

## ENERGIA DE FORMAÇÃO DE VACÂNCIAS EM LIGAS DILUÍDAS DE ALUMÍNIO

Carlos Roberto Sobreira BEATRICE\*  
Mário CILENSE\*  
Waldir GARLIPP\*  
Antonio Tallarico Vicente ADORNO\*

---

**RESUMO:** Determinou-se a energia de formação aparente de uma vacância em soluções sólidas diluídas de Al-Mg com composições de 0,37% at Mg e 0,72% at Mg, a partir de medidas da variação da resistividade elétrica em função da temperatura de têmpera. Os valores obtidos de  $(0,62 \pm 0,03)$  eV e  $(0,54 \pm 0,02)$  eV são menores que a energia de formação de uma vacância no alumínio puro e diminuem com o aumento da porcentagem atômica de magnésio.

**UNTERMOS:** Resistividade elétrica; solução sólida diluída de Al-Mg; têmpera de vacâncias; energia de formação de vacâncias.

---

## INTRODUÇÃO

A concentração de equilíbrio de defeitos é obtida em um cristal por difusão a partir de superfícies internas e externas e também em direção a elas. Estes defeitos são continuamente produzidos e aniquilados nessas superfícies por causa da grande mobilidade que possuem e, portanto, sua concentração é mantida em equilíbrio dinâmico no cristal. A qualquer temperatura, a velocidade com que é estabelecida uma nova concentração de equilíbrio de defeitos depende do livre caminho médio de percurso entre fontes e sumidouros de defeitos, da sua energia de migração e da temperatura.

Nos metais com estruturas cfc, ccc e provavelmente na maior parte dos metais com estrutura hcp, as vacâncias são os defeitos predominantes em equilíbrio térmico<sup>1</sup>, mas a

---

\* Departamento de Físico-Química - Instituto de Química - UNESP - 14800 - Araraquara - SP.

sua concentração é em geral muito pequena à temperatura ambiente. Para se estudar sua influência nas propriedades dos metais é conveniente produzi-los em grande concentração fora do equilíbrio, sendo a temperatura um dos principais métodos para se conseguir isso.

O propósito da operação de temperatura é permitir que a amostra fique em equilíbrio térmico a uma temperatura elevada, denominada temperatura de temperatura  $T_q$ , e então esfriá-la a uma temperatura menor, com rapidez suficiente para reter a concentração de defeitos existente na temperatura  $T_q$ .

O objetivo deste trabalho foi o de se determinar as energias de formação de vacâncias em soluções sólidas diluídas de Al-Mg (0,37% at Mg e 0,72% at Mg), por meio da variação da resistividade elétrica residual ( $\Delta\rho$ ) acrescida à liga imediatamente após o tratamento de temperatura em função da temperatura de temperatura, descrita pela equação<sup>2</sup>:

$$\Delta\rho = A \exp(-E_f / k T_q) \quad (1)$$

onde a constante A reúne os termos de entropia ou fator entrópico e  $E_f$  é a quantidade pela qual a energia interna aumenta quando os defeitos são introduzidos, denominada energia de formação dos defeitos.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Corpos de prova foram preparados em forma de fios retirados das duas ligas referidas anteriormente, com 74,50 mm de comprimento e 0,56 mm de diâmetro, em média. Colocados em ampolas de pìrex com atmosfera rarefeita de argônio, para se evitar oxidação, foram recozidos a 500°C durante 40 horas e esfriados lentamente, com a finalidade de se aliviar as tensões mecânicas adquiridas e também dar uma granulação cristalina grosseira na qual a área total dos contornos de grão fosse a menor possível para se reduzir sua capacidade de atuar como sumidouro de vacâncias (Fig. 1).

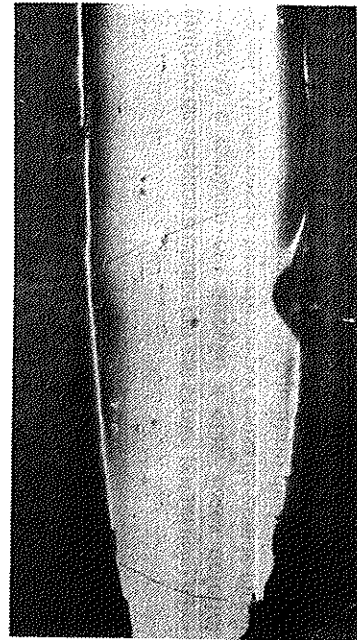


FIG. 1 - Micrografia da amostra  
- Corte longitudinal  
- Aumento: 133x  
- Polimento eletrolítico

Após este recozimento, as amostras foram temperadas de temperaturas entre 316°C e 511°C, em um banho de salmoura a -2°C e em seguida colocadas em um dispositivo para a medida da diferença de potencial elétrico a 0°C, utilizando-se a técnica de BAUERLE & KOEHLER<sup>3</sup>, que adota o método de medida de resistência elétrica diferencial do corpo de prova em relação a um fio padrão de prata com dimensões invariáveis.

A resistividade elétrica residual assim obtida foi sempre computada a partir de uma média da diferença de potencial elétrico conforme o esquema da Fig. 2 e a descrição da sua operação.

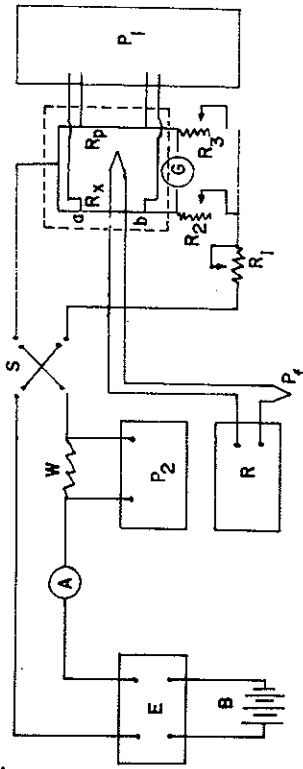


FIG. 2 - Circuito utilizado para as medidas da d.d.p.

O potenciômetro  $P_2$  (precisão 10<sup>-5</sup>V) permitia medir a corrente elétrica gerada na bateria B(12V) com precisão superior a 10<sup>-6</sup>A. A chave S possibilitava inverter o sentido da corrente que passava pelos corpos de prova, com a finalidade de eliminar a influência de forças eletromotrizes e correntes parasitas que pudessem interferir nas medidas.

A igualdade de corrente elétrica que passava pelos corpos de prova foi verificada pelo galvanômetro G, cujo controle era feito através dos reostatos  $R_2$  e  $R_3$ . O reostato  $R_1$  permitia controlar a corrente desejada no circuito (0,40A), o que era verificado pelo equilíbrio do potenciômetro  $P_2$ .

O potenciômetro  $P_1$  (precisão 10<sup>-7</sup>V) comparava a diferença de potencial entre  $R_x$  (corpo de prova) e  $R_p$  (fio padrão de prata), fornecendo as leituras em volts.

## RESULTADOS

A Fig. 3 mostra os gráficos do logaritmo da variação relativa da resistividade elétrica ( $\Delta\rho/\rho_0$ ) em função do inverso da temperatura de temperatura ( $1/T_q$ ), para as duas ligas examinadas, onde  $\Delta\rho$  é a diferença entre cada valor da resistividade  $\rho$  após a temperatura e o valor da resistividade para a amostra recozida  $\rho_0$ .

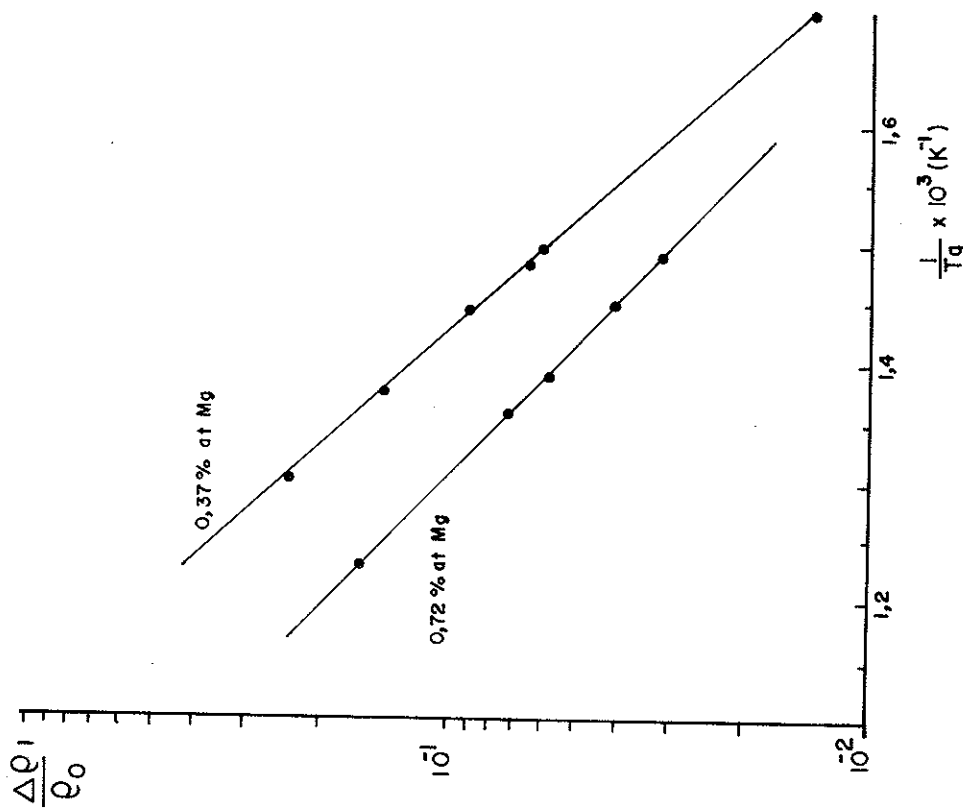


FIG. 3 - Variação da resistividade relativa das ligas de Al-Mg em função do inverso da temperatura absoluta de têmpera.

Comparando-se as equa es das retas obtidas a partir da Fig. 3 com a equa o 1 na forma logar mica, que descreve o aumento na resistividade elétrica  $\Delta\rho$  imediatamente após a têmpera, obteve-se as energias de forma o das vacâncias nas solu es sólidas diluídas de Al-Mg, indicadas na Tabela 1.

TABELA 1 - Energias de forma o obtidas

% at Mg	$E_f$ (eV)
0,37	$0,62 \pm 0,03$
0,72	$0,54 \pm 0,02$

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O exame da Fig. 3 mostra que o aumento da resistividade elétrica devido   têmpera   uma fun o exponencial do inverso da temperatura de têmpera e que as energias de forma o das vacâncias são menores que a energia de forma o das vacâncias no alumínio puro, encontrada na literatura<sup>4,5</sup> e também por estes autores em um trabalho a ser publicado brevemente onde se utilizou a técnica de equilíbrio térmico. Além disso, as energias de forma o de vacâncias decrescem com o aumento da porcentagem atômica de magnésio, estando de acordo com o valor de  $(0,521 \pm 0,02)\text{eV}$  obtido<sup>6</sup> para a liga Al - 0,87 at Mg.

Os resultados obtidos para as energias de forma o de uma vacância, nestas solu es sólidas diluídas de Al - (0,37 e 0,72)% at Mg, devem se referir não são a vacâncias livres mas também àquelas que vêm a formar agrupamentos com átomos solutos de Magnésio<sup>7,8,9</sup> sendo então denominadas energias de forma o aparentes.

BEATRICE, C. R. S. *et alii* - Formation energy of vacancy in dilute aluminium alloys. *Ecl. Quím.*, S o Paulo, 13: 13-18, 1988.

ABSTRACT: The apparent formation energy of a vacancy in dilute solid solution of Al-Mg alloys, with compositions of 0,37% at Mg and 0,72% at Mg, was determined by electrical resistivity measurement immediately after quenching. The computed values  $(0,62 \pm 0,03)\text{eV}$  and  $(0,54 \pm 0,02)\text{eV}$ , are lower than the value for the pure aluminium and decrease with the increase of the magnesium content.

KEY-WORDS: Electrical resistivity; dilute solid solution of Al-Mg; quenched-in vacancies; formation energy of a vacancy.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KOVÁCS, I. & EL SAYED, H. - *J. Mat. Sci.*, **11**, 529, (1976).
2. DAMASK, A. C. & DIENES, G. J. - *Point defects in metals*, Gordon and Breach, New York, 1971.
3. BAUERLE, J. E. & KOEHLER, J. S. - *Phys. Rev.*, **107**, 1493 (1957).
4. TAKAMURA, J.; FURUKAWA, K.; KUWANA, N. & TAJIMA, R. - *27th Annual Meeting, The Physical Society of Japan*, Hiroshima, 1972.
5. DOYAMA, M. - *Studies of point defects by positrons and positive muons*, Tokyo University Press, 1982.
6. BEATRICE, C. R. S.; CILENSE, M.; ADORNO, A.T.V. & GARLIPP, W. - *Ecl. Quím.*, **9**, 31 (1984).
7. HEHENKAMP, Th. - *Point defects and defect interactions in metals*, Tokyo University Press, 1982.
8. FAUPEL, F. & HEHENKAMP, Th. - *Scr. Metall.*, **18**, 597 (1984).
9. FAUPEL, F. & HEHENKAMP, Th. - *Acta Metall.*, **35**, 771 (1987).

Recebido em 23/05/88