relativo, aumentando a quantidade da estrutura eutética. Quanto à estrutura eutetóide isolada, observa-se especialmente que na liga com 2% de magnésio, que as regiões dessa estrutura

diminuiu de tamanho e que as lamelas tornaram-se mais refinadas a medida que o teor de magnésio aumentou. Constatou-se que quanto maior o teor de magnésio presente na liga maior quantidade de magnésio na região do eutético devido à presença de maior quantidade da fase rica neste elemento que precipita nessa estrutura.

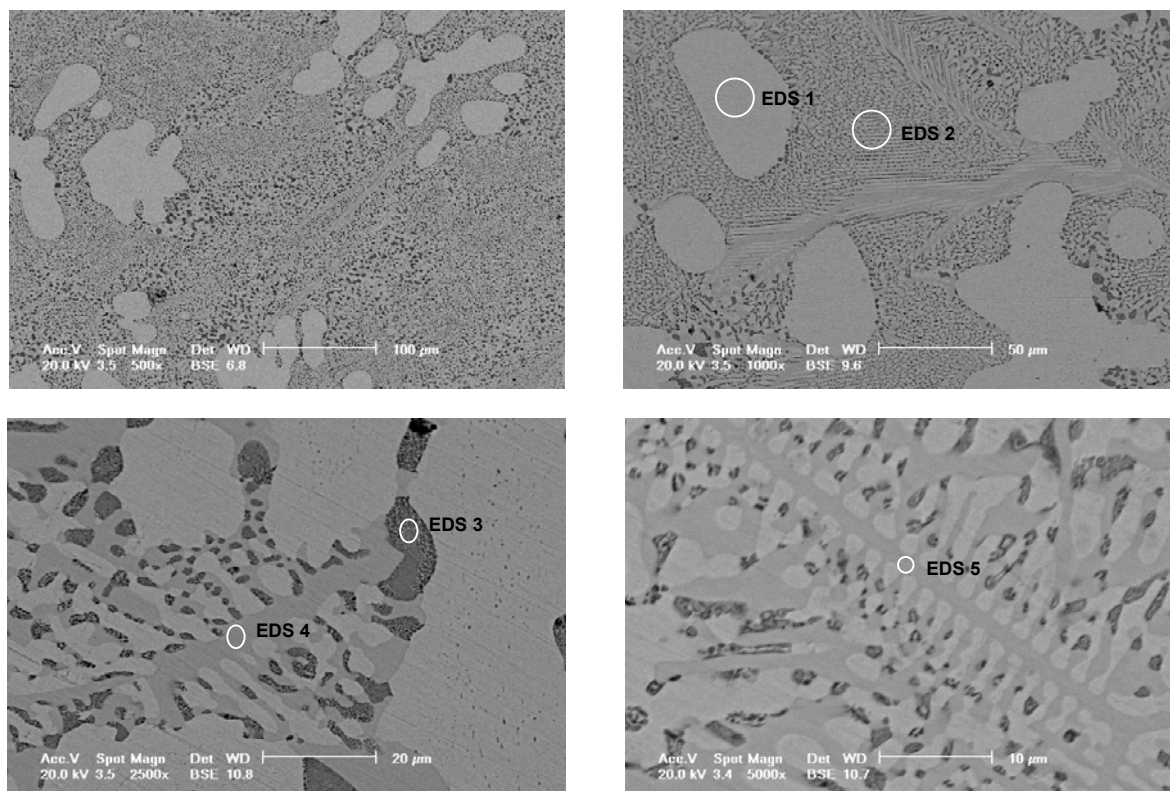
Foi possível identificar em todas as ligas a presença de precipitados contendo ferro, cromo, manganês, níquel e alumínio devido à presença de impurezas.



EDS 1: Dendritas da fase primária (fase η- rica em Zn)	
Elemento	% em peso
ZnK	94,29
CuK	3,72
AlK	1,99
EDS 3: Estrutura eutetóide ($\eta + \alpha$)	
Elemento	% em peso
ZnK	70,17
AlK	28,06
CuK	1,76

EDS 2: Estrutura eutética interdendrítica (fase $\eta +$ eutetóide)	
Elemento	% em peso
ZnK	85,13
AlK	9,35
CuK	3,23
MgK	2,29
EDS 4: Fase rica em Mg	
Elemento	% em peso
ZnK	85,54
MgK	5,95
CuK	5,94
AlK	2,57

Figura 6. Microestruturas da liga quaternária Zn-4Al-3Cu-1,0Mg bruta de fusão e os respectivos EDS.



EDS 1: Dendritas da fase primária (fase η - rica em Zn)	
Elemento	% em peso
ZnK	87,89
AlK	7,83
CuK	4,28
EDS 3: Estrutura eutetóide ($\eta + \alpha$)	
Elemento	% em peso
ZnK	70,01
AlK	29,09
EDS 5: Fase rica em Mg	
Elemento	% em peso
ZnK	88,94
MgK	8,14
AlK	2,93

EDS 2: Estrutura eutética interdendrítica (fase $\eta +$ eutetóide)	
Elemento	% em peso
ZnK	87,08
AlK	7,77
CuK	4,25
MgK	0,90
EDS 4: Fase rica em Mg	
Elemento	% em peso
ZnK	87,04
MgK	9,61
AlK	3,36

Figura 7. Microestruturas da liga quaternária Zn-4Al-3Cu-2,0Mg bruta de fusão e os respectivos EDS.

3.2. Curvas de Solidificação das Ligas

A Figura 8 mostra as curvas de solidificação típica para as ligas ternárias com cobre e com magnésio e a Figura 9 mostra as curvas de solidificação para as ligas quaternárias. Comparando-se as Figuras 8 e 9, observa-se que a presença do cobre eleva a temperatura da linha liquidus, mas não muda a temperatura da linha solidus. Já a presença do magnésio promove um decréscimo de poucos graus na temperatura liquidus e baixa muito a temperatura solidus, pois leva à precipitação de fases a baixa temperatura.

A provável seqüência de precipitação de fases para as diferentes ligas e as respectivas temperaturas de formação das mesmas são resumidas na Tabela 1.

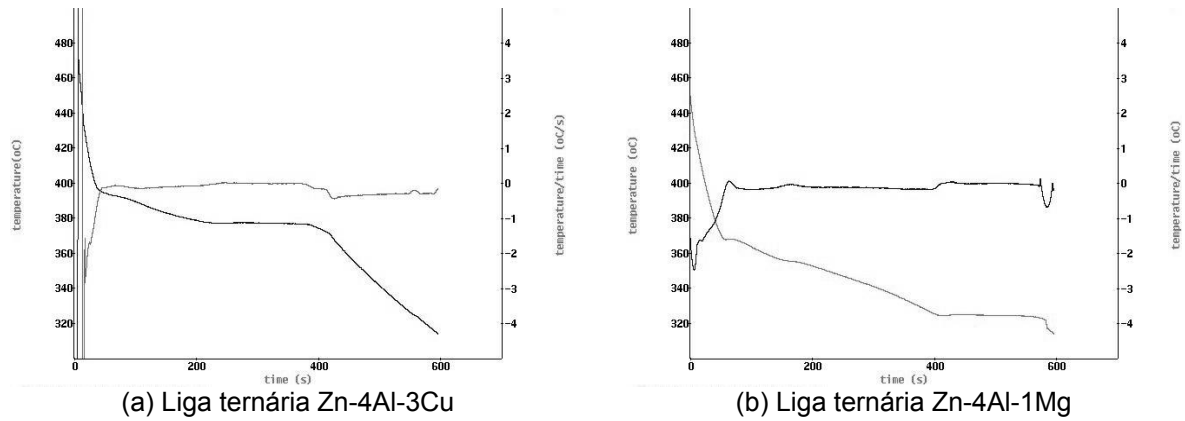


Figura 8. Curvas de solidificação das ligas ternárias de cobre e magnésio e as primeiras derivadas, respectivamente.

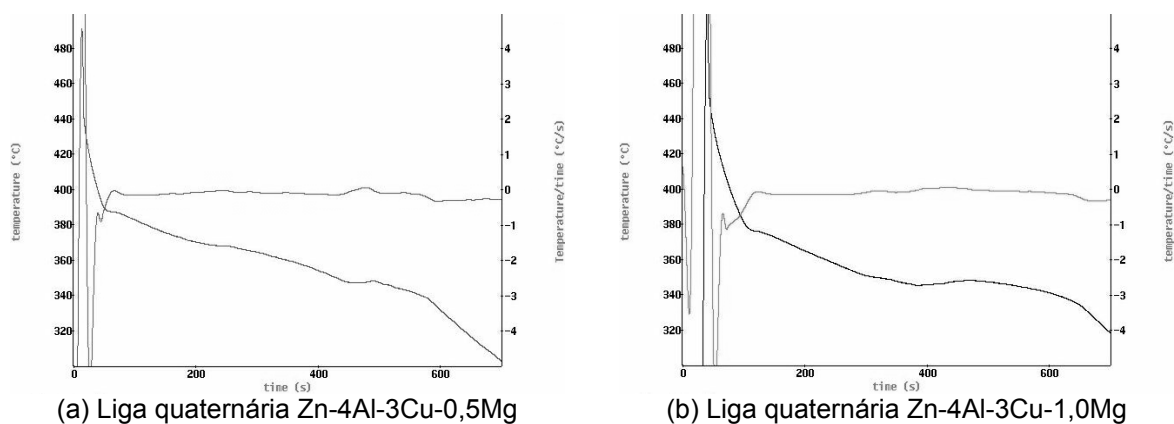


Figura 9. Curvas de solidificação das ligas quaternárias e as primeiras derivadas.

Tabela 1: Provável seqüência de precipitação de fases para as diferentes ligas e as respectivas temperaturas obtidas das curvas de solidificação.

Liga	Formação da solução sólida rica em zinco (dendritas da fase primária η)	Formação da fase metaestável ϵ (composto intermetálico CuZn_4)	Formação da estrutura eutética	Formação da estrutura eutetóide isolada	Formação da fase rica em manésio na região eutética
Zn-4Al	385°C	-	380°C	-	-
Zn-4Al-3Cu	396°C	387°C	377°C	-	-
Zn-4Al-1Mg	371°C	-	356°C	327°C	-
Zn-4Al-3Cu-0.5Mg	388°C	374°C	369°C	348°C	-
Zn-4Al-3Cu-1Mg	377°C	-	350°C	346°C	-
Zn-4Al-3Cu-2Mg	370°C	-	340°C	335°C	-

3.3. Dureza das Ligas

A dureza das diferentes ligas estudadas é mostrada na Tabela 2. Pode-se observar que ambos os elementos, cobre e magnésio, promovem o endurecimento das ligas de Zn-Al. Contudo, o magnésio sem a presença do cobre é provavelmente menos efetivo no aumento da dureza como pode ser observado na liga ternária. Além disso, a adição de magnésio em elevados teores, como é o caso da liga com 2% de magnésio, promove um decréscimo na dureza.

Tabela 2. Dureza das diferentes ligas estudadas.

Liga	Dureza Brinell (HB _S) (D= 5 mm)
Zn-4Al	62
Zn-4Al-3Cu	107
Zn-4Al-1Mg	97
Zn-4Al-3Cu-0,5Mg	112
Zn-4Al-3Cu-1,0Mg	133
Zn-4Al-3Cu-2,0Mg	93
Zamac 2 – liga padronizada	100

4 CONCLUSÕES

A influência do teor de magnésio nas propriedades das ligas Zn-Al-Cu-Mg foi evidente nas diferentes microestruturas formadas, bem como nas curvas de solidificação, promovendo modificações nas temperaturas, cinética e composição química, e percentual relativo das fases e microconstituintes formados. A adição de magnésio mudou a morfologia das partículas da fase primária, diminuindo o percentual relativo das mesmas à medida que o teor de magnésio aumenta. A presença de magnésio levou à formação de uma estrutura eutetóide isolada, além da estrutura eutetóide presente na região do eutético, aumentando também a quantidade da estrutura eutética. Quanto à estrutura eutetóide isolada, observou-se que, especialmente na liga com 2% de magnésio, as regiões dessa estrutura diminuíram de tamanho e que as lamelas tornaram-se mais refinadas a medida que o teor de magnésio aumentou. O EDS mostrou que quanto maior o teor de magnésio presente na liga maior a quantidade de magnésio na região do eutético, devido à presença de maior quantidade da fase rica neste elemento que precipita nessa estrutura. A presença do magnésio promoveu um decréscimo de poucos graus na temperatura liquidus e baixa muito a temperatura solidus, pois leva à precipitação de fases a baixa temperatura. Além disso, a formação do composto intermetálico ZnCu₄ foi suprimida nas ligas com 1 e 2% de magnésio. O magnésio sem a presença do cobre é provavelmente menos efetivo no aumento da dureza, como pode ser observado na liga ternária. Além disso, a adição de magnésio em elevados teores, como é o caso da liga com 2% de magnésio, promove um decréscimo na dureza.

REFERÊNCIAS

- 1 EL-KAHIR, 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**, 58 (2004), p. 1754-1760.
- 2 SAVASKAN, T.; TURKAL, M.S. Relationships between cooling rate, copper content and mechanical properties of monotectoid based Zn-Al-Cu alloys. **Materials Characterization**, 51(2003), p. 259-270.
- 3 SAVASKAN, T.; HEKIMOGLU, A.P.; PURÇEK, G. Effect of copper content on the mechanical and slide wear properties of monotectoid-based zinc-aluminium-copper alloys. **Tribology International**, 37 (2004), p. 45-50.
- 4 CHEN, T.J.; HAO, Y.; SUN, J.; LI, Y.D. Effects of Mg and RE additions on the semi-solid microstructure of a zinc alloy ZA27. **Science and Technology of Advanced Materials**, 4 (2003), p 495-502.
- 5 PRASAD, B.K. Wear response of zinc-based alloy containing silicon as influenced by material microstructure and test conditions. **Materials Science and Engineering A**, 367 (2003), p. 63-73.

- 6 SAVASKAN, T.; BICAN, O. Effects of silicon content on the microstructural features and mechanical and sliding wear properties of Zn–40Al–2Cu–(0–5)Si alloys. **Materials Science and Engineering A**, 404 (2005), p. 259–269.
- 7 CASOLCO, S.R.; NEGRETE-SÁNCHEZ, J.; TORRES-VILLASENOR, G. Influence of silver on the mechanical properties of Zn-Al eutectoid superplastic alloy. **Materials Characterization**, 51 (2003), p. 63-67.
- 8 AURAS, R.; SCHVEZOV, C. Solidification structures and properties of cast samples of Zinc-Aluminum alloys and compounds.
- 9 ZHU, Y.H., MAN H.C., LEE W.B. Exothermic reaction in eutectoid Zn–Al based alloys. **Materials Science and Engineering A**, 268 (1999), p. 147–153.
- 10 ZHU, Y.H.; LEE W.B.; TO, S. Tensile deformation-induced phase transformation in cast Zn-Al-based alloy (ZnAl₇Cu₃). **Materials Research Bulletin**, 38 (2003), p. 1851-1858.
- 11 METALS HANDBOOK. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials. **ASM.**, Vol.2.
- 12 ESCOBEDO, J.C.; RAMÍREZ, M.A.; CORTÉS, D.A.; FLORES, A.; CASTILLEJOS, H.; ACOSTA, F.A. Computer-aided cooling curve analysis (CA-CCA), applied to na Al-Si system. **Light Metals 1997. The Minerals, Metals and Materials Society**. Edited by Reidar Huglen, (1997).
- 13 EMADI, D., WHITING, L.V., NAFISI, S., GHOMASHCHI, R. Applications of the thermal analysis in quality control of solidification processes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 81 (2005), p. 235–242.