



# ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO NA MORFOLOGIA E NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE LIGAS DE MAGNÉSIO<sup>1</sup>

Sergio Luiz Telles Bartex<sup>2</sup>  
 André Gonçalves Garcia<sup>3</sup>  
 Breno Basso<sup>4</sup>  
 Jaime Alvares Spim<sup>5</sup>

## Resumo

O principal objetivo desse trabalho foi realizar o estudo comparativo do comportamento de duas ligas de Magnésio brutas de fusão, uma contendo Al-Zn (AZ) e outra com Al-Zn-La-Ca (ZAXLa) quando submetidas ao tratamento térmico de solubilização. Os experimentos variaram o tempo de exposição ao forno e o meio utilizado para resfriamento. Os resultados mostraram uma significativa redução da dureza da AZ91, mostrando a dissolução completa da fase  $\beta$  com o aumento do tempo de forno. Já a liga ZAXLa mostrou uma redução da dureza menos expressiva, mostrando-se mais estável quando submetido à elevadas temperaturas, mostrando-se coerente com a literatura.

**Palavras-chave:** Solubilização; Tratamento térmico; Microestrutura; Propriedades mecânicas.

## COMPARATIVE STUDY ABOUT THE THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON MORPHOLOGY AND MECHANICAL BEHAVIOR OF MAGNESIUM ALLOYS

### Abstract

The main objective of this work was to study the mechanical behavior of two different magnesium cast alloys, containing an Al-Zn (AZ) and another with Al-Zn-La-Ca (ZAXLa) when subjected to heat treatment for solubilization. The samples were exposure in different solubilization times and different cooling rates were used. The results have showed a significant reduction of hardness of AZ91, presenting complete solutionizing of the  $\beta$  phase with increasing processes time. Already the alloy ZAXLa showed a less significant reduction of hardness, it being more stable enough when exposed to high temperatures.

**Key words:** Solutionizing; Heat treatment; Microstructure; Mechanical properties.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Eng. Mecânico, Mestrando LAFUN – CT - EE - UFRGS.

<sup>3</sup> Tecg. Fabricação Mecânica, Mestrando LAFUN – CT - EE - UFRGS.

<sup>4</sup> Aluno de Graduação LAFUN – CT - EE - UFRGS.

<sup>5</sup> Prof. Adjunto, Coordenador LAFUN – CT - EE – PPGEM - UFRGS

## 1 INTRODUÇÃO

O Magnésio e suas ligas vêm ganhando cada vez mais destaque como materiais estruturais em aplicações de engenharia. Esse destaque deve-se a excelente relação peso/resistência apresentada por esse material e a atual demanda de nossa sociedade por aumento na eficiência energética e conseqüente redução dos níveis de emissões de gases poluentes. Nesse contexto a indústria automobilística vem apostando crescentemente nesse material. Porém as tecnologias e processos de fabricação apresentados dependem de estudo e desenvolvimento para a aplicação na indústria de transformação.

O processo de fundição de peças é o mais fundamental processo de fabricação de componentes metálicos. Entretanto, esse processo, devido aos requisitos de propriedades mecânicas necessárias para o emprego em determinadas situações requer um pós tratamento, amplamente conhecido no meio industrial como tratamento térmico.

O Magnésio e suas ligas, de forma geral, necessitam de um tratamento térmico de solubilização para alcançar as melhores propriedades para o processo de conformação mecânica. Esse fenômeno deve-se a solubilização dos átomos da segunda fase na matriz, reduzindo assim as propriedades de dureza e conseqüentemente aumentando a sua ductilidade.

Assim, o objetivo desse trabalho é comparar as alterações microestruturais sofridas ao longo do tratamento térmico de solubilização por duas ligas distintas de Magnésio e correlacioná-las com as propriedades mecânicas, buscando a otimização dos parâmetros desse tratamento.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química das duas ligas é mostrada na tabela 1. Lingotes comerciais com essa composição química foram colocados em um forno resistivo, aquecidos a 850°C e resfriados unidirecionalmente pela base, conforme descrito por Ferri.<sup>(1)</sup> Foi utilizada uma atmosfera protetora de Argônio para evitar a oxidação catastrófica da liga, uma vez que o Magnésio reage com o oxigênio quando aquecido a elevadas temperaturas.

**Tabela 1** – Composição química da liga (valores percentuais)

	Al	Ca	Mn	Zn	La	Mg
AZ91	8,50 - 9,50	-	0,17 - 0,40	0,45 - 0,90	-	Balanço
ZAXLa05413	4,00 - 5,00	0,80 - 1,00	-	0,50 (máx)	3,20 - 3,90	Balanço

Os corpos de prova foram extraídos na parte superior desse lingote (aproximadamente a 90 mm da base) e foi utilizada uma fresa para sua confecção. As dimensões dos corpos de prova foram: base quadrada de 10 mm e 15 mm de altura. A Tabela 2 mostra os parâmetros utilizados durante os tratamentos térmicos para ambas as ligas. Conforme indicado por Wang, Liu e Fan<sup>(2)</sup> a temperatura utilizada para a solubilização todos os experimentos foi de 413°C.

**Tabela 2 – Parâmetros utilizados durante a solubilização**

Experimento	Resfriamento	Tempo (h)
E1	No forno	24
E2	No ar	24
E3	Na água	24
E4	No ar	12
E5	No ar	24
E6	No ar	36
E7	No ar	48
E8	No ar	60

O forno utilizado foi um forno resistivo tipo mufla com ajuste automático de temperatura com controlador programável. Após a estabilização do forno na temperatura foram colocadas as peças. O tempo de aquecimento foi monitorado com a utilização de termopares tipo K e levou em torno de 15 minutos para estabilização.

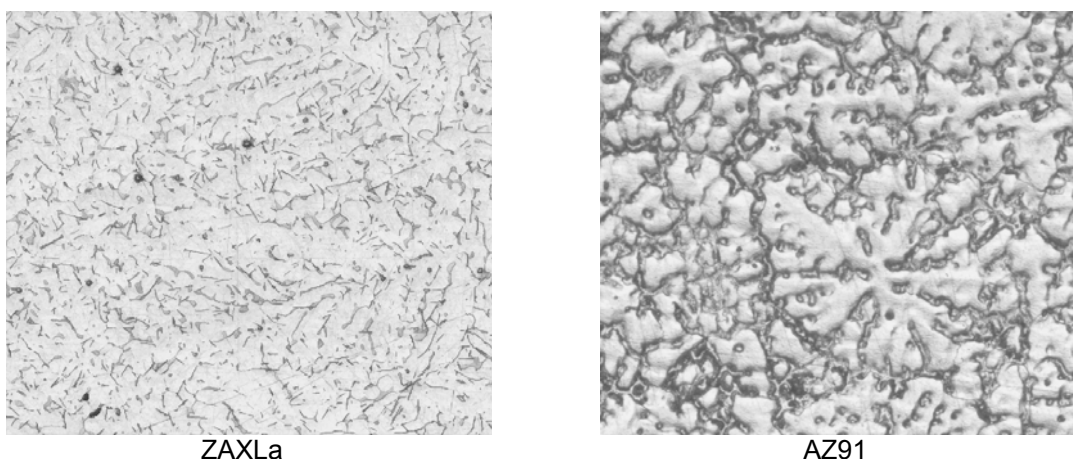
O ensaio de dureza foi realizado em um durômetro universal segundo a norma ASTM E 10-93 pelo método Brinell com esfera de aço de 2,5 mm de diâmetro e carga de 62,5 kg. A medida da indentação foi realizada com o auxílio de um software com analisador de imagem.

As amostras foram embutidas com resina cura a frio e lixadas na seqüência de #100, #200, #400, #600 e #1.200. Para o polimento foi utilizado alumina 1 µm e o ataque químico foi realizado com Nital 4%.

Os corpos de prova foram visualizados em um analisador de imagens com o auxílio de um microscópio óptico com captura de imagens.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 mostra as micrografias realizadas na amostra bruta de fusão. Na AZ91 pode-se notar uma matriz (clara) de Magnésio supersaturada com átomos de Al e Zn e a fase β (escura) formada por Al<sub>17</sub>Mg<sub>12</sub> precipitada nos contornos de grão.



**Figura 1 – Metalografia das amostras brutas de fusão. Ataque nital 4%, aumento 100x.**

Já a liga ZAXLA05413 apresenta uma matriz de Magnésio com o a fase eutética formada por Al<sub>2</sub>Ca e a fase acicular formada por Al<sub>11</sub>La<sub>3</sub> conforme estudado anteriormente por outros autores.<sup>(1,3)</sup>

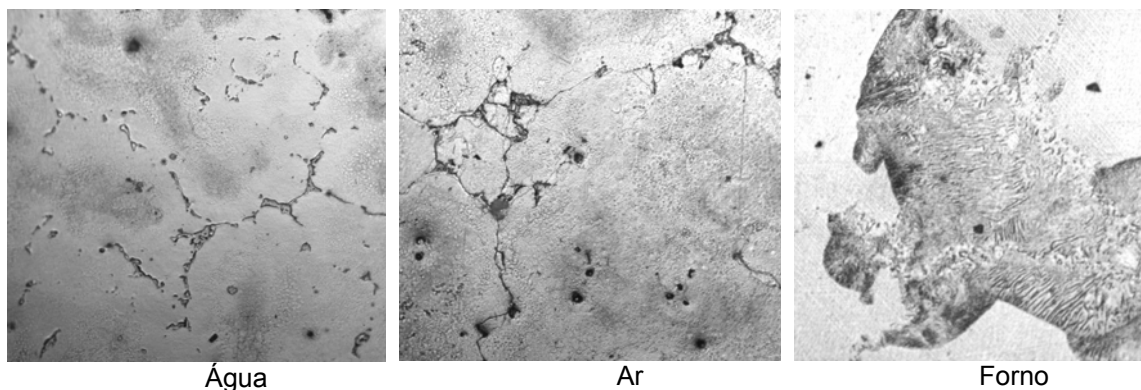
Primeiramente, foi realizada a solubilização nos dois materiais, porém variou-se a taxa de resfriamento, variando o meio utilizado para resfriar as peças. A Tabela 3 mostra o resultado dos ensaios de dureza realizados nos corpos de prova.

**Tabela 3** – Medidas de dureza (valores em Brinell) nos três meios utilizados para o resfriamento

Resfriamento	na <b>Água</b>		no <b>AR</b>		no <b>Forno</b>	
Composição	<b>ZAX1a</b>	<b>AZ91</b>	<b>ZAX1a</b>	<b>AZ91</b>	<b>ZAX1a</b>	<b>AZ91</b>
Média	64,1	62,7	61,8	59,1	63,1	66,2
Desvio Padrão	1,7	1,6	1,9	3,5	3,2	5,0

Os resultados não mostram diferença significativa na dureza apresentada pelas peças quando comparados os diferentes meios de resfriamento. De maneira geral, comparando as peças brutas de fusão com as tratadas, houve uma queda na dureza, porém entre os diferentes meios não há significativa mudança.

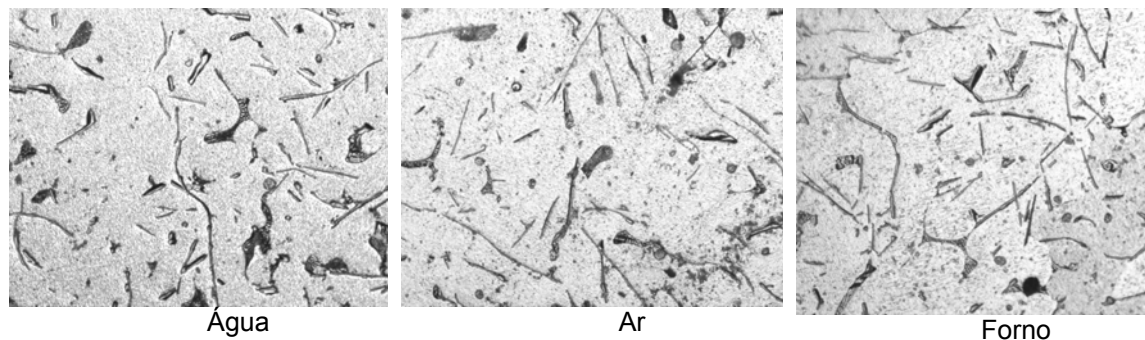
Porém, ao analisar a microestrutura das peças, nota-se grande diferença na morfologia entre os diferentes meios de resfriamento, conforme a Figura 2. Para as amostras de AZ91, o resfriamento no forno (mais lento) causou um acentuado crescimento de grão. Pode-se notar também que com o resfriamento mais acentuado (resfriamento na água) houve uma dissolução completa da fase  $\beta$  na matriz. O resfriamento intermediário (no ar) mostrou uma boa dissolução da segunda fase na matriz, sendo, porém menos efetivo. Esse resultado pode ser explicado pelo tempo necessário para o resfriamento na peça. No resfriamento no forno, os átomos já dissolvidos na matriz têm tempo e energia suficiente para se difundir e coalescer. Já no resfriamento rápido, o processo é parado, quase que instantaneamente, não havendo assim tempo para difusão dos elementos na matriz. O resfriamento intermediário (ao ar) consegue reduzir o processo de difusão, mas não por completo, como pode-se notar na pouca quantidade de fase  $\beta$  presente no contorno de grão.



**Figura 2** – AZ91 Solubilizado 24 h (413°C) resfriado em água, ar e forno. Aumento de 200x.

Já para a liga ZAXLa05413, o tratamento térmico aplicado e os diferentes meios de resfriamento, não causaram mudanças apreciáveis conforme mostra a Figura 3. Nota-se que o meio de resfriamento praticamente não tem influência na morfologia apresentada por essa liga após a solubilização. A baixa difusividade do Lantânio na matriz Magnésio é a principal causa da baixa mobilidade e pouca mudança na morfologia. Segundo Zhu et al.<sup>(4)</sup> essa baixa mobilidade dos átomos de Lantânio na matriz é o principal mecanismo responsável pelo aumento da resistência

da liga em elevadas temperaturas, sendo até mais importante do que o efeito de clivagem descrito por Anyanwu et al.<sup>(5)</sup>



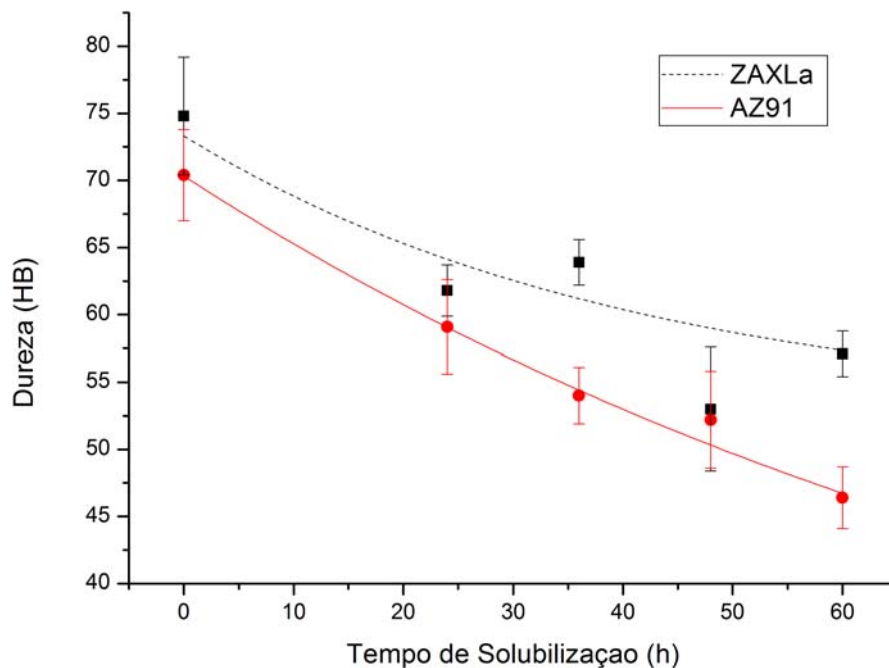
**Figura 3** – ZAXLa Solubilizado 24 h (413°C) resfriado em água, ar e forno. Aumento de 200x.

Pode-se notar, entretanto, que a fase lamelar (eutético formado por  $Al_2Ca$ ) responde ao tratamento, como pode-se notar nas micrografias. A fase lamelar, parece ter sido separada e formado pequenos glóbulos, parecendo-se com o processo de esferoidização.

Após o teste realizado com as taxas de resfriamento, e com os resultados obtidos mostrando não haver diferença significativa, optou-se pelo resfriamento ao ar para os testes seguintes. Esse resfriamento não é tão brusco como na água (que pode acarretar problemas de trinca ou empenamento em peças) e não tão demorado como no forno (o que inviabilizaria a operação em modo industrial, pelo longo tempo requerido). Além disso, os resultados do ensaio de dureza mostram pouca diferença entre os diferentes meios. Por outro lado as metalografias desse modo de resfriamento mostraram-se mais adequadas aos propósitos propostos.

Partiu-se então para os testes variando o tempo de exposição da peça no forno e qual sua influência nas propriedades mecânicas e metalúrgicas nas ligas. A Figura 4 mostra a dureza Brinell em função do tempo de exposição ao forno. Mostra-se claramente a redução da dureza de ambas as ligas se comparadas ao estado bruto de fusão.

Com os dados obtidos nos experimentos pode-se traçar as curvas de interpolação e, através de métodos estatísticos pode-se gerar as seguintes expressões empíricas para representar o processo:

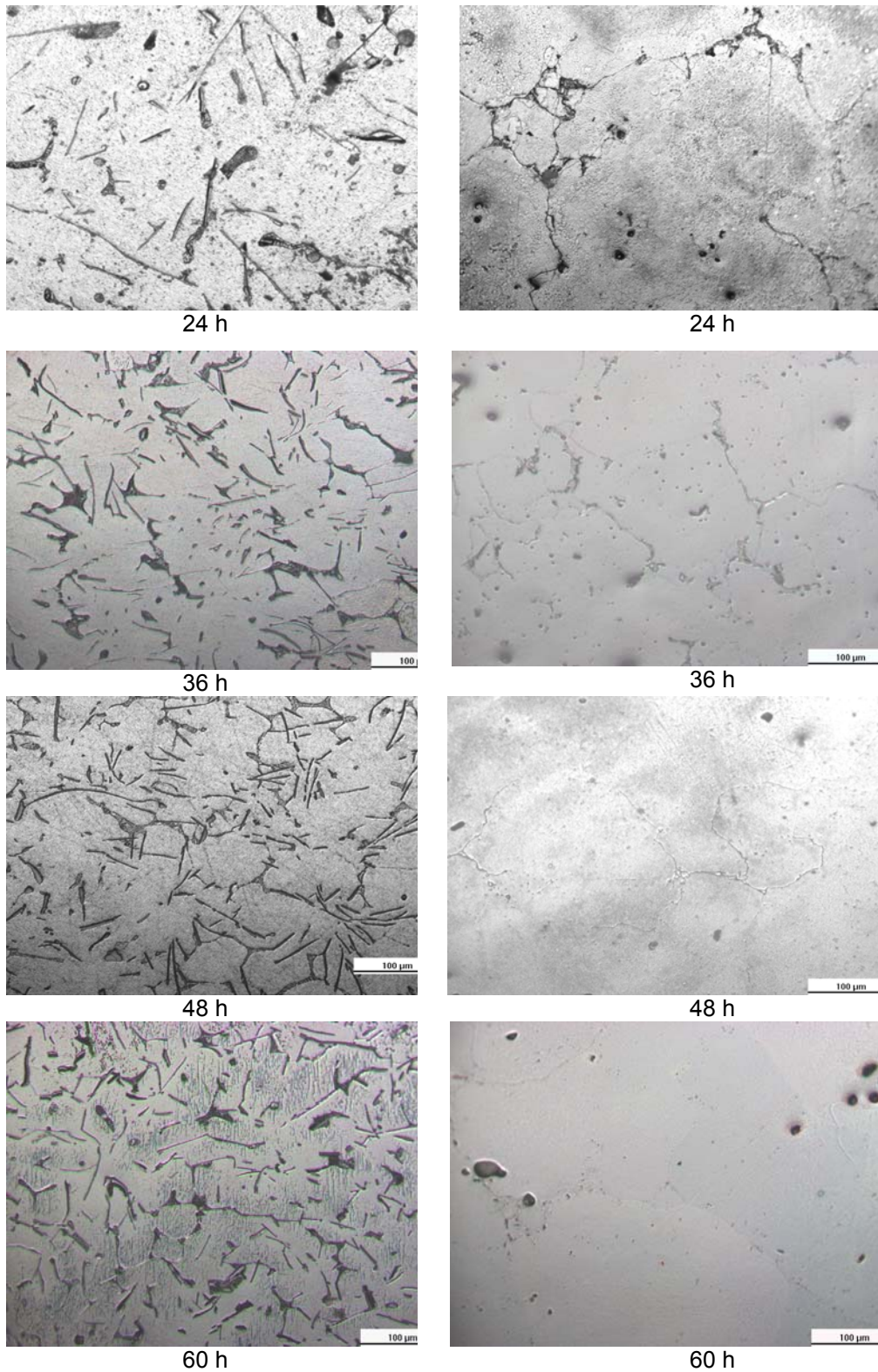


**Figura 4** – Gráfico correlacionando a dureza com o tempo de exposição ao forno ( $T = 413^{\circ}\text{C}$ ).

Porém, a AZ91 apresentou uma queda mais acentuada nos valores de dureza. Isso se deve a solubilização da fase  $\beta$  na matriz. Com o aumento do tempo de exposição ao forno a dureza reduz drasticamente. Entretanto, o AZ91 não é resistente a exposição a elevadas temperaturas conforme descrito por Anyanwu et al.<sup>(5)</sup> Nos experimentos realizados até 24 h, não se notou modificações macroscópicas nas peças. Porém, a partir de 36 horas de forno, começou um processo de degradação da peça de AZ91. Provavelmente, a elevada temperatura e o contato com o ar causou uma reação de oxidação na superfície dessas peças, o que mostra a impossibilidade de exposição desse material durante longos períodos de tempo na temperatura de processo ( $413^{\circ}\text{C}$ ) utilizada.

Embora a menor dureza seja atingida para a AZ91 em 60 h, os resultados mostram que essa liga tem seu tempo de exposição ao forno para a temperatura de  $413^{\circ}\text{C}$  de no máximo 24 h. Após esse período, diversas modificações macroscópicas podem ser notadas, como empenamento e oxidação superficial.

Já as amostras de ZAXLa05413 mostraram-se bem mais estáveis à exposição a temperatura. Entretanto, a redução nas propriedades mecânicas são bem menos pronunciadas do que na AZ91. Analisando as micrografias pode-se notar que não existem alterações consideráveis ao longo do tempo, a não ser as mencionadas anteriormente no eutético. Ainda assim, esse material teve uma redução no nível de dureza se comparado ao estado bruto de fusão. A figura abaixo mostra as metalografias realizadas nas amostras.



**Figura 5** – Metalografia apresentada em função do tempo de exposição: ZAXLa (esquerda) e AZ91 (direita). Aumento 200x, ataque nital 4%.

#### 4 CONCLUSÕES

O estudo comparativo entre duas diferentes ligas de magnésio durante o processo de solubilização foi realizado.



Os resultados mostraram não haver diferença significativa entre o comportamento mecânico apresentado pelos materiais resfriados em diferentes meios de resfriamento. Porém as metalografias mostraram diferenças significativas, tendo a liga AZ91 apresentado excessivo crescimento de grão; Já a liga com Lantânio não apresentou esse comportamento.

A redução da dureza apresentada pelos corpos de prova em função do tempo de exposição no forno foi verificada. A AZ91 apresentou maior redução nos níveis de dureza devido a solubilização quase completa da segunda fase na matriz; Já a liga ZAXLa apresentou uma redução menor em sua dureza, pois as agulhas formadas pelo Alumínio e Lantânio apresentam elevada estabilidade térmica, fato comprovado na resistência apresentada ao longo do experimento.

O período de 24 h de forno apresentou os melhores resultados diminuindo a dureza de ambas os materiais, sendo que para períodos maiores de tempo as peças de AZ91 embora continuem mostrando uma redução dos níveis de dureza começam a apresentar deformações e defeitos superficiais. Já para a amostra contendo Lantânio, um aumento do tempo de processamento não traz significativos avanços no comportamento mecânico.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro concedido.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 Ferri, T.V., Figueiredo, A.P., Ferreira, R.F., Hormaza, W., Santos, C.A., Spim, J.A., Mechanical properties as a function of microstructure in the new Mg–Al–Ca–La alloy solidified under different conditions, *Materials Science and Engineering A* 527, 4624–4632, (2010).
- 2 Wang, Y., Liu, G., Fan, Z., Microstructural evolution of rheo-diecast AZ91D magnesium alloy during heat treatment, *Acta Materialia* 54, 689–699, (2006).
- 3 Jinghui Zhang, Milin Zhang, Jian Meng, Ruizhi Wu, Dingxiang Tang, Microstructures and mechanical properties of heat-resistant high-pressure die-cast Mg–4Al–xLa–0.3Mn (x = 1, 2, 4, 6) alloys, *Materials Science and Engineering A* 527 2527–2537, (2010).
- 4 Zhu, S.M., Gibson, M.A., Easton, M.A., and Nie, J.F., The relationship between microstructure and creep resistance in die-cast magnesium–rare earth alloys, *Scripta Materialia* 63 (2010) 698–703.
- 5 Anyanwu, I.A., Kamado, S., Honda, T., Kojima, Y., Takeda, S., Ishida, T. *Mater. Science Engineering, A* 380 (2004) 93–99.