

PURIFICAÇÃO DE METAIS POR FUSÃO ZONAL

Carmo Heinemann

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

Divisão de Engenharia/Departamento de Metalurgia/Centro de Tecnologia

Av. Bento Gonçalves, 9500 / Cx.P. 15.021 CEP 91501-970 - Porto Alegre - RS / Br

Fone / FAX: (0xx51) 3316-6142 carmoh@exatas.unisinos.br

Cândida Cristina Klein

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

Divisão de Engenharia/Departamento de Metalurgia/Centro de Tecnologia

Av. Bento Gonçalves, 9500 / Cx.P. 15.021 CEP 91501-970 - Porto Alegre - RS / Br

Fone / FAX: (0xx51) 3316-6142 candidaklein@ig.com.br

Jaime Álvares Spim Júnior

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

Divisão de Engenharia/Departamento de Metalurgia/Centro de Tecnologia

Av. Bento Gonçalves, 9500 / Cx.P. 15.021 CEP 91501-970 - Porto Alegre - RS / Br

Fone / FAX: (0xx51) 3316-6142 spim@ct.ufrgs.br

Resumo

Neste trabalho teve-se como objetivo estudar a influência da velocidade de avanço da zona fundida no processo de purificação de metais de baixo e médio ponto de fusão pelo processo de fusão zonal. O trabalho justifica-se pela importância dos metais de alta pureza nas aplicações tecnológicas e pela necessidade de otimização do processo de refino zonal através da realização de investigações científicas de fronteira. Desenvolveu-se um modelo numérico para a avaliação dos parâmetros interferentes no processo. Foi dada ênfase à velocidade de avanço da zona fundida. Com base no modelo teórico, construiu-se um equipamento de fusão zonal constituído, basicamente, de um tubo de quartzo dentro do qual se aloja o cadinho de grafite contendo o metal a ser purificado e que pode ser evacuado ou preenchido com gás inerte, de um motor com engrenagem redutora, de polias de vários diâmetros e de um forno de aquecimento com potência variável e controlada. A velocidade é estabelecida pela conjugação das polias de diferentes diâmetros, uma acoplada ao sistema redutor do motor e outra, ao eixo sem-fim transportador do forno, interligadas por uma correia. Os resultados experimentais indicam que uma velocidade de avanço menor da zona fundida apresenta-se mais eficiente na primeira passada. Esta velocidade, segundo a literatura, pode ser aumentada à medida que a concentração da impureza diminui com o número de passadas, desde que não ultrapasse o critério do super-resfriamento constitucional. O modelo teórico pode ser usado como uma ferramenta matemática para simulação do refinamento zonal.

Palavras-chave: Modelagem numérica, fusão zonal, purificação de metais.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Hashimoto⁽¹⁾, muitas propriedades dos materiais são muito sensíveis à presença de impurezas, mesmo em quantidades equivalentes a traços. Por esta razão, nos últimos anos, a necessidade de materiais de elevada pureza tem sido aumentada, tanto na pesquisa básica quanto nas aplicações práticas.

Ho⁽²⁾ ressalta que uma quantidade significativa de investigações, enfocando diversos aspectos de aplicações do refino zonal, tem aparecido na literatura durante as últimas décadas, como, por exemplo, o uso do refino zonal para purificação e crescimento. Citam-se: GaAs, para aplicação em detectores de raios gama, investigados por Henry⁽³⁾ e King⁽⁴⁾; TlBr, para aplicação em detectores de radiação, estudado por Hitomi⁽⁵⁾; SCN, para ser utilizado em padrões térmicos, analisado por Rubinstein⁽⁶⁾; Te, para ser utilizado em moduladores eletro-ópticos, detectores de radiação e câmeras de visão noturna, pesquisado por Munirathnam⁽⁷⁾, além de ser utilizado em pesquisas básicas sobre o coeficiente de distribuição realizadas por Kuchar⁽⁸⁾ e Drápala⁽⁹⁾.

A fusão zonal é um processo altamente eficiente para a purificação de metais, semicondutores e substâncias orgânicas e inorgânicas. Foi originalmente proposto por Pfann⁽¹⁰⁾ e teve como primeira importante aplicação a purificação do germânio para a fabricação de transistores. Conforme Ho⁽¹¹⁾, o refinamento zonal baseia-se no bem conhecido fato de que um material difere em composição, após sua solidificação, de sua correspondente fase líquida. Assim, ao passar uma pequena zona fundida através de um lingote sólido, esta tem duas interfaces sólido-líquido onde, na face de fusão, o material sólido é simplesmente fundido e misturado ao conteúdo da fase líquida. Por outro lado, na interface de solidificação, a concentração de soluto é, em geral, diferente no sólido e no líquido adjacente. Garcia⁽¹²⁾ e Ho⁽¹¹⁾ relatam que, se o soluto diminui a temperatura de fusão do solvente, então sua concentração no sólido será menor que no líquido e haverá rejeição do mesmo durante a solidificação. Se, no entanto, a temperatura de fusão aumenta, então a concentração no sólido será maior que no líquido e, em consequência, ocorrerá empobrecimento de soluto no líquido. Garcia⁽¹²⁾ ainda complementa que no primeiro caso haverá o deslocamento das impurezas para a extremidade final da amostra (quando o coeficiente de distribuição de soluto k for menor que 1) e, no segundo, a concentração será maior na extremidade inicial (quando k for maior que 1). Em ambos os casos resultará uma região intermediária com maior pureza.

De acordo com Silva⁽¹³⁾, o refino zonal com múltiplas passadas consiste numa série de fornos compactos e espaçados que são colocados em movimento relativo em relação a um longo lingote sólido, levando a uma redistribuição do soluto neste lingote. Ho⁽²⁾ e Ho⁽¹¹⁾ ressaltam que a vantagem do refino zonal com múltiplas passadas é o ganho em tempo de operação, pois a cristalização seguinte inicia antes que a precedente foi completada.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo estudar a influência da velocidade de avanço da zona fundida no processo de purificação de metais de baixo e médio ponto de fusão pelo processo de fusão zonal. Ele justifica-se pela importância dos metais de alta pureza nas aplicações tecnológicas e pela necessidade de purezas cada vez mais elevadas na realização de pesquisas científicas de ponta, além do desenvolvimento de técnicas de purificação mais eficientes, mais rápidas e menos onerosas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. O processo de fusão zonal

Ho⁽²⁾ descreve que a distribuição de impurezas ao longo do lingote, no processo de fusão zonal, depende do valor do coeficiente de distribuição, do comprimento da zona líquida e do número de passadas. Além disso, segundo Hashimoto⁽¹⁾ e Rodway⁽¹⁴⁾, num processo de purificação que utiliza o fenômeno da segregação durante a solidificação, o nível de pureza atingido depende do grau de pureza do material de partida.

Silva⁽¹³⁾ verificou que, para aumentar a eficiência do processo de refinamento por zona, no que se refere ao consumo de energia, ao tempo de processamento, ao grau de purificação e aos custos de produção, necessita-se uma compreensão do mecanismo responsável pela redistribuição das impurezas ao longo do processo, ao qual os parâmetros-chave vinculados são o coeficiente de distribuição (k) e o coeficiente de distribuição efetivo (k_{ef}).

O coeficiente de distribuição (k) é definido como a razão entre a concentração de soluto no sólido (C_s) e a correspondente concentração de soluto no líquido (C_l). O coeficiente de distribuição efetivo, por sua vez, é definido por:

$$k_{ef} = \frac{k}{k + (1 - k) \cdot \exp\left(-v \frac{\delta}{D}\right)} \quad (1)$$

onde D é a difusividade da impureza no líquido, δ é a espessura da camada de difusão e v é a velocidade de avanço da zona líquida.

Como $k < k_{ef} < 1$ nota-se que o ideal, em termos de purificação, seria que k_{ef} fosse o mais próximo de k . Uma alternativa é impor uma velocidade de avanço mínima da zona fundida. Isto implicará num maior tempo de processamento e é justamente o contrário o que se pretende.

Elevadas velocidades de deslocamento da zona líquida são recomendadas, pois permitem maior número de passadas por unidade de tempo, mas há uma limitação imposta pelo superesfriamento constitucional, cujo critério é dado por:

$$\frac{v}{G} \leq \frac{D \cdot k}{m \cdot C_s (1 - k)} \quad (2)$$

onde G é o gradiente térmico no líquido e C_s é a concentração de soluto no sólido, na interface de solidificação e m é a declividade da linha liquidus.

Assim, um aumento de G e/ou uma redução de C_s possibilitam um aumento da velocidade, até um determinado limite, sem instabilizar a interface de solidificação. Isto abre a possibilidade de otimização através da imposição de velocidades variáveis ao longo de cada passada ou durante uma mesma passada, pois o perfil de distribuição da impureza é variável durante o processo.

Outros parâmetros são analisados, com vistas à otimização: Garcia⁽¹²⁾ analisa δ , a influência do comprimento da zona líquida é descrita por Rodway⁽¹⁴⁾, Ho⁽¹¹⁾ e Ho⁽²⁾.

Spim⁽¹⁵⁾ ressalta que, pela dificuldade em estabelecer critérios gerais em função das particularidades de cada material a ser purificado e da alternativa de purificação escolhida, é importante desenvolver um modelo numérico que permita quantificar os perfis de distribuição de impurezas em função dos parâmetros adotados.

3.2. Modelo numérico proposto

Segue-se o desenvolvimento do modelo numérico para o refino zonal para a primeira passada, segundo Garcia⁽¹²⁾. A avaliação da distribuição de soluto ao longo da amostra baseia-se nas seguintes variáveis e hipóteses:

- a) O coeficiente de distribuição k é constante;
- b) O comprimento da zona líquida (l) e sua velocidade de deslocamento (v) são constantes em cada passada;
- c) A difusão de impurezas no sólido é desprezível;
- d) A concentração de soluto na zona líquida é uniforme;
- e) O sólido e o líquido têm densidades iguais;
- f) A concentração inicial C_0 é uniforme ao longo da barra.

São utilizadas as seguintes variáveis adimensionais:

$$X = x/L \leq 1 \quad \text{e} \quad Z = l/L < 1$$

onde x é a posição ao longo da barra, X é a distância relativa a partir da extremidade inicial da barra, l é o comprimento da zona líquida, L é o comprimento total da barra e Z é o comprimento relativo da zona líquida.

3.2.1. Distribuição de soluto na primeira passada

Ao assumir a área da seção transversal unitária e que para cada avanço de um elemento de volume dx , da zona líquida, ocorre a solidificação também de um elemento dx , o seguinte balanço de massas pode ser montado:

$$(C_0 - C_{si})dx = dC_L l \quad (3)$$

onde C_{si} é a concentração do sólido formado na interface sólido/líquido, e x a distância a partir da extremidade esquerda da barra. A quantidade de soluto que deixa a zona líquida em função da solidificação é $C_{si}dx$, enquanto a quantidade que é agregada à zona líquida na interface de fusão é $C_0 dx$. A diferença entre as duas representa a quantidade efetivamente incorporada à zona líquida, $dC_L l$. Como $C_{si} = kC_L$, pode-se rearranjar a Equação (3) na forma:

$$(C_0 - kC_L)dx = dC_L l \quad (4)$$

Ao reagrupar as variáveis comuns, a Equação (4) pode ser integrada:

$$\int_{C_0}^{C_L} \frac{dC_L}{(C_0 - kC_L)} = \int_0^x \frac{dx}{l} \quad (5)$$

tendo como solução:

$$C_s = C_0 \left[1 - (1 - k) \exp\left(-k \frac{x}{l}\right) \right] \quad (6)$$

Essa última expressão permite o cálculo do perfil de soluto na primeira passada do refino zonal, da posição $x = 0$ até a posição $x = L - l$, ou seja, de $X = 0$ a $X = 1 - Z$. Substituindo as grandezas adimensionais X e Z , na Equação (6), obtém-se:

$$C_s = C_0 \left[1 - (1 - k) \exp\left(-k \frac{X}{Z}\right) \right] \quad (7)$$

A partir da posição $x = L - l$ ($X = 1 - Z$), até a extremidade final da barra, $x = L$ ($X = 1$), tem-se uma situação de solidificação normal, já que todo o material restante se encontra no estado líquido e conseqüentemente o perfil decorrente da solidificação entre estas posições deve ser calculado pela Equação (8):

$$C_s = kC_0^* (1 - f_s)^{(k-1)} \quad (8)$$

onde f_s é a fração solidificada da barra, C_0^* é a composição uniforme do líquido quando a zona líquida chega à extremidade final da barra, e que pode ser determinada pela Equação (7):

$$C_0^* = \frac{C_{si}}{k} = \frac{C_0}{k} \left\{ 1 - (1-k) \exp \left[-k \frac{(L-l)}{l} \right] \right\} \quad (9)$$

onde C_{si} é a composição do sólido na interface de solidificação na posição $x = L - l$.

Introduzindo-se a Equação (9) na Equação (8), redefinindo f_s e lembrando que deve assumir valores entre 0 e 1 respectivamente para as posições $x = L - l$ e $x = L$, tem-se:

$$C_s = C_0 \left\{ 1 - (1-k) \exp \left[-k \frac{(L-l)}{l} \right] \right\} \left\{ 1 - \left[\frac{x - (L-l)}{l} \right] \right\}^{k-1} \quad (10)$$

Substituindo as grandezas adimensionais X e Z , na Equação (10), obtém-se:

$$C_s = C_0 \left\{ 1 - (1-k) \exp \left[-k \frac{(1-Z)}{Z} \right] \right\} \left\{ 1 - \left[\frac{X - (1-Z)}{Z} \right] \right\}^{k-1} \quad (11)$$

A Equação (11) permite quantificar o perfil de soluto na última porção da barra.

4. MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

4.1. Materiais utilizados

O material escolhido para testar o sistema de purificação foi o alumínio devido, principalmente, à facilidade de sua manipulação, suas propriedades já bem conhecidas, seu médio ponto de fusão (933K) e sua aplicação na indústria eletrônica, quando com elevada pureza.

As três barras utilizadas foram cortadas de um mesmo lote de cabos para linhas de transmissão, tendo comprimento de 0,15m, cada.

4.2. Método

O método utilizado é o da fusão zonal. Este consiste em produzir uma zona líquida numa barra metálica e movimentá-la de uma extremidade à outra da mesma.

4.3. Equipamento

O equipamento é constituído, basicamente, por um forno resistivo, um tubo de quartzo e um motor com engrenagem redutora.

A barra de alumínio é alojada num cadinho de grafite e este, por sua vez, é colocado num tubo de quartzo. A zona líquida é obtida através de um forno resistivo construído com fio Kanthal de 1,5 mm de diâmetro, espiralado, com 1×10^{-2} m de diâmetro e embutido em cimento refratário, formando uma circunferência de 5×10^{-2} m de diâmetro que envolve o tubo de quartzo. A potência do forno é de 800 W e a resistência elétrica vale 2Ω . O tubo de quartzo tem 4×10^{-2} m de diâmetro e nas extremidades tem flanges para permitir o controle da atmosfera interna. A atmosfera usada é de argônio.

O forno é acoplado num parafuso sem-fim acionado por um motor elétrico adaptado a uma engrenagem redutora com rotação de 5×10^{-2} Hz.

A velocidade de deslocamento do forno é obtida por uma conjugação conveniente de polias.

A temperatura é medida com um termopar alojado próximo ao cadinho internamente ao tubo de quartzo. O controle de temperatura é feito por meio do monitoramento da voltagem aplicada no forno, através de um varivolt.

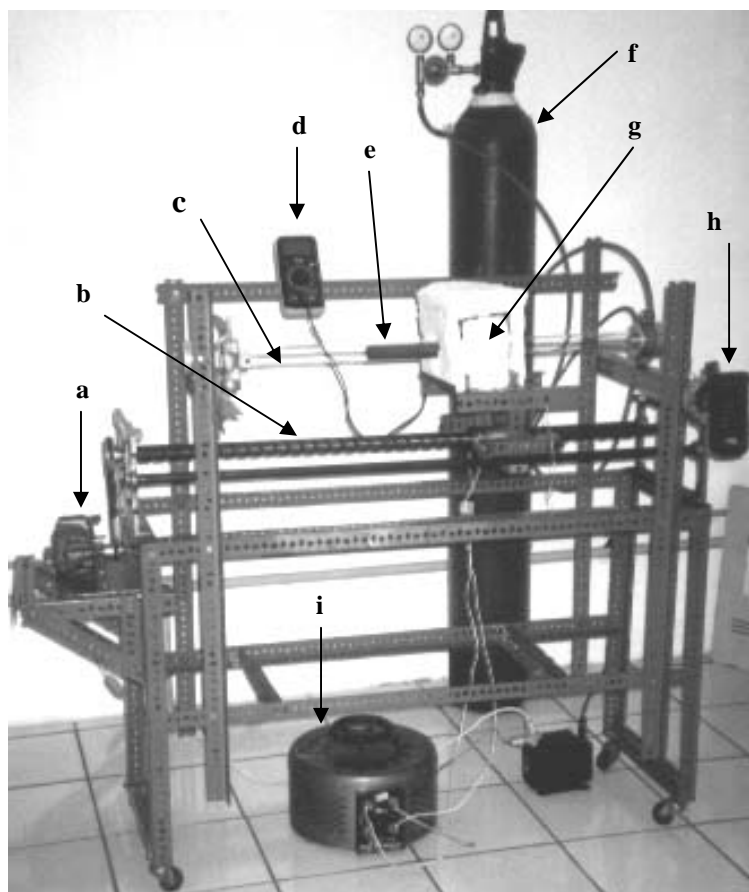


Figura 1. Fotografia do equipamento indicando: a) motor com engrenagem redutora, b) parafuso sem-fim, c) tubo de quartzo, d) voltímetro, e) cadinho de grafite, f) cilindro de argônio, g) forno resistivo, h) termopar e i) varivolt.

As amostras obtidas têm $L = 0,15\text{m}$ de comprimento. Foram obtidas com sobreaquecimento de 100 K e uma zona fundida l de $3 \times 10^{-2}\text{ m}$ (20% do comprimento da amostra). As velocidades de avanço da frente de solidificação foram de $1,19 \times 10^{-5}\text{m/s}$ (amostra 3), $2,39 \times 10^{-5}\text{m/s}$ (amostra 1) e $4,78 \times 10^{-5}\text{m/s}$ (amostra 4).

Os corpos de prova foram analisados por espectroscopia de absorção atômica com material retirado em 5 pontos da barra: no início (A), em $L/4$ (B), em $L/2$ (C), em $3L/4$ (D) e no final (E), conforme esquematizado na Figura 2. Uma amostra do material de partida (não submetido à fusão zonal) também foi analisada a fim de estabelecer a composição inicial do material C_0 .

A		B		C		D		E
0,01m	0,025m	0,01m	0,025m	0,01m	0,025m	0,01m	0,025m	0,01m

Figura 2. Esquema da subdivisão das amostras para análise por espectroscopia de absorção atômica.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela (1) mostra os resultados obtidos na análise das amostras por espectrometria de absorção atômica com fonte de chama. As impurezas analisadas foram Fe, Zn e Cu. A análise do percentual destes solutos foi realizada no material de partida e nas diferentes distâncias relativas ao longo da barra, descritas anteriormente.

Tabela 1. Resultados experimentais obtidos do percentual de soluto Fe, Zn e Cu, no material de partida C_0 e nas posições A, B, C, D e E, ao longo das barras 1, 3 e 4, purificadas por fusão zonal.

	Percentual de soluto(%)		
	Fe	Zn	Cu
C₀	0,132	0,085	0,0019
1A	0,118	0,061	0,0019
1B	0,105	0,075	0,0019
1C	0,125	0,075	0,0019
1D	0,156	0,063	0,0018
1E	0,158	0,094	0,0019
3A	0,109	0,075	0,0019
3B	0,088	0,061	0,0018
3C	0,105	0,071	0,0018
3D	0,160	0,061	0,0020
3E	0,189	0,120	0,0023
4A	0,132	0,091	0,0019
4B	0,120	0,067	0,0018
4C	0,118	0,065	0,0019
4D	0,134	0,065	0,0020
4E	0,136	0,095	0,0019

Verifica-se, na Tabela (1), que a purificação foi mais efetiva no caso da velocidade utilizada no lingote 3, correspondente a $1,19 \times 10^{-5}$ m/s, para todas as impurezas analisadas. Observa-se que ao longo das distâncias relativas no lingote, a concentração das impurezas foi aumentando significativamente de A a E. A impureza que foi deslocada com maior eficiência, nos três casos analisados, foi o Fe. No caso do Zn a purificação foi efetiva no lingote 1 e 3, correspondentes à velocidade de $2,39 \times 10^{-5}$ m/s e $1,19 \times 10^{-5}$ m/s, respectivamente. Já, no caso do Cu, o processo demonstrou-se eficaz apenas ao utilizar a menor velocidade, correspondente ao lingote 3.

As velocidades máximas de deslocamento da zona líquida que podem ser utilizadas de modo a não instabilizar a interface de solidificação foram determinadas através da Equação (2), para cada soluto. Os respectivos valores utilizados foram: $D = 10^{-9}$ m²/s, $G = 10^4$ K/m, $m_{Fe} = 2,83$ K/% em peso, $m_{Zn} = 2,92$ K/% em peso, $m_{Cu} = 2,59$ K/% em peso, $k_{Fe} = 0,5$, $k_{Zn} = 0,39$ e $k_{Cu} = 0,13$. Além disso, foram utilizados os percentuais de soluto do material de partida obtidos na literatura: $C_{0Fe} = 0,185\%$, $C_{0Zn} = 0,0022\%$, $C_{0Cu} = 0,0078\%$. Os resultados obtidos estão listados na Tabela (2).

Tabela 2. Valores de velocidade máxima de deslocamento da zona líquida, sem instabilização da interface de solidificação, para os solutos: Fe, Zn e Cu em Al.

Soluto	$V_{m\acute{a}x}$ (m/s)
Fe	$1,91 \times 10^{-5}$
Zn	$2,80 \times 10^{-4}$
Cu	$2,62 \times 10^{-5}$

Observa-se que, apesar da velocidade máxima permitida para o Fe ser menor que a utilizada nos lingotes 1 e 4, o processo demonstrou-se eficaz. Porém, no caso do Zn, mesmo sendo teoricamente efetivo devido a sua velocidade limite estar acima das utilizadas no experimento, sua eficiência não foi satisfatória no lingote 4, ao utilizar a velocidade de $4,78 \times 10^{-5}$ m/s. Enquanto isso, o processo foi considerado eficiente somente no lingote 3, para o Cu, mesmo tendo condições teóricas de apresentar bons resultados também no lingote 1.

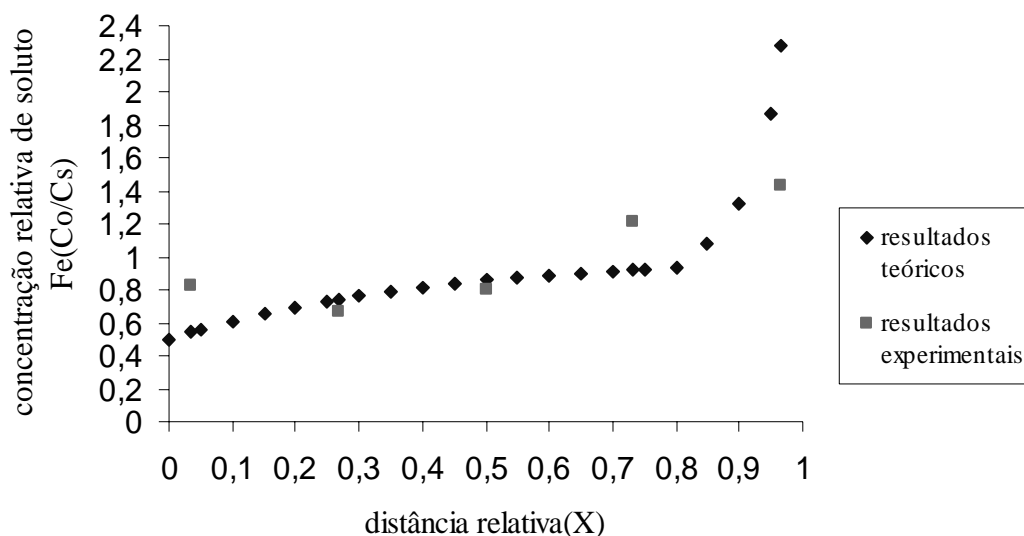


Figura 3. Gráfico dos resultados obtidos através do modelo numérico e experimentalmente no lingote 3.

A Figura 3 mostra o gráfico da comparação entre os dados obtidos experimentalmente para o soluto Fe no lingote 3 e a simulação de dados feita utilizando o modelo matemático proposto. Verifica-se uma concordância razoável.

6. CONCLUSÕES

Nas condições de realização do presente trabalho conclui-se que:

- O sistema experimental desenvolvido para o processo de fusão zonal demonstrou ser viável para a purificação do alumínio.
- Os valores experimentais concordam razoavelmente com o modelo teórico.
- Os resultados experimentais indicam que para uma passada, uma velocidade de avanço menor da zona fundida apresenta-se mais eficiente.

7. REFERÊNCIAS

- (1) Hashimoto, E.; Ueda, Y.; Kino, T. Purification of ultra-high purity aluminium. **Journal De Physique IV**, v.5, p. 153-57, 1995.
- (2) Ho, C. D.; Yeh, H. M.; Yeh, T. L. Optimal zone lengths im multi-pass zone-refining processes **Separations technology**, v.6, p.227-33, 1996.
- (3) Henry, R. L.; Nordquist, P. E. R.; Gorman, R. J.; Blakemore, J. S.; Moore, W.J. Zone melt growth of GaAs for gamma ray detector applications. **Nuclear instruments and methods in Physics research A**, v. 380, p. 30-35, 1996.
- (4) King, S. E.; Dietrich, H. B.; Henry, R.L.; Katzer, D. S.; Moore, W.J.; Phillips, G. W. Development and characterization of zone melt growth GaAs for gamma-ray detectors. **IEEE transactions on nuclear science**, v. 43, p. 1376-80, 1996.
- (5) Hitomi, K.; Matsumoto, M.; Muroi, O.; Shoji, T.; Hiratae, Y. Characterization of thallium bromide crystals for radiation detector applications. **Journal of Crystal Growth**, v. 225, p. 129-33, 2001.
- (6) Rubinstein, E.; Glicksman, M. E.; Mangum, B. W.; Fang, Q. T.; Singh, N. B. Preparation of multistage zone-refined materials for thermochemical standards. **Journal of Crystal Growth**, v. 89, p. 101-10, 1988.

- (7) Munirathnam, N. R.; Prasad, D. S.; Sudheer, Ch.; Prakash, T. L.. Purification of tellurium to 6N+ by quadruple zone refining. **Journal of Crystal Growth**, v. 254, p. 262-66, 2003.
- (8) Kuchar, L.; Drápala, J.; Lunacek, J. Purification methods of Cd, Te and CdTe and periodicity of segregation coefficients of admixtures. **Journal of Crystal Growth**, v. 161, p. 94-103, 1996.
- (9) Drápala, J.; Lunacek, J.; Kuchar, L.; Kuchar Jr., L.. Systematic study and periodic dependence of equilibrium distribution coefficients of admixtures on the atomic number of admixtures and their importance for crystallization. **Materials Science and Engineering**, v. A173, p. 73-77, 1993.
- (10) Pfann, W.G. **Zone melting**. 2ed. New York: John Willey & Sons, Inc., 1966. 308p.
- (11) Ho, C.D.; Yeh, H.M.; Yeh, T.L. The optimal variation of zone lengths in multipass zone refining processes **Separation and purification technology**, v.15, p.69-78, 1999.
- (12) Garcia, Amauri. **Solidificação: Fundamentos e aplicações**. Campinas: UNICAMP, 2001. 399p.
- (13) Silva, M. J. **Otimização do processo de purificação de materiais por fusão zonal**. 1991.166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.
- (14) Rodway, G.H.; Hunt, J. D. J. Optimizing zone refining. **Journal of Crystal Growth**, v. 97, p.680-88, 1989.
- (15) Spim, Jr., J. A.; Bernardou, M. J. S.; Garcia, A. Numerical model and optimization of zone refining. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 298, p. 299-305, 2000.

PURIFICATION OF METALS BY ZONE REFINING

Carmo Heinemann

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

Divisão de Engenharia/Departamento de Metalurgia/Centro de Tecnologia

Av. Bento Gonçalves, 9500 / Cx.P. 15.021 CEP 91501-970 - Porto Alegre - RS / Br

Fone / FAX: (0xx51) 3316-6142 carmoh@exatas.unisinos.br

Cândida Cristina Klein

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

Divisão de Engenharia/Departamento de Metalurgia/Centro de Tecnologia

Av. Bento Gonçalves, 9500 / Cx.P. 15.021 CEP 91501-970 - Porto Alegre - RS / Br

Fone / FAX: (0xx51) 3316-6142 candidaklein@ig.com.br

Jaime Álvares Spim Jr.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

Divisão de Engenharia/Departamento de Metalurgia/Centro de Tecnologia

Av. Bento Gonçalves, 9500 / Cx.P. 15.021 CEP 91501-970 - Porto Alegre - RS / Br

Fone / FAX: (0xx51) 3316-6142 spim@ct.ufrgs.br

Abstract

This work has the purpose to study the influence of melting zone speed in purification processes of low and medium melting point metals by zone refining. The work is justified by itself because of the importance of high-purity metals in technological applications and the necessity of optimizing the zone refining process through the accomplishment of frontier scientific researches. A numerical model was developed to evaluate the interfering parameters in the process. The melting zone speed was emphasized. Based on the theoretical model, zone melting equipment was built. It is formed, basically, by a quartz tube in which a graphite boat with the metal to be purified was placed which can be evacuated or filled with inert gas, a motor with reducing gear, pulleys with many diameters and a heater with variable and controlled power. The speed is established by coupling pulleys with many diameters, one coupled on the motor reducing system and the other on the worm screw heat transporter, interconnected by a belt. The experimental results indicate that a lower melting zone speed is more efficient at the first pass. This speed, according to the literature, can be increased while impurity concentration decreases with the number of passes, as long as it does not exceed the constitutional undercooling criterion. The theoretical model can be used as a mathematical instrument to simulate the zone refining.

Key-words: numerical modeling, zone refining, purification of metals.