



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PROPOSIÇÃO DE UM PROCESSO ALTERNATIVO À FUSÃO  
VIA FORNO VAR PARA A CONSOLIDAÇÃO DE CAVACOS  
PRENSADOS DE ZIRCALOY E ESTUDO DO SISTEMA  
DINÂMICO DO ARCO ELÉTRICO**

**CRISTIANO STEFANO MUCSI**

Tese apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Doutor em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Materiais.

Orientador:  
Dr. Jesualdo Luiz Rossi

**São Paulo  
2005**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**PROPOSIÇÃO DE UM PROCESSO ALTERNATIVO À FUSÃO VIA FORNO  
VAR PARA A CONSOLIDAÇÃO DE CAVACOS PENSADOS DE ZIRCALOY  
E ESTUDO DO SISTEMA DINÂMICO DO ARCO ELÉTRICO**

**Cristiano Stefano Mucsi**



**Tese apresentada como parte dos  
requisitos para a obtenção do  
Grau de Doutor em Ciências na  
Área de Tecnologia Nuclear –  
Materials**

**Orientador: Dr. Jesualdo Luiz Rossi**

**SÃO PAULO  
2005**

*"Trabalho bem feito é sinal de: Amor, Compreensão e Dedicção"*

*Dr. Romano.*

**A TODOS AQUELES QUE REPRESENTAM O MUNDO EM SUAS MENTES E  
UTILIZAM-SE DA INTELIGÊNCIA PARA MELHORÁ-LO.**

## AGRADECIMENTOS

Ao PhD. Jesualdo Luis Rossi, além de grande orientador, um amigo dedicado e compreensivo.

Ao PhD. Rubens Nunes de Faria, pela amizade e pelas sugestões práticas e certeiras.

Ao MSc. Eguiberto Galego, pelas inestimáveis e proveitosas discussões técnicas sobre eletrônica e computação.

Aos amigos da "Metalurgia", atual CCTM-IPEN, Instituição que me recebeu e permitiu que me desenvolvesse desde os tempos da graduação e que ofereceu as condições para a realização deste trabalho.

À minha esposa, Vera Alice, pela paciência e apoio necessários para acompanhar a jornada que aqui se apresenta.

Aos meus pais, pela introdução que nos deram no mundo do conhecimento, por sua dedicação para nossa educação e pelo fantástico exemplo de vida.

Ao amigo e companheiro Sérgio Eduardo, pela sua compreensão nos momentos de dificuldade e pelo seu exemplo de dedicação e alegria contagiantes.

Ao grande amigo Dr. Romano, pela amizade, dedicação e amparo.

Ao Hospital Espírita Fabiano de Cristo, onde pude refinar o conceito de trabalho.

Ao Prof. Doutor Ângelo Fernando Padilha, por permitir minha iniciação no mundo da pesquisa.

Ao Maestro Walter Lourenção, meu primeiro verdadeiro contato com um profissional da cultura, que nos mostrou a importância da filosofia na construção da humanidade.

Ao Prof. Dr. Henrique S. Del Nero, Médico, Filósofo e Pesquisador, pela introdução ao desafio de compreender a mente humana, essa máquina fantástica, fonte de toda a cultura da humanidade.

As Indústrias Nucleares do Brasil, INB, pela cessão dos cavacos de Zircaloy utilizados nos experimentos ao longo deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia Química de Lorena, FAENQUIL, em nome do Professor Doutor Hugo R. S. Sandin, por ter-nos facultado o acesso aos seus laboratórios, para a elaboração dos eletrodos de cavacos prensados, sem os quais este trabalho não chegaria a bom termo.

Bem, este trabalho é um sistema muito complexo e, portanto, torna-se impossível listar todos os amigos, pesquisadores e instituições que, de uma forma ou de outra colaboraram na sua elaboração. A todos, meus sinceros agradecimentos. Tenham a certeza de meu sincero reconhecimento.

**PROPOSIÇÃO DE UM PROCESSO ALTERNATIVO À FUSÃO VIA FORNO  
VAR PARA A CONSOLIDAÇÃO DE CAVACOS PRENSADOS DE ZIRCALOY  
E ESTUDO DO SISTEMA DINÂMICO DO ARCO ELÉTRICO**

**Cristiano Stefano Mucsi**

**RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo investigar um novo processo como uma alternativa à fusão por arco elétrico sob vácuo, *vacuum arc remelting*, na consolidação de cavacos de usinagem da família de ligas Zircaloy. É proposto um procedimento para a reciclagem de sucatas primárias de Zircaloy através de um forno VAR modificado. Os estudos desenvolvidos visam viabilizar o teste e a otimização de novos dispositivos de baixo custo de instalação. Estes dispositivos foram acoplados a um protótipo VAR existente, para a determinação de condições ideais de operação, avaliação do problema de aquisição de dados e dos estudos do sistema dinâmico do arco elétrico, para a implementação do controle automatizado do protótipo VAR modificado. Foi desenvolvido um dispositivo denominado de funil-lingoteira o qual, acoplado a um protótipo de forno VAR, possibilitou a obtenção de lingotes a partir de eletrodos de cavacos prensados, indicando a viabilidade da criação de um novo processo para a fusão de cavacos Zircaloy. A diferença de potencial do arco elétrico durante as operações de fusão foram registradas digitalmente permitindo a avaliação da dinâmica do arco elétrico através dos invariantes topológicos do sistema: Dimensão de correlação e maior expoente de Liapunov.

**PROPOSITION OF A MODIFICATION TO THE VAR PROCESS AND ITS  
APPLICATION IN THE CONSOLIDATION OF PRESSED ZIRCALOY CHIPS  
AND THE EVALUATION OF THE DYNAMICAL SYSTEM OF THE ELECTRIC  
ARC**

**Cristiano Stefano Mucsi**

**ABSTRACT**

The objective of this work is the investigation of a new process as an alternative to the Vacuum Arc Remelting technology in the consolidation of Zircaloy chips. A procedure is proposed for the recycling of primary Zircaloy scraps by means of a modified VAR furnace. The performed studies were made in order to optimise the low cost new devices added to existing VAR furnace prototype, find ideal operational conditions, evaluate data acquisition system and the electric arc dynamical system in order to make viable the automated control of the modified VAR prototype. A funnel-crucible special device was developed and installed in a VAR prototype furnace allowing ingots to be obtained from pressed chips. This indicated the viability of creation of a new process for the consolidation of Zircaloy chips. The voltage of the electric arc during the melting runs was digitally recorded allowing the evaluation of the electric arc dynamics by using the topological invariant of the system: correlation dimension and the higher Liapunov exponent.

## SUMÁRIO

<b>EPIGRAFE</b>	I
<b>DEDICATÓRIA</b>	II
<b>AGRADECIMENTOS</b>	III
<b>RESUMO</b>	IV
<b>ABSTRACT</b>	V
<b>SUMÁRIO</b>	VI
<b>1 OBJETIVO</b>	<b>1</b>
<b>2 CONTEXTO</b>	<b>2</b>
<b>3 TEORIA E REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>4</b>
3.1 HISTÓRICOS	4
3.1.1 HISTÓRICO E APLICAÇÕES DO ZIRCÔNIO E DO ZIRCALOY	4
3.1.2 HISTÓRICO DOS FORNOS A ARCO ELÉTRICO	6
3.2 VISCOSIDADE DO ZIRCALOY	8
3.3 O ARCO ELÉTRICO	9
3.4 CONTROLE DO ARCO ELÉTRICO	11
3.5 OS PROCESSOS INDUSTRIAIS DE FUSÃO A ARCO ELÉTRICO	13
3.5.1 O PROCESSO VAR	13
3.5.1.1 VÁCUO NOS FORNOS VAR	17
3.5.1.2 CARACTERÍSTICAS DOS FORNOS VAR	18
3.5.2 O PROCESSO VADER	19
3.6 TRANSFERÊNCIA METÁLICA ELETRODO-LINGOTE NUM FORNO VAR	20
3.7 O REFINO FÍSICO-QUÍMICO	22
3.8 APLICAÇÃO DO PROCESSO A VÁRIOS MATERIAIS	22
3.9 A QUALIDADE FINAL DO PRODUTO OBTIDO	24

3.10	A FORMAÇÃO DO LINGOTE- ASPECTOS METALÚRGICOS	25
3.11	RISCOS OPERACIONAIS DO PROCESSO VAR	28
3.12	INTRODUÇÃO QUALITATIVA AOS SISTEMAS COMPLEXOS	30
3.12.1	BREVE INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS NÃO-LINEARES CAÓTICOS	34
3.12.2	RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO DE ESTADOS	39
3.13	DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL E DO EXPOENTE DE LIAPUNOV	43
3.14	MODELOS MATEMÁTICOS PARA ARCOS ELÉTRICOS	48
3.15	GOTEJAMENTO DE LÍQUIDOS	63
3.16	MODELOS PARA RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO DE ESTADOS	66
3.17	RECICLAGEM	67
4	<b>EXPERIMENTAL</b>	69
4.1	O PROTÓTIPO VAR-IPEN	69
4.2	DISPOSITIVO FUNIL-LINGOTEIRA	71
4.3	ELETRODOS	72
4.4	AS FUSÕES	74
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	75
4.6	ESCOLHAS DE REGIÕES SIGNIFICATIVAS DOS SINAIS PARA ANÁLISE	78
4.7	ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS ADQUIRIDOS	79
4.8	METALOGRAFIA	82
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	82
5.1	DISPOSITIVO FUNIL-LINGOTEIRA ACOPLADO AO FORNO VAR	83
5.2	AS FUSÕES E OS LINGOTES OBTIDOS	85
5.3	ANÁLISES QUÍMICAS	95
5.4	METALOGRAFIA	97
5.5	QUALIFICAÇÃO DA DINÂMICA DO ARCO ELÉTRICO	101

5.5.1	DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL	114
5.5.2	RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO DE ESTADOS E O MAIOR EXPOENTE DE LIAPUNOV	115
6	CONCLUSÕES	119
7	TRABALHOS FUTUROS	121
8	APÊNDICE	122
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

## 1 OBJETIVO

Apresentar o desenvolvimento de um novo processo de fusão a arco sob vácuo, por intermédio da instalação de um dispositivo original denominado de funil-lingoteira num protótipo de forno VAR convencional, com aplicação imediata na consolidação de cavacos prensados de Zircaloy.

Implementar um novo processo que, quando comparado ao processo VAR, caracterize-se pelo:

- Aumento do rendimento energético do processo;
- Diminuição dos seus riscos operacionais inerentes;
- Modificação da macroestrutura de solidificação do lingotamento e;
- Baixo custo de implementação das alterações em fornos VAR convencionais.

Analisar a dinâmica dos sinais elétricos característicos do arco elétrico, durante a fusão de eletrodos de aço AISI 304 e de cavacos de Zircaloy, através da determinação do expoente de Liapunov; e da dimensão topológica do atrator no espaço de estados reconstruído.

## 2 CONTEXTO

As usinas nucleares Angra I e II utilizam reatores do tipo PWR (*pressurized water reactor*), cujo combustível é produzido no Brasil pela INB, Indústrias Nucleares do Brasil instalada na cidade de Resende - RJ. Basicamente o combustível é constituído de pastilhas cerâmicas cilíndricas de  $UO_2$  enriquecido, apropriadamente encapsuladas por tubos redondos selados, e estes são adequadamente distribuídos em uma grade espaçadora. A escolha da família de ligas Zircaloy foi feita pela sua baixa seção de choque para nêutrons térmicos, suas elevadas resistências mecânica e à corrosão, na temperatura de operação do reator. A composição das ligas da família Zircaloy é apresentada na tabela 2.1.

Tabela 2.1. Composição química das ligas Zircaloy-2 e Zircaloy-4 (% massa) <sup>[1]</sup>.

Elemento	Zr	Sn	Fe	Cr	Ni	O	Hf
Zircaloy-2	balanço	1,2-1,7	0,07-0,20	0,05-0,15	0,03-0,08	0,12 típico	< 1000 ppm
Zircaloy-4	balanço	1,2-1,7	0,18-0,24	0,07-0,13	-	0,12 típico	< 1000 ppm

- Não contém.

Durante o processo de fabricação dos elementos combustíveis quantidades importantes de cavacos de Zircaloy são produzidas, principalmente na usinagem por torneamento. No início da produção industrial, os cavacos de zircônio eram queimados, ASTM <sup>[1]</sup>, sendo que esse procedimento não é mais aceitável dentro das políticas ambiental e econômica universais, motivando o desenvolvimento de processos de reciclagem das sucatas primárias e secundárias. No caso brasileiro, o Zircaloy é importado tornando o aproveitamento de cavacos um fator a ser considerado na diminuição dos custos de desenvolvimento e produção de partes para os elementos combustíveis.

Em meados da década de 1990 desenvolveu-se no IPEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, um projeto de construção de um protótipo de forno VAR (*vacuum arc remelting*). Este protótipo viabilizou as facilidades para os estudos dos fenômenos envolvidos na fusão e na solidificação para pequenas quantidades de material de eletrodo, MUCSI <sup>[2]</sup>, notadamente o aço AISI 304. Um modelo matemático para a simulação computacional da distribuição de

temperaturas no lingote, do gradiente térmico e da velocidade de resfriamento foi desenvolvido e os resultados das simulações foram satisfatoriamente comparados com as evidências experimentais, micro e macrográficas.

Foram projetados conjuntos de experimentos, visando encontrar uma solução para o aproveitamento dos cavacos de Zircaloy e a viabilização da automação do processo. A fusão de ligas com alta temperatura de fusão, baseadas em materiais reativos demanda cuidados de processamento. Um dos processos que mais se adequou à produção em massa foi o processo VAR, devido à proteção promovida pela atmosfera e pela alta densidade de energia concentrada no arco elétrico. Este processo vem sendo utilizado e desenvolvido pelas indústrias nuclear e aeroespacial desde a década de 1950. No processo VAR, como no lingotamento contínuo, o metal fundido deposita-se sobre a poça de metal líquido em solidificação. A ação do arco elétrico sobre a poça líquida, aliada à intensa extração de calor da lingoteira, cria um elevado gradiente térmico. Esse gradiente térmico aliado à velocidade de deslocamento da interface sólido-líquido desfavorece a precipitação, associada ao lingotamento convencional e causa uma grande anisotropia nas propriedades mecânicas do lingote.

Observa-se que as indústrias metalúrgicas dos países desenvolvidos vêm buscando efetuar a automação do processo VAR para garantir maior homogeneidade na qualidade final do produto obtido e, também, para diminuir cada vez mais os riscos, para os operadores das plantas, inerentes ao próprio processo.

## 3 TEORIA E REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 HISTÓRICOS

#### 3.1.1 HISTÓRICO E APLICAÇÕES DO ZIRCÔNIO E DO ZIRCALOY

O zircônio encontra-se amplamente espalhado pela crosta terrestre, na forma de compostos químicos muito variados. Pode-se citar sua aparição como lendárias gemas preciosas das histórias de Israel e Grécia antigas. O Hyacinto e o jargão eram terras muito conhecidas na idade Média. No século XVIII, zircônias sem cor eram tidas como diamantes com baixa qualidade, conhecidas como "Diamantes de Matara". Romé de l'Isle provou ser uma espécie mineral distinta, posteriormente denominada de *zircon*, por Werner, do árabe: *zerk* ou; do persa: *zargun*. BLUMENTHAL <sup>[3]</sup>.

A primeira referência ao zircônio foi feita por Klaproth, em 1789, quando analisava uma pedra preciosa, *jargon*, e encontrou um óxido desconhecido ao qual, mais tarde deu o nome de *Zirkonerde*. A descoberta de Klaproth foi confirmada por vários outros pesquisadores e, em 1797 Vauquelin denominou o óxido de zircônia, detalhando sua preparação, assim como algumas propriedades de alguns de seus compostos. Em 1824 Berzelius conseguiu isolar o metal na forma impura, mas somente em 1925 van Arkel e de Boer desenvolveram uma técnica para a produção do metal dúctil.

O desenvolvimento da produção de zircônio dúctil deve-se principalmente a Kroll, pesquisador do U.S. Bureau of Mines - Albany Oregon, quem desenvolveu uma técnica para produção em escala comercial do metal. O processo Kroll realiza a redução do tetracloreto de zircônio através do magnésio, formando uma esponja do metal.

As propriedades físicas, químicas e nucleares do zircônio são únicas, possibilitando seu uso em vários setores tecnológicos. Podem-se citar vários ramos de aplicação, principalmente as indústrias nucleares e as indústrias químicas, MILLER <sup>[4]</sup>.

A aplicação de maior interesse para este trabalho reside na área nuclear. O zircônio é encontrado com relativa abundância na natureza e suas ligas possuem adequadas propriedades mecânicas, resistência à corrosão, resistência à fluência, dentre outras, para que sua utilização na construção dos componentes do reator tenha um custo aceitável. Sua propriedade mais importante é a baixa seção de choque para absorção de nêutrons térmicos gerados na reação de fissão, no interior do combustível nuclear, característica que favorece o rendimento da reação de fusão. Devido à resistência das ligas de zircônio ao ataque corrosivo da água quente e do vapor, elas são utilizadas com as seguintes finalidades: revestimento do combustível; como material estrutural para suportar o núcleo do reator e prevenir a distorção do elemento combustível, COSTA <sup>[5]</sup>.

O zircônio não ligado tem resistências à oxidação e à corrosão sob alta temperatura de água e vapor inconsistentes. Esta característica anormal é atribuída à presença de pequenas quantidades de impurezas como o nitrogênio e o carbono. A utilização do estanho como elemento de liga ajuda o zircônio a se comportar mais previsivelmente em água quente e em vapor sob alta temperatura, aumentando também a sua resistência mecânica, como a rigidez e a resistência à fluência.

O estanho é o elemento de liga mais importante do zircônio <sup>[6]</sup>. O Zircaloy é, na verdade, um grupo de ligas com alto teor de zircônio, característica que o elege como material adequado à utilização em componentes de construção do reator nuclear tipo PWR. O Zircaloy-1 consiste de uma liga com 2,5% em massa de estanho mais o zircônio em balaço e foi inicialmente recomendado para os reatores nucleares do submarino nuclear *USS Nautilus*. Para aproveitar o excelente desempenho do Zircaloy-1, novos elementos de liga tiveram de ser adicionados, para compensar o aumento da velocidade de corrosão dessa liga, gerando os Zircaloy-2 e Zircaloy-4. O Zircaloy-2 consiste de uma liga com a seguinte composição porcentual em massa, apresentada na tabela 2.1. O Zircaloy-4 tem composição ligeiramente diferente, Tabela 2.1, porém sem a presença do níquel.

As propriedades de resistência à corrosão do Zircaloy-4 podem ser

melhoradas com pequenas adições de níquel, resultando num Zircaloy-4 dopado com níquel, com resistência à corrosão nodular melhorada, sem alterar a sensibilidade à absorção do hidrogênio e sem sacrificar a resistência à corrosão uniforme. A adição voluntária do níquel não caracteriza o Zircaloy-4 dopado como um Zircaloy-2 <sup>[7,8]</sup>.

### 3.1.2 HISTÓRICO E APLICAÇÕES DOS FORNOS A ARCO ELÉTRICO

A história dos processos de fusão por arco elétrico é encontrada num texto de Noesen <sup>[9]</sup>, que será apresentada a seguir. A história da fusão de metais por arco elétrico inicia-se pouco depois da descoberta do arco elétrico por Sir Humphrey Davy (circa 1810), utilizando a corrente gerada por uma grande pilha de Volta, na figura 3.1 pode-se observar o dispositivo de Davy. Em 1839 o médico Robert Hare fundiu platina e utilizou o arco elétrico, numa câmara fechada, para a realização de várias reações químicas, produzindo carbeto de cálcio, fósforo, grafite e cálcio. Em 1878, após a invenção do dínamo, Von Walter Siemens iniciou experimentos para a fusão exclusiva de metais, trabalho que resultou nos atuais fornos, a arco elétrico, convencionais para a fusão de grandes quantidades de aço. O forno de Siemens utilizava-se de eletrodos de carbono e cadinhos cerâmicos.



Figura 3.1. Reprodução, da impressão original, do dispositivo de Sir Humphrey Davy para a obtenção do primeiro arco elétrico artificial <sup>[10]</sup>.

Há contradições sobre a invenção do forno a arco elétrico, atribuindo a Paul-Louis-Toussaint Heroult, a sua invenção para a manufatura de aços <sup>[11]</sup>. Inegavelmente Heroult foi o grande desenvolvedor da tecnologia para a obtenção do alumínio metálico, com a utilização do arco elétrico.

Em 1903 Werner Von Bolton desenvolveu o trabalho original de Hare e

construiu o predecessor dos fornos a arco elétrico sob vácuo. As três características originais do forno de Werner Von Bolton que lhe permitiram fundir metais reativos e refratários são as mesmas utilizadas nos modernos fornos a arco elétrico sob vácuo. Eles tomam o arco elétrico como uma fonte de alta temperatura, resfriamento por água das superfícies em contato com as altas temperaturas, e um encapsulamento que permite a operação sob vácuo ou sob atmosfera controlada.

Analogamente ao equipamento de Von Bolton, nos equipamentos modernos o metal que primeiro entra em contato com a lingoteira solidifica-se instantaneamente, formando uma casca que funciona como um recipiente do mesmo metal que se funde posteriormente. Uma vez que se atinja um estado estacionário adequado para a transferência de calor, o metal fundido não mais interage com partes do forno construídas com outros materiais. Von Bolton não utilizou eletrodos de carbono, mas sim do próprio metal a ser fundido, após a solidificação, esse recipiente que inicialmente se forma passa a fazer parte do lingote final. O. A. Simpson melhorou o forno de Von Bolton e produziu aproximadamente uma tonelada de tântalo, a qual foi utilizada na confecção de instrumentos dentais cirúrgicos e filamentos de lâmpadas. O trabalho original de Von Bolton continuou a ser utilizado, dessa vez por Weiss e Stilmelmayr, os quais fundiram tungstênio em atmosferas de hidrogênio, amônia, nitrogênio e vácuo.

Em 1935, R. K. Hopkins atingiu pela primeira vez escala industrial num forno a arco elétrico com eletrodo consumível, utilizando proteção por escória, no lugar de atmosfera controlada. Este processo ficou conhecido como "processo Hopkins". Pouco depois, em 1939, Wilhem J. Kroll reportou uma técnica para produzir lingotes de titânio. O mesmo Kroll dá nome ao processo físico-químico para obtenção das esponjas de titânio e zircônio, que são largamente utilizadas nas indústrias aeroespacial e nuclear.

Num trabalho publicado em 1946, Parke e Ham, foram os primeiros a utilizar alto vácuo, menos de 0,1 mmHg, para a fusão de grandes quantidades de molibdênio. A necessidade por metais mais puros cresceu na década de 1950,

assim como a disponibilização de equipamentos de alto vácuo, possibilitando que Noesen e Hughes obtivessem tungstênio com menos de 1 ppm de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, sendo que o carbono não pode ser detectado na época, pois o limite de detecção era de  $10 \pm 10$  ppm. Foi também durante a década de 1950 que ocorreu aumento do interesse pela purificação e pelo controle da estrutura de aços ligas. Em 1960, setenta e cinco milhões de toneladas de aços especiais e superligas já eram produzidas anualmente. A dimensão dos lingotes chegou a sessenta polegadas e a sua massa às quarenta toneladas.

### 3.2 A VISCOSIDADE DO ZIRCALOY

A viscosidade de metais e ligas metálicas líquidas tem importância fundamental nos processos metalúrgicos. Nesse sentido KIM *et al.* <sup>[12]</sup> apresentam um sumário da teoria fenomenológica acerca da viscosidade de metais e ligas metálicas líquidas. Partindo da velocidade dos fônons e do caminho livre médio das partículas, derivam as relações para a viscosidade. Ao final apresentam os resultados comparando os valores calculados aos valores experimentais, observando uma boa correlação entre os valores.

O valor para a viscosidade do zircônio foi recomendado pelo *International Nuclear Safety Center* do *U.S. Department of Energy* <sup>[13]</sup>. Na temperatura de fusão esse valor é de  $8 \pm 2$  mPa s. O autor afirma que para ligas metálicas com pequena quantidade de impurezas, como a família Zircaloy, a viscosidade da liga pode ser considerada igual à do elemento principal puro, KIM *et al.* <sup>[12]</sup>. A grande incerteza da medida é devida às diferentes condições experimentais para a obtenção das medidas. Entretanto concluem que o valor de 15 mPa s é recomendado para a viscosidade do Zircaloy no início da fusão do metal, sujeito a uma condição oxidante e; para o Zircaloy ou zircônio fundido, sob uma atmosfera inerte ou redutora o valor de 8 mPa s é sugerido.

### 3.3 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 do campo elétrico. As regiões relativamente livres do campo onde as cargas positivas e negativas estão quase em equilíbrio dá-se o nome de plasma, DEMBOWSKI <sup>[14]</sup>. As regiões adjacentes com grande concentração de cargas denominam-se bainhas. O estado estacionário de equilíbrio implica num movimento orientado de partículas, motivado neste caso, pela aceleração das partículas carregadas num campo elétrico. Sobre estas circunstâncias todas as partículas compartilham da mesma temperatura termodinâmica.

A distribuição de corrente ao longo do eletrodo, arco e lingote não é nem uniforme nem constante, fato este que embora não seja discutido aqui é assunto de pesquisas, ZANNER <sup>[15]</sup>. A distribuição de corrente no sistema de estudo é de importância fundamental, pois caracteriza a forma, a taxa de transferência de 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:

$$P = V * I \qquad \text{Eq. 3.1}$$

A partição da potência do arco elétrico que é dissipada entre anodo e catodo difere de um metal para outro. Ela depende pela proporção da corrente que é termoionicamente emitida e do fluxo de ions positivos. Essa proporção governa a taxa de fusão do eletrodo para uma dada corrente de operação do forno a arco elétrico. Entretanto esse é um caso ideal, pois há perdas de potência por irradiação.

Pode-se considerar, como ponto de partida, que potência consumida para

o aquecimento e fusão do eletrodo situa-se em torno da metade da potência total do arco elétrico. BERTRAN e ZANNER<sup>[15, 16]</sup>, em dois artigos dedicados à modelagem e simulação computacional da solidificação em fornos VAR de ligas de urânio-nióbio, investigaram a distribuição de potência entre eletrodo e lingoteira, assunto este que será retomado mais adiante.

A descrição de um equipamento dedicado ao estudo dos fenômenos envolvidos no processo VAR é encontrada num breve capítulo elaborado por JOHNSON<sup>[17]</sup>. 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. 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 destes 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, o autor 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.

Investigações sobre o balanço térmico nos processos de fusão de eletrodos consumíveis foram efetuadas. Em trabalho dedicado ao desenvolvimento de modelos para a simulação da solidificação em fornos VAR e *electro slag remelting*, ESR, por JARDY *et al.*<sup>[18]</sup>, na qual propõem um conjunto de fontes e sumidouros de calor dentro de um processo VAR. Na figura 3.2 é apresentada 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.

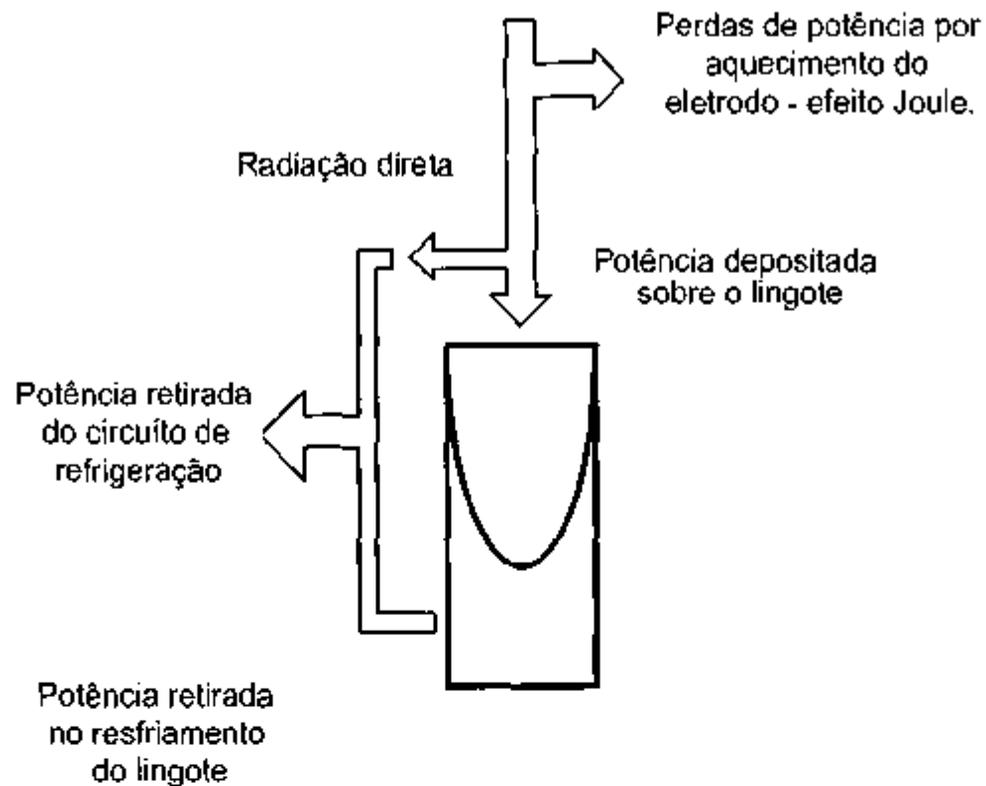


Figura 3.2 – Representação do balanço térmico de uma fusão em forno VAR.

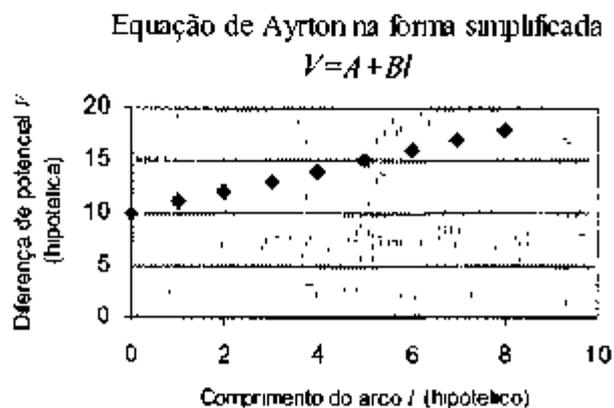
### 3.4 CONTROLE DO ARCO ELÉTRICO

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 linear aproximada entre a distância eletrodo-lingote e a diferença de potencial elétrico total entre estes pontos. Essa relação linear, equação 3.2, é uma forma incompleta da equação de Ayrton <sup>[19]</sup>, para uma dada corrente elétrica do arco, representada graficamente na figura 3.3, é uma boa referência para a operação manual do processo.

$$V(t) = V_0 + At \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde  $l$  é o comprimento do arco,  $A$  é uma constante que depende o arranjo experimental na região compreendida entre a extremidade do eletrodo e o topo do lingote.

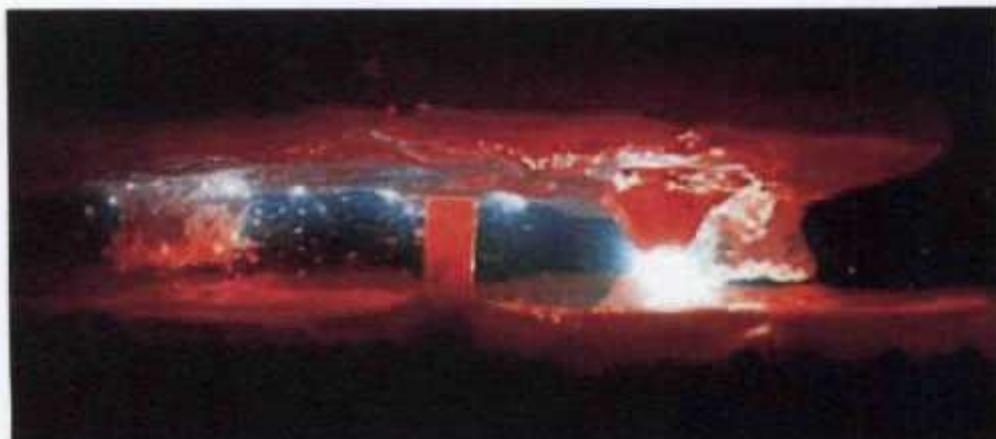
Considerando-se a existência de fenômenos de transferência, consumo de eletrodo e flutuações na superfície de metal líquido, é evidente a impossibilidade de que a distância entre eletrodo e lingote seja mantida constante, embora todas as outras variáveis o sejam, em média, mostra-se esquematicamente na figura 3.4 esta situação, de forma a ilustrar a afirmação. Esta impossibilidade da constância da distância entre eletrodo e topo do lingote é devida a 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 3.3 – Relação entre diferença de potencial e comprimento do arco elétrico, obtida a partir da equação de Ayrton.*

Com exceção 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 micro-segregações em aços.



*Figura 3.4 – Aspecto da variação do comprimento do arco elétrico durante a fusão, devida à transferência metálica do eletrodo para o lingote.*

NACEY <sup>[20]</sup>, 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 *spattering*, espirramento, quando da transferência metálica, e o aumento da velocidade de fusão. Isto é conseguido com o controle, inteligente, da corrente elétrica, não mais a mantendo 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 desprendimento dessas partículas solidificadas, gerar uma fonte de nucleação homogênea.

### **3.5 OS PROCESSOS INDUSTRIAIS DE FUSÃO A ARCO ELÉTRICO COM ELETRODO CONSUMÍVEL**

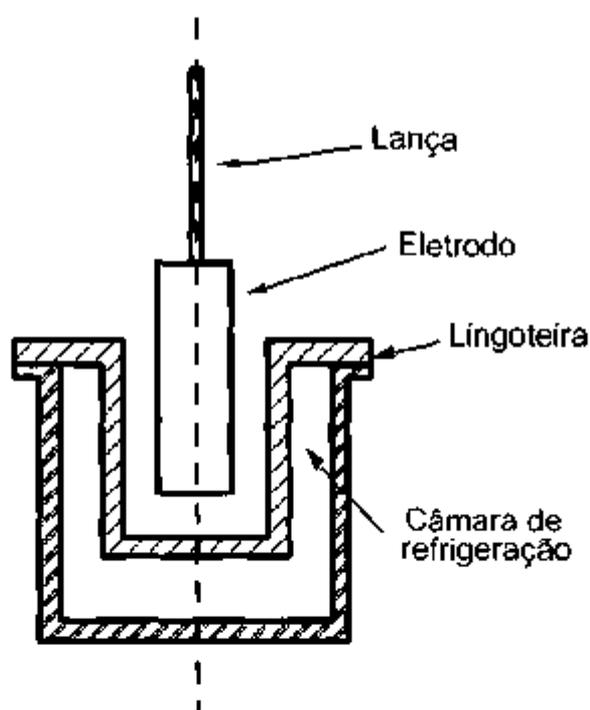
#### **3.5.1 O PROCESSO VAR**

Apresenta-se na figura 3.5 o desenho esquemático de um forno VAR. Pode-se observar, nesta figura, a simetria radial e a disposição vertical do equipamento.

Na etapa inicial do processo, um arco elétrico é estabelecido entre a extremidade inferior do eletrodo e o fundo da lingoteira iniciando, então, a fusão do eletrodo devido à alta concentração de energia contida num pequeno volume. A ignição do arco elétrico ocorre por duas técnicas principais: utilização de cavacos finos do mesmo metal que se deseja fundir, a qual ao aquecer-se, pela passagem de corrente, explode e os vapores propiciam a passagem de corrente inicial para o estabelecimento do arco elétrico e; por intermédio de um centelhador de alta tensão que cria um arco elétrico de baixa corrente entre os eletrodos do forno. 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 metal fundido deposita-se sobre o solidificado anteriormente.

Devido à diferença entre os diâmetros do eletrodo e da lingoteira, o eletrodo precisa ser abaixado continuamente, para que seja introduzido na lingoteira de forma a compensar seu consumo, e manter a distância adequada entre o a extremidade inferior do eletrodo e à superfície superior da poça líquida.

A rápida solidificação do metal que entra em contato com a parede da lingoteira forma um *skull*, casca ou crosta sólida, que protege o metal líquido não permitindo a reação entre eles e a conseqüente contaminação do lingote.



*Figura 3.5 - Desenho esquemático de um forno VAR, sem o detalhe da câmara de vácuo.*

Existe um risco operacional intrínseco ao funcionamento típico de um forno VAR. Este risco 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 pode causar sua perfuração, devido ao superaquecimento causado pela concentração do arco elétrico numa área muito pequena. O deslocamento do arco elétrico pode ocorrer devido a vários fatores: ao fluxo de gases super aquecidos que sobem pelo espaço entre eletrodo e lingoteira; pela concentração do campo elétrico nos salpicos de metal líquido que se solidificam nas paredes internas da lingoteira (efeito das pontas); pela descentralização do eletrodo e; pelo ajuste incorreto da distância entre eletrodo e lingoteira. A perfuração da lingoteira permite a entrada da água refrigerante, que se encontra numa pressão muito mais alta que aquela existente no interior do forno, extinguindo o arco elétrico. Imediatamente, o contato da água com o metal ainda líquido e com o sólido à alta temperatura causa a evaporação rápida da água dentro do forno e o conseqüente aumento da pressão interna. Este evento é agravado no caso da fusão de metais reativos, como o titânio e o zircônio, pois devido à reação entre a água e o metal líquido, ocorre a dissociação das moléculas de água em  $H_2$  e  $O_2$ , em relações

estequiométricas. Esta mistura, confinada num volume caracterizado por alta pressão e temperatura internas agrava as conseqüências da perfuração da lingoteira pelo arco elétrico. Em fornos industriais, o aumento violento de pressão pode ser catastrófico, resultando na explosão e conseqüente comprometimento das regiões adjacentes a este. Embora a água seja utilizada comumente como líquido refrigerante, realizaram-se algumas tentativas com sódio líquido, o qual oferece uma maior capacidade de extração de calor que a água. No caso da perfuração da lingoteira a oxidação do metal é evitada, diminuindo os riscos de acidentes, como será visto mais adiante.

Classicamente, o controle operacional de um equipamento do tipo VAR pode ser feito manual ou automaticamente, entretanto sempre se faz necessário um parâmetro de processo que deve ser tomado como base para o controle. O parâmetro de processo que se mostra mais interessante na fusão a arco elétrico é a tensão entre os eletrodos, que é governada pela equação de Ayrton, na forma completa, DI STASI <sup>[9]</sup>, escrita na forma total, equação 3.3:

$$v_a = V(t) = A + Bl + \frac{C + Dl}{i_a} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde:

A, B, C e D são constantes características do processo e;

l é o comprimento do arco elétrico.

..i<sub>a</sub> é a corrente de operação.

Pode-se utilizar a equação de Ayrton numa forma mais simples e linear, desprezando-se o terceiro termo do lado direito da igualdade, como visto abaixo:

$$V(t) = V_0 + Al \quad \text{Eq. 3.2}$$

Tal equação pode ser utilizada como ponto de partida para um controlador linear automático assim como é utilizada para indicar o comportamento do arco elétrico no controle manual do processo. Deve-se levar em conta que esta

equação considera os valores médios da tensão e do comprimento do arco, assim como do parâmetro  $b$ , pois todos variam rápida e instantaneamente durante o processo. Conceitualmente, estas variações se devem ao movimento, translações, do arco sobre a poça líquida e às variações das condições de contorno: atmosfera, fluxos gasosos, transferência de metal do eletrodo para a poça líquida, e forças eletromagnéticas.

### 3.5.1.1 VÁCUO NOS FORNOS VAR

O sistema de vácuo em fornos VAR é característico. No lugar de se buscar atingir altos valores absolutos para o vácuo na câmara do forno, o processo necessita de uma alta velocidade de bombeamento. É sabido que a velocidade de bombeamento é dada pela relação:

$$Q = C \cdot \Delta P \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde  $Q$  é o fluxo de gases bombeados;

$C$ , é a condutância do sistema, a qual depende da geometria, caminho livre médio, etc. e;

$\Delta P$ , é a diferença de pressões. No caso do forno VAR, a diferença entre a pressão na região do arco elétrico e a entrada da bomba, onde se localiza o sistema de medição.

Uma avaliação simples da velocidade de bombeamento mostra que, num sistema VAR, a condutância do espaço anelar entre eletrodo e lingoteira tem importância fundamental na manutenção de baixas pressões na região do arco elétrico e; impõe a necessidade de sistemas de bombeamento com alto desempenho. Os sistemas de bombeamento em fornos VAR consistem de uma bomba rotativa de vácuo, tipo Roots associada a uma bomba de vácuo mecânica convencional, de paletas.

### 3.5.1.2 CARACTERÍSTICAS DOS FORNOS VAR

As características operacionais dos fornos VAR garantem qualidades impares aos seus produtos finais. Porém essas qualidades só podem ser atingidas se a preparação do material para a fusão for adequadamente realizada. Esta preparação consiste na confecção de eletrodos longos, retilíneos e homogêneos em sua composição e, principalmente, o diâmetro menor que o diâmetro da lingoteira. Para lingotes de 10cm até a escala industrial até eletrodos utiliza-se uma relação igual a 0,75 entre o diâmetro do eletrodo e o diâmetro da lingoteira, essa preocupação deve-se ao risco da abertura de arcos laterais e, também, à necessidade de extração de impurezas voláteis provenientes do arco elétrico, pelo sistema de bombeamento. Para equipamentos de laboratório, entretanto, uma distância mínima entre eletrodo e lingoteira deve ser mantida, sendo esse valor em torno de 1cm a 1,5cm, diminuindo a possibilidade de arcos elétricos laterais. A homogeneidade da composição do eletrodo é necessária, pois como comentado anteriormente, o processo de formação do lingote ocorre continuamente, dessa forma variações da composição ao longo do eletrodo afetam a homogeneidade do lingote. Esta característica dos equipamentos é muito importante na elaboração de ligas, mas nem tanto nas fusões com vistas à extração de impurezas do material do eletrodo.

O processo tem em seu nome o termo *remelting*, refusão. Deve-se isto ao fato do eletrodo ter sido produzido num lingotamento anterior, no mesmo forno, quando vários lingotes são unidos axialmente, para serem fundidos no forno VAR, formando um lingote com maior diâmetro. Algumas vezes esse termo pode ser substituído por *refining*, refino, pois a alta velocidade de bombeamento propicia a extração de impurezas voláteis em baixa pressão de operação dos equipamentos.

As fusões sucessivas aumentam a homogeneidade do produto, porém no caso de materiais reativos como o titânio e o zircônio devem ser realizados a vácuo com alta velocidade de bombeamento, com muito cuidado para evitar a contaminação do lingote. Em contrapartida deve-se manter uma pressão tal que mantenha a estabilidade do arco elétrico. No caso da elaboração de ligas, as pressões no interior do forno devem ser tais que evitem a evaporação dos

componentes com maior pressão de vapor.

Resumidamente, o processo VAR apresenta as seguintes características:

1. Intenso gradiente térmico devido ao arco elétrico, gerando produtos com morfologia de solidificação tipicamente anisotrópica.
2. Controle dificultado pela impossibilidade de visualização do arco elétrico.
3. Intensas variações da diferença de potencial entre eletrodo e lingoteira.
4. Risco da ocorrência de salpicos metálicos e conseqüente formação de heterogeneidades nos lingotes.
5. Risco de acidentes catastróficos, causados pela perfuração da lingoteira, devido ao comportamento do arco elétrico.
6. Eletrodo com dimensões da seção transversal menores que as da lingoteira.

### 3.5.2 O PROCESSO VADER

A fim de contornar o problema de segurança operacional do forno VAR e de possibilitar a obtenção de estruturas de solidificação mais isotrópicas foi desenvolvido o forno VADER (*vacuum arc double electrode remelting*). Nesse tipo de forno a arco a lingoteira assemelha-se ao VAR, entretanto são utilizados dois eletrodos horizontalmente opostos, e o arco elétrico estabelecido entre ambos fica posicionado sobre a entrada da lingoteira. O metal fundido cai para dentro da lingoteira, porém não transita mais dentro do arco elétrico nem a poça de metal líquido fica sendo continuamente aquecida pelo arco elétrico, PATENTE AMERICANA <sup>[21]</sup>.

O processo VADER apresenta algumas peculiaridades que o diferenciam do processo VAR. No processo VADER, o arco elétrico é estabelecido entre as extremidades de dois eletrodos opostos axialmente. O metal fundido pelo calor gerado pelo arco elétrico cai pela ação da gravidade, com um pequeno superaquecimento e deposita-se numa lingoteira disposta logo abaixo da região que contém o arco elétrico. No intervalo de tempo entre o início e o fim da queda núcleos sólidos se formam. Estes núcleos darão início à solidificação, permitindo a obtenção de grãos finos e sem orientação preferencial, PATENTE AMERICANA

[21]. O processo VADER é um outro 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, MITCHELL [22].

### 3.6 TRANSFERÊNCIA METÁLICA ELETRODO-LINGOTE NUM FORNO VAR

O metal líquido, proveniente do eletrodo, separa-se do mesmo, caindo logo após atingir um superaquecimento, que varia entre 80 °C e 280 °C, BERTRAN *et al.* [16]. 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 3.4. 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).

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 *et al.* [23] 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.

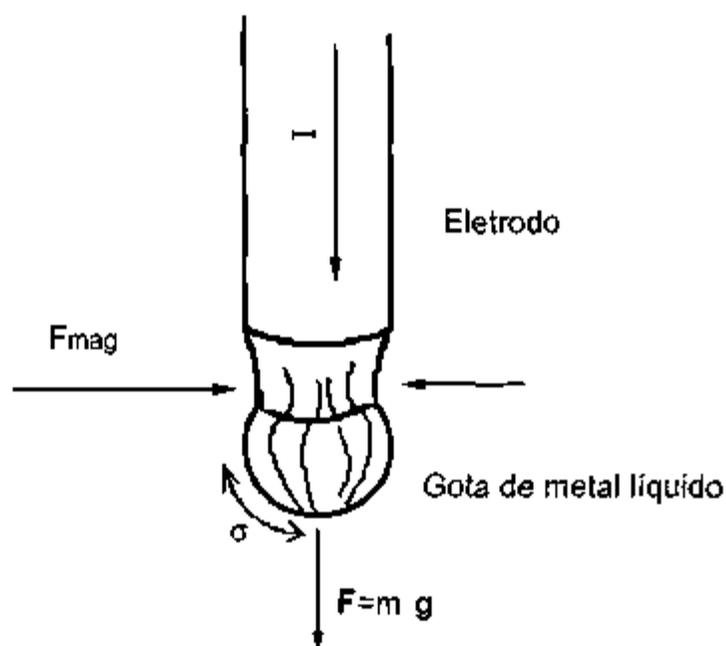


Figura 3.4 – Forças atuantes na gota de metal líquido na extremidade do eletrodo.

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 <sup>[15]</sup> 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 elétrico, a fusão ocorre em pressões entre  $10^{-3}$  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, ~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 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 3 cm e 10 cm ocorre uma combinação entre a transferência globular e aquela por contato.

### **3.7 O REFINO FÍSICO-QUÍMICO**

Uma abordagem qualitativa e quantitativa do refino em fornos a arco é feita por DEMBOWSKI <sup>[14]</sup>, quem 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 à alta temperatura do arco elétrico é responsável pelos fenômenos físicos e químicos que alteram as características originais do material do eletrodo. Nesse aspecto, duas situações se apresentam: A primeira é a extração, por destilação, de impurezas que não interessam ao produto final, como no caso do titânio, MUMMAU *et al.* <sup>[24]</sup>, e do zircônio, LEYT <sup>[25]</sup>, em ambos a retirada de impurezas é tão intensa que só se retém pequenas quantidades da concentração inicial; A segunda situação apresenta a necessidade de utilização de pressões mais altas nas quais a pressão de vapor de seus componentes é mais alta.

### **3.8 APLICAÇÃO DOS PROCESSOS A VÁRIOS MATERIAIS**

O titânio é um metal bastante semelhante ao zircônio e é largamente utilizado na indústria aeronáutica e aeroespacial. Neste aspecto, FARIA <sup>[26]</sup> apresenta um trabalho sobre o processo clássico para a consolidação e 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, GREENFIELD <sup>[27]</sup>: britagem da esponja; compactação em briquetes e; soldagem por meio de solda resistiva em equipamento especialmente desenvolvido.

Devido à alta responsabilidade dos materiais utilizados em equipamentos e dispositivos para reatores, estes devem ter necessariamente uma qualidade específica para o seu uso. A tecnologia de fusão a arco de eletrodos consumíveis a vácuo de ligas de zircônio é a mais adequada para garantir a qualidade do produto que acompanhará, no caso dos vasos de pressão, a vida útil do reator ou do elemento combustível, ISORE *et al.* <sup>[28]</sup>.

Obteve-se uma boa aceitação dos processos na purificação e controle de microestruturas de aços-liga e superligas, SIMS *et al.* <sup>[29]</sup>. Superligas são ligas metálicas desenvolvidas para o trabalho em temperaturas elevadas. São utilizadas num nível mais alto de temperatura em comparação à sua temperatura 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 à 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 largamente 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 nações do mundo, notadamente os projetos aeroespaciais, nucleares, militares e de aviação civil e militar, Stoloff *et al.* <sup>[30]</sup>.

PAPIER <sup>[31]</sup>, proferiu seminário no qual 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 a problemas com os carbetos e óxidos de titânio, concluindo ser necessária um primeiro processamento 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, 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 minimiza a segregação da liga. Este material é utilizado nas indústrias alimentícia e aeroespacial, ASM<sup>[32]</sup>.

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<sup>[33]</sup> e ligas de alta temperatura de fusão tal como as ligas de tungstênio-háfnio-carbono, ANABLE *et al.*<sup>[34]</sup>.

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 (CONSARC e ALD) e produtores de metais reativos (Cezus), bem como a tendência mundial no sentido da automação de processos, mostram que para os equipamentos para a tomarem-se competitivos, em qualidade e custos, a automação é um dos fatores mais importantes.

### 3.9 A QUALIDADE FINAL DO PRODUTO OBTIDO

SZEKELY<sup>[35]</sup>, em trabalho apresenta uma discussão geral sobre métodos matemáticos no desenvolvimento de novos processos. Neste apresenta como ponto de partida a diminuição gradativa de preços dos equipamentos de computação utilizados para a simulação de processos por meio de 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 de modelos

matemáticos, com muitos trabalhos realizados na área de transferência de calor, solidificação, formação de trincas e deformação térmica, sendo um desafio para os pesquisadores.

Paralelamente, a necessidade de controle do processo no processamento de materiais é apresentada de uma forma geral por MEHRABIAN *et al.* [36]. Neste artigo apresentam-se a necessidade de se conhecer o inter-relacionamento entre estrutura, propriedades 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 deste 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. O lingotamento contínuo é citado, 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 macro-segregação no produto. Outros processos são citados, porém estão fora do escopo deste trabalho.

### **3.10 A FORMAÇÃO DO LINGOTE - ASPECTOS METALÚRGICOS**

É importante notar que a compreensão do processo de solidificação permite determinar a correlação entre microestrutura, macroestrutura e propriedades em função dos parâmetros envolvidos no processo de solidificação. Esse aspecto é fundamental para o desenvolvimento de todos os processos nos quais ocorra a solidificação de uma liga, fornos metalúrgicos e soldagem, por exemplo.

Num artigo sobre soldagem de ligas de alumínio, STOOOP *et al.* [37] apresentam uma correlação entre os parâmetros operacionais da soldagem (corrente e tensão elétricas, velocidade de alimentação e deslocamento). Esse trabalho é um exemplo qualitativo para o projeto de investigação sistemática da influência das variáveis do processo na qualidade final do produto.

Então, a parte do processo que define a qualidade metalúrgica do produto final é a solidificação. Num forno VAR o processo ocorre com deposição contínua de metal líquido sobre o lingote, que se solidifica devido ao resfriamento da lingoteira. O depósito líquido forma uma poça de metal líquido no topo do lingote, a qual tem o formato típico do lingotamento contínuo mostrado na figura 3.6. 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; a região líquida. A região pastosa é onde ocorre a solidificação de uma liga, 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 à combinação entre a ação do arco elétrico sobre o topo do lingote (líquido) e à intensa refrigeração da parede externa da lingoteira provoca uma poça de metal líquido com formato de um parabolóide de revolução com micro e macroestruturas peculiares ao processo, MUCSI [2]. Entretanto num forno VADER, no qual não ocorre a transferência do arco elétrico para o topo do lingote, a macroestrutura do lingote ainda apresenta a poça de metal líquido bastante mais rasa.

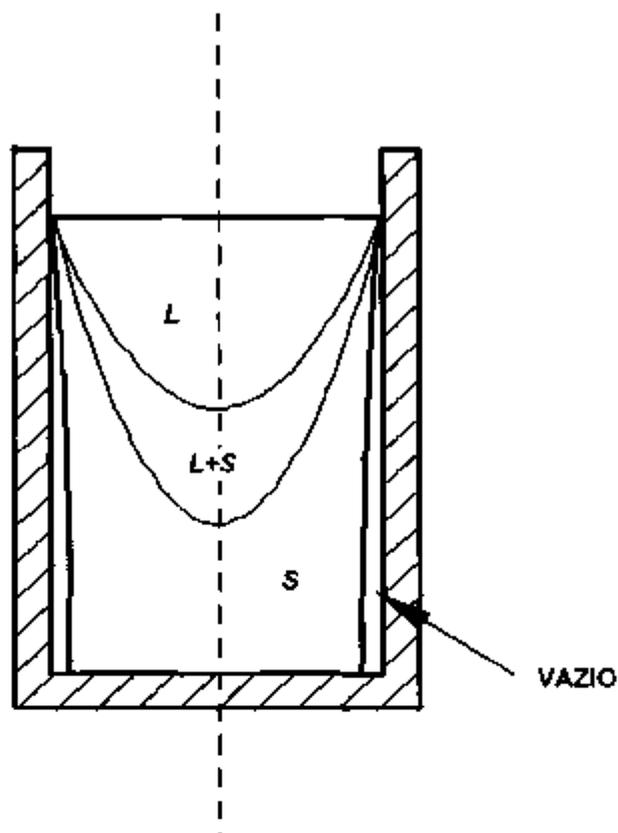


Figura 3.6 – Posição típica das isotermas no lingotamento pelo processo VAR.

A macroestrutura de um lingote VAR é mostrada na figura 3.7. 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 preferencial é motivada pelo fenômeno de crescimento competitivo aliado ao sentido extração de calor, proveniente do arranjo experimental. Em lingotes VAR a zona coquilhada ou é inexistente, ou tem uma extensão desprezível podendo ser confundida com grãos recristalizados, CAMPOS *et al.* [38]. 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, ao final do processo de fusão do eletrodo.



*Figura 3.7 – Macrografia da solidificação de um lingote VAR <sup>[2]</sup>.*

### **3.11 RISCOS OPERACIONAIS DO PROCESSO VAR**

Na década de 1960 um relatório foi publicado com recomendações sobre aspectos da segurança operacional de fornos VAR. Essas recomendações baseavam-se nos efeitos causados por acidentes durante a fusão de metais reativos. Havia a indicação de dispositivos e configurações para projeto de toda a instalação assim como dos próprios fornos, ARMED SERVICES TECH. INFO. <sup>[39]</sup>. Tal característica da operação dos fornos VAR foi motivo de uma revisão dos acidentes ocorridos com os fornos VAR nos últimos 50 anos, ou seja, desde o

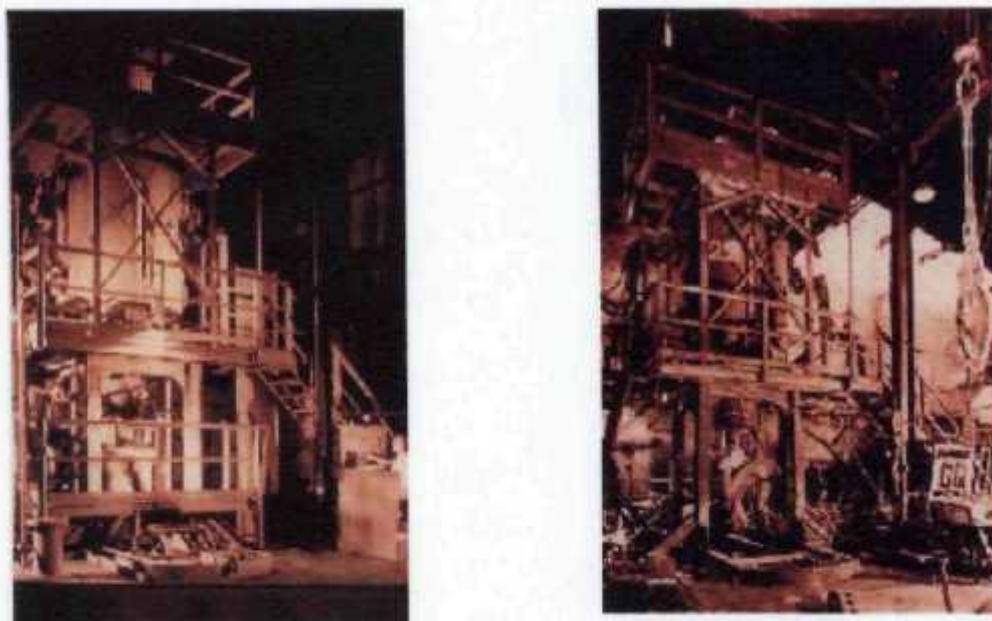
início da aplicação industrial da tecnologia de fusão a arco sob vácuo, POULSEN <sup>[40]</sup>.

O contato do metal líquido com a água promove a dissociação da molécula de água e a absorção do oxigênio pelo metal reativo. Resultando numa explosão catastrófica. Nos primeiros cinco anos de utilização industrial do processo VAR, seis funcionários envolvidos com o processo faleceram em acidentes desse tipo. Outros quatro funcionários faleceram devido a problemas na manipulação da esponja e de pós de titânio. Alguns acidentes foram causados por erros no projeto dos sistemas de gases inertes. Acidentes desses tipos motivaram a criação de comitês com recomendações de projeto para a operação de fornos VAR, como o apresentado acima, ARMED SERVICES TECH INFO <sup>[39]</sup>.

Novamente, o principal motivo, para os acidentes com fornos VAR, é a entrada de água no recinto contendo metal reativo líquido, assim como a operação manual e visual do processo. Reporta-se que num dos primeiros acidentes, a energia liberada pela explosão do forno equivaleu a uma carga de 100 kg de TNT. A última fatalidade motivada por explosões em fornos VAR ocorreu em 1960, e o último acidente foi registrado em 1999, na Oremet, parte do grupo WAH CHANG. O resultado do acidente pode ser visto nas figuras 3.8 e 3.9, abaixo:



*Figura 3.8. Fotos de um forno VAR antes e depois da explosão devida à entrada de água na lingoteira. OREMET (Wah Chang), 1999, POULSEN <sup>[40]</sup>.*



*Figura 3.9. Fotos de um forno VAR antes e depois da explosão devida à entrada de água na lingoteira, que causou a fatalidade de um operador em 1955, e feriu outros três, POULSEN<sup>[40]</sup>.*

No artigo são listadas vinte recomendações para o projeto e operação de fornos VAR, já considerando a tecnologia eletrônica e de vídeo para a operação segundo procedimentos bem controlados.

### **3.12 INTRODUÇÃO QUALITATIVA AOS SISTEMAS COMPLEXOS**

O conjunto dos fenômenos físicos intrínsecos ao processo operacional de um forno VAR é muito grande. Assim como nos fenômenos da natureza, existe um íntimo relacionamento entre eles, muitas vezes não ostensivo, cujas extensão e intensidade nem sempre são ou podem ser totalmente compreendidas. Os fenômenos de transporte de energia (calor) e massa (difusão e fluxos) além dos eletromagnéticos estão evidentemente presentes. O fluxo de calor foi muito investigado, MUCSI<sup>[2]</sup>; JARDY *et al.*<sup>[41,42]</sup> e ainda não é um problema definitivamente resolvido. O transporte de massa, tanto na poça de metal líquido quanto no plasma, é assunto atual e estará presente mais adiante.

A abordagem clássica para a resolução dos problemas citados no parágrafo anterior normalmente é feita utilizando-se equações analíticas

clássicas, usualmente não-lineares. Entretanto a complexidade do sistema suscita a utilização de um enfoque mais atual, os sistemas complexos e os sistemas não-lineares. Uma introdução abrangente aos sistemas complexos pode ser encontrada em ÇAMBEL <sup>[43]</sup>. O inter-relacionamento entre os vários fenômenos de um processo pode provocar mudanças inesperadas, e grandes, quando o sistema sofre pequenas perturbações. Ou seja, causa e efeito não são proporcionais, podendo até ter comportamentos inversos num mesmo sistema. O rigor matemático pede que se chamem esses eventos de não-lineares. Infelizmente, para as equações diferenciais não-lineares, excetuando as mais comuns, e para os seus sistemas, não existem soluções analíticas prontamente disponíveis, embora suas existências possam ser garantidas pelo "teorema da existência e unicidade". Cada caso deve ser tratado adequada e convenientemente.

A complexidade está presente na natureza e o ser humano aprende a lidar com ela no seu cotidiano, mesmo sem se dar conta disso. A fazer previsões de comportamentos sociais sem conhecer, ou utilizar, uma descrição matemática repleta de condições de contorno mais ou menos rígidas. Entretanto a construção de máquinas e controladores pede que esse tema seja mais investigado.

A origem dos estudos sobre os sistemas dinâmicos remonta a Henri Poincaré com a publicação de artigo sobre a Investigação da mecânica celeste, em 1899. Entretanto, muitos sistemas complexos nos são familiares e cotidianos, nas áreas sociais e tecnológicas: fluxos de tráfego; dinâmica climática; dinâmica populacional; comportamento organizacional; desenvolvimento urbano; arritmias cardíacas; diferenciação de células; imunologia; tomada de decisão; etc.

O conjunto de exemplos acima não esgota a lista, pois seria impossível descrever todos os sistemas naturais e artificiais, entretanto ilustra bem a dificuldade em se encontrar uma ferramenta universal para a solução de cada problema. Vários aspectos devem ser considerados quando se analisa um sistema complexo. Esses aspectos são listados abaixo:

- A complexidade pode ocorrer em sistemas naturais e artificiais, incluindo

estruturas sociais.

- Sistemas dinâmicos complexos podem ser muito pequenos ou muito grandes. Podem coexistir e interagir num mesmo sistema, composto;
- Forma não importa, podendo ser regulares ou irregulares;
- Quanto maior for a quantidade de partes do sistema então é mais provável que esse sistema seja complexo;
- O sistema complexo pode ser conservativo ou não;
- Uma das características mais importantes: o sistema nem é totalmente determinístico nem totalmente aleatório;
- O sistema é não-linear;
- Diferentes partes de um sistema complexo interagem sinergicamente;
- Há retro-alimentação positiva e negativa;
- O grau de complexidade depende do caráter do sistema, seu contexto e da interação entre eles;
- Sistemas complexos são abertos – podem trocar matéria, energia e informação com o meio;
- Sistemas complexos tendem a sofrer processos irreversíveis;
- Sistemas complexos são dinâmicos e não em equilíbrio. Têm uma trajetória, mas não um alvo ou destino;
- Muitos sistemas complexos não têm um comportamento previsível, podendo mudar rapidamente, o que sugere as relações funcionais não são diferenciáveis e;
- Há paradoxos nas suas características.

Pode parecer um contra senso, mas a complexidade é assunto de discussão muito antigo e foram os trabalhos de Sir Isaac Newton, que deram ímpeto ao determinismo com suas leis da mecânica clássica e com cálculo diferencial. Laplace - Marquês Pierre Simon de Laplace – fortaleceu essa idéia, tendo influência particular no pensamento científico moderno. O seguinte parágrafo atribuído a Laplace corrobora isso:

“Nós podemos considerar o estado atual do universo como um efeito de seu passado e a causa para o seu futuro. Um intelecto que num dado instante

soubesse todas as forças que animam a natureza e as posições mútuas de todos os seres que as compõem, se este intelecto fosse vasto o suficiente para submeter os dados para análise, poderia condensá-lo numa única fórmula o movimento dos maiores corpos do universo assim como do mais leve dos átomos; para tal intelecto nada poderia ser incerteza e o futuro assim como o passado estaria presente diante de seus olhos”.

Esse determinismo foi combustível para vários setores da sociedade que o utilizavam invocando a autoridade das leis da ciência. No mundo de Laplace não havia lugar para incerteza, probabilidades, escolha, liberdade e livre arbítrio. Tudo estaria predeterminado. Claro que essa postulação laplaciana teve sua importância na formação do pensamento moderno, embora os sistemas complexos não possam se beneficiar dela, como apresentado até aqui. Acerca da década de 1950 os cientistas acreditavam ser possível prever e até controlar o clima de regiões, e do próprio planeta, desde que houvesse facilidades tecnológicas para isso.

Aleatoriedade é o contraponto do determinismo. Entende-se por determinismo que um evento cujas causas só podem levar a um, único, resultado. Numa situação dinâmica, isso significa que para uma dada condição inicial, a trajetória do sistema pode ser calculada com precisão razoável. Permitindo que se utilize uma regra para prescrever como o estado do sistema evolui de um instante para outro, ou seja, que se conheça a evolução dos estados do sistema dinâmico. Quando pontos representativos dos estados do sistema são ordenados, obtém-se a trajetória do sistema.

Num sistema totalmente aleatório não há nenhuma relação causal, entre estados do sistema imediatamente subseqüentes. Assim, em contraste com um sistema determinístico, não existe a regra que relacione um estado a outro. A trajetória do sistema pode ser determinada e após certa quantidade de dados preencherá o espaço amostral de maneira uniforme.

Um conceito importante a se notar é a incerteza. Deve-se tomar cuidado para não considerar incerteza um sinônimo de aleatoriedade. Foi apresentado

acima que aleatoriedade indica independência entre estados de um sistema. Por outro lado, a incerteza está relacionada à impossibilidade de se determinar a relação entre elementos de um mesmo sistema. Por exemplo, pode-se considerar a população global um sistema relativamente pequeno com a ordem de  $10^9$  elementos, sobre a qual podem-se tecer hipóteses e determinar distribuições de probabilidade de ocorrências ou então; um mol gasoso é um sistema muito mais populoso, com a ordem de  $10^{23}$  partículas, sobre o qual se pode discorrer sobre seu estado através das distribuições de probabilidades. Ambos não são aleatórios e, qualquer investigação a seus respeito leva em conta a interdependência dos elementos do sistema. Deve-se lembrar que nesses sistemas complexos, é impossível conhecer o estado de um único elemento.

Pelo exposto acima é de se esperar que o comportamento do arco elétrico num forno VAR, perturbado pelos fluxos gasosos e metálicos, tenha um comportamento característico de um sistema complexo.

Em contraste ao oscilador harmônico singelo, num forno VAR a quantidade de variáveis de estados envolvidas no processo é muito grande, dificilmente monitorável e a relação entre elas nem sempre conhecida. Mais adiante serão apresentados alguns modelos matemáticos para o arco elétrico, presentes na literatura. A equação de Ayrton, apresentada anteriormente, mostra claramente uma relação linear entre a tensão elétrica e o comprimento do arco, porém desconsidera todas as outras variáveis que estão envolvidas no processo – corrente elétrica, atmosfera, parâmetros da geometria, materiais e atmosfera do arco elétrico, etc. Um sistema com essa complexidade é impossível de ser monitorado com a simultaneidade necessária, e a sua representação gráfica é, aparentemente, impossível.

### **3.12.1 BREVE INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DINÂMICOS NÃO-LINEARES CAÓTICOS**

Invariavelmente, problemas complexos envolvem não-linearidades. Devido às dificuldades implícitas, sempre existiu a tendência de lidar com os problemas de não-linearidades como aberrações, muitas vezes deixando-os de lado. Isso se

deve mais às impossibilidades tecnológicas do que incapacidade científica, pois as ferramentas matemáticas adequadas e necessárias ao tratamento de problemas de sistemas dinâmicos não-lineares estão disponíveis. Entretanto, muitas vezes, a aplicação prática dessas ferramentas só é possível com a utilização de computadores, como no caso dos projetos de sistemas automotivos revolucionados com os projetos realizados em computador.

Sob certas condições alguns sistemas dinâmicos não-lineares podem apresentar um comportamento denominado de comportamento caótico. Para ilustrar a evolução do comportamento de um sistema dinâmico não-linear até o regime caótico, sem recorrer às análises complexas, o exemplo mais adequado é a equação logística.

A equação logística presta-se usualmente para descrever um sistema dinâmico populacional, de elementos numa sociedade humana ou animal, sujeita um parâmetro de não linearidade. Na sua forma mais simples a equação logística é apresentada abaixo:

$$x_{n+1} = rx_n - rx_n^2 \quad \text{Eq. 3.5}$$

Uma forma mais adequada para sua análise é apresentada a seguir:

$$x_{n+1} = rx_n(1 - x_n) \quad \text{Eq. 3.6}$$

Para os propósitos dessa seção é conveniente tratar a equação logística com o auxílio de um computador, determinando e analisando a evolução do sistema dinâmico estado por estado, em função do parâmetro não-linear  $r$  da equação logística. Como resultado obtém-se o gráfico da figura 3.10.

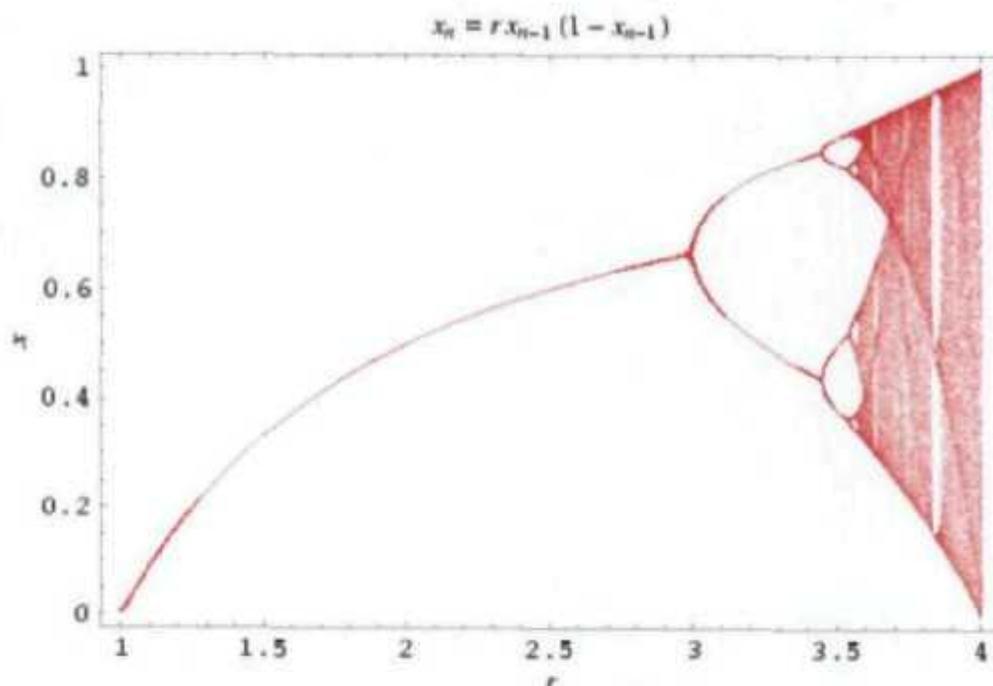


Figura 3.10. Bifurcações nos sistema não-linear, representado pela equação logística, em função do parâmetro  $r$ , da equação 3.6 <sup>[46]</sup>.

A chamada "rota para o caos", ilustrada através da equação logística, mostra simplesmente que um sistema simples pode evoluir de um ponto de equilíbrio fixo para um regime caótico em função de um parâmetro. No caso da equação logística, tem-se um ponto fixo para um valor do parâmetro  $r$  menor que 3; duplicando seu período, entre  $r$  igual a 3 até o ponto de acumulação,  $\approx 3,569945672$ . Para  $r$  maior ou igual ao ponto de acumulação, o sistema dinâmico apresenta um comportamento dito caótico, com número infinito de períodos. A existência de um número infinito de períodos não implica que todos sejam independentes, como num sistema aleatório.

A designação de caos, para o comportamento de alguns sistemas, não está associada à semântica literária, filosófica ou histórica; sequer a palavra caos, na literatura científica, está relacionada às gêneses - grega, judaica ou cristã. Assim, o caos científico não é nem bom nem mau, desejável ou indesejável. Sequer indica um estado de coisas em total desordem. Caos, por outro lado, é uma condição. Uma característica de alguns sistemas dinâmicos complexos, com características detectáveis bastante específicas.

O aparecimento do termo caos na literatura científica ocorreu em 1975, sendo a partir de então universalmente aceito. A teoria do caos é uma coleção de técnicas matemáticas, numéricas e geométricas, que permitem a investigação de problemas não-lineares específicos. Um dos méritos atuais da teoria do caos é a sua potencialidade para lidar com problemas que anteriormente eram deixados de lado. Entre suas várias características, a teoria do caos possibilitou a compreensão de fenômenos não-lineares com características de aleatoriedade.

Duas abordagens principais podem ser encontradas na literatura para os estudos dos sistemas dinâmicos caóticos. A primeira delas é mais qualitativa e define um sistema dinâmico caótico como sendo: *Bounded* (restrito a uma região do espaço de estados), aperiódico e sensível às condições iniciais. Embora a primeira abordagem permita uma fácil assimilação do conceito de caos em sistemas dinâmicos, essa é uma consequência dos estudos de uma “matemática do não-linear”, focada na topologia, definindo matematicamente um sistema dinâmico caótico como tendo: um conjunto denso de pontos com órbitas periódicas, sensível às condições iniciais e ser topologicamente transitivo.

A sensibilidade às condições iniciais foi observada pioneiramente por EDWARD LORENZ <sup>[47]</sup> em 1960, baseado nos resultados de um modelo de termo-difusivo para a simulação bidimensional, para o clima terrestre para o clima terrestre, simples o suficiente para ser simulado em seu computador. A sensibilidade do sistema às condições iniciais foi observada quase por um acaso, quando Lorenz comparou resultados de duas simulações de seu precisões diferentes. À sensibilidade às condições iniciais do sistema deu-se o nome de efeito borboleta. Claro, o resultado desta comprovação foi que o clima jamais poderia ser previsto absolutamente, em função das imprecisões das medidas experimentais. Ver-se-á mais adiante que um sistema com dinâmica caótica é determinístico e, portanto permite que previsões de curto prazo possam ser realizadas, com razoável precisão. A sensibilidade às condições iniciais de um sistema complexo tem implicações essenciais no comportamento dos elementos da natureza. Stephen Hawkins afirma que se a densidade do universo fosse infimamente diferente logo após o *big bang* o universo não existiria como o

conhecemos hoje

A despeito da fácil compreensão do conceito qualitativo de caos, somente a partir de ferramentas matemáticas podem-se obter informações sobre os dados experimentais para a qualificação do sistema dinâmico. Uma abordagem importante sobre a estabilidade de um problema não-linear foi desenvolvida por Aleksandr Mikhailovich Liapunov – pode-se encontrar a grafia Lyapunov, e seu uso na literatura é indistinto – A matemática não-linear afirma que o método de Liapunov permite investigar a estabilidade local de um sistema não-linear [45]. Para sistemas com suspeita de comportarem-se com dinâmica caótica, a utilização dos atratores estranhos e da geometria fractal ofereceu uma nova maneira de encarar a dinâmica não-linear.

A ciência mostra bem uma característica que acompanha o ser humano ao longo de toda a sua existência, é a busca pela forma adequada para a representação da natureza. Assim gráficos e equações são adequadamente criados, facilitando a condensação da informação, sua qualificação e quantificação. Num passo adiante, a modelagem de fenômenos naturais permite criar uma representação que permita a previsão de comportamentos sob diferentes condições. Enfim, isso é ciência. A teoria do caos não podia ser diferente.

O ponto de partida para o estudo de um sistema dinâmico é a sua representação no espaço de estados, sendo esse espaço representado num espaço suporte cujas variáveis independentes, variáveis de estado, são eixo linearmente independentes.

O gráfico de um sistema dinâmico no espaço de estados é chamado de trajetória do sistema. Quando essa trajetória visita uma certa região do espaço de estados com maior frequência, essa região é denominada de atrator. Os atratores de sistemas dinâmicos caóticos são chamados de atratores estranhos.

Dessa maneira o espaço de estados de um oscilador harmônico simples com pequena amplitude, não amortecido, é uma circunferência, com raio igual à

amplitude da oscilação, representada num espaço de dois eixos linearmente independentes, um deles onde se representa a velocidade angular e o outro onde se representa a posição angular da massa oscilante.

Nesse sentido a teoria matemática da informação e o teorema de Takens apresentam as ferramentas a serem adicionadas ao arsenal necessárias à avaliação da dinâmica caótica, fundamentais à construção do espaço de estados.

### 3.12.2 RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO DE ESTADOS

Qualitativamente, o teorema de Takens, ABARBANEL <sup>[48]</sup>, garante – por transitividade topológica entre conjuntos, HOLMEGREEN <sup>[49]</sup>, que um sistema dinâmico multidimensional que evolui no tempo, pode ser representado pela evolução no espaço de estados, de um vetor constituído por uma seqüência de uma das variáveis escalares mensuráveis do sistema dinâmico. Esta técnica é denominada de reconstrução do espaço de estados, e garante a manutenção dos invariantes topológicos do espaço de estados original.

Pode-se escolher como função que represente uma transformação, do espaço de estados original para o espaço de estados reconstruído, um vetor com dimensão  $(d-1)$ , escrito como:

$$S(n) = [s(n), s(n + \Delta t), s(n + 2 * \Delta t), \dots, s(n + (d - 1)\Delta t)] \quad \text{Eq. 3.7}$$

Onde:  $S(n)$  é um vetor com componentes escalares, ou módulo do vetor, de uma das variáveis de estado;

- $s( )$  são as componentes escalares escolhidas nos instantes de tempo a intervalos  $\Delta t$  e;
- $d$  é a dimensão do espaço suporte ou dimensão de imersão
- $\Delta t$  é o tempo de imersão.

O teorema de Takens garante que se possa exprimir o estado de um sistema através de uma série temporal, equação 3.6, quando reconstruindo o

espaço de estados. Como escolher o intervalo de imersão? O senso comum diz que se deve buscar um intervalo em que as medidas sejam independentes. Em álgebra linear essa independência é garantida pelo produto:

$$\vec{A} \bullet \vec{B} = \delta_{AB} \quad \text{Eq. 3.8}$$

onde:

$$\delta_{AB} = 1 \text{ se } \vec{A} = \vec{B} \text{ e;}$$

$$\delta_{AB} = 0 \text{ se } \vec{A} \neq \vec{B}.$$

A qual, embora simples, não se presta para ser utilizada diretamente no tratamento de sistemas complexos. Se um sistema tem dinâmica caótica, os estados não se repetem no espaço de estados e, então o produto acima não pode ser aplicado, pois os vetores seriam sempre diferentes.

Não existe um lema ou teorema formal universal para a escolha do intervalo de imersão, utilizado na técnica para reconstrução do espaço de estados. Em seu lugar podem ser utilizadas várias receitas, cada uma com vantagens e desvantagens. Um procedimento é baseado na teoria da informação [50] e outro, mais simples, utiliza a função de autocorrelação linear. Algumas outras técnicas encontradas na literatura são apresentadas mais adiante.

A técnica mais simples para contornar esse problema é a utilização da função de autocorrelação linear. A função de autocorrelação linear é definida pela relação abaixo:

$$C(T) = \sum_n [s(n) - \bar{s}][s(n+T) - \bar{s}] \quad \text{Eq. 3.9}$$

onde:  $\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s(n)$ , é a média aritmética da série de dados.

Recomenda-se que o valor a ser escolhido para o intervalo de imersão seja

o primeiro zero da função de autocorrelação linear. Esta foi a técnica utilizada neste trabalho, pela simplicidade de implementação e análise.

A segunda técnica a ser citada, pela imensa importância que tem na teoria do caos, é a utilização da informação mútua média entre estados. Para introduzir qualitativamente a abordagem da teoria da informação em sistemas com dinâmica caótica, ABARBANEL <sup>[48]</sup>, é necessário imaginar que dois pontos em duas trajetórias do sistema, no espaço de estados, podem ser indistintos quando envolvidos por uma esfera com raio  $r_0$ . A separação exponencial de duas trajetórias do sistema dinâmico caótico permite que esses dois pontos sejam revelados após um certo intervalo de tempo de evolução do sistema, tornando a distância entre eles maior que o raio da esfera. Então, a sensibilidade do sistema permite que se revele uma quantidade de informação sobre o povoamento do espaço de estados, anteriormente escondido. Pode-se tomar a analogia dessa esfera imaginária com a resolução do sistema de aquisição de dados ou do conversor analógico digital. Essa discussão qualitativa sugere que a geração de informação pode ser fundamental no estudo de sistemas dinâmicos não-lineares.

O conceito e a teoria geral para a informação foram desenvolvidos por SHANNON <sup>[50]</sup>. Um dos conceitos trabalhados por Shannon na teoria matemática da comunicação foi a probabilidade que cada estado de um sistema de dados poderia ocorrer. Ou seja, dado um sistema com uma certa distribuição de probabilidade de estados, poder-se-ia definir uma relação que qualificasse essa distribuição, com a seguinte forma:

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad \text{Eq. 3.10}$$

Onde  $p_i$  é a probabilidade de ocorrência de cada estado do sistema e  $K$  uma constante positiva.

Devido à semelhança notável com a entropia termodinâmica e pelo ineditismo do trabalho, esta relação foi chamada de entropia informacional. O conceito de variação da entropia informacional aplicado à mudança de estados,

como apresentado no caso da esfera que deixava de esconder dois estados após um intervalo de tempo, gerou uma nova medida. Essa medida foi chamada de média da informação mútua entre estados de um sistema.

A equação para a média da informação mútua é dada pela relação abaixo (50):

$$I(T) = \sum_{s(n), s(n+T)} P(s(n), s(n+T)) \log_2 \left[ \frac{P(s(n), s(n+T))}{P(s(n))P(s(n+T))} \right] \quad \text{Eq. 3.11}$$

Onde  $T$  representa um intervalo de tempo após um dado instante. Utiliza-se esta equação para a determinação do intervalo de imersão utilizado na reconstrução do espaço de estados do sistema. De forma análoga à função de autocorrelação linear, escolhe-se o primeiro mínimo da curva de  $I(T)$  como intervalo de imersão.

Para reconstruir o atrator, restam determinar: a dimensão do espaço de estados homeomórfico ao sistema dinâmico original, dimensão de imersão, o parâmetro  $d$  na equação 3.6 e; conseqüentemente, a dimensão fractal,  $d_a$ , do atrator no espaço de estados.

A dimensão fractal,  $d_a$ , é um dos invariantes topológicos do atrator. Por sua vez um atrator é um espaço – conjunto de pontos ordenados – que se apresenta como uma trajetória contida no espaço de imersão, que tem dimensão inteira, através da técnica de reconstrução do espaço de estados. No sentido matemático, o atrator é contínuo no espaço embora não o seja, necessariamente na acepção vulgar, de pontos ligados por retas, sem vazios entre eles.

O teorema de Takens garante também que a relação entre a dimensão de imersão e a dimensão fractal do atrator deve ser dada pela relação:

$$d = 2 d_a + 1 \quad \text{Eq. 3.12}$$

Mas, na prática, todos os autores afirmam que:  $d > d_a$  <sup>[44]</sup> Fato razoável, pois o atrator deve estar imerso num espaço com maior dimensão que o dele.

### 3.13 DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL E DO EXPOENTE DE LIAPUNOV

A determinação da dimensão fractal um espaço está muito bem discutida no texto de FERRARA *et al.* <sup>[51]</sup> A dimensão de Hausdorf-Besicovitch:

$$D_0 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} \quad \text{Eq. 3.13}$$

Também chamada de dimensão fractal, essa relação permite que se determine a dimensão de qualquer espaço, seja um espaço convencional, com dimensão inteira, seja um espaço incomum como, por exemplo, o espaço de Cantor ou poeira de Cantor. O espaço de Cantor é obtido pela repetição de uma regra: a divisão de um segmento de reta em três partes iguais e a exclusão do segmento intermediário, HOLMGREEN <sup>[49]</sup>. Repete-se essa regra indefinidamente, com os segmentos que vão restando das divisões. A dimensão fractal desse espaço pode ser calculada pelo limite:

$$D_0 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} = \frac{\log 2}{\log 3} = 0,63 \quad \text{Eq.3.13.1}$$

Exemplificando, então, a existência de dimensões não inteiras para espaços. Entretanto a aplicação desse método algébrico em dados experimentais pode ser impossível, pois para reconstruir o atrator é necessário conhecer a sua dimensão fractal, que é o que se deseja conhecer. Para contornar esse problema Grassberger e Procaccia propõem um algoritmo para a determinação da dimensão do atrator por intermédio da integral de correlação, denominando então a dimensão do atrator de dimensão de correlação, PAWELLIK <sup>[52]</sup>.

O algoritmo para a determinação da dimensão de correlação segue a idéia

de que existe a probabilidade de que dois pontos estejam dentro de uma caixa de lado  $\varepsilon$ , dada por:

$$\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^2 \quad \text{Eq. 3.14}$$

A qual representa a probabilidade que a distância entre dois pontos seja menor que  $\varepsilon$ . Por sua vez é igual a:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \left\{ \text{número de pares } (i, j) \text{ tais que } \left| \vec{x}_i - \vec{x}_j \right| < \varepsilon \right\} = C(\varepsilon) \quad \text{Eq. 3.15}$$

onde  $\vec{x}_i$  e  $\vec{x}_j$  são a posição vetorial dos pontos no atrator. Essa equação rearranjada leva a:

$$C(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{\substack{i, j=1 \\ i \neq j}}^N \theta \left[ \varepsilon - \left( \left| \vec{x}_i - \vec{x}_j \right| \right) \right] \quad \text{Eq. 3.16}$$

A qual é chamada de integral de correlação, onde  $\theta(x)$  é a função de Heaviside:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 3.17}$$

A implementação da integral de correlação por meio de uma linguagem de computador é relativamente simples, assim como a dimensão de correlação. A dimensão de correlação é calculada pela relação abaixo.

$$D \approx \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log C(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad \text{Eq. 3.18}$$

A operacionalização da análise se faz sobrepondo os gráficos de  $D$  em função de  $\varepsilon$ , para diferentes valores de dimensões hipotéticas do espaço de imersão. Determina-se o valor de  $D$  onde a sobreposição é razoavelmente constante. Essa técnica foi utilizada neste trabalho e está ilustrada mais adiante no capítulo sobre os resultados.

Finalmente, o teorema de Takens garante que:  $d = 2d_0 + 1$ , mas, na prática utiliza-se  $d > d_0$ . Sendo possível, então, reconstruir o espaço de estados num espaço de imersão com dimensão  $d$ .

Analogamente ao procedimento para a determinação da dimensão fractal, a investigação da sensibilidade do sistema a pequenas perturbações ou às condições iniciais tem duas abordagens: A primeira voltada a problemas algébricos e; a segunda direcionada à avaliação da estabilidade de sistemas experimentais, cujos dados acabam sendo discretizados através de algum sistema de conversão analógico digital.

A divergência exponencial de trajetórias próximas do atrator, causada pela sensibilidade do sistema às condições iniciais, pode ser descrita pelos expoentes de Liapunov. Retornando à situação da esfera que engloba dois pontos de trajetórias distintas de um mesmo atrator, a esfera deve deformar-se para um elipsóide, aumentando suas dimensões, para acompanhar a divergência exponencial das trajetórias. Como o espaço de imersão pode ter mais de três dimensões, denominam-se a esfera de hiper-esfera e o elipsóide de hiper-elipsóide. A deformação da hiper-esfera, com dimensão  $\varepsilon_0$  para um hiper-elipsóide, com dimensão  $\varepsilon_k(t)$ ,  $d = 1,2,3,\dots,m$  permite que se desenvolva uma relação do tipo:

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{\varepsilon_0(x_0)} \frac{1}{t} \ln \frac{\varepsilon_i(t)}{\varepsilon_0(x_0)} \quad \text{Eq. 3.19}$$

Ou, reescrevendo:

$$\varepsilon_i(t) \approx \varepsilon_0(x_0) e^{\lambda_i t} \quad \text{Eq. 3.20}$$

Os expoentes  $\lambda_i$  são denominados de coeficientes exponenciais de Liapunov, ÇAMBEL [43]. Este equacionamento ilustra a abordagem qualitativa do problema de avaliação da divergência de trajetórias de um atrator no espaço de imersão. Se o sistema dinâmico for gerado por um mapeamento, então torna-se possível determinar analiticamente os expoentes de Liapunov.

Seja o mapa:

$$x_{n+1} = F(x_n) \quad \text{Eq. 3.21}$$

e, defina-se a distância entre dois pontos pertencentes a duas trajetórias distintas do atrator:

$$\delta = y_0 - x_0 \quad \text{Eq. 3.22}$$

Após um intervalo de tempo, esta distância fica:

$$\delta' = y_1 - x_1 \quad \text{Eq. 3.23}$$

Tal que:

$$\delta' = e^{\lambda} \delta \quad \text{Eq. 3.24}$$

Considerando algumas iterações e manipulações algébricas, e tomando a distância inicial tendendo a zero, tem-se:

$$\lambda(x_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \ln \left| \frac{dF^N(x_0)}{dx_0} \right| \quad \text{Eq. 3.25}$$

O qual, por definição, é o expoente característico de Liapunov para o

mapa. Aplicando a regra da cadeia e generalizando para  $m$  dimensões, tem-se que:

$$(e^{\lambda_1}, e^{\lambda_2}, \dots, e^{\lambda_n}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[ \text{módulo\_dos\_autovalores\_de} \prod_{r=0}^{N-1} \|J\|(\bar{x}_r) \right] \quad \text{Eq. 3.26}$$

onde  $\|J\|(\bar{x}_i)$  é a matriz Jacobiana do mapa, calculada em  $\bar{x}_i = F'(\bar{x}_0)$ , sendo:

$$\|J\|(\bar{x}_i) = \frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial (F_1, F_2, \dots)}{\partial (x_1, x_2, \dots)} \quad \text{Eq. 3.27}$$

calculada no ponto  $\bar{x}_i$ .

As técnicas citadas acima não exigem que se descreva o sistema não-linear através dos sistemas de equações diferenciais que os regem. Convém lembrar a importância de se reconhecer os fenômenos envolvidos no processo em estudo, para que a análise dos resultados computacionais possa ser realizada com mais coerência.

A teoria do caos é uma maneira de estudar a complexidade. Como existem vários tipos de sistemas dinâmicos imersos em diferentes contextos, pode-se abordá-los de diversas maneiras, portanto a abordagem científica da teoria do caos, adotada neste trabalho, é adequada aquela mais indicada para a investigação do sistema complexo sob investigação. A abordagem de um problema não-linear, através da teoria do caos, deve ser realizada com a integração dos conceitos da dinâmica não-linear, termodinâmica de não equilíbrio, teoria da informação e geometria fractal. Outras abordagens são possíveis, entretanto essa é a mais comumente utilizada. A teoria do caos pode ser considerada uma coletânea de técnicas da matemática para avaliar a dinâmica do sistema complexo.

Observações mais recentes do comportamento do arco elétrico vêm

mostrando que o arco elétrico tem um comportamento caótico. Portanto, a modelagem num dado instante de tempo, baseada no comportamento de instantes anteriores, pode prever, com precisão garantida pelo horizonte de previsibilidade, o comportamento do sistema dentro desse período futuro de tempo. Tal comportamento indica a necessidade de utilização de controladores mais complexos, para um maior aproveitamento da energia despendida no processo e da tecnologia disponível no mercado.

A classificação de um sistema dinâmico como caótico a partir de dados experimentais não tem uma técnica definitiva. Nesse trabalho adotou-se a técnica mais voltada à teoria da topologia geométrica, ou seja, utilizou-se a avaliação dos invariantes topológicos: dimensão fractal e; expoente de Liapunov (ou Lyapunov). Sistemas dinâmicos que exibem comportamento caótico têm a eles atribuídas dimensões fractais,  $d_a$ , não inteiras e coeficiente de Liapunov positivo.

### 3.14 MODELOS MATEMÁTICOS PARA ARCOS ELÉTRICOS

Um dos primeiros trabalhos que realizam a modelagem do arco elétrico de alta corrente contínua foi realizado por USHIO *et al.* [50] Neste trabalho os autores buscaram uma representação matemática para a o campo de forças eletromagnéticas, o campo de velocidades e a distribuição de temperaturas no arco elétrico. A simulação numérica foi realizada do modelo magneto-hidrodinâmico foi efetuada e os resultados comparados com dados da bibliografia corrente. As equações utilizadas assim como a lista de símbolos à elas associadas, não serão apresentadas aqui devido à sua extensão, entretanto um resumo da modelagem é apresentado a seguir.

Devido às limitações computacionais da época, o modelo utiliza-se ainda de abordagens simplificadas. Considera o arco elétrico axissimétrico evoluindo num estado estacionário, sujeito a condições de contorno simples, temperaturas nas superfícies dos eletrodos e uma distribuição de corrente conhecida, entre outras. Acoplaram-se os fenômenos de transferência de calor e o do fluxo de massa devido às forças eletromagnéticas, resolvendo o sistema de equações diferenciais pelo método de Gauss-Seidel. As equações fundamentais do modelo

são apresentadas abaixo.

Equação de movimento:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad \text{Eq. 3.28}$$

Equação de continuidade:

$$\rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla P - \nabla \tau + F \quad \text{Eq. 3.29}$$

Equação do balanço de energia térmica:

$$\rho(v \cdot \nabla h) = \nabla \cdot k_{eff} \nabla T + F \quad \text{Eq. 3.30}$$

Nessas equações os símbolos mais importantes são:

- $\vec{F}$ , o vetor força,  $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$ ;
- $\vec{B}$ , o fluxo de densidade magnética;
- $h$  a entalpia;
- $\vec{J}$ , o vetor densidade de corrente;
- $\nabla P$ , o gradiente de pressão;
- $S_\tau$ , a fonte de energia térmica;
- $v$ , o vetor velocidade;
- $K_{eff}$ , o valor efetivo da condutividade térmica;
- $\rho$ , a densidade e;
- $\tau$ , o tensor de *stress*, linear e turbulento.

A despeito da simplicidade do modelo, os autores afirmam ter obtido uma boa correlação com dados experimentais, embora a distribuição de corrente tenha sido o ponto fraco do modelo, por ser uma estimativa inicial.

Num novo artigo, SZEKELY *et al.* [54], dão continuidade ao trabalho anterior, agora com uma aplicação para fornos a arco elétrico e a plasma ambos com corrente contínua. O objetivo do trabalho foi o de compreender quantitativamente os fenômenos de transferência de calor e fluxo de fluidos nos fornos a arco e a busca pela melhor eficiência, pois 20% do total do aço produzido àquela época, 1983, provinha de fornos a arco elétrico. Novamente o material dos eletrodos são o carbono e o metal líquido, fundido. O novo modelo incorpora as equações de Maxwell, as equações para turbulência de Navier-Stokes e a equação do balanço de energia turbulenta. Adicionalmente os trabalho calcula o calor transmitido do arco elétrico para poça de metal líquido. A lista de símbolos utilizada no trabalho original é bastante extensa e não será reproduzida aqui.

Devido à complexidade de lidar com não linearidades as propriedades dos fluidos foram consideradas constantes, embora a turbulência do jato de plasma tenha sido considerada e algumas observações empíricas foram utilizadas para facilitar a modelagem. Adotou-se a simetria azimutal para o sistema e as seguintes equações para o modelo:

Equação de continuidade:

$$\nabla v = 0 \quad \text{Eq. 3.31}$$

Equação de movimento:

$$\bar{\rho}(v \cdot \nabla)v = -\nabla P - \nabla \tau + J \times B \quad \text{Eq. 3.32}$$

E a equação do balanço da energia térmica:

$$\bar{C}_p \bar{\rho}(v \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + J \cdot E - S_R + \frac{5}{2} \frac{k}{e} J \cdot \nabla T \quad \text{Eq. 3.33}$$

Foram utilizadas condições de contorno mais realistas que as do caso anterior, assim como o contexto do problema foi baseado nos parâmetros operacionais de fornos a arco elétrico, com escala industrial.

Os resultados obtidos por simulação a partir do modelo mostraram boa correlação com os dados experimentais, tornando-o assim uma boa primeira aproximação para modelagem do sistema. Com a determinação dos fluxos de plasma e distribuição de temperaturas no arco elétrico, foi possível avaliar as transferências de calor para a poça de metal líquido e as correntes de convecção no seu interior.

Embora avançado para a sua época, os autores conseguiram desenvolver um modelo bastante prático para o arco elétrico em fornos elétricos com eletrodos não consumíveis, mesmo com as simplificações efetuadas para facilitar as simulações.

Modelos matemáticos definitivos para fenômenos da natureza ainda não existem e, o caso do arco elétrico de corrente contínua não é exceção. Embora o trabalho de ALEXIS *et al.* <sup>[55]</sup> não estude o comportamento dinâmico do arco elétrico, os seus resultados mostram claramente a complexidade intrínseca do arco elétrico pelos fenômenos associados. Os autores desenvolveram um modelo matemático para arcos elétricos de fornos elétrico com eletrodo de grafite, para a fusão de aços. Com o objetivo de aumentar a eficiência do processo, os autores consideraram como fundamental o acoplamento dos fenômenos de fluxo térmico e de massa, transferência de massa e fenômenos eletromagnéticos inerentes a um arco elétrico, para a determinação da distribuição de temperaturas e para o deslocamento de partículas no sistema. Para incluir o efeito do campo elétrico induzido, os autores optaram por utilizar a equação de Poisson, pois ela descreve corretamente a corrente elétrica no sistema. A descrição do sistema pelo modelo matemático considerou:

1. A conservação da massa, dos momentos axial e radial; a conservação da energia térmica;
2. Razão de geração de energia cinética pelo fluxo turbulento, e;
3. Fenômenos de transporte eletromagnético para o arco de corrente contínua.

As equações para cada um dos itens anteriores são apresentadas a seguir:

Conservação da massa:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w)}{\partial r} = 0 \quad \text{Eq. 3.34}$$

Conservação do momento axial:

$$\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v w)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{ref}} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu_{\text{ref}} \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) + J_z B_\theta \quad \text{Eq. 3.35}$$

Conservação do momento radial:

$$\frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r w^2)}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_{\text{ref}} \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_{\text{ref}} \left( \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right) - \mu_{\text{ref}} \frac{2v}{r^2} - J_z B_\theta \quad \text{Eq. 3.36}$$

Conservação da energia térmica:

$$\frac{\partial(\rho v h)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v h)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{\text{ref}}}{\sigma_T} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\mu_{\text{ref}}}{\sigma_T} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma_e} - S_R - \frac{5 k_b}{2 e} \left( \frac{J_r}{C_p} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{J_z}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{Eq. 3.37}$$

A geração de energia por fluxo viscoso:

$$G = \mu_{\text{ref}} \left( 2 \left( \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{w}{r} \right)^2 \right) + \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) \quad \text{Eq. 3.38}$$

As equações de conservação do momento axial e radial foram determinadas a partir da força de Lorentz:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad \text{Eq. 3.39}$$

Onde:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad \text{Eq. 3.40}$$

Sendo que a densidade de corrente  $\mathbf{J}$  é dado por:

$$\vec{J} = \sigma_v [\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}] \quad \text{Eq. 3.41}$$

O campo elétrico é dado por:

$$\vec{E} = -\nabla\Phi \quad \text{Eq. 3.42}$$

As equações acima, quando combinadas geram:

$$\nabla\sigma_v \cdot \nabla\Phi = \nabla\sigma_v (\vec{U} \times \vec{B}) = \nabla\vec{J}, \quad \text{Eq. 3.43}$$

Os autores lograram determinar a distribuição de temperaturas e de velocidades de partículas no sistema do arco elétrico, para diferentes condições experimentais, a saber: comprimentos do arco elétrico entre 15 cm e 30 cm, e correntes do arco elétrico de 36, 40 e 44 kA, valores operacionais típicos para equipamentos industriais. Embora afirmem que para comprimentos de arcos mais longos o aquecimento seja mais rápido, contradizem as afirmações de outros pesquisadores ao concluírem que os arcos mais longos têm eficiência menor que os arcos curtos, devido à contribuição dos efeitos de radiação luminosa.

Após essas primeiras abordagens, vários outros autores buscaram introduzir mais detalhes nos seus modelos, mas utilizando basicamente as mesmas equações, assim procedem SIMONIN *et al* <sup>[56]</sup>. Eles desenvolvem um modelo para o plasma térmico de arco com alta corrente elétrica. Entretanto, com o desenvolvimento acelerado dos estudos de modelagem, os autores passam a se preocupar com aspectos que aumentam a dificuldade da modelagem, que são,

textualmente:

- Grandes variações das propriedades termodinâmicas;
- Situações de desequilíbrio termodinâmico e químico;
- Presença de regimes turbulentos e laminares no mesmo fluido;
- Geometrias complexas e interações do plasma e;
- Fluxos bifásicos.

As equações utilizadas anteriormente por outros autores são acrescidas outras. Para simplificação as equações de balanço serão citadas a seguir:

- Balanço de massa;
- Balanço de momento;
- Balanço da densidade de elétrons;
- Balanço da energia dos elétrons;
- Balanço da energia das espécies pesadas;
- Balanço de energia;
- Balanço de cargas elétricas e, considerando as turbulências:
  - Balanço da energia cinética turbulenta;
  - Balanço da razão de dissipação da turbulência e.

Os autores concluem que embora as comparações com dados experimentais tenham tido boa concordância, e que o modelo permite que se determinem condições de contorno para o cálculo da transferência de calor para o sólido, do eletrodo e do substrato a ser aquecido. Este modelo deve ainda ser muito melhorado, pois se observam grandes variações nos parâmetros de densidade e viscosidade nos fluxos dos plasmas.

Trabalhos semelhantes ao anterior foram realizados por QIAN *et al.* [57] e FAVALLI *et al.* [58]. Nestes trabalhos os autores demonstram a sua preocupação com as aplicações práticas do plasma, o primeiro em fornos a arco elétrico e o segundo em tochas de plasma utilizadas no processamento de materiais e na metalurgia. As equações utilizadas em suas modelagens são aquelas apresentadas nos artigos anteriores, variando condições de contorno, e o método resolução dos sistemas de equações diferenciais. O trabalho de FAVALLI apresenta uma abordagem mais conceitual e fenomenológica do plasma e a

simulação é feita pelo método dos elementos finitos. Por outro lado QIAN tem uma abordagem voltada à engenharia.

Um interessante artigo, com ênfase na matemática e na simulação da relação característica entre voltagem e corrente do arco elétrico foi publicada por EMANUEL *et al.* [59]. O trabalho apresenta os resultados da comparação entre dois modelos para o arco elétrico: O de dois diodos Zener conectados *back to back* e; um modelo mais realista baseado na equação de Mayr. Os dois modelos têm por objetivo investigar a injeção de harmônicos na linha elétrica por equipamentos a arco elétrico.

Os autores apresentam a equação de Ayrton na sua forma completa, não linear, e com algumas constantes para arcos elétricos entre eletrodos de carbono à pressão atmosférica, como segue:

$$v_a = A + Bl + \frac{C + Dl}{i_a} \quad \text{Eq.3.3}$$

Onde  $A = 39 \text{ V}$ ;

$B = 26 \text{ V/cm}$ ;

$C = 11,7 \text{ V/cm e}$ ;

$D = 105 \text{ VA/cm}$

Apresentam a equação de Mayr, que relaciona a corrente com a tensão do arco elétrico:

$$\frac{1}{i_a} \frac{dt}{dt} - \frac{1}{v_a} \frac{dv_a}{dt} = \frac{v_a i_a - P_i}{W_{Qa}} \quad \text{Eq. 3.44}$$

Observaram que para mudanças aleatórias nas condições do arco elétrico, vibrações do eletrodo, estrição da coluna do plasma e movimentação do arco elétrico, a equação de Mayr permite uma simulação mais realista. Entretanto notaram que embora uma razoável correlação possa ter ocorrido com o modelo de Mayr e o ruído branco, simulações por “modelos mais avançados”, aqui sem maiores referências, foram obtidas a partir de modelos caóticos.

Grandes flutuações de tensão da rede elétrica são causadas principalmente por fornos industriais de fusão a arco, utilizados no processamento da indústria do aço. WANG *et al.* <sup>[60]</sup> mostram a necessidade de modelar o arco elétrico em fornos otimizar a simulação de sistemas de transmissão. Embora a estocasticidade tenha sido considerada e utilizada em estudos anteriores, as flutuações de tensão nos arcos elétricos provaram ter natureza caótica. Por esse motivo os autores propõem a modelagem do problema através da teoria do caos e de redes neurais artificiais.

O modelo foi desenvolvido para fornos industriais com fonte de corrente alternada para alimentação do arco elétrico. Os autores utilizaram a abordagem clássica para o estudo da dinâmica caótica: reconstrução do espaço de estados, determinação da dimensão fractal e dos expoentes de Liapunov. O valor encontrado para a dimensão de correlação foi de  $2,6 \pm 0,3$  e o expoente de Liapunov teve seu valor estimado em 2,54.

Uma rede neural foi desenvolvida com um passo adiante e com multi-passos adiante, gerando boas correlações com os dados experimentais, validando o modelo proposto.

KING <sup>[61]</sup>, apresentou vários trabalhos de interesse para o estudo de sistemas não-lineares e aplicações ao processo VAR. Num desses trabalhos <sup>[61]</sup>, os autores passam a estudar o caso de um sistema dinâmico de uma massa simetricamente ancorada em quatro pontos sujeita à excitação não-linear das ondas e das correntes, visando avaliar a controlabilidade do sistema. Apesar de não estar ligado diretamente ao sistema do arco elétrico do forno VAR, este trabalho apresenta uma abordagem para um problema que poderá ser utilizada futuramente, pois o equacionamento da gota suspensa de metal líquido na extremidade do eletrodo terá uma equação de movimento que, em parte, lembrará a equação deste problema.

A equação de movimento utilizada neste problema é:

$$m\ddot{X} + C\dot{X} + R(X) = F(X, \dot{X}, t) \quad \text{Eq. 3.45}$$

Onde,  $F$  é a força de excitação e  $R$  a restauradora.

A força de excitação é uma combinação de resistências viscosas e inerciais, baseadas nas interações entre a estrutura e o meio:

$$F(X, \dot{X}, t) = \lambda(u - X) \left| \dot{u} - \dot{X} \right| + \mu(u - X) + \rho \bar{V} \dot{u} \quad \text{Eq. 3.46}$$

Após um desenvolvimento algébrico considerando as várias restrições quanto à geometria e a movimentação da massa e do sistema, algumas predições analíticas foram realizadas, a partir das quais se pôde observar a influência dos parâmetros na duplicação do período do sistema dinâmico até atingir o comportamento caótico e a baixa ordem do sistema. A seguir os autores investigam o controle do sistema por meio de pequenas perturbações, entretanto este procedimento está além dos objetivos deste trabalho.

Num outro trabalho, KING *et al.* <sup>[62]</sup> propõem a modelagem e o controle de um forno a arco elétrico utilizando uma rede neural artificial. Embora redes neurais artificiais não estarem nos escopo deste trabalho, o estudo para sua aplicação é semelhante ao que foi realizado experimentalmente.

Foi utilizado um forno com eletrodo de grafite com capacidade para o processamento de 100 kg, com capacidade de corrente de 3000 A e 100 V. O forno foi modificado para permitir a observação e registro filmográfico de alta velocidade do comportamento do arco elétrico. O sistema de aquisição de dados permitia freqüências de aquisição de 50, 100 e 500 kHz e a filmagem com uma taxa e até 44000 imagens por segundo, sincronizada aos dados adquiridos.

O espaço de estados foi reconstruído utilizando a mesma técnica deste trabalho, entretanto o intervalo de tempo para a determinação do tempo de imersão e a técnica para sua determinação não são citados. A dimensão de

correlação foi determinada com o valor de  $2,4 \pm 0,3$ . O máximo expoente de Liapunov foi calculado, para os primeiros 40000 pontos foi:  $\lambda = 4,07$ , e  $\lambda = 3,12$  para os 40000 pontos subseqüentes. Os autores não correlacionam esta variação a nenhum evento do processo, embora reconheçam que o expoente de Liapunov possa tornar-se uma ferramenta para o diagnóstico do sistema. A seguir desenvolvem uma rede neural artificial para o problema, obtendo uma boa correlação entre o comportamento experimental e os dados gerados pela rede, no computador.

Os autores concluem que a rede neural artificial pode ser um bom instrumento de previsão para o sistema de arco elétrico estudado, porém cuidados devem ser tomados, pois a previsão é possível para cinco dados. Isso implica que numa taxa de 50 kHz, prevêem eventos 0,0001 s adiante do atual, tornando difícil a construção de um controlador real.

Novamente, KING *et al.* <sup>[63]</sup> realizaram estudos sobre o comportamento do arco elétrico entre eletrodos de grafite e cobre, alimentados por corrente alternada com freqüência de 60 Hz. Para tal, desenvolveram um equipamento para a realização de experimentos que possibilitasse a filmagem em alta velocidade do comportamento do arco elétrico e de um sofisticado sistema de aquisição de dados. O sistema de filmagem possibilitou que se obtivessem filmes com até 44000 imagens por segundo numa câmera adequadamente adaptada. O sistema de aquisição de dados dedicado, e sincronizado ao sistema fotográfico, possibilitava freqüência de aquisição de até 500 kHz com isolamento por fibras óticas dos sinais. A voltagem e a corrente elétrica foram gravadas simultaneamente e dados sobre a atmosfera do forno, calorimetria e consumo elétrico foram observados.

Os autores consideram o arco elétrico como um resistor não linear, devido aos baixos valores de indutância e capacitância do arco elétrico. Justificam a não-linearidade pelo movimento do arco elétrico que altera o seu comprimento devido a efeitos magneto-hidrodinâmicos. Sugerem uma equação diferencial, para modelar o sistema do arco elétrico, apresentada abaixo:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + ri = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \phi) - e_a \quad \text{Eq. 3.47}$$

Onde:  $L$  é a indutância do circuito,  $r$  é a resistência,  $E$  a diferença de potencial imposta e  $e_a$  é diferença de potencial do arco elétrico, e é descrita pela relação:

$$e_a = a + bY(t) \quad \text{Eq. 3.48}$$

Essa relação é uma aproximação da equação de Ayrton completa, mostrada anteriormente. Reescrevem a equação como:

$$\frac{1}{r^3} \frac{\partial v}{\partial t} + \left( \frac{1}{L} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial r}{\partial t} \right) v + \frac{1}{L} e_a = \sqrt{2} \frac{E}{L} \sin(\omega t + \phi) \quad \text{Eq. 3.49}$$

onde  $r = r[t, Y(t)]$  e é uma função do tempo e do comprimento do arco elétrico.

A possibilidade de registro simultâneo da corrente elétrica e da diferença de potencial do arco elétrico gerou a seguinte relação, entre a resistência elétrica do arco elétrico em função da diferença de potencial:

$$r(v) = 4,543v^{\frac{1}{3}} + 0,477ve^{-0,00001951v^2} \quad \text{Eq. 3.50}$$

Esta relação foi obtida a partir dos dados do gráfico da figura 3.11, abaixo:

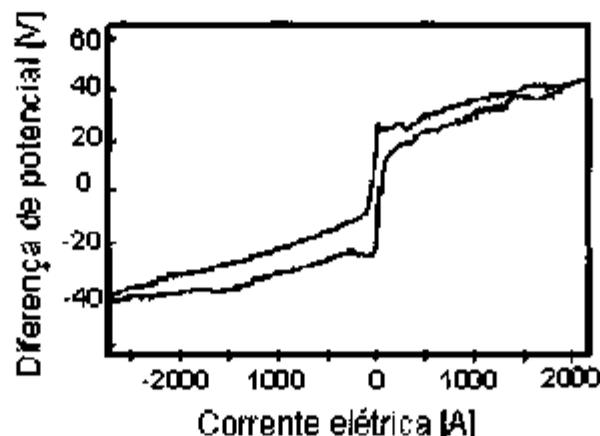


Figura 3.11. Ciclo de tensão versus corrente num arco elétrico, obtido experimentalmente, KING et al. <sup>[63]</sup>.

O espectro de potência obtido para o sinal é mostrado na figura 3.12, abaixo, a partir do qual os autores inferem, preliminarmente, um comportamento caótico para o sistema analisado.

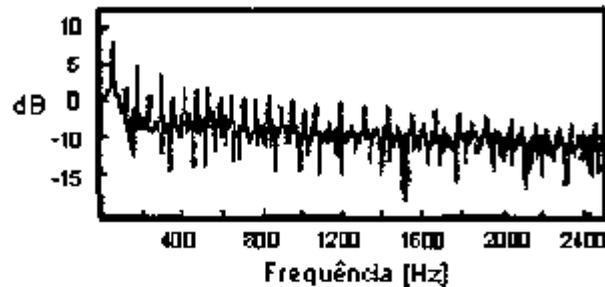


Figura 3.12. Espectro de potência obtido para o sinal do arco elétrico, durante os experimentos de KING et al. <sup>[63]</sup>.

A partir da observação da filmagem e das oscilações da diferença de potencial sincronizadas, atestam que, para frequências abaixo de 5 kHz, as oscilações observadas estão correlacionadas ao movimento do arco elétrico, devido às forças atuantes sobre a coluna de plasma, incluindo ventos magnéticos mudanças na geometria do eletrodo e na localização do arco elétrico. Para frequências acima dos 5 kHz, assumem que a flutuação na diferença de potencial do arco elétrico é devida à natureza turbulenta do plasma, que têm natureza caótica.

O espaço de estados foi reconstruído, utilizando um espaço de imersão com três dimensões, como apresentado na figura 3.13.

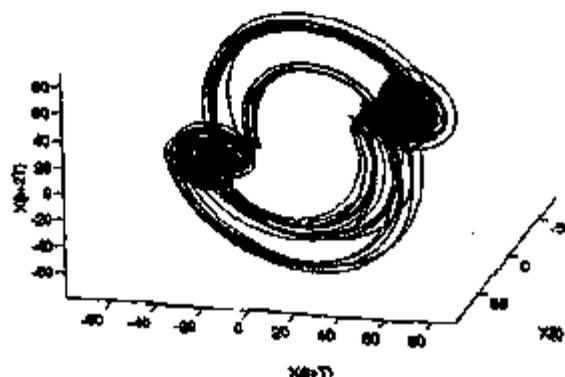


Figura 3.13. Espaço de estados reconstruído para o sinal elétrico dos experimentos realizados por KING *et al.* <sup>[63]</sup>.

A caracterização do comportamento caótico do sistema foi feita com a determinação da dimensão fractal do espaço de estados e do maior expoente de Liapunov. A dimensão de correlação foi calculada e o valor obtido foi de  $2,5 \pm 0,2$ . Os expoentes de Liapunov foram calculados e o maior deles apresentou o valor:  $\lambda = 17,01$ .

Embora não trate do sistema dinâmico do arco elétrico, ZANNER *et al.* <sup>[64]</sup> utilizaram um sistema de aquisição de dados para analisar dados experimentais e estabelecer uma correlação entre as condições operacionais de um forno VAR e a flutuação da diferença de potencial, durante a fusão da liga INCONEL 718. O objetivo do trabalho desses autores foi determinar condições em que a fusão pudesse ocorrer num estado estacionário, responsável pela homogeneidade do produto final, analisando as formas de onda para a diferença de potencial, para diversas condições operacionais. A manutenção de um estado estacionário ótimo.

O sistema de aquisição de dados consistiu-se de gravadores analógicos de fita magnética, com frequência máxima do sinal de 10 kHz, registrando as evoluções da corrente elétrica, diferença de potencial do arco elétrico, pressão de CO<sub>2</sub> e comprimento do arco. Os dados registrados foram discretizados com uma frequência de 10 kHz. Dois tipos fundamentais de comportamento da diferença de potencial, associados aos fenômenos de transferência de metal líquido do eletrodo para a lingoteira, foram observados e analisados: quedas de tensão e; quedas de tensão acompanhadas por picos anódicos. Ambas as formas são apresentadas nas figuras, 3.14 e 3.15.

Embora a dinâmica caótica não tenha sido citada no trabalho, os autores apresentaram na discussão a observação de que mudanças sutis nas condições experimentais podem ser responsáveis por oscilações no comportamento do arco elétrico. Adicionalmente afirmam que o controle do comprimento do arco elétrico durante o processo de fusão "não é uma arte exata", dentro das ferramentas de análise, por eles utilizadas.

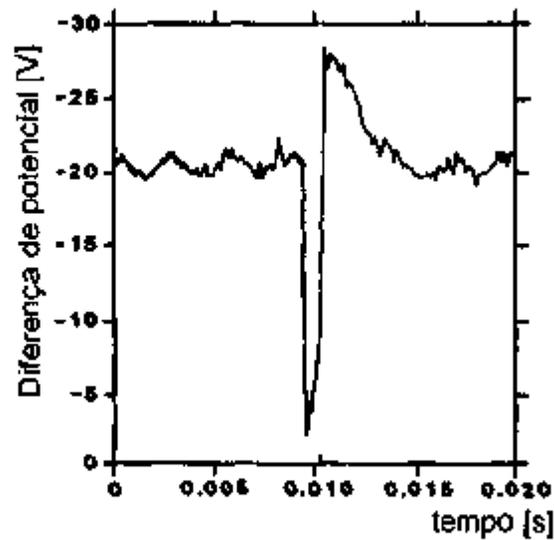


Figura 3.14. Oscilograma registrado por ZANNER *et al.*, mostrando quedas de tensão num intervalo de tempo contendo a transferência de metal eletrodo-lingoteira, ZANNER *et al.* <sup>[64]</sup>.

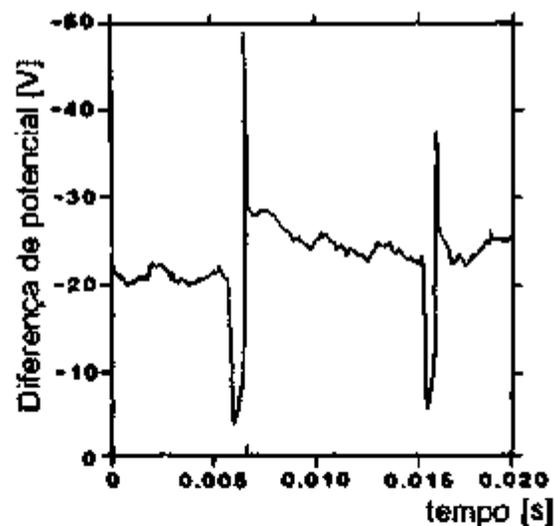


Figura 3.15. Oscilograma registrado por ZANNER *et al.*, mostrando quedas de tensão acompanhadas de picos anódicos, durante a transferência de metal eletrodo-lingoteira, ZANNER *et al.* <sup>[64]</sup>.

Um comportamento cáótico na diferença de potencial no plasma de uma tocha coaxial de plasma foi observado por ANDERS *et al.* <sup>[65]</sup>. O comportamento da diferença de potencial elétrico de uma tocha de plasma foi analisado para a operação com catodos constituídos de vários materiais (C, Mg, Ti, V, Ni, Cu, Zr, Nb, Ag, Hf, Ta, W, Pt, Bi e Si) na operação sob vácuo. A análise dos dados

adquiridos foi feita por intermédio da técnica de transformadas de Fourier (FFT). Os sinais revelaram um espectro do tipo  $1/f^2$ , não apresentando corte em altas frequências.

### 3.15 GOTEJAMENTO DE LÍQUIDOS

Um interessante artigo de divulgação publicado na revista *Scientific American*, por CARLSON <sup>[66]</sup>, mostra a evolução do comportamento das gotas d'água dentro de um líquido viscoso não miscível. Nesse artigo o autor expõe um aparato experimental muito simples, com o qual se pôde observar a queda de gotas em "câmera lenta". O fluxo de saída da água para formar as gotas pôde ser ajustado de forma crescente, a partir do zero. Para um fluxo baixo pode-se observar um padrão de gotas como 1,1,1,1,1,... Para um fluxo ligeiramente maior as gotas começam a variar de tamanho gerando, eventualmente, padrões como 2,2,2,2,... Continuando-se a aumentar o fluxo, o padrão modifica-se crescentemente, até certo ponto. Para um dado valor de fluxo um padrão não mais se repete, tornando a frequência das gotas aparentemente aleatória. Entretanto uma análise mais cuidadosa mostra que esse comportamento só tem aparência aleatória. Isso pode ser observado através do mapeamento de primeiro retorno. Os mapas originais são apresentados no trabalho, mostrando que os dados não são aleatórios, como num jogo de dados, que teriam um espalhamento generalizado pela superfície, sem pontos mais visitados, pois cada estado do dado independe totalmente do anterior. Entretanto observam-se pontos mais visitados que outros indicando que há uma certa dependência do estado anterior.

Embora este trabalho não tenha uma aplicação imediata ao estudo do sistema dinâmico do arco, pode-se induzir que, sob certas condições, o fluxo de gotas que deixam o eletrodo do forno VAR pode ser caótico.

Num estudo anterior, realizado por ROCHA *et al.* <sup>[67]</sup>, os autores utilizam-se de um modelo matemático para a gota d'água, oscilando segundo a equação:

$$\frac{d}{dt} \left( m(t) \frac{dy}{dt} \right) = mg - ky - b \frac{dy}{dt} \quad \text{Eq. 3.51}$$

Onde  $y$  é a posição da gota. O comportamento da solução do problema depende da constante  $k$ , que será discutida posteriormente, do parâmetro de viscosidade  $b$ , de  $m(t)$ , pois a massa não é constante e da constante gravitacional  $g$ .

A formação e o desprendimento das gotas foi filmado e sincronizado com um sistema de detecção de passagem a laser, o qual permitia a determinação da frequência e duração da passagem das gotas.

A simulação do sistema dinâmico foi realizada a partir do modelo matemático e os dados obtidos apresentaram uma boa correlação com os experimentais. Observou-se o fenômeno da duplicação do período na rota para o caos, em função do controle dos parâmetros operacionais do dispositivo experimental, especificamente o fluxo d'água para a formação das gotas.

Apresentam-se nas figuras 3.16 e 3.17, o mapa de primeiro retorno e a série temporal para o regime caótico observado.

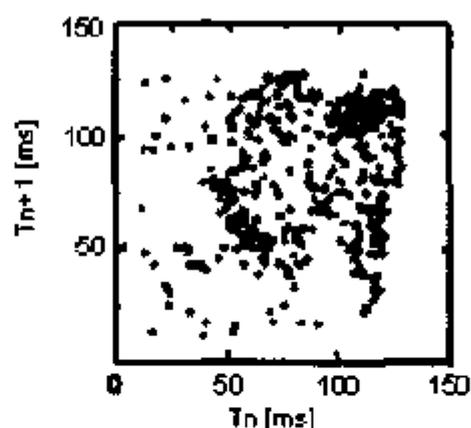


Figura 3.16. Mapa de primeiro retorno para o experimento de gotejamento de ROCHA et al. <sup>[67]</sup>.

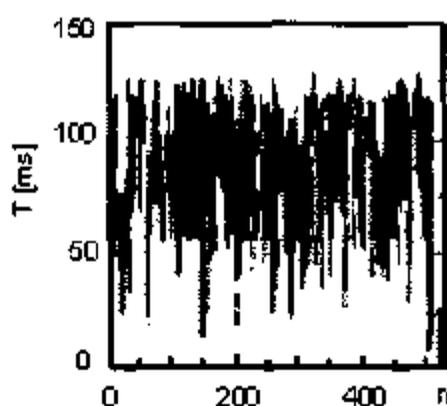


Figura 3.17. Sinal caótico registrado por ROCHA *et al.* <sup>[67]</sup>, em experimento de gotejamento.

O aspecto deste trabalho mais relevante para o sistema do arco elétrico no forno VAR está presente nas conclusões do trabalho. A utilização do modelo matemático para a gota, de uma massa oscilando em uma mola, mostrou que o comportamento do sistema dinâmico é dependente do parâmetro de elasticidade, podendo fazer o sistema ir do regime linear para o não-linear e caótico.

Embora não utilize a análise de sinais elétricos BEAMAN *et al.* <sup>[68]</sup> apresentam um modelo de controlador não-linear para um forno VAR, baseado na modelagem da velocidade de fusão do eletrodo, visando otimizar o controle da taxa de fusão controle de transientes e comprimento do arco, de maneira a produzir lingotes VAR com qualidade mais homogênea. Esse trabalho é resultado de um esforço significativo para a otimização do controle de fornos VAR, realizado pela *Sandia Laboratories* e pelo *Specialty Metals Processing Consortium*.

O controlador utiliza-se de um modelo matemático para descrever a dinâmica de fusão, alimentado por valores de diferença de potencial, corrente elétrica do arco elétrico e velocidade de alimentação do eletrodo. Um controlador não-linear foi projetado e construído. Os autores reportam sucesso no controle do forno, mostrando a eficiência do dispositivo construído, sem a utilização de células de carga para a determinação da massa do eletrodo.

### 3.16 MODELOS PARA A RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO DE ESTADOS

O espaço de estados de um sistema dinâmico pode oferecer informações importantes quanto às características do sistema. O teorema de Takens demonstra essa importância, e aplicações práticas se seguiram.

PACKARD *et al.* <sup>[69]</sup> estudaram o problema da utilização de uma série temporal de uma variável de um sistema dinâmico, como fonte para a reconstrução do espaço de estados multidimensional da evolução temporal daquele sistema dinâmico. A partir do espaço de estados reconstruído puderam determinar os invariantes topológicos do sistema: o maior expoente de Liapunov e a dimensão topológica do atrator. Eles ilustram o método pioneiro a partir dos dados gerados na simulação, em um computador analógico, do sistema de equações diferenciais de Rossler, comparando os resultados obtidos para o espaço de estados originalmente construído, com aqueles obtidos através de técnicas de reconstrução expostas.

Os autores afirmam que as técnicas utilizadas nas reconstruções dos espaços de estados de sistemas dinâmicos dependem do conhecimento que se tem do problema, não existindo uma técnica universal.

Uma técnica para a reconstrução do espaço de estados que se firmou ao longo do tempo foi a da expansão da série temporal escalar numa série temporal vetorial com a utilização de intervalos de atraso. FRASER *et al.* <sup>[70]</sup> publicaram um artigo fundamental, revendo os pontos fundamentais da literatura e da teoria, e aplicando conceitos da teoria da informação para a determinação do intervalo de tempo de imersão, na reconstrução do espaço de estados. Como diz o título do trabalho, os autores buscam uma forma de tornar "independentes" os vetores (num sentido semelhante ao da independência linear da álgebra linear), da série temporal vetorial buscando um intervalo de tempo em que a informação transmitida, entre um estado do sistema e outro subsequente, é mínima. Os autores propuseram um método mais flexível para a determinação da densidade de probabilidade de estados, no qual a largura do canal era ajustada a partir dos dados, evitando concentrações que, eventualmente poderiam esconder

estruturas. Fraser observou que, de uma forma geral, o intervalo de tempo de imersão obtido a partir do primeiro mínimo da informação média mútua transmitida entre estados do sistema foi menor do que aquele obtido através da determinação do primeiro mínimo da função de autocorrelação linear, mais comumente utilizada.

A não existência de um método geral para a reconstrução do espaço de estados de um sistema dinâmico, continuou a incentivar as investigações. Nesse sentido, AGUIRRE [71] propõe uma evolução da função de autocorrelação linear, como alternativa para a determinação do intervalo de tempo de imersão. A função de autocorrelação linear, pode ser escrita como apresentado abaixo, onde  $E$  é expectativa matemática e  $\tau_i = 0, 1, \dots$  é o intervalo de tempo de imersão:

$$\Psi_{y,y}(\tau_i) = E\{[y(k) - \bar{y}(k)] \cdot [y(k - \tau_i) - \bar{y}(k)]\} \quad \text{Eq. 3.52}$$

A função de autocorrelação não-linear proposta é mostrada abaixo:

$$\Phi_{y^2,y^2}(\tau_i) = E\{[y^2(k) - \overline{y^2(k)}] \cdot [y^2(k - \tau_i) - \overline{y^2(k)}]\} \quad \text{Eq. 3.53}$$

O autor conclui que, de forma semelhante ao observado com a utilização da teoria da informação, a função de autocorrelação não-linear apresentada gera intervalos de tempo de imersão menores que os obtidos com o modelo linear. Entretanto não tomam o modelo como geral, e sua aplicação de vê ser feita com atenção.

### 3.17 RECICLAGEM

Embora este trabalho não se dedique a estudar a reciclagem em particular, o processo aqui desenvolvido tem aplicação imediata na reciclagem de cavacos primários de metais reativos. As sucatas de zircônio comprazem de 30% a 35% da matéria prima para a produção de lingotes. São utilizadas principalmente as sucatas primárias, provenientes dos processos de usinagem e de conformação. Sucatas secundárias também são utilizadas, entretanto sua quantidade é de difícil

avaliação, pois suas fontes, desmontes de equipamentos, não são constantes.

Como a fusão de sucatas exige uma preparação cuidadosa do material, cada companhia tem processos próprios, citam-se a Wah Chang, atualmente subsidiária da Allegheny Technologies Inc. Albany Oregon, e a Western Zirconium, subsidiária da Westinghouse Electric Company, Ogden, Utah. [72]

O futuro da reciclagem foi o título para um trabalho de TILTON [73]. Neste trabalho o autor discute a evolução dos conceitos de escassez de matérias primas para a produção na indústria metalúrgica e a importância da reciclagem, tanto de sucatas primárias como de sucatas secundárias. Cita o fato das sucatas primárias serem de fácil seleção nas fontes de produção em contraste com as sucatas secundárias, que em geral estão misturadas a outros materiais.

As preocupações ambientais são consideradas, pois as indústrias metalúrgicas ainda causam poluição, apesar do desenvolvimento de processos menos poluidores, para a obtenção de metais a partir dos minérios. Nesse aspecto, como a reciclagem não causa problemas ambientais tão importantes, enaltecendo o desenvolvimento de novas tecnologias.

Numa economia de escala, a reciclagem de metais pode ter impacto importante no produto interno bruto de um país, evitando a importação de matérias primas e, mais ainda, o desenvolvimento de novos processos de reciclagem retém os gastos realizados com a manufatura, mão de obra, no próprio país.

No interesse de viabilizar uma tecnologia de fusão de cavacos de Zircaloy, MUCSI *et al.* [74] publicaram os progressos na consolidação de cavacos de Zircaloy. O trabalho teve dois focos principais: a consolidação dos cavacos de Zircaloy oriundos da usinagem em torno da matéria prima, para a confecção dos elementos combustíveis para os reatores nucleares de Angra dos Reis, prensados e; os estudos preliminares sobre o arco elétrico para a otimização de um sistema de controle automatizado para o processo.

## 4 EXPERIMENTAL

### 4.1 O PROTÓTIPO VAR - IPEN

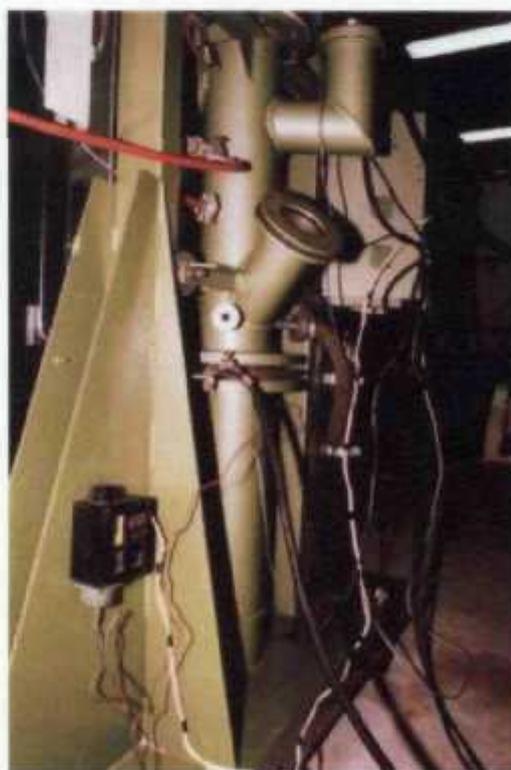
Para a realização deste trabalho foi utilizado o protótipo de forno VAR, desenvolvido no IPEN-CNEN/SP, MUCSI <sup>[2]</sup>, durante a década de 1990, dotado de uma janela de observação, incomum em fornos VAR convencionais, adequada para a filmagem. Na figura 4.1 é apresentada uma imagem do protótipo VAR utilizado neste trabalho. Na figura 4.2 pode ser vista a janela de observação utilizada para a filmagem do arco elétrico e da transferência de metal líquido do eletrodo para a lingoteira. As características principais do protótipo VAR são apresentadas na tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Características principais do protótipo VAR – IPEN.

	Característica	
1	Largura x altura x profundidade	2 m x 3,5 m x 1,2 m
2	Diâmetro da lingoteira VAR	50 mm
3	Altura máxima do lingote	200 mm
4	Resfriamento da lingoteira	Fluxo d'água
5	Termostato de segurança	Instalado na câmara de resfriamento
6	Corrente máxima de operação	400 A
7	Tomadas de vácuo	6
8	Material da lingoteira VAR	Cobre OFHC
9	Acionamento da lança	Sustentação por cabo de aço e movimentação por motor elétrico
10	Abertura do arco elétrico	Curto-circuito ou faiscador



*Figura 4.1 – Vista geral do protótipo VAR utilizado para a realização deste trabalho.*



*Figura 4.2 – Detalhe do protótipo VAR mostrando a janela de observação para filmagem.*

O protótipo foi acoplado a uma fonte comercial de corrente contínua para

soldagem, com capacidade máxima de 400 A, com característica tombante. A tensão em aberto da máquina é de  $65,5 \text{ V} \pm V_{\text{ripple}}$  ( $V_{\text{ripple}}=0,744 \text{ Vpp}$ ). A polaridade normalmente utilizada para o eletrodo é negativa. A polaridade positiva para o eletrodo foi utilizada em algumas condições que serão apresentadas adiante. A abertura do arco do arco elétrico foi realizada pelo curto circuito entre anodo e cátodo ou com a utilização de um gerador de alta tensão em alta frequência.

## 4.2 DISPOSITIVO FUNIL-LINGOTEIRA

O dispositivo funil lingoteira utilizado neste trabalho encontra-se em desenvolvimento e, portanto, não existe um desenho que possa ser apresentado como definitivo. O trabalho de desenvolvimento tem com o objetivo possibilitar a fusão de eletrodos cujas dimensões da seção transversal sejam próximas ou maiores que as da lingoteira. Eletrodos desse tipo são aqueles preparados por prensagem de sucatas, no nosso caso de sucatas primárias provenientes da usinagem em torno.

A concepção original pode ser vista na figura 4.3. Nesta figura observa-se o posicionamento de um funil de cobre no topo da lingoteira. Estabeleceu-se que o *diâmetro inferior do funil deveria ser menor que o da lingoteira para evitar o contato com as paredes desta e, conseqüentemente, geração de inclusões exógenas ou não-homogeneidades no lingote, devido à solidificação prematura do fundido, antes de atingir a poça de metal líquida. Evidenciou-se a necessidade da conicidade anotada no desenho para a retirada do lingote e para a solução de problemas eventuais de travamento do lingote.*

O material utilizado para a construção do dispositivo e da lingoteira foi o cobre *oxygen free high conductivity* (OFHC) com o objetivo de diminuir-se a perda de energia por efeito Joule, devida à passagem da corrente elétrica.

Antes do início das fusões, a superfície interna do dispositivo funil-lingoteira foi limpa e teve as imperfeições causadas, pela erosão do arco elétrico, eliminadas por fresagem e lixamento. Para algumas das fusões de eletrodos de

Zircaloy foi aplicada uma camada de tinta, a base de nitrato de boro com características antiaderentes.

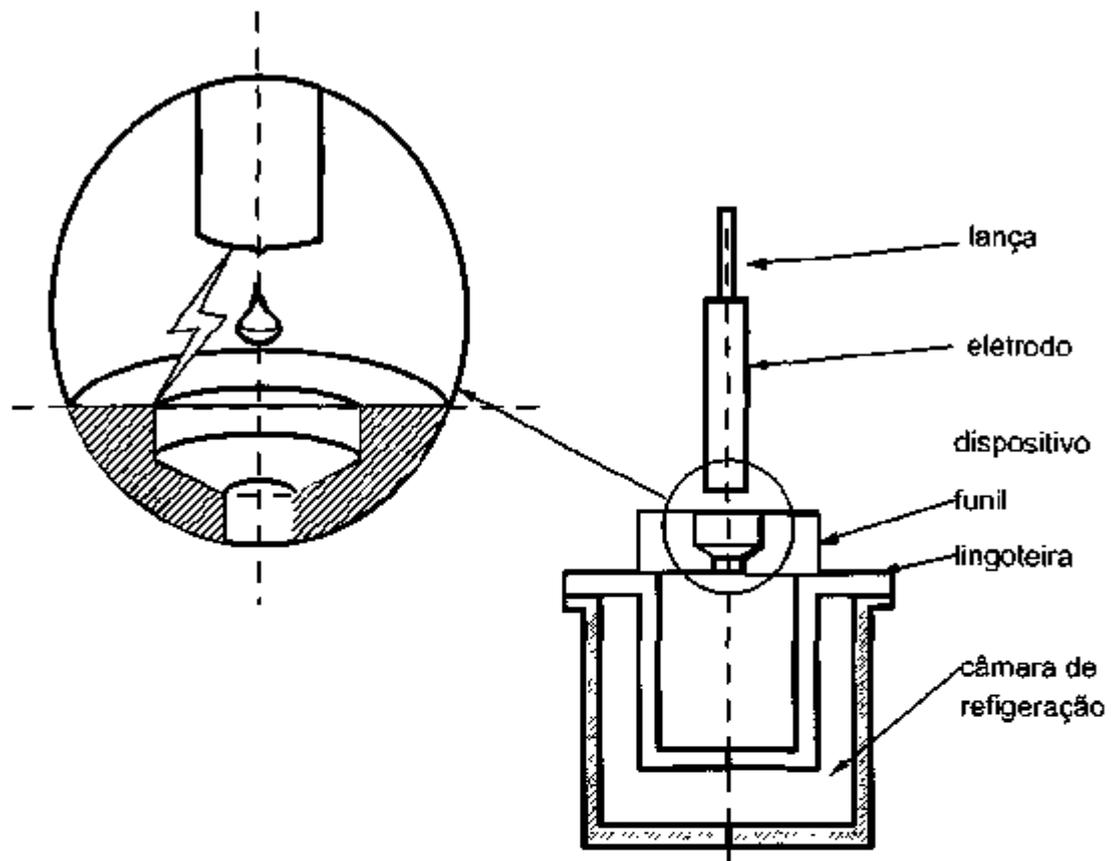


Figura 4.3 – Desenho esquemático do dispositivo funil-lingoteira.

#### 4.3 ELETRODOS

Foi adotado um protocolo para os experimentos de fusão, aproveitando-se a experiência adquirida anteriormente no desenvolvimento do protótipo VAR. Foram escolhidos dois materiais para os eletrodos: O aço inoxidável AISI 304 e; o Zircaloy. A tabela 4.2 apresenta as composições do aço inoxidável AISI 304 teórico.

TABELA 4.2. Composição química teórica do aço AISI 304.

Elemento	Fe	Cr	Ni	C	Si	Mn	P	S
	balanço	18-20	8-12	0,030	1	2	0,045	0,030

Na tabela 2.1, representada nesta seção, são mostradas as composições teóricas da família de ligas Zircaloy.

TABELA 2.1. Composições químicas das ligas Zircaloy-2 e Zircaloy-4 (% massa), ASTM<sup>(1)</sup>.

Elemento	Zr	Sn	Fe	Cr	Ni	O	Hf
Zircaloy-2	balanço	1,2-1,7	0,07-0,20	0,05-0,15	0,03-0,08	0,12 típico	< 1000 ppm
Zircaloy-4	balanço	1,2-1,7	0,18-0,24	0,07-0,13	-	0,12 típico	< 1000 ppm

- Não contém.

Inicialmente foram utilizados eletrodos de aço AISI 304 na forma de barras cilíndricas maciças com 3/4" de diâmetro, com o objetivo de gerar os dados iniciais para o ajuste e desenvolvimento do processo. Nenhuma preparação especial foi realizada nessas barras, além de uma limpeza com solvente orgânico para a retirada de sujidades, proveniente das manipulações.

Para o desenvolvimento do processo de fusão de cavacos optou-se inicialmente por adotar eletrodos prensados de cavacos de aço AISI 304, novamente pela experiência adquirida com o material. Os cavacos foram obtidos a partir da usinagem em torno mecânico de uma barra cilíndrica de aço AISI 304, sob diferentes condições operacionais, velocidade de avanço, rotação e profundidade de corte e sem utilização de líquidos refrigerante ou lubrificante. Os cavacos obtidos apresentaram morfologias distintas, variando de acordo com as condições operacionais de usinagem, proporcionando assim uma quantidade de material com morfologia bastante heterogênea. Os cavacos foram coletados enquanto eram produzidos, tomando-se o cuidado de não permitir que entrassem em contato com outros materiais.

A prensagem dos materiais foi realizada na Faculdade de Engenharia Química de Lorena (FAENQUIL). Na oportunidade, foi utilizada uma prensa hidráulica aplicando-se a carga máxima de 20 toneladas em todas as operações de prensagem. Para a prensagem dos eletrodos, foi utilizada uma matriz com

seção retangular, gerando eletrodos com as seguintes dimensões: Comprimento de 400 mm; largura de 30 mm e; altura de 40 mm.

A altura depende da quantidade de material prensado, entretanto foi tomado todo cuidado possível para manterem-se quantidades constantes. A massa dos eletrodos de aço AISI 304 foi de aproximadamente 800 g.

Os eletrodos prensados de cavacos de Zircaloy foram fornecidos pela INB. Estes eletrodos foram prensados no mesmo equipamento utilizado para a prensagem dos eletrodos de aço AISI 304. A massa de cada eletrodo foi de aproximadamente 1000g.

Cuidados foram tomados para que os eletrodos, dos dois materiais, tivessem as mesmas dimensões após as prensagens, embora isso não garantisse que as relações entre as densidades aparentes e as densidades reais fossem as mesmas, devido às diferenças entre os módulos de elasticidade e dos coeficientes de atrito dos materiais.

#### **4.4 AS FUSÕES**

Apresenta-se na tabela 4.5 uma seleção de experimentos de fusão cujos resultados foram significativos para o estágio atual de desenvolvimento: do processo; do dispositivo funil-lingoteira e; da análise do comportamento dinâmico do arco elétrico.

Antes do início das fusões, a câmara do forno foi evacuada com bomba mecânica a pistão e preenchida com argônio grau técnico, procedimento realizado por três vezes, excetuando-se os casos nos quais as fusões foram realizadas sob vácuo.

Os eletrodos elaborados a partir de cavacos de Zircaloy prensados foram divididos axialmente em duas metades, para a realização dos experimentos 7 e 8, visando economizar material, embora mantendo a diagonal da seção transversal equivalente ao diâmetro do dispositivo funil-lingoteira.

Tabela 4.5. Características importantes dos experimentos de fusão.

Fusão #	Material e tipo de eletrodo	Corrente [A]	Pressão [mmHg]	Polaridade
1	304 / maciço Ø 3/4"	250	100	normal
2	304 / maciço Ø 3/4"	250 a 300	100	normal
3	304 / prensado	50 a 100	100	normal
4	304 / prensado	100	100	normal
5	Zircaloy / prensado	300 a 400	100	invertida
6	Zircaloy / prensado	300	100	invertida
7	Zircaloy / prensado	300	Vácuo mecânico	invertida
8	Zircaloy / prensado	300	Vácuo mecânico	invertida

#### 4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a aquisição de dados foi utilizado um computador com processador Intel 80486, modelo DX4-100 MHz, com memória RAM de 20 Mbyte e um disco rígido de 540 Mbyte. Foi utilizada uma placa de som marca Creative Labs, modelo *Sound Blaster VIBRA 16X CT 4170*. O conversor analógico digital da placa de som permitiu a digitalização do sinal analógico com resolução de 16 bit. A entrada utilizada foi a de linha, que tem impedância de 15 k $\Omega$  e amplitude máxima de sinal de 1 V, ou seja, 2 V<sub>pp</sub>. Apresenta-se na figura 4.4, a curva de resposta de frequência medida para a placa de aquisição de utilizada.

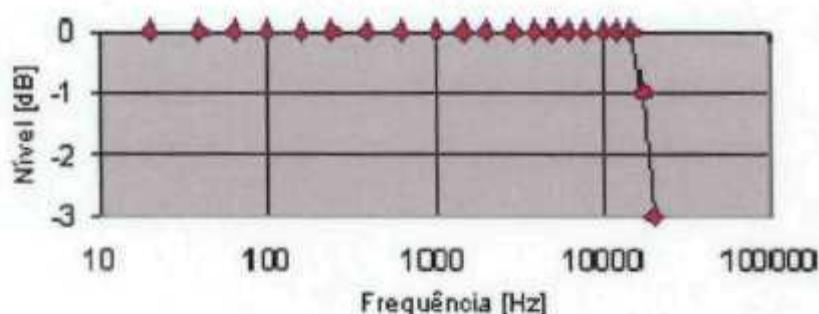


Figura 4.4. Curva de resposta de frequência da placa de som Sound Blaster 16, utilizada na aquisição de dados para este trabalho <sup>[75]</sup>.

Observa-se na figura 4.4 que a resposta de frequências no intervalo compreendido entre 110 Hz e 10 kHz é constante. A resposta para frequências maiores de 10 kHz foi considerada inicialmente como pouco importante, pois se situa acima da frequência de Nyquist, utilizada para os experimentos. Essa característica da curva de resposta possibilitou a utilização dos dados gravados sem a realização de correções para a análise.

O aplicativo DAQARTA (*Data Acquisition And Real Time Analysis*) <sup>[76]</sup>, foi utilizado para a digitalização, gravação e tratamento prévio de dados, rodando sobre o sistema operacional DOS 6. As taxas de aquisição de dados para todos os experimentos foram de 20,089 kHz (frequência de Nyquist de 10,044 kHz). A gravação do sinal foi realizada diretamente no disco rígido, no formato WAVE. O aplicativo DAQARTA possibilitou o registro no formato texto, na forma de uma tabela de tensão x tempo, nas unidades desejadas, do sinal do arco elétrico em intervalos de 50 ms. A quantidade máxima de pontos em cada intervalo de 50 ms é limitada pelo aplicativo DAQUARTA a 1024 pontos.

A discretização da voltagem máxima de entrada pico a pico foi feita com resolução de 16 bit, proporcionando a seguinte incerteza na medida:

$$\Delta V = \pm 2 V_{pp} / 65536$$

$$\Delta V \cong \pm 15 \mu V$$

Essa discretização impõe uma incerteza na medida da diferença de

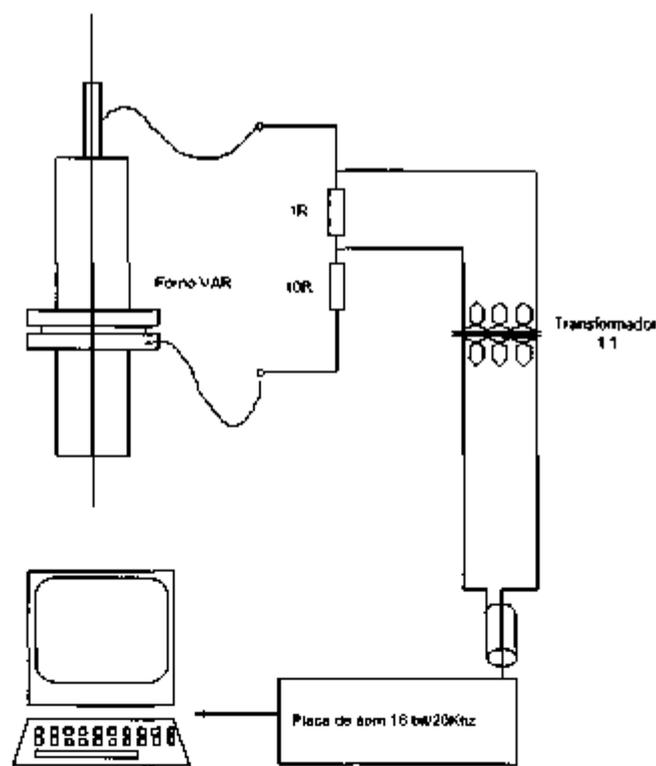
potencial do arco elétrico igual a:

$$\Delta V \cong \pm 165 \mu V$$

As imagens apresentadas neste trabalho foram obtidas através de uma câmara VHS com tempo de exposição de 1/2000 s, foco manual, exposição manual com uma razão de 30 quadros por segundo. Foi utilizado um filtro para a diminuição da intensidade luminosa incidente na lente. Para a digitalização das imagens da câmara VHS foi utilizada uma plataforma Pentium IV com placa de aquisição de áudio e vídeo e edição pelo aplicativo Studio 8®, permitindo a obtenção das seqüências de fotogramas apresentadas.

Para a adequação da diferença de potencial do arco elétrico aos limites da entrada de linha da placa de aquisição de dados foi utilizado um circuito constituído por resistores em série, como mostrado na figura 4.5. O circuito foi calculado de forma a minimizar o efeito da variação da resistência elétrica em função do aquecimento pela passagem de corrente. Foi utilizado um transformador impedâncias idênticas na entrada e na saída, com o objetivo de diminuir a interferência por sinais provenientes da rede elétrica.

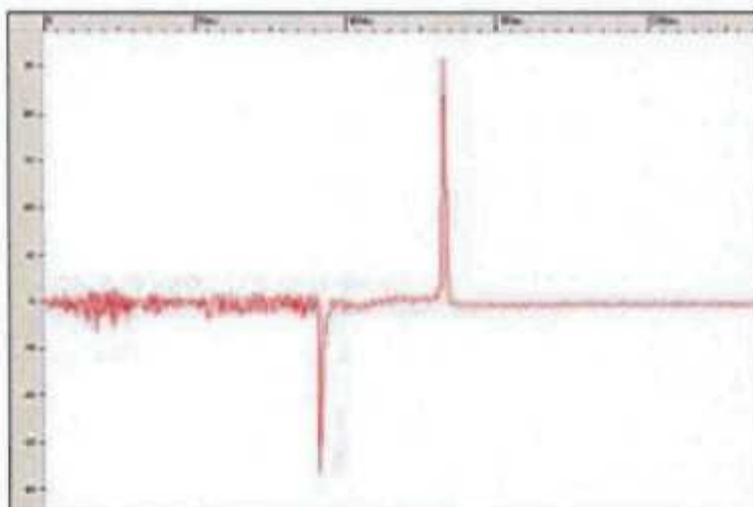
Na figura 4.5 é apresentado o desenho esquemático do sistema de aquisição de dados ligado à fonte de corrente.



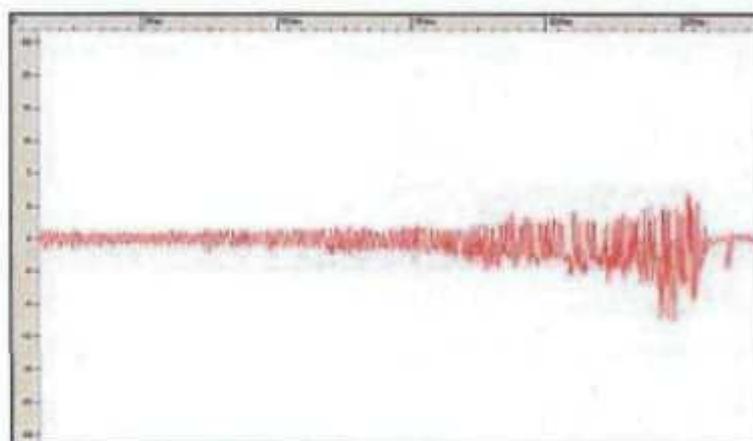
*Figura 4.5 . Desenho esquemático do sistema de aquisição de dados.*

#### **4.6 ESCOLHAS DE REGIÕES SIGNIFICATIVAS DOS SINAIS PARA ANÁLISE**

A escolha das regiões significativas para análise do arco elétrico foi focada no objetivo do desenvolvimento do dispositivo funil-lingoteira. A operação idealizada para o novo sistema concentra-se na manutenção de arcos elétricos longos, sem o curto circuito característico dos arcos curtos. Nas figuras 4.6 e 4.7 são mostrados dois trechos de dois oscilogramas típicos para cada tipo de arco elétrico.



*Figura 4.6 - Oscilograma típico de um arco elétrico curto. Neste oscilograma, as abscissas são hipotéticas, mas proporcionais ao sinal original.*



*Figura 4.7 - Oscilograma típico de um arco elétrico longo. Neste oscilograma, as abscissas são hipotéticas, mas proporcionais ao sinal original.*

Um trecho do sinal elétrico, equivalente ao da figura 4.7 foi escolhido para análise. O comprimento a ser analisado foi de 500 ms, dividido em onze trechos de 50 ms cada. O comprimento de 50 ms para análise é imposto pelo software de digitalização.

#### 4.7 ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS ADQUIRIDOS

A dimensão fractal do espaço de estados do sistema do arco elétrico foi determinada, inicialmente, para um intervalo de sinal contido exatamente numa região em que o arco elétrico estava sendo intensamente perturbado. O algoritmo de Grassberger-Procaccia foi utilizado para a determinação da dimensão de correlação. A partir disso pôde ser determinada a dimensão do espaço suporte para o espaço de estados, espaço de imersão, a partir da seguinte relação, discutida anteriormente:

$$d > d_u$$

Onde:  $d_u$  é a dimensão fractal do atrator;

$d$  é a dimensão do espaço de imersão sendo que;

$d$  é o primeiro número inteiro maior que  $d_u$ .

A escolha da função de autocorrelação em detrimento à média da informação mútua entre estados foi feita pela sua simplicidade de implementação e pela limitada quantidade de pontos para análise, 1024 pontos para cada seção com 50 ms.

Para a reconstrução do espaço de estados utilizaram-se os conceitos desenvolvidos no teorema de Takens. A determinação do intervalo de tempo, ou intervalo de imersão, para todos os trechos analisados foi determinada a partir das análises das integrais de autocorrelação, para cada trecho. A partir da reconstrução do espaço de estados foi possível efetuar uma avaliação dos expoentes de Liapunov para cada um dos trechos de 50 ms analisados, compreendendo os períodos de:

- Fusão do metal do eletrodo e acumulação de metal líquido e formação da gota;
- Formação do pescoço e perturbações da superfície de metal líquido e;
- Separação do metal, do eletrodo para a lingoteira.

Para a determinação do expoente de Liapunov foi tomado um primeiro

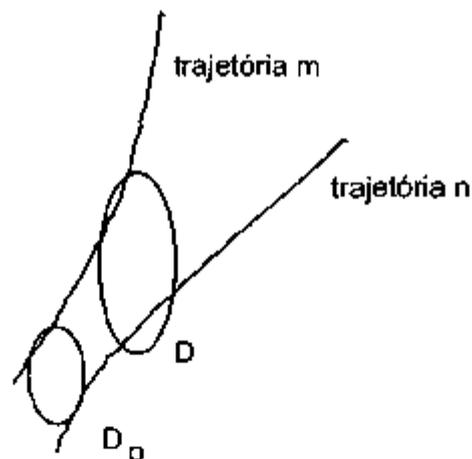
vetor contido no atrator, determinados os vetores subseqüentes mais próximos e, então, determinado o valor do maior expoente local de Liapunov para a evolução da dinâmica do sistema para alguns pontos, a partir do vetor escolhido, como apresentado na figura 4.8. A determinação foi feita através da definição do expoente de Liapunov, discutido anteriormente, através de equação 3.54, que é uma derivação imediata da equação 3.30.

$$D = D_0 e^{\lambda_1(t)} \quad \text{Eq. 3.54}$$

Onde  $\lambda_1$  é o maior expoente de Liapunov do sistema dinâmico;

$D_0$ , o diâmetro da esfera que contém dois vetores de órbitas paralelas;

$D$ , o diâmetro da esfera que contém vetores subseqüentes das órbitas paralelas, após um intervalo de tempo  $(t-t_0)$ .



*Figura 4.8 – Esquema gráfico para a avaliação do expoente de Liapunov, em cada trecho analisado.*

#### 4.8 METALOGRAFIA

Os lingotes obtidos foram fotografados digitalmente para registro dos experimentos.

Lingotes significativos foram seccionados ao longo do eixo longitudinal para uma avaliação metalográfica da morfologia de solidificação, com o objetivo de revelar peculiaridades do fluxo de calor e distribuição de temperaturas durante a solidificação.

As seções a serem analisadas foram lixadas e polidas. Para revelar a microestrutura e a macroestrutura, dos lingotes de aço inoxidável AISI 304, foi aplicada uma solução saturada de sulfato de cobre em ácido clorídrico, por um intervalo de tempo suficiente.

As superfícies foram analisadas por microscopia ótica e as imagens registradas digitalmente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 DISPOSITIVO FUNIL-LINGOTEIRA ACOPLADO AO FORNO VAR

A busca das soluções para os problemas operacionais e para os objetivos propostos no início deste trabalho levou ao desenvolvimento de um dispositivo a ser instalado no protótipo VAR, aqui chamado de dispositivo funil-lingoteira. A instalação deste dispositivo num forno VAR pode ser observada na figura 4.3. Um desenho com as dimensões principais do projeto do protótipo de funil é apresentado na figura 5.1. Nas figuras 5.2 e 5.3 são apresentadas fotografias do dispositivo. Na figura 5.2 observa-se a vista lateral do dispositivo funil-lingoteira, enquanto na figura 5.3 uma vista da porção superior pode ser observada mostrando a simetria azimutal do dispositivo; a foto foi realizada pouco antes do processo de fusão do eletrodo de cavacos de Zircaloy prensado, quando se utilizou um recobrimento de nitreto de boro na superfície interna do funil.

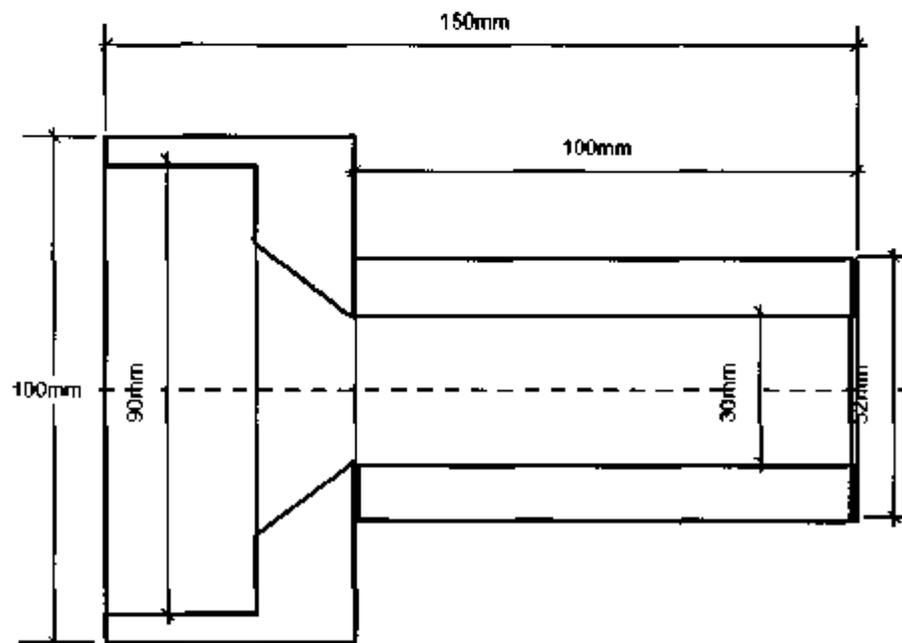


Figura 5.1 – Desenho do conjunto funil-lingoteira mostrando as dimensões principais do dispositivo.



*Figura 5.2 – Vista lateral do conjunto funil-lingoteira.*



*Figura 5.3 – Fotografia da vista superior do funil, observa-se a pintura com tinta a base de Nitreto de Boro para a fusão do eletrodo de cavacos de Zircaloy prensado.*

A adoção do recobrimento por nitreto de boro na superfície interna do funil, para as fusões dos eletrodos de cavacos de Zircaloy, deve-se ao seu comportamento como antiaderente e isolante térmico, pois o cobre apresenta alta molhabilidade pelo Zircaloy líquido, favorecendo a troca de calor, e resfriamento, do metal fundido e conseqüente solidificação. O filme de Nitreto de Boro visa possibilitar a manutenção do arco elétrico entre a extremidade do eletrodo e o anel superior do funil e o fluxo de metal líquido pela garganta do funil.

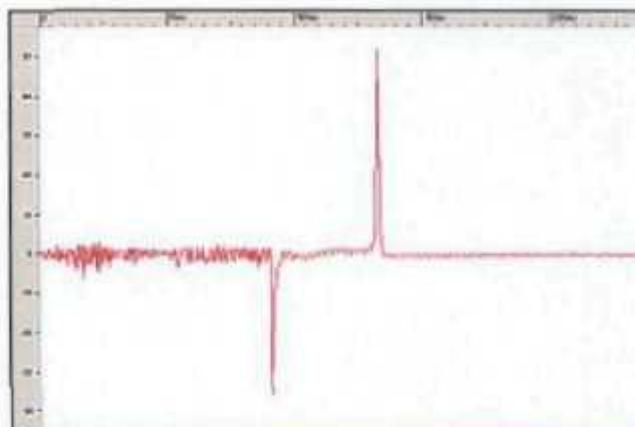
## 5.2 AS FUSÕES E OS LINGOTES OBTIDOS

O registro filmográfico das fusões possibilitou a seleção de seqüências de fotogramas de fases importantes do processo. Nas figuras 5.4 e 5.5 são apresentadas duas seqüências, com intervalo de 1/30 s entre fotogramas e velocidade de obturação 1/2000 s, em que ocorrem dois tipos de transferências do metal líquido do eletrodo para um substrato.

No conjunto de fotogramas da figura 5.4 pode-se observar a seqüência: do arco elétrico, ocorrência de curto-circuito e flash de luz que ocorre durante a extinção do arco elétrico e retorno ao arco elétrico. Tal comportamento é caracterizado pelo oscilograma da figura 4.6, repetida nesta seção.



Figura 5.4 - Seqüência de fotogramas mostrando o arco elétrico, curto circuito, flash de luz que ocorre durante a extinção do arco elétrico e retorno ao arco elétrico.



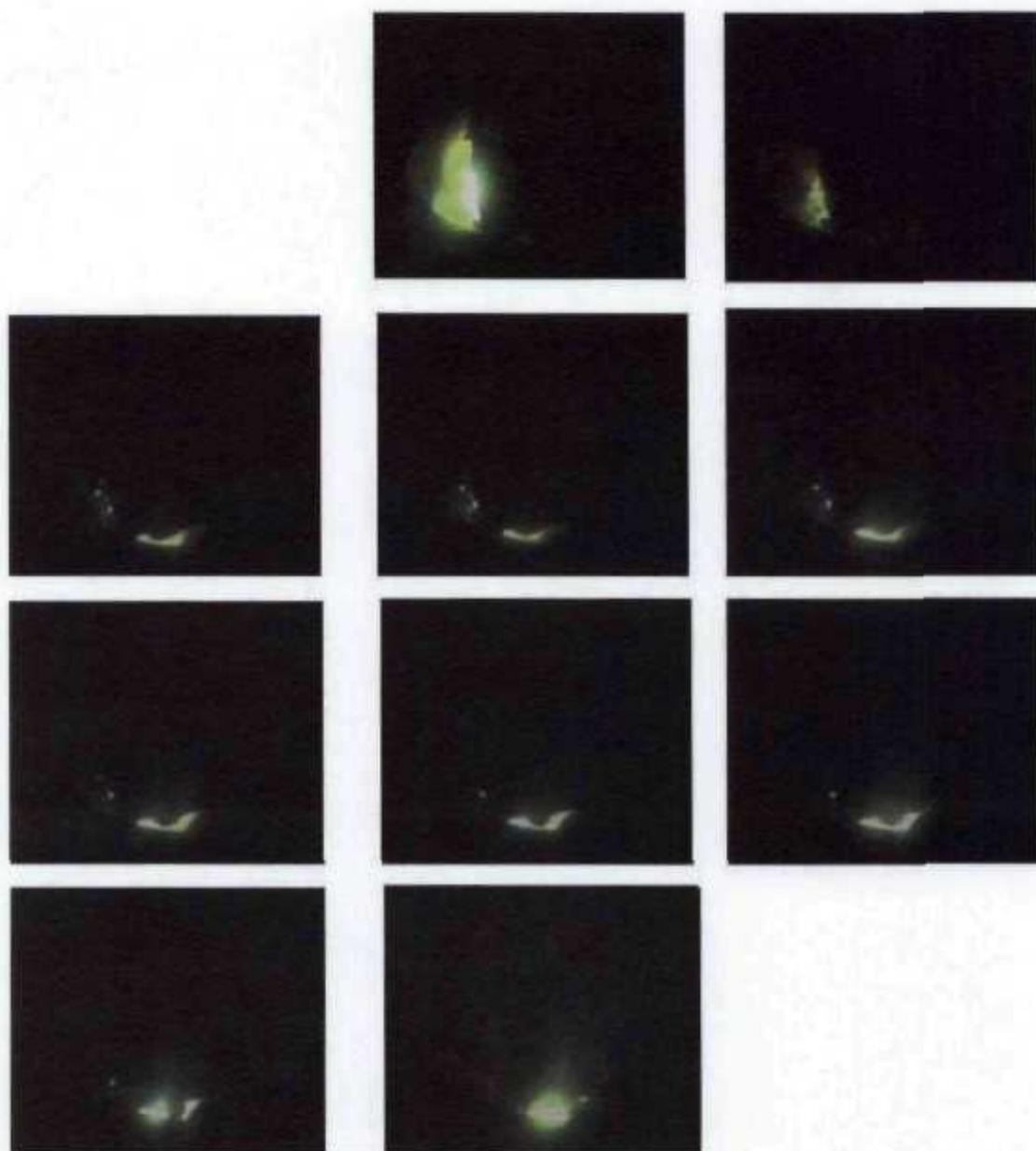
*Figura 4.6 - Oscilograma típico de um arco elétrico curto. Neste oscilograma, as abscissas são hipotéticas, mas proporcionais ao sinal original.*

A figura 4.6, repetida aqui nesta seção, mostra as oscilações iniciais do arco elétrico perturbado por oscilações na superfície do metal líquido na extremidade do eletrodo seguidas pelo curto circuito, caracterizado pelo pico negativo no oscilograma, seguindo-se de um pico positivo, o qual caracteriza o flash de luz observado no fotograma 6, da figura 5.4. As oscilações que seguem o pico positivo são aquelas do arco elétrico pouco ou nada perturbado pelas oscilações na superfície do metal líquido na extremidade do eletrodo. Essas oscilações são a resposta às oscilações no plasma do arco elétrico excitadas pela fonte de corrente,  $65,5 \text{ V} \pm V_{\text{ripple}}$  ( $V_{\text{ripple}}=0,744 \text{ Vpp}$ ).

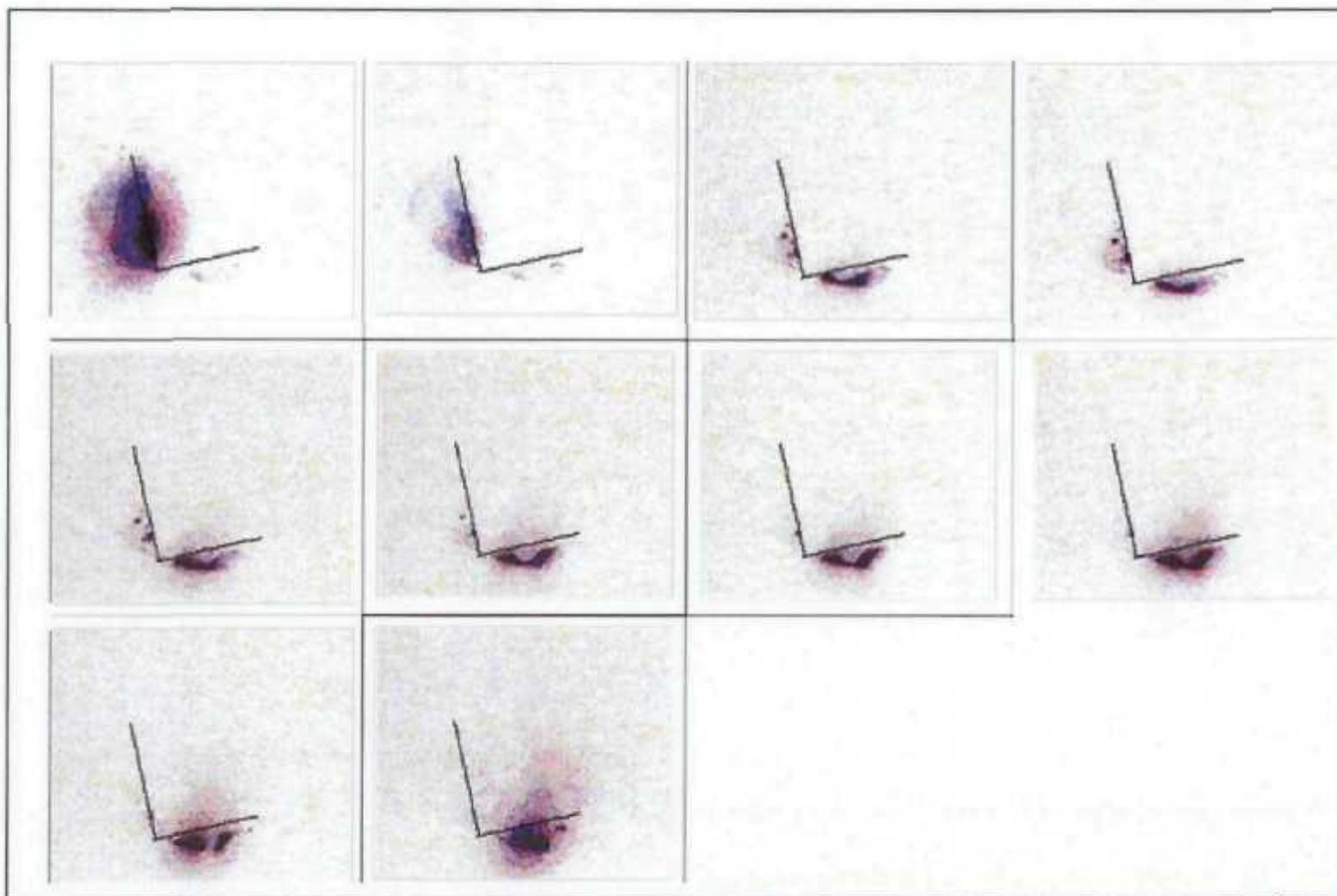
Na figura 5.4 podem-se observar pontos de metal incandescentes aparentemente suspensos. A estricção magnética, causada pela força de Lorentz, sobre a coluna de metal líquido, separa a coluna do eletrodo. Associa-se à passagem de corrente por uma coluna delgada de metal líquido o salpico de metal líquido, caracterizado pelos pontos alaranjados dos fotogramas. Num processo VAR convencional, tais gotas são responsáveis por não homogeneidades no lingote, pois solidificam fora da zona pastosa do lingote VAR.

O conjunto de fotogramas da figura 5.5 mostra o aspecto de um arco longo. Nessa figura pode-se observar a formação da gota de metal líquido na extremidade do eletrodo, a partir do segundo fotograma, Embora de difícil visualização nos fotogramas, o filme original mostra claramente a oscilação entre durante a formação das gotas. No penúltimo fotograma, a gota de metal líquido,

inicia o seu desprendimento da extremidade do eletrodo e, desprendida no último fotograma pode-se observar somente o arco elétrico ao fundo.

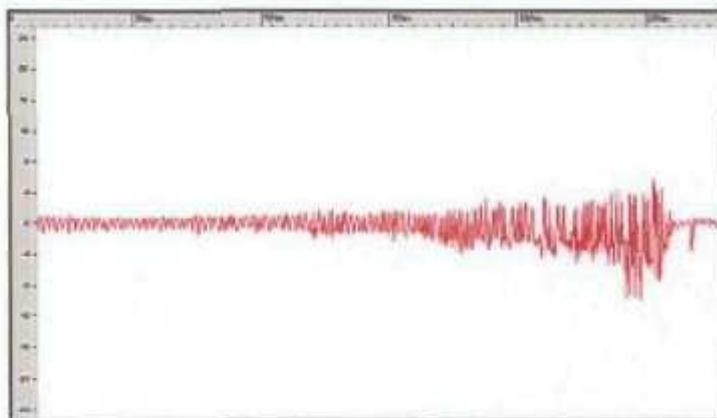


*Figura 5.5a - Seqüência de fotogramas mostrando o arco elétrico longo. Observa-se claramente a formação da gota de metal líquido e seu desprendimento. No primeiro e último fotogramas pode-se verificar a existência somente do arco elétrico.*



*Figura 5.5.b – visão em negativo da figura 5.15.a. Foi adicionado o perfil do eletrodo para facilidade de observação.*

Na figura 4.7, repetida nesta seção, verifica-se a oscilação da diferença de potencial, característica do acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo e a oscilação das gotas. Após a queda da gota e a variação da diferença de potencial do arco elétrico é característica do plasma do arco elétrico, e pode ser observada no final do oscilograma da figura 4.7.



*Figura 4.7 - Oscilograma típico de um arco elétrico longo. Neste oscilograma, as abscissas são hipotéticas, mas proporcionais ao sinal original.*

Durante a análise dos sinais elétricos dos experimentos realizados com o dispositivo funil-lingoteira, utilizado nas fusões deste trabalho, pôde-se confirmar que os salpicos são característicos nas fusões com arcos elétricos curtos, como observado anteriormente, altamente prejudiciais à homogeneidade do lingote.

As fusões realizadas seguiram o protocolo apresentado na seção anterior. A evolução dos resultados pode ser observada nas figuras 5.6 a 5.10.

Na figura 5.6 são apresentados os lingotes obtidos, sendo que o da esquerda, fusão 1, preencheu totalmente a lingoteira. Observou-se que para arcos curtos a diferença de potencial entre eletrodo e dispositivo funil-lingoteira situou-se entre 15 V e 20 V e, para arcos longos em torno de 30 V com picos de 40 V. Conseguiu-se sucesso na manutenção de arco elétrico estável e difuso com comprimento de cerca de 40 mm, fato impossível na operação do protótipo VAR, MUCSI<sup>(2)</sup>.



*Figura 5.6 - Lingotes obtidos nas fusões 1 e 2 da tabela IV.*

No segundo grupo de testes foram utilizados eletrodos prensados de aço AISI 304, com as dimensões apresentadas na tabela 4.5. A corrente utilizada foi reduzida por dois motivos, a saber: ser este o primeiro grupo de testes com eletrodos prensados, cuja densidade é cerca de 1/5 daquela do eletrodo maciço e; as dimensões da seção transversal do eletrodo serem muito maiores que a do furo do funil. Observou-se que a impedância ao fluxo de gotas líquidas ainda não era adequada para permitir o fluxo de gotas provenientes do eletrodo, pois, após um dado intervalo de tempo, as gotas provenientes da região das arestas dos eletrodos começam a aderir nas paredes do funil causando seu entupimento. Um lingote obtido é apresentado na figura 5.7. Juntamente é apresentada a imagem da vista inferior do lingote, região onde o arco elétrico se estabelece. Observam-se depósitos sólidos maciços originados de gotas metálicas que não se desprenderam do eletrodo e se solidificaram após a extinção do arco elétrico, ao final do processo. Uma discussão sobre as causas para o entupimento do furo do funil será apresentada mais adiante.



*Figura 5.7 - Fotografia da extremidade do eletrodo e do lingote obtido na fusão 3.*

Nas figuras 5.8, 5.9 e 5.10 são mostrados os resultados do grupo da fusão de eletrodos prensados de Zircaloy. No experimento da figura 5.8, fusão 4 da tabela 4.5, foi utilizado um eletrodo com as mesmas dimensões da fusão 3, visando-se efetuar a comparação entre os diferentes materiais sob condições análogas. O lingote obtido teve cerca de apenas 5mm de altura, devido ao entupimento do dispositivo funil-lingoteira. Deu-se continuidade à fusão do eletrodo, preenchendo-se o funil com Zircaloy e obtendo-se o material apresentado na figura 5.8. Apesar do insucesso aparente do experimento na obtenção de um lingote de Zircaloy algumas observações devem ser comentadas. Na extremidade do eletrodo forma-se um depósito de material sólido após a extinção do arco elétrico ao final do processo de fusão, esse fenômeno tem início no início da fusão, pois após o estabelecimento do arco elétrico o metal fundido não cai imediatamente, ao invés disso percola pelo eletrodo adentro, devido à viscosidade do Zircaloy líquido, e à continuidade dos vazios do eletrodo. A partir do momento que uma situação de equilíbrio ocorre, as gotas começam a se desprender seguindo duas formas principais de transferência: o gotejamento e o curto-circuito, que serão discutidas adiante. O óxido observado, na região próxima ao eletrodo, aparentemente formou-se após o final do procedimento de fusão e da

entrada de atmosfera oxidante na câmara do forno.



*Figura 5.8 - Fotografia do eletrodo, lingote e massa do entupimento do dispositivo funil-lingoteira da fusão 4, tabela 4.5.*

Com o objetivo de diminuir a influência das dimensões da seção transversal com relação ao furo do funil foram adotados dois procedimentos: primeiro diminuir a seção transversal do eletrodo, fusões 5 e 6, e, posteriormente diminuir a impedância do dispositivo funil-lingoteira, fusão 6. Na figura 5.9, é mostrado o lingote obtido com a diminuição da seção transversal do eletrodo pela metade. Formou-se um lingote contínuo, porém o entupimento do funil motivou a interrupção da fusão. Novamente o período transiente inicial com a coleção de metal líquido na extremidade do eletrodo se fez presente, como evidenciado na fotografia, esse depósito de Zircaloy maciço chega a ter 20 mm na lateral do eletrodo.

Nas fusões 4 e 5 realizadas sob atmosfera de argônio com pressão de 100 mmHg, o arco elétrico apresentou-se concentrado em pequenas áreas com movimentação errática na superfície da lingoteira, por vezes erodindo sua superfície. Esse comportamento foi bastante distinto daquele observado nas fusões do aço AISI 304, seja de eletrodos maciços ou de eletrodos prensados quando o arco mostrou-se difuso.



*Figura 5.9 - Fotografia do eletrodo e lingote obtido na fusão 5, tabela 4.5.*

A recorrência do entupimento do funil motivou a diminuição da impedância do dispositivo funil-lingoteira com o aumento do seu diâmetro médio e diminuição da conicidade do funil. Os resultados podem ser observados abaixo, na figura 5.10, com a formação de um lingote pouco maior que o anterior, aquele da fusão 5. O entupimento do furo ocorreu como na situação anterior, mostrando que a diminuição da impedância ao fluxo de gotas não foi suficiente para a solução do problema. Por outro lado, a condição operacional foi distinta de todas as anteriores com a adoção de evacuação mecânica contínua da câmara interna do arco elétrico. Nessa nova condição o arco elétrico mostrou-se difuso, totalmente distinto dos comportamentos das fusões 4 e 5. Adicionalmente sob vácuo o depósito de metal na extremidade do eletrodo diminuiu de forma considerável para cerca de 5 mm e, como era de se esperar o lingote apresentou um brilho metálico mais intenso que nos anteriores.

Em resumo, a configuração proposta para a modificação do processo VAR logrou sucesso para a fusão de eletrodos maciços e compactados de aço AISI 304L. Os lingotes obtidos apresentaram uma quantidade de defeitos de solidificação compatível com o estado da arte do desenvolvimento: porosidade e rugosidade superficial importantes. A consolidação dos eletrodos prensados de Zircaloy foi o processo que mais gerou dificuldades. O maior valor da capacidade térmica, da entalpia de mudança de fase sólido-líquido e da temperatura de fusão, com relação ao aço inoxidável, mostrou-se como o primeiro obstáculo à fusão do Zircaloy. Essas características da liga são exatamente aquelas que elegeram o processo VAR como adequado ao seu processamento, sendo necessária a

aplicação de correntes mais elevadas e polaridade invertida, relativas àquelas utilizadas na fusão do aço AIS 304L. As características termofísicas dos dois materiais são apresentadas na tabela abaixo, a título de comparação e para evidenciar a diferença citada no texto.

O maior problema enfrentado para a viabilização da utilização do dispositivo funil-lingoteira foi aquele relacionado à interação entre o Zircaloy líquido e a superfície de cobre do funil. As gotas de Zircaloy líquido ao entrarem em contato com a superfície do cobre rapidamente se solidificam, ao invés de correrem para dentro do funil, como acontece com o aço inoxidável. Sugere-se então, que o bom contato térmico entre o Zircaloy líquido e o substrato de cobre seja devido ao fenômeno da molhabilidade, na condição de alta temperatura na qual se encontra a superfície do funil. Esse bom contato térmico entre os materiais seria o responsável pelo disparo de uma solidificação inicial suficiente para ancorar subseqüentes gotas de Zircaloy líquido. Conseqüentemente ocorre o entupimento do funil.



*Figura 5.10 - Fotografia do eletrodo e lingote obtido na fusão 6, Tabela 4.5.*

A solução para este problema pode encontrar-se na utilização de um

revestimento antiaderente ou com a escolha de uma liga de cobre mais adequada para a construção do funil.

A atmosfera de operação do forno

### 5.3 ANÁLISES QUÍMICAS

Após o encerramento das fusões de eletrodos de cavacos de Zircaloy prensados, foram observados depósitos fuliginosos na lança e no interior da campânula do forno. Na superfície do funil e no fundo da lingoteira foram observados depósitos com aspecto de um filme metálico. Ambos os depósitos foram avaliados por microscopia eletrônica de varredura com o objetivo de conhecer a evolução da fusão do Zircaloy.

Amostras do depósito fuliginoso foram coletadas utilizando-se uma fita de carbono com cola. A amostra recebeu recobrimento de um filme de carbono. Na figura 5.11 é apresentada uma avaliação qualitativa obtida por microscopia eletrônica de varredura, técnica EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*), dessa amostra. Observa-se a presença bastante intensa de zircônio e, em menor quantidade, de estanho, constituintes principais da família de ligas Zircaloy. Podem ser observadas outras impurezas, provenientes do Zircaloy ou do próprio material de construção do protótipo. As impurezas principais detectadas têm origem no Zircaloy fundido, entretanto a quantidade dessas em relação à massa do eletrodo é insignificante, não necessitando maior atenção, a menos que se deseje projetar um equipamento industrial no qual painéis refrigerados deverão ser inseridos entre o forno e o sistema de bombeamento.

O fundo da lingoteira foi analisado por microscopia eletrônica de varredura, imagem e análise pela técnica de EDS. Nas figuras 5.12 e 5.13 são apresentadas as imagens do fundo da lingoteira com diferentes ampliações.

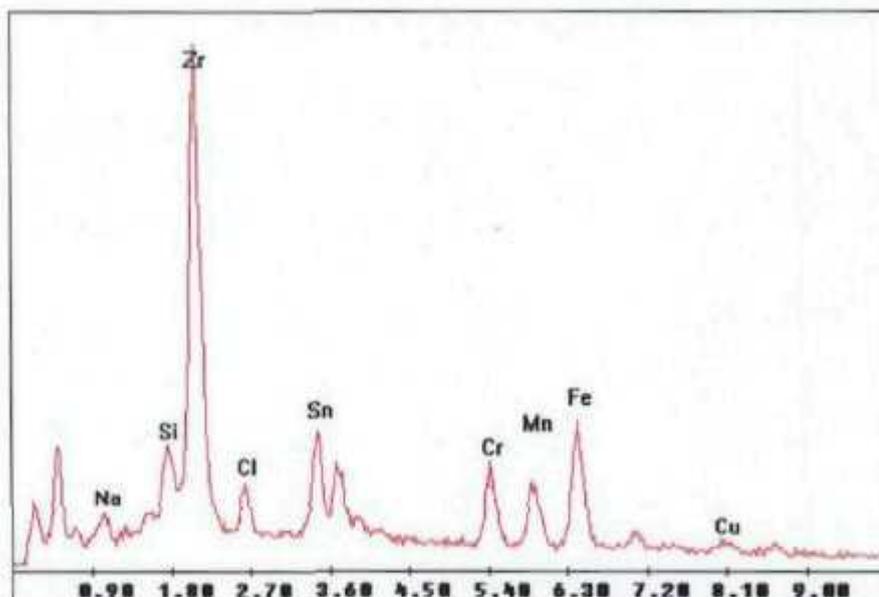


Figura 5.11 – Espectro obtido pela técnica EDS em microscopia de varredura da amostra do depósito fuliginoso encontrado nas superfícies internas do protótipo VAR após as fusões dos eletrodos de cavacos prensados de Zircaloy.

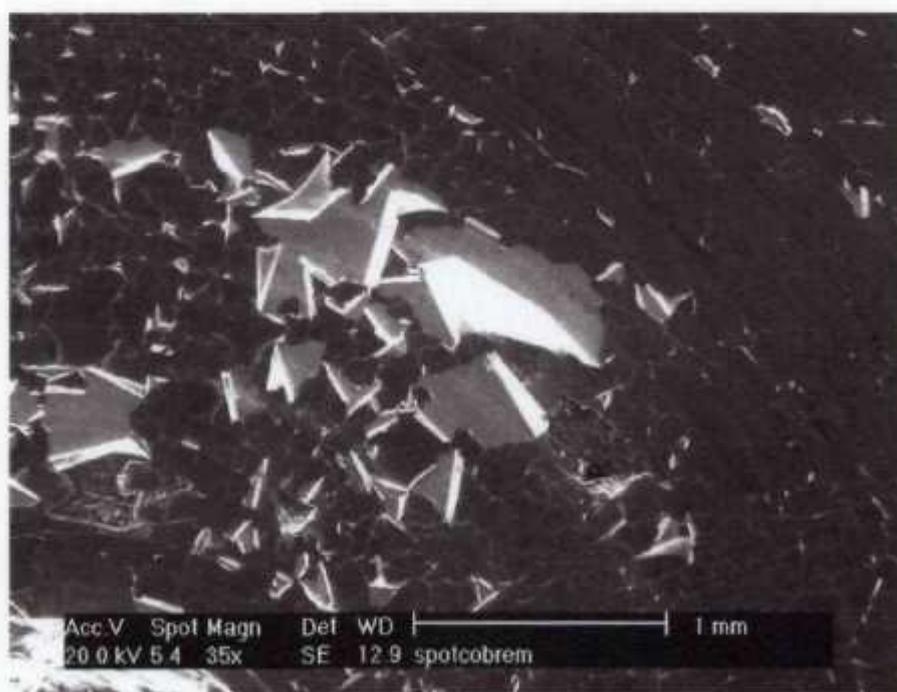


Figura 5.12 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do fundo da lingoteira, com depósito de filme metálico oriundo da fusão de cavacos prensados de Zircaloy.



Figura 5.13 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do fundo da lingoteira, com depósito de filme metálico oriundo da fusão de cavacos prensados de Zircaloy.

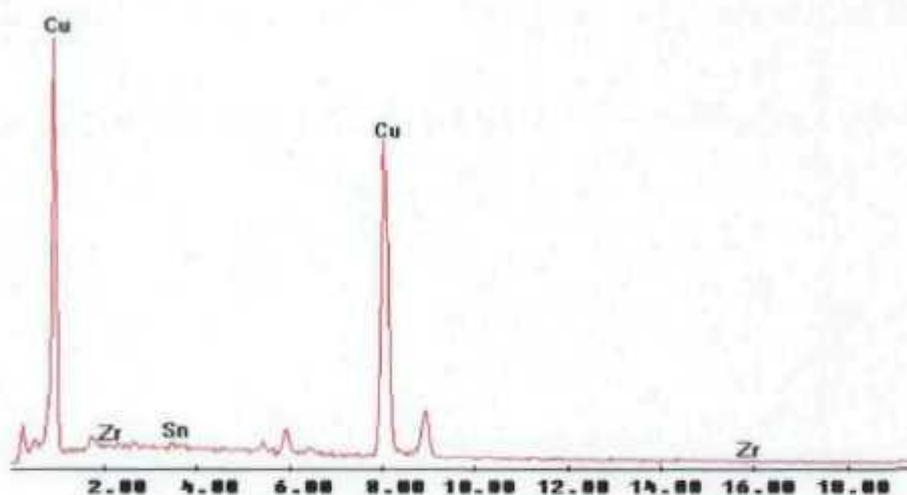


Figura 5.14 – Espectro obtido pela técnica de EDS em microscopia eletrônica de varredura para o fundo da lingoteira após fusão de eletrodos de cavacos prensados de Zircaloy.

Na figura 5.14 apresenta-se a avaliação pela técnica de EDS em microscopia eletrônica de varredura das regiões mostradas nas figuras 5.13 e 5.14. Pode-se observar claramente a presença do cobre como elemento fundamental na construção do conjunto funil-lingoteira. Pequenos picos sugerem

a presença de zircônio e eventualmente estanho, porém com pequenas quantidades. Como no caso dos depósitos fuliginosos, a quantidade de material depositada no fundo da lingoteira é tão pequena que a sua influência na composição da liga ou no balanço de massa eletrodo-lingote é insignificante.

#### 5.4 METALOGRAFIA

Na figura 5.15 é apresentada a seção longitudinal de um dos lingotes de aço inoxidável AISI 304, obtido a partir da fusão de um eletrodo de cavacos prensados. Pode-se observar a presença de grãos colunares com crescimento bastante distinto daqueles obtidos pelo processo. Essa diferença manifesta-se na isotropia do crescimento de grãos, figura 3.7 comparada à desta página.

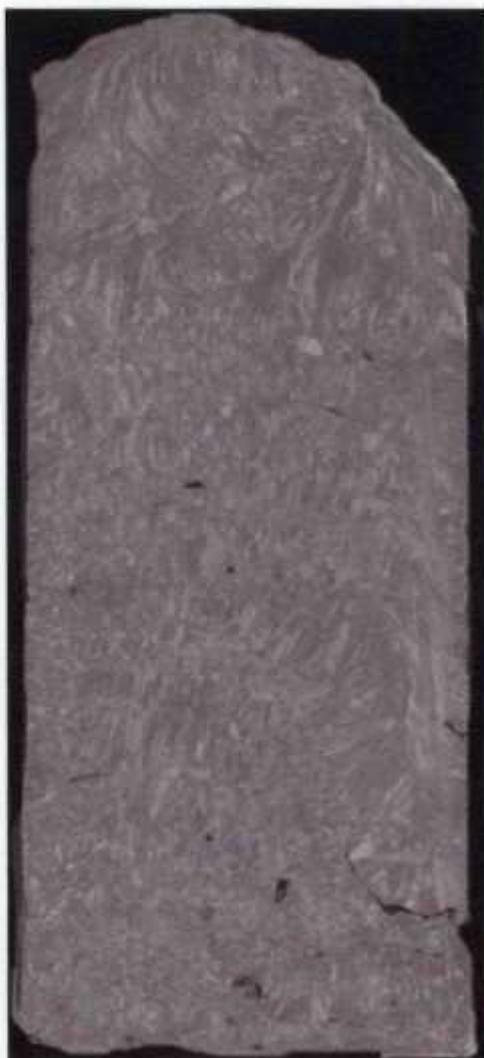
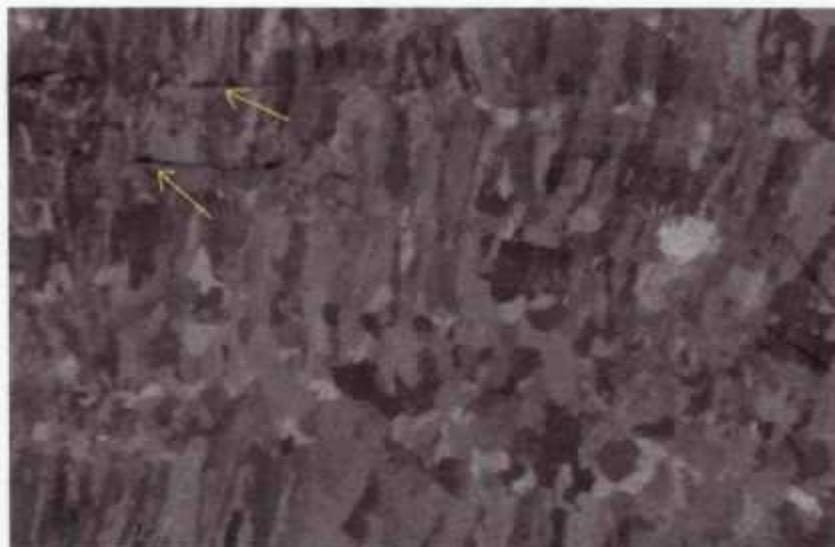


Figura 5.15 – Macrografia do lingote de aço inoxidável.

Uma segunda macrografia de uma região central do lingote é apresentada na figura 5.16.

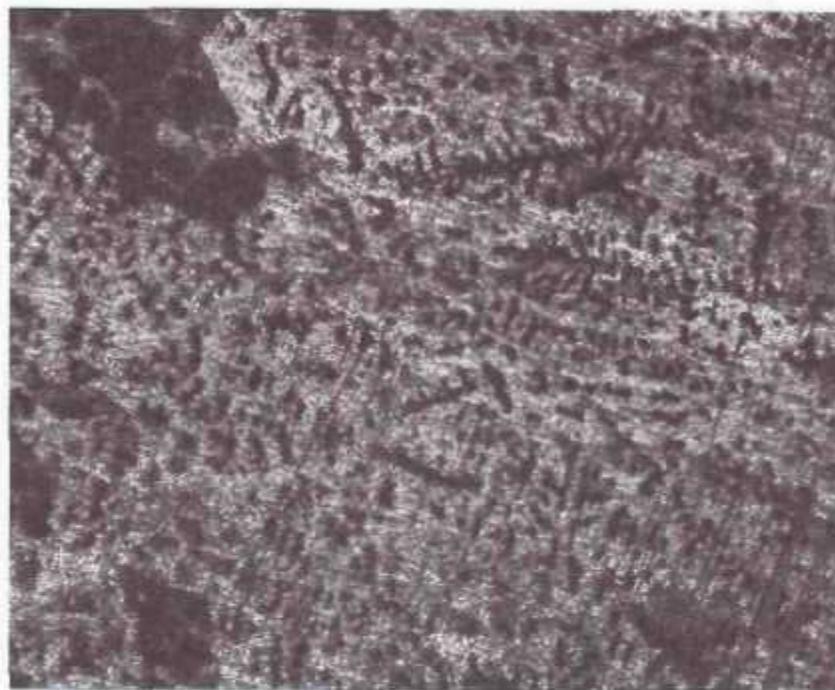


*Figura 5.16 - Macrografia da seção transversal de um lingote de aço AISI 304, obtido no protótipo VAR com a utilização do dispositivo funil-lingoteira.*

Na figura 5.16 pode ser observada a existência de grãos cujo crescimento não foi tão alongado quanto os produtos obtidos pelo processo VAR convencional, um dos objetivos desse trabalho. A presença de falhas de preenchimento pode ser observada nas regiões apontadas pelas setas na figura. Sugere-se que essas falhas de preenchimento são causadas pelo excessivo resfriamento do metal líquido e do material já depositado na lingoteira, evitando assim a continuidade local do lingote. O fato dessa falta de preenchimento ser localizada indica que a correção do defeito pode ter solução relativamente simples, com a correção do sistema de refrigeração e com o aumento do aporte térmico.

Na figura 5.17 é apresentada uma micrografia típica do centro de um lingote de aço AISI 304. Observa-se a presença de uma formação dendrítica sem orientação preferencial, típica do crescimento equiaxial. Esse tipo de microestrutura não foi encontrado na região próxima à parede da lingoteira. Estima-se que para diâmetros maiores o gradiente térmico no lingote em solidificação, é bastante diminuído, pela inexistência da fonte de calor no seu topo favorecendo a presença extensa de grãos equiaxiais. Pelo mesmo motivo

espera-se que as falhas de preenchimento tenham sua presença diminuída.



*Figura 5.17 – Microestrutura típica da seção transversal de um lingote de aço AISI 304, obtido no protótipo VAR com a utilização do dispositivo funil-lingoteira. Aumento de 100x, em microscópio ótico digitalizado, superfície atacada com solução supersaturada de sulfato de cobre.*

## 5.5 QUALIFICAÇÃO DA DINÂMICA DO ARCO ELÉTRICO

Nas figuras 5.18 a 5.20 são apresentados períodos longos de sinal, dos quais foram retirados os trechos apresentados nas figuras 4.6 e 4.7. Os valores dos eixos das abscissas são valores relativos, não representando o valor exato da diferença de potencial do arco elétrico, embora o fator de escala seja o mesmo para todos os oscilogramas. O eixo das ordenadas representa a evolução temporal exatamente.

Na figura 5.18, é apresentada a evolução das oscilações da diferença de potencial de um arco elétrico longo, com cerca de 40 mm. Pode-se observar que os picos de tensão situam-se em torno de 10 unidades. A situação com arco curto, cerca de 10 mm, na qual ocorre o curto circuito com metal líquido proveniente do eletrodo fundido, pode ser verificada na figura 5.19. Os picos de tensão nesse caso chegam freqüentemente a 50 unidades. Na figura 5.20 pode-se observar a condição experimental em que a fusão do eletrodo ocorreu desde o arco curto até o arco longo. Claramente verifica-se a mudança da amplitude das oscilações. Nesse caso a tensão de corrente contínua nessa condição muda de cerca de 18 V para cerca de 35 V.

Com o aumento da tensão de corrente contínua do arco elétrico de 18 V para 35 V, promovido pela utilização do dispositivo funil-lingoteira aumentou-se, conseqüentemente, a potência gerada pelo arco elétrico para uma mesma corrente de operação do equipamento, aumentando assim o consumo do eletrodo, como se pode apreciar pelo equacionamento abaixo:

Seja  $P$  a potência elétrica gerada por um arco elétrico, com diferença de potencial  $V$  e corrente elétrica  $I$ :

$$P = V \cdot I \quad \text{Eq. 5.1}$$

A Energia  $\Delta Q$  por unidade de tempo necessária para aquecer e fundir uma quantidade de liga metálica é dada pela relação a seguir:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} c_p \Delta T + \frac{\Delta m}{\Delta t} c_f \quad \text{Eq. 5.2}$$

Onde:  $\Delta Q$  é a quantidade de energia necessária para aquecer e fundir uma certa quantidade massa;

$\Delta m$  é a quantidade de massa;

$\Delta T$  é a variação da temperatura e;

$c_p$  e  $c_f$  são respectivamente a capacidade térmica e as energias de mudança de fase por unidade de massa.

Das equações 5.1 e 5.2 emerge a seguinte relação:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = (V \cdot I) / (c_p \Delta T + c_f) \quad \text{Eq. 5.3}$$

Como o aumento na diferença de potencial com relação à operação do protótipo VAR foi de 18 V para 35 V, pode-se observar que a maior potência elétrica atingida aumenta linearmente e conseqüentemente a eficiência do sistema, para mesmos valores de corrente de alimentação do arco elétrico, como se pode observar pela equação 5.3.

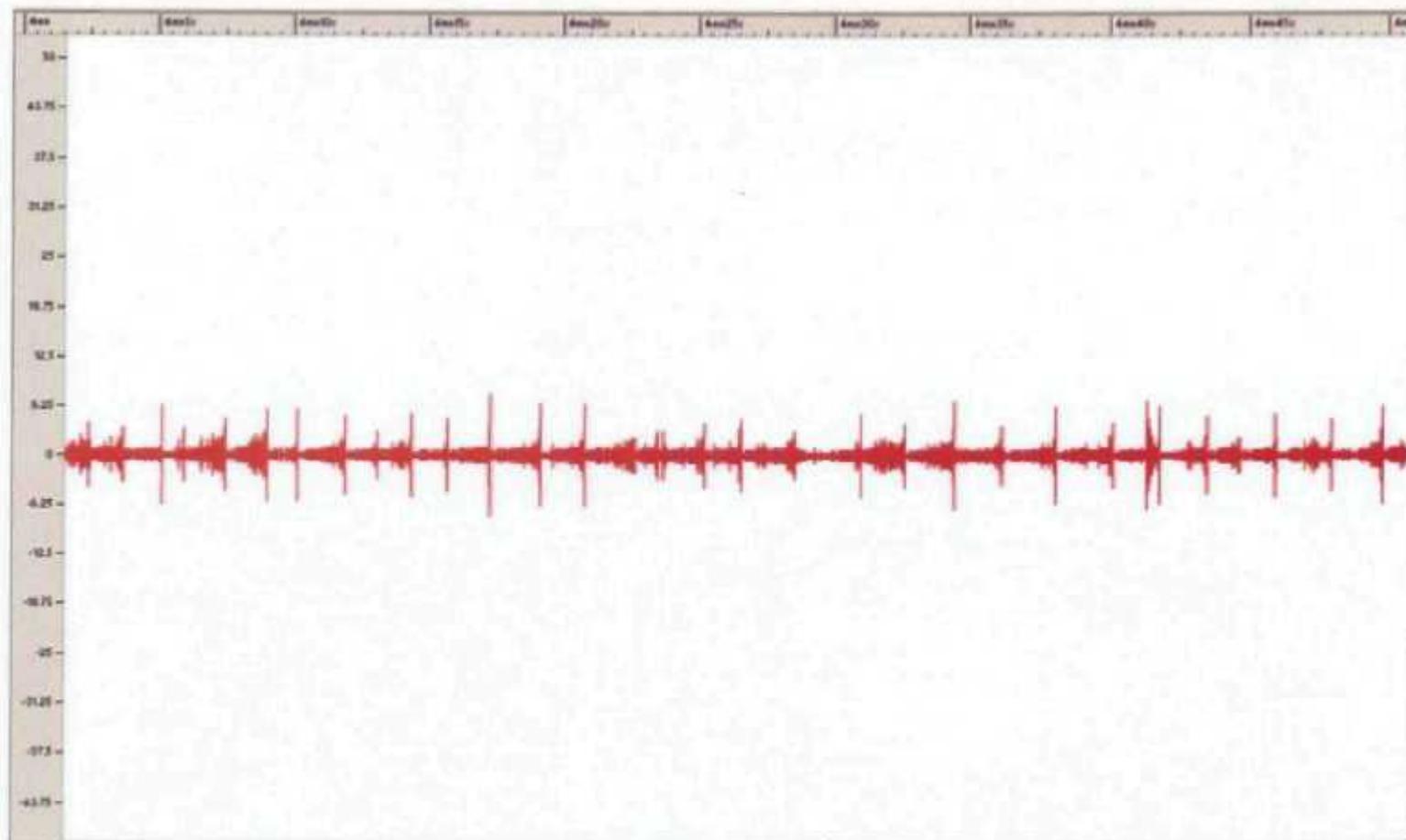
O interesse no aumento do rendimento do processo levou a focar a avaliação do comportamento das oscilações do arco elétrico na situação do arco elétrico longo, figura 5.19. Como apresentado anteriormente, um sinal de oscilação da diferença de potencial do arco elétrico com um intervalo de tempo de 500 ms foi escolhido para análise.

Na figura 5.21 é apresentado um intervalo de tempo escolhido, contendo a região de transferência do metal líquido do eletrodo para a lingoteira. Junto ao oscilograma da diferença de potencial estão presentes o espectro de potência e a função de autocorrelação para o mesmo trecho. Juntamente ao oscilograma são apresentados o espectro de potência e a função de autocorrelação. Como comentado anteriormente, a função de autocorrelação foi utilizada para a determinação do intervalo de imersão, na reconstrução do espaço de estados. A observação do espectro de potência dos sinais ofereceu uma boa indicação do

comportamento do arco elétrico.

A evolução do espectro de potência para a diferença de potencial do arco elétrico pode ser observada na figura 5.22, de 5.22.1 até 5.22.11. Nestas figuras, são apresentados todos os trechos que compõem o oscilograma desde o acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo até a sua transferência e restabelecimento de arco elétrico não perturbado por oscilações no metal líquido. Ao lado de cada um dos trechos são apresentados os espectros de potência e a respectiva função de autocorrelação. A função de autocorrelação foi utilizada para a escolha do intervalo de imersão para a reconstrução do espaço de estados.

Uma avaliação da função de autocorrelação mostra que da figuras 5.22.1 até a figura 5.22.4, um ponto de inflexão aparece no quarto ou quinto ponto. Este ponto de inflexão transforma-se num mínimo nas curvas das figuras 5.22.5 até 5.22.8. Esses comportamentos desaparecem nas curvas das figuras 5.22.9 até 5.22.11, notadamente quando o metal líquido se desprende do eletrodo e o arco elétrico apresenta-se não perturbado por oscilações devidas ao metal líquido. O ponto correspondente ao valor 35 apresenta um comportamento comum a todas as curvas da função de autocorrelação como o mínimo que se manifestou para todos os trechos.



*Figura 5.18 - Oscilograma de um arco curto. Observe-se a repetição dos curto circuitos que seguem as perturbações na diferença de potencial do arco elétrico. Neste oscilograma, as abscissas são hipotéticas, mas proporcionais ao sinal original*

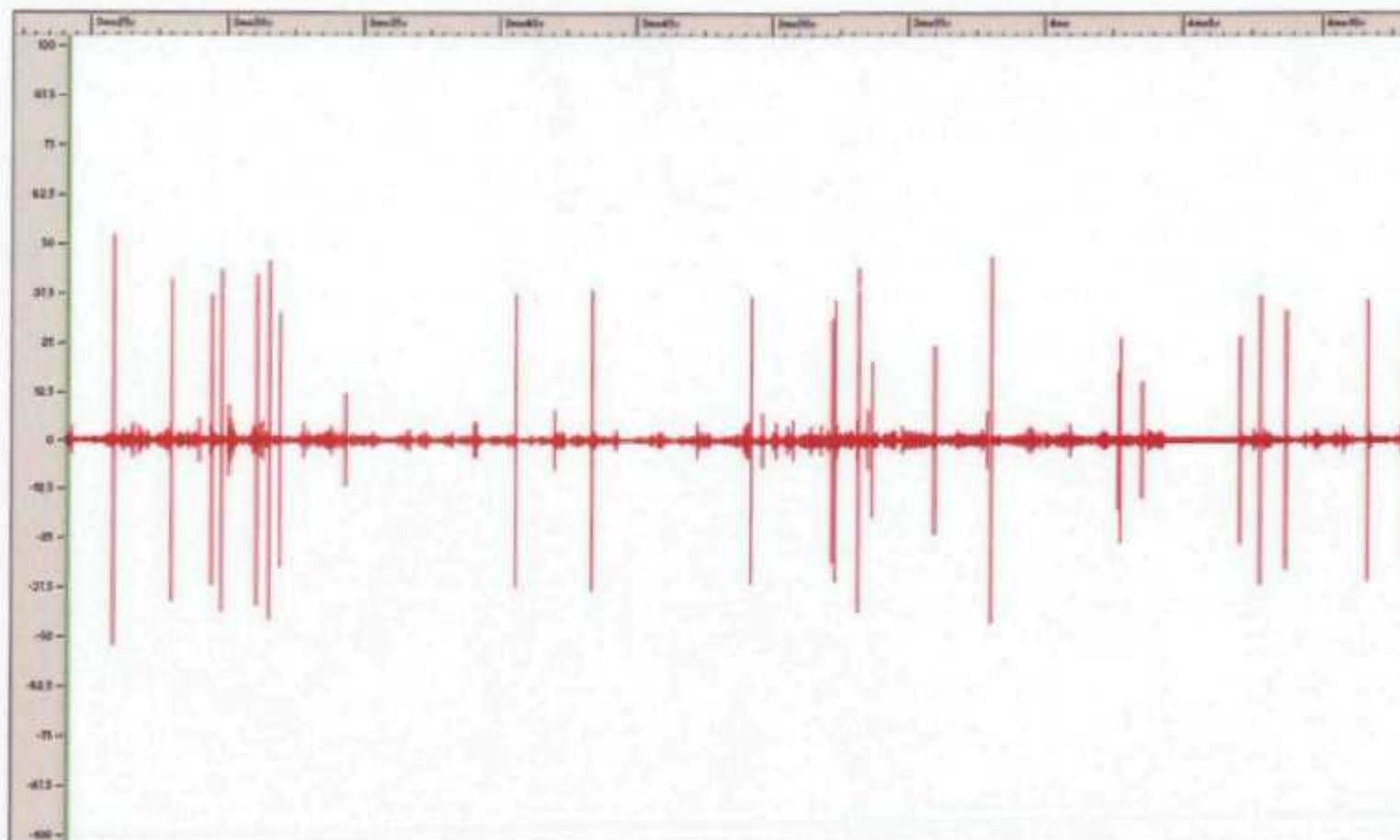
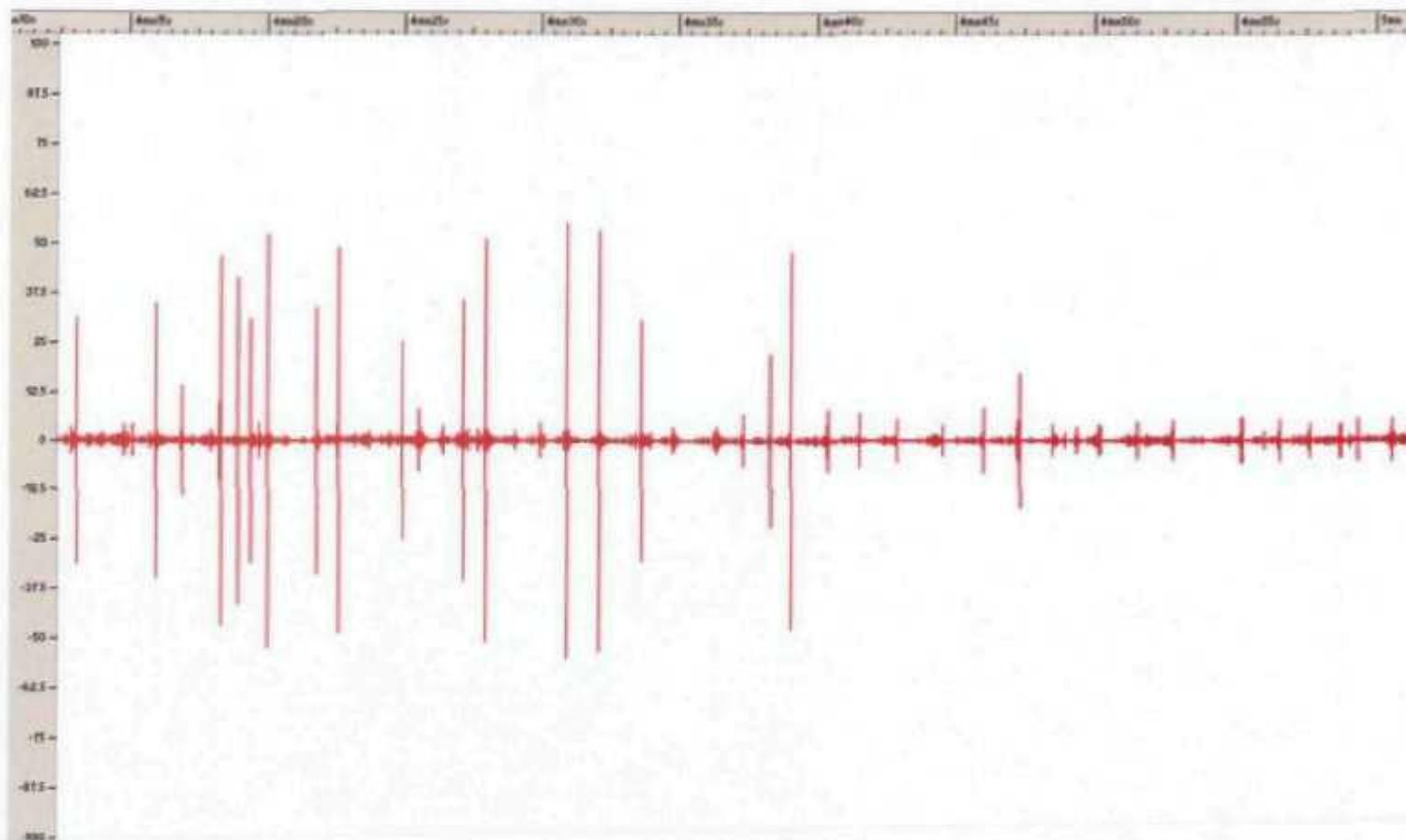


Figura 5.19 - Oscilograma de um arco longo. Não podem ser observados os curto circuitos que seguem as perturbações na diferença de potencial do arco elétrico. Neste oscilograma, as abscissas são hipotéticas, mas proporcionais ao sinal original



*Figura 5.20 - Oscilograma de um arco longo. Não podem ser observados os curto circuitos que seguem as perturbações na diferença de potencial do arco elétrico. Neste oscilograma, as abscissas são hipotéticas, mas proporcionais ao sinal original*

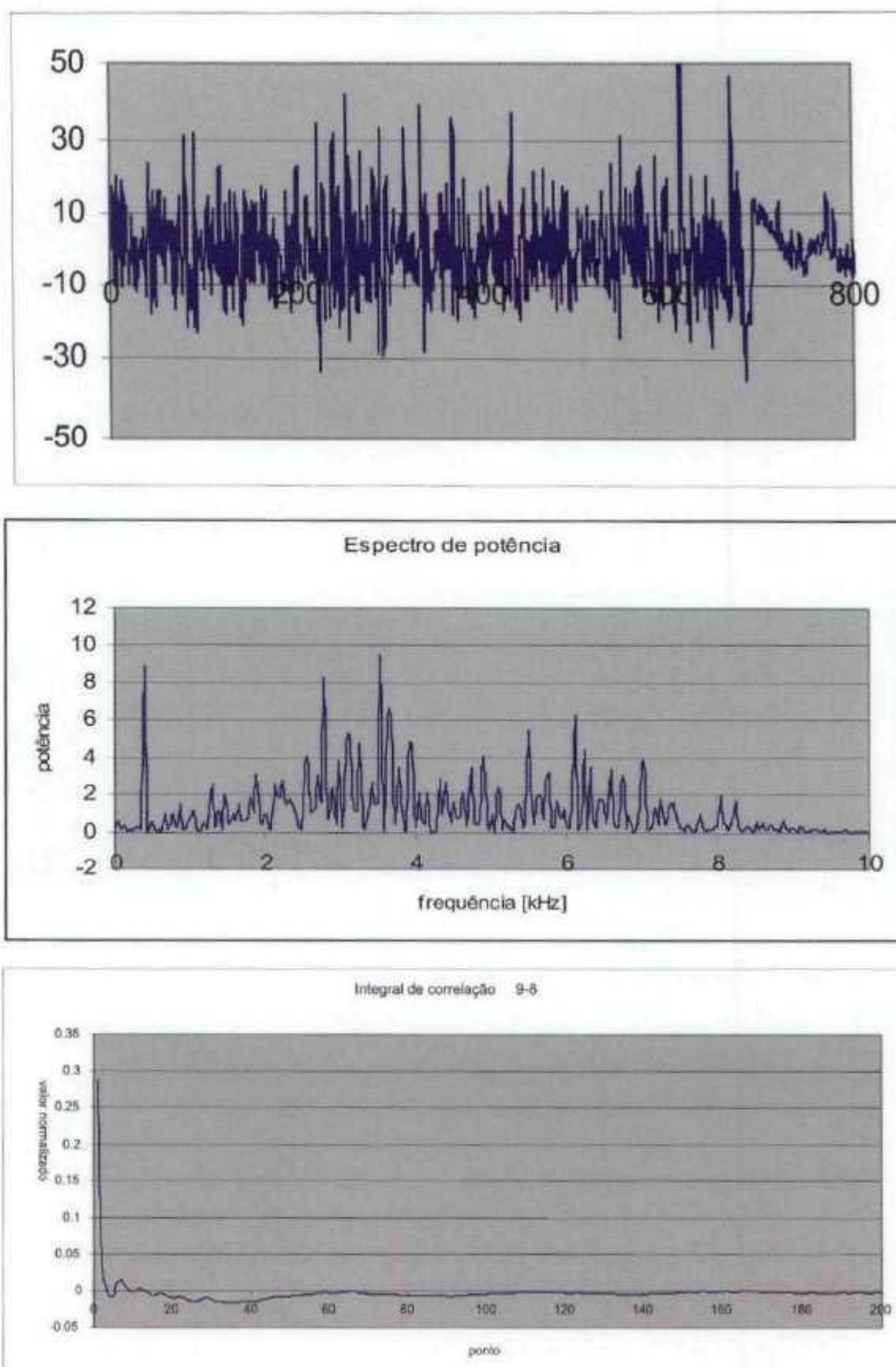


Figura 5.21 – Oitavo trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico intensamente perturbado pelo acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo, seguido pelo desprendimento do metal líquido.

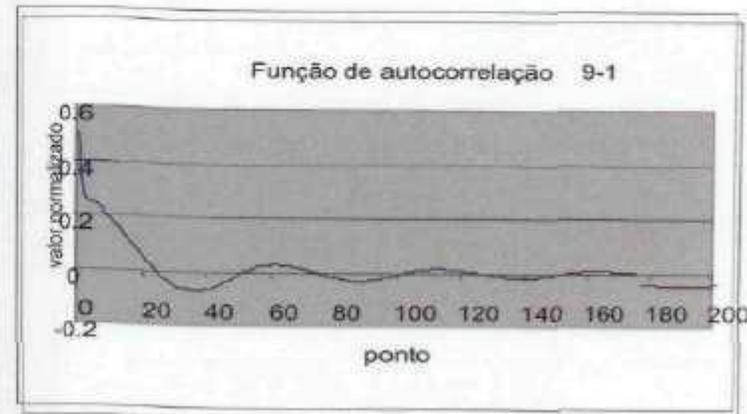
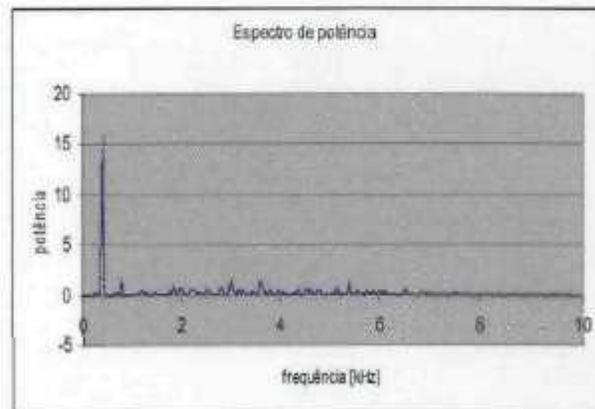
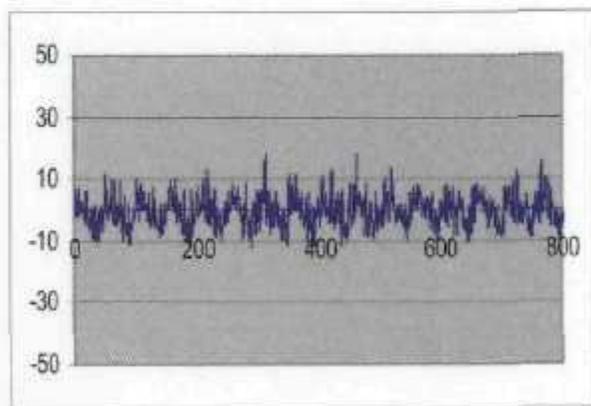


Figura 5.22.1 – Primeiro trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico perturbado pelo acúmulo crescente de metal líquido na extremidade do eletrodo.

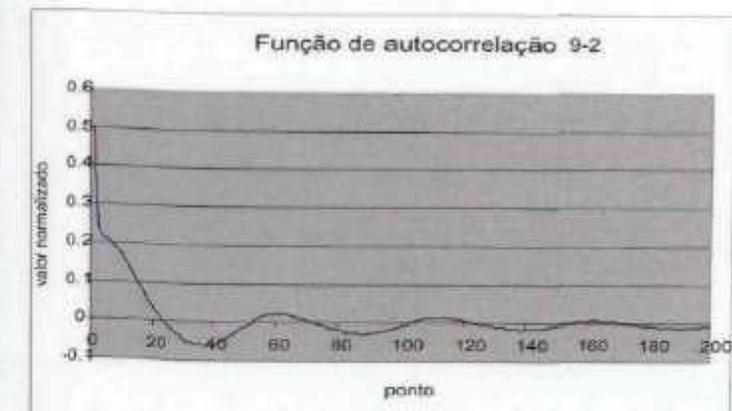
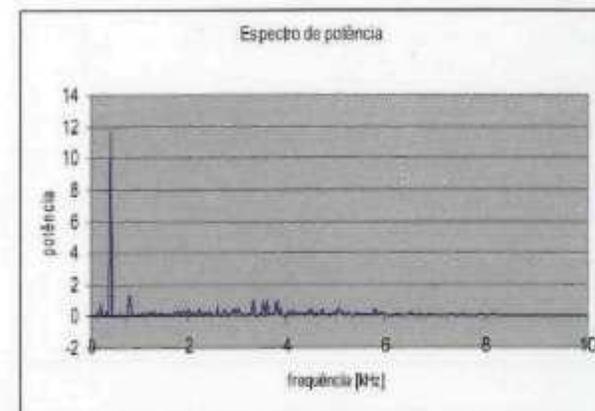
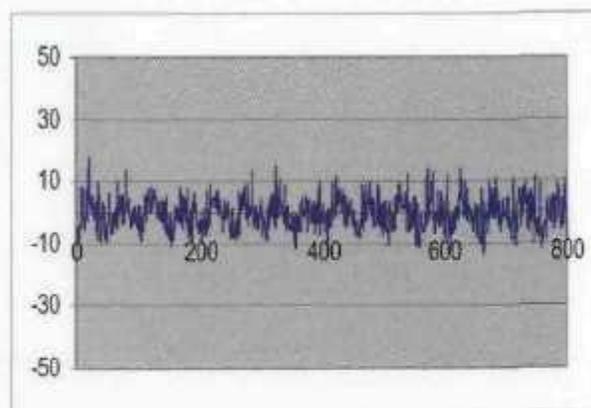


Figura 5.22.2 – Segundo trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico perturbado pelo acúmulo crescente de metal líquido na extremidade do eletrodo.



Figura 5.22.3 – Terceiro trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico perturbado pelo acúmulo crescente de metal líquido na extremidade do eletrodo.

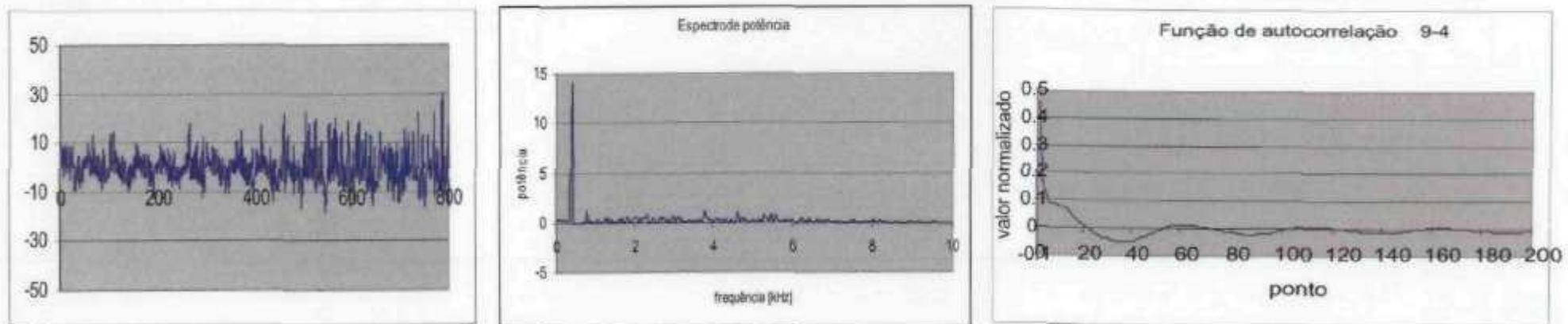


Figura 5.22.4 – Quarto trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico perturbado pelo acúmulo crescente de metal líquido na extremidade do eletrodo. Oscilações aumentam de uma forma mais intensa após a metade do trecho.



Figura 5.22.5 – Quinto trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico intensamente perturbado pelo acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo.

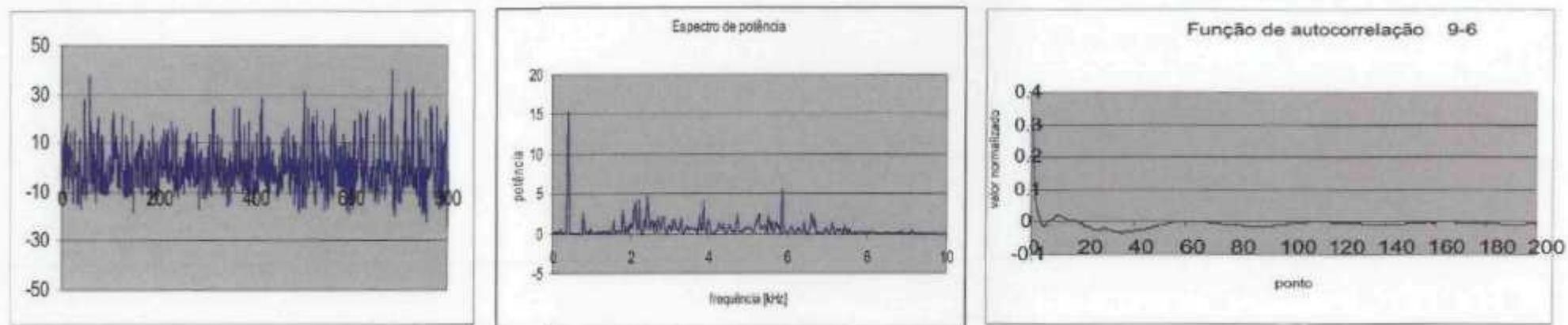


Figura 5.22.6 – Sexto trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico intensamente perturbado pelo acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo.

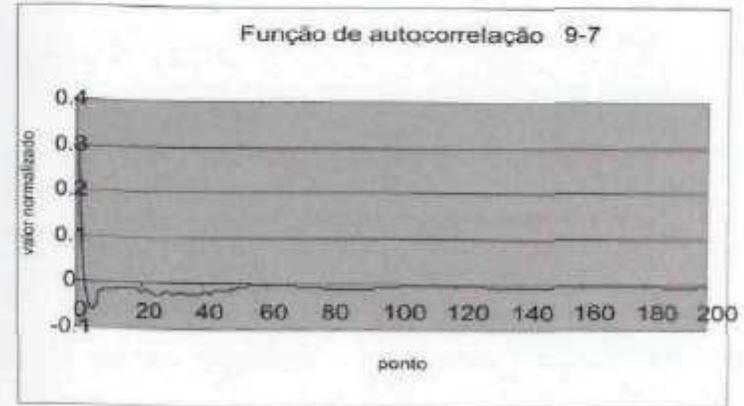
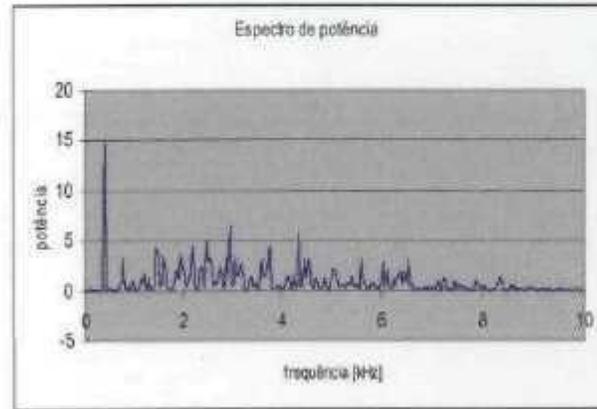
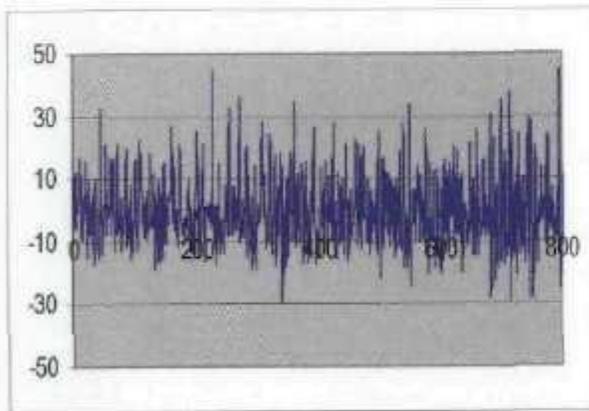


Figura 5.22.7 – Sétimo trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico intensamente perturbado pelo acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo.

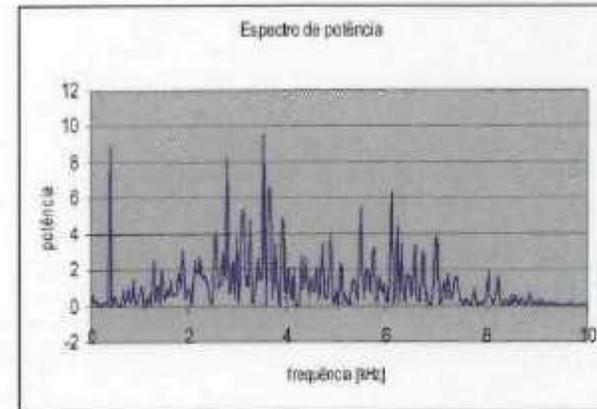
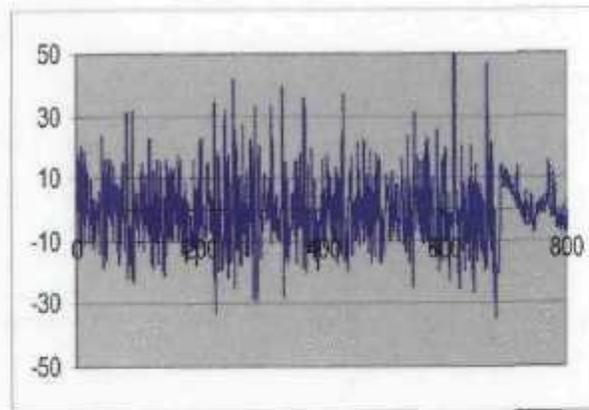


Figura 5.22.8 – Oitavo trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico intensamente perturbado pelo acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo, seguido pelo desprendimento do metal líquido.

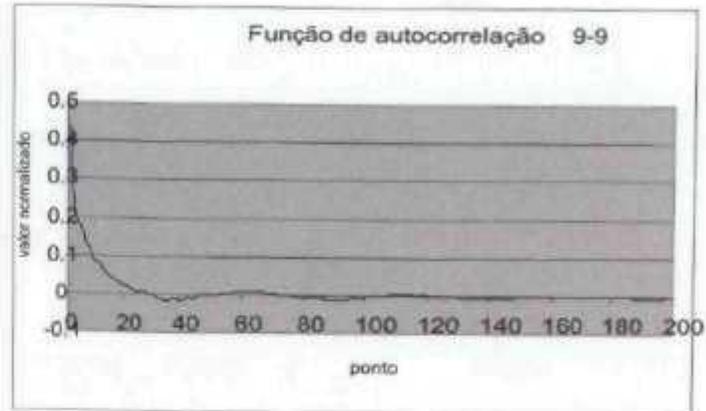
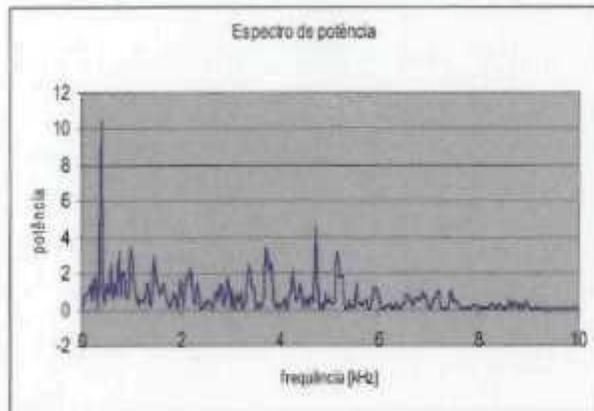
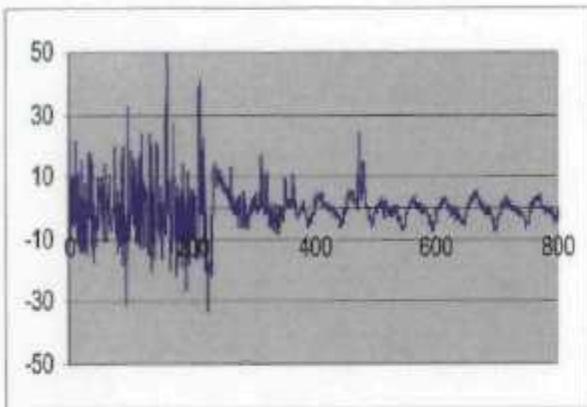


Figura 5.22.9 – Nono trecho do sinal de uma gota. Região de desprendimento do metal líquido na extremidade do eletrodo seguido pelo arco não perturbado. O espectro de potência começa a apresentar uma mudança significativa.

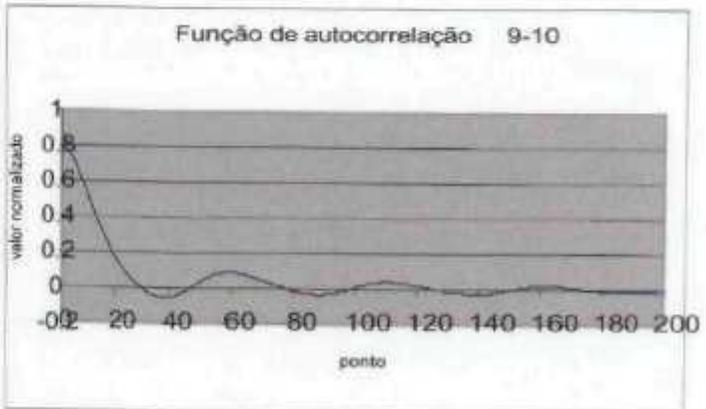
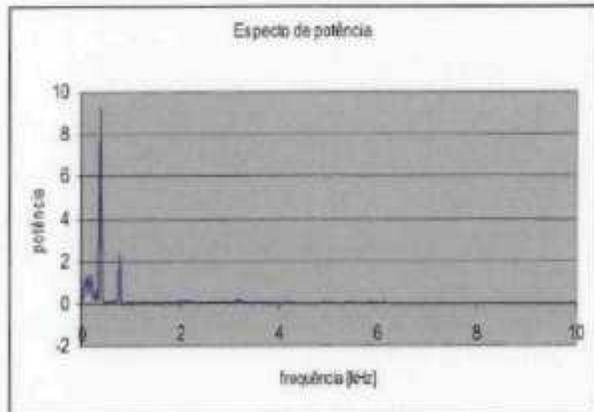
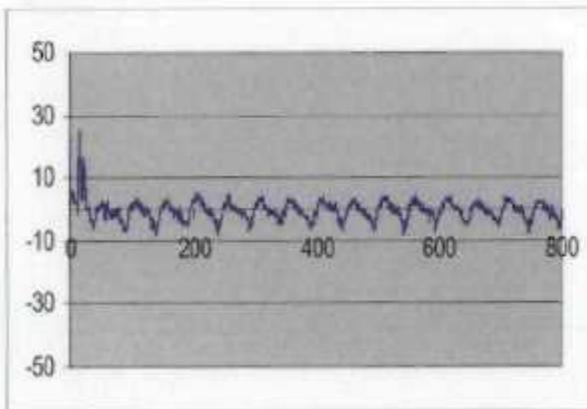


Figura 5.22.10 – Décimo trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico nada ou pouco perturbado pelo acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo. Espectro de potência peculiar.

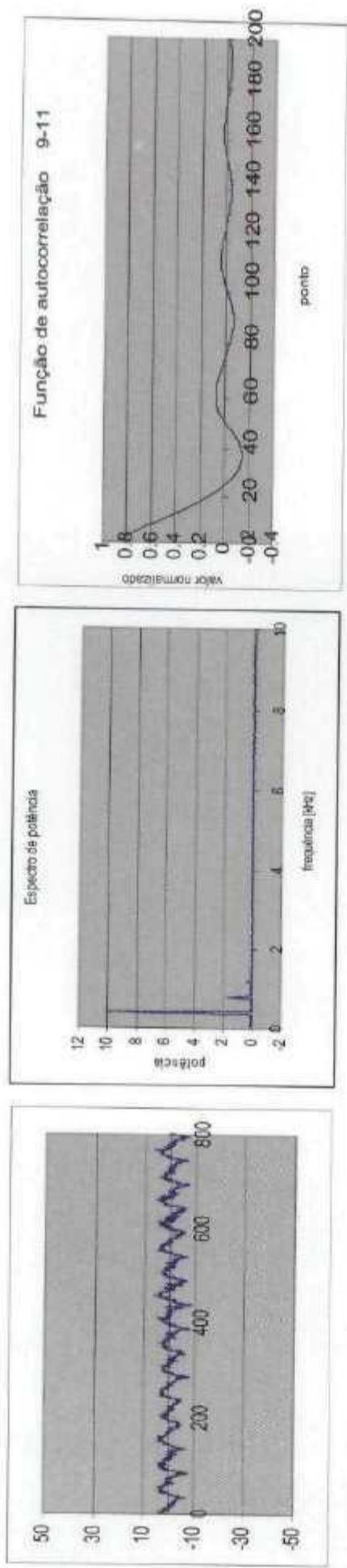


Figura 5.22.11 – Décimo primeiro trecho do sinal de uma gota. Arco elétrico nada ou pouco perturbado pelo acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo. Espectro de potência peculiar.

### 5.5.1 DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL

As curvas para a determinação da dimensão fractal, determinada a partir da dimensão de correlação, pode ser observada nas figuras 5.23 e 5.24. Na figura 5.23 é apresentado o conjunto de curvas da dimensão possível em função do valor do raio da hiper-esfera, de zero até 50000. O comportamento assintótico para o zero tem a interpretação clássica: de como um elemento com um dado volume ou dimensão é percebido a grandes distâncias, por exemplo, uma galáxia distante que é percebida como um ponto – dimensão zero - aqui da Terra. Na figura 5.24 é apresentado um detalhe da anterior. A coincidência de curvas numa região indica onde existe uma a dimensão comum, dita dimensão de correlação e aqui chamada de dimensão fractal. O valor obtido, igual a 2,2 está de acordo com o valor da literatura que estabelece o valor de  $2,4 \pm 0,3$  para a dimensão topológica de um atrator de um arco elétrico não consumível [53].

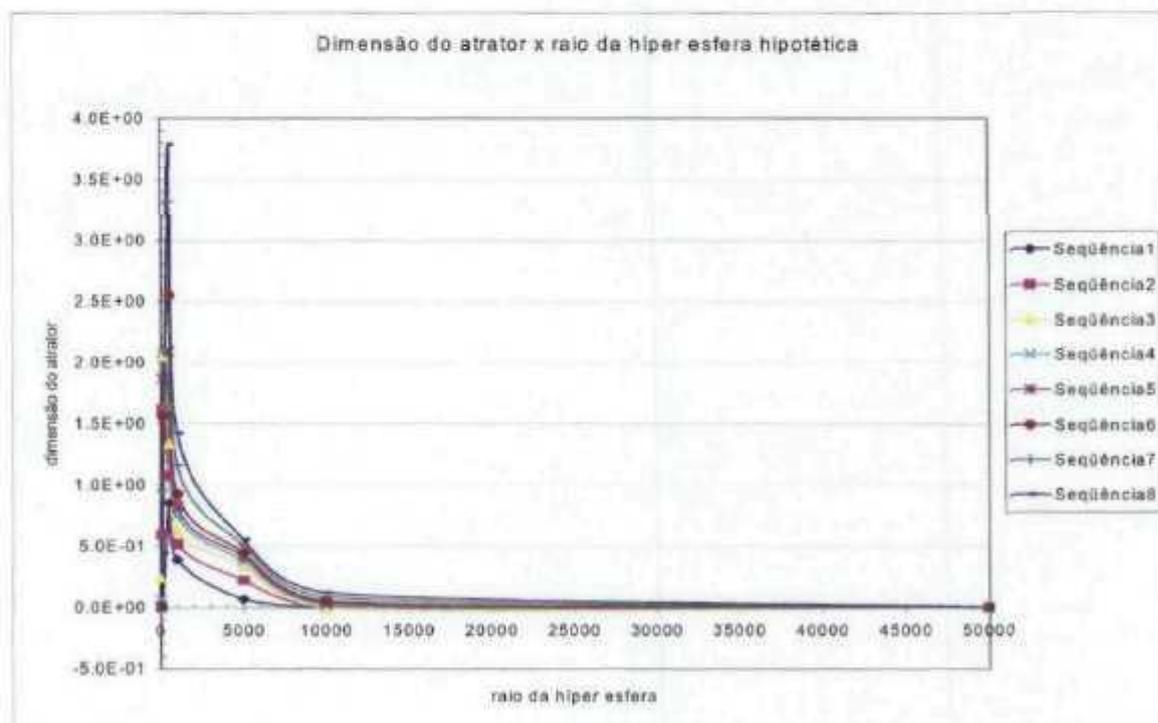


Figura 5.23. Dimensão do atrator em função da distância entre vetores,  $r$ . Cada seqüência refere-se ao número de dimensões do espaço de imersão, ou seja, para vários valores do número de graus de liberdade dos vetores  $S(n)$ ,  $d=1, 2, 3, 4, 5, 6, 8$  e  $10$ .

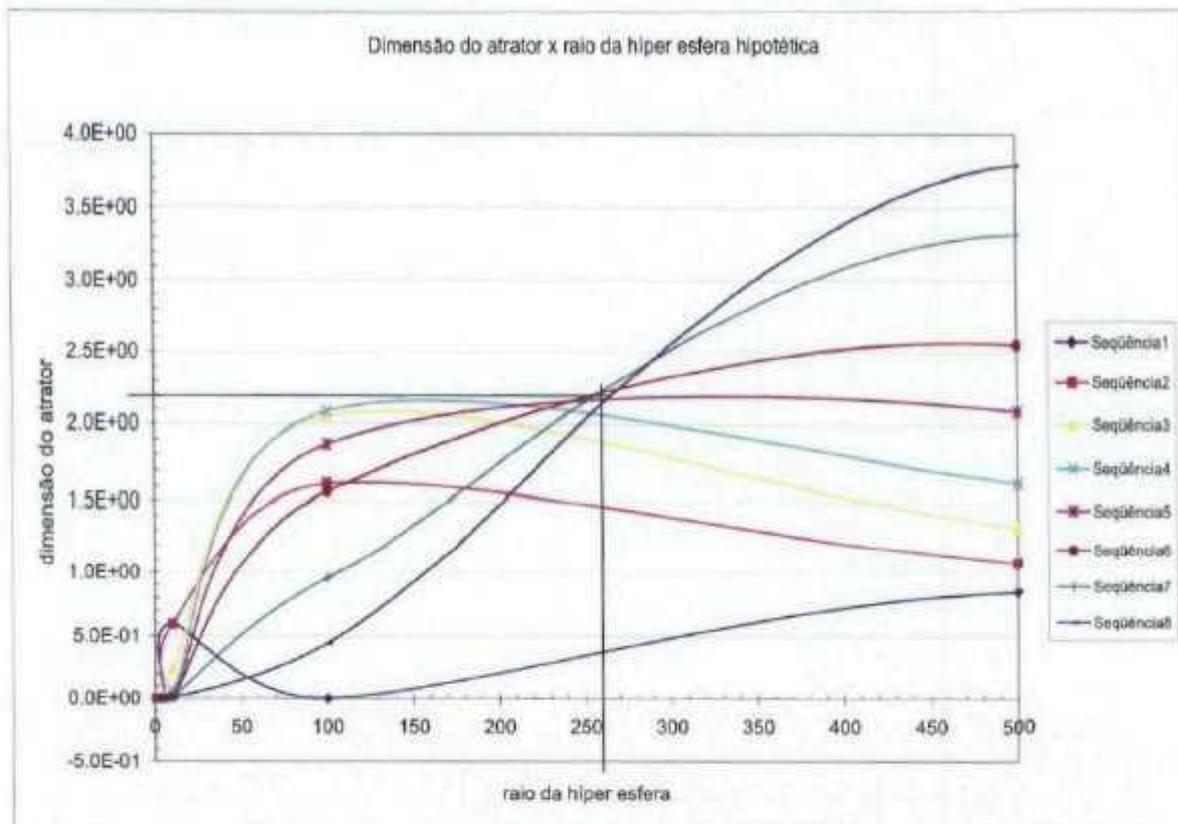


Figura 5.24. Detalhe das curvas da figura 9, utilizada para a determinação da dimensão do atrator.

### 5.5.2 A RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO DE ESTADOS E O MAIOR EXPOENTE DE LIAPUNOV

A reconstrução do espaço de estados para o sistema dinâmico do arco elétrico seguiu a técnica proposta originalmente por Takens. O conjunto ordenado dos vetores, que representam a dinâmica dos estados do sistema dinâmico do arco elétrico obtido a partir da expansão temporal, da Equação 3.7, como apresentado anteriormente.

Optou-se por analisar as curvas da integral de correlação, método de Grassberger e Procaccia, e determinar o melhor valor para o sistema dinâmico do arco elétrico perturbado. Duas condições foram estudadas: A primeira utilizando um ponto de mínimo comum a todas as curvas da função de autocorrelação, situado em torno do ponto 35. Os maiores expoentes de Liapunov,  $\lambda_1$ , avaliados para cada um dos trechos analisados – figuras 5.22.1 até 5.22.11 – são apresentados na figura 5.25.

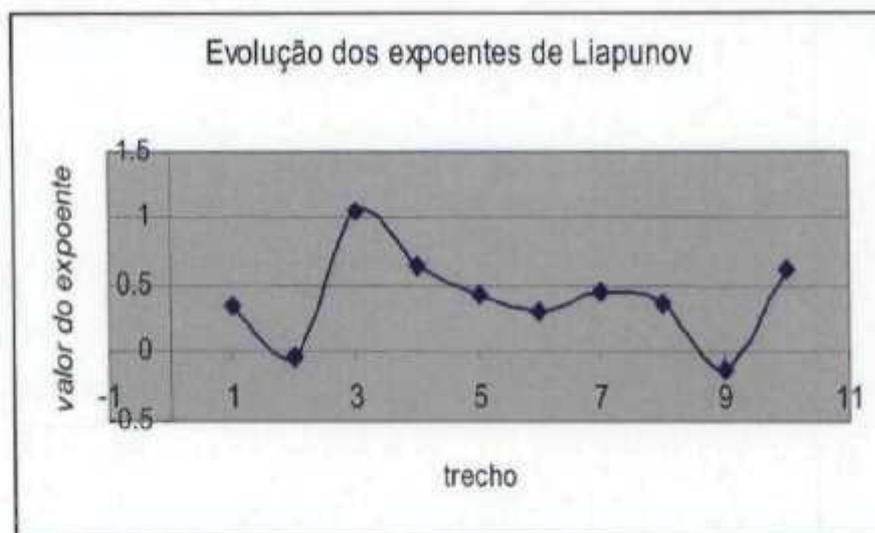


Figura 5.25 – Evolução dos maiores expoentes de Liapunov,  $\lambda_1$ , ao longo dos trechos ordenados, utilizando-se  $\Delta t$  equivalente a 35 pontos de aquisição.

De uma forma geral, não se pode associar o comportamento de nenhum dos valores dos expoentes de Liapunov,  $\lambda_1$ , avaliados nesse caso com o comportamento do sistema dinâmico do arco elétrico.

A segunda condição, por outro lado, permitiu-se associar o comportamento do arco elétrico aos valores avaliados para o maior expoente de Liapunov,  $\lambda_1$ , para cada trecho do sinal de 500 ms escolhido. Como apresentado anteriormente, nas figuras 5.22.1 até 5.22.4, um ponto de inflexão aparece no quarto ou quinto ponto. Este ponto de inflexão transforma-se num mínimo nas curvas das figuras 5.22.5 até 5.22.8. Esses comportamentos desaparecem nas curvas das figuras 5.22.9 até 5.22.11, notadamente quando o metal líquido se desprende do eletrodo e o arco elétrico apresenta-se não perturbado por oscilações devidas ao metal líquido. Elegeu-se então o intervalo de imersão correspondente ao ponto 5 para a reconstrução de um novo espaço de estados e a avaliação do maior expoente de Liapunov para cada trecho. Na figura 5.26 é apresentada a evolução desses expoentes avaliados durante as fases de fusão do eletrodo, acumulação do metal líquido na extremidade do eletrodo, perturbação do arco elétrico e desprendimento do metal líquido da extremidade do eletrodo e finalmente o restabelecimento de um arco elétrico não perturbado.

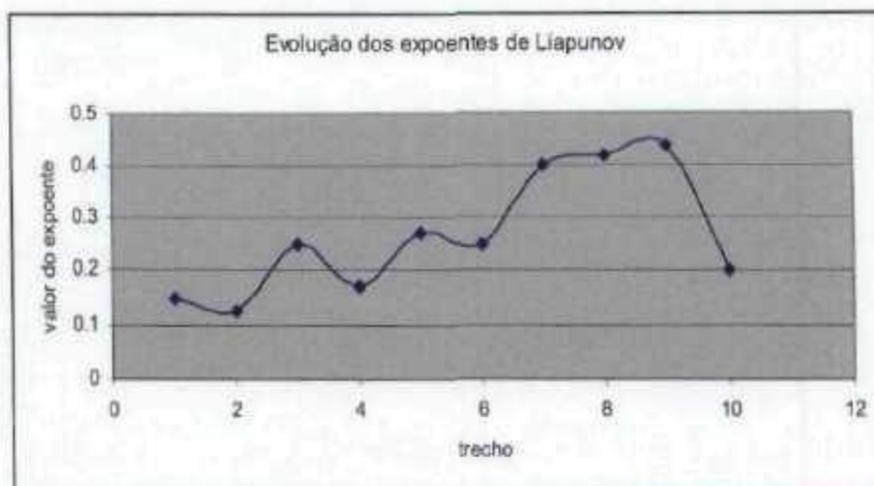


Figura 5.26 – Evolução do maior expoente de Liapunov ao longo do trecho de 500 ms escolhido para análise, utilizando-se um tempo de imersão equivalente a 5 pontos de aquisição.

Uma análise da curva da figura 5.26 deve ser realizada com uma comparação conjunta dos trechos do arco elétrico, mostrados nas figuras 5.22.1 até 5.22.11. Nas figuras 5.22.10 e 5.22.11 pode-se observar a oscilação da diferença de potencial do arco elétrico essencialmente não perturbada pelo movimento de metal líquido na extremidade do eletrodo, pois esse acabou de desprender-se da extremidade do eletrodo. Na figura 5.10 é apresentada a extremidade de um eletrodo ao final da fusão, infelizmente não é possível determinar em qual instante a corrente de alimentação do arco elétrico foi desligada, entretanto, na figura 5.5.a, pode-se observar claramente a gota num momento anterior ao desprendimento, com tamanho maior que a do depósito da figura 5.10. Nessa situação de arco não perturbado avaliou-se o maior expoente de Liapunov local com o valor de 0,2, que pode diminuir para 0,15, valor encontrado para o primeiro e segundo trechos, figuras 5.22.1 e 5.22.2. Esses trechos seguiriam a situação anterior de arco não perturbado. Nas figuras 5.21.1 e 5.22.2 observa-se que o acúmulo de metal líquido já se manifesta no formato do sinal elétrico, menos comportado, e na função de autocorrelação com o aparecimento do ponto de inflexão. Nas curvas das figuras 5.22.3 e 5.22.4 pode-se observar um ligeiro aumento dos maiores expoentes locais de Liapunov, compatível com a manutenção do ponto de inflexão na curva da função de autocorrelação e na maior desordem do sinal. Nas figuras 5.22.5 em diante o ponto de inflexão das curvas torna-se um ponto de mínimo, enquanto as oscilações do sinal aumentam e os maiores expoentes locais de Liapunov

crecem até um patamar em torno de 0,4.

O comportamento da evolução dos maiores expoentes locais de Liapunov ao longo da evolução do processo de fusão do eletrodo de cavacos prensados de Zircaloy mostrou-se consistente, pois o expoente de Liapunov permite inferir o grau de complexidade do sistema dinâmico. Mostrando que o arco elétrico não perturbado tem comportamento caótico, como apresentado na literatura, e que a complexidade do sistema aumenta com o acúmulo de metal líquido na extremidade do eletrodo, voltando para os níveis do arco elétrico não perturbado após o desprendimento do metal líquido da extremidade do eletrodo.

Embora esse resultado seja animador, deve-se compreender que foi feita uma avaliação dos expoentes em vez de uma determinação sistemática, que fica aqui como sugestão para a otimização do processo de análise. A dificuldade encontrada para melhorar a acuidade dos resultados foi baixa frequência de aquisição de dados, 20,089 kHz, notada após a execução das análises. A solução para essa preocupação tem implantação imediata para os próximos experimentos. Pois os intervalos de interesse de formação e separação da gota têm cerca de 500 ms, sugerindo que mil pontos em 50 ms, 20 kHz, requerem frequências de aquisição bastante mais altas, para garantir uma maior quantidade de pontos por período do atrator, com o objetivo de revelar as estruturas eventualmente não acessíveis pela baixa taxa de aquisição de dados.

Além das observações feitas até aqui, sobre o comportamento da dinâmica do arco elétrico ao longo do novo processo proposto, uma avaliação qualitativa mostra que o modelo da dinâmica deve incluir o sistema dinâmico da superfície de metal líquido, em suspensão no topo do eletrodo, acoplado aos já mencionados sistemas dinâmicos do plasma e do circuito elétrico.

## 6 CONCLUSÕES

Os produtos obtidos com a utilização do dispositivo funil-lingoteira no protótipo VAR são semelhantes àqueles reclamados pelo processo VADER, cuja descrição é encontrada na sua patente. Entretanto, devido às suas simplicidades geométrica e operacional, a implantação do dispositivo num protótipo VAR mostrou ser bastante menos custosa do que o projeto e a construção de um forno VADER.

Os estudos realizados, com a implantação do dispositivo funil-lingoteira, permitem afirmar que se desenvolveu um novo processo, que evoluiu a partir dos processos VAR, VADER e das tochas de plasma para soldagem e corte. Para esse novo processo sugere-se o nome de: Processo para a fusão, refusão ou refino de eletrodos consumíveis, por arco elétrico não transferido, sob atmosfera controlada ou vácuo.

Os lingotes obtidos a partir eletrodos maciços de aço AISI 304 apresentaram mais fácil processamento, quando comparados ao processo VAR convencional. Por outro lado, apresentaram maior quantidade de defeitos internos, porosidades. Os lingotes provenientes da fusão de cavacos de AISI 304 apresentaram comportamento e resultados análogos aos eletrodos maciços.

A consolidação de cavacos de Zircaloy, prensados na forma de eletrodos, mostrou-se viável com a utilização do novo processo. As dificuldades experimentais observadas na fusão do Zircaloy, em relação ao aço AISI 304, deveram-se principalmente: à maior entalpia na mudança de fase sólido-líquido; à maior capacidade térmica e; à maior temperatura de fusão da liga.

Observou-se que o processo é bastante sensível às interações termo-físicas entre o metal líquido e as superfícies internas do funil, sendo necessária a escolha do material correto para a construção ou recobrimento do dispositivo, com o objetivo de minimizar a transferência de calor entre estes.

No novo processo o arco elétrico não é transferido para o topo do

lingote. O arco elétrico estabelecido entre a extremidade do eletrodo e o aro superior do funil impossibilitou a ocorrência da perfuração da lingoteira, risco inerente ao processo VAR e causador de explosões catastróficas, aumentando, portanto, a segurança operacional intrínseca do processo.

A observação de maiores valores de tensão, devidas aos maiores comprimentos dos arcos elétricos, indica maior potência elétrica, para mesmos valores de corrente, que aqueles atingidos na operação do protótipo VAR-IPEN, aumentando a velocidade de fusão dos eletrodos.

A dimensão topológica,  $d_a$ , determinada pelo algoritmo de Grassberger-Procaccia, para o novo processo está de acordo com a literatura para os arco elétricos alimentados por corrente alternada, KING *et al.* [62, 63]. O valor de 2,3 para a dimensão de correlação é a primeira indicação da dinâmica caótica no sistema dinâmico do arco elétrico no processo VAR e no novo processo.

A avaliação dos expoentes de Liapunov mostrou-se extremamente sensível à escolha do intervalo de tempo de imersão para a reconstrução do espaço de estados.

Os expoentes de Liapunov, avaliados para os diversos trechos do sinal do arco elétrico, foram todos positivos, confirmando a existência de uma dinâmica caótica para o arco elétrico no processo VAR.

Uma variação sistemática do expoente de Liapunov ao longo da evolução do sistema pôde ser observada, conforme anotado na literatura por KING *et al.* [62]. A investigação dessa variação permitiu que esse comportamento fosse relacionado à quantidade de metal líquido que se acumula e desprende periodicamente, na extremidade inferior do eletrodo. A análise do sinal do arco elétrico ao longo do processo permitiu que se isolassem três sistemas dinâmicos acoplados: o sistema dinâmico turbulento do plasma elétrico; o sistema dinâmico do movimento do arco elétrico e; o sistema dinâmico das oscilações das gotas de metal líquido. O acoplamento desses sistemas ocorre com maior ou menor peso ao longo do processo.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

A sistematização da aplicação do dispositivo funil-lingoteira ao processo VAR convencional permitiu que se desenvolvesse um novo processo de fusão de metais. Dessa maneira, o passo imediato é a elaboração de um pedido de patente sobre o novo processo, a ser denominado de: Processo para a fusão, refusão e refino de eletrodos consumíveis, por arco elétrico não transferido com atmosfera controlada ou vácuo.

A viabilização da tecnologia de consolidação de cavacos de Zircaloy através do novo processo deverá ser otimizada através da simulação computacional do fluxo térmico durante a formação do lingote, analogamente ao trabalho desenvolvido no desenvolvimento do protótipo VAR. Será desenvolvida uma ferramenta dedicada às simulações, do novo processo, voltadas ao projeto processamentos em escalas pilotos ou maiores.

Será dada continuidade aos estudos dos fenômenos inerentes ao arco elétrico, através de sua modelagem matemática e computacional e, com a otimização dos sistemas de aquisição de dados e análise para a investigação e modelagem da dinâmica do arco elétrico.

## 8 APÊNDICE

### 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:

$$\bar{P} = m\bar{g} = \frac{4}{3}\pi r^3 \bar{g} \quad (\text{A1.1})$$

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

$$|\bar{S}| = 2\pi r\sigma \quad (\text{A1.2})$$

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

$$r = \sqrt{\frac{3\sigma}{2\rho g}} \quad (\text{A1.3})$$

Onde:  $r$  - o raio da gota;

$\sigma$  - o valor da tensão superficial;

$\rho$  - a densidade;

$g$  - aceleração gravitacional;

$\rho$  - densidade.

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

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

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

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

Integrando-se esta relação entre 0 e  $R$ :

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

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

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASTM Manual on Zirconium and Hafnium (1977).
- 2 MUCSI, C. S.; **Estudo sobre o processo V.A.R. (Vacuum Arc Remelting) escala de laboratório.** Dissertação de Mestrado, IPEN/USP (1996).
- 3 BLUMENTHAL, W.B.; **The chemical behaviour of zirconium.** D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC. PRINCETON NEW JERSEY, 1958.
- 4 G.L. MILLER; **Zirconium in the Metallurgy of the rarer metals** .Butterworths Publications Limited. London 1957.
- 5 ISOLDA COSTA. **Estudo do comportamento de oxidação do zircônio e suas ligas.** IPEN São Paulo 1985.
- 6 [http://www.alleghenytechnologies.com/WahChang/pages/outlook/pdf/2001/q2/2Q2001\\_outlook.pdf](http://www.alleghenytechnologies.com/WahChang/pages/outlook/pdf/2001/q2/2Q2001_outlook.pdf). Acessado em novembro de 2005.
- 7 <http://en.wikipedia.org/wiki/Zircaloy>. Acessado em novembro de 2005.
- 8 <http://legal.european-patent-office.org/dg3/pdf/t000318eu1.pdf>. Acessado em novembro de 2005.
- 9 NOESEN, S.J. **Vacuum arc melting, consumable, nonconsumable, and skull.** In **Techniques of metals research VI.** John Wiley and Sons, New York. 1968.pp. 659-703.
- 10 <http://home.frognet.net/~ejcov/volta2grove.html>.
- 11 <http://www.geocities.com/bioelectrochemistry/heroult.htm>.
- 12 KIM,W.; CHAIR, T. **A simplified phenomenological theory of viscosity for liquid metals.** Bull. Korean Chem. Soc. 2001, Vol.22, No. 1. pp. 43-45.
- 13 <http://www.insc.anl.gov/matprop/zirconium/zrvis.pdf>.
- 14 DEMBOWSKY, V. **Plasma Metallurgy - The Principles.** Elsevier Science Publishing Company, Inc. New York, 1985.
- 15 ZANNER, FJ. **Metal transfer during vacuum consumable arc remelting.** Metallurgical Transactions B, voll B, June 1979, p. 133-142.
- 16 BERTRAN, L.A.; ZANNER, FJ. **Interaction between computational modelling and experiments for vacuum consumable arc melting.** SANDIA NATIONAL LABS. SAND 80-1177C (1980).
- 17 JOHNSON, E.V. **Vacuum arc melting.** In:ACADEMY OF THE USSR The uses of vacuum in metallurgy/London, Edinburgh,1964.

- 18 JARDY, A; FALK, L.; ABLITZER, D. **The overall energy balance of Vacuum Arc Remelting**. Memolres et études scientifiques revue de metallurgie, December 1991.
- 19 DI STASI, L. **Fornos elétricos**. São Paulo, Hemus, 1981.
- 20 NACEY, T.J. **Forth generation inverters add artificial intelligence to the control of GMA welding**. Welding Journal, January 1993, p. 31-34.
- 21 ESTADOS UNIDOS US PATENT 4.261.412 Fine Grain Casting Method. Ferhun H. Soykan; John S. Huntington - Apr.14,1981.
- 22 MITCHELL, A. **The present status of melting technology for alloy 718**. IN International Symposium on the Metallurgy and Applications of Superalloy 718. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International and National Association of Corrosion Engineers, Pittsburgh, Pennsylvania, June 12-14, 1989, [pp. 1-15].
- 23 BRANDI, S.D.; TANIGUCHI, C. **Transferência metálica na soldagem com eletrodo revestido**. Soldagem & Materiais, 2(2), Abr/Jun 1990.
- 24 MUMMAU, G.R; AUFDERHAAR, W.B. **Importance of arc gap control in vacuum consumable arc remelting of superalloys**. J. Vac. Sci. Technol. vol. 9 no.6 Nov-Dec. 1972 p. 1315.
- 25 LEYT, A. **Los procesos de fusion a arco de metales**. Buenos Aires, Comission Nacional de Energia Atómica, 1970.
- 26 FARIA, J. **Fabricação de lingotes de titânio pelo processo de fusão a arco sob vácuo com eletrodo consumível**. Metalurgia ABM, vol.146 n. 392, Outubro/Novembro de 1990, p.530.
- 27 GREENFIELD, P. **Zirconium in Nuclear Technology** IN M&B Monograph ME/12 Mills & Boon Limited. London 1972.
- 28 ISORE, A.J.; IVO, P.S. **Produção de aços especiais e superligas através de refino por ESR e V AR**. Niquel, Junho, 1990.
- 29 SIMS,C.T.; HAGEL, W.C. **The Superalloys**. Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, New York (1972).
- 30 STOLOFF, N.S.; SIMS,C.T.; HAGEL, W.C. **The Superalloys II**. Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, New York (1987).
- 31 PAPIER, J. **Aços e Ligas para a indústria naval e nuclear**. Seminário proferido no dia 7 de Agosto de 1992, COPESP I, SP.
- 32 ASM Source Book on stainless steels. American Society for Metals, USA, 1976.

- 33 ANABLE, W.E. **Purification of vanadium by vacuum melting.** J. Vac. Sci. Technol., vol7, no. 6, p. 574 (1976).
- 34 AMMON, RL.; BUCKMAN Jr., RW. **Vacuum arc melting of tungsten-hafnium-carbon alloy.** J. Vac. Sci. Technol., vol.1, no. 1., Jan/Feb 1974, p. 385.
- 35 SZEKELY, J. **Mathematical models in new models development.** JOM - February 1990, p.16.
- 36 MEHRABIAN R; W ADLEY, H.N.G. **Needs for control in advanced processing of materials.** Journal of Metals, February 1985, p.51.
- 37 STOOP, B.T.J.; LUYENDUK, T.; den OUDEN, G. **Structure and properties of GTA welds in aluminium alloys.** Welding and metal fabrication, October 1989.
- 38 CAMPOS FILHO, M.P.; DAVIES, G.J. **Solidificação e fundição de metais e ligas,** Editora da Universidade de São Paulo, 1978.
- 39 ARMED SERVICES TECHNICAL INFORMATION AGENCY. **General recommendations on design features for Ti and Zr production-melting furnaces.** Columbus, Oh., Defense Metals Information Center, 1961. (AD-260099).
- 40 POULSEN, E. **Safety-related problems in the titanium industry in the last 50 years.** JOM, 52 (5) (2000), pp. 13-17.
- 41 JARDY, A; ABLITZER, D. **Modelization des effets hydrodynamiques du brassage eletromagnetique dans le procédé de refusion à l'arc sous vide.** Memoires et études scientifiques revue de metallurgie, janvier 1991.
- 42 JARDY, A; ABLITZER, D. **Comportement des puits liquides des lingots VAR (Vacuum Arc Remelting).** Memoires et études scientifiques revue de metallurgie. juillet-aout 1990.
- 43 ÇAMBEL, A.B. **Applied Chaos Theory – A paradigm for complexity.** Academic Press, Inc., San Diego, CA. 1993.
- 44 KAPLAN, D.; GLASS L., **Understanding Nonlinear Dynamics,** Springer-Verlag, New York (1995).
- 45 <http://www.ele.ita.br/~takashi/lyap.pdf>. Acessado em novembro de 2005.
- 46 <http://mathworld.wolfram.com/LogisticMap.html>. Acessado em novembro de 2005.
- 47 LORENZ, E.H.; J. Atmos. Sci.; 20, 1963.
- 48 ABARBANEL, D.I.H.; **Analysis of Observed Chaotic Data,** Springer-Verlag, New York (1995).

- 49 HOLMGREN, R.A. **A First Course in Discrete Dynamical Systems**, Springer-Verlag, New York (1994).
- 50 SHANNON, C.; Weaver, W. **The mathematical theory of communication**. The university of Illinois Press: Urbana. (1949).
- 51 FIEDLER-FERRARA, N.; PRADO,C.P.C. **Caos – Uma introdução**. Editora Edgard Blücher Ltda (1995).
- 52 PAWELZIK, K.; SCHUSTER, H.G. **Generalized dimensions and entropies from measured time series**. Physical Review A. Volume 35. Number 1. January. 1987. pp. 481-484.
- 53 USHIO, M.; SZEKELY, J.; CHANG, C.W. **Mathematical modelling of flow field and heat transfer in high-current arc discharge**. Ironmaking and Steelmaking, 1981, No. 6. pp. 279-286.
- 54 SZEKELY, J.; MCKELLIGET, J.; CHOUDHARY, M. **Heat-transfer fluid flow and bath circulation in electric-arc furnaces and DC plasma furnaces**. Ironmaking and Steelmaking, 1983, vol. 10, No. 4. pp. 169-179.
- 55 ALÉXIS, J.; RAMIREZ, M.; TRAPAGA, G.; JÖNSSON, P. **Modelling of a DC electric arc furnace-heat transfer from the arc**. ISIJ International, Vol. 40 (2000), No 11. pp. 1089-1097.
- 56 SIMONIN, O. ;DELALONDRE, C.; VIOLLET PIERRE-LOUIS. **Modelling in thermal plasma and electric arc column**. Pure&Appl. Chem. Vol. 64, No. 5, 1992. pp. 623-628.
- 57 QIAN, F.; FAROUK, B.; MUTHARASAN, R. **Modelling of fluid flow and heat transfer in the plasma region of the DC electric arc furnace**. Metallurgical and materials transactions B. volume 26B, October 1995. pp. 1057-1067.
- 58 FAVALLI, R.C.; SZENTE, R.N. **Physical and mathematical modeling of non transferred plasma torches**. Brazilian Journal of physics, vol. 28, no. 1, March, 1998.
- 59 EMANUEL, A.E., ORR, J.A. **An improved method of simulation of the arc voltage-current characteristic**. 2000IEEE. pp. 148-154.
- 60 WANG, F; JIN, Z.; ZHU, Z. **Modelling and Prediction of electric arc furnace based on neural network and chaos theory**. Advances in Neural Networks - ISSN 2005, Second International Symposium on Neural Networks, Chongqing, China, May 30 - June 1, 2005, Proceedings, Part III. Lecture Notes in Computer Science 3498 Springer 2005.
- 61 KING, P.E., YIM, S.C.S. **Control of noisy chaotic motion in a system with nonlinear excitation and restoring forces**. Chaos 7 (2). 1997. pp. 290-300.

- 62 KING, P.E., NYMAN, M.D. **Modeling and control of an electric arc furnace using a feedforward artificial neural network.** J. Appl. Phys. 80 (3), 1 August 1996. pp. 1872-1876.
- 63 KING, P.E.; OCHS, T.L.; HARTMAN, A.D. **Chaotic responses in electric arc furnaces.** J. Appl. Phys. 76 (4), August 1994. pp. 2059-2065.
- 64 ZANNER, F.J.; WILLIAMSON, W.A.; HARELAND, W.A.; BERTRAM, L.A. **Behavior and structure of metal vapor arc plasma between molten electrodes.** J. Vac. Sci. Technol. A 6 (3), May/June 1988. pp. 2062-2063.
- 65 ANDERS, A.; OKS, E.M.; YUSHKOV, G.Y. **Cathodic arcs: Fractal voltage and cohesive energy rule.** Applied Physics Letters 86, 211503 (2005).
- 66 CARLSON, S. **Falling into chaos.** Scientific American. November 1999. pp. 96-97.
- 67 ROCHA, M.S.F., SARTORELLI, J.C., GONÇALVES, W.M., PINTO, R.D. **Some dynamical aspects of the water drop formation in a leaky faucet.** Physical review E vol. 54, number 3. September 1996. pp. 2378-2383.
- 68 BEAMAN, J.J., WILLIAMSON, R.L., MELGAARD, D.K., HELMIDINE, G.J., HAMEL, J.C. **Model based gap and melt rate control for VAR of Ti-6Al-4V.** Journal of materials science 39 (2004). pp. 7153-7159.
- 69 PACKARD, N.H.; CRUTCHFIELD, J.P.; FARNR, J.D.; SHAWN, R.S. **Geometry of a time series.** Physical Review Letters. Volume 45, number 9, September 1980. pp. 712-716.
- 70 FRASER, A. M.; SWINNEY, H.L. **Independent Coordinates for strange attractors from mutual information.** Physical Review A volume 33, number 2, Feb. 1986. pp. 1134-1140.
- 71 AGUIRRE, L.A. **A nonlinear correlation function for selecting the delay time in dynamical reconstructions.** Physics Letters A 203 (1995), July 1995, pp. 88-94.
- 72 **Recycling-Metals-2003. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook-2003.**
- 73 TILTON, J.E. **The future of recycling.** Resources Policy 25 (1999). pp. 197-204.
- 74 MUCSI, C.S.; FARIA, R.N.; GALEGO, E.; ROSSI, J.L. **Consolidation of compacted Zircaloy chips via vacuum arc melting – analysis of the electric arc.** Materials Science Forum vols. 498-499 (November 2005) pp. 258-263.
- 75 [www.epanorama.net/documents/souncardtest/sb16value.html](http://www.epanorama.net/documents/souncardtest/sb16value.html). Acessado em novembro de 2005.

76 [www.daqarta.com](http://www.daqarta.com), acessado em setembro de 2002.



M23324



**Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**  
Diretoria de Ensino & Informação Científica e Tecnológica  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária CEP: 05508-000  
Fone/Fax(0XX11) 3816 - 9148  
SÃO PAULO - São Paulo - Brasil  
<http://www.ipen.br>

O Ipen é uma autarquia vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico e Turismo do Estado de São Paulo, gerida técnica, administrativa e financeiramente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência e Tecnologia, e associada à Universidade de São Paulo.