



ESTRUTURA METALÚRGICA DE LINGOTES PRODUZIDOS
EM FORNO V.A.R. DE LABORATÓRIO



Arnaldo H. Paes de Andrade, Cristiano S. Musci, Maurício D. M. das Neves e Armando F. Padial
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN
Comissão Nacional de Energia Nuclear - São Paulo



O Processo V.A.R. é uma das técnicas de fusão mais apropriadas a fornecer a estrutura metalúrgica de lingotes destinados a fabricação de componentes de desempenho elevado. O processo V.A.R. foi desenvolvido para a produção de metais com pontos de fusão elevados (W, Ta, Mo) e alta reatividade química (Ti, Hf, Zr), materiais difíceis de fundir por outros processos. Recentemente o processo vem obtendo uma boa aceitação na purificação e controle da microestrutura de aços-liga e superligas. Neste trabalho apresenta-se resultados relacionados a estruturas de lingotes de aço inoxidável produzidos num equipamento V.A.R. desenvolvido no IPEN, usando como variáveis de processo a taxa de fusão e a velocidade de resfriamento do lingote.

INTRODUÇÃO

Um protótipo de forno V.A.R. ("Vacuum Arc Remelting"; Refusão a Arco sob Vácuo) com eletrodo consumível, está sendo desenvolvido no IPEN-CNEN/SP. A opção pela nacionalização do equipamento tem várias razões, entre elas: aquisição de tecnologia própria; redução dos custos da compra de equipamento importado; e desenvolvimento de projeto e construção de instalação (escala de laboratório) para fusão de metais e ligas, reativas e refratárias, baseadas nos processos VAR e VADER ("Vacuum Arc Double Electrode Remelting").

O processo de fusão e refino utilizando o forno VAR originalmente foi desenvolvido para metais de difícil elaboração metalúrgica, pelas técnicas convencionais de fusão. Entre os metais de alta reatividade química pode-se citar o zircônio, titânio e o háfnio; entre os metais de elevado ponto de fusão ou refratários cita-se o tungstênio, o tântalo e o molibdênio. A obtenção e refino destes metais e suas ligas utilizando o forno VAR assegura um lingote com uma estrutura metalúrgica mais homogênea, sendo portanto o processo indicado para a elaboração de materiais que devam apresentar um alto desempenho em serviço [1].

Basicamente, o processo VAR consiste em estabelecer um arco elétrico entre a parte inferior de uma lingoteira (fundo) e o eletrodo a ser fundido. A intensa liberação de energia provocada pelo arco elétrico é a responsável pela fusão do eletrodo. O refino do material ocorre a medida que as gotas de metal líquido transitam no vácuo ou na atmosfera de gás inerte. A lingoteira é fortemente refrigerada para se evitar um aquecimento excessivo e aumentar a taxa de retirada de calor do lingote. A lingoteira é um componente importante do sistema, sob o ponto de vista de segurança, posto que uma perfuração da mesma pelo arco elétrico provocará uma interação entre a água de refrigeração e o metal líquido. A figura 1 mostra esquematicamente os principais componentes de um forno VAR [2].

Em uma etapa intermediária do desenvolvimento do equipamento utilizou-se como material de estudo, eletrodos de aço inoxidável austenítico do tipo AISI 304L. Os objetivos eram de levantar os parâmetros de fusão, estimar a qualidade do vácuo e avaliar as condições de refrigeração da lingoteira.

Observações macroestruturais em lingotes fundidos, nas seções transversal e longitudinal, evidenciam a presença de 3 regiões distintas: coquilhada, colunar e equiaxial [3,4]. A região coquilhada é produzida principalmente, por nucleação heterocênica a partir da região adjacente à lingoteira, facilitada pelo superresfriamento, que ocorre nesta região. A condição superficial da lingoteira exerce papel de importância na extração de calor e por conseguinte, na extensão da zona coquilhada. Já a região colunar se desenvolve como um resultado do crescimento competitivo entre as dendritas, a partir da interface sólido-líquido e ocorrerá até quando persistam as condições favoráveis ao crescimento.

Em materiais de estrutura cúbica, o crescimento preferencial se dá na direção <100>. Duas hipóteses tentam explicar o aparecimento da região equiaxial: eventos de nucleação heterocênica no líquido e na superfície do sólido; fragmentação das dendritas, durante o crescimento da região colunar provocada por ondas convectivas no interior do lingote. O efeito conjunto destas hipóteses deve ser considerado.

Uma característica inerente ao processo VAR é a agitação a que o banho está submetido. A agitação do metal líquido durante a fusão é provocada pelo arco elétrico e altera algumas características macroestruturais do lingote. Verifica-se com frequência, um refino da estrutura, diminuição da extensão da região colunar e consequente crescimento da região central. De forma geral, a agitação do banho não provoca alteração na taxa de nucleação.

As microestruturas dos aços inoxidáveis austeníticos, da série AISI 300 podem apresentar fundamentalmente duas características: uma matriz inteiramente austenítica (c.f.c. cúbica de face centrada) e uma outra também austenítica, com uma certa quantidade de ferrita delta. A ferrita delta é uma fase cúbica de corpo centrado, metaestável à temperatura ambiente. A relação entre os elementos formadores de austenita e ferrita delta, determina basicamente como um aço austenítico se solidificará. Para uma avaliação global da influência destes elementos existem expressões que agrupam os elementos alfa-gênicos e gama-gênicos, através da utilização do Diagrama de Schaeffler [5,6,7].

Os processos comuns de solidificação ocorrem por nucleação e crescimento. O evento de nucleação ocorre na etapa inicial da solidificação e quanto mais intenso for este fe-

nômeno, mais fina será a microestrutura. O modo de crescimento pode ser celular ou dendriticamente. Além da taxa de crescimento (R), outro parâmetro que influencia decisivamente o modo de crescimento é o gradiente de temperatura no líquido (G). Segundo Suutala [7], as relações entre os parâmetros básicos de solidificação como G/R, afetam a morfologia do metal em solidificação e o produto G.R., que é a taxa de resfriamento, determina o espaçamento entre os braços secundários das dendritas. A tabela 1 apresenta os valores típicos de G, R e G.R para vários processos metalúrgicos. A maioria dos autores [6,7,8] sugere que para valores elevados da relação G/R, as microestruturas do tipo celular são favorecidas em detrimento das microestruturas dendríticas.

TABELA 1 - Valores de taxa de crescimento (R) e do gradiente de temperatura (G) em diferentes processos metalúrgicos.

Processo	R (cm/min)	G (°C/cm)	G.R (°C/min)
Solidificação de lingotes			
- Superfície	2,2	70	150
- Centro	0,2	10	2
- Superfície	1,0	150	150
- Centro	0,1	4	0,4
Lingotamento contínuo			
- Superfície	6	330	2000
- Centro	1	40	40
Soldagem TIG			
- Solda com penetração total	6	700	4000

Os objetivos deste trabalho são:

- apresentar resultados relacionados às estruturas dos lingotes de aço inoxidável produzidos em equipamento VAR desenvolvido no IPEN.
- estabelecer de modo qualitativo, relações entre parâmetros do processo (corrente, velocidade de fusão e taxa de extração de calor) e características metalúrgicas do lingote (solidificação, modo de crescimento e aspectos macro- e microestruturais).

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado como eletrodo do VAR foram barras de aço inoxidável austenítico AISI 304L. A composição química nominal do material é mostrada na tabela 2. A dureza do material como recebido é de 27 RC.

Os seguintes parâmetros do processo VAR foram investigados: correntes de fusão e taxa de extração de calor (material da lingoteira : aço-carbono).

As técnicas utilizadas para a caracterização microestrutural dos lingotes foram: microscopia óptica, microanálise por microsonda eletrônica e dureza por indentação Rockwell e microdureza Vickers. Foram analisadas as seções longitudinal e transversal dos lingotes produzidos.

A preparação das amostras seguiu as técnicas convencionais da metalografia. A tabela 3 apresenta as soluções utilizadas para a revelação da macro- e da microestrutura.

TABELA 2 - Composição química nominal do aço AISI 304L.

Aço Inox AISI 304L	18-20 Cr, 8-12 Ni 0.03 C, 2.0 Mn, 1.0 Si 0.045P, 0.030 S, 0.10N
-----------------------	---

TABELA 3 - Técnicas metalográficas utilizadas para análise macro- e microestrutural.

Técnicas metalográficas - Inox 304L	
Macro -	Lixamento até lixa 600 Polimento com alumina 0,05 µm Ataque em solução (saturada) de CuSO ₄ em 50 ml de HCl
Micro -	Lixamento até lixa 600 Polimento em diamante 3 µm, alumina 0,05 µm Ataque em solução de Ácido Picrico (1g) em 5 ml HCl e 100 ml etanol

RESULTADOS OBTIDOS

A macroestrutura dos lingotes produzidos no equipamento VAR apresentou semelhanças com a estrutura de lingotes obtidos por processos metalúrgicos convencionais, vide figura 2.

A região coquilhada se revela extremamente pequena, em consequência da reduzida extração térmica na interface lingoteira-lingote. A condição superficial da lingoteira é o parâmetro que controla a taxa de extração de calor, e a lingoteira utilizada na presente investigação apresentava uma superfície com um nível de rugosidade, que implicava em um contacto térmico reduzido. Neste caso a intensidade de nucleação é baixa diminuindo a extensão da zona coquilhada. O aquecimento produzido pelo arco elétrico contribui também para a redução do superresfriamento do metal, através do pré-aquecimento da lingoteira.

A região colunar, como sabido, cresce a partir da interface sólido-líquido, com seu desenvolvimento paralelo ao sentido de extração de calor. Portanto observou-se que em fusões realizadas com maior fornecimento de calor (corrente de fusão), a região colunar apresentou uma extensão maior, do que aquelas fusões realizadas com correntes mais baixas. Na macrografia da secção longitudinal do lingote mostrada na figura 1, verifica-se inicialmente uma maior extração de calor (na direção longitudinal) pela base da lingoteira (de aço-carbono), posteriormente a extração de calor radial torna-se importante. A razão entre estas duas componentes varia ao longo do eixo longitudinal do lingote. Esta variação (gradiente) é evidente na observação da orientação de crescimento dos grãos cristalinos.

A região central apresenta grãos equiaxiais como mostrada na figura 3, macroestrutura da secção transversal do lingote. Foi observado que para um maior fornecimento de calor ao lingote, menor será a dimensão da região central. A origem desta região está ligada, provavelmente, ao efeito conjunto dos fatores mencionados anteriormente.

Como pode ser observado na figura 4, a microestrutura do lingote apresenta basicamente uma morfologia do tipo dendrítico, com orientações paralelas à direção de maior extração de calor. Nestas direções, o produto do gradiente de temperatura do líquido (G) pela taxa de crescimento (R) é máximo. O produto de solidificação inicial do lingote depende fundamentalmente

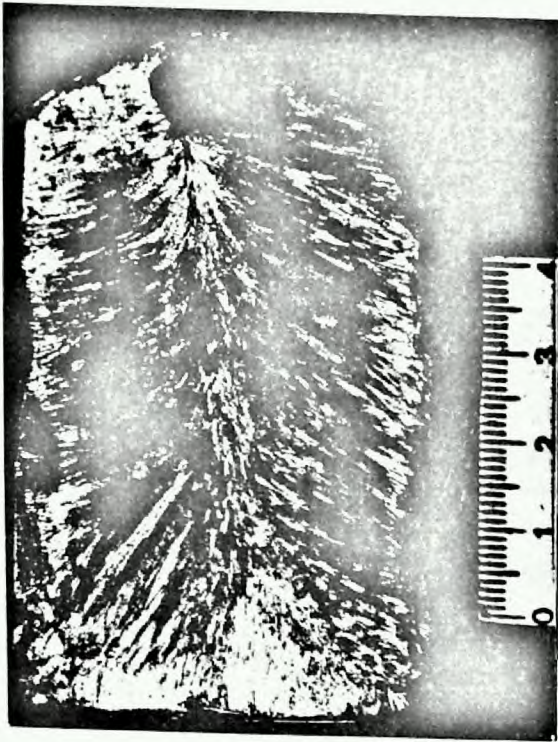


FIGURA 2 - Macrografia da secção longitudinal do lingote de aço inoxidável (Aumento 1,5 x)



FIGURA 4 - Fotomicrografia extraída da interface das regiões colunar-central (Aumento 120 x).

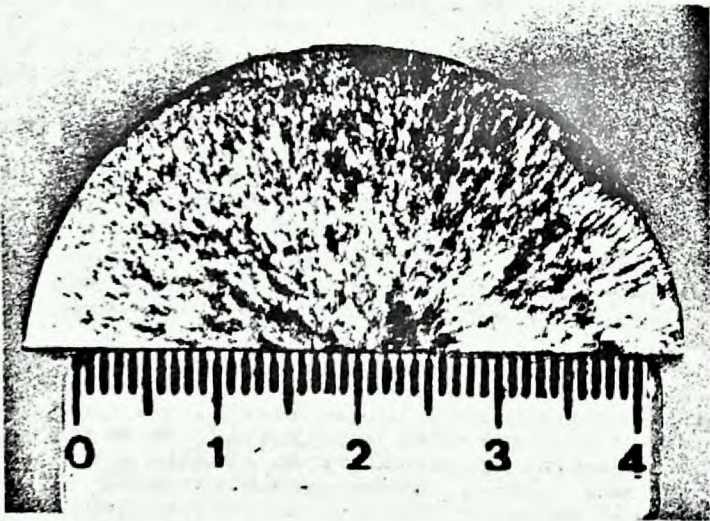


FIGURA 3 - Macrografia da secção transversal do lingote de aço inoxidável (Aumento 2,3 x).



FIGURA 5 - Fotomicrografia apresentando uma microestrutura duplex (ferrita delta + austenita) (Aumento 200 x).

te da composição original do material do eletrodo na temperatura liquidus. Entretanto, a segregação de elementos pode alterar totalmente a composição do líquido remanescente e alterar o produto de solidificação.

Duas fases foram observadas na microestrutura pela metalografia óptica: austenita e ferrita delta. A quantidade e distribuição das fases varia de região para região. A primeira fase a se solidificar é a ferrita delta, enquanto a austenita se forma no líquido remanescente entre as dendritas de ferrita delta. A austenita cresce no líquido e ocorre também uma transformação de estado sólido da ferrita delta para austenita. A ferrita delta que fica retida à temperatura ambiente situa-se em gran-

de parte nos contornos interdendríticos, conforme ilustrado na figura 5.

Os resultados obtidos pela microsonda eletrônica confirmaram as observações realizadas por metalografia óptica, isto é, uma matriz austenítica com ferrita delta, situando esta, geralmente, nos espaços interdendríticos. A tabela IV apresenta as porcentagens de cromo e níquel para as duas fases presentes no lingote. Como esperado, a ferrita delta apresenta um teor mais elevado de cromo em sua composição, enquanto que a austenita apresenta uma porcentagem maior de níquel. Na matriz austenítica não são observadas diferenças significativas em cromo e níquel ao longo das secções longitudinais e transversais. Os valores médios

de dureza e microdureza da matriz ao longo das secções longitudinal e transversal do lingote não mostram uma diferença significativa em relação aos dados da literatura. Estes valores são os seguintes: dureza 80 RB e microdureza 191HV. Portanto o lingote é razoavelmente homogêneo conforme a microanálise também mostra.

TABELA 4 - Teores de Cromo, Níquel e Ferro presentes na microestrutura (resultados por microsonda eletrônica).

	Ferrita δ	Austenita
Cr	24,22 \pm 0,22	17,64 \pm 0,38
Ni	5,81 \pm 0,42	10,86 \pm 0,18
Fe	68,32 \pm 0,36	69,10 \pm 0,32

A distribuição local de ferrita delta varia ao longo do lingote, devido principalmente à segregação e à velocidade de extração de calor (G.R.). O produto G.R. não é constante, pois o arco (fonte de calor) atua de modo intermitente (transiente) sobre o lingote que está sendo resfriado. Observa-se ainda a presença de maiores quantidades de ferrita delta em regiões onde a extração de calor é mais intensa.

A continuidade deste trabalho visa investigar as condições de estabilização do arco, utilizar lingoteira de cobre e também melhorar o sistema de vácuo com objetivo de medir os parâmetros de solidificação assim como ampliar as observações estruturais. A finalidade principal é a obtenção de lingotes de metais reativos (Zircônio e Háfnio).

CONCLUSÕES

A macroestrutura do lingote de aço inoxidável 304L refundido no protótipo V.A.R., do IPEN, mostra somente uma pequena região coquelhada, em virtude das condições de transporte de calor no sistema arco-lingoteira. Na região colunar os grãos se apresentam paralelos ao sentido do gradiente térmico. Em termos microestruturais são observadas duas fases: a matriz austenítica e ferrita delta. A matriz é homogênea com respeito à distribuição dos principais elementos da liga (Cr e Ni); já a distribuição da ferrita delta é influenciada pela taxa da extração de calor G.R.

AGRADECIMENTO

Ao Grupo de Microanálise do IPEN (Rejane, Liana e Eduardo) pela ajuda nas análises por microsonda eletrônica.

REFERÊNCIAS

- [1] Yu, K. O., McMullen, J. F., Adczik, C.B. e Maurer, G.E., "Vader and Var Ingot Structures". J.O.M., February (1989), pp. 10-14.
- [2] Musci, C.S., Júlio Jr., O., Neves, M.D.M. e Andrade, A.H.P., "Projeto de um Forno V.A.R. Nacional". Anais do X CBRAVIC, São José dos Campos (SP) (1989).
- [3] Campos, F., M. D., Davies, C.J., "Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas". Ed. Universidade de São Paulo, (1978).
- [4] Davies, G.J. e Garland, J.G., "Solidification Structures and Properties of Fusion Welds". Int. Met. Rev. v.20, pp. 83-106.
- [5] Lippold, J.C. e Savage, W.P. "Solidification of Austenitic Stainless Steel Weldments". Welding Journal. December (1979),

pp. 362s-374s.

- [6] Vitek, J.M. e David, S. A., "Microstructural Modification of Austenitic Stainless Steels by Rapid Solidification". Met. Trans. A, 14A, September (1983), pp. 1833-1841.
- [7] Suutala, N., Takano, T. e Maiso, T., "Single Phase Ferrite Solidification Mode in Austenitic-Ferritic Stainless Steel Weld". Met. Trans. 10A. (1979), pp. 1183-1190.
- [8] Suutala, N. "Effects of Solidification Conditions on the Solidification Mode in Austenitic Stainless Steels". Met. Trans. 14A. (1983), pp. 191-197.

SUMMARY

Vacuum arc remelting (VAR) is one of the recommended techniques to obtain a metallurgical structure of ingots for use in the fabrication of high performance components originally VAR was developed for production of high melting point (tungsten, tantalum and molybdenum) and high chemical reactivity (titanium, hafnium and zirconium). These materials are difficult to melt by other processes; more recently VAR is gaining wider acceptance in the purification and control of the microstructure of alloy steels and superalloys. In this paper, results are presented related to the structure of stainless steels ingots designed and built at IPEN. The processes variables are melting rate and rate of cooling of the ingot.

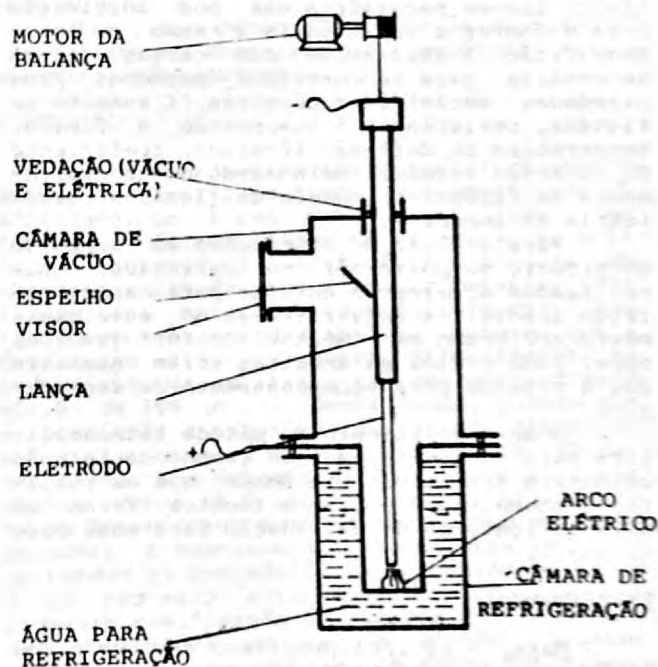


FIGURA 1 - Principais componentes de um forno V.A.R.