

PROGRESSOS NA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS COMPUTACIONAIS PARA A OTIMIZAÇÃO DE EQUIPAMENTO VAR/VADER E PARA A ANÁLISE DO PROCESSO DE LINGOTAMENTO, SIMULAÇÃO DA SOLIDIFICAÇÃO E ANÁLISE METALÚRGICA.

Cristiano Stefano Mucsi (1)

Arnaldo Homobono Paes de Andrade (2)

(1) Mestrando, Pesquisador do IPEN-CNEN/SP.

(2) Membro da ABM, Doutor em Metalurgia e Materiais, Pesquisador do IPEN-CNEN/SP.

RESUMO

A evolução técnica, e a diminuição dos custos de aquisição de equipamentos de computação, possibilita que a aplicação de modelos numéricos de simulação de processos seja amplamente utilizada, para a otimização dos processos com uma diminuição simultânea nos custos de desenvolvimento. Nesta contribuição técnica é apresentada a evolução do trabalho realizado no IPEN-CNEN/SP, no projeto e construção de um equipamento modular para a fusão a arco sob vácuo de eletrodos consumíveis (VAR/VADER) de pequena escala visando: estudos básicos do processo de formação do lingote sob diferentes condições de operação, o processamento de materiais em pequena escala (tais como o Háfênio, para a indústria nuclear e o Titânio, para a indústria médica) e, a elaboração de ligas experimentais em pequena escala, para uma avaliação prévia da operação ou produção industrial. Para tais objetivos estão sendo realizados estudos do modelamento matemático e simulação computacional dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante o processo de lingotamento, sendo aqui apresentados os avanços na determinação de parâmetros de interesse metalúrgico que influem nas propriedades mecânicas do produto final - tempo local de solidificação, espaçamento interdendrítico, velocidade de resfriamento, gradiente térmico, formato e dimensões da frente de solidificação.

OBJETIVO

As tecnologias associadas aos processos industriais, de grande ou pequena escala, que envolvam produtos com fins estratégicos (tais como as indústrias aeroespaciais, nucleares, militares, siderurgia fina, etc.), não estão prontamente disponíveis no mercado, e muitas vezes são protegidas. Seus custos são bastante elevados, tornando por vezes mais cara a sua aquisição do que o produto acabado.

Esta contribuição tem como objetivo principal apresentar o trabalho que vem sendo realizado no desenvolvimento e nacionalização de uma tecnologia, na sua acepção mais completa, para a obtenção de lingotes (de pequena escala/laboratório, até 2Kg) por meio de fusão de eletrodos consumíveis sob vácuo, de metais reativos e refratários e suas ligas, bem como de materiais de difícil processamento tais como aços endurecíveis por precipitação e superligas. Utiliza-se uma abordagem por métodos computacionais recentes no desenvolvimento de processos ou tecnologias (industrial ou piloto) (1) e, em particular, para o desenvolvimento de: um equipamento modular para a fusão pelo método VAR e pelo método VADER, e o procedimento técnico para a obtenção de um produto com as qualidades desejadas, com reproducibilidade garantida.

A instalação projetada visa: a produção de pequenos lingotes do material de partida (até 2Kg), quantidade essa imprópria para a maioria dos processos industriais de larga escala, porém adequada para a análise e desenvolvimento do processo, e para facilita a transposição da tecnologia e seus resultados para escalas maiores.

Um segundo objetivo é a utilização da tecnologia para a produção de material em pequena escala, com potencial para utilização na indústria nuclear (barras de Háfnio metálico a ser utilizado na confecção de barras de controle para reatores nucleares) e na utilização de moldes no processo VADER (2) para a fabricação de pequenas peças, como as utilizadas em implantes ortopédicos (ligas de Ti-Al-V).

O FORNO VAR

A figura 1 apresenta esquematicamente um forno VAR. Nesta

pode-se observar a simetria radial e a montagem vertical do equipamento. Na etapa inicial do processo, um arco elétrico é estabelecido entre a extremidade inferior do eletrodo e o fundo da lingoteira, fundindo então o eletrodo devido à alta concentração de calor num pequeno volume. Ao fundir-se, o metal líquido oriundo do eletrodo, cai transitando através do arco elétrico e deposita-se no fundo da lingoteira (intensamente refrigerada por um fluxo d'água na sua superfície externa), onde se resfria e se solidifica. Com a continuidade da fusão o novo metal

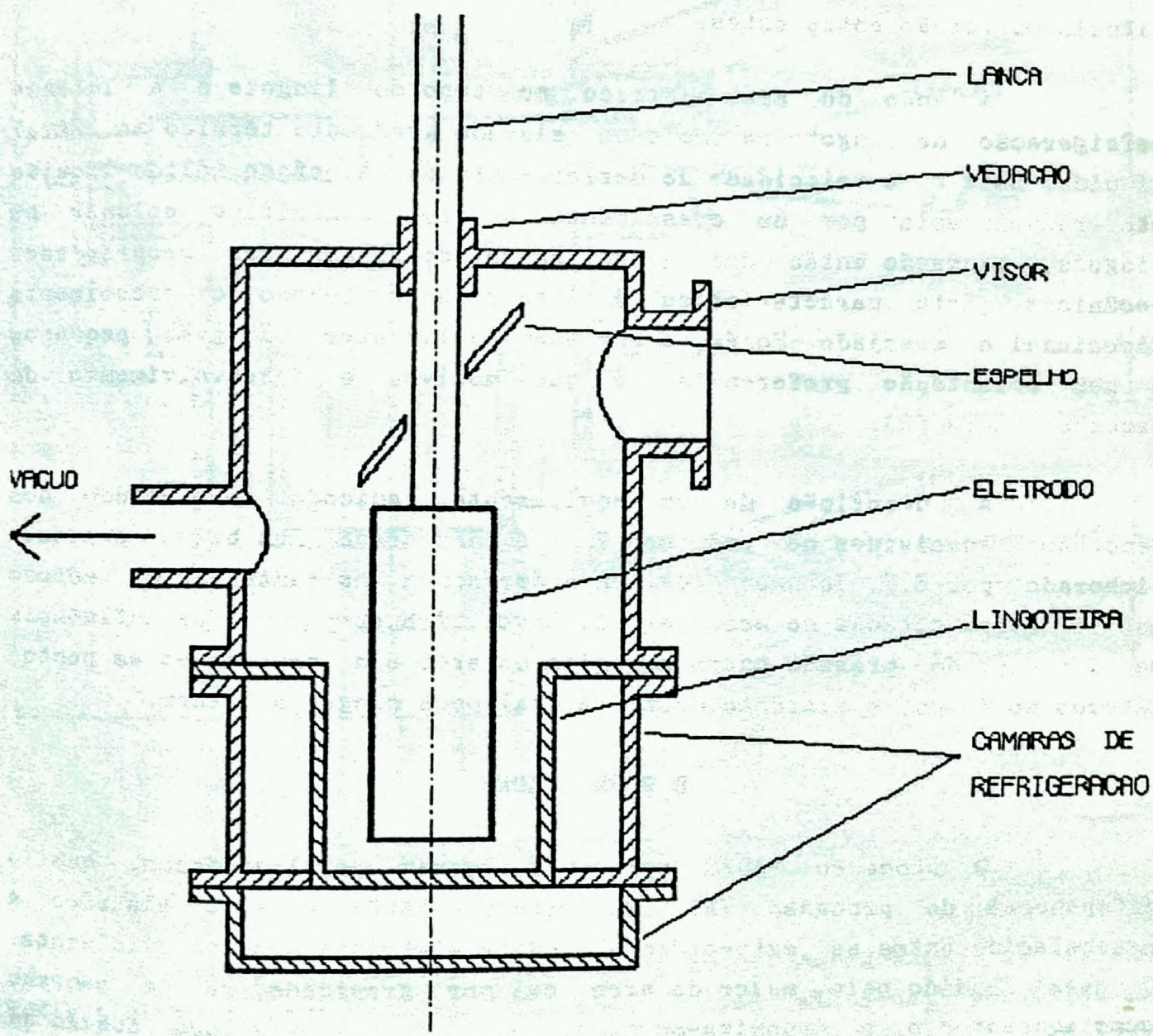


Figura 1. Desenho esquemático de um forno VAR. Apresenta as câmaras de refrigeração, descritas no texto, para a extração seletiva de calor da lingoteira e, conseqüente controle da microestrutura e da macroestrutura.

fundido deposita-se sobre o solidificado anteriormente. Devido à diferença de diâmetros, do eletrodo e da lingoteira, o eletrodo é continuamente deslocado para introduzi-lo na lingoteira de forma a compensar o seu consumo e manter a distância constante entre eletrodo e a superfície superior da poça líquida. A rápida solidificação do metal que entra em contato com a parede da lingoteira forma uma casca ("skull") a qual envolve e protege o metal líquido, não permitindo a difusão ou reação entre estes.

A ação do arco elétrico no topo do lingote e a intensa refrigeração da lingoteira impõe um elevado gradiente térmico ao metal líquido. Este e a velocidade de deslocamento da interface sólido-líquido são responsáveis por um crescimento do tipo dendrítico colunar no lingote, causando então uma grande anisotropia nas suas propriedades mecânicas. Esta característica é interessante quando o crescimento direcional é desejado. Porém, a obtenção de lingotes com grãos pequenos e sem orientação preferencial é que motivou o desenvolvimento do processo VADER (3).

A descrição de um equipamento dedicado ao estudo dos fenômenos envolvidos no processo VAR é encontrada num breve capítulo elaborado por E.V. Johnson (4), onde apresenta as vantagens do método que já foram citadas no decorrer do texto. Johnson mostra a influência da diferença de pressão entre a região do arco e a pressão em um ponto, interno ao forno, e distante deste, a qual pode chegar a 1 torr.

O FORNO VADER

O processo VADER apresenta algumas peculiaridades, que o diferenciam do processo VAR. No processo VADER o arco elétrico é estabelecido entre as extremidades de dois eletrodos opostos axialmente. O metal fundido pelo calor do arco cai por gravidade, com um pequeno superaquecimento, e deposita-se numa lingoteira disposta logo abaixo da região que contém o arco elétrico, figura 2. No intervalo de tempo entre o início e o fim da queda, núcleos sólidos se formam; estes núcleos darão início à solidificação, permitindo a obtenção de grãos finos e sem orientação preferencial (3). O processo VADER é um desenvolvimento recente na tecnologia de fusão a arco que tem um grande potencial como

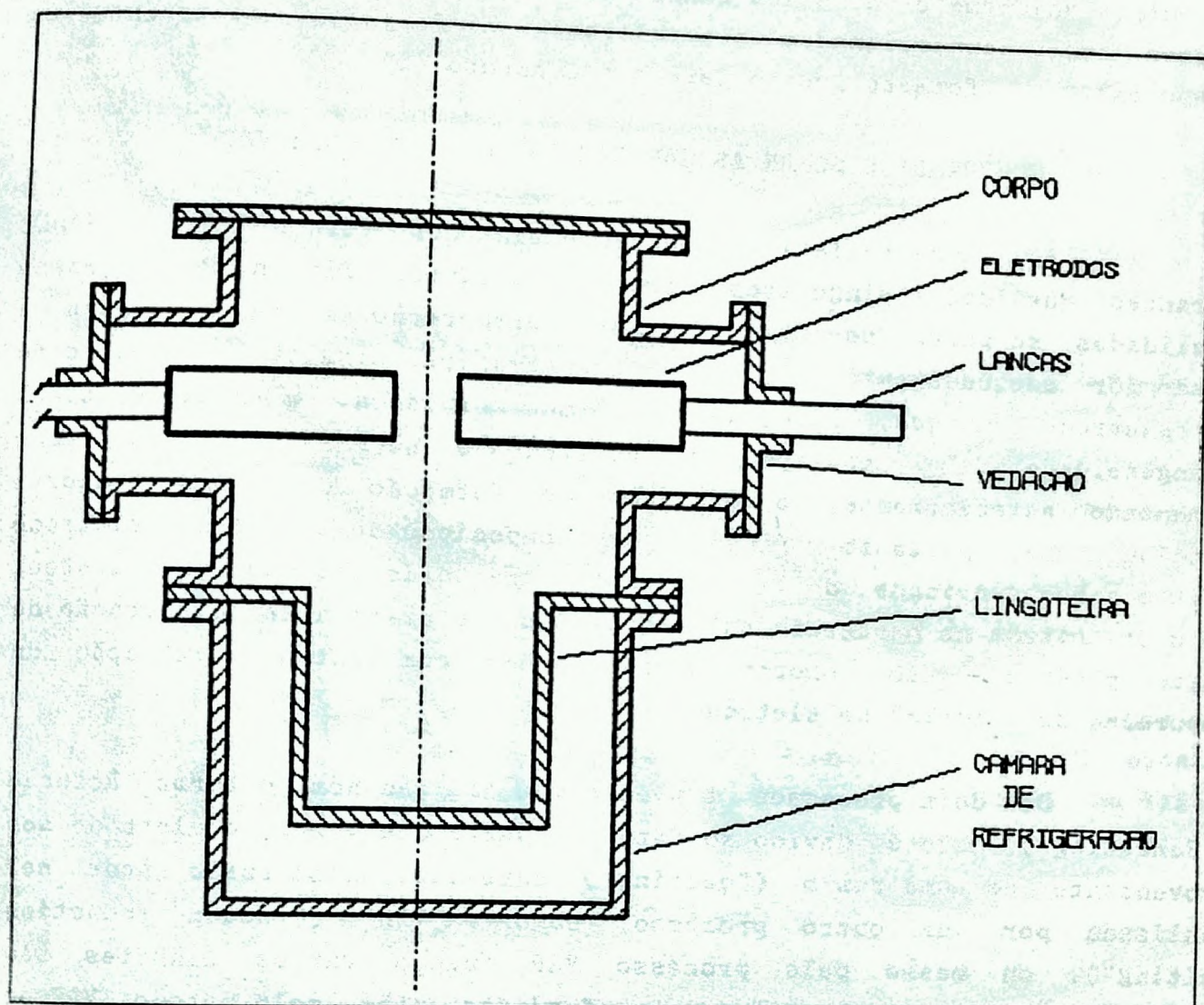


Figura 2. Desenho esquemático de um forno VADER. As lanças porta-eletrodos movimentam-se mantendo o arco elétrico, estabelecido entre as extremidades dos dois eletrodos, sobre o centro da lingoteira. O visor e a tomada de vácuo não são apresentadas para simplificação do desenho.

processo alternativo à elaboração de superligas por metalurgia do pó. A estrutura uniforme e de grãos finos dos lingotes VADER permite que os mesmos sejam inspecionados por ultrassom e forjados diretamente em componentes com formato pronto para o acabamento (5).

COMENTARIOS SOBRE AS CARACTERISTICAS DO FORNO VAR

As características operacionais dos fornos VAR e VADER garantem qualidades singulares aos seus produtos finais. Porém essas qualidades só podem ser atingidas se a preparação do material para a fusão for adequadamente realizada. Esta preparação consiste da confecção de eletrodos longos, homogêneos na sua composição e retilíneos. A homogeneidade da composição do eletrodo é necessária pois, como comentado anteriormente, o processo de formação do lingote ocorre continuamente; portanto variações de composição ao longo do eletrodo afetam a homogeneidade do lingote. Esta característica dos equipamentos, além da citada no parágrafo anterior, é muito crítica na elaboração de ligas porém não tão importante nas fusões com vistas à extração de impurezas do material do eletrodo.

Os dois processos têm em comum no seu nome o termo Refusão ("Remelting"). Isto é devido ao fato de, parte das vezes, o eletrodo ser proveniente de uma fusão ("casting") anterior. Esta fusão pode ser realizada por um outro processo, como o VIM ("Vacuum Induction Melting"), ou mesmo pelo processo VAR, quando vários lingotes são soldados para formar um eletrodo e refundidos então, pelo método VAR ou VADER.

As fusões sucessivas aumentam a homogeneidade do produto, porém no caso de metais reativos como o Zircônio e o Titânio devem ser realizadas a vácuo, com muito cuidado para evitar a contaminação por gases. Em contrapartida deve-se manter uma pressão tal que permita a estabilidade do arco. No caso de ligas as pressões no interior do forno devem ser tais que evitem a evaporação dos componentes com maior pressão de vapor.

O REFINO QUIMICO

Uma abordagem qualitativa e quantitativa dos processos

envolvidos no refino químico, foi feita por V. Dembovsky (6). Neste trabalho ele apresenta o plasma como uma ferramenta para vários processos metalúrgicos; elabora um tratamento termodinâmico dos vários fenômenos físicos e químicos, de interesse, envolvidos em cada processo, fenômenos esses análogos aos que ocorrem na fusão pelos métodos VAR e VADER: destilação, dissociação e fenômenos complexos para a eliminação de óxidos, sulfetos, nitretos, etc. Devido à extensão do assunto citado no parágrafo anterior, no presente trabalho serão citados somente os pontos básicos para o seu desenvolvimento.

A exposição do metal líquido às baixas pressões internas do forno e a alta temperatura do arco elétrico, é responsável pelos fenômenos físicos e químicos que alteram as características originais do material do eletrodo. Neste aspecto duas situações se apresentam: A primeira é a extração por destilação, de impurezas que não interessam ao produto final, como no caso do refino do titânio (7) e do zircônio (8) onde a retirada de impurezas é tão intensa que só se retém pequenas partes da concentração inicial; A segunda situação apresenta a necessidade de utilização de pressões mais altas na fusão de ligas nas quais pressão de vapor de seus componentes é mais alta. A determinação da pressão de operação e da velocidade de bombeamento do forno VAR é feita de maneira direta e relativamente simples para alguns casos (9):

APLICAÇÕES DO PROCESSO

Os materiais utilizados em equipamentos e dispositivos para reatores nucleares, devido à alta responsabilidade destes, devem ter necessariamente uma qualidade específica para o seu uso. Entre estes materiais está a liga de zircônio denominada Zircaloy, que é largamente utilizada na fabricação dos tubos de revestimento do elemento combustível em reatores tipo PWR (Pressurized Water Reactor).

O Titânio é um metal bastante semelhante ao zircônio e largamente utilizado na indústria aeronáutica e aeroespacial. Neste aspecto, J. de Faria (7) apresenta um trabalho sobre o processo clássico para a consolidação e refino da esponja de titânio, em escala piloto. Faria também apresenta resultados interessantes sobre a preparação e características do eletrodo a partir da esponja de titânio obtida pelo

processo Kroll (8): britagem da esponja, compactação em briquetes e soldagem por meio de solda resistiva em equipamento especialmente desenvolvido.

Recentemente os processos VAR E VADER vem obtendo uma boa aceitação na purificação e controle de microestruturas de aços-liga e superligas (5). O processo VAR foi o primeiro a ser utilizado para a produção de superligas e ainda é utilizado largamente até os dias de hoje, além de ser o único aceito pela indústria aeronáutica.

Os fornos VAR são também utilizados para a obtenção de aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação, como o tipo 15-5 PH pois este processo minimiza a quantidade de inclusões, o conteúdo de gases retidos e a segregação da liga. Este material é utilizado na indústria alimentícia e aeroespacial (10).

Como citado acima, no processo VAR a confecção do eletrodo tem papel muito importante. Porém, em se confeccionando eletrodos homogêneos, longos e retilíneos, a fusão e refino de vários materiais pode ser realizada com alta qualidade do produto final, como o Vanádio (11) e ligas de alto ponto de fusão tal como as ligas de Tungstênio-Háfnio-Carbono (12).

A importância estratégica dos produtos obtidos por ambos os processos, VAR e VADER, explica o alto custo da importação da tecnologia do processo.

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente foi construído um protótipo de forno VAR de pequena escala/laboratório para que se pudesse efetuar uma abordagem experimental dos fenômenos envolvidos no processo (13). A seguir, estudos da macroestrutura e microestrutura de lingotes de aço inoxidável obtidos no protótipo VAR/IPEN foram efetuados (14) e verificada a influência dos parâmetros do processo na morfologia microestrutural e macroestrutural dos lingotes (15). Observou-se então a complexidade inerente à tentativa de sistematização da influência dos parâmetros do processo nas características e propriedades dos lingotes. Mais ainda

observou-se que a sua aplicação seria dificultada quando não utilizada dentro das condições estudadas. Dessa maneira a utilização dos resultados para escalas maiores e/ou outros materiais não seria confiável.

As dificuldades e a complexidade, dos fenômenos de refino sob plasma e vácuo e do interrelacionamento parâmetros/morfologia micro- e macroestrutural, motivaram a utilização de métodos computacionais para o desenvolvimento do presente projeto VAR/VADER. A utilização de métodos computacionais neste desenvolvimento abrange inicialmente três campos:

1º Criação de uma linha de pesquisa para a elaboração de modelos matemáticos numéricos e simulação da solidificação por computador, por meio da criação e desenvolvimento de "softwares" dedicados especificamente para o problema. Um modelo da solidificação de lingotes em forno VAR (16) utilizando o método das diferenças finitas (17) para a determinação do campo térmico no lingote encontra-se em fase de aperfeiçoamento;

2º Utilização dos resultados de simulação para a otimização do desenvolvimento de um novo equipamento, para a mesma escala de produção, porém com flexibilidade de operação pelo processo VADER;

3º Projetar e controlar a qualidade final dos lingotes obtidos em função dos parâmetros de operação dos equipamentos.

Estes três campos são quase que exclusivamente acadêmicos, porém, uma vez dominados tornarão possível a transposição da tecnologia adquirida para escalas maiores, piloto e industrial. Esta transposição será possível de uma forma relativamente simples, pois deverá ser mudada somente a escala do modelo utilizado, para a avaliação das novas condições.

RESULTADOS

O modelo matemático desenvolvido para a simulação da formação do lingote VAR é baseado na resolução da equação de condução de calor manipulada adequadamente à qual, juntamente com as condições de contornos e inicial, forma o modelo matemático para simulação numérica do processo.

A solução desta equação é obtida em pontos escolhidos especificamente no lingote utilizando o Método das Diferenças Finitas (17). A apresentação da solução da equação de condução de calor, o Campo Térmico, pode ser feito de várias maneiras; a figura 3 apresenta o campo térmico calculado para uma dada condição de funcionamento do forno. Observa-se nelas o formato parabólico das isotermas sendo que duas destas representam as isotermas solidus e liquidus. Estes resultados mostraram-se muito próximos dos resultados experimentais obtidos por metalografia. Por si só, o campo térmico determinado, na simulação em computador, não é suficiente para a solução dos problemas de projeto e avaliações da qualidade do produto a ser obtido no processamento. Este resultado deve ser tratado, matematicamente, para a determinação de valores de importância no estudo metalográfico, como por exemplo: o gradiente térmico; a velocidade de resfriamento; o tempo local de solidificação e o parâmetro G/v , em pontos específicos do interior do lingote. Utilizando-se uma representação análoga à feita na figura 3, pode-se apresentar a velocidade de resfriamento calculada para regiões específicas do lingote, como por exemplo uma região compreendendo a zona pastosa, donde se pode inferir o espaçamento interdendrítico, e outra região compreendendo o espaço entre duas isotermas $T=850^{\circ}\text{C}$ e $T=950^{\circ}\text{C}$, região em que ocorre a formação de precipitados em aços de alta resistência (18), não sendo apresentada aqui pela escassez de espaço.

Numa segunda fase do modelamento e simulação está prevista a investigação de outros fenômenos envolvidos no processo (agitação magnética, difusão e convecção) de forma semelhante à realizada por empresas especializadas na fusão VAR (19-22), porém em escala bastante maior que esta de laboratório e com uma grande complexidade matemática.

A utilização dos resultados típicos apresentados acima auxilia no desenvolvimento de partes do protótipo e do novo equipamento VAR/VADER. Basicamente o projeto e a construção do novo forno vem sendo feitos com a utilização de computador direcionado à elaboração dos desenhos para estudo e fabricação das várias partes do equipamento. Os dados de partida são baseados na experiência do grupo envolvido no projeto e dos resultados obtidos em simulações efetuadas em computador.

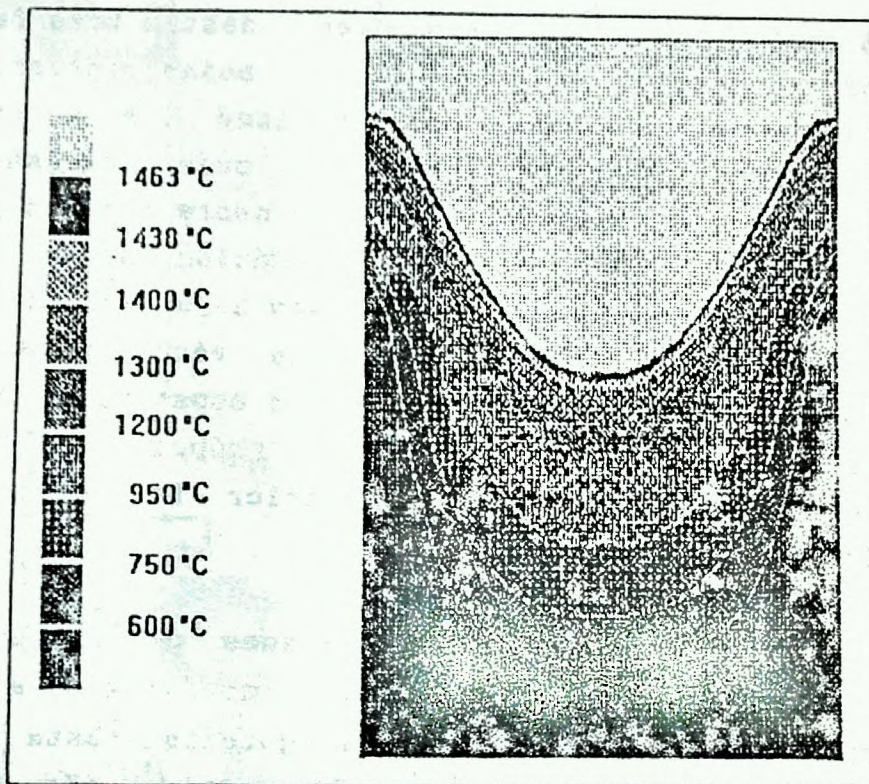


Figura 3. Representação gráfica do campo térmico calculado em computador para uma dada condição de operação do forno VAR. As áreas apresentadas em tons de cinza mostram regiões delimitadas pelas isotermas indicadas ao lado. A faixa escura com temperaturas entre 1463 °C e 1438 °C, representa a zona pastosa entre $T_{liquidus}$ e $T_{solidus}$.

O projeto foi inicialmente dividido em três fases distintas:

- 1ª Câmaras de vácuo;
- 2ª Lingoteira, lança e sistemas de refrigeração e;
- 3ª Sistemas de suportes e periféricos.

A maior parte dos componentes, destas três fases, vem sendo desenvolvidos de maneira a permitir que sejam intercambiáveis com o protótipo existente, e assim possibilitar que sejam avaliados, e corrigidos quando necessário, sem que seja necessário concluir a construção de todo equipamento. Optou-se neste projeto pela construção modular, permitindo assim que novos módulos sejam desenvolvidos e instalados e a manutenção do equipamento seja facilitada. A figura 4 mostra esquematicamente as câmaras de vácuo para o equipamento VAR/VADER, na qual se pode verificar a construção de duas câmaras axialmente montadas, sendo a superior própria ao funcionamento do processo VAR, enquanto a câmara inferior foi desenvolvida para a operação pelo processo VADER.

Uma das partes mais críticas de um equipamento VAR, responsável quase que totalmente pela morfologia microestrutural e macroestrutural do lingote, é a lingoteira. Esta parte do novo equipamento, acoplada ao seu sistema de refrigeração, foi concebida de forma a possibilitar a investigação da influência da contração do lingote na transmissão de calor deste, para o líquido de refrigeração; este é um dos pontos mais importantes para a qualidade final de lingotes industriais. A nova lança tem a sua refrigeração efetuada pelos métodos clássicos, encontrados nos fornos VAR industriais.

Os sistemas de suporte e periféricos são constituídos pela estrutura de sustentação de todo o equipamento e; pelo sistema eletrônico de sensores e tomada de dados ligados à um computador para o controle automático do processo. O desenvolvimento de "softwares" de controle é uma consequência natural dos estudos que vem sendo desenvolvidos e; não é um problema grande no atual estado-da-arte dos equipamentos eletrônicos e de computação.

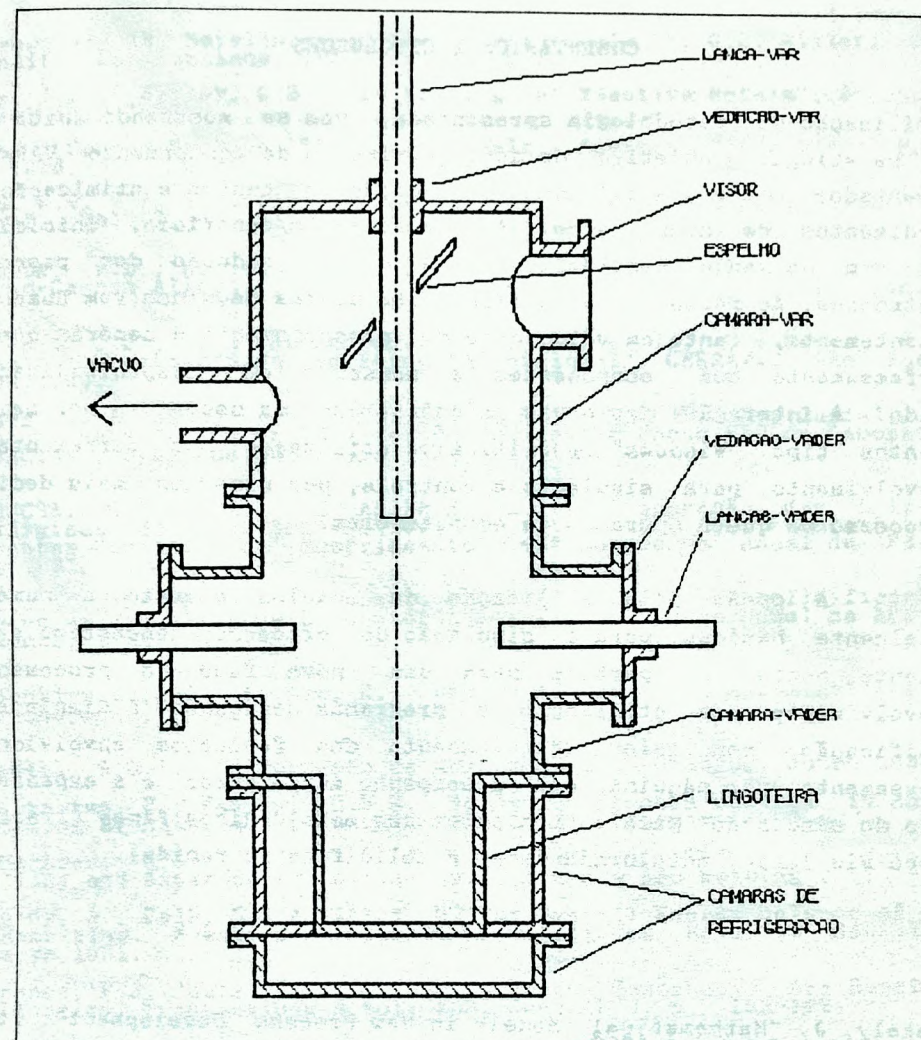


Figura 4. Desenho esquemático mostrando a concepção do equipamento VAR/VADER em desenvolvimento. O funcionamento das partes específicas é apresentado, quando necessário, no texto. A operação pelos processos VAR ou VADER é feita por um ou outro processo, exclusivamente. Muitos dos componentes do equipamento não são apresentados para simplicidade do desenho.

A utilização da metodologia apresentada, vem se mostrando muito útil para se atingir o objetivo de desenvolvimento do equipamento VAR/VADER apresentado, com a viabilização da redução de custos e otimização dos procedimentos de investigação. A relação custo/benefício, inicialmente alta, vem baixando consideravelmente com a redução dos preços de computadores. Ao mesmo tempo o desempenho destas máquinas vem aumentando constantemente, tanto em velocidade de processamento e memória como no interfaceamento com componentes e sensores em disponibilidade no mercado. A interação das novas máquinas com os usuários por meio de ambientes tipo "Windows" permitirá a utilização das ferramentas em desenvolvimento, para simulação e controle, por usuários mais dedicados ao processo do que à operação de computadores.

A opção pela utilização de modelos e métodos numéricos inicialmente básicos, para a simulação do processo, demonstrou ser um excelente ponto de partida para uma nova fase do processo: o desenvolvimento e a utilização de programas dedicados à simulação da solidificação, com maior detalhamento dos fenômenos envolvidos; o processamento por máquinas com desempenho muito maior e a expansão do método de simulação para outros processos metalúrgicos finos (tratamento térmico via laser, metalurgia do pó e solidificação rápida).

REFERENCIAS

- 1 Szekely, J. "Mathematical Models in New Process Development". Journal of Materials, february 1990.
- 2 Estados Unidos. U.S. Patent 4.261.412. Fine Grain Casting Method. Soykan, F.H.; Huntington, J.S. Apr. 14, 1981.
- 3 Yu, K.O.; McMullen, J.F.; Adasczick, C.B.; Maurer, G.E. "VADER and VAR Ingot Structures". Journal of Materials, february 1989.
- 4 Johnson, E.V.; The Uses of Vacuum in Metallurgy, cap. 10.
- 5 Isore, A.J.; Ivo, P.S. "Produção de aços especiais e superligas através de refino por ESR e VAR". Níquel.
- 6 Dembowsky, V. Plasma Metallurgy - The Principles. Elsevier Science Publishing Company, Inc. New York, 1985.
- 7 de FARIA, J. "Fabricação de Lingotes de Titânio pelo Processo de Fusão a Arco sob Vácuo com Eletrodo Consumível". Metalurgia-ABM, Vol. 46, n° 392, Outubro/Novembro de 1990.

8 Zirconium- IN Metallurgy of the Rarer Metals by G.L. Miller. London Scientific Publications, 1957, London, p.91

9 Ham, J.L.; Sibley, C.B. "Arc Melting of Reactive Metals". Journal of Metals, July 1957.

10 ASM. Source Book on Stainless Steels. American Society for Metals, USA, 1976.

11 Le, W.E. "Purification of Vanadium by Vacuum Melting". J. Vac. Sci. Technol., Vol. 7, No. 6.

12 Ammon, R.L.; Nuckman, Jr., R.W. "Vacuum Arc Melting of Tungsten-Hafnium-Carbon Alloy". J. Vac. Sci. Technol., Vol. 11, No. 1, Jan./Feb. 1974.

13 Mucsi, C.S.; Paes de Andrade, A.H.; Júlio Jr., O.; Neves, M.D.M.; "Projeto e Construção de um Forno VAR nacional". CEBRAVIC, São José dos Campos, 1989.

14 Paes de Andrade, A.H.; Mucsi, C.S.; Neves, M.D.M.; Padial, A.F.; Estrutura Metalúrgica de Lingotes Produzidos em Forno VAR de Laboratório. IX CBECIMAT, Aguas de São Pedro, SP, Dez. 1990.

15 MUCSI, C.S.; PAES DE ANDRADE, A.H. "Comparação das Estruturas Metalúrgicas de Lingotes Obtidos em Forno VAR de Laboratório sob Diferentes Condições de Resfriamento". 46^a Congresso Anual da ABM. São Paulo 1991.

16 Mucsi, C.S.; Paes de Andrade, A.H. "Simulação da solidificação de Lingotes em Forno VAR de Laboratório". XXIII Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, 1992.

17 Zienkiewicz, O.C.; Morgan, K.; Finite Elements and Approximation. John Wiley and Sons, Inc., 1983.

18 Padial, A.G.F.; Dissertação de Mestrado. IPEN-CNEN/SP. Junho 1994.

19 Mehrabian, R.; Wadley, H.N.G. "Needs for Process Control in Advanced Processing of Materials". Journal of Metals,, February 1985.

20 Bertran, L.A.; Zanner, F.J. "Interaction Between Computational Modelling and Experiments for Vacuum Consumable Arc Melting". ??

21 Jardy, A.; Falk, L.; Ablitzer, D. The Overall Energy Balance of Vacuum Arc Remelting. Memoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, Décembre 1991.

22 Zanner, F.J. "Metal Transfer During Vacuum Consumable Arc Remelting". Metallurgical Transactions B Vol. 10B, June 1979, p. 133-142.