

**ESTUDO SOBRE O PROCESSO V.A.R.
(VACUUM ARC REMELTING
ESCALA DE LABORATÓRIO**

CRISTIANO STEFANO MUCSI

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de Reatores
Nucleares de Potência e Tecnologia do
Combustível Nuclear.**

**Orientador:
Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade**

**São Paulo
1996**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTUDO SOBRE O PROCESSO V.A.R.
(VACUUM ARC REMELTING)
ESCALA DE LABORATÓRIO**

CRISTIANO STEFANO MUCSI

Dissertação de mestrado apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear

Orientador: Dr. Arnaldo H. Paes de Andrade

São Paulo \ - _ -

1996

ESTUDO SOBRE O PROCESSO V.A.R
(VACUUM ARC REMELTING)
ESCALA DE LABORATÓRIO

CRISTIANO STEFANO MUCSI

RESUMO

Os processos de metalurgia a arco elétrico sob vácuo destacam-se para a produção e refino de metais reativos e refratários (Zr, Ti, U) e de ligas especiais (aços especiais e superligas). Isso se deve à proteção e refino proporcionados pelo ambiente de vácuo e pela intensa geração de calor do arco elétrico, assim como pela possibilidade de obtenção de um produto final homogêneo. Este trabalho apresenta um estudo sobre o processo VAR (Vacuum Arc Remelting), desde a construção de um protótipo em escala de laboratório, passando pela avaliação do seu funcionamento e dos produtos obtidos até o desenvolvimento de um modelo matemático e um aplicativo a ele associado, para a simulação do processo de formação do lingote, sob diferentes condições operacionais. Essa metodologia fornece então, como resultado, um entendimento maior da tecnologia envolvida no processo VAR, permitindo analisar e compreender a influência dos parâmetros de funcionamento do equipamento na qualidade do lingote e também, especificar e sugerir novos equipamentos relacionados, numa escala laboratorial.

A STUDY ON THE LABORATORY SCALE
VACUUM ARC REMELTING PROCESS

CRISTIANO STEFANO MUCSI

ABSTRACT

The vacuum electric arc process are outstanding process to the melting and refining of reactive and refractory metals (Zr, Ti, U) and special alloys (special steels and superalloys). This is due to the protection and refining conditions provided by the vacuum environment and the intense electric arc heat generation, yielding homogeneous products. This work presents a study on the VAR process, starting with the project and set up of a laboratory scale prototype followed by the evaluation of its operation and products, ending with the development of a mathematical model and a related software, to be used in the simulation of the ingot build up process under different operational conditions. This methodology then provides, as a result, a better understanding of the VAR process technology, allowing the evaluation of the influence of the equipment working parameters to the ingots quality, and to specify and suggest new related laboratory scale devices and its features.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução ao processo VAR e seus produtos.....	1
1.1.1 O processo VAR.....	1
1.1.2 O processo VADER.....	3
1.1.3 Comentários sobre as características do forno VAR.....	4
1.2 O refino químico.....	5
1.3 Aplicação do processo VAR à vários materiais.....	5
1.4 O produto obtido e o projeto da qualidade final.....	7
2 BASES TEÓRICAS DO TRABALHO	9
2.1 Estabelecendo um sistema de estudo.....	9
2.2 Principais fenômenos físicos envolvidos no processo VAR.....	10
2.2.1 O arco elétrico.....	10
2.2.2 Controle do arco elétrico.....	13
2.2.3 Problemas advindos da utilização do arco elétrico.....	15
2.2.4 Transferência metálica eletrodo-lingote.....	16
2.2.5 A formação do lingote - aspectos metalúrgicos.....	18
2.3 Introdução ao modelamento matemático.....	20
2.3.1 Modelamento matemático e simulação computacional do processo.....	20
2.3.2 O fluxo de calor durante a formação do lingote.....	21

2.3.3	Solução da equação de condução de calor.....	22
2.3.4	Aplicações práticas do modelamento matemático e da simulação.....	24
2.4	Conceitos de solidificação.....	27
2.4.1	Nucleação homogênea, heterogênea e condições de equilíbrio.....	28
2.4.2	O crescimento de protuberâncias.....	29
2.4.3	Características das dendritas.....	30
2.4.4	Macroestrutura dos lingotes.....	33
3	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	35
4	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....	36
4.1	Metodologia adotada no desenvolvimento do trabalho.....	36
4.2	O equipamento de fusão.....	37
4.2.1	O protótipo VAR.....	37
4.2.2	Parâmetros de operação.....	50
4.3	Obtenção de lingotes e análise metalográfica.....	52
4.3.1	Abordagem experimental.....	52
4.3.1.1	Obtenção e preparo dos lingotes.....	54
4.3.2	Resultados experimentais.....	57
4.3.2.1	Metalografia.....	57
4.3.2.2	Resultados metalográficos - aspectos qualitativos.....	64
4.3.2.3	Resultados metalográficos - aspectos quantitativos.....	72
5	MODELAMENTO MATEMÁTICO E A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SOLIDIFICAÇÃO DO LINGOTE.....	73
5.1	Introdução.....	73
5.2	Determinação da equação constitutiva do problema.....	74
5.2.1	A equação de condução de calor.....	74

5.2.2	A geração interna de calor.....	75
5.2.3	A mudança do sistema referencial.....	77
5.3	Aproximação das derivadas - o método das diferenças finitas.....	78
5.3.1	Discretização do domínio.....	81
5.3.2	As condições de contorno e sua discretização.....	82
5.3.3	Discretização da equação diferencial.....	87
5.3.4	Desenvolvimento do algoritmo de simulação.....	88
5.3.5	Desenvolvimento e resolução da equação matricial.....	89
5.3.6	Valores derivados da distribuição de temperaturas - gradiente térmico, velocidade de resfriamento e tempo local de solidificação.....	91
5.3.6.1	Gradiente térmico.....	92
5.3.6.2	A velocidade de resfriamento.....	93
5.3.6.3	O tempo local de solidificação.....	94
5.3.6.4	Parâmetros termofísicos do material.....	95
5.4	Resultados da simulação.....	95
5.4.1	Definições.....	95
5.4.2	Resultados.....	96
5.4.3	Os valores derivados calculados - gradiente térmico, velocidade de resfriamento e tempo local de solidificação.....	97
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	113
7	CONCLUSÕES.....	118
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	120
8.1	Instrumentação proposta para um forno VAR.....	120
8.2	Proposição de um novo equipamento VAR/VADER.....	123
8.3	Especificações gerais para o forno VAR/VADER.....	126

APÊNDICE 1.....	127
APÊNDICE 2.....	129
APÊNDICE 3.....	131
APÊNDICE 4.....	139
APÊNDICE 5.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151

LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO

	.....Potência
	.....Tensão elétrica
	.....Corrente elétrica
$k, k(T)$	Conductividade térmica
∇^2.....	....Operador Laplaciano
∇Operador Nabla
$T(\mathbf{r},t)$.....	.....Temperatura num ponto e instante
\dot{w}_i.....	.....Potência gerada ou consumida internamente
$\rho; \rho(T)$.....	.....Densidade
$\frac{\partial}{\partial t}$.....	.....Derivada temporal
ΔG.....	.....Variação da Energia Livre
Q.....	.....Concentração de soluto no sólido na temperatura T^*
Cl.....	.....Concentração de soluto no líquido na temperatura T^*
T_f.....	.....Temperatura de fusão
$T_s, T_{solidus}, T_{sol}$.....	.....Temperatura <i>solidus</i> de uma liga
$T_h, T_{liquidus}, T_{liq}$.....	.....Temperatura <i>liquidus</i> de uma liga
f_s.....	.....Fração de sólido
f_l.....	.....Fração de líquido
C.....	.....Concentração
Q_0.....	.....Concentração inicial
k.....	.....Coeficiente de difusão
T^*.....	.....Temperatura específica
σ.....	.....Tensão superficial
a, b.....	.....Constantes genéricas

d, X, X', X_2	Espaçamentos interdendríticos
G, G_r	Gradiente térmico
G_r	Componente radial do gradiente térmico
G_z	Componente axial do gradiente térmico
$\mathbf{R}, v, \mathbf{v}$	Velocidade de deslocamento da interface
k	Condutividade térmica
dH/Bt	Varição da entalpia com o tempo
AH/At	Varição da entalpia com a temperatura
C_p	Calor específico
C_p^*	Calor específico fictício
$f, f(r, t), f(r', t'), g, \text{etc.}$	Funções
\hat{r}, \hat{z}	Coordenadas genéricas
\hat{e}_r, \hat{e}_z	Versores genéricos
\mathbf{r}	Vetor posição
r, z, t, r', z', t'	Coordenadas cilíndricas para dois referenciais distintos.
Δq	Intervalo entre duas coordenadas q
Δt	Intervalo entre dois instantes de tempo
$F(f, \dots)$	Função composta
$\nabla^2 \approx \nabla^2_{i,j} \approx \nabla^2_{i,j,k}$	Aproximações da temperatura
h	Espessura da lingoteira
h	Coefficiente de transnissão de calor entre superfícies
$R_{radial}, R_{axial}, R, R_0$	Resistências térmicas
\mathbf{v}	Velocidade de deslocamento da interface
$\{A\}$	Matriz
(T)	Vetor de temperaturas
(b)	Vetor
T	Velocidade de resfriamento
v_r	Componente radial da velocidade de deslocamento da interface

v_zComponente axial da velocidade de deslocamento da interface
 t_sTempo local de solidificação
 $a, a(T)$Difusividade térmica

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO AO PROCESSO VAR E SEUS PRODUTOS

A produção e refino de metais reativos e refratários (como o zircônio, o titânio e o urânio), e de metais e ligas especiais (aços especiais e superligas), teve grande evolução a partir das necessidades tecnológicas surgidas na década de 50. Os processos de metalurgia a arco elétrico sob vácuo destacaram-se devido a proteção e refino proporcionados pelo ambiente de vácuo, pela intensa liberação de calor do arco elétrico, possibilidade de obtenção de um produto final homogêneo e possibilidade de controle das condições de fusão e solidificação (1). Dentre estes, os processos VAR ("Vacuum Arc Remelting") e VADER ("Vacuum Arc Double Electrode Remelting"), pelas suas características oferecem alta eficiência energética, além da relativa simplicidade das fontes de corrente necessárias à manutenção do arco elétrico, como dos sistemas de vácuo e de controle.

1.1.1 O PROCESSO VAR

A figura 1.1 apresenta esquematicamente um forno VAR. Nesta figura 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 solidifica. Com a continuidade da fusão o novo material fundido deposita-se sobre o solidificado anteriormente. Devido à diferença entre

diâmetros do eletrodo e da lingoteira, o eletrodo é continuamente abaixado para que seja introduzido na lingoteira, de forma a compensar o seu consumo e manter a distância constante entre o 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.

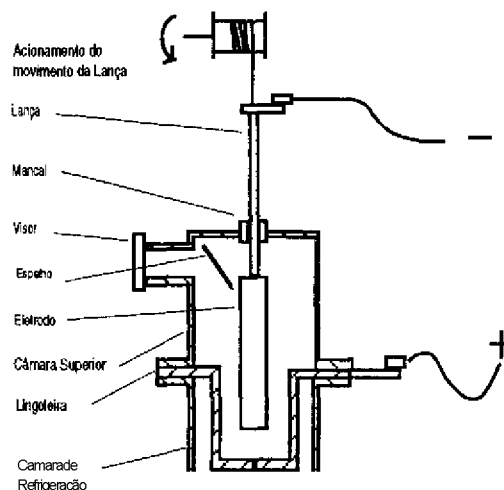


Figura 1.1. Desenho esquemático de um forno VAR.

A ação do arco elétrico no topo do lingote e a intensa refrigeração da lingoteira impõe um elevado gradiente térmico ao metal líquido. Estes, aliado à 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. Além da anisotropia, a solidificação contínua desfavorece a precipitação, comumente verificada nos processos de lingotamento convencional, produzindo então um lingote com maior homogeneidade na distribuição dos componentes da liga. O alto gradiente térmico é interessante quando o crescimento direcional é desejado, tal qual na produção de pás de reatores de turbinas. Porém, a necessidade de obtenção de lingotes com grãos pequenos e sem orientação preferencial foi o que motivou o desenvolvimento do processo VADER (2).

1.1.2 O PROCESSO VADER

O processo VADER apresenta algumas peculiaridades, que o diferem 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 1.2.

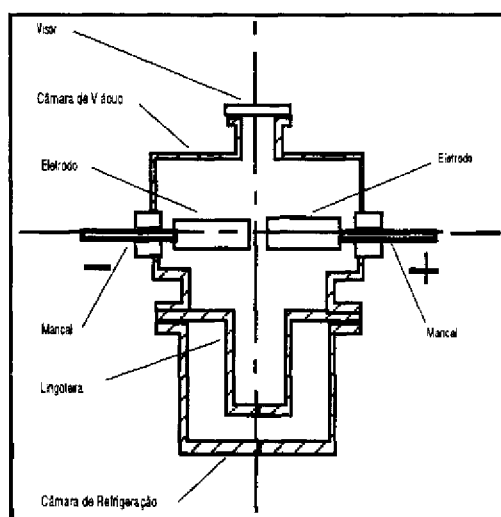


Figura 1.2. Desenho esquemático de um forno VADER

No intervalo de tempo entre o início e o fim da queda os núcleos sólidos se formam; núcleos darão início à solidificação, permitindo a obtenção de grãos finos e sem orientação preferencial (2). O processo VADER é um novo desenvolvimento na tecnologia de fusão a arco que tem um grande potencial como 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 ultra-som e forjados diretamente em componentes com formato pronto para o acabamento (3,4).

1.1.3 COMENTÁRIOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DO FORNO VAR

As características operacionais dos fornos VAR E VADER garantem qualidades ímpares aos seus produtos finais. Porém essas qualidades só podem ser atingidas se a preparação do material para fusão for adequadamente realizada. Esta preparação consiste na confecção de eletrodos longos, com a razão entre o comprimento e o diâmetro maior que a prevista para o lingote, devem ter distribuição homogênea da composição e serem retilíneos. A homogeneidade da composição é necessária pois, como comentado anteriormente, o processo de formação do lingote ocorre continuamente, dessa forma 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 é proveniente de uma fusão anterior. Essa fusão pode ser por um outro processo como o VIM ("vacuum induction melting"), VAR ou mesmo pelo processo VADER, quando vários lingotes são soldados para formar um eletrodo e então refundidos, pelo método VAR ou VADER.

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

1.2 O REFINO QUÍMICO

Uma abordagem qualitativa e quantitativa é feita por Dembowski (5). O trabalho apresenta o plasma como uma ferramenta para vários processos metalúrgicos. Efetua também 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.

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 (6) e do zircônio (7). Em ambos 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 as pressões 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 (8).

1.3 APLICAÇÃO DO PROCESSO VAR À VÁRIOS MATERIAIS.

O titânio é um metal bastante semelhante ao zircônio e é amplamente utilizado na indústria aeronáutica e aeroespacial. Neste aspecto, Faria (6) apresenta um trabalho sobre o processo clássico para a consoidação e o refino da esponja de titânio, em escala piloto. Neste trabalho são também apresentados resultados interessantes sobre a preparação e características do eletrodo a partir da esponja de titânio obtida pelo processo Kroll (7): britagem da esponja; compactação em briquetes e; soldagem por meio de solda resistiva em um equipamento especialmente desenvolvido.

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 encontra-se um tipo de liga denominada de Zircalloy, a qual é largamente utilizada na construção dos tubos do elemento combustível para reatores do tipo PWR ("Pressurized Water Reactor"). A tecnologia para a fusão a arco de eletrodos consumíveis sob vácuo de ligas de zircônio é a mais adequada para garantir a qualidade do produto que acompanhará, no caso de vasos de pressão, a vida útil do reator (9).

Obteve-se uma boa aceitação dos processos na purificação e controle de microestruturas de aços-liga e superligas (3). Superligas são ligas metálicas desenvolvidas para o trabalho em temperaturas elevadas. São utilizadas num nível mais alto de temperatura em comparação ao seu ponto de fusão do que qualquer outro aço em uso comercial (800-1000 °C). O aparecimento dos motores a jato ocorreu paralelamente ao desenvolvimento das superligas, especialmente devido à sua resistência a alta temperatura, fluência, resistência à fadiga térmica e mecânica e estabilidade estrutural. O processo VAR foi o primeiro a ser utilizado para a produção de superligas e ainda é utilizado amplamente até os dias de hoje, além de ser o único aceito pela indústria aeronáutica. A utilização do processo VAR na elaboração de superligas foi decisivo para os diversos programas estratégicos das grandes nações do mundo, notadamente os projetos aeroespaciais, nucleares, e de aviação comercial, civil e militar (10).

Papier, em seminário proferido (11), apresentou o desenvolvimento do processo de elaboração de superligas e aços maraging na empresa Aubert Duval (a empresa possui vários fornos tipo VAR com capacidades entre 200 kg e 30 toneladas), com grande ênfase para a indústria aeronáutica. Enfatizou o fato da baixa qualidade dos aços maraging obtidos unicamente pelo processo VAR, devido à problemas com os carbetos e óxidos de titânio, concluindo ser necessário um processamento inicial num forno de indução sob vácuo, VIM, e posteriormente uma refusão pelo processo VAR, obtendo-se assim a qualidade desejada, com a composição exata, característica do método VIM, e com a homogeneidade otimizada pelo processo VAR.

Os fornos VAR são também utilizados para a obtenção de aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação ("precipitation hardening"), como o tipo ARMCO 15-5 PH (0,04 C, 15 Cr, 4,6 Ni, 3,3 Cu, 0,25 Nb) 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 (12).

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 (13) e ligas com alto ponto de fusão tal como as ligas de tungstênio-háfênio-carbono (14).

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

Os catálogos e informativos dos fabricantes de equipamentos (Leybold Heraeus) e produtores de metais reativos (Cezus), bem como a tendência mundial no sentido de automação de processos, mostram que para os equipamentos tornarem-se competitivos, em qualidade e custos, a automação é um dos fatores importantes.

1.4 O PRODUTO OBTIDO E O PROJETO DA QUALIDADE FINAL

A utilização dos resultados de modelamento matemático e simulação computacional é essencial para: a otimização do projeto de um novo forno VAR/VADER para a produção em escala pequena/piloto, e para o controle da microestrutura e macroestrutura dos lingotes produzidos, analogamente ao que ocorre durante o processo de soldagem a arco elétrico (15).

Szekely (16), em trabalho recente apresenta uma discussão geral sobre métodos matemáticos utilizados no desenvolvimento de novos processos. Neste trabalho apresenta como ponto de partida a diminuição dos preços dos equipamentos de computação, utilizados na simulação de processos por meio do modelamento matemático. A utilização desta ferramenta acarreta uma alta redução de custos e aumento da velocidade de desenvolvimento do processo. Entre os processos citados, o lingotamento contínuo ("continuous casting"), processo análogo aos processos VAR e VADER porém sem a fonte de calor do arco elétrico, é tido como uma das tecnologias que mais se aproveitam do auxílio do modelamento matemático, com muitos trabalhos sendo realizados na área de transferência de calor, solidificação, formação de trincas e deformação térmica, sendo um

desafio para os pesquisadores.

A necessidade de controle das operações no processamento de materiais é apresentada de uma forma geral por Mehrabian e Wadley. Neste artigo (17) apresentam a necessidade de se conhecer o interrelacionamento entre estrutura, propriedade e processo. Este relacionamento criou um desafio no sentido de redirecionar a tecnologia de ensaios não destrutivos, radiografia por raios-x e ultra-som, para a avaliação do processo durante o seu desenrolar. Apresentam alguns conceitos básicos do método tais como: modelos de processo, que relacionam as variáveis do processo às propriedades/microestrutura e; controle inteligente via sistema de inteligência artificial ou via sistema baseado em modelo. De uma forma geral prevêem que a utilização de ambos os sistemas pode otimizar o desenvolvimento do processo de controle. Um ponto crucial no desenvolvimento de qualquer sistema desse tipo é a criação de sensores adequados às medidas a serem efetuadas pois cada processo tem necessidades específicas; mais ainda apresentam a necessidade de medição em tempo real das variáveis de interesse para o controle imediato da qualidade final do produto. Citam o lingotamento contínuo como um exemplo típico da tecnologia que requer este tipo de controle, no qual se necessita determinar o formato e espessura da frente de solidificação de forma a minimizar a macrosegregação do produto, utilizando-se de aparelhagem de ultra-som para tal tarefa. Outros processos são citados porém estão fora do escopo deste trabalho.

2 BASES TEÓRICAS DO TRABALHO

2.1 ESTABELECENDO UM SISTEMA DE ESTUDO

Para que se pudesse efetuar um estudo sistemático sobre o processo de formação do lingote no forno VAR, um procedimento de análise foi estabelecido. Foram isolados, teoricamente, a lingoteira, lingote e o eletrodo. Esse conjunto passa a ser chamado de sistema de estudo, dentro do qual ocorrem a maior parte dos fenômenos físicos e químicos envolvidos na formação e, portanto, na qualidade final do lingote. Sobre esse sistema atuam os parâmetros, chamados de parâmetros de controle do processo. Os ditos diretos: dimensões da lingoteira e eletrodo; fluxo e/ou temperatura da água no sistema de refrigeração da lingoteira; corrente e tensão do arco elétrico; pressão da atmosfera no topo do lingote; constantes termofísicas do material e os parâmetros derivados: velocidade de preenchimento da lingoteira ou consumo do eletrodo.

A figura 2.1 mostra uma representação esquemática deste sistema. Nesta são indicados os principais fenômenos que ocorrem dentro do sistema de estudo.

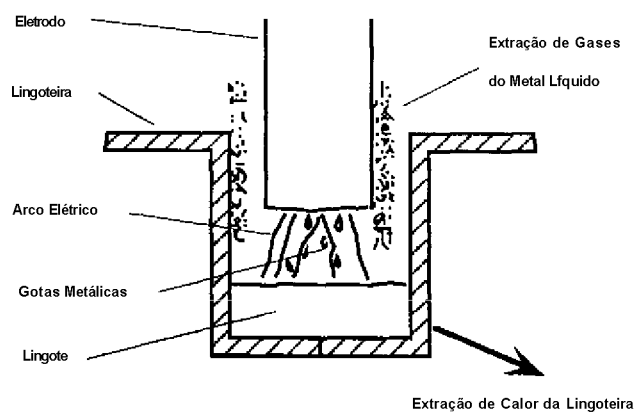


Figura 2.1. Desenho esquemático do sistema de estudo.

Inicialmente será dada menor atenção ao início e ao final do ciclo de operação

do equipamento, pois estes constituem-se numa porção relativamente pequena do mesmo, e influenciam principalmente as extremidades do lingote, como pode ser observado na figura 2.2. Nesta figura, que representa o ciclo de operação do forno VAR, mostrando o comportamento da corrente e da tensão do arco elétrico ao longo do processo. Onde:

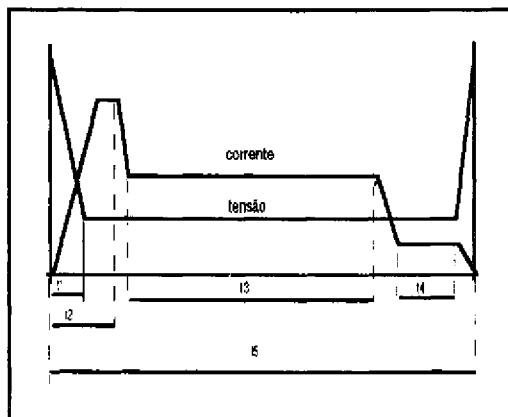


Figura 2.2. Ciclo de operação, esquemático, de uma fusão em forno VAR.

- t₁-instante inicial, quando se estabelece o arco elétrico (0-1 s);
- t₂-pré-aquecimento, com alta corrente (0-10 s);
- t₃-período de fusão com corrente constante;
- t₄-"hot-topping", manutenção do arco elétrico de baixa potência, provocando um resfriamento lento do topo do lingote (10-30 s) e;
- t₅- tempo total de fusão.

2.2 PRINCIPAIS FENÔMENOS FÍSICOS ENVOLVIDOS NO PROCESSO VAR

2.2.1 O ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico, estabelecido entre a extremidade do eletrodo e o topo do lingote, constitui-se de um gás ionizado pela passagem de corrente elétrica. Quando sujeito a um campo elétrico estático, um gás ionizado age como um condutor, os portadores de carga se redistribuem rapidamente de forma a blindar o gás contra o campo elétrico. Às

regiões relativamente livres do campo elétrico, onde as cargas elétricas positivas e negativas estão quase em equilíbrio dá-se o nome de Plasma (5). As regiões adjacentes, com grande concentração de cargas denominam-se de bainhas ("sheaths"), como apresentado na figura 2.3. O estado estacionário de equilíbrio implica num movimento orientado de partículas, motivado, neste caso, pela aceleração das partículas carregadas dentro de um campo elétrico. Sobre estas circunstâncias todas as partículas compartilham da mesma temperatura termodinâmica (5), que pode ser determinada a partir dos parâmetros elétricos envolvidos no processo, tensão e corrente elétrica do arco.

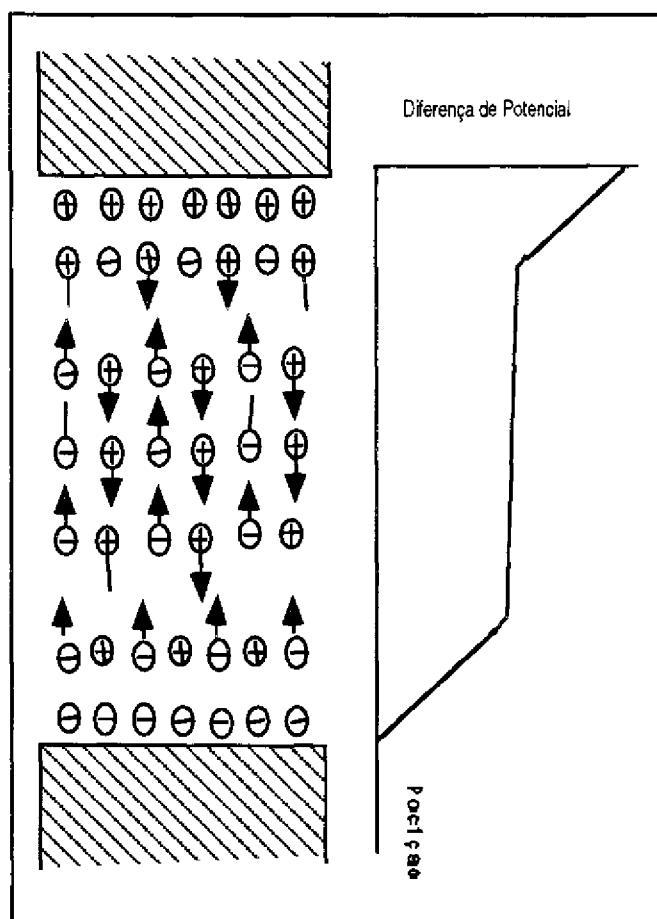


Figura 2.3. Desenho esquemático dos componentes principais de um plasma, mais o comportamento da tensão ao longo do seu comprimento.

A movimentação de cargas elétricas no arco gera uma quantidade de calor, por unidade de tempo, concentrado num volume relativamente pequeno e distribuída dentro deste. A distribuição de corrente ao longo do eletrodo, arco elétrico e lingote não é uniforme nem constante, fato este que embora não seja discutido aqui é assunto de pesquisas (18). A distribuição de corrente no sistema de estudo é de importância fundamental pois caracteriza a forma e a velocidade de transferência do metal líquido e a distribuição de potência elétrica depositada sobre o topo do lingote (um dos responsáveis pela qualidade final do produto obtido). A potência (quantidade de energia por unidade de

tempo) gerada pelo arco elétrico, pode ser calculada por:

$$P=V*I$$

(2.1)

Parte dessa potência é consumida para o aquecimento e fusão do eletrodo, porém, para o presente trabalho, o valor dessa fração não está prontamente disponível na literatura e será determinado posteriormente, em função dos resultados experimentais, mas situa-se em torno da metade da potência total do arco elétrico. Bertran e Zanner (18, 19) em dois artigos dedicados ao modelamento e simulação computacional da solidificação em fornos VAR de ligas de urânio-nióbio, estudo este que voltará a ser retomado mais adiante, apresentam uma avaliação teórica da quantidade de calor irradiada pelo eletrodo e pela superfície de metal líquido para as paredes da lingoteira. Nestes, concluem que os fluxos de energia térmica irradiada pelo lingote são desprezíveis no balanço total de energia do processo.

A descrição de um equipamento dedicado ao estudo dos fenômenos envolvidos no processo VAR é encontrada num breve capítulo elaborado por Johnson (20). Este autor enumera neste capítulo as vantagens do método que já foram apresentadas no decorrer do presente texto. Apresenta um dado interessante e muito importante, o qual diz respeito à diferença de pressão entre a região do arco e a pressão lida no medidor distante deste, a qual pode chegar a 1 torr ($1,33 \times 10$ Pa). Mostra um dispositivo para o estudo do comportamento do arco elétrico sob diferentes condições de operação, permitindo a medida da pressão do gás, na região próxima ao arco elétrico. A observação e o registro deste são feitos por uma janela lateral bastante ampla, na altura do arco elétrico, donde se visualiza uma lingoteira caracterizada por sua baixa profundidade. Após uma breve discussão sobre o arco elétrico, que será retomada mais adiante, e apresenta as aplicações do processo para vários materiais: metais reativos e refratários; ligas especiais (resistentes ao calor); aço ferramenta inoxidável; aços para a construção mecânica e; metais não ferrosos.

Mais recentemente, medições e análises do balanço térmico nos processos de fusão de eletrodos consumíveis foram efetuados, em trabalho dedicado ao desenvolvimento de modelos para a simulação da solidificação em fornos VAR e ESR ("Electro Slag Remelting"), por Jardy, Ablitzer e Falk (20), na qual propõe um conjunto de fontes e sumidouros de calor dentro de um processo VAR. A figura 2.4 apresenta uma representação esquemática desta análise. Os resultados de fluxo térmico são experimentais em sua maioria, sendo obtidos com a extensa e cuidadosa instrumentação dos

equipamentos utilizados, chegando a resultados de uma perda de potência elétrica entre 20 % a 30 % da potência total consumida.

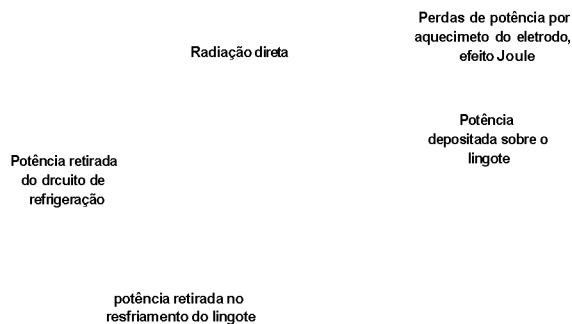


Figura 2.4. Representação do balanço térmico de uma fusão em forno VAR.

2.2.2 CONTROLE DO ARCO ELÉTRICO

O controle da distância entre a extremidade inferior do eletrodo e o topo do lingote pode ser feita manual ou automaticamente. Porém as duas formas baseiam-se na utilização da relação direta entre a distância eletrodo-lingote e a diferença de potencial elétrico total entre estes pontos. A equação que relaciona estas duas grandezas é conhecida como equação de Ayrton (22), e é apresentada abaixo, para uma dada corrente elétrica do arco, representada graficamente na figura 2.5.

$$V(l) = V_0 + a \cdot l \quad (2.2)$$

Onde l é o comprimento do arco, a é uma constante a ser ajustada experimentalmente.

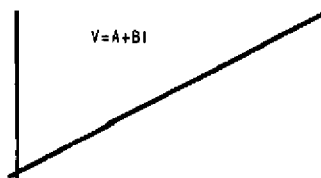


Figura 2.5 . Relação teórica entre a tensão elétrica e o comprimento do arco, obtida a partir da equação de Ayrton.

Na região compreendida entre a extremidade do eletrodo e o topo da lingote. Considerando-se a existência de fenômenos de transferência, consumo de eletrodo e flutuações na superfície de metal líquido, é evidente a impossibilidade de que a distância entre eletrodo e lingote seja mantida constante, embora todas as outras variáveis o sejam, em média, a figura 2.6 mostra esquematicamente esta situação, de forma a ilustrar a afirmação. Esta impossibilidade da constância da distância entre eletrodo e topo do lingote é devida à vários fatores: movimentação e instabilidades do arco elétrico; geometria sem simetria esférica; desgaste irregular da superfície do eletrodo devido à concentração do arco na mancha catódica, que se movimenta sobre a extremidade do eletrodo e pela formação de gotas; instabilidade da superfície líquida do topo do lingote em formação, acentuada pela transferência de gotas e; em alguns casos o curto circuito instantâneo devido ao contato, por uma gota de metal líquido, entre a extremidade do eletrodo e o topo do lingote. O comportamento da tensão elétrica em função do tempo pode ser avaliado com a utilização de um osciloscópio e um registrador em papel. Equipamentos mais modernos permitem a obtenção dessas curvas por intermédio de um computador acoplado a um dispositivo específico, dessa forma permitindo a manipulação dos resultados mais eficientemente.

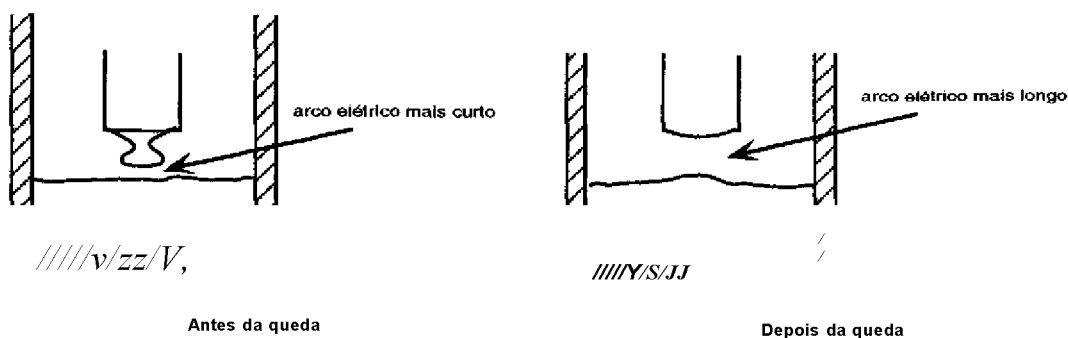


Figura 2.6 . Aspecto esquemático da variação do comprimento do arco elétrico durante a fusão, devida à transferência metálica do eletrodo para a lingoteira.

Com excessão ao último fator citado acima, o curto circuito, todos os outros são satisfatoriamente controlados por um sistema manual ou automático. No caso de haver curto circuito entre eletrodo e lingote, com conseqüente extinção momentânea do arco elétrico, a literatura apresenta a influência deste fator na existência de microsegregações em aços (23).

Nacey (59) apresenta um novo nível de controle para a soldagem a arco elétrico. Este controle baseia-se na utilização de inteligência artificial para o controle direto do curto-circuito durante a transferência metálica eletrodo-lingote. Indicam que esta técnica oferece muitas vantagens, como a diminuição do nível de espirramento ("spattering"), quando da transferência metálica, e o aumento da velocidade de fusão. Isto é conseguido com o controle, inteligente, da corrente elétrica, não mais mantendo-a fixa mas impondo-se uma forma de onda adequada (a aplicação dessa fonte de corrente no processo VAR diminuiria a quantidade de material que espirra para as paredes frias da lingoteira, resfriando-se e podendo diminuir a transferência de calor do lingote para a lingoteira ou, se houver despreendimento dessas partículas solidificadas, gerar uma fonte de nucleação homogênea).

2.2.3 PROBLEMAS ADVINDOS DA UTILIZAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO

Um risco operacional está associado ao funcionamento típico de um forno VAR. Este é devido à possibilidade do desvio do arco elétrico, do topo do lingote, para a lateral da lingoteira. A ação do arco elétrico na parede da lingoteira, relativamente pouco espessa, pode causar a sua perfuração, devido ao superaquecimento causado pela passagem de corrente por um só ponto. Esta perfuração permite a entrada do líquido refrigerante, que se encontra a uma pressão muito mais alta que aquela existente no interior da lingoteira, extinguindo o arco elétrico. O sólido a alta temperatura, dentro da lingoteira causa a evaporação rápida da água dentro do forno e o conseqüente aumento da pressão interna do forno. Esse aumento violento de pressão pode ser catastrófico, resultando na explosão deste e conseqüente comprometimento das regiões adjacentes a este, quando ocorrendo em fornos industriais. Este fenômeno é agravado no caso da fusão de metais reativos, como o titâni e o zircônio, devido à reação entre a água e o metal, oxidação do metal, com a

consequente liberação de hidrogênio e oxigênio. Esta mistura confinada num volume, caracterizado por alta pressão e temperatura internas, geralmente agrava as consequências da perfuração da lingoteira pelo arco elétrico.

Embora correntemente a água seja utilizada como líquido refrigerante, realizaram-se algumas tentativas com sódio líquido, o qual oferece uma maior capacidade de extração do calor das superfícies externas da lingoteira. No caso de uma perfuração a oxidação do metal é evitada diminuindo assim os riscos de acidentes. O desvio do arco elétrico, do topo do lingote para a lateral da lingoteira, é devido diretamente a dois fatores: descentralização do eletrodo em relação a lingoteira e; controle incorreto da distância entre eletrodo e o topo do lingote, quando esta é maior que a distância entre o eletrodo e a parede da lingoteira (24, 25).

2.2.4 TRANSFERÊNCIA METÁLICA ELETRODO -LINGOTE

O metal líquido, proveniente do eletrodo, separa-se do mesmo, caindo, logo após atingir um superaquecimento, que varia entre 80 °C e 280 °C (19). Uma melhor explanação dos motivos que causam a transferência do metal líquido, do eletrodo para o lingote, pode ser feita discutindo-se as forças atuantes no metal líquido, na extremidade do eletrodo, como pode ser visto esquematicamente na figura 2.7. Sobre metal liquefeito agem inicialmente duas forças ou potenciais: O seu peso próprio e a tensão superficial. Estas causam a formação de um depósito de metal líquido em forma gota na extremidade inferior do eletrodo. A distribuição de corrente contínua por essa gota provoca o aparecimento de um estreitamento no contato com o eletrodo (pescoço). Este estreitamento deve-se à pressão magnética do arco sobre a gota. Esta pressão distribuída em todas as direções, contribui para a separação da gota, assim que ocorra um desequilíbrio nas forças que sobre ela atuam, apêndice 1 (26).

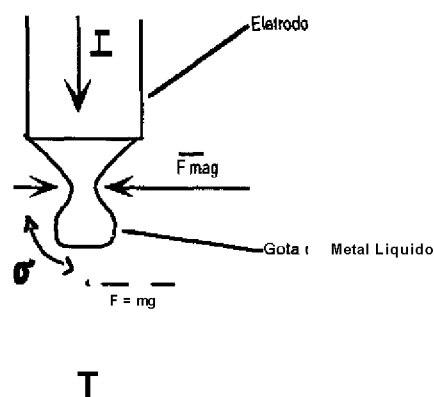


Figura 2.7 . Principais forças atuantes numa gota de metal líquido, submetida a passagem de corrente elétrica.

Nos processos de soldagem por eletrodos consumíveis, aos quais o processo VAR muito se assemelha, normalmente são consideradas outras forças atuantes na separação do metal líquido do eletrodo. Brandi e Taniguchi (27) apresentam um resumo dessas forças: Força de arraste do plasma e do gás de proteção, muito importante nas soldagens pelos processos TIG, MIG e Plasma, porém de pouca importância para o processo VAR; a força devida às reações químicas, útil na avaliação da soldagem por eletrodos consumíveis e; força devida à evaporação metálica, cuja existência tem como hipótese a evaporação do metal líquido causada pela grande densidade de corrente em um ponto do eletrodo (mancha catódica).

A forma de transferência é governada pela composição das forças, que agem sobre o metal líquido e a distância entre eletrodo e lingoteira. Esta pode ser na forma de um "spray", na forma globular ou como um curto-circuito causado, entre o eletrodo e a lingoteira, pelo metal líquido em queda.

Zanner (18) apresenta um extenso trabalho referente à forma de transferência do material entre eletrodo e lingoteira. Neste trabalho mostra uma revisão bibliográfica sobre o assunto, e realiza uma série de experimentos de fusão em um forno VAR suficientemente instrumentado para a aquisição de dados e posterior análise de resultados. São efetuadas, basicamente, medidas dos parâmetros elétricos de forma a se determinar curtos circuitos entre eletrodo e lingote, outros parâmetros típicos do processo. Em fornos a arco, a fusão ocorre em pressões entre 0,133 a 1,33 Pa (10^{-3} a 10^{-2} torr). Para estas pressões o fenômeno de plasma que ocorre no equipamento não pode ser classificado como um arco elétrico sob vácuo ("vacuum arc") embora esta denominação seja comumente

utilizada. Nestes equipamentos devido à baixa pressão o arco deve ser sustentado principalmente pelos vapores metálicos do banho líquido. O resultado que o trabalho se propõe é relacionar o comprimento de arco e a forma de transferência. Para arcos curtos, $< 0,03$ m (3 cm) a forma de transferência ocorre pelo contato de gotas de metal líquido entre eletrodo e lingote. No caso de arcos com comprimento maior que 0,1 m (10 cm) a transferência não mais ocorre por contato, mas sim pela separação de glóbulos de metal líquido do eletrodo, antes que estes entrem em contato com o metal do lingote. Para um valor intermediário de comprimento de arco, entre 0,03 m e 0,1 m (3 cm e 10 cm) ocorre uma combinação entre a transferência globular e a por contato.

2.2.5 A FORMAÇÃO DO LINGOTE - ASPECTOS METALÚRGICOS

Num artigo sobre soldagem de ligas de alumínio, Stoop, Luyendijk e Ouden (15) apresentam uma correlação entre a microestrutura, macroestrutura e propriedades em função dos parâmetros envolvidos no processo de soldagem (corrente e tensão elétricas, velocidade de alimentação e deslocamento). Este trabalho, pelo menos qualitativamente, é um ponto de partida para o projeto de investigação sistemática da influência das variáveis do processo na qualidade final do produto obtido no forno VAR.

A parte do processo que define a qualidade metalúrgica do produto final é a solidificação, que, no forno VAR, ocorre pela deposição contínua de metal líquido sobre o lingote, que se solidifica. Forma-se uma poça de metal líquido no topo do lingote, a qual tem o formato típico do bngotamento contínuo (28) mostrado na figura 2.8. Nesta figura pode-se observar o lingote dividido em três partes distintas: região solidificada; região pastosa, com mistura entre sólido e líquido (no caso de uma liga metálica) e; região líquida.

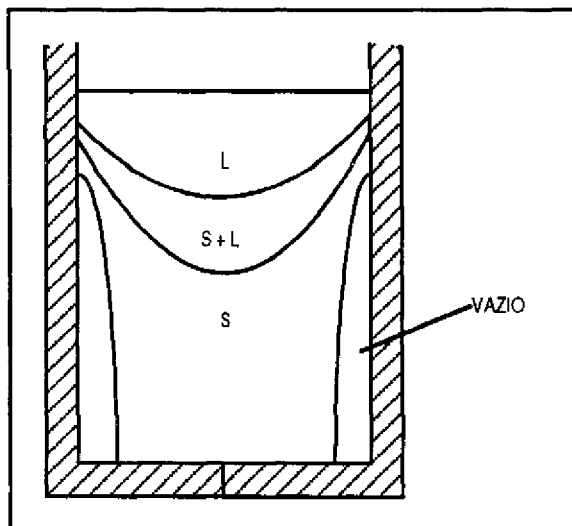


Figura 2.8 . Desenho esquemático de uma frente de solidificação VAR, mostrando a região de vazio entre eletrodo e lingoteira, devida à contração do lingote.

A região pastosa é onde ocorre a solidificação de uma liga, fato explanado mais adiante, portanto seu formato e características são responsáveis pela microestrutura e macroestrutura do lingote. As dimensões e características da zona pastosa são dependentes das condições térmicas do sistema; da presença de inoculantes, etc. No forno VAR, devido a ação do arco elétrico sobre o topo do lingote (líquido) e à intensa refrigeração da lingoteira, a solidificação é controlada pelo superresfriamento constitucional, ou seja um gradiente térmico é imposto ao sistema de forma a garantir que a solidificação ocorra a partir da interface sólido-líquido.

Um resumo dos parâmetros e fenômenos que regem as características microestrutura e macroestruturais do metal solidificado, lingote ou peça, pode ser visto na figura 2.9.

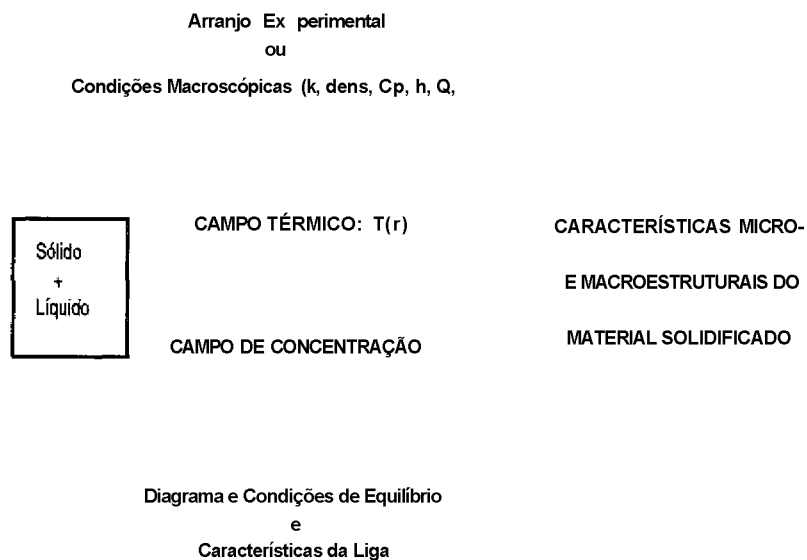


Figura 2.9 . Esquema mostrando o interrelacionamento entre os parâmetros experimentais e as microestrutura e macroestruturas obtidas.

2.3 INTRODUÇÃO AO MODELAMENTO MATEMÁTICO

2.3.1 MODELAMENTO MATEMÁTICO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO

O modelamento matemático e a simulação computacional de um processo tem por objetivo avaliar, previamente e com um computador, o comportamento de componentes de interesse tecnológico durante o seu processamento ou funcionamento. Para tal são escolhidas equações e relações fundamentais da física e da matemática que representem o comportamento destes, tanto em escala microscópica como macroscópica. Em seguida o conjunto de equações obtido é traduzido para um programa de computador, especialmente desenvolvido, para determinar as grandezas de interesse. A apresentação de resultados é feita por meio de gráficos ou tabelas de dados. A utilização desses resultados auxilia a otimização do processamento e influi de modo decisivo na redução de custos

envolvidos no desenvolvimento de novos materiais e/ou processos.

Como citado na seção 1.4, nos últimos tempos com a diminuição dos custos de equipamentos de computação com alta capacidade de armazenamento e alta velocidade de processamento, viabilizou-se a utilização dos mesmos para a simulação de componentes, dispositivos e processos. A relação custo/benefício desta ferramenta é bastante favorável pois permite prever resultados sob várias condições, sem a necessidade de execução do experimento ou mesmo de toda uma linha de processamento, permitindo determinar parâmetros ótimos de operação ou auxiliar na elaboração e/ou melhoria de um projeto. Esta ferramenta exige a elaboração de programas específicos para cada problema (ou a adequação de aplicativos comerciais), com maior ou menor grau de complexidade, porém compartilhando um mesmo equipamento para simulação.

Ashby (29) apresenta uma revisão do modelamento de materiais e processos. Neste trabalho apresenta as definições de tópicos envolvidos no procedimento de desenvolvimento de um modelo. Sintetiza as definições com um diagrama de blocos, generalizado, que deve servir de importante referência para a "construção de um modelo físico" e a interação entre cada uma das fases. O diagrama de blocos não será reproduzido aqui, pois os tópicos interessantes a este trabalho serão apresentados numa seção posterior. Cada um dos blocos é discutido, apresentando os seus aspectos mais importantes, seguindo-se de exemplos, entre os quais o lingotamento contínuo. Devido à complexidade dos exemplos apresentados, os modelos matemáticos citados são bastante mais complexos que aquele utilizado neste trabalho, são eles: Método dos Elementos Finitos; Método de Monte Carlo; Cálculo de Relaxação Atômica; Cálculos Moleculares Dinâmicos e; *Calculo Ab Initio*.

2.3.2 O FLUXO DE CALOR DURANTE A FORMAÇÃO DO LINGOTE

Para que ocorra a solidificação do metal (líquido), proveniente do eletrodo, deve-se diminuir a sua energia interna, possibilitando assim a mudança de fase líquido-sólido. A diminuição desta energia é conseguida retirando-se do lingote o calor proveniente do arco elétrico (a porção utilizada na fusão do eletrodo) e o calor gerado na

mudança de fase, líquido-sólido, que ocorre na região pastosa mostrada na figura 2.10.

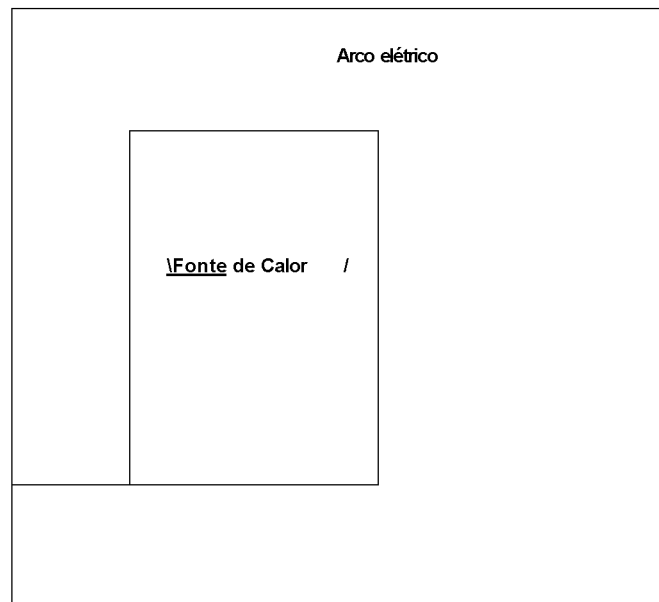


Figura 2.10 . Esquema apresentando fontes e sumidouros de calor num lingote VAR.

O fluxo de calor, causado pelo arranjo experimental do sistema de estudo, através do lingote em formação é responsável pelo campo de temperaturas ao longo de todo o lingote. Numa abordagem mais simples, a determinação desta distribuição de temperaturas num dado instante da formação do lingote, pode ser feita utilizando-se a equação de condução de calor, escrita na forma geral abaixo:

$$-V_kVT(r,t) + W_i(r,t) = \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

A dedução desta equação pode ser encontrada em livros textos sobre fenômenos de transporte, como Rosenow e Choi (30).

2.3.3 SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE CONDUÇÃO DE CALOR

A solução de uma equação deste tipo necessita de pelo menos duas condições, uma de contorno e uma inicial. Estas são dependentes do arranjo experimental. A condição de contorno caracteriza o comportamento da temperatura na superfície do lingote, que é

aqui denominada de fronteira do domínio, enquanto a condição inicial expressa a distribuição de temperaturas $T_0(r)$ num instante t_0 inicial, e conhecido t , ao qual se deseja determinar.

A determinação de um conjunto de equações que representem os fenômenos físicos e químicos que se desejem estudar é denominada de modelamento matemático do sistema em estudo. A solução destas equações (quando feita com a utilização de parâmetros reais) representa o comportamento do sistema avaliado em condições teóricas, e é dito simulação do processo. As técnicas para a solução das equações constituem-se num estudo à parte, somente sendo tratada aqui a técnica a ser utilizada neste trabalho.

Na seção 4.4, e nas que seguem, será apresentada uma solução numérica para a distribuição de temperaturas para um lingote de aço inoxidável, obtido experimentalmente neste trabalho. Porém uma visão do equacionamento dos processos de transferência de calor dentro do *sistema de estudo* é apresentada a seguir. A figura 2.10 mostra as fontes e sumidouros (sorvedouros) de calor que atuam, instantaneamente, num lingote VAR.

A figura 2.10 também mostra a presença da fase líquida com formato tipo-parabólico, na parte superior do lingote em formação. Este formato é esperado, em função da potência térmica, proveniente do arco elétrico, distribuída sobre a área do topo do lingote, da liberação de calor latente e da extração de calor através das superfícies lateral e basal do lingote. A contribuição de cada uma destas superfícies de extração de calor, varia de acordo com a altura do lingote já formado. Esta variação da contribuição motiva diferentes formatos da frente de solidificação, até que se atinja o estado quasi-estacionário (32). O estado quasi-estacionário é caracterizado por não haver variação da distribuição de temperaturas ao redor da fonte de calor (32).

Na figura 2.10 as setas indicam os fluxos de calor nos pontos de interesse no *sistema de estudo*. Observe-se que a potência proveniente do arco elétrico é introduzida no sistema, mantendo a fase líquida numa temperatura sempre mais alta que a Temperatura Liquidus da liga (pelo arranjo experimental). O calor flui então pela zona pastosa, com mistura sólido mais líquido. A zona pastosa constitui-se, também, numa fonte de calor do sistema, devido à variação temporal da entalpia, dH/dt , durante a mudança de fase. Este calor flui quase que totalmente pela fase sólida, pois há somente uma pequena interface líquida em contato com a lingoteira. A extração de calor do lingote ocorre principalmente através da interface com a lingoteira. Somente uma pequena parte é irradiada pela

superfície do líquido. A forma como esta extração ocorre é apresentada a seguir.

Os fenômenos de extração de calor são regidos pela interação entre lingote e lingoteira e entre lingoteira e água de refrigeração. Na figura 2.10 observa-se que o contato entre as duas superfícies ocorre somente em duas regiões, a base do lingote e uma superfície cilíndrica situada no topo do lingote (33). Observa-se esquematicamente a presença de um espaço vazio entre o lingote e a lingoteira. Este vazio é causado pela diferença entre os coeficientes de contração e diferentes variações de temperatura, dos materiais da lingoteira e do lingote. Este espaço vazio é vedado na sua parte superior, pelo contato entre as superfícies que ocorre no topo do lingote. Situação esta que perdura até o final da fusão, quando o arco elétrico é desligado, permitindo a solidificação e contração do topo do lingote.

Nas regiões de contato entre a lingoteira e o lingote, a transferência de calor de um para outro é do tipo Newtoniano, ou seja, obedece a equação de Newton para o fluxo térmico entre duas superfícies em contato, enquanto que na região sem contato o calor pode ser transferido por irradiação. Na transição entre os dois processos, ou entre as duas regiões, ocorre uma combinação de ambos.

2.3.4 APLICAÇÕES PRÁTICAS DO MODELAGEM MATEMÁTICO E DA SIMULAÇÃO

Alguns trabalhos foram publicados sobre o modelamento de fenômenos físicos que ocorrem no processo VAR, e em processos semelhantes. A seguir apresenta-se uma breve revisão destes.

Rosenthal (32) apresenta um artigo pioneiro, no qual aborda analiticamente o problema da distribuição de calor durante a soldagem e corte de chapas. Neste trabalho, faz considerações que levam a definir um estado dito quasi-estacionário, estado este que garante uma distribuição de temperaturas constante ao redor da fonte de calor, facilitando os cálculos pois pode-se assim desprezar a parte temporal do problema. Uma consideração

bastante precisa quando se trata de grande chapas porém quando utilizada nos modelos de lingotes, deve ser verificada para cada caso.

Um dos primeiros trabalhos realizados na tentativa de simulação do processo VAR foi feito por Eisen e Canpagna (34). Neste trabalho justificam a utilização do modelamento e simulação para se obter informações sobre as condições de resfriamento e então sobre a estrutura metalúrgica do produto. Para tal desenvolvem um modelo bastante simples para a análise do fluxo térmico no lingote, utilizando condições de contorno de transferência de calor nas paredes da lingoteira. O maior inconveniente do modelo é o fato de considerar o lingote como uma massa homogênea, sem uma fronteira entre sólido e líquido, e a liberação do calor latente sendo feita no topo do lingote. Este fato pode ser considerado válido no caso do crescimento colunar de grãos pois todo o calor flui do líquido para o sólido.

Falk e colaboradores (35), apresentam um modelo térmico para a solidificação de ligas de zircônio no processo VAR. Resolvem exclusivamente a equação de condução de calor, utilizando condições de contorno bastante reais, considerando a irradiação no topo do ingote, a condutividade no contato do lingote com a lingoteira e a irradiação na região de descolamento. A validação do modelo é feita efetuando-se uma comparação da macroscopia da seção longitudinal do lingote com os resultados numéricos obtidos na simulação computacional. Como maior problema do modelo, comum à maioria dos problemas de simulação, é a utilização de valores estimados para as constantes termofísicas dos materiais.

Em trabalhos subsequentes, Jardy e Ablitzer (36,37) efetuam estudos sobre o comportamento da poça de metal líquido no lingote VAR e da agitação magnética natural e/ou forçada por bobinas eletromagnéticas. O objetivo destes trabalhos é a otimização do modelo apresentado anteriormente, pelos mesmos autores, pois ao considerarem o movimento do líquido no lingote em formação melhoram a avaliação do fluxo térmico, suplantando a dificuldade de utilizar valores estimados para as constantes termofísicas do material. Para tal além das relações de balanço da energia térmica foi utilizada a equação de Navier-Stokes.

Bertran e Zanner (18, 19) já citados anteriormente, apresentam um modelo e um programa para a simulação da solidificação de ligas de U-Nb em fornos VAR. Neste trabalho efetuam a simulação da solidificação considerando além do balanço térmico as

influências eletromagnéticas na movimentação do líquido. Utilizam como condições de contorno, na lateral do lingote, a transferência de calor considerando o descolamento lingote-lingoteira. Como resultados, apresentam isotermas e curvas de velocidade, do líquido, na seção longitudinal do lingote.

O processo VAR é semelhante ao lingotamento contínuo convencional, pois o lingote com seção constante forma-se continuamente. Ribeiro e Seshadri (38) apresentam um modelo para a determinação da distribuição de temperaturas em lingotes industriais de aço, através da resolução da equação de calor clássica, o qual tem por objetivo determinar a posição e formato da frente de solidificação e assim otimizar o posicionamento de um sistema de agitação magnética do banho líquido.

Uma resolução do problema de transferência de calor com mudança de fase para o lingotamento contínuo é apresentada por Szekely e Themelis (33). Apresentam uma solução analítico-numérica e uma solução exclusivamente numérica, pelo método das diferenças finitas. Aqui o problema do lingotamento contínuo é tratado com algumas considerações simplificadoras que pouco interferem na qualidade final do resultado. Essencialmente, impõe um problema unidimensional para a transferência de calor considerando muito pequena a contribuição do fluxo de calor axial no lingote, consideração esta impossível de se ter em fornos tipo VAR em função da existência do arco elétrico. Em contrapartida é feita uma análise bastante criteriosa da extração de calor pelas paredes laterais do lingote em formação, com medições experimentais dos coeficientes de transmissão de calor. Este texto não faz uma comparação com resultados experimentais.

Abou-Arab e Al-Nimr (39), apresentam um estudo sobre a condução de calor com estado transiente e estacionário. No primeiro trabalho apresentam uma solução analítica para o problema da fonte de calor deslocando-se linearmente sobre uma chapa plana, grande quando comparada às dimensões da fonte de calor, a exemplo do trabalho de Rosenthal discutido acima. Num segundo trabalho, Abou-Arab, Al-Nimr e Ramadan (40) apresentam uma solução numérica para o mesmo problema, fazendo em seguida uma comparação entre os resultados obtidos e os resultados experimentais para a validação de seus trabalhos.

A escolha entre um ou outro método para a análise dos problemas térmicos (método analítico ou o método numérico) deve ser feita em função das necessidades do

problema, a exatidão do resultado desejado, a versatilidade da ferramenta e da rapidez para se chegar a um resultado. De uma forma geral os resultados analíticos, estando as suas equações prontas e validadas como no caso das chapas apresentado acima, são mais rápidos e podem mostrar uma tendência de comportamento do processo em função de uma variável. Já o método numérico necessita de um processamento toda a vez que se necessite conhecer o comportamento do processo com qualquer modificação de uma variável, tornando-o por vezes mais lento que o anterior. Em contrapartida tem uma versatilidade imensa quando comparado ao método analítico, pois permite a solução do problema para geometrias complexas, condições de contorno e iniciais, assim como constantes termofísicas do problema, as mais reais possíveis (41).

2.4 CONCEITOS DE SOLIDIFICAÇÃO

Para facilitar a discussão sobre o aspecto metalúrgico da formação do lingote, este passará a ser apresentado como um sistema a parte, sendo considerados o arco elétrico, a zona pastosa e a lingoteira como fontes e sumidouro de calor, respectivamente. Desta forma será destacado da figura 2.1, não sendo considerada nenhuma dimensão fixa, além dos diâmetros. Assim, a partir da análise do fluxo de calor, da velocidade de deslocamento da interface sólido-líquido no interior do ingote, e da influência destes na morfologia microestrutura e macroestrutural, pode-se prever algumas de suas consequências no material dos lingotes.

A formação de um metal sólido a partir de um metal líquido depende de dois fenômenos distintos: a Nucleação e o Crescimento.

2.4.1 NUCLEAÇÃO HOMOGÊNEA, HETEROGÊNEA E CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO

Chalmers (42) introduz muito claramente o conceito da formação dos primeiros sólidos e a nucleação enquanto os conceitos macroscópicos básicos sobre a solidificação de metais puros e ligas foram descritos por Wulf (43).

Resumidamente, quando a temperatura no líquido a frente da interface é menor que a temperatura $T_{liquidus}$, $\hat{<^{\wedge}liquidus}$, tem-se a situação de superresfriamento constitucional. As eventuais protuberâncias sólidas que possam aparecer na interface sólido-líquido encontram condições para se desenvolver.

As protuberâncias sólidas da interface sólido-líquido são causadas por instabilidades nessa interface. Elas são explicadas pela teoria da estabilidade da interface (44), que não será explicada aqui, e têm a forma apresentada na figura 2.15. A quantificação da condição para a ocorrência do superresfriamento constitucional é feita a partir da determinação do gradiente de soluto à frente da interface sólido-líquido, como ostrado no apêndice 2.

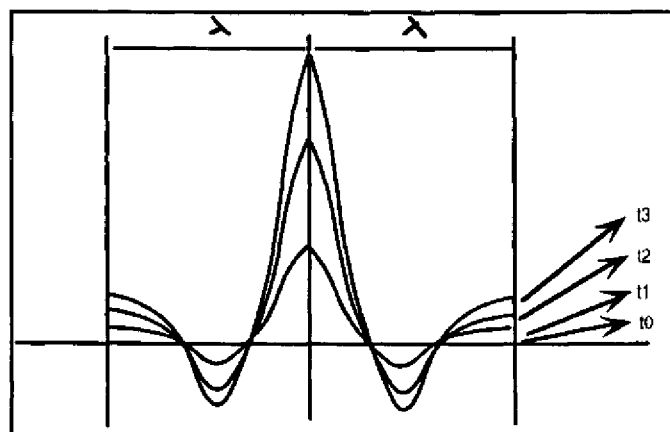


Figura 2.15 . Representação esquemática da evolução temporal da formação, estabilização e crescimento de uma perturbação na interface sólido-líquido.

2.4.2 O CRESCIMENTO DE PROTUBERÂNCIAS

O desenvolvimento destas protuberâncias dá origem, inicialmente, à estrutura conhecida como celular. Esta não tem uma orientação cristalográfica preferencial de crescimento, mas cresce na direção de extração de calor. Com o aumento da velocidade de crescimento da interface, efeitos cristalográficos passam a influenciar o crescimento, desviando-o para um eixo cristalográfico preferencial. Simultaneamente a seção transversal da célula deixa de ser circular, e inicia-se o aparecimento e desenvolvimento de protuberâncias nas paredes da célula. O efeito cristalográfico, no crescimento da célula, pode ser observado no desenho esquemático da figura 2.14. Este novo tipo de crescimento é denominado de crescimento dendrítico. A nomenclatura associada à esta estrutura denomina de braços primários o bastão inicial, de braços secundários àquelas protuberâncias que se originam nos primários, e assim sucessivamente. As protuberâncias, ou os agora chamados braços de dendritas, desenvolvem-se até que o superresfriamento constitucional seja reduzido a um mínimo.

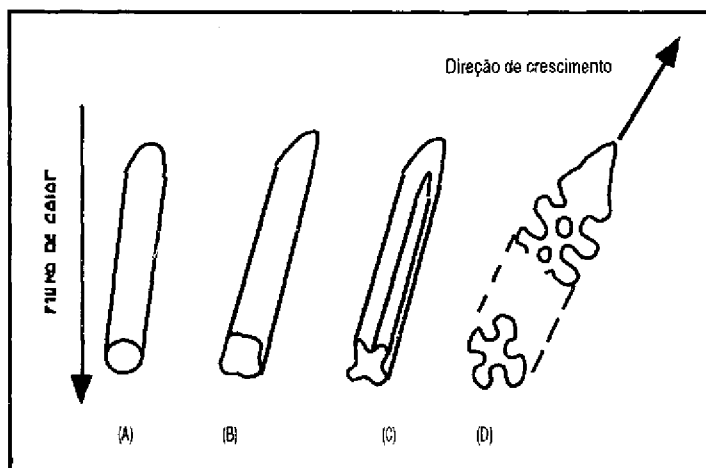


Figura 2.14 . Mudança do formato da estrutura de crescimento em função da velocidade de crescimento.

2.4.3 CARACTERÍSTICAS DAS DENDRÍTAS

A literatura sobre a teoria da solidificação apresenta basicamente três fatores que caracterizam as dendritas:

1. O nível de ramificações. Primárias, secundárias, etc. Tipicamente observa-se a existência de ramificações primárias e secundárias, sendo as terciária e de maior ordem observadas para as condições de resfriamento lento;
2. A orientação do grão dendrítico , que será tratado mais adiante nesta seção e;
3. O espaçamento entre os braços de mesma ordem, primários e secundários. O qual é um valor associado à velocidade de resfriamento, sendo menores quanto maior a variação temporal da temperatura.

Em escala macroscópica, o crescimento dendrítico apresenta duas características, em função do tipo de nucleação que o originou e da orientação cristalográfica do crescimento. Se a nucleação ocorrer dentro do líquido, nucleação homogênea, um grão dendrítico de forma radial se formará e crescerá. Esta situação é denominada de crescimento equiaxial dendrítico. Este grão cresce até que choque-se com outro que limite o seu desenvolvimento. A figura 2.16 mostra a forma esquemática destes grãos. A terminologia equiaxial vem do fato deste tipo de crescimento não resultar numa orientação preferencial dos grãos. Quando o crescimento ocorre a partir de uma interface localmente plana, os grãos dendríticos são ditos com crescimento colunar. Crescem orientados pelos eixos de crescimento dos núcleos, monocristais, e o crescimento não é necessariamente orientado com a direção de extração de calor, embora seja favorecido quando paralela a ela. Esta característica faz com que haja uma competição entre grãos dendríticos colunares em crescimento, sendo favorecidos os que têm orientação antiparalela ao gradiente térmico. Dessa forma, este tipo de crescimento resulta numa estrutura altamente orientada, na direção de extração de calor. Chama-se este de crescimento competitivo. A figura 4.20 apresenta o aspecto do crescimento competitivo entre grãos dendríticos colunares, na qual pode-se observar a pouca orientação preferencial dos grãos na região próxima a sua formação e a orientação resultante após a aniquilação resultante do crescimento competitivo.

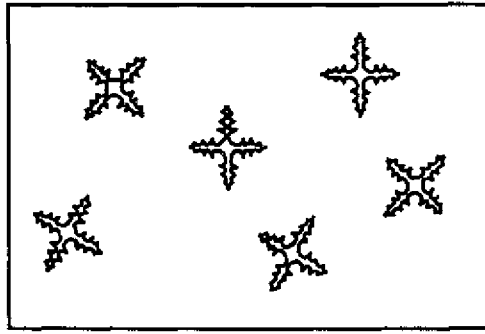


Figura 2.17 . Desenho esquemático do espaçamento dendrítico primário e secundário.

Perrin e Tabeing (45) apresentam uma abordagem bastante filosófica e qualitativa sobre o fenômeno de formação e crescimento das dendritas. Apresentam a formação de uma dendrita como uma quebra da ordem original do sistema (perda da simetria esférica original) partindo de um movimento periódico, ou seja uma perturbação da superfície, para uma estrutura que se propaga sem deformação (estrutura denominada de "soliton", La Recherche, dec. 1976). A organização das ramificações laterais pode ser explicada pela teoria dos fractais (uma repetição periódica do formato), porém não apresentam solução total para o problema da ramificação lateral dos braços primários.

A figura 2.17 apresenta esquematicamente o aspecto dos braços primários e secundários de dendritas.

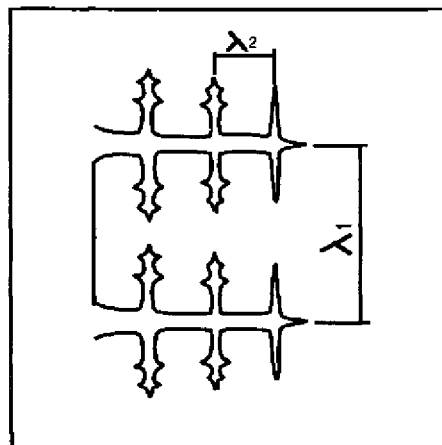


Figura 2.17 . Desenho esquemático do espaçamento dendrítico primário e secundário.

Observações experimentais, como na figura 2.18, mostram a dependência entre os espaçamentos e a velocidade de resfriamento. O ajuste dessas curvas gera a equação:

$$d = atf^n = b(GR)^{-n}$$

(2.11)

Onde d é o espaçamento interdendrítico primário ou secundário e o expoente n mostra-se constante e igual a $1/2$ para o espaçamento entre os braços primários, e variando entre $1/3$ e $1/2$ para o espaçamento secundário (44).

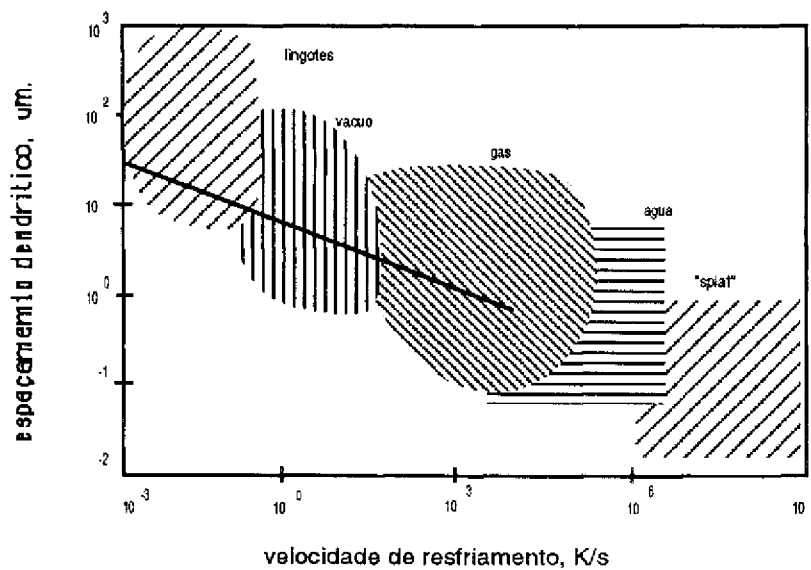


Figura 2.18 . Variação do espaçamento dendrítico secundário em função da velocidade de resfriamento.

Uma abordagem teórica, qualitativa e quantitativa, é apresentada por Kurs e Fisher (46). Partindo de considerações geométricas, térmicas e químicas determinam parâmetros de interesse teórico, como o raio de curvatura da ponta de uma dendrita, e de interesse tecnológico, espaçamentos dendríticos primário e secundário. Embora os resultados sejam obtidos a partir de um modelo simplificado, estes são bastantes diferentes daqueles comumente encontrados na literatura, que em geral baseiam-se na análise de observações experimentais. O modelo teórico apresentado permite que se descrevam os crescimentos planar, celular e a morfologia dendrítica, partindo-se de uma abordagem geométrica.

2.4.4 MACROESTRUTURA DOS LINGOTES

A macroestrutura dos lingotes obtidos nos fornos VAR (2) apresenta, aproximadamente, a morfologia clássica dos produtos obtidos nos processo de lingotamento contínuo (28). A figura 2.19 mostra a macroestrutura característica de um lingote obtido por um processo convencional. Nela podem-se observar três zonas típicas, da borda para o centro: A zona coquilhada; a zona com predominância de grãos colunares e a zona caracterizada pelo crescimento equiaxial.

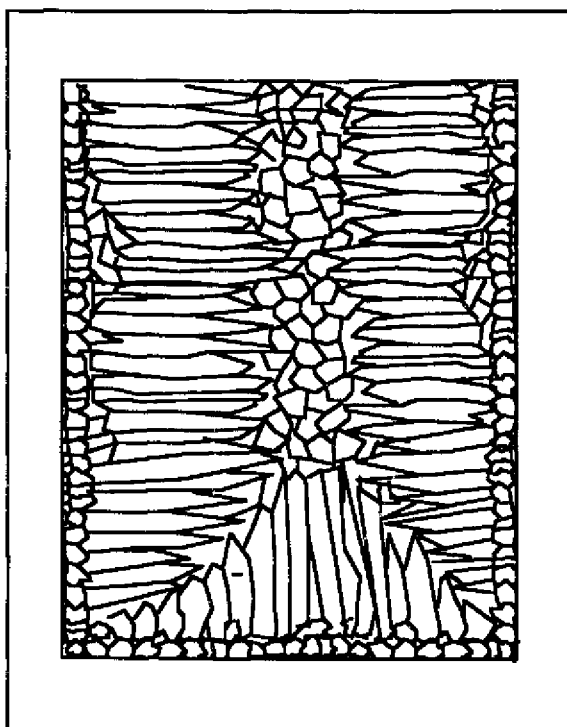


Figura. 2.19 . Desenho esquemático da macrografia de um lingote convencional.

Em lingotes VAR a zona coquilhada ou é inexistente ou tem uma extensão desprezível, podendo ser confundida com grãos recristalizados (47). A figura 2.20 mostra esquematicamente a morfologia da macroestrutura de um lingote VAR. Observa-se a presença de uma zona de grãos dendríticos equiaxiais numa região com formato parabólico no topo do lingote. A presença deste tipo de crescimento, é motivada pela diminuição do gradiente térmico após o desligamento do arco elétrico, no final do processo de fusão do

eletrodo. A maior parte do volume do lingote é então constituída por grãos dendríticos colunares, que dirigem para o centro e para o topo do lingote. Esta orientação é motivada pelo crescimento competitivo aliada ao sentido extração de calor, proveniente do arranjo experimental, como apresentado na seção 2.3.2.

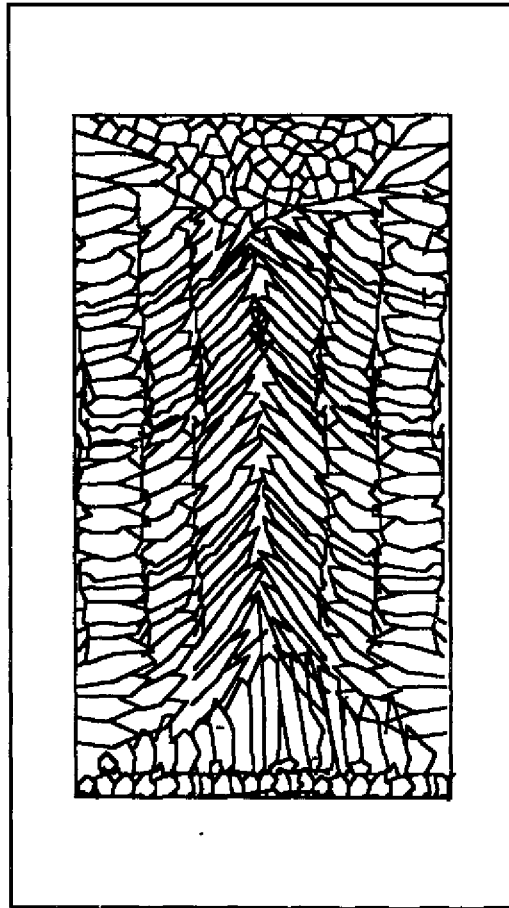


Figura. 2.28 . Desenho esquemático da macrografia longitudinal de um lingote obtido em forno VAR.

3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo principal um estudo sobre o processo para a obtenção de lingotes de metais e ligas de interesse industrial, tais como metais reativos e refratários e materiais de difícil processamento como os aços endurecíveis por precipitação e as superligas. Utiliza-se uma abordagem que inclui o desenvolvimento de um equipamento modular para a fusão pelo método VAR e o procedimento técnico para a obtenção de um produto com as qualidades desejadas.

A instalação desenvolvida visa: a produção de pequenos lingotes de material (até 2 kg), quantidade essa considerada pequena para a maioria dos processos industriais de larga escala, porém adequada para a análise e o desenvolvimento do processo (31,48) e; facilita a transposição da tecnologia e seus resultados para escalas maiores.

Um dos métodos mais importantes para se alcançar este objetivo é a aplicação dos resultados da simulação computacional do processo. A obtenção desses resultados tornou-se também um dos objetivos deste trabalho, com o modelamento matemático da formação do lingote e o desenvolvimento de um aplicativo, que apresentassem resultados baseados no tipo de material em solidificação e nas características da lingoteira.

4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

4.1 METODOLOGIA ADOTADA NO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para que fossem alcançados os objetivos propostos para este trabalho adotou-se um procedimento que resume a metodologia aplicada, constituído basicamente de três partes distintas porém intimamente relacionadas. Estas três partes do trabalho são listadas a seguir, com breves comentários, estendidos em seções posteriores:

1. Desenho e construção de protótipo de forno VAR em escala laboratorial (48). O equipamento é baseado nas descrições gerais apresentadas em livros textos sobre a fusão de metais reativos e refratários, em visitas técnicas (49) e em função das necessidades observadas no trabalho com o equipamento. As características desse protótipo são apresentadas na seção seguinte.

2. Obtenção de pequenos lingotes, com a finalidade de testar o equipamento. Estes testes dividiram-se em duas fases distintas: a primeira, avaliação do comportamento do equipamento e desenvolvimento da técnica necessária para sua operação e, segundo, um trabalho sistemático de avaliação da morfologia microestrutura e macroestrutural dos lingotes obtidos (50,31).

3. Modelamento matemático e simulação computacional do processo de formação dos lingotes obtidos. Motivada pela verificação dos diferentes resultados obtidos para diferentes condições de operação, esta fase que pode parecer isolada das duas últimas, mostrou-se de fundamental importância para realimentar o projeto de novas lingoteiras e para a otimização do processo de fusão.

4.2 O EQUIPAMENTO DE FUSÃO

4.2.1 O PROTÓTIPO VAR

A figura 4.1 apresenta uma foto do protótipo mostrando uma vista frontal do equipamento. Nas figuras 4.4 e 4.8 observa-se uma vista parcial traseira do protótipo. Nas legendas são mostradas as suas partes fundamentais. Esta seção mostra detalhes do protótipo VAR, estando contidas informações sobre os materiais, características, funções, etc. dos detalhes apresentados.

O protótipo tem as seguintes características básicas de construção:

Estrutura. Uma estrutura em aço-carbono, tipo pórtico, sustenta as três partes principais do equipamento:

Câmara de vácuo: Construída em aço carbono, pintada externamente e cromeada no seu interior. Nesta câmara encontram-se as conexões de vácuo, para bombeamento, medição e entrada de gases, janelas de observação e eventual instrumentação. Embora esta parte do forno não seja atuante na qualidade do produto é o suporte e o acesso para a instrumentação e controle do processo, figura 4.1.

Lança Porta-Eletrodo: Dispositivo que suporta e movimenta o eletrodo, para a manutenção da fusão. A lança é construída em aço inoxidável, para evitar problemas de corrosão por vapores provenientes do refino de materiais como o zircônio. o seu movimento é acionado por um motor elétrico de corrente alternada com rotação reduzida e fixa, dessa forma não permitindo a variação de velocidade de movimentação do eletrodo, figuras 4.1, 4.4 e 4.5.

Lingoteira e câmara de refrigeração: Partes essenciais do equipamento, onde ocorrem os processos responsáveis pela qualidade final do produto. A lingoteira é

ligeiramente cônica com o fundo removível, fabricada em cobre. A lingoteira fica inserida em uma câmara de refrigeração alimentada por um fluxo d'água que retira o calor proveniente da solidificação do lingote, figuras 4.1 e 4.3.

~ Alimentação de corrente elétrica para a fusão, feita por uma fonte de corrente contínua retificadora, com corrente nominal de 400 A, marca Hobart, figura 4.1.

— O bombeamento e manutenção do vácuo é efetuado por uma bomba mecânica a pistão marca HF modelo D15. Uma válvula de vácuo tipo esfera, com acionamento manual, é a única maneira de se isolar e controlar o bombeamento do forno. Uma armadilha, "trap", de Nitrogênio líquido é instalada em série, de forma a prevenir a contaminação do óleo da bomba com eventuais vapores e partículas provenientes do refino do metal, figuras 4.1, 4.6 e 4.9.

--Instrumentação disponível. No estado atual, a instrumentação básica do protótipo, figuras 4.1, 4.9, 4.10. é constituída dos seguintes elementos:

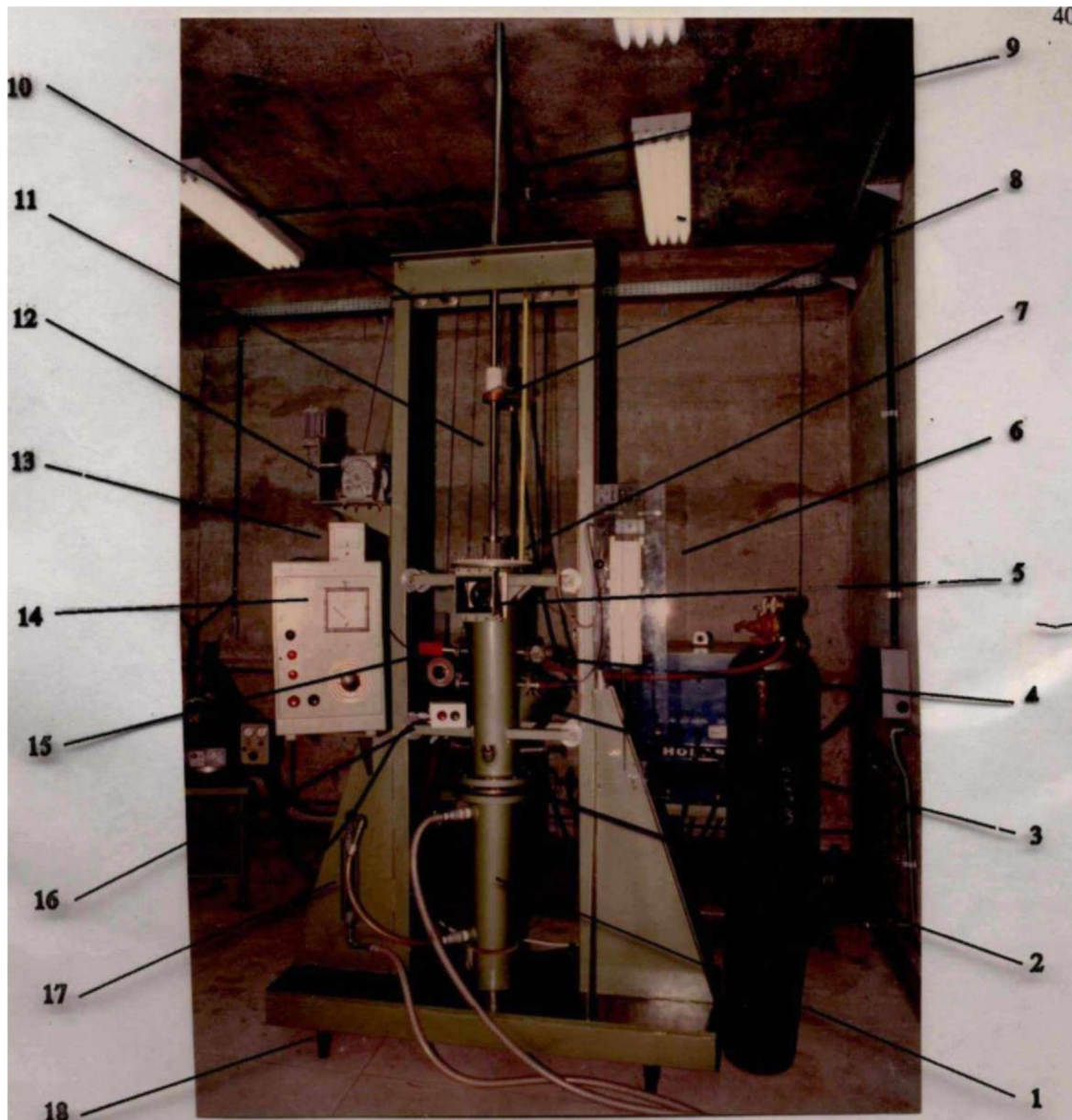
Voltímetro analógico: Adaptado para duas escalas, adequando-o para os valores de operação do forno, figuras 4.1 e 4.2.

Fluxômetro tipo rotâmetro: Com leitura até 250 l/min, figura 4.10.

Termostato Termo-Mecânico: Para efetuar o desligamento do equipamento quando a temperatura da água de refrigeração da lingoteira excede um valor pre-determinado, figura 4.8.

Medidores de vácuo: Um tubo em U é instalado permanentemente para a leitura da pressão interna durante a operação (leitura mínima de 2 torr). Há conexões disponíveis para a instalação de outros medidores para ordens de vácuo menores, figura 4.9.

Painel de controle: Visando possibilitar o controle do forno por um único operador, foi construído um painel de controle elementar que estende os comandos da fonte de corrente de alimentação elétrica do forno, luzes de alarme, controle de funcionamento da bomba de vácuo, acionamento remoto do faiscador para a abertura de arco e um sistema de desligamento da alimentação do arco elétrico no caso de superaquecimento da câmara de refrigeração, figura 4.2.



1. Câmara de refrigeração da lingoteira.
2. Lingoteira.
3. Tomada para a medição de vácuo, manómetro de mercúrio.
4. Entrada de gás.
5. Visor com espelho.
6. Manómetro de mercúrio.
7. Mancal-Selo de vácuo para a lança.
8. Conexão elétrica da lança e isolador.
9. Guia da lança.
10. Estrutura de sustentação.
11. Lança.
12. Motor e redutor para a movimentação d a lança.
13. Medidor de vácuo tipo Pirani.
14. Painel de controle.
15. Cabeça do medidor de vácuo, Pirani.
16. Controles de acionamento da lança.
17. Medidos de vazão de água.
18. Apoio com regulagem de altura.
19. Fonte de corrente para soldagem, marca HOBART, ao fundo.

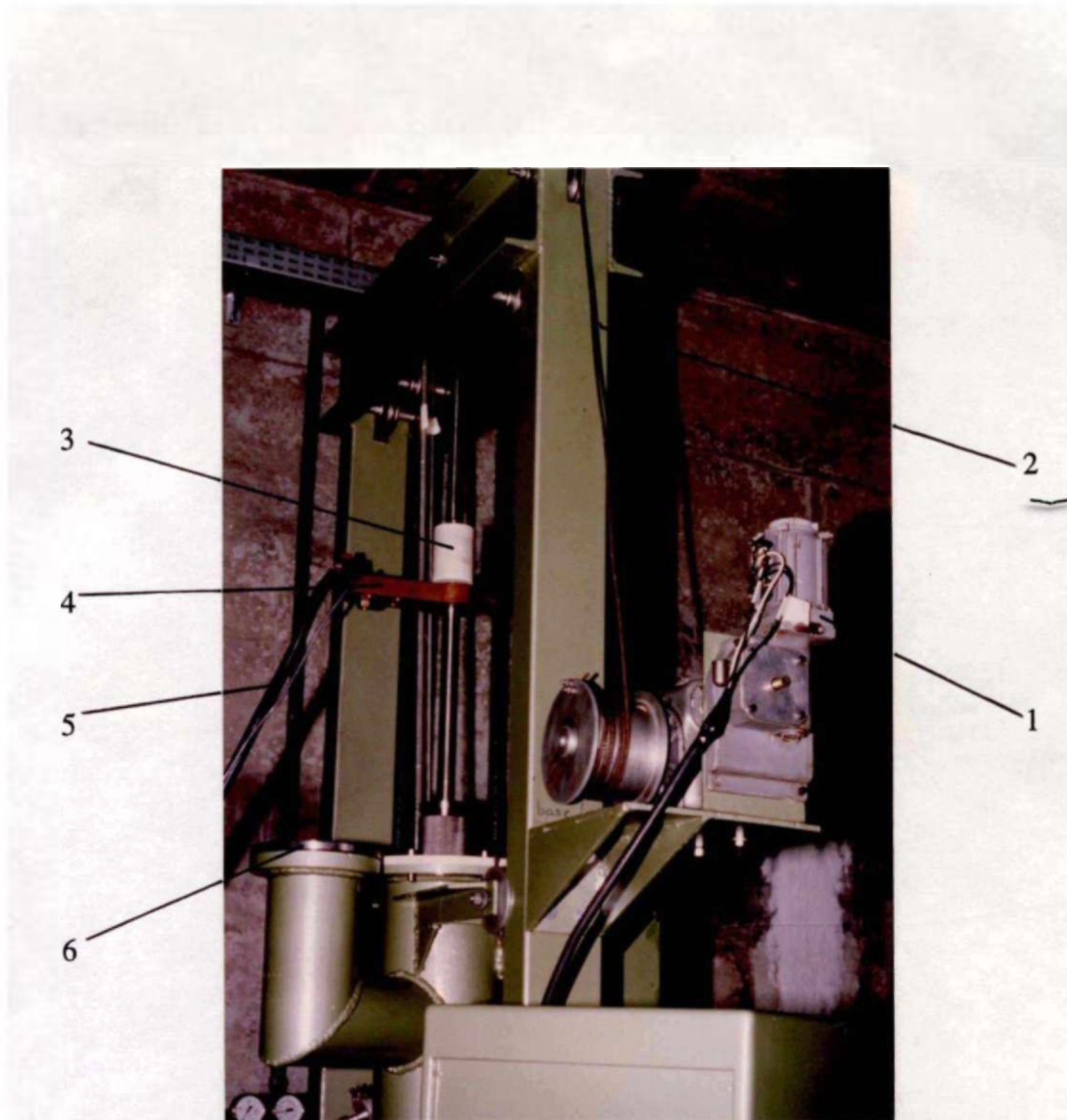
Figura 4.1 . Vista frontal do protótipo.

1. Controle de corrente do arco elétrico.
2. Seletor de corrente máximas da fonte de corrente.
3. Voltímetro analógico.
4. Seletor de escala do voltímetro.
5. Acionamento da bomba de vácuo.
6. Acionamento do faiscador para abertura do arco elétrico.
7. Luz de alerta 1, superaquecimento da água de refrigeração.
8. Luz de alerta 2, disponível.
9. Controles para ligar e desligar a fonte de corrente.

Figura 4.2 . Painel de controle.

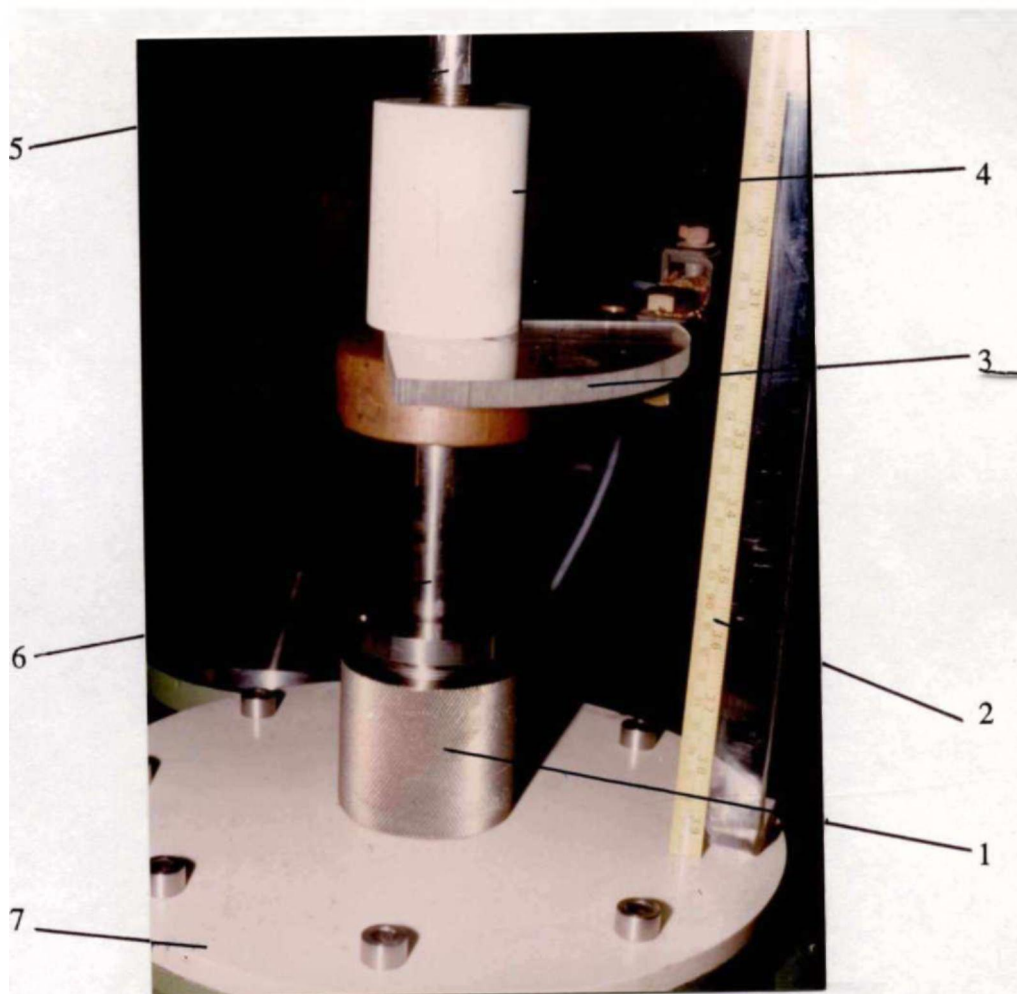
1. Corpo da lingoteira.
2. Conexão elétrica da lingoteira, ver figura 4.8.
3. Tampa da parte inferior da lingoteira.

Figura 4.3 . Lingoteira.



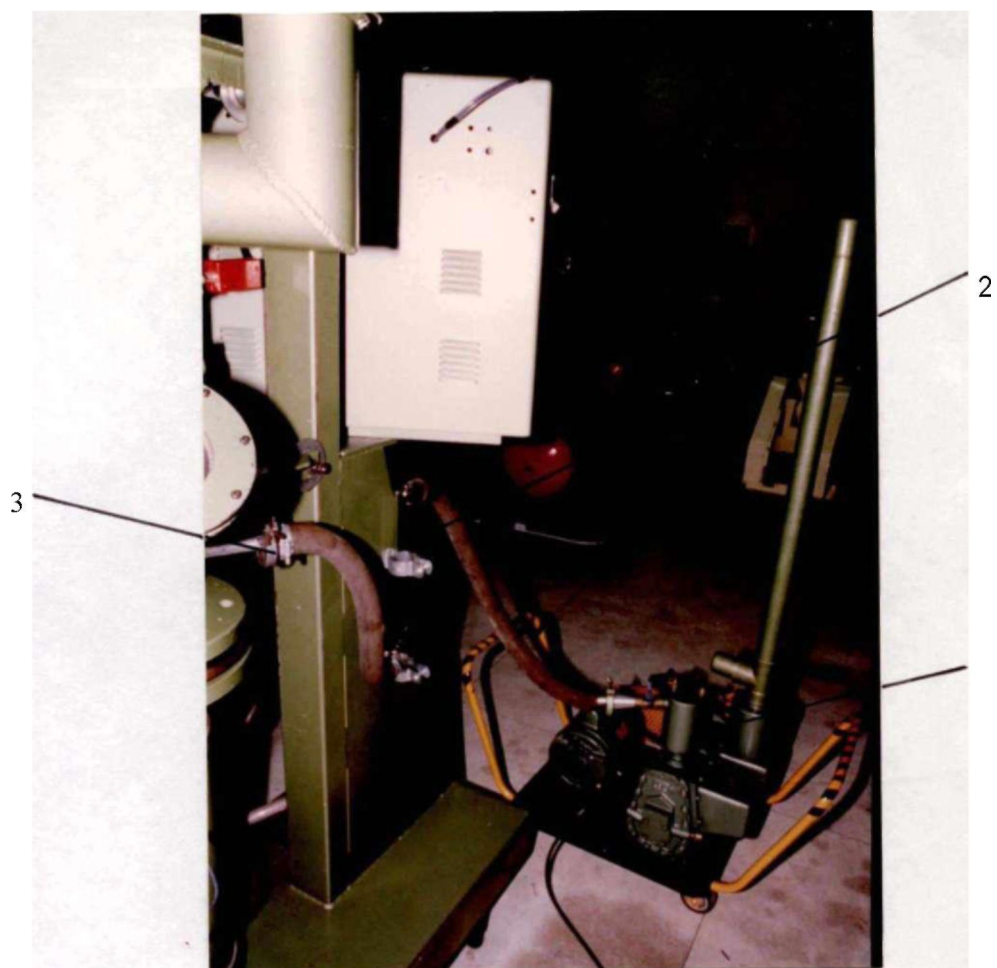
1. Motor e reduções.
2. Cabo de sustentação e movimentação da lança.
3. Isolador elétrico da lança.
4. Conexão elétrica da lança.
5. Cabo elétrico para alimentação do arco -létrico.
6. Válvula de segurança.

Figura 4.4. Vista posterior superior do Protótipo.



1. Mancal-Selo para vácuo.
2. Escala para visualização e medida do consumo do eletrodo.
3. "Ponteiro" para a leitura da medida do consumo do eletrodo.
4. Isolador elétrico da lança e união lança-eletrodo.
5. Guia da lança.
6. Lança.
7. Flange superior.

Figura 4.5 . Flange superior e isolador elétrico.



1. Bomba de vácuo a pistão.
2. "Trap" de nitrogênio líquido.
3. Conexão da câmara de vácuo ao sistema de bombeamento.

Figura 4.6 . Vista posterior inferior do Protótipo.

1. Flange da válvula.
2. Tampa da válvula.

Figura 4.7 . Válvula de segurança.

1. Conexão da câmara de vácuo ao sistema de bombeamento.
2. Visor traseiro para a parte superior da lingoteira.
3. Válvula de segurança.
4. Termostato para a água de refrigeração da lingoteira

Figura 4.8 . Vista posterior do protótipo.

1. Válvula de controle de pressão de alimentação de gás inerte.
2. Manómetro de mercúrio.
3. Válvula de controle de enchimento de gás da câmara de vácuo.

Figura 4.9 . Vista frontal parcial do protótipo.



1. Fluxometro para água, tipo rotametro, com até 250l/min.

Figura 4.10. Fluxometro.

4.2.2 PARÂMETROS DE OPERAÇÃO

A análise das observações experimentais feitas no decorrer da montagem, testes e operações do protótipo, propiciou além da otimização do protótipo ao estado em que foi apresentado, também o desenvolvimento sistemático, de uma lista de parâmetros de operação de um forno VAR. Na seção referente as sugestões, será apresentada a utilização destes parâmetros na proposição, de um sistema automático de controle do forno VAR, de forma a assegurar a reproducibilidade do processo.

Basicamente a instrumentação de um forno VAR pode ser dividida em três grupos básicos. A divisão em grupos visa facilitar a compreensão dos sistemas, porém as informações contidas em cada grupo não lhes são exclusivas mas são compartilhadas entre os mesmos. Estes foram obtidos pelo agrupamento dos parâmetros mensuráveis e atuáveis durante o funcionamento do forno. Os grupos, denominações e elementos são listados a seguir.

Grupo dos *parâmetros de controle ou parâmetros ativos*:

- Tensão e Corrente do arco elétrico;
- « Presença de arcos laterais em pontos fixos;
- Velocidade de alimentação do eletrodo;
- Chave geral.

Grupo dos parâmetros de *controle de qualidade*:

- Pressão na câmara de vácuo;
- Vazão da água de refrigeração;
- Pressão da água de refrigeração;
- Temperaturas na lingoteira;
- Rampas de subida e descida da corrente;

- Alinhamento do conjunto eletrodo-lingoteira;
- Composição dos gases eliminados.

Grupo dos parâmetros de *segurança de operação*.

- Temperatura na extremidade inferior da lança;
- Limites de temperatura, vazão e pressão da água;
- Limite de pressão na câmara de vácuo;
- Sensores para a monitoração do funcionamento das bombas de vácuo, válvulas e água de refrigeração.
- Alinhamento do conjunto eletrodo-lingoteira.

Não foi justificada a existência de qualquer um destes parâmetros, embora possa ser feita. Também pode parecer que há redundância entre dois grupos, porém isso significa em geral que um só sensor pode ser responsável por dois parâmetros distintos, representando uma mesma grandeza num mesmo ponto.

A configuração apresentada para o protótipo, torna o equipamento adequado para a preparação de pequenos lingotes (até 2 kg) desde que se disponha do eletrodo com a configuração adequada. Os eletrodos utilizados nesse trabalho foram barras de aço inoxidável, cuja utilização será justificada mais adiante.

4.3 OBTENÇÃO DE LINGOTES E ANÁLISE METALGRÁFICA

43.1 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta o trabalho realizado na obtenção de lingotes de aço inoxidável AISI304L, e a análise metalográfica destes lingotes.

A avaliação do funcionamento do protótipo VAR foi efetuada, inicialmente, com a fusão de eletrodos de aço-carbono. A opção deste como material para o eletrodo foi feita devido à sua ampla disponibilidade num variada gama de seções longitudinais e pelo seu baixo custo. Atualmente ainda são utilizados eletrodos desse material quando da realização de testes preliminares, para a avaliação de alguma modificação ou procedimento de fusão.

Um dos lingotes de aço carbono foi utilizado na avaliação tanto da microestrutura como da macroestrutura do lingote produzido no protótipo VAR (50). A utilização do aço carbono apresenta alguns problemas como a alta quantidade de impurezas voláteis, durante a fusão, e a oxidação do produto final, especialmente as superfícies polidas para a análise metalográfica. A bibliografia disponível para o aço inoxidável AISI 304L, fez com que esse material fosse eleito como o mais adequado, para o estudo dos parâmetros do processamento VAR e sua influência na microestrutura e macroestrutura dos lingotes, suplantando os problemas citados acima. O aço inoxidável AISI 304L tem como elementos principais de liga o cromo e o níquel, tendo um teor de carbono muito baixo. A tabela 1, abaixo, apresenta a composição química em peso desse aço.

Tabela 1 . Composição nominal do aço AISI 304L.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
%máx	0,030	2,00	1,00	0,045	0,30	18-20	8-12

Essa composição faz com que esse aço apresente uma estrutura basicamente autêntica, entretanto, a alta velocidade de resfriamento causa uma retenção da ferrita delta, numa razão de cerca de 10 % em volume, observada na forma de dendritas. Esse comportamento é fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, pois o crescimento dendrítico oferece condições para uma análise relativamente simples da velocidade de resfriamento, direcionamento do crescimento e formato da frente de solidificação.

Foi, então, prevista uma série de fusões com dois objetivos:

- Determinar os valores máximos e mínimos para os parâmetros, controladores, de operação do protótipo (corrente de fusão, fluxo d'água de refrigeração e tipo de lingoteira) e;

- Fornecer os lingotes necessários para a investigação dos parâmetros de fusão na morfologia microestrutura e macroestrutural do produto obtido no processo VAR de pequena escala.

Das fusões realizadas duas foram escolhidas como representativas. A não ser pelo lingote de aço carbono, figura 4.16, dedicada a mostrar o defeito de solidificação, as características típicas das fusões são apresentadas na tabela 2.

Os lingotes obtidos tiveram suas seções longitudinais analisadas por metalografia ótica, tanto macroscópica como microscópica. Análises qualitativas foram utilizadas para a avaliação da morfologia microestrutural e; análises quantitativas forneceram dados relativos à parâmetros térmicos de solidificação. A análise destes resultados fornece um conjunto de informações sobre a interação entre os parâmetros operacionais e a morfologia microestrutura e macroestrutural dos lingotes VAR, de pequenas dimensões. Nas seções posteriores estes procedimentos serão apresentados com o detalhamento necessário e suficiente.

Tabela 2. Apresentação das características típicas das fusões.

material do lingote	304L	304L
lingoteira	cobre	cobre
diâmetro do eletrodo	19 mm	19 mm
diâmetro do lingote	44 mm	44 mm
pressão	50 mmHg	50 mmHg
gás	argônio	argônio
vazão de refrigeração	250 l/min	250 l/min
corrente de fusão	400 A	200 A

4.3.1.1 OBTENÇÃO E PREPARO DOS LINGOTES

As operações de preparação do protótipo VAR, para a realização das fusões de eletrodos de aço inoxidável AISI 304L, foram realizadas com os cuidados para que ocorressem no ambiente mais limpo possível, e são encadeadamente mostrados na figura 4.11, assemelhando-se, dessa forma, aos cuidados necessários à fusão de materiais reativos. Essa condição permite, também, que sejam mantidas baixas as quantidades de impurezas formadoras de inclusões exógenas (52), e/ou de elementos que funcionassem como inoculantes causadores de uma nucleação homogeneamente distribuída ao longo do lingote.

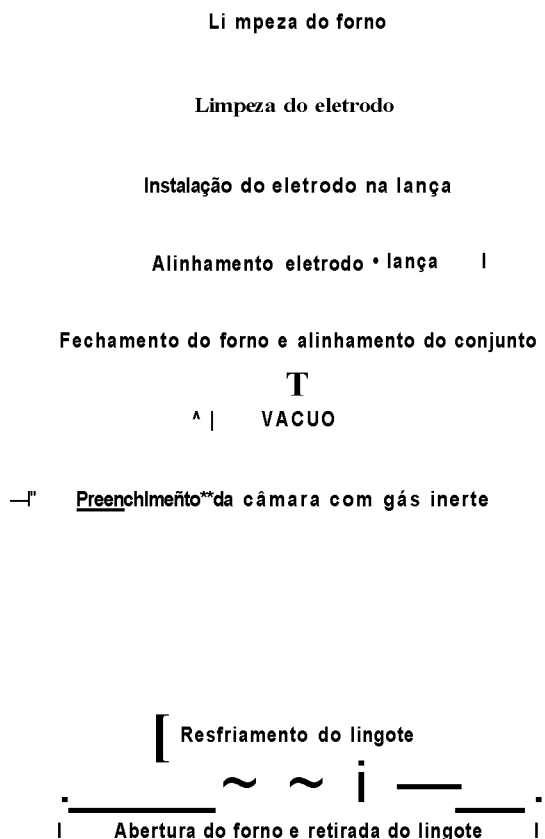


Figura 4.11 . Operações de preparo do forno VAR para o processo de fusão.

A limpeza geral do forno foi feita com a utilização de estopa embebida em álcool ou acetona, para a retirada de fuligem ou depósitos mais grosseiros. Enquanto este processo mostrou-se satisfatório para as partes internas da câmara superior e da lança, a limpeza da lingoteira foi realizada sempre de uma forma mais cuidadosa. Após a retirada dos depósitos mais grosseiros pelo método descrito acima, essa é lavada com detergentes para a eliminação de gorduras; a seguir passa por uma leve decapagem com solução aquosa de ácido clorídrico e; finalmente, uma lavagem com detergentes e enxagues. Nos experimentos realizados com lingoteira de aço carbono a decapagem foi substituída, quando necessário por um lixamento.

Os eletrodos de aço inoxidável constituíram-se de barras retilíneas com seção transversal circular com 3/4 de polegada (19 mm) de diâmetro. As extremidades inferiores, onde se inicia o arco elétrico, foram usinadas para um perfil cônico, aproveitando-se assim o "efeito de ponta", quando do acendimento do arco elétrico. A união do eletrodo com a lança foi feita de várias maneiras no decorrer do desenvolvimento do protótipo, a figura 4.12 mostra o acoplamento que vem sendo utilizado atualmente. A limpeza dos eletrodos

foi feita com a retirada de gorduras e fuligem residuais.

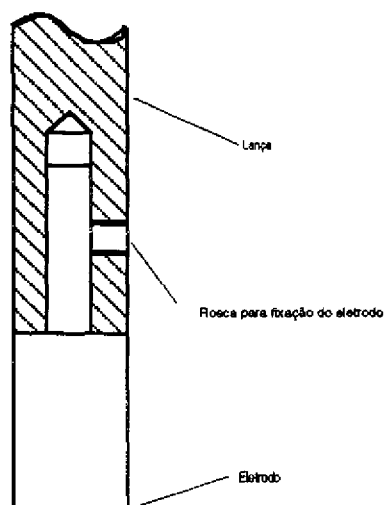


Figura 4.12. Acoplamento mecânico Eletrodo-Lança.

Imediatamente após a preparação da lingoteira e do eletrodo segue-se a montagem destas no forno, e os ajustes necessários para o seu alinhamento. O ponto mais crítico no alinhamento do sistema, o qual deve ser realizado antes de todas as fusões, é o alinhamento do eletrodo com a lança, pois o alinhamento dos seus eixos deve ser garantido no projeto, construção e montagem do equipamento. Movimentando-se a lança para cima e para baixo e observando o deslocamento radial do eletrodo em relação ao forno verifica-se se o alinhamento é suficiente para a fusão. Foram obtidos valores menores que 3 mm/m para o deslocamento radial do sistema eletrodo-lança, sendo plenamente satisfatório para um consumo de eletrodo em torno de 0,5 m.

Os procedimentos de limpeza e montagem até aqui apresentados, foram efetuados sempre no menor intervalo de tempo possível, para evitar a contaminação das superfícies limpas. Este tempo fica em torno de 3 horas.

Em seguida à montagem do forno, efetua-se uma evacuação da câmara, reaperto dos parafusos de união da câmara de refrigeração, lingoteira e da câmara superior, e a reavaliação do alinhamento. A evacuação do forno por um intervalo de pelo menos

uma hora tem por objetivo efetuar uma limpeza fina de suas superfícies internas, por intermédio da evaporação dos solventes utilizados na limpeza, e, também, prover a extração de gases em reentrâncias, interfaces de flanges, etc.

As fusões dos eletrodos de aço inoxidável foram realizadas sob um pressão de 50 mm Hg, tabela 2, pressão essa escolhida após testes que revelaram ser este um bom compromisso entre uma alta estabilidade do arco elétrico e das baixas pressões necessárias para o refino de metais reativos.

O melhor método utilizado para a abertura do arco, foi utilizando-se um gerador de alta tensão e alta frequência, ligado em série a um dos cabos de alimentação do forno. O sinal de alta tensão e alta corrente que é então sobreposto à corrente contínua proveniente da máquina de solda, que alimenta o forno. A alta tensão, a ponta afilada e a proximidade com o fundo da lingoteira, fazem com que ocorra uma ionização entre o eletrodo e a lingoteira, possibilitando a passagem de corrente elétrica contínua e a abertura do arco elétrico.

O ciclo de fusão tem o formato geral apresentado na figura 2.2, utilizando-se a corrente mais alta possível por um curto período (em torno de 10 s), para aquecimento do sistema seguindo-se do ajuste para a corrente de fusão em estudo. No final do ciclo de fusão efetua-se o abaixamento da corrente para evitar a formação de rechupes, no topo do lingote devido ao seu rápido resfriamento.

43.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

43.2.1 METALOGRAFÍA

Os lingotes obtidos nas fusões, caracterizados na tabela 2, foram fotografados e apresentados nas figuras 4.13, 4.14 e 4.16.

A preparação das amostras metalográficas, tanto para a microestrutura como para a macrografia, foi feita segundo as técnicas convencionais da metalografia. O corte longitudinal dos lingotes foi efetuado de forma a que a linha central dos mesmos estivesse contida na superfície resultante. Foi utilizada para o corte uma serra mecânica convencional com refrigeração por óleo solúvel, de maneira a evitar o aquecimento excessivo do material e consequente alteração da microestrutura.

A tabela 3 apresenta a sequência de operações executadas para a preparação da superfície, tanto para a macroestrutura como para a microestrutura, com uma estimativa de tempo de execução de cada operação.

Tabela 3. Sequência de operações, executadas na preparação das superfícies para análise metalográfica, com estimativa de tempo para cada operação.

OPERAÇÃO	ESTIMATIVA DE TEMPO (Horas)
Corte refrigerado com serra mecânica	1
Lixamento até lixa 600	3
Lixamento até lixa 1000	3
Polimento com alumina até 0,05 μ m	1
Ataque com solução saturada de Q1SO_4 em HCl	1

O registro das imagens foi feito utilizando-se:

Uma câmara fotográfica Pratika modelo MTL3, para a obtenção de macrografias, apresentadas nas figuras 4.13, 4.14, 4.16, 4.45 e 4.46, das superfícies intensamente iluminadas, utilizando-se filme monocromático com sensibilidade, ASA 100;

Uma macrografia com grande aumento, apresentada na figura 4.15, foi obtida por intermédio do microscópio Letz Wetzlar, modelo MM5, com filme KODAK - KODALITE;

As micrografias apresentadas foram obtidas num microscópio metalográfico Zeiss, modelo Photomicroscope **III**, utilizando-se filmes para diapositivos com sensibilidade, ASA 100. As características de ampliação e filtros são apresentadas nas legendas das figuras.

As micrografias, das regiões central, mediana e borda, para cada uma das condições (200 A e 400 A), foram digitalizadas utilizando-se um "scanner" de mesa marca HP. As imagens digitalizadas foram posteriormente analisadas, para a determinação do espaçamento interdendrítico secundário, por uma versão do programa Quantikov (53), gerando como resultado o valor médio do espaçamento, para um mínimo de dez medidas, e o desvio padrão associado a esse valor.

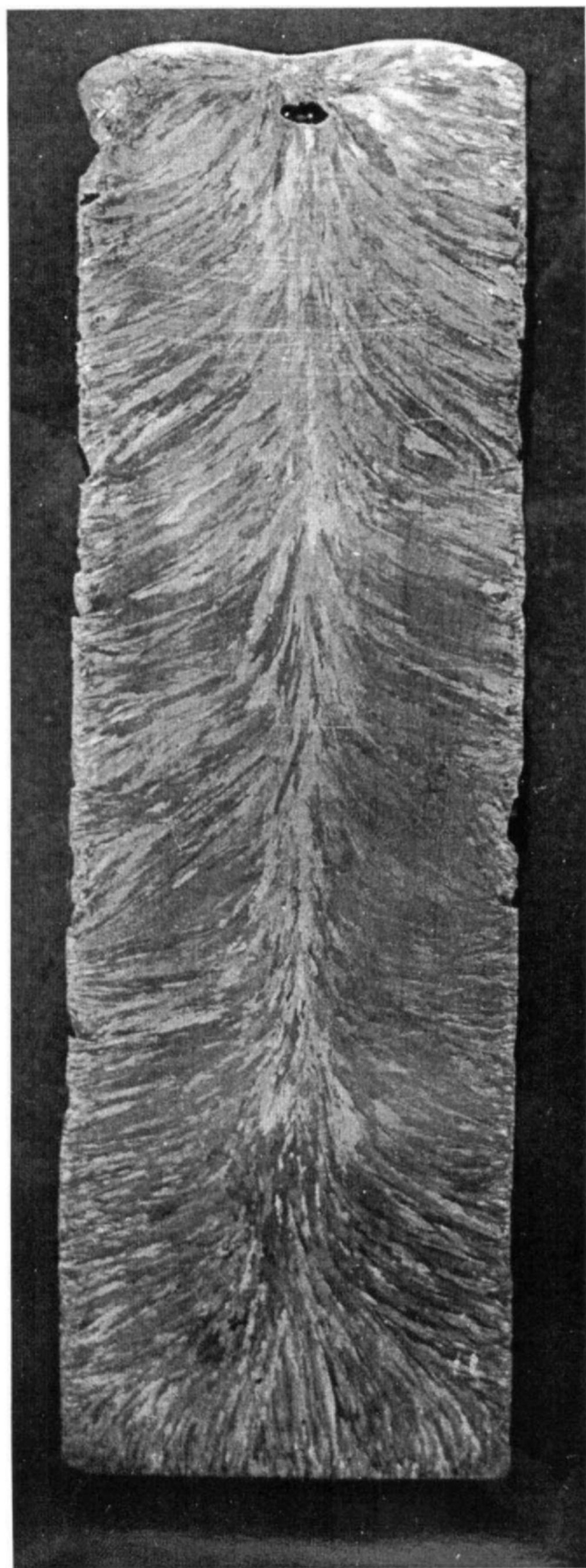


Figura 4.13 . Macrografia do lingote VAR. Aço inoxidável AISI304L, corrente de fusão 400 A, fluxo d'água 250 l/min.

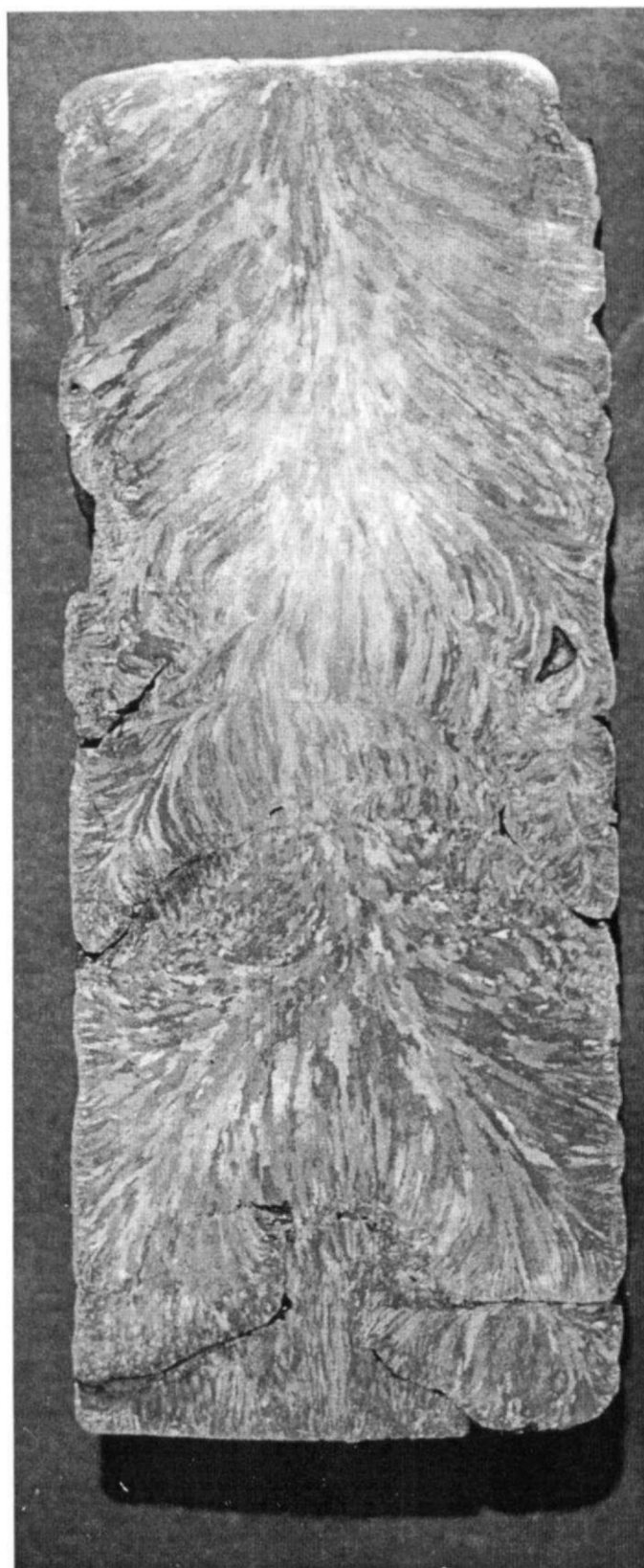


Figura 4.14 . Macrografia do lingote VAR. Aço inoxidável AISI304L, corrente de fusão 200 A, fluxo d'água 250 Umin.

Figura 4.15 . Macrografia com grande aumento da seção longitudinal de um lingote VAR. As curvas escuras revelam frentes de solidificação.

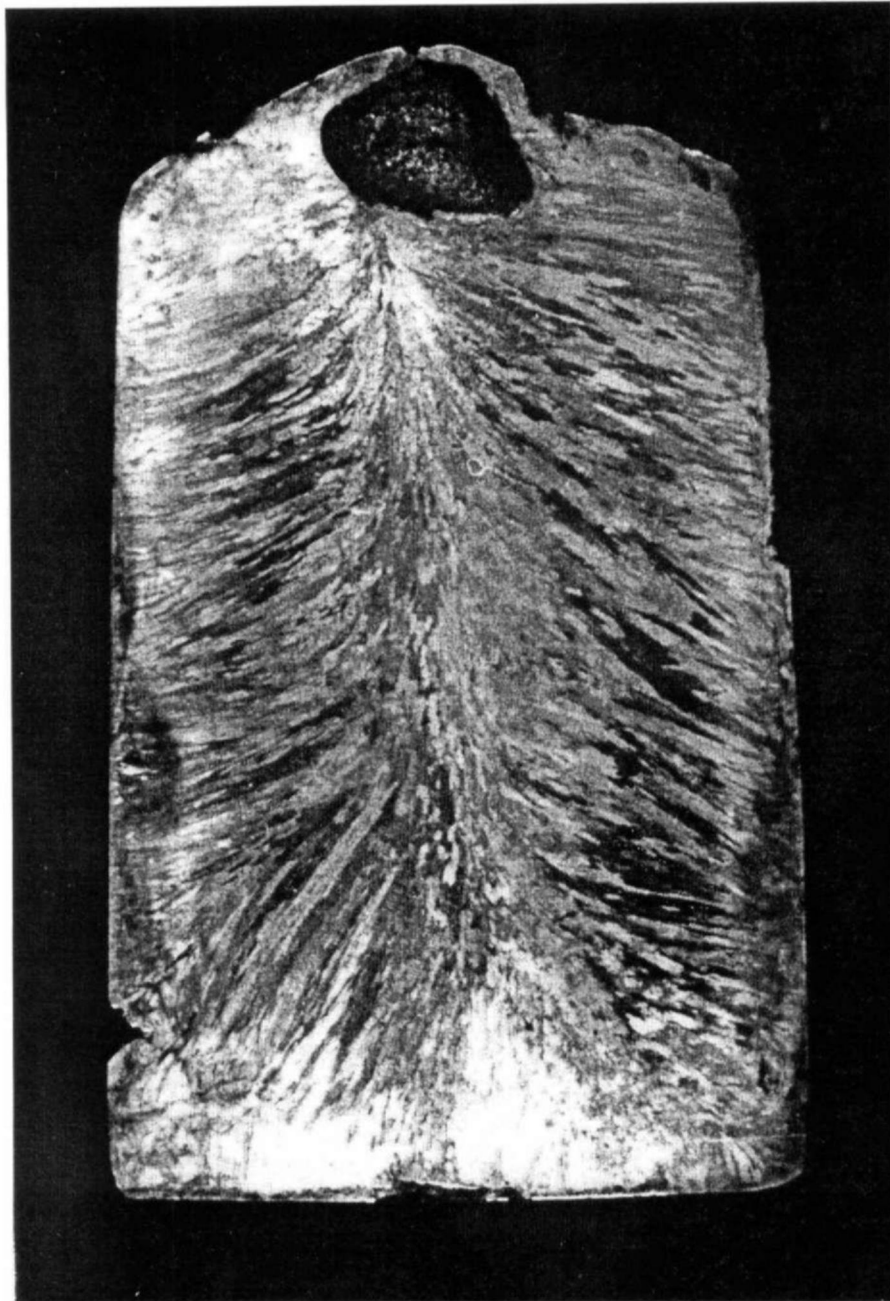


Figura 4.16 . Macrografia da seção longitudinal de um lingote VAR de aço-carbono, mostrando rechupe exagerado no topo do lingote, comportamento apresentado no texto.

4.3.2.2 RESULTADOS METALOGRAFICOS - ASPECTOS QUALITATIVOS

Os resultados metalográficos macroestruturais e microestruturais são apresentados a seguir. As figuras 4.13, 4.14 e 4.16 mostram as macrografias das seções longitudinais dos lingotes utilizados neste trabalho. Observa-se que a macroestrutura dos lingotes VAR apresenta semelhanças àquelas dos lingotes obtidos por métodos convencionais utilizados na fundição. O crescimento dendrítico colunar pode ser observado por quase todo o lingote, estando associado a gradientes térmicos elevados.

Contrariamente ao lingotamento convencional, não se observa a existência de uma zona central com crescimento equiaxial, devido ao alto gradiente térmico imposto pelo arco elétrico, entretanto observou-se a existência de uma região com crescimento equiaxial dendrítico no topo do lingote, quando a solidificação ocorre após o desligamento do arco elétrico, figura 4.23.

Não houve observação significativa de regiões coquilhadas provavelmente devido ao gradiente térmico elevado e altas temperaturas causados pelo arco elétrico. Apenas uma pequena região foi observada em um dos lingotes, apresentada na figura 4.26.

Os formatos das poças líquidas dos lingotes apresentaram o formato tipo-parabólico esperado, para todas as condições de operação. A dimensão mais significativa é a sua profundidade, que é tanto maior quanto mais alta for a corrente de fusão utilizada, como pode ser observado nas macrografias. O formato das poças líquidas é o ponto mais importante quanto a orientação dos grãos colunares. A orientação axial é maior quando as poças são mais rasas e; a orientação é em média mais radial quando as poças são mais profundas. Embora não seja discutido aqui este compromisso é importante quando se deseja avaliar a relação entre a textura cristalográfica do material (anisotropia), as suas propriedades mecânicas e a conformação termo-mecânica, do material.

As falhas de continuidade no material do lingote foram associadas aos defeitos típicos do lingotamento: os vazios no topo do lingote são consequência do resfriamento rápido do metal líquido, com consequente dificuldade de acomodação do metal em solidificação. Este defeito é denominado de "rechupe", é causado pela extinção rápida do

arco elétrico, e pode ser observado pronunciadamente na figura 4.16. A manutenção de um arco elétrico com baixa corrente, insuficiente para a fusão significativa do eletrodo, favorece a diminuição desse defeito. Foi também observado que uma segunda forma de diminuí-lo é a utilização de correntes mais altas durante a fusão, provocando poças líquidas mais profundas, com maior energia interna que demoram mais para se resfriar.

Outro defeito observado é a descontinuidade tanto interna ao lingote como na sua superfície, com a existência de falhas de preenchimento, semelhantes às trincas, como pode ser observado na figura 4.14. As figuras 4.24a e 4.24b mostram micrografias de falhas internas. Estas falhas apresentam-se ao longo de lingotes obtidos em fusões realizadas com correntes mais baixas. A justificativa para isso é a mesma apresentada para o vazio no topo do lingote, ou seja, a alta extração de calor que caracteriza o processo, resfria o material em solidificação muito rapidamente, não permitindo o total preenchimento da lingoteira. Observa-se também uma menor pressão hidrostática da poça de metal líquido, devido às poças mais rasas, em relação às observadas com correntes maiores.

A série de micrografias mais representativa, da seção longitudinal dos lingotes, é apresentada nas figuras 4.17 a 4.26. A seguir é apresentada uma análise qualitativa destas micrografias.

As figuras 4.17 e 4.18 mostram a microestrutura típica dos lingotes VAR (2), constituindo-se de grãos dendríticos com crescimento colunar. Os grãos dendríticos colunares aparecem em contraste devido a utilização de um filtro polarizador e contraste de interferência de fase. Observa-se também, além dos grãos colunares, braços dendríticos primários e secundários e alguns braços terciários.

Na figuras 4.19, tomada na base da lingoteira próxima à interface, observa-se o início da formação do lingote. A velocidade de resfriamento é suficientemente alta para causar um espaçamento dendrítico, primário, muito pequeno no início da solidificação, o qual logo estabiliza-se em torno de um valor constante.

Um efeito semelhante é apresentado na figura 4.20, fotografada na interface lateral do lingote com a lingoteira. O aspecto é clássico, mostrando o contraste entre os grãos cuja orientação, evidenciada pelo tronco central das dendritas, caracteriza o

crescimento competitivo, mostrando grãos que se aniquilam na lateral de um grão maior, mais alinhado com a direção de extração de calor do lingote.

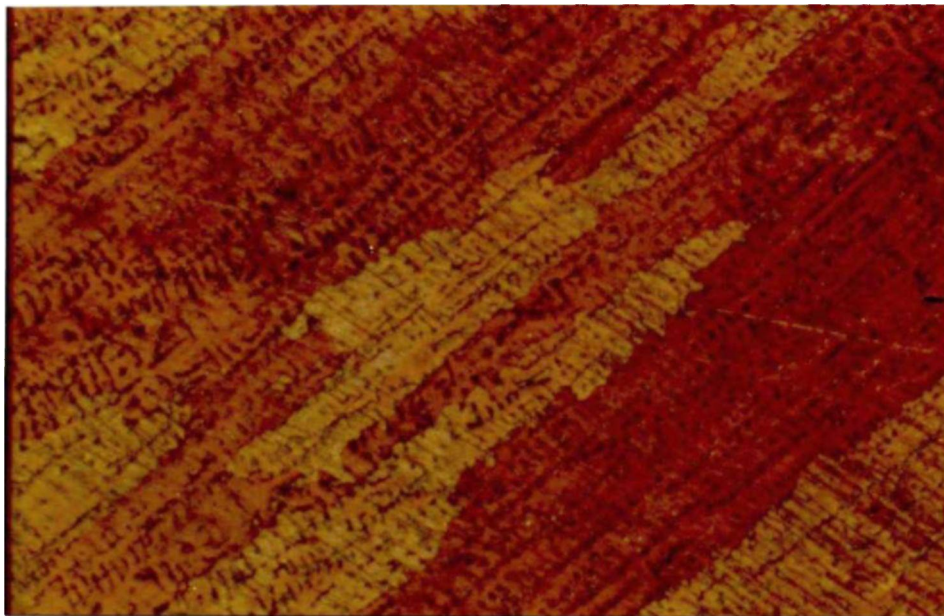


Figura 4.17 . Microestrutura típica de um lingote VAR.

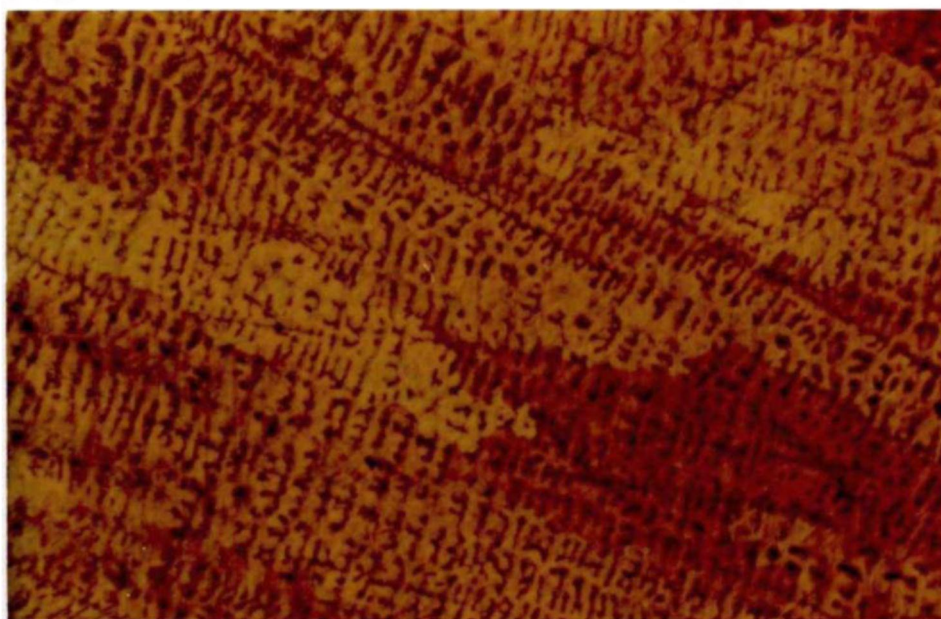


Figura 4.18 . Microestrutura típica de um lingote VAR.



Figura 4.19 . Microestrutura típica da base de um lingote VAR.

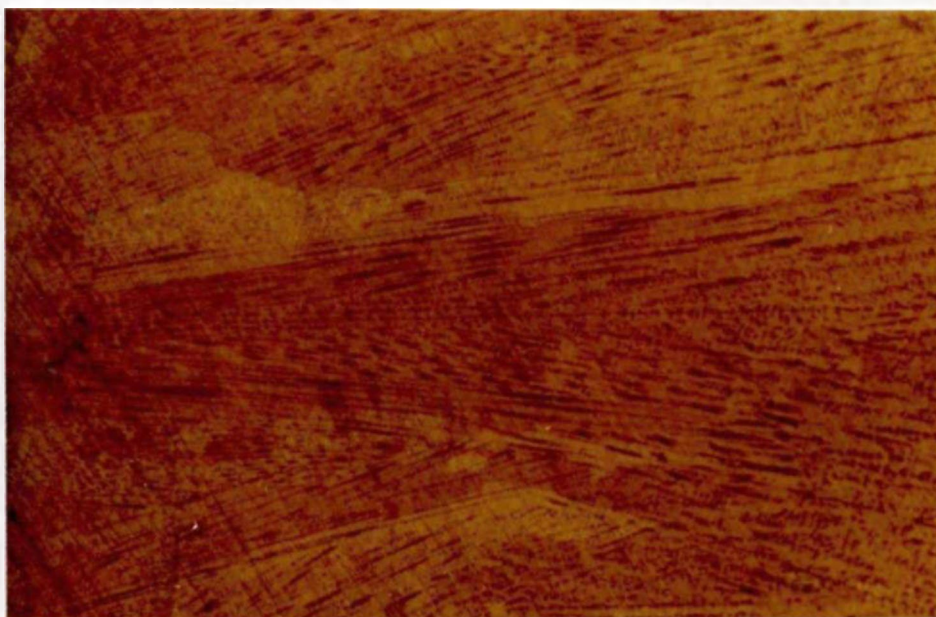


Figura 4.20 Microestrutura típica da lateral de um lingote VAR

O efeito da mudança de direção e sentido, de extração de calor existente durante o deslocamento da interface sólido-líquido, figura 4.21, provoca a mudança de direção de crescimento correspondente. O desenho esquemático da figura 4.25 mostra essa situação. Adicionalmente pode-se observar um depósito devido à precipitação de soluto, que caracteriza as frentes de solidificação nas macrografias.

A região de interface entre o crescimento dendrítico colunar e o crescimento dendrítico equiaxial, no topo do lingote, pode ser observado na figura 4.22. O crescimento dendrítico equiaxial é característico no topo do lingote quando, com o arco elétrico já desligado, não há mais o superaquecimento e o gradiente térmico necessário para manter o crescimento colunar. Na figura seguinte, figura 4.23, observa-se uma irricrografia característica da região com grãos dendríticos equiaxiais.



Figura 4.21 . Microestrutura mostrando a mudança de direção de crescimento colunar, devido ao deslocamento da interface sólido líquido.



Figura 4.22 . Microestrutura da interface entre as regiões com crescimento colunar e equiaxial

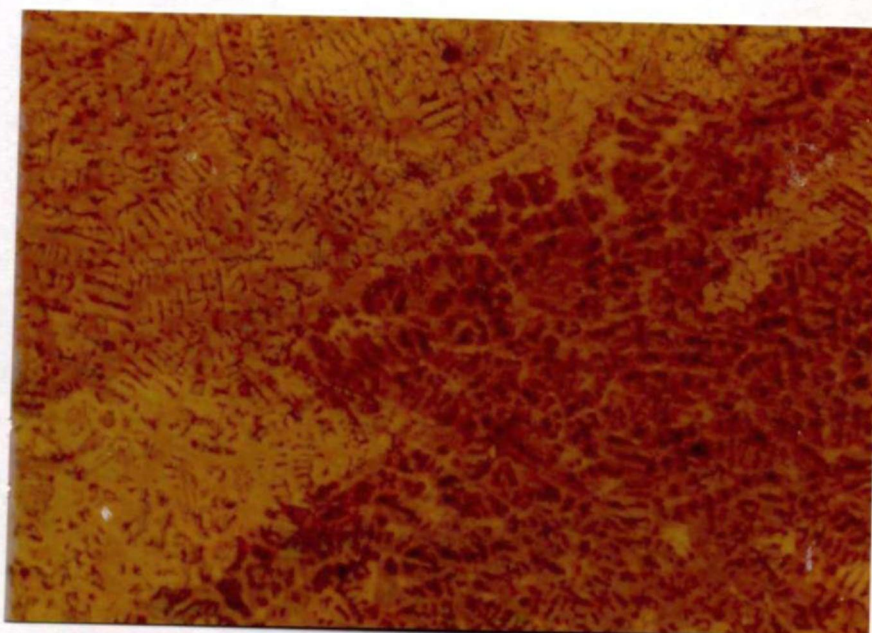
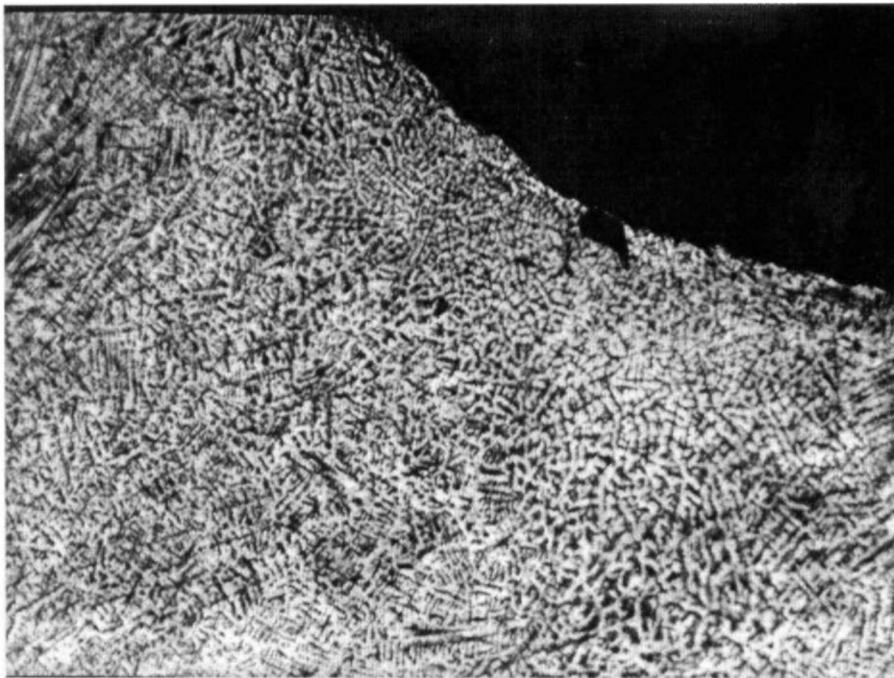


Figura 4.23 . Micrografia da região com crescimento equiaxial, no topo do lingote.



Figuras 4.24 a 4.24 b . Micrografias mostrando falhas de preenchimento, "trincas", conforme apresentado no texto.

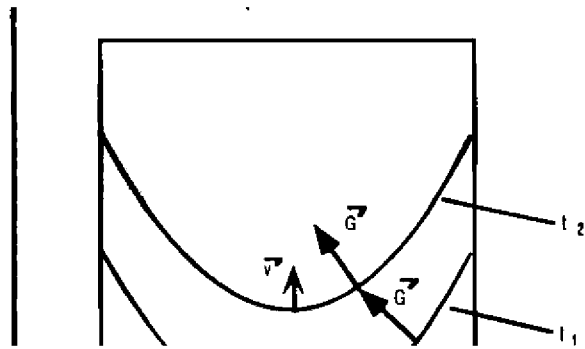


Figura 4.25 . Desenho esquemático da seção longitudinal de um lingote VAR, mostrando o deslocamento da interface sólido-líquido, no intervalo de tempo compreendido entre os instantes t_1 e t_2 . Os vetores G , gradientes térmicos, apresentam direções distintas para cada um dos instantes de tempo, causando a mudança da direção de crescimento dos grãos dendríticos colunares.



Figura 4.26 . Micrografia mostrando uma das raras regiões com grãos coquilhados, na base do lingote.

4.3.2.3 RESULTADOS METALOGRAFICOS - ASPECTOS QUANTITATIVOS

As medidas de espaçamento interdendrítico secundário, efetuadas com as técnicas descritas neste capítulo, apresentam os seguintes resultados expressos em microns:

Tabela 4 mostrando valores do espaçamento interdendrítico secundário (um), em função da posição no lingote e da corrente de fusão (A).

Posição radial	centro	meio diâmetro	borda
400 A	7±1	8±2	8±2
200 A	8±2	8±3	5±1

5 MODELAMENTO MATEMÁTICO E A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA SOLIDIFICAÇÃO DO LINGOTE.

5.1 INTRODUÇÃO

A simulação computacional de qualquer processo constitui-se de uma série de procedimentos. Estes procedimentos estão associados ao método matemático escolhido para a simulação. Basicamente, em todos os métodos, é desenvolvido um modelo matemático que servirá de base para a simulação em computador do processo. Para este trabalho foi escolhido o método das diferenças finitas com a formulação explícita, pela maior simplicidade de abordagem do processo de modelamento e simulação. O modelo e o método serão apresentados nas seções posteriores.

O primeiro passo na criação de um modelo para a simulação do processo de formação do lingote foi a elaboração de um conjunto de características geométricas e térmicas, que servissem de base e justificativa, para a escolha das equações e sistemas referenciais a serem utilizados. Este conjunto representa um resumo de muito o que foi apresentado em seções anteriores, é denominado de hipóteses do modelo, apresentado a seguir:

1-0 lingote tem simetrias térmica e geométrica, cilíndricas. A simetria geométrica é devida à construção da lingoteira e a térmica pela simetria anular da câmara de refrigeração e pela centralização do arco elétrico no topo do lingote;

2-0 arco elétrico é uma fonte de calor no topo do lingote, que impõe um superaquecimento ao metal líquido, enquanto as paredes da lingoteira são um sumidouro de calor. Uma segunda fonte de calor encontra-se na zona pastosa, com a liberação de calor latente da solidificação;

3-Existe um estado quasi-estacionário, térmico, no topo do lingote, ao redor da fonte de calor do arco elétrico, a partir de um certo intervalo de tempo de formação do lingote;

4-As constantes termofísicas do material são consideradas localmente constantes. Este fato será explicado oportunamente;

5-A transferência de massa do eletrodo para o lingote é considerada quando da adição de material por camadas, no topo do lingote;

6-Por simplicidade, o modelo somente considera transporte de calor, sendo os fenômenos de transporte de massa deixados para um futuro modelamento.

5.2 DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DO PROBLEMA

5.2.1 A EQUAÇÃO DE CONDUÇÃO DE CALOR

Os detalhes da dedução desta equação são apresentados no apêndice 3. No texto abaixo serão apresentadas as Unhas gerais para a dedução da mesma.

A equação de condução de calor é tomada como ponto de partida para o desenvolvimento do modelo matemático, lembrando que os fenômenos de transporte de massa não foram considerados, em virtude da simplicidade do modelo. Esta equação, já apresentada em seção anterior, é escrita na forma geral abaixo:

$$-k \nabla^2 T(r,t) + W_i(r,t) = \rho c_p \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (5.1)$$

Escrita para um sistema referencial genérico (r,t).

A observação da macrografia da seção transversal do lingote justifica a simetria azimutal, térmica e geométrica. A simetria azimutal garante, então, que as derivadas em anulem-se. Dessa forma a equação fica:

$$\rho C_p \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) = W_i(r,t) \quad (5.4)$$

5.2.2 A GERAÇÃO INTERNA DE CALOR

O termo $W(r,t)$, referente à geração interna de calor, é não nulo apenas na região onde o lingote está se solidificando. Este termo representa a geração de calor interna de um elemento de volume, por unidade de volume e por unidade de tempo, e é válido na região com temperaturas que obedecem a condição abaixo:

$$T_s \leq T < T_l \quad (5.5)$$

Escrevendo o termo $W(r,t)$ como:

$$W_i(r,t) = \rho \frac{\partial H(r,t)}{\partial t} \quad (5.6)$$

o qual representa a, desejada, variação de energia por unidade de volume por unidade de tempo. Efetuando-se uma mudança de variáveis, convenientemente, obtém-se:

$$(5.7)$$

Onde o termo, \ddot{u} pode ser obtido por métodos de análise térmica (54), para uma investigação mais exata e este, juntamente com as características termofísicas do material, é o fator que liga o modelo à realidade. Neste trabalho, para simplificar os cálculos, é feita uma aproximação da derivada por:

$$\frac{cH}{3T} \sim \frac{AH}{AT} \quad (5.8)$$

Rearranjando-se convenientemente os termos e, chamando

$$\Lambda = \frac{AH}{C_p = C_p}$$

, chega-se à equação:

$$\frac{1}{3r^2} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) - \Lambda \frac{T(r,t) - p C_p}{3t} = 0 \quad (5.12)$$

Onde o termo c_p tem o comportamento esquemático apresentado na figura 5.1, na qual se observa uma descontinuidade no intervalo de temperaturas compreendido pela zona pastosa, ou região onde ocorre uma mudança de fase. No caso de se considerar outras mudanças de fase no material, apresentar-se-iam outras descontinuidades, com maior ou menor intensidade e em outras temperaturas.

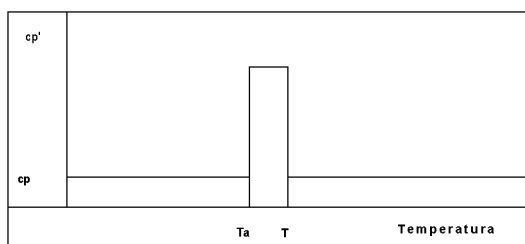


Figura 5.1 . Comportamento do calor específico em função da temperatura.

5.2.3 A MUDANÇA DO SISTEMA REFERENCIAL

Seguindo a hipótese da existência de um estado quasi-estacionário no topo do lingote, efetua-se uma mudança do sistema referencial do problema, da base fixa para o topo, do lingote, que se desloca com uma velocidade constante.

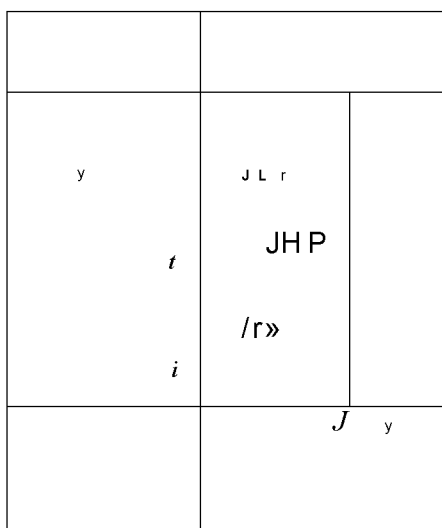


Fig. 5.2 . Representação dos sistemas de referência.

A figura 5.2 apresenta um corte na seção longitudinal de um lingote VAR onde são apresentados dois sistemas referenciais bidimensionais, (z,r,t) e (z',r',t') , os quais relacionam-se por:

$$r'=r;$$

$$z'=vt-z \text{ e};$$

$$t'=t.$$

(5.16)

Com a mudança do sistema referencial a equação 5.12 fica:

$$\rho \frac{d}{dt} \int_V \mathbf{T}(r',t') \cdot \mathbf{e}_i \, dV = \dots$$

(5.27)

Esta é a equação constitutiva, escrita para o novo sistema referencial, posicionado no topo do lingote. A partir de agora, a título de simplificação, as coordenadas (r', z', t') , no novo sistema, serão escritas como (r, z, t) não devendo ser confundidas com as coordenadas no referencial situado na base do lingote. Pelo mesmo motivo, o termo $T(r', t')$ será referenciado como T , simplificando a escrita da equação para:

$$-\nabla \cdot \tilde{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}} \cdot \nabla T + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{W} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.28)$$

Separadas as derivadas geométricas da derivada temporal.

5.3 APROXIMAÇÃO DAS DERIVADAS - O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

A tentativa de se encontrar uma solução para a equação 5.28, que gera a distribuição de temperaturas no interior do lingote é, por si só, um problema bastante complexo. Um método analítico seria por vezes quase impossível ou necessitaria de aproximações tais que diminuiriam em muito a precisão do resultado, embora este mesmo resultado na forma de função, expressasse mais facilmente o comportamento do campo térmico em função de um dado parâmetro. Em contrapartida, com a utilização de um método numérico a solução é simplificada, gerando sempre as temperaturas nos pontos internos do lingote ao invés de uma função que represente o comportamento da distribuição de temperaturas.

Com o desenvolvimento das ciências da computação, vários métodos para a solução de equações diferenciais foram sendo desenvolvidos. Este trabalho não comporta um resumo destes métodos (55), e onde somente será apresentado o método utilizado para a solução da equação 5.28 e determinação da distribuição de temperaturas no lingote VAR, lembrando que este não esgota o assunto nem que é o método mais preciso ou rápido.

Basicamente, todos os métodos numéricos para a solução de equações

diferenciais necessitam de aproximações das derivadas por valores ou relações algébricas, que são mostradas a seguir.

A aproximação de uma função contínua num certo intervalo pelo teorema de Taylor é expressa pela seguinte série infinita, neste mesmo intervalo:

$$f(q) = f(a) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{f^{(i)}(a)}{i!} (q-a)^i \quad (5.29)$$

Isolando-se e rearranjando-se convenientemente o termo $f(q)$ obtém-se a aproximação por diferenças finitas das derivadas. Assim as primeiras derivadas podem ser escritas pelas relações abaixo:

$$\frac{f(q_i + \Delta q) - f(q_i)}{\Delta q} \quad (5.33)$$

A qual tem erro associado:

$$E = \frac{1}{2} \Delta q^2 f''(\xi) \quad \xi = q_i + \theta \Delta q \quad (5.34)$$

Com ordem igual à Δq , $O(\Delta q)$.

Esta é denominada de aproximação por "forward differences" ou diferenças para diante.

De maneira análoga escreve-se a aproximação por "backward differences", ou diferença para trás:

$$\frac{f(q_i) - f(q_i - \Delta q)}{\Delta q} \quad (5.36)$$

Com a mesma ordem do erro associado anterior.

E, finalmente:

$$\frac{1}{3q} \frac{f(q_i + \Delta q) - f(q_i - \Delta q)}{2\Delta q} \quad (5.40)$$

Com erro E associado com ordem de Δq^2 , $O(\Delta q^2)$, aproximação denominada "central differences", ou diferenças centrais. Estas três aproximações esgotam as primeiras derivadas a serem utilizadas neste trabalho.

Com um procedimento análogo determina-se a aproximação para a segunda derivada:

$$\frac{1}{q} \frac{f(q_i + \Delta q) - 2f(q_i) + f(q_i - \Delta q)}{\Delta q} \quad (5.44)$$

Com erro E associado com ordem Δq^2 , $O(\Delta q^2)$.

O método das diferenças finitas consiste em utilizar-se das relações apresentadas acima para a solução da equação diferencial. A substituição destas e uma manipulação conveniente leva à seguinte relação, geral:

$$F(f, f', \dots, q_1, q_2, q_3, \dots, q_N, t) = \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t} \quad (5.45)$$

Onde: $F(f, f', \dots, q_1, q_2, q_3, \dots, q_N, t) = \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}$ é uma função de f , suas derivadas geométricas, temporal e eventualmente das variáveis dependentes, calculadas sobre o domínio em um dado instante.

5.3.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO.

Como citado anteriormente, a equação constitutiva, equação 5.28, como em qualquer método numérico, deverá ser resolvida em pontos específicos do domínio do problema, parte interna do lingote, pontos estes escolhidos a critério. No método das diferenças finitas esses pontos devem ser escolhidos de forma a que a distância entre dois pontos adjacentes seja sempre a mesma. Este fato é devido à discretização que será feita, na equação constitutiva, inerente ao método.

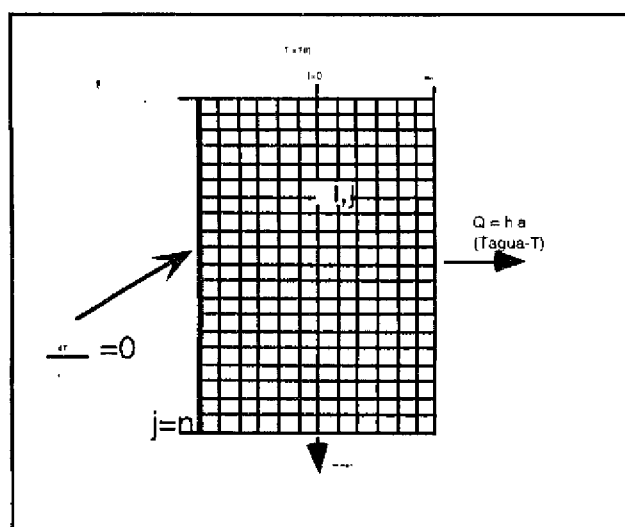


Fig. 5.3 . Corte longitudinal do lingote apresentando quadrilado, domínio, e condições de contorno.

A figura 5.3 apresenta um corte longitudinal num lingote VAR hipotético. Nesta figura são mostradas as condições de contorno e um quadrilado. Este quadrilado, igualmente espaçado em cada direção, apresenta nas intersecções das retas, pontos denominados nós, e a cada um destes nós é associado um par de números (i,j) , sua coordenada discretizada. Os pontos adjacentes ao ponto (i,j) são designados por $(i+1,j)$, $(i-1,j)$, $(i,j-1)$ e $(i,j+1)$. O número i está associado ao valor da coordenada radial (r) e o número j ao valor da coordenada axial (z). A discretização das derivadas e relações algébricas a serem utilizadas na discretização das condições de contorno e da equação constitutiva, será feita utilizando-se esta convenção.

Os espaçamentos r e z são determinados de acordo com a resolução desejada no campo de temperaturas, ou seja, da diferença de temperaturas entre dois pontos adjacentes do domínio e da memória disponível do computador. Uma forma de se pré-determinar isso, é avaliando-se o gradiente térmico final em função por exemplo, das condições de contorno e dos resultados experimentais obtidos. Gradientes térmicos muito altos numa dada direção exigem um espaçamento pequeno entre nós nesta mesma direção.

A determinação do intervalo entre dois instantes de tempo consecutivos é feita após a análise de estabilidade, para a determinação do maior intervalo de tempo possível para a discretização espacial efetuada. Ao instante de tempo t está associado o índice k e, aos instantes anterior e posterior a ele os números $k-1$ e $k+1$ respectivamente. Por conseguinte, um ponto em um dado instante de tempo é representado por (i,j,k) , e a temperatura neste ponto é aproximada por

$$(5.46)$$

O valor inicial de i e j é arbitrado neste trabalho como 0, zero. O valores máximos destes dois índices devem ser calculados para a resolução desejada do domínio e são normalmente representados por M e N , para i e j respectivamente. O índice temporal k inicia-se do zero, instante inicial, e tem o valor máximo determinado pelo tempo fictício de transiente.

5.3.2 AS CONDIÇÕES DE CONTORNO E SUA DISCRETIZAÇÃO

São apresentadas a seguir as condições de contorno analíticas e discretizadas, para a solução da equação diferencial constitutiva do problema, efetuando-se a substituição de/por T .

Para a discretização de relações ou equações serão utilizadas as aproximações apresentadas no apêndice 4. A representação da aproximação das temperaturas encontra-se na seção anterior.

Devido à simetria azimutal, do lingote, a primeira derivada radial da temperatura anula-se no centro do lingote. Como citado anteriormente, a justificativa para tal condição pode ser feita com base na análise metalográfica das seções longitudinal e transversal do lingote. A relação abaixo representa este fenômeno, analiticamente:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (5.47)$$

Utilizando-se uma aproximação do tipo "central differences" obtém-se:

$$\frac{T_{1,j} - T_{-1,j}}{2\Delta r} = 0$$

a qual gera

$$T_{1,j} - T_{-1,j} = 0 \quad (5.48)$$

Obtendo-se aqui o termo $T_{-1,j}$ o qual será utilizado na discretização da equação diferencial no eixo central do lingote.

A influência da potência gerada pelo arco elétrico no lingote é resumida neste modelo, por um superaquecimento do metal no topo do lingote. Assim as temperaturas na primeira camada do topo do lingote têm a temperatura definida por:

$$T(r,z)|_{z=0} = T(r) \quad (5.49)$$

A condição de contorno mais complexa é a retirada do calor pelas laterais do lingote.

O fluxo de calor na interface lingote-lingoteira é utilizado como condição de contorno para esta região. Como apresentado anteriormente, esta interface é constituída por três tipos de regiões: a primeira com contato total entre lingote e lingoteira, num anel circular no topo do lingote e na região circular do fundo; uma região cilíndrica onde se inicia o descolamento do lingote, devido à sua contração e; a região abaixo desta já totalmente descolada. As observações experimentais efetuadas levam a crer que o descolamento entre eletrodo e lingoteira é incompleto ao longo de todo o lingote, devendo-se isto ao fato dos experimentos terem sido realizados com um diâmetro pequeno 44 mm (0,044 m). Por este motivo e, supondo a transferência de calor pelo gás residual muito menor que a resistência de contato entre os metais, será utilizada neste modelo uma adaptação das relações de balanço térmico sugeridas por Bertran e Zanner (18,19), devidamente adaptadas aos materiais e dimensões utilizadas físicas deste problema.

Basicamente a determinação das temperaturas nas superfícies de contato do lingote com a lingoteira é feita igualando-se o fluxo de calor no lingote (equação de Fourier) com o fluxo de calor existente na combinação entre: a interface lingote-lingoteira; parede da lingoteira; e interface lingoteira-água de refrigeração. O fluxo de calor entre dois pontos no lingote é calculado por duas relações, uma para o sentido radial e outra para o axial, ambos os fluxos dirigindo-se para fora do lingote:

$$\nabla T|_{\text{radial}, r=R} = -\frac{1}{k(T)} Q_{\text{radial}} \quad (5.55)$$

ou,

$$\frac{(\theta_{M,i,j} - \theta_{M-1,j})}{\Delta r} = \frac{1}{k_{Mj}} Q_{\text{radial}} \quad (5.56)$$

$$\nabla T|_{\text{axial}, z=H} = -\frac{1}{k(T)} Q_{\text{axial}} \quad (5.57)$$

ou,

$$\frac{(\theta_{i,N} - \theta_{i-1,N})}{\Delta z} = \frac{1}{k_{i,N}} Q_{\text{axial}} \quad (5.58)$$

A combinação da influência da interface lingote-lingoteira; parede da lingoteira e, interface lingoteira-água de refrigeração é sintetizada pela relação abaixo, baseada no conceito de resistência térmica. O conceito de resistência térmica é apresentado em vários livros texto, como por exemplo Rosehnow e Choi (30), e não será detalhado aqui.

$$\dot{M}_{i,j} - \dot{Q}_{\text{radial}} = R_{\text{radial}} \dot{Q}_{\text{radial}} \quad (5.59)$$

$$\dot{T}_{i,n} - \dot{T}_{\text{água}} = R_{\text{axial}} \dot{Q}_{\text{axial}} \quad (5.60)$$

Os termos R_{radial} e R_{axial} são as resistências térmicas, para ambas as direções, compostas pelos termos:

$$R_{\text{radial}} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{2k} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{h_o} \quad (5.61)$$

$$R_{\text{axial}} = \frac{1}{h_i} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_o} \quad (5.62)$$

Onde h_i e h_o são os coeficientes de transmissão de calor, por contato, para as interfaces entre lingote-lingoteira e lingoteira-água de refrigeração; e é a espessura da parede da lingoteira e; r_1 e r_2 são os raios externo e interno da lingoteira respectivamente.

A relação 5.61 não considera explicitamente o efeito da retração do lingote, com a conseqüente formação do "gap". Este efeito está embutido no valor da constante h_i , a qual conseqüentemente, deve variar ao longo do comprimento do lingote. Bertran & Zanner (18,19) sugerem a seguinte relação para a resistência térmica do contato lingote-lingoteira, a qual deve ser adequada às dimensões e ao material do lingote utilizado neste trabalho.

$$R = R_{\text{radial}} - \frac{(T_s - T_d)}{(T - T_s)} \quad (5.63)$$

Onde: T_d é a temperatura onde o descolamento do lingote é considerado total; R_o é a resistência térmica de contato total entre lingote e lingoteira.

Para temperaturas, da superfície lateral do lingote, maiores que T_a a resistência térmica é igual à R_o . Enquanto que para temperaturas menores que T_d a resistência eleva-se em quatro ordens de grandeza, $R_o = R_o \cdot 10^4$, para evitar a singularidade matemática na relação 5.63, e ainda considerar o efeito, pequeno, da irradiação nas superfícies do lingote.

A temperatura de descolamento, T_d , é definida neste trabalho como a temperatura que causa uma contração de 0,1 % no volume do lingote.

Reagrupando adequadamente os termos das equações 5.59 a 5.62, obtém-se os valores das temperaturas na superfície do lingote em função das características termofísicas dos materiais da lingoteira e do lingote, das constantes de transmissão de calor envolvidas e das dimensões do sistema, gerando as relações:

$$T_{M,j}^{k+1} = \frac{A_r}{R_{M,j}^{radial}} \left(T_{M-1,f}^{k+1} - T_{M,j}^{k+1} \right) + T_{água} \quad (5.64)$$

$$T_{i,N}^{k+1} = \frac{A_z}{R_{i,N}^{axial}} \left(T_{i,N-1}^{k+1} - T_{i,N}^{k+1} \right) + T_{água} \quad (5.65)$$

Onde as resistências térmicas podem ser determinadas pelas relações 5.61 e 5.62. E os termos $T_{M-1,j}^k$ e $T_{i,N}^k$, na formulação explícita, já são conhecidos no instante anterior.

5.3.3 DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DIFERENCIAL

Utilizando-se os esquemas para a aproximação das derivadas apresentados neste capítulo, e as relações para as condições de contorno, escreve-se a equação constitutiva para cada uma das regiões do domínio: topo; centro; lateral; fundo e; região interna do lingote.

Para a região interna do lingote, onde não há influência das condições de contorno, obtém-se a seguinte relação, que aproxima a equação 5.28, e gera $T_{i,j,k+1}$:

$$T_{i,j,k+1} = \frac{\Delta t}{\rho C \Delta x} \left[\frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{\Delta x} + \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}}{\Delta x} + \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k+1}}{\Delta y} + \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}}{\Delta y} + \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k+1}}{\Delta z} + \frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}}{\Delta z} \right] + T_{i,j,k} \quad (5.66)$$

Onde: $1 \leq i \leq M-1$ e $1 \leq j \leq N-1$.

A figura 5.4 mostra uma representação esquemática dos pontos do domínio envolvidos na determinação da temperatura, denominada de célula computacional, no ponto determinado pelas coordenadas (i,j).

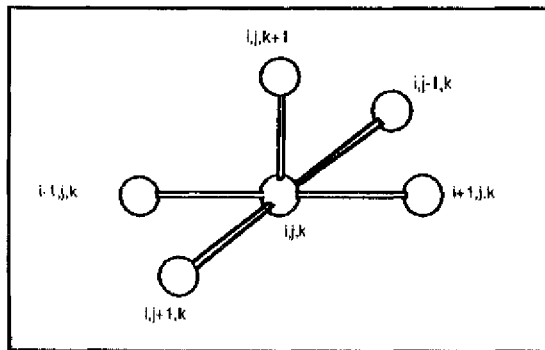


Fig. 5.4 . Célula computacional para a região central do domínio.

No topo do lingote onde se estabelece uma distribuição de temperaturas, superaquecimento, as temperatura são dadas pela relação 5.54 e pela imposição de um superaquecimento no anel externo do topo do lingote.

Na região central do lingote, onde há simetria azimutal do campo térmico, equação 5.48, este é determinado a partir da relação:

$$\rho_{i,j,k} \frac{dT_{i,j,k}}{dt} = \frac{k}{r} \left(\frac{dT_{i,j,k+1}}{dr} - \frac{dT_{i,j,k-1}}{dr} \right) + \frac{k}{\Delta r} \left(\frac{dT_{i,j,k}}{dz} - \frac{dT_{i,j,k-1}}{dz} \right) + \frac{k}{\Delta z} \left(\frac{dT_{i,j,k}}{dz} - \frac{dT_{i,j,k+1}}{dz} \right) + \rho C_p Y J \quad (5.67)$$

Onde $1 < j < N-1$.

E tem a ela associada a célula computacional mostrada na figura 5.5.

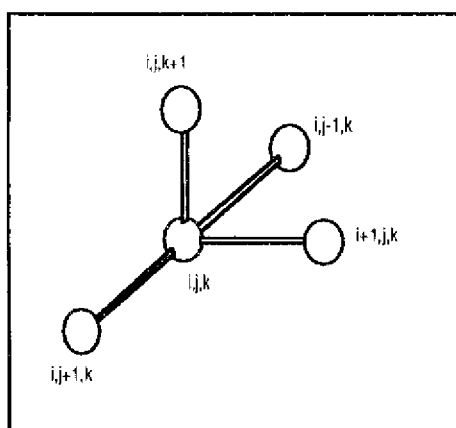


Fig. 5.5 . Célula computacional para os pontos da região central do domínio.

A lateral e o fundo do lingote têm as temperaturas determinadas pelas relações 5.63 e 5.64, já discutidas.

5.3.4 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE SIMULAÇÃO

A aplicação das relações desenvolvidas acima para a simulação em computador deve ser feita com a utilização de um algoritmo, um esquema que represente a formação do lingote no computador.

O algoritmo desenvolvido para este trabalho tem por objetivo reproduzir o processo de formação do lingote pela adição de camadas de metal líquido superaquecido, a intervalos de tempo definidos. Durante cada intervalo, entre as adições de material no topo do lingote, é calculado um transiente da distribuição de temperaturas. O resultado deste transiente ao final do intervalo, mais a temperatura constante do topo do lingote, formam a condição inicial para a determinação do transiente para a nova adição de material. O valor para o intervalo de tempo entre duas adições de material fica determinado pela seguinte relação:

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{|v|} \quad (5.68)$$

Nesta relação o valor de z é o mesmo utilizado na discretização do domínio, enquanto v é o valor da velocidade de deslocamento da superfície de metal líquido. O valor da velocidade $|v|$ pode ser determinado dividindo-se o comprimento do lingote pelo tempo total necessário à sua formação, para uma condição de corrente constante. Esta velocidade é idêntica à velocidade v calculada para o estado quasi-estacionário, discutida anteriormente.

O maior problema neste algoritmo, quando da opção pela formulação explícita da aproximação por diferenças finitas das derivadas, é a necessidade da análise do intervalo de tempo máximo entre iterações sucessivas, de maneira a que o intervalo de tempo entre adições de camadas seja um múltiplo inteiro do intervalo entre iterações sucessivas.

5.3.5 DESENVOLVIMENTO E RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO MATRICIAL

Foram escritas então $M \times N$ equações, uma para cada ponto do domínio. Ordenando-se estas equações linha a linha com o esquema mostrado a seguir:

iniciais.

Para a solução do problema são utilizadas as equações 5.53 a 5.56. Estas rearranjadas, expressam as temperaturas no domínio num instante de tempo $t+\Delta t$ em função de temperaturas no instante t imediatamente anterior, como pode ser observado nas células computacionais apresentadas nas figuras 5.4 e 5.5.

A utilização destas equações pode parecer contraditória à consideração apresentada no início deste capítulo, que existe um campo térmico quasi-estacionário ao redor do arco elétrico no topo do lingote. Esta condição justificaria que a derivada temporal fosse anulada, impossibilitando a aplicação do método apresentado. A solução para o que parece um paradoxo é a utilização da formulação explícita, partindo-se de uma condição inicial qualquer que deve convergir para um estado estacionário, da solução, após um certo intervalo de tempo. A este intervalo de tempo denomina-se tempo fictício para a solidificação do lingote, um conceito definido neste trabalho.

5.3.6 VALORES DERIVADOS DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS - GRADIENTE TÉRMICO, VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO E TEMPO LOCAL DE SOLIDIFICAÇÃO

O campo térmico determinado, seja numérica como analiticamente, normalmente não é suficiente para solução de problemas que envolvam o comportamento metalúrgico do material durante o seu processamento. Valores tais como o tempo local de solidificação; gradiente térmico; velocidade de resfriamento local e ; o parâmetro G/v (G/R para alguns autores), podem ser determinados a partir do campo térmico calculado e do modelo utilizado. Esta seção apresenta as equações analíticas e suas aproximações numéricas para a obtenção das grandezas citadas acima.

A figura 5.6 apresenta esquematicamente um corte longitudinal de um lingote VAR. Mostra-se o sistema de coordenadas deslocando-se com velocidade v e uma linha representando a linha $T_{solidus}$, interface entre o sólido e a zona pastosa. Nesta linha

apresenta-se ponto genérico num dado instante de tempo do processamento (ij) ao qual estão associados os vetores gradiente térmico a ser calculado, e o vetor velocidade de deslocamento da interface, v , característica do modelo.

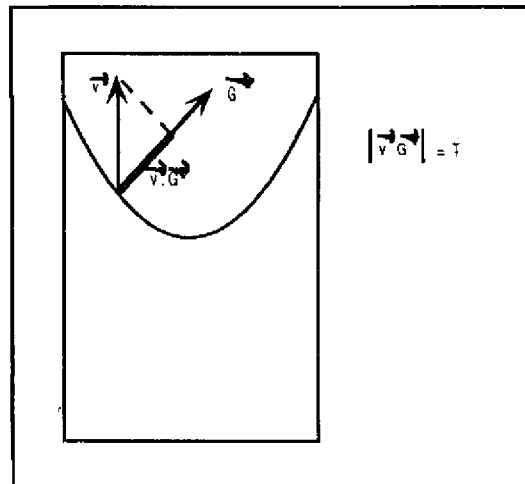


Fig. 5.6 . Descrição dos vetores velocidade e gradiente térmico, e determinação gráfica da velocidade de resfriamento.

5.3.6.1 GRADIENTE TÉRMICO

O gradiente térmico é a grandeza derivada que aparece na determinação de todas as outras. Como citado anteriormente, é o responsável pelo sentido de crescimento dos grãos colunares.

O gradiente térmico é calculado para uma direção genérica, por:

$$G = \frac{\partial T(r,t)}{\partial x} e_j$$

(5.71)

Sendo aproximado pelas relações abaixo, baseadas nas aproximações efetuadas para a primeira derivada.

$$G_{r,i,j} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{2Ar} \vec{e}_r \quad (5.72)$$

$$G_{z,i,j} = \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{2Az} \vec{e}_z \quad (5.73)$$

Para as duas direções mostradas na figura. Verifica-se aqui que a obtenção dos gradientes térmicos no lingote é bastante simples e segue imediatamente o cálculo da distribuição de temperaturas.

Vetorialmente a soma dá o vetor gradiente, para cada ponto do domínio, e consequentemente a direção de maior extração de calor.

$$\vec{G} = G_{r,i,j} \vec{e}_r + G_{z,i,j} \vec{e}_z = \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{2Ar} \vec{e}_r + \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{2Az} \vec{e}_z \quad (5.74)$$

O módulo deste vetor é um valor numérico que será muito utilizado na determinação das outras grandezas.

$$(5.75)$$

5.3.6.2 A VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO

Esta grandeza é apresentada como $G \cdot R$ por vários autores, sendo neste trabalho utilizada a designação $G \cdot v$. Em todos os trabalhos estudados os valores de G e v são apresentados como grandezas escalares, não sendo portanto esta abordagem adequada à solução do problema pois, a velocidade de deslocamento da interface e o gradiente térmico não são paralelos. A utilização de um produto escalar de vetores resolve este problema,

projetando o vetor velocidade, na direção do gradiente térmico, assim:

$$t(r,t) = t_{i,j} = \frac{(T_i - T_j)}{2\lambda z} = G \quad (5.76)$$

substituindo as relações escritas para o vetor gradiente térmico dá:

$$T(r,t) = T_{i,j} = \frac{(T_i - T_j)}{2\lambda z} = v_r + \frac{(T_i - T_j)}{2\lambda z} e_r \quad (5.77)$$

que dá:

$$f(r,t) = f_{i,j} = \frac{(T_i - T_j)}{2\lambda z} \quad (5.78)$$

5.3.6.3 O TEMPO LOCAL DE SOLIDIFICAÇÃO

A grandeza escalar tempo local de solidificação, simbolizada por t_s , é normalmente utilizada em engenharia de materiais, e representa o tempo necessário para que um dado ponto do metal líquido passe da temperatura liquidus, *Tuquidus*, para a temperatura *solidus*, T_i . Esta pode ser calculada pela relação abaixo:

$$t_s = \frac{(T_l - T_s)}{T_{i,j}} \quad (5.79)$$

para um dado ponto (i,j), facilmente calculável após a determinação da velocidade de resfriamento, $T(r,t)$, ter sido determinada na seção anterior, equação 5.78.

5.3.6.4 PARÂMETROS TERMOFÍSICOS DO MATERIAL

Os valores reais dos parâmetros termofísicos utilizados na simulação do processo têm uma importância fundamental na exatidão dos resultados obtidos. São esses valores que ligam o modelo matemático e o código de simulação à realidade experimental. Neste trabalho foram utilizados os valores obtidos da literatura, da série "Thermophysical Properties of Matter" (61). Embora não seja essa a condição ideal, a medida sistemática das constantes termofísicas do material foge do escopo deste trabalho.

5.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

5.4.1 DEFINIÇÕES

A figura 5.7 mostra uma seção longitudinal esquemática de um lingote VAR, nesta estão definidas cotas lineares importantes para a análise dos resultados da simulação. Define-se no texto o volume total da poça como sendo o volume de metal líquido existente no lingote, delimitado pela interface sólido-líquido do lingote. Convém ressaltar que a profundidade da poça líquida, que será utilizada como fator de validação do modelo, não é determinada a partir do volume total da poça.

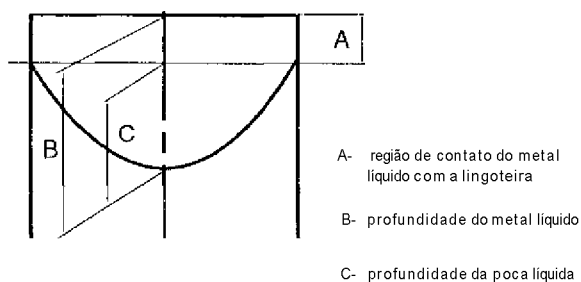


Figura 5.7 . Definição das cotas para análise dos resultados da simulação.

5.4.2 RESULTADOS

O programa utilizado para a simulação roda na forma não interativa com o usuário. Esta opção foi feita pois a formulação explícita das aproximações das diferenças finitas exige intervalos de tempo pequenos entre iterações, impondo, por vezes, um tempo longo de simulação, o que prenderia o usuário à máquina.

Um arquivo sequencial é utilizado para armazenar o resultado da simulação. Os valores das temperaturas são também impressos em linhas e colunas, sobrepondo as temperaturas aos pontos do domínio considerado. O cálculo das dimensões das isotermas é efetuado, por interpolação, por um outro programa que determina no arquivo resultante da simulação, a posição da temperatura, isoterma, dentro de cada coluna de temperaturas, e armazena-os para análise.

A apresentação dos resultados é feita graficamente, de duas formas: a primeira utilizando um aplicativo comercial, EPlot (62) e; a segunda, um programa desenvolvido neste trabalho, apêndice 5, o qual apresenta faixas de temperatura constante, pintadas sobre uma representação de um corte longitudinal do lingote. Este programa caracteriza-se por uma interação muito maior com o usuário que a observada no código de simulação, flexibilizando a análise dos resultados. Exemplos destes dois tipos de resultados são apresentados nas figuras 5.8 a 5.10.

Os resultados das simulações foram agrupados convenientemente, como mostrado nas figuras 5.11 a 5.18, nas quais conjuntos de resultados comparam as dimensões e formatos das frentes de solidificação agrupados de forma a representar bem o modelo, validá-lo e servir de base para as conclusões desta seção e do trabalho. As simulações foram efetuadas para duas condições de fusão distintas, 200 A e 400 A, realizadas experimentalmente.

Uma análise prévia dos resultados das simulações, baseadas no modelo, mostrou que os parâmetros que mais influenciam as dimensões da interface sólido-líquido são a resistência térmica, o superaquecimento do líquido no topo do lingote e suas distribuições e as temperaturas de descolamento da interface lingote-lingoteira. Nas figuras 5.11 e 5.12, (para 400 A) ; 5.13 e 5.14 (para 200 A) observam-se as comparações entre isotermas T_{oUdus} representando as interfaces sólido-líquido, para diferentes valores da

resistência térmica total, estando fixos os outros parâmetros de processamento. De forma semelhante, as figuras 5.15 a 5.18 mostram comparações entre as isothermas *Tsolidus* para valores distintos de superaquecimento e temperaturas de descolamento.

Os ajustes de curvas sobre as isothermas *Tsolidus* obtidas nas simulações efetuadas, mostraram que os polinômios que melhor se adaptam são do quarto grau, embora as curvas obtidas inicialmente pareçam e sejam denominadas de tipo-parabólicas ao longo do trabalho. Estas equações têm os termos ímpares anulados, devido à geometria do problema. Esta característica facilita o cálculo do volume da poça líquida, através integração de um elemento de volume delimitado por uma curva tipo parabolóide de revolução.

A análise dos resultados, efetuada acima, não é suficiente para a validação do modelo. Para tal tarefa foi feita a comparação entre a isoterma observada experimentalmente e as isothermas calculadas por simulação. Estas comparações são apresentadas nas figuras 5.19 e 5.20.

5.4.3 OS VALORES DERIVADOS CALCULADOS - GRADIENTE TÉRMICO, VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO E TEMPO LOCAL DE SOLIDIFICAÇÃO

As distribuições de temperaturas calculadas, que melhor se ajustaram aos resultados experimentais foram utilizadas para a determinação dos gradientes térmicos, velocidades de resfriamento e tempos locais de solidificação, para cada uma das condições experimentais.

A apresentação dos resultados é feita de forma semelhante à utilizada na apresentação das distribuições de temperaturas no lingote. Sobre o domínio geométrico do problema são traçadas isothermas como referências, e setas cuja origem está nos nós da grade de discretização do domínio, e são orientadas no sentido do fluxo de calor naquele ponto. As cores das setas indicam faixas do valor do gradiente térmico, tal qual o método

utilizado para apresentar as distribuições de temperatura. Estes resultados são apresentados nas figuras 5.21 e 5.22.

As velocidades de resfriamento são apresentadas na mesma forma gráfica da utilizada para a distribuição de temperaturas. As figuras 5.23 e 5.24 mostram estes resultados, para a situação de melhor ajuste para as fusões com 200 A e 400 A.

Os procedimentos para a apresentação dos resultados foram desenvolvidos de forma a possibilitar a sobreposição de resultados, como se pode observar em alguns deles.

A figura 2.18 mostra a relação experimental entre o espaçamento interdendrítico secundário e a velocidade de resfriamento no intervalo de temperatura entre $T_{\text{ço}}/e$ (57). Em seguida, figuras 5.25 e 5.26, sobrepõe-se os resultados experimentais aos teóricos para os melhores ajustes obtidos, para 200 A e 400 A.

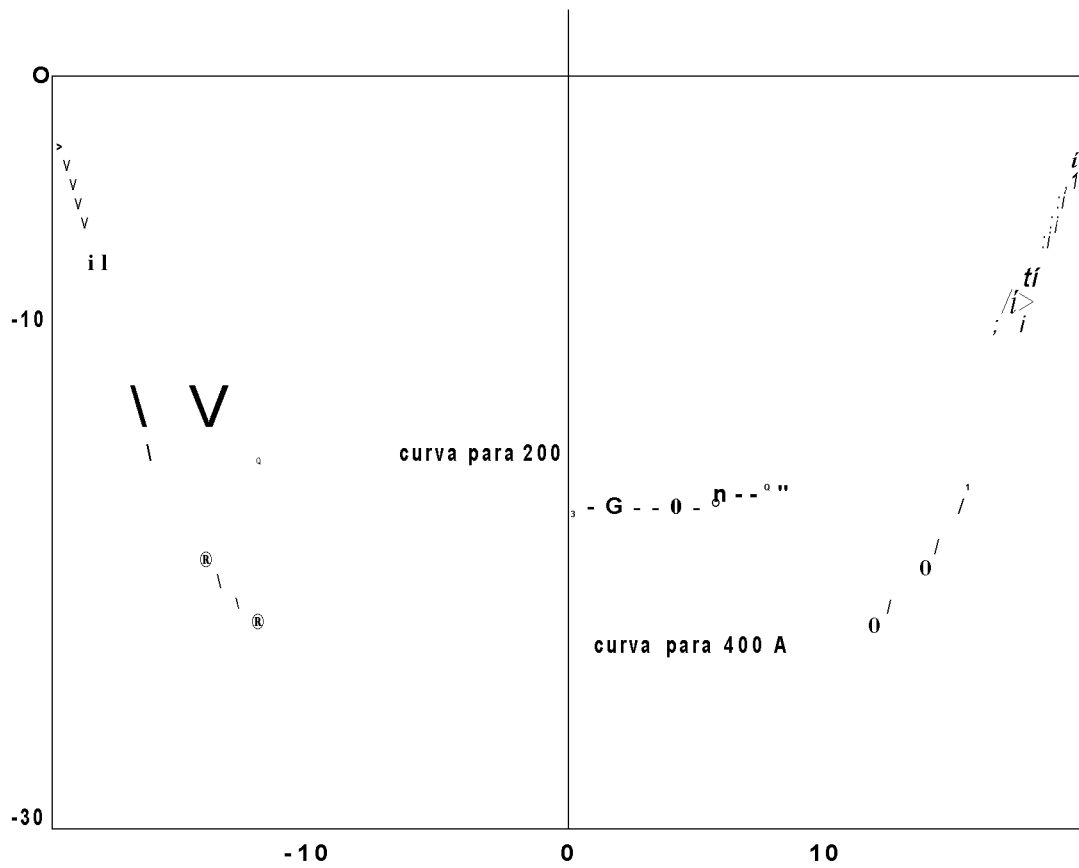


Figura 5.8 . Resultados das simulações. Interfaces sólido-líquido calculadas por simulação, para as fusões com 200 A e 400 A.

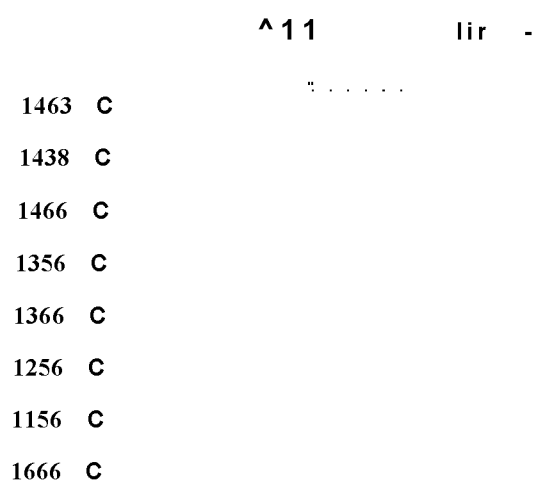


Figura 5.9 . Resultado da simulação. Fotografia mostrando a distribuição de temperaturas obtida por simulação, para a fusão com 200 A, por faixas coloridas discretizando as temperaturas.

```

'Hllllllllllllllliir
l1111111111111111
I!                    " r
H l          I M
"«•III»'
1463 C
1436 C

```



ura 5.10. Resultado da simulação. Fotografia mostrando a distribuição de temperaturas obtida por simulação, para a fusão com 400 A, por faixas coloridas discretizando as temperaturas.

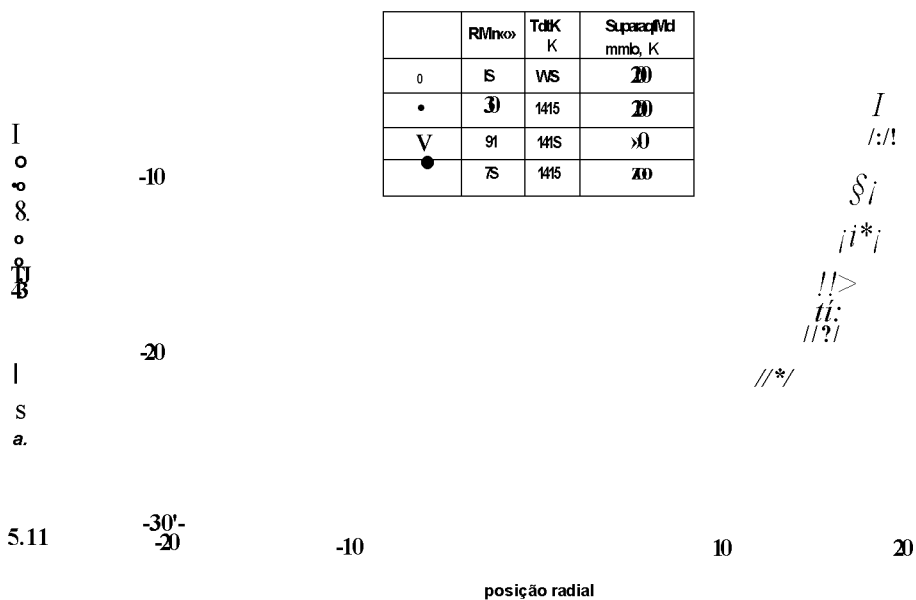


Figura 5.11

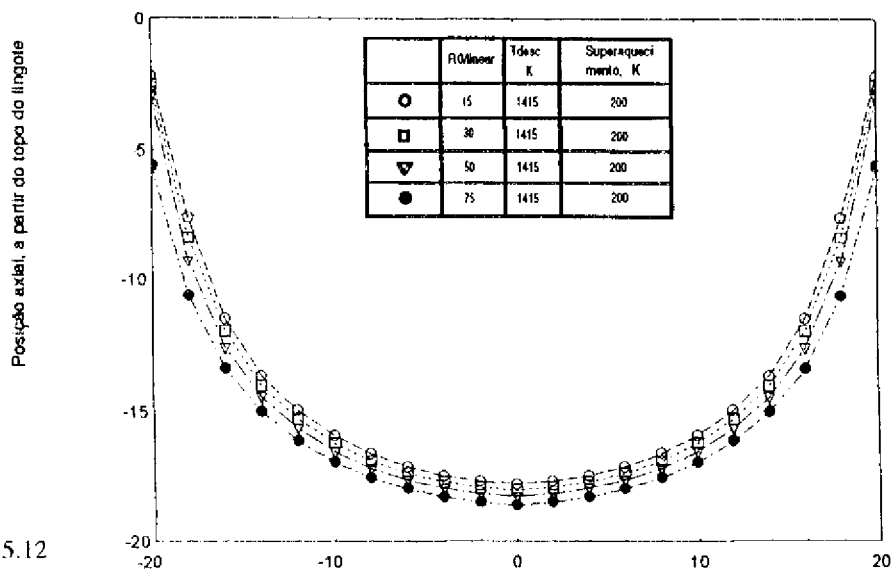


Figura 5.12

Figuras 5.11 e 5.12 . Curvas da interface sólido-líquido, obtidas por simulação, para as fusões com 400 A e 200 A respectivamente, mostrando o comportamento dos seus formatos e dimensões em função da variação da resistência térmica, RO, mantidas as outras condições constantes.

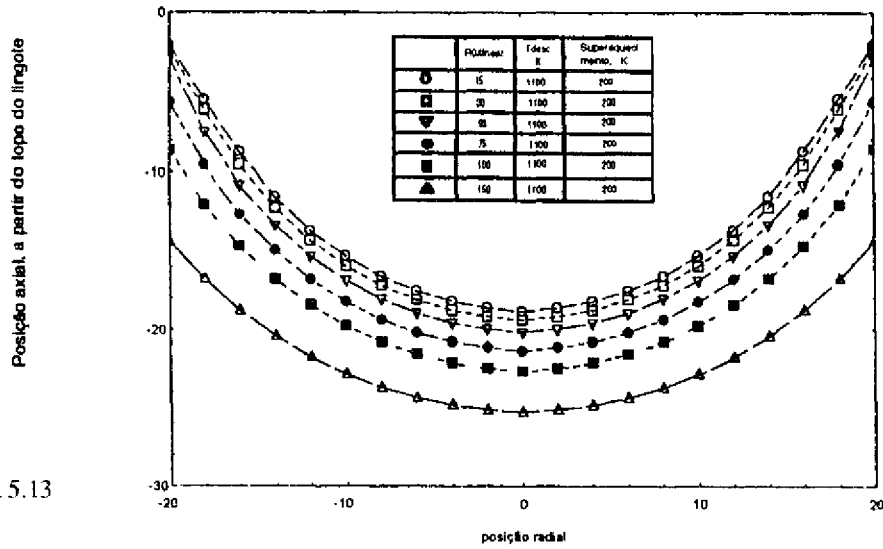


Figura 5.13

I
o
a

S
o

-15

-20
-20

-10

posição radial

o'
cr

o'
p'

10

20

Figura 5.14

Figuras 5.13 e 5.14 . Curvas da interface sólido-líquido, obtidas por simulação, para as fusões com 400 A e 200 A respectivamente, mostrando o comportamento dos seus formatos e dimensões em função da variação da resistência térmica, RO, mantidas as outras condições constantes.

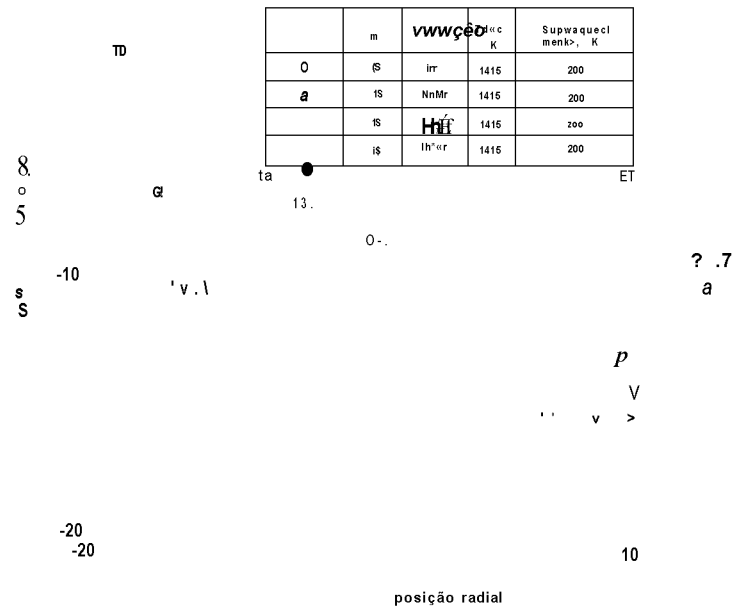


Figura 5.15

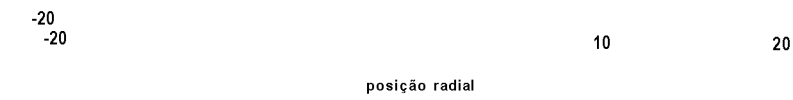


Figura 5.16



Figuras 5.15 e 5.16 . Curvas da interface sólido-líquido, obtidas por simulação, para as fusões com 400 A e 200 A respectivamente, mostrando o comportamento dos seus formatos e dimensões em função da temperatura de descolamento, Tdesc, mantidas as outras condições constantes.

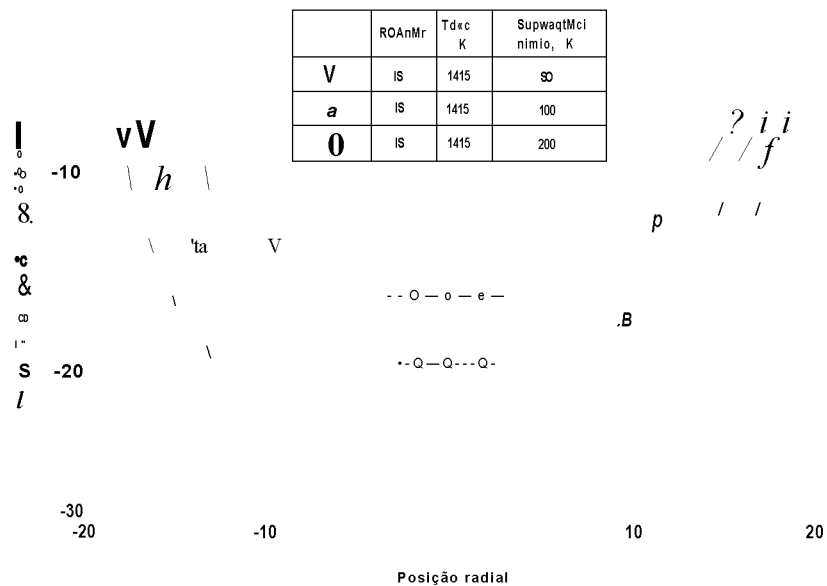


Figura 5.17

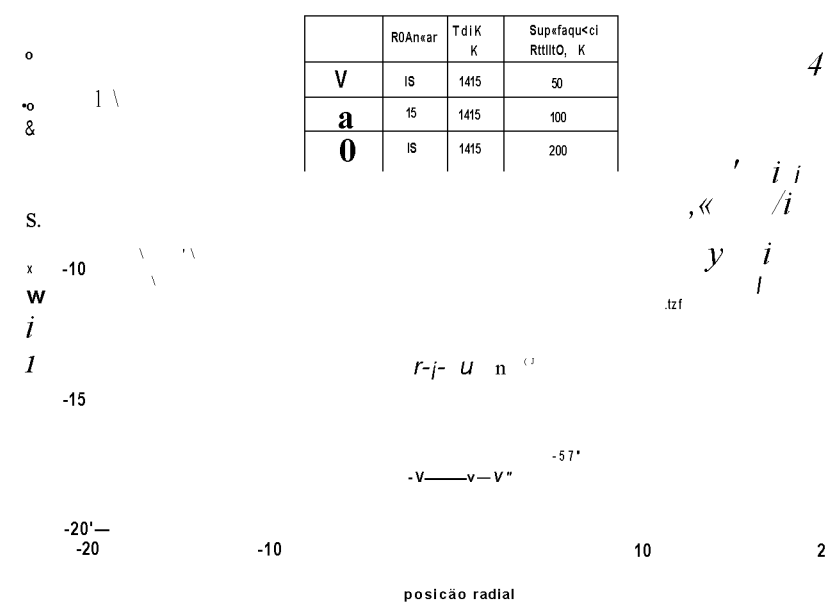
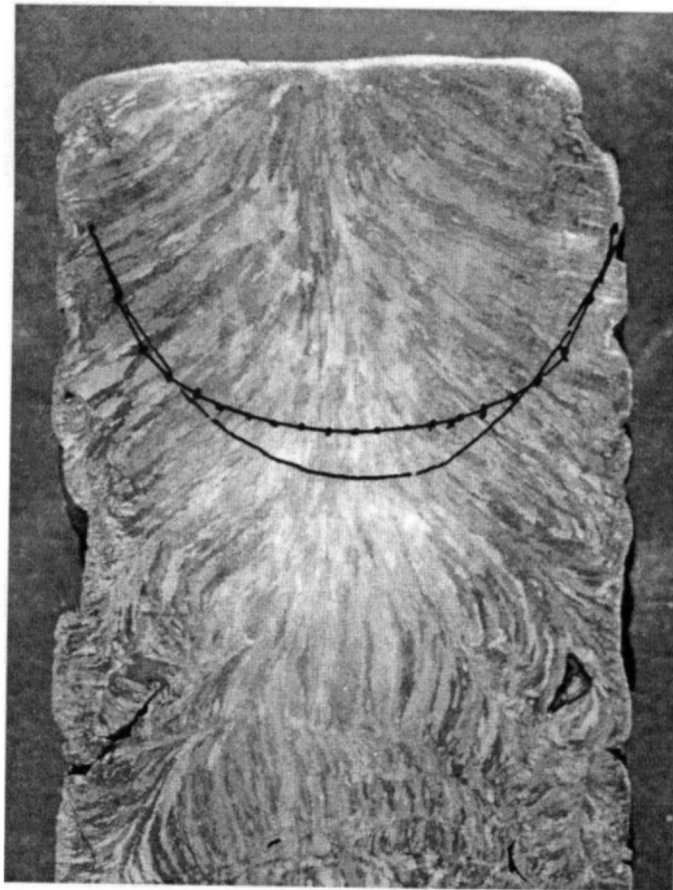


Figura 5.18

Figuras 5.17 e 5.18 . Comparação das formas e dimensões das isothermas T_{..}/ em função do superaquecimento máximo no topo do lingote, mantidas as outras condições constantes, para as fusões com 400 A e 200 A, respectivamente.



—— resultado experimental

- · - · - resultado da simulação

Figura 5.19 . Sobreposição dos resultados experimental e calculado, do formato e dimensão da poça líquida para a fusão com 200 A.

——— resultado experimental

- • - • - resultado da simulação

Sobreposição dos resultados experimental e calculado, do formato e dimensão da poça líquida para a fusão com 400 A.

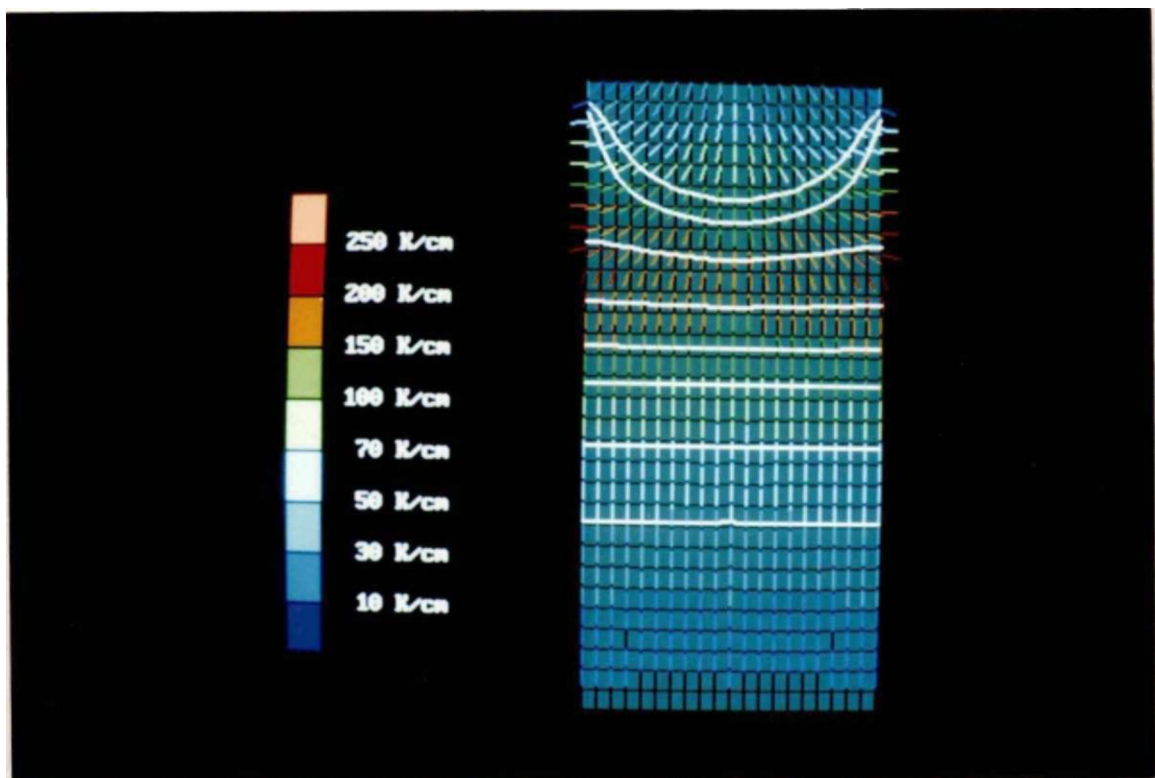
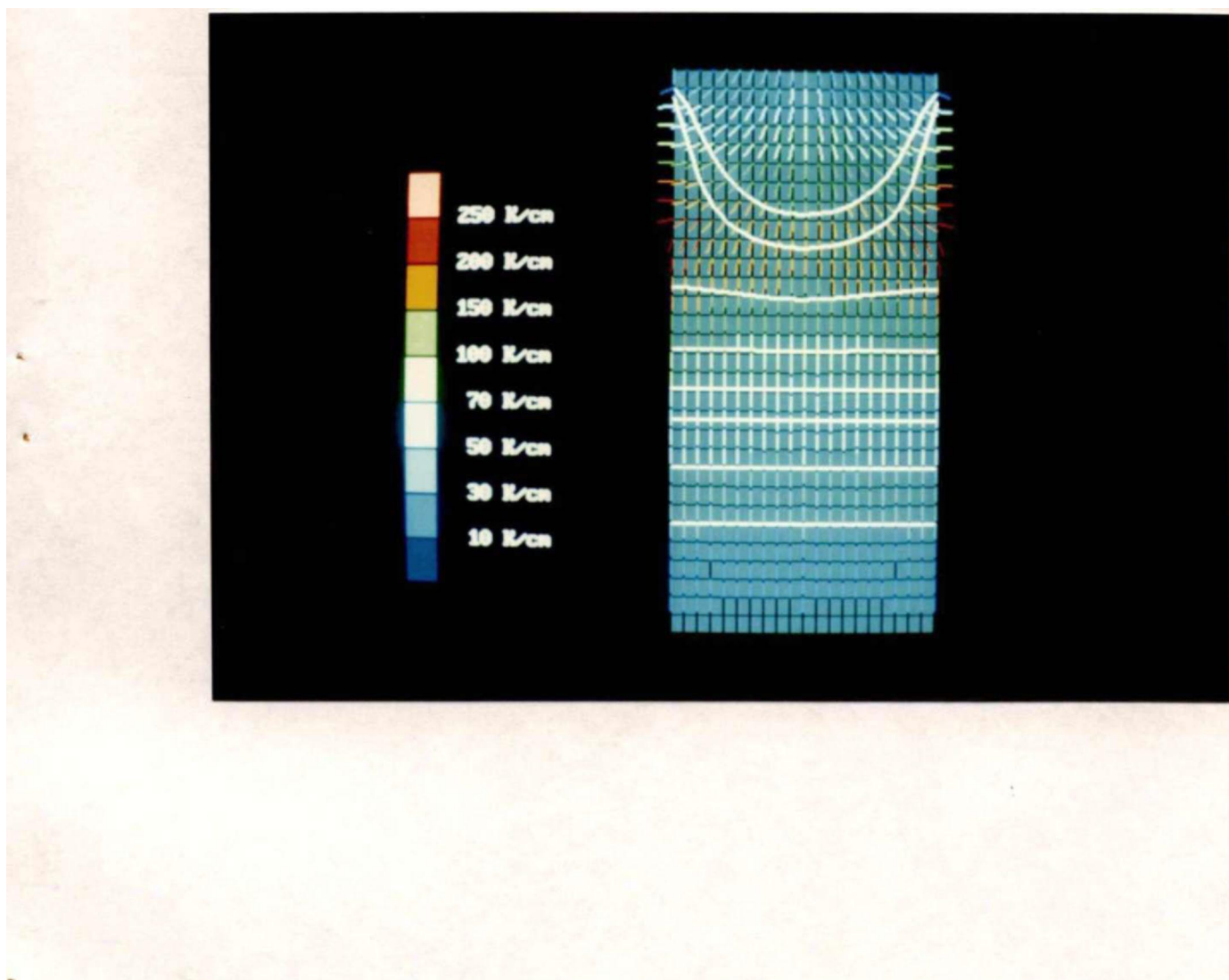


Figura 5.21 . Gradientes térmicos calculados a partir do resultado da simulação da fusão com 200A. As setas coloridas indicam a direção e o sentido , a partir de cada nó do domínio, do fluxo de calor. A cor de cada seta indica a faixa de intensidade do vetor gradiente térmico.



k

Figura 5.22 . Gradientes térmicos calculados a partir do resultado da simulação da fusão com 400A. As setas coloridas indicam a direção e o sentido , a partir de cada nó do domínio, do fluxo de calor. A cor de cada seta indica a faixa de intensidade do vetor gradiente térmico.

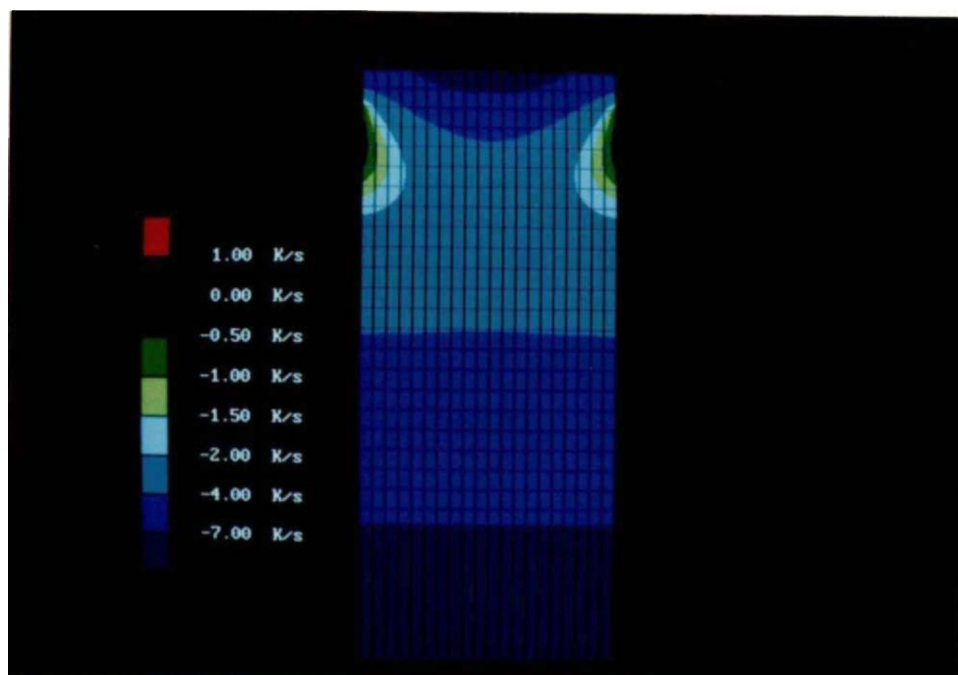


Figura 5.23 . Fotografia mostrando a distribuição de velocidades de resfriamento, calculadas, para cada fusão com 200 A, por faixas coloridas discretizando as temperaturas.

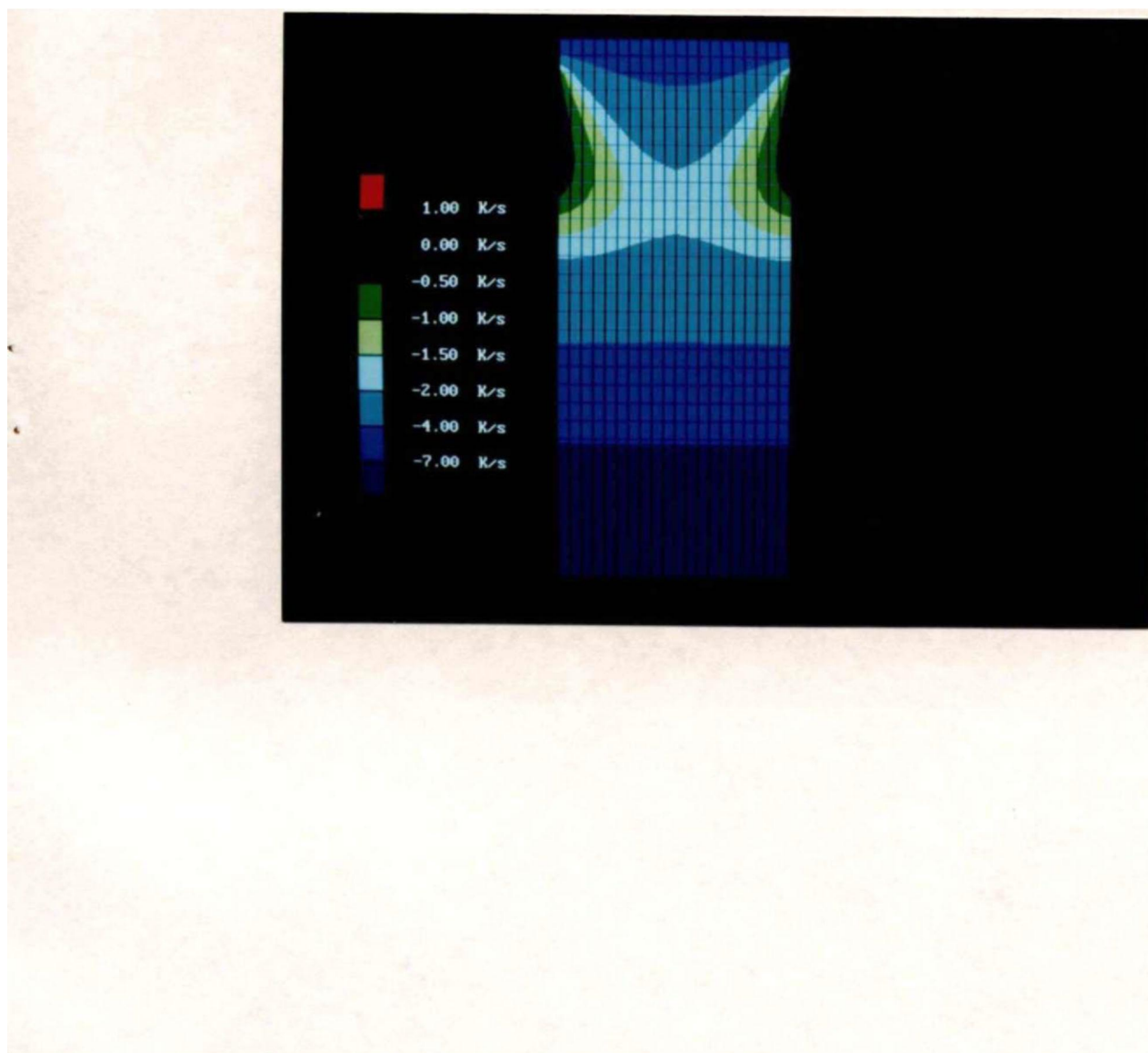


Figura 5.24 . Fotografia mostrando a distribuição de velocidades de resfriamento, calculadas , para cada fusão com 400 A, por faixas coloridas discretizando as temperaturas.

RESULTADO PARA 400 A

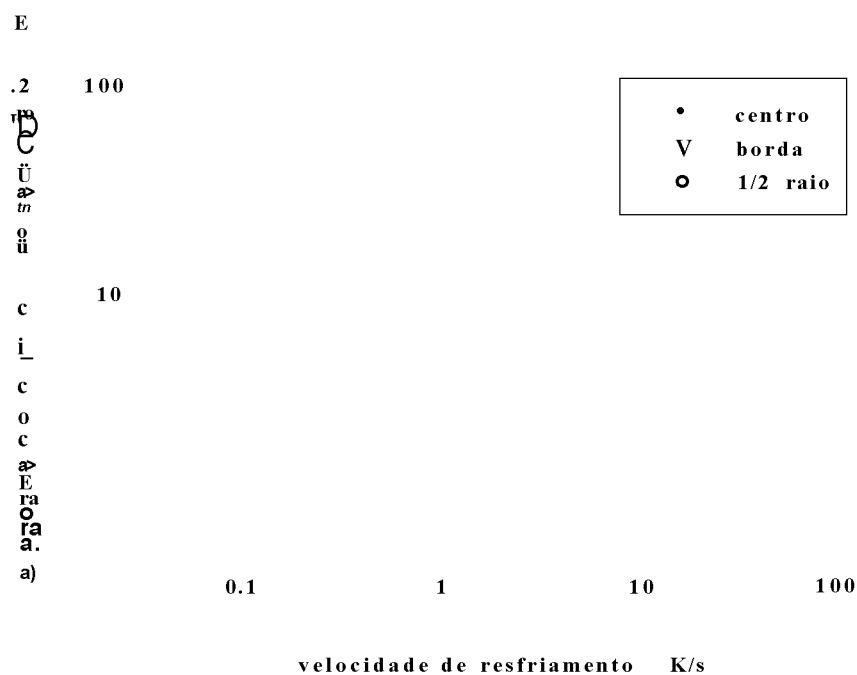


Figura 5.25

RESULTADO PARA 200 A

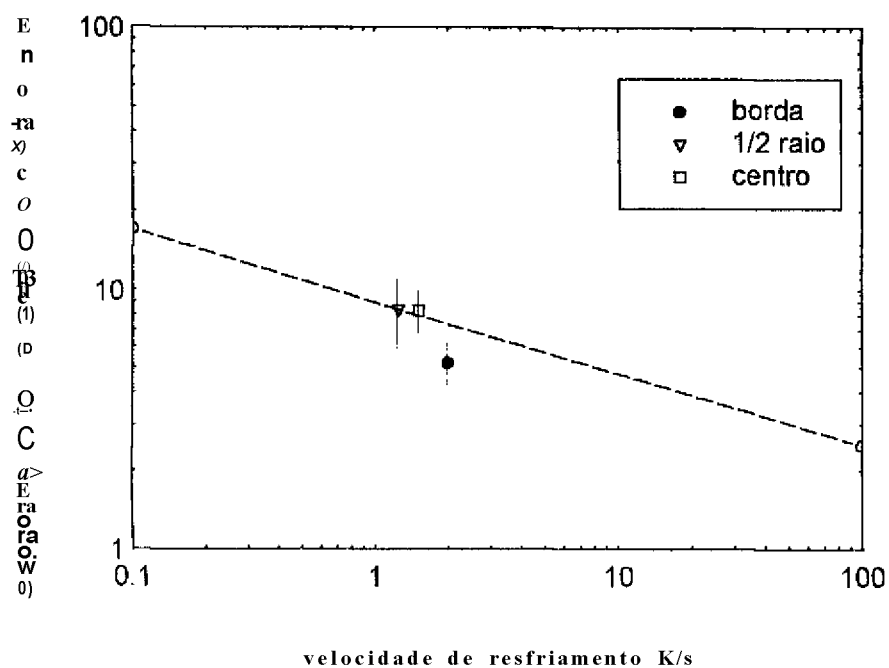


Figura 5.26

Figuras 5.25 e 5.26 . Comparação dos resultados experimentais, obtidos por simulação e microscopia ótica, com os resultados da literatura (57), da correlação entre o espaçamento dendrítico secundário e a velocidade de resfriamento, para as fusões com 400 A e 200 A, respectivamente.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As figuras 5.19 e 5.20 mostram a comparação entre os resultados experimentais e calculados das isothermas. As curvas calculadas mostradas são as que melhor se ajustaram aos resultados experimentais, dentro das condições de simulação apresentadas anteriormente. Na avaliação da influência do superaquecimento, figuras 5.17 e 5.18, observa-se que para superaquecimentos menores o valor calculado não se ajusta tão bem, tornando a poça líquida mais rasa quando se diminui o superaquecimento. A razão desta apreciação reside no fato de que um superaquecimento tão elevado, 200 °C, pode ocorrer uma perda da quantidade de Níquel presente na liga, AISI 304L. A geometria e o funcionamento do forno VAR não possibilitam a medida direta da temperatura do líquido no topo do lingote, seja por intermédio de um termo par ou com a utilização de um pirômetro ótico, devido à ação do arco elétrico.

Uma solução para esse problema é implantar termopares num lingote, previamente inserido na lingoteira, abertura do arco elétrico e continuar crescendo o lingote até que a poça líquida seja igual à de um lingote formado normalmente. As temperaturas determinadas durante a monitoração do processo alimentariam parâmetros de um sistema de simulação que geraria como resultados as temperaturas no restante do lingote (56). Esta técnica funciona de forma semelhante a uma condição de contorno "interna". Por outro lado poder-se-ia efetuar uma série de medições de temperaturas, com um pirômetro ótico no topo do lingote imediatamente após a extinção do arco elétrico. Um cuidado deveria ser tomado com o efeito de absorção da luz pela condensação de vapores no espelho do visor, assim como os próprios vapores na atmosfera do forno. Além desses procedimentos experimentais, o ajuste da simulação aos resultados experimentais poderia ser melhor, otimizando-se o modelo com a consideração dos fenômenos magneto-hidrodinâmicos, decorrentes do gradiente térmico e da passagem de corrente elétrica dentro metal líquido do lingote. Este procedimento seria análogo ao utilizado por Jardy et al. (36), quando consideram os efeitos da movimentação do líquido na condutividade térmica, ajustando assim a profundidade e formato da poça líquida

Na decorrer do trabalho de simulação, observou-se que o fluxo de calor do lingote para a água de refrigeração concentra-se principalmente em um anel próximo ao topo do lingote e pelo fundo do mesmo, como pode ser visto nas figuras 5.21 e 5.22. Observou-se também que, devido à poça líquida, já num estado quasi-estacionário, estar circunscrita por e próxima ao anel de extração de calor longe da base do lingote, este anel é o segundo parâmetro que mais influencia na distribuição de temperaturas do lingote, sendo representado pela resistência térmica nas laterais do lingote e a sua distribuição ao longo da parede lateral. Seguindo os trabalhos de Zanner (19) utilizou-se a distribuição da equação 5.63 e o valor de R_{rj} discutido anteriormente. Observou-se que, para um mesmo valor de R_o , mudando-se a sua distribuição altera-se a posição da interface sólido-líquido, figuras 5.11 a 5.14, pois no cálculo geral pode-se retirar mais calor com uma distribuição linear do que com uma distribuição como a da equação 5.64, assim a relação utilizada por Zanner gera neste caso, uma poça líquida mais rasa e com volume menor. Uma maneira para se tentar avaliar isso seria manter a relação 5.64 como distribuição porém alterar-se o superaquecimento no topo do lingote de maneira a aumentar a profundidade da poça líquida, entretanto ter-se ia de aumentar muito o valor do superaquecimento da superfície, para valores impossíveis de serem alcançados. O efeito da distribuição da resistência térmica ao longo da parede sugerido por Zanner não foi por ele justificado, embora utilizado aqui fica a ressalva que foi tomado como a única referência que tratava da retirada de calor do lingote de forma mais quantitativa.

A validação do modelo e do algoritmo de simulação para a solidificação, não seria completa se efetuada somente comparando-se a interface sólido-líquido calculada com a experimental. Esta comparação poderia indicar um bom ajuste entre os resultados porém deve-se lembrar que, como em qualquer processo de solidificação, ela é a representação de um processo dinâmico e que a dinâmica da solidificação é responsável pelas estruturas metalúrgicas microestrutural e macroestruturais do lingote. Por esse motivo, como já comentado, foi determinada a velocidade de resfriamento, a partir das hipóteses do modelo e dos resultados da simulação, e esta foi comparada aos resultados experimentais da micrografia por intermédio de dados da literatura, provenientes de resultados experimentais obtidos para aços inoxidáveis (57). Nas figuras 5.25 e 5.26 estão sobrepostos à essas curvas, os resultados obtidos para o espaçamento interdendrítico secundário medido em três regiões do lingote, borda, eixo central e região intermediária e as respectivas velocidades de resfriamento determinadas por interpolação dos valores da velocidade de resfriamento calculadas, para os melhores ajustes obtidos, para as simulações de 200 A e 400 A.

O desenvolvimento de um modelo matemático e de um código para a simulação computacional do fenômeno de formação do lingote, foi motivado principalmente pela inexistência atual de um aplicativo comercial dedicado a tal propósito. A validação destes pela comparação de seus resultados com os de outros programas é, portanto, inviável, por isso esta foi efetuada através da comparação dos resultados experimentais metalográficos com os da simulação.

O erro porcentual anotado nas medidas de espaçamento interdendrítico ficou entre 18 % e 25 % para a fusão de com corrente de 400 A e entre 18 % e 30 % para a fusão com corrente de 200 A. Supõe-se que este erro elevado seja devido ao coalescimento dos braços de dendritas, causando um aumento do espaçamento interdendrítico secundário pela fusão de alguns braços secundários e a difusão, fenômeno ativado termicamente, do soluto para os braços adjacentes (44). Entretanto, um cuidado deve ser tomado com relação ao efeito da utilização da escala logarítmica, causando a impressão de um grande espalhamento pouco acima de 10 um no eixo das ordenadas e para valores próximos e maiores que 1 °C/s, valores que concentram grande número de resultados. Em contrapartida, independente da dispersão, parece claro concluir que os valores da velocidade de resfriamento, calculados por simulação a partir do modelo e algoritmo desenvolvidos, ajustam-se bastante bem aos resultados de medidas de espaçamento interdendrítico secundário, obtidas experimentalmente, para cada caso estudado.

Com relação à previsão das microestrutura e macroestruturas de solidificação dos lingotes do protótipo VAR com a escala de operação apresentada, pode-se considerar os aplicativos desenvolvidos como bastante adequados. Eles possibilitam a determinação tanto da distribuição de temperaturas, e conseqüentemente o formato e dimensões da interface sólido-líquido, como a determinação da velocidade de resfriamento em qualquer ponto do lingote, viabilizando a pré-determinação de espaçamento interdendríticos na solidificação de ligas metálicas bem como, por exemplo, a previsão do fenômeno de precipitação em ligas assim endurecíveis, como os aços "maraging". A aplicação desses resultados para o projeto de microestrutura e macroestruturas não esgota a aplicação dos aplicativos ou da tecnologia obtida. A aplicação orientada de diferentes valores de resistência térmica, para a interface lingote-água de refrigeração, simula imediatamente diferentes espessuras de parede ou material da lingoteira, com um pouco mais de cuidado pode-se estimar a influência de diferentes tipos de fluxos hidráulicos, laminar; turbulento; com mudança de fase; e diferentes fluidos refrigerantes. Com ligeiras modificações nos códigos do programa viabiliza-se a investigação do comportamento térmico e termo-mecânico (contração térmica) tanto do lingote como da lingoteira, acoplando-se as equações adequadas ao problema.

Uma evolução maior do modelo e do algoritmo prevê a utilização da formulação implícita para a solução das equações de condução de calor, com ou sem a análise termo-mecânica apresentada acima, possibilitando assim, sob certas condições, a obtenção de resultados mais rapidamente. Espera-se efetuar um modelamento mais aprofundado do transiente inicial do processo, eliminando-se a necessidade de se iniciar a simulação a partir de um pequeno lingote como condição inicial. Para a análise do transiente final a equação constitutiva deverá ser modificada para considerar a perda de energia devida a irradiação de calor pela superfície superior da poça líquida. Finalmente o modelo deverá englobar o fluxo do fluido refrigerante e os fenômenos magnetohidrodinâmicos na poça de metal líquido e, eventualmente, a transferência de calor entre o plasma gasoso e o metal líquido no topo do lingote.

Embora não tenha sido realizada para este trabalho, a análise química dos constituintes da liga metálica, tanto do eletrodo como do lingote, pode ser de grande valia para a avaliação da influência do processo na composição do lingote, ou para estimar o superaquecimento no topo do lingote, a partir do qual ocorre a evaporação dos constituintes. A análise química de diferentes regiões indicaria a homogeneidade ou não, devido aos estados transientes inicial e final do processo. Embora não observadas inclusões nos lingotes, os resultados não podem ser conclusivos, pois o material do eletrodo apresentava grande homogeneidade, uniformidade e pureza comercial.

Os conhecimentos obtidos no desenvolvimento dos aplicativos e na análise dos resultados de simulação, para várias condições, forneceu dados para a certificação de detalhes dimensionais no projeto de uma lingoteira para o protótipo e para o novo forno VAR, o qual encontra-se em fase de desenho. Concluiu-se que o projeto do conjunto lingoteira-lingote é o primeiro item de importância fundamental, para a definição das qualidades microestrutura e macroestruturais dos lingotes obtidos, em segundo lugar vem os parâmetros: velocidade de preenchimento da lingoteira e superaquecimento do metal líquido. A lingoteira é o elo de ligação entre o lingote e a fluido refrigerante e, dependendo do material de sua construção, proverá maior ou menor retirada de calor pela lateral do lingote pois descolar-se-á, do lingote, a diferentes temperaturas. Para corroborar tal fato, foram efetuados alguns testes utilizando-se eletrodos de aço inoxidável e correntes de 400 A, com uma lingoteira fabricada em aço carbono; o maior problema observado foi uma grande dificuldade para a extração do lingote de dentro da lingoteira pois os materiais do lingote e da lingoteira têm coeficientes de dilatação muito próximos. Em contrapartida observou-se uma macroestrutura semelhante à obtida para uma fusão com corrente de 200 A com lingoteira de cobre. A dificuldade operacional para a extração do lingote inviabilizou a continuidade dos experimentos com esta lingoteira.

O superaquecimento do líquido proveniente do lingote depende essencialmente do tipo de processo. Com um maior superaquecimento, e fonte de calor do arco elétrico, tem-se o processo VAR enquanto, quando se provê um superaquecimento menor passa-se a tratar do processo VADER. Do exposto verifica-se que embora o modelo tenha sido desenvolvido especificamente para o processo VAR, esse pode ser utilizado para o estudo do processo VADER, sem maiores modificações além de um menor superaquecimento e uma distribuição de temperaturas no topo mais adequada, a se estudar.

Os resultados apresentados indicam que os objetivos propostos foram obtidos, mostrando a correlação entre as previsões teóricas obtidas por simulação numérica baseada em modelo físico matemático, e os resultados experimentais das micro estrutura e macroestruturas dos lingotes e dados obtidos na literatura correlata. Embora estes resultados estejam restritos à pequena escala do processo imposta pelo equipamento a aplicação dos resultados deste trabalho na otimização de um forno VAR/VADER de pequena escala/laboratório, assim como a adequação dos aplicativos para a aplicação a equipamentos de maior escala, para lingotes em torno de 100 kg ou para lingotes industriais. Certamente, devido aos custos envolvidos em escalas maiores, a validação dos aplicativos, sem a qual sua aplicação seria inviável e impossível, terá de ser efetuada por um processo diferente, eventualmente químico (38), ou outro método adequado ao produto em questão, como medidas de dureza em lingotes de aços "maraging", ou com a utilização de ensaios radiográficos (19).

Finalmente, como se esperava, constatou-se que tal qual qualquer outro processo tecnológico o processo VAR envolve uma quantidade muito grande de fenômenos físicos e químicos, correlacionados e que determinam a qualidade final do produto, tanto na preparação do eletrodo mas principalmente durante o processo de fusão e obtenção do lingote. Levar-se em consideração todos esses fenômenos durante a fase de projeto é altamente recomendável, porém, sem uma abordagem matemática, muito difícil ou até mesmo impossível. A aplicação das análises e códigos ao desenvolvimento e implantação do processo VADER, mostra um primeiro resultado prático da tecnologia VAR desenvolvida neste trabalho.

7 CONCLUSÕES

- O projeto e a construção de um protótipo de equipamento VAR forneceu o ponto de partida para o desenrolar de todo o trabalho, pois partindo-se de um modelo de forno muito simples, e analisando-se o comportamento do processo de formação do lingote foi possível implantar uma instrumentação mínima para o controle do funcionamento do equipamento.

- A experiência adquirida no desenvolvimento do protótipo permitiu que fossem definidas as características de um forno VAR em escala de laboratório, adequado à pesquisa sobre o processo de fusão a arco sob vácuo, dando ênfase especial ao sistema de aquisição de dados operacionais, de maneira a caracterizar o processamento, extração de calor, corrente e tensão do arco, pressão na câmara, etc.

- A utilização de análises metalográficas para a avaliação dos produtos obtidos nas fusões realizadas sistematicamente, mostrou-se satisfatória à escala do equipamento.

- Partindo-se somente de análises metalográficas para a previsão da qualidade do produto final, conclui-se que seria necessária uma grande quantidade de operações e amostras de forma a se poder interpolar valores mensuráveis da micrografia, espaçamento interdendrítico, ou avaliação da orientação do crescimento de grãos dendríticos.

- Analogamente ao item anterior, a avaliação de eventuais fusões de ligas especiais, teria seu custo elevado, além dos custos de preparo de amostras, pelo alto custo da matéria prima necessária a sua elaboração.

- Observou-se que o processo VAR tem peculiaridades que, se não impossibilitam, dificultam em muito a obtenção de dados característicos ao processo, especialmente as temperaturas do metal líquido e de suas vizinhanças, como a lingoteira,

lança e sistema de refrigeração.

- A simulação do processo em computador, apesar de suas vantagens mostrou a necessidade de cuidado na escolha dos parâmetros termofísicos a serem utilizados no programa que, idealmente, deveriam ser medidos para o material em estudo, embora aqui tenham sido utilizados valores da literatura.

- Embora utilizado um modelo relativamente simples, os resultados da simulação quando comparados aos resultados experimentais apresentam uma boa correlação.

- Além dos valores das constantes termofísicas para a solução do problema, conclui-se ser necessário o desenvolvimento de experimentos adicionais para avaliar a transmissão de calor através das superfícies de contato lingote-lingoteira, e como esta se comporta ao longo do lingote.

- A equação 5.63 não se mostrou adequada como condição de contorno, à simulação realizada neste trabalho. A utilização de uma distribuição linear para a resistência térmica neste trabalho, resultou num ajuste melhor dos resultados experimentais.

- Da comparação entre modelos matemáticos distintos, pela utilização da relação 5.63 e da distribuição linear, para a simulação de um mesmo processo, conclui-se que condições de contorno isoladas não são responsáveis pelo comportamento geral do resultado da simulação.

- O conjunto compreendido por: algoritmo, condições de contorno, fontes de calor, fenômenos físicos (difusão de calor e massa, movimentos magnetohidrodinâmicos, ação mecânica externa) pode representar um processo VAR de uma forma mais aproximada da realidade.

- Como conclusão dos dois itens anteriores, este trabalho propõe um modelo que apresenta boas correlações com os resultados experimentais, dentro das condições propostas e a despeito de sua simplicidade.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Foi observado que para lingotes com pequenos diâmetros, como os utilizados neste trabalho, a diferença de contração entre lingote e lingoteira, é relativamente pequena, mantendo-se então uma combinação de irradiação e contato como modos de transferência de calor na maior parte da superfície do lingote, ou seja o vazio, figura 2.14, neste caso é pouco pronunciado. Fica como sugestão a necessidade de se elaborar e montar alguns experimentos a partir dos quais se possa determinar os parâmetros de transferência de calor entre duas superfícies sólidas, tendo uma delas a rugosidade apresentada pelos lingotes VAR e a outra que faça o papel da parede da lingoteira, segundo diferentes condições de pressão da interface. Da mesma maneira um segundo experimento deveria ser realizado de forma a representar a interface entre metal líquido e a lingoteira, com a baixa pressão hidrostática encontrada na região próxima ao topo do lingote.

Uma segunda possibilidade para a otimização do modelo de simulação é a determinação da contração radial ao longo do lingote, integrando-se a contração de cada elemento da discretização radial em função do abaixamento da temperatura, com o crescimento do lingote e utilizando-se esse resultado para ajustar a resistência térmica entre um valor mínimo no topo do lingote, e um valor adequadamente alto que isolasse termicamente o lingote. Esse procedimento evitaria a utilização de uma função predeterminada para a distribuição da resistência térmica, por um algoritmo mais próximo ao problema real.

8.1 INSTRUMENTAÇÃO PROPOSTA PARA UM FORNO VAR

Baseando-se na experiência obtida com este trabalho, propõe-se um esquema de instrumentação para um forno VAR. Os equipamentos sugeridos foram então agrupados,

abaixo em sistemas distintos. A maioria dos equipamentos citados devem possibilitar a conexão com um computador seja para a aquisição de dados experimentais como para o controle automatizado do processo, após o desenvolvimento de um programa adequado de controle.

1. SISTEMA DE VÁCUO

BOMBEAMENTO

Bomba mecânica 30 a 60 m /h

Bomba Roots 250 m /h

MEDIÇÃO

Medidor de vácuo para a faixa entre 10 e 1000 mmHg, com sensor próprio para atmosfera corrosiva, saída digital para interfaceamento por computador.

CONTROLE

Um conjunto de válvulas para vácuo com acionamento remoto, em painel próprio ou por computador.

2. SISTEMA DE MEDIÇÃO ELÉTRICA

TENSÃO

Voltímetro digital para a faixa entre 0 e 200 Volts, com proteção contra picos de alta tensão, com interface para aquisição de dados por computador.

CORRENTE

Amperímetro digital para a faixa entre 0 e 3000 Amperes, com interface para aquisição de dados por computador.

3. SISTEMA DE CONTROLE DA REFRIGERAÇÃO

FLUXO

Manômetros e fluxômetros para fluxo d'água com interface para computador. A especificação destes deve ser feita de acordo com o desenho do equipamento e a região que se deseja avaliar.

TEMPERATURA

Termômetros digitais, ou sistema equivalente, para a avaliação em vários locais de interesse, com interface para computador.

VÁLVULAS

Válvulas para o controle do fluxo d'água de refrigeração com acionamento remoto por computador ou manual.

4. SISTEMAS DE ACIONAMENTO MECÂNICO

"Step-motor", motor de passo, com sua interface, para cada eletrodo, (um para o forno VAR e dois para o forno VADER). Com acionamento controlado por computador.

5. SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA

Fonte de corrente com acionamento remoto, via computador, das suas várias funções (escala de corrente, alteração da corrente, liga/desliga).

Sistema de abertura de arco, por interposição de alta tensão e alta frequência juntamente com a fonte de alimentação de corrente para o arco elétrico.

6. SISTEMA DE CONTROLE DO PROCESSO

Sistema de aquisição de dados multicanal para a interface entre os periféricos do forno e um computador digital (60).

Computador digital

8.2 PROPOSIÇÃO DE UM NOVO EQUIPAMENTO VAR/VADER

Além da instrumentação proposta, na seção imediatamente anterior, mostra-se aqui a proposição de uma nova geometria para um equipamento de laboratório (com possibilidade de operação em pequena escala, sempre ao redor de 2Kg de massa dos lingotes). A proposição baseia-se no fato de possibilitar a versatilidade de operação do equipamento, para a obtenção de produtos tão distintos como os apresentados na introdução e revisão bibliográfica deste trabalho, num espaço reduzido e necessitando de pouca instrumentação suplementar.

Esta instrumentação consiste de um dispositivo ótico, para o controle automático, da posição do arco elétrico em relação ao eixo central da lingoteira. Este controle é necessário pois o consumo dos eletrodos não é necessariamente igual para ambos os eletrodos (4), necessitando de um procedimento para a correção do consumo. A proposição desta nova geometria visa, também, facilitar a manutenção e limpeza das partes internas do forno. Da mesma forma, por constituir-se de partes menores, a construção ou substituição de qualquer parte do forno fica facilitada e tem seu custo diminuído.

A figura 8.1 apresenta uma vista esquemática do dispositivo VAR/VADER proposto.

O procedimento utilizado para o desenvolvimento deste projeto de fabricação resume-se nos pontos apresentados a seguir

- Dividir o projeto em grandes fases distintas, desenvolvendo cada uma delas a saber:

1. Câmaras de vácuo, superior e inferior;
2. Lingoteira e sistema de refrigeração;
3. Sistema de suportes e periféricos.

- Utilizar, tanto quanto possível, partes confiáveis do protótipo na montagem do novo equipamento, dessa forma economizando no teste de cada componente.

- Substituir paulatinamente as partes do protótipo por outras novas, mais eficientes e adequadas ao desempenho do novo forno.

- Utilizar, quando possível, a simulação computacional do processo para o dimensionamento especialmente a parte de transferência de calor no sistema de refrigeração da lingoteira.

- Testar, avaliar e comparar os resultados com os obtidos no protótipo e pela simulação computacional.

1. Entrada para eletrodo VADER.
2. Visor VADER.
3. Visor VAR.
4. Válvula de segurança.
5. Entrada para eletrodo VADER.
6. Flange para lingoteira.

Figura 8.1. Vista esquemática do novo forno V AR/V ADER.

8.3 ESPECIFICAÇÕES GERAIS PARA O FORNO VAR/VADER

Numa fase inicial desenvolveu-se, para se guiar o projeto do novo forno, uma série de especificações de geometria, materiais, requerimentos, etc. A esta fase convencionou-se chamar de "pré-projeto". Estas especificações não são definitivas e representam, de uma certa forma um resumo das necessidades observadas, durante a construção, desenvolvimento e operação do protótipo e são apresentadas na tabela 5, que segue.

Tabela 5 . Características do protótipo VAR.

Dimensões do lingote (aprox.)	40 mm x comp. 200 mm
Massa do lingote de aço (aprox.)	2 kg máx
Corrente de fusão máxima	3000 A
Dimensões (sem fonte de corrente e painel de controle)	1 x 1 x 3,5 m
Fluxo d'água de refrigeração	maior que 250 m /h
Operação sob vácuo (topo da lingoteira)	até 10 mmHg
Operação sob atmosfera de gás inerte	até 1 atm
Controle -Sistemas de segurança de operação -	manual (remoto) ou automático
Lança em cobre, refrigerada	
Fácil manutenção	
Padronização e intercambiabilidade de flanges e guarnições	
Facilidade de desmontagem e transporte	

APÉNDICE 1

A.1 FORÇAS ATUANTES NA GOTA DE METAL LÍQUIDO

Aproximando-se a gota de metal líquido por uma esfera, forma mais estável, determina-se o valor da força gravitacional agindo sobre a gota por:

$$P = mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$$

(A1.1)

A força responsável pela manutenção da gota é devida à tensão superficial. Essa força pode ser descrita pela relação:

$$S = 2\pi r \sigma$$

(A1.2)

O equilíbrio destas duas forças gera o valor do raio de uma gota que permanece em contato com o eletrodo.

$$r = \sqrt{\frac{3\sigma}{2\rho g}}$$

(A1.3)

onde: r - o raio da gota;

σ - o valor da tensão superficial;

ρ - a densidade;

g - aceleração gravitacional.

Demonstrada a existência de uma gota na extremidade do lingote, demonstram-se a existência e o valor da força magnética, devido a passagem da corrente.

Num condutor cilíndrico com raio R , pelo qual atravessa uma corrente I , determina-se a pressão que a força magnética exerce no condutor numa posição radial, r , onde $r < R$ e dada pela relação:

$$P(r) = \frac{I^2 (R^2 - r^2)}{4} \quad (A1.4)$$

Fazendo o produto dessa relação com um diferencial de área determina-se o valor da força axial numa certa posição r :

$$F(r) = P(r) ds = P(r) 2\pi r dr \quad (A1.5)$$

Integrando-se esta relação entre 0 e R :

$$F = \int_0^R P(r) 2\pi r dr = \frac{1}{2} I^2 R^2 \quad (A1.6)$$

A relação 1.6, então, dá a força total que age de forma a separar a gota líquida da extremidade do eletrodo.

APÊNDICE 2

2 SUPERRESFRIAMENTO CONSTITUCIONAL

Este apêndice apresenta apenas as linhas gerais para a determinação dos critérios de superresfriamento constitucional, uma descrição mais completa pode ser encontrada em Flemings (57). Para desenvolver quantitativamente o critério do superresfriamento constitucional é necessário determinar os fluxos de massa e calor através da interface. O gradiente de soluto no líquido na interface é:

$$\left. \frac{dC_l}{dx} \right|_{x=0} = \frac{P_v}{D_l} C_l^* (1 - k) \quad (\text{A2.1})$$

Assumindo-se equilíbrio na interface plana, a inclinação da curva de temperatura liquidus T_l versus a distância da interface, x , é relacionada à inclinação da composição do líquido C_l pela inclinação da linha liquidus, m :

$$\left. \frac{dT_l}{dx} \right|_{x=0} = m \left. \frac{dC_l}{dx} \right|_{x=0} \quad (\text{A2.2})$$

Impõe-se a ausência do superresfriamento constitucional quando o gradiente de temperatura no líquido, junto à interface, for maior ou igual a:

$$\left. \frac{dT_l}{dx} \right|_{x=0} \geq m \left. \frac{dC_l}{dx} \right|_{x=0} \quad (\text{A2.3})$$

Combinando esta relação com as equações 3.1 e 3.2, e considerando $C_s = C_s^*$, gera o critério geral para o superresfriamento constitucional:

$$\frac{G}{R} \sim \frac{m \cdot C_s^{1-k}}{kD}, \quad (A2.4)$$

Quando não há convecção, $C_s^* = C_0$, a equação 3.3 fica:

$$\frac{G}{R} \sim \frac{m \cdot C_0(1-k)}{kD}, \quad (A2.5)$$

Quando a convecção no líquido ocorre, a relação 3.5 fica:

$$\frac{G}{R} \sim \frac{m \cdot d - k}{kD_j}, \quad (A2.6)$$

APÉNDICE 3

A.3 DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA DO PROBLEMA

A.3.1 A EQUAÇÃO DE CONDUÇÃO DE CALOR

A equação de condução de calor é tomada como ponto de partida para o desenvolvimento do modelo matemático, lembrando que os fenômenos de transporte de massa não foram considerados, em virtude da simplicidade do modelo. Esta equação, já apresentada em seção anterior, é escrita na forma geral abaixo:

$$-\nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T(\vec{r}, t) + W_s(\vec{r}, t) = \rho c_p \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (5.1)$$

Considerando-se a condutividade térmica, k , constante modifica-se a equação 5.1 para:

$$-k \nabla^2 T(\vec{r}, t) + W_s(\vec{r}, t) = \rho c_p \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (5.2)$$

Escrita para um sistema referencial genérico. Escrevendo-a para um referencial em coordenadas cilíndricas, conforme considerações apresentadas para o modelo, obtém-se:

$$-k \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + W_i = \rho C_p \frac{dT}{dt} \quad (5.3)$$

Embora possa parecer um complicador, a utilização de coordenadas cilíndricas mostrar-se-á como um modo de simplificação do número de dimensões do problema. A observação da macrografia da seção transversal do lingote justifica a simetria azimutal, térmica e geométrica. A simetria azimutal garante, então, que as derivadas em θ anulem-se. Dessa forma a equação fica:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + W_i = \rho C_p \frac{dT}{dt} \quad (5.4)$$

A.3.2 A GERAÇÃO INTERNA DE CALOR

O termo $W(r,t)$, referente à geração interna de calor, é não nulo apenas na região onde o lingote está se solidificando. Este termo representa a geração de calor internamente em um elemento de volume, por unidade de volume e por unidade de tempo, e é válido na região com temperaturas que obedecem a condição abaixo:

$$T_{s,l} < T < T_{l,q} \quad (5.5)$$

Escrevendo o termo $W(r,t)$ como:

$$f_3 H(r,t) \quad (5.6)$$

a qual representa a, desejada, variação de energia por unidade de volume por unidade de tempo. Efetuando-se uma mudança de variáveis, convenientemente, obtém-se:

$$W(r,t) = p \quad (5.7)$$

Onde o termo $\frac{3H}{3T}$ pode ser obtido por métodos de análise térmica (54), para uma investigação mais exata, e este, juntamente com as características termofísicas do material, é o fator que liga o modelo à realidade. Neste trabalho, para simplificar os cálculos, é feita uma aproximação da derivada por:

$$\frac{3H}{3T} \sim \frac{AH}{AT} \quad (5.8)$$

Para a região caracterizada pela equação 5.5, sendo que os termos H e t, quando não são facilmente encontráveis, podem ser medidos sem muita dificuldade.

Substituindo a aproximação, 5.8, na equação 5.6 e depois na equação 5.4, chega-se à:

$$-k \frac{d^2 T(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT(r,t)}{dr} = \rho C_p \frac{dT(r,t)}{dt} \quad (5.9)$$

a qual, após a mudança de variáveis apresentada acima gera:

$$-k \frac{d^2 T(r,t)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT(r,t)}{dr} = \rho C_p \frac{dT(r,t)}{dt} \quad (5.10)$$

ou, com a aproximação:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(k r \frac{dT(r,t)}{dr} \right) + \rho C_p \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = 0 \quad (5.11)$$

Rearranjando-se convenientemente os termos e, chamando $\tilde{T} = T - T_p$, chega-se à equação:

$$-\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(k r \frac{d\tilde{T}}{dr} \right) + \rho C_p \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} = 0 \quad (5.12)$$

Onde o termo C_p tem o comportamento esquemático apresentado na figura 5.1, na qual se observa uma descontinuidade no intervalo de temperaturas compreendido pela zona pastosa, ou região onde ocorre uma mudança de fase. No caso de se considerar outras mudanças de fase no material, apresentar-se-iam outras descontinuidades, com maior ou menor intensidade e em outras temperaturas.

A.3.3 A MUDANÇA DO SISTEMA REFERENCIAL

A equação 5.12 foi escrita para um referencial situado no centro da base do lingote. Isto implica que o topo do lingote e a zona pastosa deslocam-se em relação a ele. Efetuando-se, então, uma mudança do sistema de coordenadas da base para o topo do lingote, num sistema de coordenadas cilíndrico, consegue-se no estado quasi-estacionário, definido anteriormente e tido como uma hipótese do problema, tornar o topo do lingote e a frente de solidificação estacionários nesse novo referencial, facilitando a sua análise dos resultados da simulação.

Seja/uma grandeza única, função da posição e do tempo, então pode ser representada por:

$$f = f(\mathbf{r}', t) = f(\mathbf{r}, t)$$

Igualdade baseada no fato de $\mathbf{1}$ e \mathbf{i}' serem dois vetores que representam um mesmo ponto no espaço, em relação a dois referenciais distintos.

Vetorialmente representa-se, para consistência do problema:

$$\mathbf{f} = \sum_i q_i \hat{\mathbf{e}}_i$$

$$\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j = \delta_{ij}$$

$$\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j = 0$$

(5.14)

Analogamente,

$$\tilde{\mathbf{r}} = \sum_i q_i \hat{\mathbf{e}}_i$$

$$\hat{\mathbf{e}}_j \cdot \hat{\mathbf{e}}_i = \delta_{ij}$$

$$\hat{\mathbf{e}}_i \cdot \hat{\mathbf{e}}_j = 0$$

(5.15)

Garantindo a independência entre as variáveis de um mesmo referencial.

A figura 5.2 apresenta um corte na seção longitudinal de um lingote VAR onde são apresentados dois sistemas referenciais bidimensionais, (z,r,t) e (z',r',t') , os quais relacionam-se por:

$$\begin{aligned} r' &= r; \\ z' &= vt - z \text{ e}; \\ t' &= t. \end{aligned} \tag{5.16}$$

Pelas relações anteriores observa-se que:

$$\begin{aligned} r' &= r'(r); \\ z' &= z'(z,t) \text{ e}; \\ f &= f(t). \end{aligned} \tag{5.17}$$

Reescrevendo a função f na forma geral:

$$\begin{aligned} f &= f(q_1, q_2, q_3, \dots, q_N) = f(r, z, t) \\ \text{e;} \\ f &= f(q_1, q_2, q_3, \dots, q_N) = f(r'(r), z'(z,t), t'(t)) \end{aligned} \tag{5.18}$$

Para a derivação desta função f , toma-se a regra da cadeia escrita na forma geral segue.

Seja:

$$f = f(g(q_1, q_2, q_3, \dots, q_N), f(q_1, q_2, q_3, \dots, q_N), \dots) \tag{5.19}$$

$$\frac{\partial f}{\partial q_i} = \frac{\partial f}{\partial g} \frac{\partial g}{\partial q_i} + \frac{\partial f}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial q_i} \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial f}{\partial q_j} = \frac{\partial f}{\partial g} \frac{\partial g}{\partial q_j} + \frac{\partial f}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial q_j} \quad (5.21)$$

A segundas derivadas geométricas ficam:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial q_i \partial q_s} = \frac{\partial^2 f}{\partial g^2} \frac{\partial g}{\partial q_i} \frac{\partial g}{\partial q_s} + \frac{\partial^2 f}{\partial g \partial h} \left(\frac{\partial g}{\partial q_i} \frac{\partial h}{\partial q_s} + \frac{\partial g}{\partial q_s} \frac{\partial h}{\partial q_i} \right) + \frac{\partial^2 f}{\partial h^2} \frac{\partial h}{\partial q_i} \frac{\partial h}{\partial q_s} \quad (5.22)$$

Utilizando-se a relação acima na função/e chamando/de T, obtém-se:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r'} \frac{\partial r'}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z'} \frac{\partial z'}{\partial r} \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z'} \frac{\partial z'}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial r'} \frac{\partial r'}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial z} \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial T}{\partial f} = \frac{\partial T}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial f} + \frac{\partial T}{\partial r''} \frac{\partial r''}{\partial f} + \frac{\partial T}{\partial z'} \frac{\partial z'}{\partial f} + \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial f} + \frac{\partial T}{\partial z'} \frac{\partial z'}{\partial f} \quad (5.25)$$

As segundas derivadas são calculadas de forma mais simples, dando:

e;

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z'} \frac{\partial z'}{\partial z}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r'} \frac{\partial r'}{\partial r}$$

(5.26)

Substituindo as derivadas escritas para o novo sistema de coordenadas e reagrupando convenientemente, obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} + p C_p V \frac{\partial T}{\partial z} (r', t') = p C_p \frac{\partial T(r', t')}{\partial t'}$$

(5.27)

Que é a equação constitutiva, escrita para o novo sistema referencial, posicionado no topo do lingote. A partir de agora, a título de simplificação, as coordenadas (r',z',t'), no novo sistema, serão escritas como (r,z,t) não devendo ser confundidas com as coordenadas no referencial situado na base do lingote. Pelo mesmo motivo, o termo T(r',t) será referenciado como T, simplificando a escrita da equação para:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} + p C_p V \frac{\partial T}{\partial z} = p C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

(5.28)

Separadas as derivadas geométricas da derivada temporal.

APÊNDICE 4

A.4 APROXIMAÇÃO DAS DERIVADAS - O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

A tentativa de se encontrar uma solução para a equação 5.28, que gera o campo de temperaturas no interior do lingote, é, por si só, um problema bastante complexo. Um método analítico seria por vezes quase impossível ou necessitaria de aproximações tais que diminuiriam em muito a precisão do resultado, embora este mesmo resultado, na forma de função, expressasse mais facilmente o comportamento do campo térmico em função de um dado parâmetro. Em contrapartida, com a utilização de um método numérico, a solução gera sempre as temperaturas nos pontos internos do lingote, ao invés de uma função que represente o comportamento da distribuição de temperaturas.

Com o desenvolvimento das ciências da computação, vários métodos para a solução de equações diferenciais foram desenvolvidos. Este trabalho não comporta um resumo destes métodos, somente será apresentado o método utilizado para a solução da equação 5.28 e determinação do campo térmico no lingote VAR, lembrando que este não esgota o assunto ou seja o método mais preciso ou rápido.

Basicamente, todos os métodos numéricos para a solução de equações diferenciais necessitam de aproximações das derivadas, por valores ou relações algébricas. A seguir são mostradas as aproximações para derivadas genéricas:

O teorema de Taylor é expresso pela seguinte série infinita:

$$f(q) = f(a) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{f^{(i)}(a)}{i!} (q - a)^i$$

(5.29)

Esta série pode ser truncada no (N+1)-ésimo elemento, gerando a série de Taylor com resto, apresentada a seguir:

$$f(q) = f(a) + f'(a)(q-a) + \frac{f''(a)}{2!}(q-a)^2 + \dots + \frac{f^{(N)}(a)}{N!}(q-a)^N + \frac{f^{(N+1)}(\xi)}{(N+1)!}(q-a)^{N+1} \quad (5.30)$$

Onde: $a < \xi < x$, ou $x < \xi < a$; f é uma função contínua no intervalo que contém a e x , e derivável até ordem $N+1$.

O último termo da igualdade é denominado resto. Uma descrição detalhada do teorema de Taylor em ambas as formas pode ser vista em Kaplan (58).

Utilizando-se o teorema de Taylor com resto para a aproximação de uma função ao redor de um dado ponto q , escreve-se exatamente:

$$f(q_{i+1}) = f(q_i + \Delta q) = f(q_i) + \Delta q f'(q_i) + \frac{\Delta q^2}{2!} f''(\xi) \quad (5.31)$$

Onde θ é um número no intervalo entre 0 e 1. Rearranjando tem-se:

$$\frac{f(q_i + \Delta q) - f(q_i)}{\Delta q} = f'(q_i) + \frac{\Delta q}{2!} f''(\xi) \quad (5.32)$$

Essa aproximação leva à chamada aproximação da primeira derivada por diferenças finitas, denominada "forward difference":

$$\hat{J}_{q=q_i} \approx \frac{f(q_i + \Delta q) - f(q_i)}{\Delta q} \quad (5.33)$$

A qual tem erro associado:

$$E = -\frac{1}{2} \Delta q^2 f''(q_i) \quad (5.34)$$

Com ordem igual à Δq , $O(\Delta q)$. De maneira análoga, porém escrevendo a expansão de Taylor para o ponto anterior:

$$f(q_{i-1}) = f(q_i - \Delta q) = f(q_i) - \Delta q f'(q_i) + \frac{1}{2} \Delta q^2 f''(q_i) - \frac{1}{6} \Delta q^3 f'''(q_i) + \dots \quad (5.35)$$

A qual, analogamente reescrita, gera a denominada "backward difference":

$$\hat{J}_{q=q_i} \approx \frac{f(q_i) - f(q_i - \Delta q)}{\Delta q} \quad (5.36)$$

Com a mesma ordem do erro associado anterior.

Utilizando a mesma forma para se representar a expansão de uma função em série de Taylor, porém escrevendo-a até a terceira ordem, obtém-se:

Para um ponto adiante

$$f(q_i + \Delta q) = f(q_i) + \Delta q \left. \frac{df}{dq} \right|_{q=q_i} + \frac{\Delta q^2}{2} \left. \frac{d^2 f}{dq^2} \right|_{q=q_i + 0.3\Delta q} + \frac{\Delta q^3}{6} \left. \frac{d^3 f}{dq^3} \right|_{q=q_i + 0.3\Delta q} \quad (5.37)$$

E para um ponto atrás

$$f(q_i - \Delta q) = f(q_i) - \Delta q \left. \frac{df}{dq} \right|_{q=q_i} + \frac{\Delta q^2}{2} \left. \frac{d^2 f}{dq^2} \right|_{q=q_i + 0.4\Delta q} - \frac{\Delta q^3}{6} \left. \frac{d^3 f}{dq^3} \right|_{q=q_i + 0.4\Delta q} \quad (5.38)$$

Onde 63 e 84 são também duas constantes com valor entre 0 e 1.

Subtraindo a equação 5.38 da equação 5.37, obtém-se:

$$f(q_i + \Delta q) - f(q_i - \Delta q) = 2\Delta q \left. \frac{df}{dq} \right|_{q=q_i} + \frac{\Delta q^3}{6} \left. \frac{d^3 f}{dq^3} \right|_{q=q_i + 0.6\Delta q} - \frac{\Delta q^3}{6} \left. \frac{d^3 f}{dq^3} \right|_{q=q_i + 0.4\Delta q} \quad (5.39)$$

que rearranjada dá:

$$\left. \frac{df}{dq} \right|_{q=q_i} = \frac{f(q_i + \Delta q) - f(q_i - \Delta q)}{2\Delta q} \quad (5.40)$$

Com erro E associado com ordem de $\Delta q^2, O(\Delta q^2)$.

Esta aproximação é denominada de "central difference". Estas três aproximações esgotam as primeiras derivadas a serem utilizadas neste trabalho.

Com um procedimento análogo ao efetuado para a obtenção da equação anterior, equação 5.40, determina-se a aproximação para a segunda derivada. Expandindo-se até os termos de quarta ordem, as séries de Taylor exatas ficam:

$$f(q_i + \Delta q) = f(q_i) + \frac{\Delta q}{1} f'(q_i) + \frac{\Delta q^2}{2} f''(q_i) + \frac{\Delta q^3}{6} f'''(q_i) + \frac{\Delta q^4}{24} f^{(4)}(q_i) + \dots$$

$$f(q_i - \Delta q) = f(q_i) - \frac{\Delta q}{1} f'(q_i) + \frac{\Delta q^2}{2} f''(q_i) - \frac{\Delta q^3}{6} f'''(q_i) + \frac{\Delta q^4}{24} f^{(4)}(q_i) - \dots$$

$$\frac{d^2 f}{dq^2} \Big|_{q=q_i} = \frac{f(q_i + \Delta q) - 2f(q_i) + f(q_i - \Delta q)}{\Delta q^2} = f''(q_i) + \frac{\Delta q^2}{12} f^{(4)}(q_i) + \dots$$

(5.41)

$$\frac{d^2 f}{dq^2} \Big|_{q=q_i} = \frac{f(q_i + \Delta q) - 2f(q_i) + f(q_i - \Delta q)}{\Delta q^2} = f''(q_i) + \frac{\Delta q^2}{12} f^{(4)}(q_i) + \dots$$

(5.42)

Somando-se e rearranjando as equações obtém-se:

$$\frac{d^2 f}{dq^2} \Big|_{q=q_i} = \frac{f(q_i + \Delta q) - 2f(q_i) + f(q_i - \Delta q)}{\Delta q^2} = f''(q_i) + \frac{\Delta q^2}{12} f^{(4)}(q_i) + \dots$$

(5.43)

então a segunda derivada pode ser aproximada por:

$$\frac{d^2 f}{dq^2} \Big|_{q=q_i} \approx \frac{f(q_i + \Delta q) - 2f(q_i) + f(q_i - \Delta q)}{\Delta q^2}$$

(5.44)

Com erro E associado com ordem Δq^2 , $O(\Delta q^2)$.

O método das diferenças finitas consiste em utilizar-se das relações apresentadas acima para a solução da equação diferencial. A substituição destas e uma manipulação conveniente leva à seguinte relação, geral:

$$F(t, f, f', \dots, q_1, q_2, q_3, \dots, q_N) = \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t} \quad (5.45)$$

Onde: $F(f, f', \dots, q_1, q_2, \dots, q, t)$ é uma função de f , suas derivadas geométricas e eventualmente das variáveis dependentes, calculadas sobre o domínio em um dado instante de tempo. Resta estabelecer em qual instante de tempo serão calculadas as derivadas geométricas. A escolha deste está ligada a vários fatores. Se o lado esquerdo da igualdade acima for calculado no instante de tempo t , o método fica conhecido como tendo abordagem explícita, podendo-se exprimir uma temperatura em função das temperaturas conhecidas do instante anterior. Por outro lado, ao se escrever as derivadas geométricas no instante de tempo $t + \Delta t$, encontram-se N equações algébricas a serem resolvidas simultaneamente, chamando-se esta de formulação implícita do método das diferenças finitas. As vantagens e desvantagens dos métodos não serão discutidas aqui, somente que por maior simplicidade a formulação explícita foi escolhida para a solução do problema.

APÊNDICE 5

```

REM PROGRAMA PARA A SIMULAÇÃO DA SOLIDIFICAÇÃO DE LINGOTES
VAR
REM
REM.....SIMILI.BAS.....
REM
REM UTILIZA:
REM   FORMULAÇÃO EXPLICITA PARA A APROXIMAÇÃO DAS
DERIVADAS,
REM   MÉTODO DA ENTALPIA PARA A GERAÇÃO DE CALOR INTERNO
REM
REM
CLS
REM DIMENSIONAMENTO DAS VARIÁVEIS DO PROGRAMA
DIM T( 12, 42)
DIM teta(12, 42)
DIM cp(12, 42)
DIM Tling(41)
DIM h(41)
DIM tlin( 12)
DIM q( 12)
DIM rt(43)
DIM Mrtfundo(11)
DIM alfa(12, 41)
DIM k( 12, 41)
DIM A(50)
PI = 3.1415926*
DENS = 7.8:REMG/cm3
INPUT cp
I=1:
CTE = 1/4.186: REM FATOR DE ESCALA DE W —> CAL/S
ts= 1438
tl = 1463
F= 1
raiol = 2: REM RAI0 DO LINGOTE EM cm
RAIOE = 1: REM RAI0 DO ELETRODO EM cm
input v
DELTAR = .2
deltaz = .3
deltat = .2
m = 10
N0= 10
nmax = 30
count = 0
TEMPOTOT =15.2: REM TEMPO TOTAL DE TRANSIENTE EM SEGUNDOS, PARA
UM DELTAZ
FORj = 1 TO 5
  Tling(j) = 50
NEXT j
FORj =6 TO 10
  Tling(j) = 40
NEXT j
FORj = 11 TO 15
  Tling(j) = 30

```

```

NEXT j
FOR j = 15 TO 30
  Tling(j) = 20
NEXT j
FOR i=0 TO 10
  Tlingi(i) = 20
NEXT i
REM CALCULO DOS PRIMEIROS PARAMETROS DERIVADOS
areal = 3.14159 * raiol^ 2
areac = 3.14159 * RAIOE^ 2
potlin = VARCO * iarco * F * CTE: REM CAL/S
VEL = iarco * VARCO * (1 - F) * CTE / ((areac * DENS * cp) + (AREA * DENS * 1)):
FORj = 0 TO 2
  FORi = 0 TO 10
    T(i,j) = 1500
    teta(i,j) = T(i,j)
  NEXT i
NEXT j
FORj = 3 TO 5
  FORi = 0 TO 10
    T(i,j)=1500
    teta(i,j) = T(i,j)
  NEXT i
NEXT j
FORj = 6 TO 8
  FOR i = 0 TO 10
    T(i,j)=1400
    teta(i,j) = T(i,j)
  NEXT i
NEXT j
FORj = 9 TO 10
  FORi = 0 TO 10
    T(i,j)=1201
    teta(i,j) = T(i,j)
  NEXT i
  PRINT TAB(0);j;
  FOR i = 0 TO 10
    PRINT USING "#####"; TAB((i + 1) * 6); T(i, j);
  NEXT i
NEXT j
CLS
PRINT "deseja impor condicoes iniciais? ";
INPUT fflag$
IF fflag$ = "s" THEN GOTO poom
  OPEN "c:\data\xtdata\tesis\ci.bas" FOR INPUT AS #1
  INPUT #1, A$
  FORj = 0 TO 30
    INPUT #1, T(i, j)
  NEXT j
  CLOSE
  FORj = 0 TO NO + nmax
    FOR i = 0 TO 10
      NEXT i
    NEXT j
poom:
CLS
j=0
FORi = 0 TO 10
  teta(i, j) = -46.5 * (i * DELTAR)^ 2 + 1663: REM 200 C

```

```

T(i,j) = teta(i,j)
PRINT i,T(i,j)
NEXT i
count = 0
oink:
FOR KKK = 0 TO 20
O = INT(TEMPOTOT / deltat)
FOR kk = 1 TO o
PRINT
GOTO yyy
PRINT "          TESTANDO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO"
PRINT
PRINT
PRINT "INSTANTE DE TEMPO =" ; count * 15.2 + kk * deltat ; "S"
PRINT "INTERAÇÃO "; kk ; " DE "; o ; " INTERAÇÕES"
PRINT "NUMERÓ DE CAMADAS ADICIONADAS = "; KKK
PRINT "TEMPO TOTAL DE TRANSIENTE =" ; (nmax - NO) * 15.2
yyy:
FORj = 0 TO (NO + KKK + 1)
FORi = 0 TO 10
aaa = .16 + 2.6 * 2 * 3.14 * i * DELTAR * DELTAR * deltax
k(i,j) = .038
REM alfa(i,j) = 1.42E-09 * t(i,j)^2 + .0000165 * t(i,j) + .0335
alfa(i,j) = .04
IF T(i,j) > ts THEN
IF T(i,j) < tl THEN cp(i,j) = aaa
END IF
IFT(i,j) > tl THEN
REM neste IF a cte. mult, refere-se ao bias do li'quido
REM k(i,j) = 2 * (.12 + .0002 * (t(i,j) - 273))
k(i,j) = 1 * .038
REM alfa(i,j) = 2 * (.03386 + .0000171 * (t(i,j) - 273))
alfa(i,j) = 1 * .04
END IF
NEXT i
NEXTj
l = 0
FORj = 1 TO (NO + KKK - 1)
A3 = T(0,j)
B3 = 2 * (T(1,j) - T(0,j)) / (DELTAR^2)
C3 = (T(0,j + 1) - 2 * T(0,j) + T(0,j - 1)) / (deltax^2)
D3 = v * (T(0,j + 1) - T(0,j - 1)) / deltax
teta(i,j) = A3 + alfa(i,j) * deltat * (B3 + C3 + D3)
NEXTj
FORJ = 1 TO (NO + KKK - 1)
FOR i = 1 TO 9
A4 = T(i,j)
B4 = (T(i + 1,j) - 2 * T(i,j) + T(i - 1,j)) / (DELTAR^2)
C4 = (T(i + 1,j) - T(i - 1,j)) / (2 * i * DELTAR^2)
D4 = (T(i,j + 1) - 2 * T(i,j) + T(i,j - 1)) / (deltax^2)
E4 = v * (T(i,j + 1) - T(i,j - 1)) / 2 * deltax
teta(i,j) = A4 + alfa(i,j) * deltat * (B4 + C4 + D4 + E4)
NEXT i
NEXTj
i = 10
FORj = 1 TO (NO + KKK + 1)
rt(j) = 30
r0 = rt(j)
IF T(i,j) < 1438 THEN

```

```

    rt(j) = 30 * (1438 - 1100)/(T(i,j)- 1100)
  END IF
  IF T(i,j) < 1100 THEN
    rt(j) = 150000
  END IF
NEXT j
i = 10
  FOR j = 1 TO N0 + KKK - 1
    T(i + 1, j) = 2 * DELTAR * (Tling(j) - T(10, j)) / (k(i, j) * 2 * PI * raiol * rt(j) *
deltaz) + T(9, j)
    al = (T(11, j) - 2 * T(10, j) + T(9, j)) / DELTAR ^ 2
    bl = (Tling(j) - T(10, j)) / (k(i, j) * 2 * PI * raiol ^ 2 * rt(j) * deltaz)
    cl = (T(10, j + 1) - 2 * T(10, j) + T(10, j - 1)) / deltaz ^ 2
    dl = v * (T(10, j + 1) - T(10, j - 1)) / 2 * deltaz
    e1 = T(10, j)
    teta(10, j) = deltat * alfa(i, j) * (al + bl + cl + dl) + e1
  NEXT j
  hi = .386
  h2 = .021: REM valor médio
  k = .956
  espessura = 1
  PI = 3.141592
  j = N0 + KKK
  i = 0
  A(0) = PI * (DELTAR / 2) ^ 2
  rres1 = 1 / (A(i) * h1)
  rres2 = 1 / (A(i) * h2)
  rres3 = espessura / (k * A(i))
  rtfundo(i) = rres1 + rres2 + rres3
  FOR i = 1 TO 9
    A(i) = PI * ((i * DELTAR + DELTAR / 2) ^ 2 - (i * DELTAR - DELTAR / 2) ^ 2)
    rres1 = 1 / (A(i) * h1)
    rres2 = 1 / (A(i) * h2)
    rres3 = espessura / (k * A(i))
    rtfundo(i) = rres1 + rres2 + rres3
  NEXT i
  FOR i = 1 TO 9
    a2 = (T(i + 1, j) - 2 * T(i, j) + T(i - 1, j)) / DELTAR ^ 2
    b2 = (T(i + 1, j) - T(i - 1, j)) / (2 * i * DELTAR ^ 2)
    T(i, j + 1) = (2 * deltaz * (Tling(i) - T(i, j)) / (k(i, j) * A(i) * rtfundo(i))) + T(i, j - 1)
    c2 = (T(i, j + 1) - 2 * T(i, j) + T(i, j - 1)) / DELTAR ^ 2
    d2 = v * (Tling(i) - T(i, j)) / (k(i, j) * A(i) * rtfundo(i))
    e2 = T(i, j)
    teta(i, j) = deltat * alfa(i, j) * (a2 + b2 + c2 + d2) + e2
  NEXT i
  i = 10
  j = NO + KKK
  A(i) = PI * (raiol ^ 2 - (raiol - DELTAR / 2) ^ 2)
  rres1 = 1 / (A(i) * hi)
  rres2 = 1 / (A(i) * h2)
  rres3 = espessura / (k * A(i))
  rres3 = espessura / (k * A(i))
  rtfundo(i) = rres1 + rres2 + rres3
  T(i + 1, j) = 2 * DELTAR * (Tlingfj) - T(10, j)) / (k(i, j) * A(i) * rt(j)) + T(9, j)
  al = (T(11, j) - 2 * T(10, j) + T(9, j)) / DELTAR ^ 2
  bl = (Tlingfj - T(10, j)) / (k(10, j) * A(i) * raiol * rt(j))
  T(i, j + 1) = (2 * deltaz * (Tlingfj - T(i, j)) / (k(i, j) * A(i) * rtfundo(i))) + T(i, j - 1)
  c2 = (T(i, j + 1) - 2 * T(i, j) + T(i, j - 1)) / deltaz ^ 2
  d2 = v * (Tlingfj - T(i, j)) / (k(i, j) * A(i) * rtfundo(i) * deltaz)

```

```

    e2 = T(i,j)
    i = 0
    j = NO + KKK
    A(i) = PI * ((DELTAR / 2) ^ 2)
    rres1 = 1 / (A(i) * h1)
    rres2 = 1 / (A(i) * h2)
    rres3 = espessura / (k * A(i))
    rtfundo(i) = rres1 + rres2 + rres3
    b8 = 2 * (T(i + 1, j) - T(i, j)) / DELTAR ^ 2
    T(i, j + 1) = (2 * deltaz * (Tlingi(i) - T(i, j)) / (k(i, j) * A(i) * rtfundo(i))) + T(i, j - 1)
    c8 = (T(i, j + 1) - 2 * T(i, j) + T(i, j - 1)) / deltaz ^ 2
    d8 = v * (Tlingi(i) - T(i, j)) / (k(i, j) * A(i) * rtfundo(i))
    e8 = T(i, j)
    teta(i, j) = deltat * alfa(i, j) * (b8 + c8 + d8) + e8
uuu:
FOR j = 0 TO 40
  FOR i = 0 TO 10
    T(i, j) = teta(i, j)
  NEXT i
NEXT j
CLS
FOR j = 0 TO 18
  PRINT TAB(0); j;
  FOR i = 0 TO 10
    PRINT USING "#####"; TAB((i + 1) * 6); teta(i, j);
  NEXT i
  REM PRINT USING "###"; TAB((i + 1) * 6); rt(j)
NEXT j
iii:
PRINT TAB(0); "->"; TAB(kk + 3); "x"; TAB(INT(7.6 / deltat) + 4); "<- "
PRINT kk; " de "; INT(7.6 / deltat);
PRINT TAB(40); "adicionadas "; KKK; " camadas"
NEXT kk:
u:
A
IF KKK = 20 GOTO macintosh:
REM adiciona-se aqui nova camada com temperatura superaquecida
FOR j = (nmax - 1) TO 0 STEP -1
  FOR i = 0 TO 10
    T(i, j + 1) = T(i, j)
  NEXT i
NEXT j
j = 0
FOR i = 0 TO 10
  REM teta(i, j) = -12.5 * (i * DELTAR) ^ 2 + 1513 :rem 50 C
  REM teta(i, j) = -21.5 * (i * DELTAR) ^ 2 + 1563: REM 100 C
  teta(i, j) = -46.5 * (i * DELTAR) ^ 2 + 1663: REM 200 C
  T(i, j) = teta(i, j)
  PRINT i, T(i, j)
NEXT i
uu:
CLS
PRINT
FOR j = 0 TO nmax - NO
  PRINT TAB(0); j;
  FOR i = 0 TO 10
    PRINT USING "#####"; TAB((i + 1) * 6); T(i, j);
  NEXT i
  PRINT USING "###"; TAB((i + 1) * 6); rt(j)

```

```

NEXTj
REM STOP
macintosh:
NEXT KKK
urgh:
OPEN "c:\#061o.bas" FOR OUTPUT AS #2
LPRINT #2, "molde isolado t<1200; 400/30; 240s; .2s;"
  FORj = 0 TO nmax
    FOR i = 0 TO 10
      PRINT #2, teta(i,j)
    NEXT i
  NEXTj
CLOSE
pimba:
STOP
LPRINT "          PROGRAMA CONTCAST"
LPRINT "R0="; r0
LPRINT "h2= "; h2;" valor mínimo"
LPRINT "temperatura de descolamento= 1415 Celsius"
LPRINT "resistência térmica em 1/T"
LPRINT "corrente/tensão ,-> 200/30"
LPRINT "superaquecimento máximo 50 C"
LPRINT "Kliq = ksol; alfaliq = alfasol"
LPRINT "7.6 segundos por camada --> vel=0.02cm/s"
LPRINT "adicionadas 20 camadas a partir de Cl imposta de 10 camadas "
LPRINT "comprimento inicial=30 mm; comprimento final 90 mm"
LPRINT "resultado arquivado em c:\data\xtdata\tesis\#031o.bas"
LPRINT
FORj=0 TO 30
LPRINT TAB(0);j;
  FORi = 0 TO 10
    LPRINT USING "#####"; TAB((i + 1) * 6); T(i, j);
  NEXT i
  LPRINT USING "###"; TAB((i + 1) * 6); rtij)
NEXTj
FORj = 1 TO 3
  SOUND 440, 1
  SOUND 0, 3
  SOUND 440, 7
  SOUND 0, 3
NEXTj
STOP
END

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. QUARREL, A.G. Refino cora eletrodo consumível. Anais do **XXIII CONGRESSO ANUAL DA ABM**, MG, Julho de 1968 p. 327.
2. YU, K.O.; Mc MULLEN, J.F.; ADASCZICK, C.B.; MAURER, G.E. VADER and VAR Ingot Structures. **Journal of Materials**, Feb. 1989.
3. ISORE, A.J.; IVO, P.S. Produção de aços especiais e superligas através de refino por ESR e VAR, revista **Níquel**, Junho, 1990.
4. ESTADOS UNIDOS US PATENT 4.261.412 **Fine Grain Casting Method**. Ferhun H. Soykan; John S. Huntington - Apr.14,1981.
5. DEMBOWSKY, V. **Plasma Metallurgy - The Principles**. Elsevier Science Publishing Company, Inc. New York, 1985.
6. 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, p. 530.
7. HAM, J.L.; SIBLEY, C.B. Arc Melting of Reactive Metals. **Journal of Metals**, July 1957, p. 976.
8. MILLER, G.J. **Zirconium - IN Metallurgy of the rarer metals** . London Scientific Publications, 1957, London, p.91.
9. GREENFIELD, P. **Zirconium in Nuclear Technology** **IN M&B Monograph ME/12** Mills & Boon Limited. London 1972.
10. SIMS, C.T.; HAGEL, W.C. **The Superalloys** . Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, New York (1972).

Wiley & Sons, New York (1972).

11. **PAPIER, J. Aços e Ligas para a indústria Naval e Nuclear.** Seminário proferido no dia 7 de Agosto de 1992, **COPESPI, SP.**
12. **ASM Source Book on stainless steels.** American Society for Metals, **USA,** 1976.
13. **AN ABLE, W.E.** Purification of Vanadium by Vacuum Melting. **J. Vac. Sci. Technol.,** vol7, no. 6, P 574 (1976).
14. **AMMON, R.L.; BUCKMAN Jr., R.W.** Vacuum Arc Melting of Tungsten-Hafniun-Carbon Alloy. **J. Vac. Sci. Technol.,** voll 1, no. 1., Jan/Feb 1974, P. 385.
15. **STOOP, B.T.J.; LUYENDUK, T.; den OUDEN, G.** Structure and properties of GTA welds in aluminium alloys. **Welding and metal fabrication,** October 1989.
16. **SZEKELY, J.** Mathematical models in new models development **JOM** - February 1990, p.16.
17. **MEHRABIAN R.; WADLEY, H.N.G.** Needs for control in Advanced Processing of Materials. **Journal of Metals,** February 1985, p.51.
18. **ZANNER, F.J.** Metal transfer during vacuum consumable arc remelting. **Metallurgical Transactions B,** vol 10B, June 1979, p. 133-142.
19. **BERTRAN, LA.; ZANNER, F.J.** **Interaction Between Computacional modelling and experiments for vacuum consumable arc melting** SANDIA NATIONAL LABS. SAND 80-1177C (1980).
20. **JOHNSON, E.V.** **Vacuum arc melting.** In: **ACADEMY OF THE USSR.** The uses of vacuum in metallurgy //London, Edinburgh, 1964.
21. **JARDY, A; FALK, L.; ABLITZER, D.** The overall energy ballance of Vacuum Arc Remelting. **Mémoires et études scientifiques revue de métallurgie,** December 1991.
22. **DI STASI, L.** **Fornos elétricos.** São Paulo, Hemus, 1981.
23. **MUMMAU, G.R.; AUFDERHAAR, W.B.** Importance of arc gap control in vacuum consumable arc remelting of superalloys **J. Vac. Sci. Technol.** vol9 no.6 Nov-Dec. 1972 p!315.

24. LEYT, A. Los procesos de fusion a arco de metales. Buenos Aires, Comission Nacional de Energia Atómica, 1970.
25. ARMED SERVICES TECHNICAL INFORMATION AGENCY. **General recomendations on design features for Ti and Zr production-melting furnaces.** Columbus, Oh., Defense Metals Information Center, 1961. (AD-260099).
26. QUITES, A.M.; DUTRA, J.C. Tecnologia da soldagem a arco voltaico. EDEME, Florianópolis, 1979.
27. BRANDI, S.D.; TANIGUCHI, C. Transferência metálica na soldagem com eletrodo revestido. Soldagem & Materiais, 2(2), Abr/Jun 1990.
28. CAMPOS FILHO, M.P.; DAVIES, G.J. Solidificação e fundição de metais e ligas, Editora da Universidade de São Paulo, 1978.
29. ASHBY, M.F. Physical modelling of materials problems, Materials Science and technology Feb. 1992 vol 8 p. 102.
30. ROSENOW, W.N.; CHOI, H.Y. Heat, Mass and Momentum Transfer. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1961.
32. ROSENTHAL, D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. Welding Research Supplement, may 1941.
33. SZEKELY, THEMELIS. Rate phenomena in Process metallurgy. Wiley Interscience, Division of Joh Wiley Sons Inc. 1971.
34. EISEN, W.B. e CANPAGNA, A. Computer Simulation of Consumable Melted Slabs. Met. Trans, vol.1 April 1970, p.849.
36. JARDY, A.; ABLITZER, D. Modelization des effets hydrodynamiques du brassage eletromagnetique dans le procédé de refusion à l'arc sous vide. Mémoires et études scientifiques revue de métallurgie, janvier 1991.
37. JARDY, A.; ABLITZER, D. Comportement des puits liquides des lingots VAR (Vacuum Arc Remelting). Mémoires et études scientifiques revue de métallurgie, juillet-aout 1990.

38. RIBEIRO, W.J.; SESHADRI, V. Modelo matemático de lingotamento contínuo de tarugos de aço. **46º Congresso Anual da ABM**. São Paulo, 1991.
39. ABOU-ARAB, T.W.; AL-NIMR, M.A. A study of a multidimensional transient heat conduction problem with a moving heat source part 1: analytical solution. **Materials at High Temperatures**, vol 9 no. 1 1991.
40. ABOU-ARAB, T.W.; AL-NIMR, M.A. A study of a multidimensional transient heat conduction problem with a moving heat source part 2: numerical and experimental. **Materials at High Temperatures**, vol 9 no. 1 1991.
41. GOMES DOS SANTOS, R. Comunicação pessoal, 1993.
42. CHALMERS, B. **Principles of Solidification**. Robert E. Krieger Publishing Company. Huntinton, New York, 1964.
43. RALLS, K.M.; COURTNEY, T.H.; WULFF, J. **Introduction to materials science and engineering**, John Willey and Sons New York 1976
44. FLEMINGS, M.C. **Solidification, The Principles**. McGraw-Hill Inc. 1974.
45. PERRIN, B; TABELLING, P. Les dendrites, **La Recherche** 232, mai 1991 vol 22
46. KURS, W.; FISHER, D.J. **Fundamentals of solidification**, Trans Tech Publications, 1984, Switzerland.
47. MUCSI, C.S.; ANDRADE, A.H.P. Prograssos na utilização de técnicas computacionais para a otimização do equipamento VAR/VADER e para a análise do processo de lingotamento, simulação e análise metalúrgica. **48º Congresso Internacional de Tecnologia e Metalurgia, ABM**, São Paulo, Julho 1994.
48. MUCSI, C.S.; JÚLIO JR., O.; NEVES, M.D.M.; PAES DE ANDRADE, A.H. Projeto de um forno VAR nacional. **CEBRAVIC**, S. José dos Campos, Julho de 1989.
49. MUCSI, C.S.; JÚLIO JR., O.; NEVES, M.D.M.; PAES DE ANDRADE. **Relatório de visita ao IPD-CTA**. IPEN - Depto. de Metalurgia, Agosto 1988.
50. PAES DE ANDRADE, A.H.; MUCSI, C.S.; NEVES, M.D.M.; PADIAL, A.F. Estrutura metalúrgica de lingotes produzidos em orno VAR de laboratório. **IX CBECIMAT**, Águas de São Pedro, SP, Dez 1990.

51. PAES DE ANDRADE, A.H.; MUCSI, C.S. Estudo comparativo da morfologia micro e macroestrutural de lingotes produzidos no processo VAR com previsões obtidas em simulação por computador. **46º Congresso Anual da ABM** Belo Horizonte (MG) Agosto, 1992.
52. JACKMAN, L.A.; MAURER, G.E.; WIDGE, S. New knowledge about white spots in superalloys **Advanced Materials and Process** May 1993 p. 18.
53. PINTO, L. C. M. **Quantikov**-programa para análise de imagens em desenvolvimento como parte de tese de doutoramento CDTN-CNEN/MG, 1996.
54. A GUIDE TO THE SOLIDIFICATION OF STEELS. **Jernkontoret**, Stockohlm, 1977.
55. CARNAHAN, B.; LUTHER, H.A.; WILKES, J. **Applied numerical methods**. John Wiley and sons, 1969.
56. FERRAZ BASTOS, J.L. **Extensiom de la, méthode nodale à la modélisation des transferts couplés conduction/convection dans un canal: application à la thermique du bâtiment et aux cartes électroniques**. Suíça : 1984. Tese (doutoramento) - LENSMA.
57. GERMAN, R.M. **Powder metallurgy of superalloys**. G.H. Gessinger Buttleworks - 1989.
58. KAPLAN, W. **Advanced calculus**. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Massachussets (1957).
59. NACEY, T.J. Forth generation inverters add artificial intelligence to the control of GMA welding. **Welding Journal**, January 1993, p. 31-34.
60. Voltage and Current On Screen. **Supplement to Electronics and Wireless World**. April 1991 p. 304.
61. TOULLOKIAN, Y.S.; POWELL, R.W.; HO, C.Y.; NICOLAU, M.C. **Thermophysical properties of matter**, vols 4, 10 e 12. IFI/PLENUM New York

62. STUART KARON. Easy Plot for Windows, version 2.22-8. Spiril Software & MIT. 1989-1993.

m

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

*Cidadã Universitária • "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
Travessa R n° 400 - Caixa Postal 11049 - Pinheiros
Telefone (PABX) 816-9000 • End. Telegráfico I PE NUCLEAR
Telex (11) 83592 - IPEN - BR Fax: (011) 212-3848
SÃO PAULO • Brasi*