

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS DE MATERIAIS**

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO DE SOLDAGEM
MIG/MAG ATRAVÉS DA DIMENSÃO FRACTAL DO SINAL DE TENSÃO**

José Carlos de Souza Carneiro

**Fortaleza – Ceará
Abril de 2005**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE
PRODUÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS
DE MATERIAIS**

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO DE SOLDAGEM
MIG/MAG ATRAVÉS DA DIMENSÃO FRACTAL DO SINAL DE TENSÃO**

José Carlos de Souza Carneiro

**Dissertação submetida ao Programa
de Mestrado em Engenharia e Ciência
de Materiais da Universidade Federal
do Ceará como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia e Ciência de Materiais.**

Orientador: Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias

**Fortaleza – Ceará
Abril de 2005**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS DE MATERIAIS

PARECER DA COMISSÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JOSÉ CARLOS DE SOUZA CARNEIRO

**“ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO DE SOLDAGEM
MIG/MAG ATRAVÉS DA DIMENSÃO FRACTAL DO SINAL DE TENSÃO”**

A Comissão de Dissertação composta pelos professores Jesualdo Pereira Farias (Presidente e Orientador) da Universidade Federal do Ceará, Hélio Cordeiro de Miranda da Universidade Federal do Ceará e Eduardo de Magalhães Braga da Universidade Federal do Pará, considera o candidato:

Aprovado com Louvor

Aprovado

Não Aprovado

Secretaria do Programa de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 04 de abril de 2005.

Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Hélio Cordeiro de Miranda
Membro

Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga
Membro

A Deus.

Aos meus pais.

Aos meus irmãos, amigos de uma infância feliz.

À minha esposa Ana, companheira de uma agradável jornada.

À minha filha Dominique, por me fazer sentir orgulho de ser pai.

AGRADECIMENTOS

- **A Deus.**
- **A minha família pelo estímulo e compreensão.**
- **Ao Coordenador do Curso Professor Dr. Lindberg Lima Gonçalves por sua dedicação ao Curso.**
- **Ao Professor Dr. Jesualdo Pereira Farias por sua orientação, tolerância e amizade.**
- **Ao Professor Dr. Hélio Cordeiro de Miranda pelo material cedido, pela paciência e apoio demonstrados.**
- **Ao Pesquisador Doutor Elineudo Pinho de Moura pela ajuda na utilização do MatLab.**
- **Ao Professor Dr. Paulo Cortez pela minha participação no curso de processamento digital de sinais.**
- **Ao Professor Dr. Edgard de Macedo Silva pelo apoio e companheirismo.**
- **A todo o corpo docente do curso.**
- **Ao bolsista do PET Francisco Ivan.**
- **Aos colegas Nélio, André, Eduardo, Temístocles e Rodrigo pelo apoio nas horas difíceis.**
- **Aos demais colegas do Laboratório de Engenharia de Soldagem da Universidade Federal do Ceará (Engesolda).**
- **Ao Professor Clewerton Alfredo Gomes de Moura (in memoriam).**
- **Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará CEFET-CE pela redução parcial na carga horária.**
- **Às dezenas de professores que me ensinaram a aprender; e aos milhares de alunos com quem aprendi a ensinar.**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 O ARCO VOLTAICO DE SOLDAGEM	16
2.1.1 Processos de Soldagem a Arco Voltaico	16
2.1.2 O Circuito de Soldagem	17
2.1.3 Perfil Elétrico do Arco	18
2.2 O ARCO VOLTAICO E SUAS REGIÕES	19
2.2.1 Região Catódica	19
2.2.2 Coluna do Arco	20
2.2.3 Região Anódica	21
2.2.4 A Polaridade do Arco Voltaico	23
2.3 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS PARA O ESTUDO DO ARCO VOLTAICO	25
2.4 ESTABILIDADE DO ARCO ELÉTRICO	30
2.5 TRANSFERÊNCIA METÁLICA	31
2.5.1 Técnicas de Identificação dos Tipos de Transferência Metálica	32
2.6 TEORIAS PARA A TRANSFERÊNCIA DE METAL	35
2.6.1 Teoria do Equilíbrio Estático das Forças	35
2.6.2 Teoria da Instabilidade Pinch	40
2.7 O PROCESSO MIG/MAG	42
2.7.1 Fundamentos do Processo	42
2.7.2 Equipamento de Soldagem	44
2.7.3 A Transferência Metálica no Processo MIG/MAG	45
2.7.3.1 Transferência por Curto-Circuito	45
2.7.3.2 Transferência Globular	46
2.7.3.3 Transferência Goticular	47
2.7.4 Os Consumíveis do Processo MIG/MAG	50
2.7.5 Características e Aplicações de Soldagem	51
2.7.6 Variáveis do Processo MIG/MAG	51

2.8 DIMENSÃO FRACTAL	54
2.8.1 Introdução	54
2.8.2 As Características Fractais	56
2.8.3 A Dimensão Fractal – Df	58
2.8.4 Técnicas para Estimativa da Dimensão Fractal	59
2.8.5 A Técnica da Contagem de Caixas	59
2.8.6 O Algoritmo de Estimativa da Dimensão Fractal	61
3. MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 A Fonte de Soldagem	65
3.2 Sistema de Alimentação do Arame Eletrodo	65
3.3 Mesa de Deslocamento do Corpo de Prova	65
3.4 Materiais Consumidos	66
3.5 O Sistema de Monitoramento	66
3.5.1 Conjunto de Geração e Armazenamento de Imagens	67
3.5.2 Sistema de Aquisição e Sincronização dos Sinais	67
3.6 Sinais e Dimensão Fractal	68
3.6.1 Gráficos do Sinal de Tensão	69
3.6.2 Dimensão Fractal dos Sinais - (Df)	70
3.6.3 Dados de Soldagem dos Sinais	74
3.6.4 Sinais e o Software ANALISER	74
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1 Gráficos da Dimensão Fractal dos Sinais	76
4.1.1 Dados da Dimensão Fractal do Sinal CC1	77
4.1.2 Dados do ANALISER para o Sinal CC1	80
4.1.3 Dados da Dimensão Fractal do Sinal CC2	84
4.1.4 Dados do ANALISER para o Sinal CC2	90
4.1.5 Dados da Dimensão Fractal do Sinal CC3	94
4.1.6 Dados do ANALISER para o Sinal CC3	100
4.2 Considerações Finais	103
5. CONCLUSÕES	106
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
7. BIBLIOGRAFIA	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito de Soldagem (Farias, 1998).	17
Figura 2 - Esquema da distribuição de potencial e regiões do arco elétrico (Modenesi, 2001).	18
Figura 3 - Zonas da coluna do arco (Baixo, 1990).	20
Figura 4 - Representação esquemática do arco e dos eletrodos (Haidar, 1998).	27
Figura 5 - Tipos de transferência metálica segundo o IIW (Marques, 1997).	32
Figura 6 - Balanço de forças durante a transferência metálica (Eagar et al., 1997).	36
Figura 7 - Atuação da força eletromagnética conforme as linhas de fluxo de corrente (Norrish & Richardson, 1988 apud Miranda, 1999).	38
Figura 8 - Soldagem MIG/MAG (FBTS, 1987).	43
Figura 9 - Equipamento para a soldagem MIG/MAG (Miranda, 2002).	44
Figura 10 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem MIG/MAG com um gás de proteção a base de argônio (Modenesi, 2001).	49
Figura 11 - (a) Conjunto de Cantor (dimensão fractal 0,6309), (b) Curva de Kock (dimensão fractal 1,2618) e (c) Esponja de Menger-Sierpinsky (dimensão fractal 2,7268) (Rocha, 2003).	57
Figura 12 - Procedimento para estimativa da dimensão fractal de um sinal, utilizando o método de superposição por quadrados (Rocha, 2003).	60
Figura 13 - Sinal superposto por uma malha quadriculada, ilustrando o procedimento de contagem de caixas (Rocha, 2003).	62
Figura 14 - Relação logarítmica entre o número de caixas para cobertura do sinal e a aresta das referidas caixas, mostrando uma reta cuja inclinação fornece o valor da dimensão fractal D (Rocha, 2003).	62
Figura 15 - Ilustração da bancada utilizada para obtenção dos sinais de tensão (Miranda, 2002).	64
Figura 16 - Soldagem na posição plana (FBTS, 1987).	66
Figura 17 - Ilustração da técnica de shadowgrafia (Vilarinho, 2000 apud Miranda, 2002).	67

Figura 18 - Gráfico completo da tensão do sinal CC1 (todo o intervalo de amostragem do sinal):	69
Figura 19 - Gráfico da tensão do sinal CC1 para o intervalo das fotografias.	70
Figura 20 - Gráfico da tensão do sinal CC1 para o intervalo de um período.	72
Figura 21 - Gráfico da tensão do sinal CC1 para dois períodos.	73
Figura 22 - Gráfico da tensão do sinal CC1 para três períodos.	73
Figura 23 - a) Tensão x tempo ; b) Dimensão fractal por intervalo de tempo.	77
Figura 24 - a) Tensão média x tempo e Dimensão fractal x tempo ; b) Frequência de Curto-Circuito x tempo e Dimensão fractal x tempo.	83
Figura 25 - a) Tensão x tempo ; b) Dimensão fractal por intervalo de tempo.	84
Figura 26 - a) Tensão média x tempo e Dimensão fractal x tempo ; b) Frequência de Curto-Circuito x tempo e Dimensão fractal x tempo.	93
Figura 27 - a) Tensão x tempo ; b) Dimensão fractal por intervalo de tempo.	94
Figura 28 - a) Tensão média x tempo e Dimensão fractal x tempo ; b) Frequência de Curto-Circuito x tempo e Dimensão fractal x tempo.	102
Figura 29 - Desvio padrão da tensão x dimensão fractal e Frequência de Curto-Circuito x dimensão fractal.	105

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo de tempo para o cálculo da dimensão fractal.	71
Tabela 2 - Dados de Soldagem dos Sinais Analisados.	74
Tabela 3 - Média da Dimensão Fractal dos 20 intervalos de Tempo.	76
Tabela 4- Dados do Sinal CC1 obtidos através do ANALISER.	81
Tabela 5 - Dados do Sinal CC2 obtidos através do ANALISER.	91
Tabela 6 - Dados do Sinal CC3 obtidos através do ANALISER.	101
Tabela 7 - Dados dos sinais obtidos a partir do ANALISER.	104

Carneiro, J. C. S., 2005, “Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG Através da Dimensão Fractal do Sinal de Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, CE.

RESUMO

As técnicas de estimativa da dimensão fractal de sinais têm sido amplamente aplicadas na descrição de inúmeros sistemas físicos, desde estudos sobre turbulência atmosférica, sinais de eletroencefalograma, sistemas hidrológicos até estudos sobre o comportamento fractal de superfícies fraturadas por impacto. A análise da dimensão fractal de fenômenos complexos passou a ser uma ferramenta importante para quantificar o grau de irregularidade de fenômenos artificiais ou naturais.

Neste trabalho investigou-se a dimensão fractal dos sinais de tensão do arco voltaico do processo de soldagem MIG/MAG. A técnica de estimativa empregada para o cálculo da dimensão fractal no estudo dos sinais foi o método box counting. Pôde-se verificar que variações bruscas nos valores da dimensão fractal estavam associadas com o fenômeno da transferência metálica. São apresentados os sinais analisados, no domínio do tempo, os quadros fotográficos da transferência metálica, obtidos pela técnica de shadowgrafia, e os programas utilizados para obtenção dos gráficos, cálculo da dimensão fractal e também de dados estatísticos dos sinais de soldagem.

Na revisão bibliográfica é feita uma apresentação do arco elétrico de soldagem considerando-se apenas seus aspectos físicos. É apresentado o método empregado no cálculo da dimensão fractal dos sinais. São tratados também os mecanismos de emissão eletrônica, o processo de soldagem MIG/MAG, o fenômeno da transferência metálica no processo MIG/MAG e as forças envolvidas durante a transferência metálica.

Palavras-Chave: Arco Voltaico, Dimensão Fractal, Fractais, Método Box Counting, Processo MIG/MAG, Transferência Metálica.

Carneiro, J. C. S., 2004, "Study of Metallic Transfer in the MIG/MAG Welding Process Through the Fractal Dimension of the Tension Sign", Master's Dissertation, Federal University of Ceará, CE.

ABSTRACT

The estimate techniques of the fractal dimension of signs have been thoroughly applied in the description of countless physical systems, from studies on atmospheric turbulence, electroencephalogram signs, hydrological systems to studies about the fractal behavior of surfaces fractured by impact. The fractal dimension analysis of complex phenomena has become an important tool to quantify the irregularity degree of artificial or natural phenomena.

The fractal dimension of the voltage signs of the voltaic arch of the MIG/MAG welding process arc was investigated in this work. The estimation technique used for the calculation of the fractal dimension in the study of the signs was the box counting method. One could see that abrupt variations in the fractal dimension values were associated with the metallic transfer phenomenon. The analyzed signs are presented, in the time domain, the photographic pictures of the metallic transfer, obtained through the shadowgraphy technique, and the programs used to obtain the graphs, the dimension fractal calculation, as well as statistical data of the welding signs.

In the bibliographical review, a presentation of the welding electric arc is made considering its physical aspects. The method used to calculate the fractal dimension of the signs is also presented. The electronic emission techniques are dealt with, the MIG/MAG welding process, the metallic transfer phenomenon in the MIG/MAG process, and the forces involved during the metallic transfer.

Key words: Voltaic Arc, Fractal Dimension, Fractals, Box Counting Method, MIG/MAG Process, Metallic Transfer.

Capítulo 1

1. Introdução

Dentre os processos de soldagem que utilizam o arco voltaico, o MIG/MAG é um dos mais utilizados no mundo. A explicação deve-se as qualidades do processo: alta flexibilidade, soldagem de todos os metais e ligas comerciais em qualquer posição, elevada produtividade e boa qualidade da solda produzida.

A estabilidade do processo, a quantidade de respingos, o aspecto do cordão de solda, a qualidade e a geometria da solda são fatores determinados pelo modo como o material é transferido através do arco voltaico. Assim, a transferência metálica ocupa papel de destaque, ficando, portanto evidente, a importância de se investigar a esse respeito.

Um sistema de soldagem que aumente a eficiência do processo, melhore a qualidade e baixe os custos, deve considerar o tipo de transferência metálica, levando em conta as instabilidades que possam surgir no arco e as interferências que ocorram durante a soldagem.

Obter informações sobre a transferência metálica a partir de um modelamento teórico do arco elétrico tem se mostrado impraticável por conta da diversidade das variáveis envolvidas e também da intrincada relação entre as mesmas.

As influências do arco voltaico no processo de transferência metálica têm levado os pesquisadores a buscarem novas técnicas de controle e identificação da transferência metálica como meio de otimização dos processos de soldagem.

As técnicas empregadas até agora têm explicado de modo razoável muito dos aspectos da complexa relação arco elétrico e transferência metálica. Como método de controle da transferência metálica e, portanto, da qualidade da solda, pode-se utilizar a análise dos sinais de tensão e corrente do arco voltaico de soldagem.

Técnicas para distinguir os tipos de transferência metálica têm atraído atenção de muitos pesquisadores pelo interesse nas implicações metalúrgicas decorrentes da transferência metálica.

Hoje em dia, o estudo de sinais não-estacionários exige abordagens matemáticas robustas de análise para que se possa compreender os fenômenos físicos que estão agindo em qualquer sistema natural. Uma destas ferramentas é a teoria de análise de estimativa da dimensão fractal de sinais, capaz de analisar séries-temporais obtidas de qualquer sistema físico.

Uma das dificuldades no estudo da transferência metálica por meio dos sinais elétricos de tensão e corrente é a baixa relação sinal-ruído, que ocorre, por exemplo, nos sinais que apresentam transferência goticular. A transferência metálica, neste trabalho, será investigada mediante a estimativa da dimensão fractal do sinal de tensão.

A Teoria dos Fractais tem sido empregada em inúmeras áreas de atividades de pesquisa e industrial, possibilitando obter novos parâmetros que servem para o aperfeiçoamento das técnicas hoje existentes.

Uma interpretação conceitual poderosa da dimensão fractal é como sendo uma medida de complexidade do objeto em estudo. Na prática, pode-se caracterizar a dimensão fractal como uma medida da superfície efetiva de contato entre o objeto e o seu meio.

Dimensões Fractais são importantes porque podem ser definidas em conexão com dados do mundo real e podem ser medidas aproximadamente por meio de experimentos.

Nesse sentido, o objetivo principal da dissertação, consiste em analisar a dimensão fractal dos sinais de tensão do arco elétrico, obtidos durante soldagens de corpos de prova utilizando o processo MIG/MAG, e a partir dos valores da dimensão fractal dos sinais, estabelecer alguma correspondência com a

transferência metálica. Espera-se utilizar a dimensão fractal do sinal como ferramenta para tentar detectar variações nos modos de transferência metálica.

A pesquisa foi realizada com o objetivo de responder duas questões: existem diferenças nas medidas de dimensão fractal de um sinal de tensão quando ele apresenta mais de um tipo de transferência metálica? Em caso afirmativo, há maneira suficientemente precisa para discriminar esses tipos de transferências?

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

Será feita uma descrição das características gerais do arco elétrico, dando ênfase às aquelas mais importantes para a soldagem. A ênfase será restrita aos fenômenos físicos que controlam a soldagem a arco, não será abordada a influência do arco elétrico quanto aos aspectos tecnológicos, industriais ou metalúrgicos da soldagem.

2.1 O Arco Voltaico de Soldagem

2.1.1 Processos de Soldagem a Arco Voltaico

Não se conhece ainda uma definição normalizada para o arco elétrico de soldagem. Dentre as muitas definições, vários autores adotam a definição clássica de Jackson (Jackson, C.E. apud Farias, 1998): “O arco voltaico de soldagem consiste de uma descarga elétrica através de um plasma condutor a alta temperatura, produzindo energia térmica suficiente de modo a possibilitar a união de metais por fusão”.

Modenesi (2001) define o arco voltaico como a fonte de calor mais comumente utilizada na soldagem de materiais metálicos por fusão, por apresentar uma combinação ótima de características, incluindo uma concentração adequada de energia para a fusão localizada do metal de base, facilidade de controle, baixo custo relativo do equipamento e um nível aceitável de riscos à saúde dos seus operadores.

Valendo-se destas propriedades, foram desenvolvidos dispositivos e processos de fabricação que se utilizam do arco voltaico para produzir calor e/ou luz. Dentro destas aplicações tecnológicas, encontra-se um grupo de processos de soldagem que utilizam o arco voltaico como fonte geradora de calor para a fusão de metais. Os processos de soldagem a arco voltaico que estão nesse grupo são: Eletrodo revestido, TIG (tungstênio + gás inerte), MIG/MAG (metal + gás inerte/metal+gás ativo), Arco submerso, Arame tubular e Eletrogás.

Os processos de soldagem a arco voltaico têm uma grande importância industrial na atualidade, sendo utilizados na fabricação dos mais variados componentes e estruturas metálicas e na recuperação de um grande número de peças danificadas ou desgastadas (Modenesi, 2001).

2.1.2 O Circuito de Soldagem

O eletrodo e a peça fazem parte de um circuito elétrico conhecido como circuito de soldagem. A Figura 1 mostra um circuito de soldagem típico, composto por uma fonte de energia (de corrente contínua ou alternada), cabos de conexão, porta eletrodo, eletrodo, arco elétrico e material de base (peça).

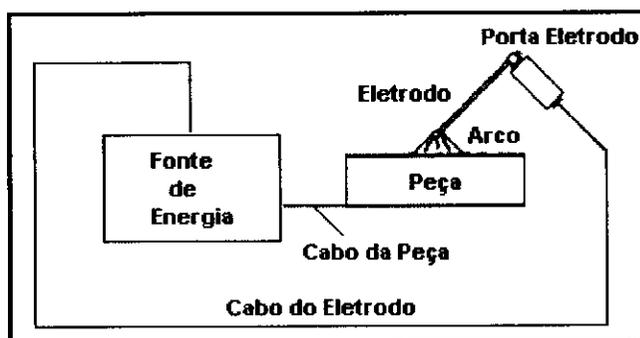


Figura 1 – Circuito de Soldagem (Farias, 1998).

O processo de soldagem inicia-se através da abertura do arco voltaico, que na maioria das vezes é feita fazendo o contato da ponta do eletrodo com a peça. O diâmetro e o tipo de eletrodo, dentre outros parâmetros, definirão a tensão e a corrente de soldagem, sendo estes obtidos a partir da curva característica estática de cada tipo de fonte (tensão ou corrente constante), que deve ser ajustada pelo soldador. A tensão de soldagem normalmente varia entre 16V e 40V e a corrente está compreendida na faixa de 20A a 550A (Modenesi, 2001).

O arco voltaico compõe-se por descargas elétricas de baixa tensão e elevada densidade de corrente, conduzidas por meio de um plasma gerado em um gás a alta temperatura.

2.1.3 Perfil Elétrico do Arco

Sabe-se que quando um fio metálico é percorrido por uma corrente elétrica constante, a tensão varia uniformemente ao longo de seu comprimento (x), pois:

$$V = R \cdot I \quad e \quad R = \rho \cdot \frac{x}{S} \Rightarrow V = \left(\rho \cdot \frac{I}{S} \right) \cdot x \Rightarrow V = k \cdot x \quad (01)$$

onde ρ é a resistividade elétrica do fio e S é a área de sua seção transversal. O mesmo já não ocorre ao longo do arco voltaico, existindo quedas abruptas de tensão junto aos eletrodos (ânodo e cátodo) que atingem entre 1V e 20V (Modenesi, 2001).

Em termos de estrutura física, o arco voltaico pode ser dividido em três regiões principais, conforme a variação de tensão ao longo dele: Zona de Queda Catódica, Coluna do Arco e Zona de Queda Anódica. As regiões de queda de tensão anódica e catódica se constituem nas interfaces do arco voltaico com o ânodo e o cátodo, respectivamente (veja a Figura 2).

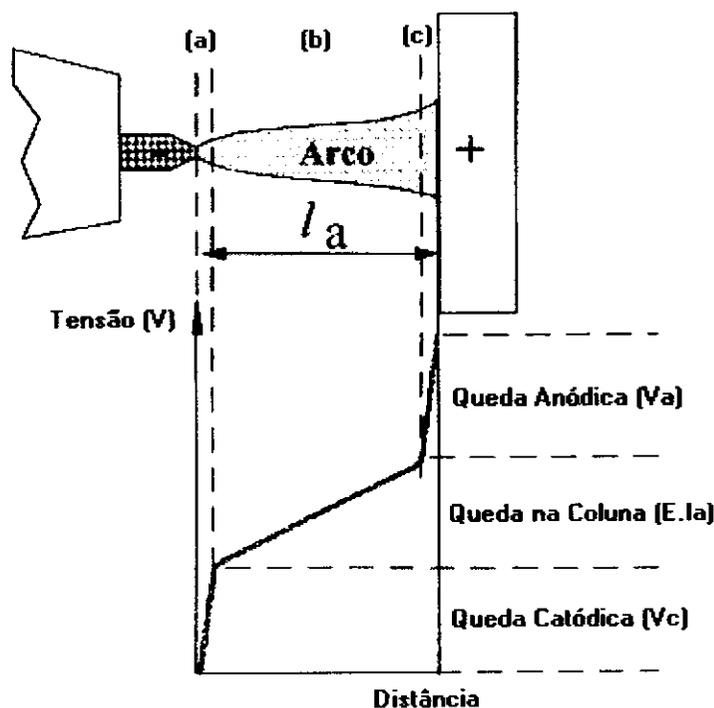


Figura 2 – Esquema da distribuição de potencial e regiões do arco elétrico: a) Zona de Queda Catódica, b) Coluna do Arco e c) Zona de Queda Anódica (Modenesi, 2001).

A coluna do arco corresponde a quase todo o volume do arco, podendo ter vários milímetros de comprimento, enquanto as zonas de queda são pequenas regiões junto aos eletrodos, com espessuras da ordem de 10^{-2} a 10^{-3} mm (Modenesi, 2001). A parcela de queda de tensão considerada significativa encontra-se nas regiões anódica (V_a) e catódica (V_c), sendo muito pequena na coluna do arco ($E.l_a$).

Em soldagem, a queda de tensão na região anódica (V_a) está entre 1V e 10V e na região catódica (V_c) a queda está entre 1V e 15V (os valores menores correspondem a um cátodo de tungstênio). As quedas de tensão junto aos eletrodos variam pouco com a corrente e são aproximadamente independentes do comprimento do arco (Modenesi, 2001). O comprimento do arco (l_a) é definido como a distância compreendida entre o ânodo e o cátodo.

2.2 O Arco Voltaico e Suas Regiões

2.2.1 Região Catódica

Assume importância na formação e manutenção do arco voltaico por ser a região onde se concentra a emissão de elétrons que fluem no interior do arco. A quantidade de elétrons produzidos na região catódica influi diretamente na distribuição espacial do arco voltaico, na regularidade do processo de transferência e na própria característica do cordão de solda depositado (Baixo, 1990).

Dentre os aspectos de interesse ao estudo da emissão de elétrons está o conceito de uma propriedade do reticulado cristalino denominada função trabalho. Segundo a teoria eletrônica, a propriedade função trabalho procura quantificar, da mesma forma que o potencial de ionização, a energia necessária para remover elétrons de um átomo. O conceito de função trabalho deriva da teoria do efeito fotoelétrico formulada por Einstein.

Com polarização direta (eletrodo conectado ao negativo da fonte), a região catódica inicia-se a partir da extremidade do eletrodo e é desta região que os elétrons são emitidos e acelerados em direção ao ânodo.

2.2.2 Coluna do Arco

Sob todos os aspectos que envolvem a física do arco voltaico, é sobre a região da coluna do arco que se concentra o maior volume de conhecimento acumulado. Apesar de se correlacionarem com a natureza do material que compõe o cátodo, muitos dos princípios físicos encontrados na coluna do arco podem ser considerados, em essência, os mesmos para os diferentes tipos de cátodos (Baixo, 1990).

A região da coluna do arco compõe-se de três zonas distintas, conforme ilustra a Figura 3 (Baixo, 1990).

- a) Coluna de plasma (núcleo do arco elétrico);
- b) Arco elétrico;
- c) Chama do arco.

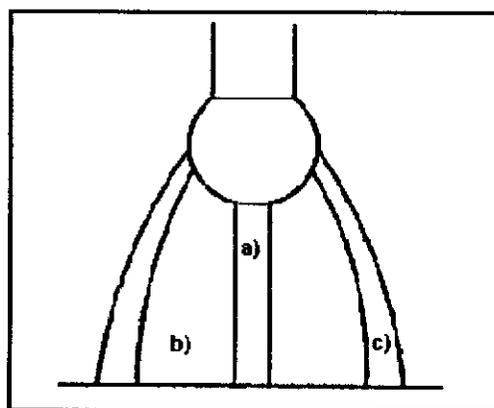


Figura 3 – Zonas da coluna do arco (Baixo, 1990).

A coluna de plasma corresponde a região mais interna da zona do arco voltaico, sendo formada por uma coluna gasosa no estado de completa ionização. Nesta zona, a temperatura encontra seu valor máximo, que decai gradualmente à medida que se afasta do núcleo em direção à periferia do arco voltaico. O contato com o

ambiente externo promove uma perda de calor da coluna de gás para o meio, impedindo que a zona do arco elétrico mantenha o estado de completa ionização.

Além da atmosfera gasosa, o arco voltaico contém material proveniente da vaporização de partículas dos eletrodos, decorrência direta do intenso aquecimento provocado pelas descargas elétricas. A terceira zona do arco voltaico aparece envolvendo a zona do arco elétrico, sendo denominada de chama do arco.

Esta zona compõe-se quase que inteiramente por gás de proteção em estado de plasma com menor excitação. Das três zonas que compõe o arco voltaico, a de maior importância é a do arco elétrico, em razão de ser nesta onde se concentra a maior parcela de corrente que circula pelo arco voltaico.

A queda de potencial elétrico na coluna do arco é aproximadamente proporcional à l_a ($V_{col} \approx E \cdot l_a$), onde E corresponde a intensidade do campo elétrico na coluna e depende da composição do gás do plasma.

De acordo com o esquema da Figura 2, a tensão no arco, para um dado valor de corrente, pode ser expressa pela equação:

$$V_{arco} = (V_C + V_A) + E.l_a \quad (02)$$

2.2.3 Região Anódica

Das três regiões que compõem o arco voltaico, a região anódica corresponde àquela onde se verificou o menor avanço em termos de conhecimento. Até onde se observou, sob vários aspectos a região anódica é similar a região catódica, caracterizando-se por uma elevada queda de potencial em um pequeno espaço físico.

Admite-se que uma das funções da região anódica é a de suprir o arco com íons positivos, auxiliando com isto na manutenção da corrente de plasma em cátodos

não refratários onde não se encontrem presentes óxidos para suprir o plasma com elétrons na quantidade necessária (Baixo, 1990).

A intensidade que o campo elétrico atinge nas regiões anódica e catódica confere a elas uma participação significativa no mecanismo de ionização do plasma. Após a abertura do arco, elétrons emitidos a partir do cátodo, a alta temperatura, são acelerados na região de queda de tensão catódica em direção ao ânodo. Neste trajeto, parte da energia cinética adquirida é liberada em colisões com átomos e moléculas presentes na coluna do arco. Como resultado destas colisões, além da produção de mais íons e elétrons, há liberação de calor para o meio, auxiliando, com isto, na manutenção do estado de ionização do gás.

Em sua trajetória final, os elétrons se chocam contra o ânodo, liberando energia na forma de calor. No sentido oposto, os íons positivos produzidos no plasma são conduzidos em direção ao eletrodo negativo (cátodo). Ao colidirem com a superfície do cátodo, liberam energia na forma de calor, mantendo o cátodo a uma temperatura elevada e auxiliando na manutenção da emissão de elétrons.

Neste mecanismo de emissão, duas variáveis que exercem um papel de grande importância são: a temperatura, e a intensidade do campo elétrico. Embora não se conheça completamente a forma como se dá esta produção, acredita-se que a emissão termoiônica, controlada pela temperatura, e a emissão de campo, controlada pela intensidade do campo elétrico da região de queda de tensão catódica, sejam os mecanismos responsáveis pela total emissão de elétrons que fluem para o interior do arco.

Em uma análise mais minuciosa sobre a estrutura física do arco voltaico, poder-se-ia subdividir as regiões de queda de tensão catódica e anódica em regiões mais elementares. Embora esta abordagem mais profunda permita estender o conhecimento sobre o arco voltaico, para sua implementação seria necessário introduzir informações que envolvem princípios físicos bastante complexos e que ainda não formam uma base de informações confiável. Por este motivo, considerou-se, nesta análise, apenas três regiões: região catódica, região anódica, e

a região da coluna do arco. O leitor interessado encontrará nos trabalhos de (Edels, 1961) e (Guile, 1984) aprofundamentos sobre as regiões do arco elétrico.

2.2.4 A Polaridade do Arco Voltaico

A polaridade é um aspecto importante nos processos de soldagem que utilizam o arco voltaico. Os pólos do arco voltaico não se comportam de modo igual. Em ambas as extremidades têm-se a conexão do arco voltaico com massas condutoras muito mais frias. Mas as conexões diferem entre si.

Na zona catódica, como citado anteriormente, devem passar os elétrons livres do cátodo ao extremo da coluna do arco, para que fique garantida a continuidade da corrente. Isto ocorre fundamentalmente devido a três fatores que ocorrem simultaneamente (Quites, 2002):

- a) emissão termoiônica;
- b) a alta intensidade do campo elétrico, da ordem de 10^6 volts/cm, capaz de arrancar elétrons do cátodo e a
- c) reflexão de íons neutralizados, que em cada choque retiram elétrons.

Já na zona anódica, imediatamente antes da superfície, há uma corrente pura de elétrons, já que o ânodo não pode emitir íons. A ionização se dá de duas maneiras:

- a) por efeito da alta temperatura e
- b) por choque dos elétrons que se dirigem ao ânodo.

Teoricamente, o bombardeio a que os elétrons submetem o ânodo deve ser mais eficiente do que o bombardeio dos íons no cátodo, pelos seguintes motivos (Quites, 2002):

- a) a energia cinética dos elétrons é maior do que a dos íons;
- b) o número de elétrons livres geralmente é maior que o número de íons livres;

- c) a emissão termoiônica aumenta ainda mais o número de elétrons que atingem o ânodo (a emissão termoiônica do ânodo não é considerada por que a força eletrostática a impede);
- d) o forte campo elétrico que existe junto ao cátodo arranca elétrons adicionais deste, aumentando ainda mais o número de elétrons que atingem o ânodo e
- e) a evaporação de elétrons do cátodo consome energia, enquanto que a chegada no ânodo se efetua com a entrega de energia.

Portanto, os fenômenos físicos que ocorrem nos pólos de um arco voltaico de soldagem são diferentes. De fato, com o arco entre dois eletrodos permanentes e iguais, verifica-se que a temperatura do ânodo é maior que a do cátodo. No processo TIG, por exemplo, com eletrodo no pólo negativo, há mais fusão no metal de base do que com o eletrodo no pólo oposto.

Quando se trata de eletrodos consumíveis, além dos fatores acima, é preciso considerar ainda o diâmetro do eletrodo, o mecanismo de transferência do metal para a peça, o tipo de gás de proteção do arco e a composição química do eletrodo.

O eletrodo consumível requer que parte da energia seja utilizada para a sua fusão e, inclusive, para um certo grau de vaporização, que sempre existe. Pode-se afirmar que, para eletrodos consumíveis, o caso mais geral é justamente o contrário do que se poderia prever a partir das condições teóricas válidas para eletrodos permanentes. Isto porque o mais comum é obter-se maior consumo do eletrodo quando ele se constitui no pólo negativo e maior fusão da peça quando o eletrodo se constitui no pólo positivo (Quites, 2002). Desse modo, uma regra geral não pode ser estabelecida.

Como os comportamentos dos pólos do arco são diferentes deve-se sempre especificar qual deles deve se situar no eletrodo, quando se faz referência às condições de soldagem. Nos processos de soldagem que utilizam corrente elétrica contínua (CC), convencionou-se chamar de polaridade direta ou normal aquela em que o eletrodo é o cátodo (negativo) e a peça é o ânodo (positivo). Para simplificar chama-se também de polaridade negativa (CC-), indicando que a corrente é contínua e que o eletrodo é negativo. Chama-se de polaridade inversa aquela em

que o eletrodo é (positivo). Neste caso, tem-se a polaridade positiva (CC+), indicando que a corrente é contínua e o eletrodo é positivo.

A neutralidade elétrica e o equilíbrio térmico são outras características físicas importantes do arco voltaico. A neutralidade elétrica corresponde à igualdade entre as quantidades de portadores de cargas positiva e negativa na coluna do arco, correspondendo a uma carga resultante nula. Como consequência da neutralidade elétrica, o campo elétrico ao longo da coluna do arco tende a ser basicamente constante (Modenesi, 2001).

O equilíbrio térmico corresponde à igualdade da energia cinética média das partículas constituintes do arco elétrico (átomos neutros, íons e elétrons). Para pressões próximas da ambiente, o número de choques entre os constituintes do arco é suficiente para equalizar a sua energia. Devido às altas temperaturas da coluna, os elétrons, íons e partículas neutras apresentam elevada energia cinética e se movem com velocidades elevadas. Como a massa dos elétrons é bem menor que a dos outros constituintes do plasma, eles têm maior velocidade e, desta forma, transportam a maior parte da corrente do arco.

A temperatura da coluna do arco elétrico é muito elevada, da ordem das encontradas nas superfícies estelares. Medidas espectroscópicas indicam uma temperatura da ordem de 6500K na soldagem com eletrodos revestidos e em torno de 10000 a 30000K nos processos GTAW, GMAW e plasma (Modenesi, 2001).

2.3 Considerações Teóricas para o Estudo do Arco Voltaico

Na soldagem MIG/MAG, praticamente em todas as aplicações, o arco voltaico é mantido entre a ponta do arame eletrodo, que é o ânodo, e o material de base que é o cátodo.

O arco funde o arame eletrodo formando gotículas que são então conduzidas através do arco até o material de base (peça). A formação das gotas de metal é governada por uma combinação de fatores que incluem o balanço de forças que

atuam sobre a gota, fenômenos térmicos que ocorrem no arame eletrodo, transferência de calor pelo plasma e distribuição de densidade de corrente na gota fundida.

As forças que atuam sobre as gotas determinam sua forma, volume e frequência com que se destacam do arame eletrodo. No arame eletrodo fundido ocorre aquecimento ôhmico pela passagem da corrente do arco elétrico, condução térmica e corrente de convecção de gotas. O calor transferido pelo plasma, através da conexão do ânodo ou cátodo, influencia o balanço de energia no eletrodo e afeta a sua taxa de fusão.

É de constatação experimental que a composição do gás de proteção influencia o tamanho e a frequência de destacamento das gotas.

Alguns modelos matemáticos, como os propostos nos trabalhos de Nemchinsky (1994) e mais recentemente no de Simpson & Zhu (1995), que tentam explicar o comportamento da transferência das gotas do arame à peça são unidimensionais, e simplificam o estudo, fixando algumas variáveis. Um modelo matemático mais consistente, que tente descrever mais completamente o arco, deve levar em conta toda a região de percurso do metal transferido, assim como o máximo de variáveis envolvidas no transporte.

Atualmente, os pesquisadores buscam por modelos matemáticos que venham descrever de modo mais global os processos dinâmicos que envolvem o arco voltaico, levando em conta desde a transferência de metal, como também as demais variáveis que comprometem a sua estabilidade.

Para se ter uma idéia da diversidade de parâmetros e variáveis a se considerar no estudo do arco, será apresentado, apenas a título de exemplo, um desses modelos. O leitor interessado encontrará nas referências que foram citadas ao longo desse tópico, mais detalhes sobre os modelos.

Haidar & Lowke (1996) propuseram um modelo matemático bidimensional que descreve as propriedades do plasma e dos eletrodos utilizando coordenadas

cilíndricas r e z , admitindo simetria rotacional em torno do eixo z . Nesse modelo é levado em consideração o que se passa nas três regiões do arco: região anódica (eletrodo), coluna do arco (plasma) e a região catódica (metal de base), veja a Figura 4.

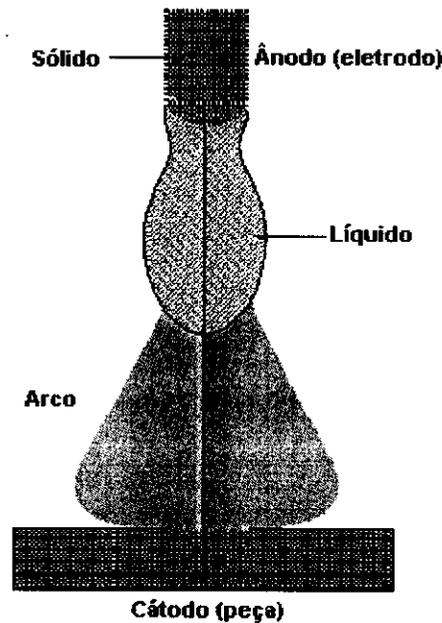


Figura 4 - Representação esquemática do arco e dos eletrodos (Haidar, 1998).

A região anódica consiste das fases sólida e líquida do metal, a mudança de seu contorno muda com o tempo dependendo da forma e do volume da gota (Figura 4).

No modelo de Haidar & Lowke as equações dinâmicas diferenciais que governam os comportamentos do arco e do eletrodo são:

- Equação da Continuidade da Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot \rho \cdot v_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \cdot v_z) = 0 \quad (03)$$

- Equação da Energia

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r h) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z h) = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{rk}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} - U \quad (04)$$

- **Equação do Momentum Radial**

$$\frac{\partial \rho v_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_r v_z) = -\frac{\partial P}{\partial r} - j_z B_\theta + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(2r\eta \cdot \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_r}{\partial z} + \eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) - 2\eta \frac{v_r}{r^2} \quad (05)$$

- **Equação do Momentum Axial**

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z^2) = -\frac{\partial P}{\partial z} + j_r B_\theta + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r\eta \frac{\partial v_r}{\partial z} + r\eta \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \rho g \quad (06)$$

- **Equação de Continuidade da Corrente**

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r\sigma \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0 \quad (07)$$

- **Lei de Ohm**

$$j_r = -\sigma \frac{\partial V}{\partial r} \quad ; \quad j_z = -\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \quad (08)$$

- **Equação de Maxwell**

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (rB_\theta) = \mu_0 j_z \quad (09)$$

onde. $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ é a permeabilidade magnética.

As variáveis e constantes presentes nas equações de (03) a (09) que descrevem as condições físicas do arco e do eletrodo, são:

- **P**: pressão;
- **T**: temperatura;
- v_r : velocidade radial;
- v_z : velocidade axial;
- **V**: potencial elétrico;
- j_r : densidade de corrente radial;
- j_z : densidade de corrente axial;
- B_θ : campo magnético azimutal;
- ρ : densidade;
- η : viscosidade;
- c_p : calor específico;
- **k**: condutividade térmica;
- σ : condutividade elétrica;
- **h**: entalpia;
- **U**: perda de radiação por unidade de volume.

Qualquer modelo teórico consistente para descrever o comportamento do plasma do arco voltaico deve conter as equações gasodinâmicas (conservação de massa, quantidade de movimento e energia), as equações eletrodinâmicas de Maxwell, a equação de Ohm, a equação de estado termodinâmico, as equações das constantes físicas do sistema, viscosidade, condutividade elétrica, etc, em função da temperatura e da pressão, e das condições de contorno (Marrota, 1992).

Acresce-se, ainda, que as propriedades físicas, tais como densidade, condutividade elétrica e térmica, viscosidade e outras variam largamente por causa dos enormes gradientes de temperatura e concentração das várias espécies presentes no arco elétrico.

É muito difícil, senão impossível, levando em conta todos esses fatores, uma solução teórica completa para o estudo do arco voltaico.

2.4 Estabilidade do Arco Elétrico

Um arco estável é a chave principal para a realização de soldas de boa qualidade. A estabilidade do arco elétrico depende das características do equipamento, das propriedades físicas e químicas do eletrodo, da atmosfera ionizante e do material de base (Miranda, 1999). A complexidade da análise da estabilidade do arco elétrico aumenta pela introdução da transferência metálica.

Estes fatores, contudo, interagem de modo complexo e, mesmo fixando a característica do equipamento, uma boa estabilidade só será alcançada, com base no conhecimento das propriedades do arco (Miranda, 1999).

O melhor ajuste das variáveis elétricas para a obtenção de uma boa estabilidade do arco, não é fácil, e deve ser realizado com base nas necessidades de ionização do gás, nas dimensões do eletrodo, no tipo de metal de base e do eletrodo, na posição de soldagem e nas exigências de qualidade (AWS, 1991 apud Miranda, 1999).

Os efeitos associados ao campo magnético como o efeito pinch e o sopro magnético tendem a desestabilizar o arco elétrico.

A força eletromagnética (com tendência de constrição) origina um jato de plasma na direção axial, exercendo uma pressão sobre a poça de fusão, de forma a alterar a geometria do cordão de solda (Farias, 1993 e Modenesi, 1996 apud Miranda, 1999) e ser responsável pela aceleração de grandes gotas no arco depois do destacamento do eletrodo (Waszink & Piena, 1986 apud Miranda, 1999).

A pressão decorrente do efeito pinch pode causar a instabilidade do arco elétrico. À medida que o núcleo de condução do arco se estreita a pressão se eleva, o que pode proporcionar a sua instabilidade. Isso ocorre, por exemplo, quando se utiliza gás de elevada condutibilidade térmica, como o CO₂. Já o sopro magnético distorce o arco, desviando-o de sua trajetória original, podendo ocasionar defeitos metalúrgicos e geométricos na soldagem (Farias, 1993).

2.5 Transferência Metálica

Denomina-se transferência metálica o fenômeno no qual o material de adição é transferido do eletrodo para a poça de fusão através do arco elétrico. O “International Institute of Welding” (IIW) classificou a transferência metálica, que ocorre nos processos a arco voltaico, em três principais grupos, compreendendo oito tipos de transferências.

Os principais fatores que influenciam o modo segundo o qual a transferência metálica ocorre são: dimensão e material do eletrodo, material da peça, tensão e corrente de soldagem, gás de proteção e temperatura do conjunto eletrodo-arco-peça.

Segundo o International Institute of Welding a transferência metálica está classificada em:

- Transferência por vôo livre (“free flight transfer”) que compreende os seguintes tipos de transferências:
 - transferência metálica globular;
 - transferência metálica por repulsão;
 - transferência metálica por projétil;
 - transferência metálica por pulverização axial;
 - transferência metálica por pulverização rotacional e
 - transferência metálica por explosão.

- Transferência por contato ininterrupto da gota (“bridging transfer”) e transferência por curto-circuito (“short circuit transfer”).

- Transferência metálica guiada pela escória (“slag protected transfer”).

A Figura 5 mostra um esquema dos tipos de transferência metálica.

Esta classificação foi baseada nas técnicas de identificação e estudo dos mecanismos de transferência. Exemplo destas técnicas são: fotografias de alta

velocidade, imagem ótica, emissão acústica, monitoramento do som do arco, monitoramento da luz do arco, etc.

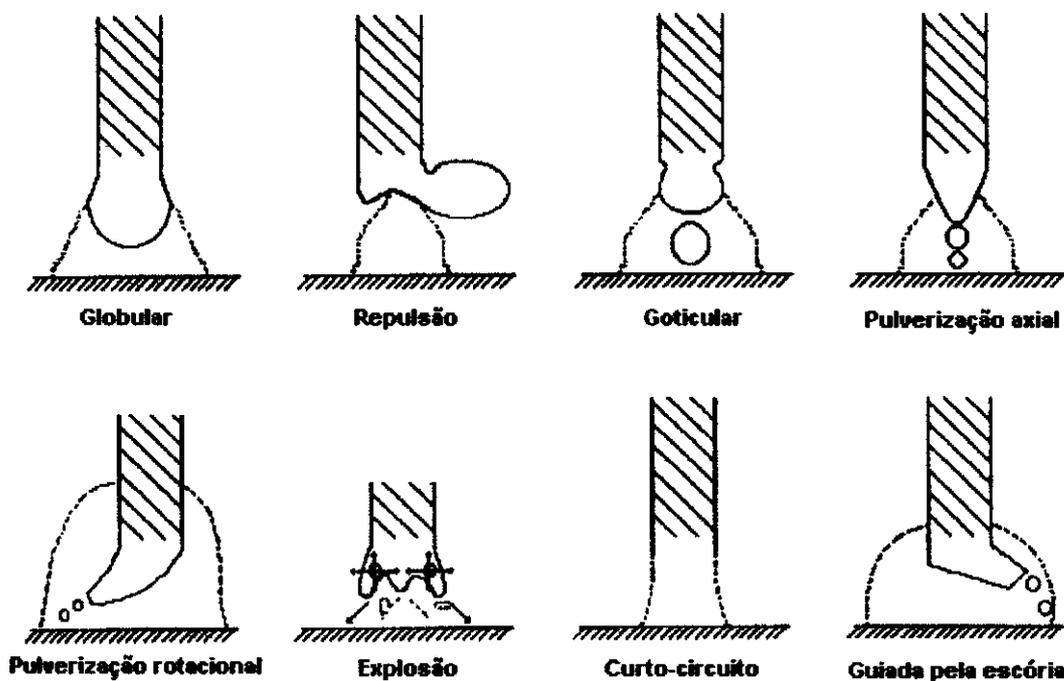


Figura 5 – Tipos de transferência metálica segundo o IIV (Marques, 1997).

2.5.1 Técnicas de Identificação dos Tipos de Transferência Metálica

No processo MIG/MAG, a eficiência do processo está diretamente associada ao tipo de transferência metálica. Portanto, torna-se importante o controle do modo de transferência metálica, na busca de qualidade, produtividade, estabilidade do arco e redução de custos (Miranda, 2002).

O fato da qualidade da solda depender diretamente da transferência metálica através do arco leva muitos pesquisadores a estudarem as variáveis que influenciam o modo de destacamento da gota.

Uma forma prática para controlar diretamente a transferência metálica consiste em empregar sensores que identifiquem a transferência da gota e reajustem os parâmetros de soldagem para melhorar a transferência metálica e, conseqüentemente, otimizar o processo. Entretanto, isto nem sempre é fácil de ser

realizado em virtude da dificuldade da identificação da transferência metálica (Miranda, 2002).

Dentre os principais sistemas de monitoramento dos modos de transferência metálica destacam-se:

- identificação por meio de filmagem em alta velocidade;
- identificação através dos sinais de tensão e de corrente do arco;
- identificação por meio da intensidade do sinal acústico do arco de soldagem e
- identificação por meio da intensidade luminosa irradiada pelo arco.

A filmagem em alta velocidade combinada com laser (técnica chamada de shadowgrafia) é muito eficiente, principalmente quando combinado com os sinais de tensão e corrente do arco, mas tem um alto custo e exige equipamentos de processamento avançados.

A identificação da transferência metálica utilizando-se os sinais elétricos de tensão e corrente, e sinal acústico, do arco, tem aplicação na determinação dos modos de transferência curto-circuito e globular, porém, para a transferência goticular esses sinais não são eficientes devido ao baixo valor da razão sinal/ruído deste modo de transferência (Miranda & Ferraresi, 1999 apud Figueiredo, 2000).

A identificação pela intensidade luminosa irradiada pelo arco pode ser utilizada para detecção dos três modos de transferência (curto-circuito, globular e goticular), pois para cada modo de transferência o comprimento do arco e a quantidade de íons metálicos emitidos variam para cada gota transferida, de modo que acarreta em modificações na luminosidade (Miranda & Ferraresi, 1999 apud Figueiredo, 2000).

Devido ao fato de a soldagem envolver condições adversas para a observação do fenômeno da transferência metálica, como: curto intervalo de tempo de transferência, pequenas dimensões do metal transferido, altas temperaturas, baixa relação sinal/ruído dos sinais elétricos e fenômenos eletromagnéticos inerentes ao

processo, torna-se difícil a construção de dispositivos de identificação da transferência.

Apresentam-se a seguir, as características dos modos de transferência metálica mais empregados no processo de soldagem MIG/MAG. Abordam-se a frequência e as flutuações dos sinais de tensão, de corrente e a intensidade sonora e luminosa (Miranda & Ferraresi, 1999 apud Figueiredo, 2000):

- A transferência por curto-circuito ocorre para tensões baixas e correntes moderadas. É caracterizada pelo contato da gota com a poça de fusão durante a transferência, com uma frequência de transferência de baixa para alta, o que causa flutuações relevantes nos sinais de tensão e corrente, na intensidade luminosa do arco e nos ruídos sonoros. Os soldadores experientes utilizam os ruídos sonoros para ajuste das condições ótimas de soldagem.
- A transferência globular ocorre para tensões altas e correntes não muito elevadas. A frequência de transferência das gotas é baixa. Como no curto-circuito, as oscilações nos sinais luminosos e sonoros são consideráveis, mas em menor intensidade.
- A transferência goticular ocorre para tensões moderadas e correntes elevadas. As gotas são transferidas em alta frequência. Este tipo de transferência é a que menos provoca flutuações relevantes nos sinais elétricos, sonoros e luminosos durante a soldagem.

Para se ter um controle efetivo da transferência metálica, o mesmo deve ser realizado baseando-se nas observações dos fenômenos a ela associados e na atuação sistemática dos parâmetros de soldagem em função das possíveis variações ocorridas (Miranda & Ferraresi, 1999 apud Figueiredo, 2000).

Constata-se, portanto, que além da seleção adequada do método de monitoramento para realizar a observação da transferência metálica, é de fundamental importância o conhecimento dos fenômenos envolvidos durante a soldagem. Somente desta forma, é possível atuar na fonte de energia para

melhorar a transferência metálica. Para mais detalhes sobre métodos de identificação da transferência metálica o leitor pode consultar a referência (Miranda, 2002).

2.6 Teorias para a Transferência de Metal

Existem diversas teorias para explicar a transferência de metal. Dentre elas pode-se citar: teoria do balanço estático das forças (Amson, Greene apud Kim & Eagar, 1993; Norrish, 1988 e Waszink & Graat, 1983 apud Miranda, 1999) teoria da instabilidade magnética “pinch” (Lancaster, Allum apud Kim & Eagar, 1993 e Lancaster, 1984 apud Miranda, 1999) teoria da força do plasma (Needham apud Kim & Eagar, 1993 apud Miranda, 1999) e teoria da velocidade crítica (Waszink apud Kim & Eagar, 1993 apud Miranda, 1999).

As teorias do balanço estático das forças e da estabilidade pinch são as mais difundidas por explicarem de forma mais global a transferência metálica.

2.6.1 Teoria do Equilíbrio Estático das Forças

As principais forças que podem atuar na ponta do eletrodo e contribuir para a transferência metálica são (Modenesi, 2001):

- a) força da gravidade (F_g)
- b) tensão superficial (F_γ)
- c) força eletromagnética (F_{em})
- d) força de arraste pela passagem de gases (F_a) e
- e) força de reação a jatos de vapores ou força de vaporização (F_v).

A Figura 6 ilustra esquematicamente as principais forças que atuam na gota durante a transferência metálica.

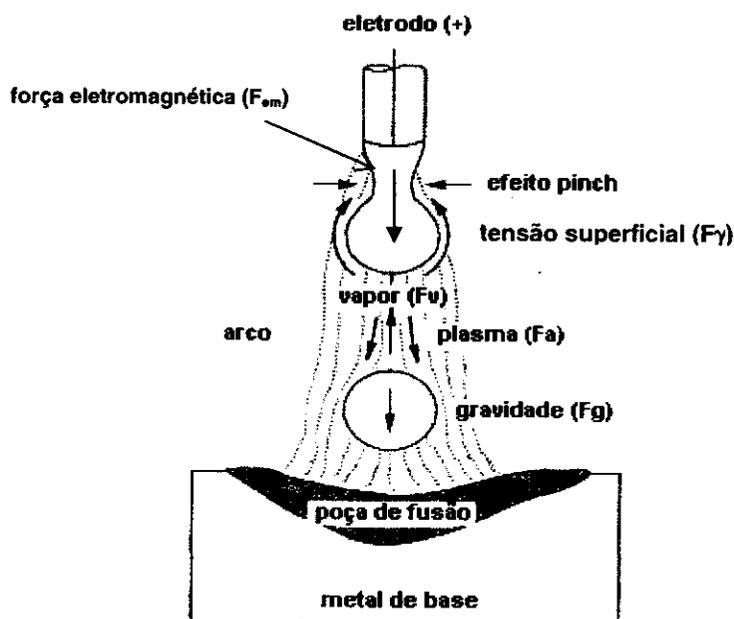


Figura 6 – Balanço de forças durante a transferência metálica (Eagar et al., 1997).

a) Força Gravitacional (F_g)

É a força devido à ação da gravidade. A intensidade da força gravitacional que atua sobre a gota, admitindo-se que a gota tenha forma esférica, é dada por:

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_g^3 \cdot \rho_g \cdot g \quad (10)$$

onde r_g é o raio da gota, ρ_g é a densidade da gota e g é a aceleração gravitacional.

A força gravitacional pode atuar de forma favorável ou não, com maior ou menor intensidade, o que irá depender da posição de soldagem.

Quando a solda é realizada na posição plana esta força age favoravelmente no destacamento da gota com sua componente máxima. Para a soldagem vertical, a mesma atua com uma componente perpendicular ao eixo do arco e, para a soldagem sobrecabeça, a resultante é oposta à transferência de metal. De qualquer modo esta força só será dominante no destacamento da gota em baixas correntes, devido à pequena força eletromagnética. A força gravitacional é dominante no modo de transferência metálica globular (Miranda, 1999).

b) Força Associada à Tensão Superficial (F_γ)

A força devido à tensão de superfície do metal líquido, chamada tensão superficial, age sempre no sentido de impedir que a gota se separe do eletrodo para a peça, ou seja, atua no sentido de impedir que a gota se transfira, exceto na transferência por curto-circuito onde a transferência da gota é auxiliada pela mesma. Sua intensidade é dada pela relação empírica (Reutzel et al., 1995):

$$F_\gamma = \frac{mg}{f(r/a)} \quad (11)$$

onde:

- $f(r/a) = 1 - 0,4(r/a)$ e $a = (2\gamma / \rho_m g)^{1/2}$
- r = raio do eletrodo.
- ρ_m = densidade da gota.
- γ = tensão superficial.
- a = constante de capilaridade.
- m = massa da gota.
- g = aceleração devido à gravidade.

A tensão superficial tem um importante papel no procedimento do processo de transferência metálica. Muitos fatores se combinam para determinar o efeito deste parâmetro sobre o modo de transferência. Dentre eles se inclui a composição e homogeneidade da gota, a temperatura da gota, o gradiente de temperatura da superfície, a composição do gás e a forma da gota (Norrish & Richardson, 1988 apud Miranda, 1999).

Como esta força modifica em função da forma da gota e esta varia durante a transferência (e outras forças dominantes apresentam este mesmo comportamento), acredita-se que o comportamento geral da transferência é dependente do tempo (Norrish & Richardson, 1988 apud Miranda, 1999).

c) Força Eletromagnética (F_{em})

A força eletromagnética, também conhecida como força de Lorentz, é oriunda dos campos elétrico e magnético gerados pela passagem de corrente elétrica através do condutor. É a força que predomina em altas correntes. Dependendo da trajetória do fluxo de corrente através da gota, poderá ser favorável ou não ao destacamento. Quando as linhas de fluxo de corrente divergem na gota, a força eletromagnética atua para o destacamento e, quando as linhas de corrente estão convergindo, ela atua em sentido contrário ao destacamento. Geralmente a força eletromagnética atua de forma favorável à transferência da gota em correntes não muito baixas.

A Figura 7 representa a atuação da força eletromagnética conforme o tipo das linhas de fluxo de corrente na gota metálica (Norrish & Richardson, 1988 apud Miranda, 1999).

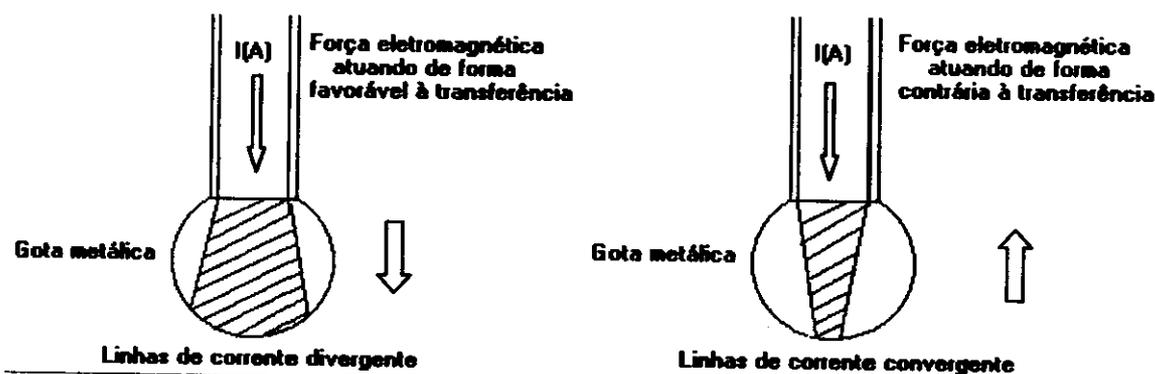


Figura 7 – Atuação da força eletromagnética conforme as linhas de fluxo de corrente (Norrish & Richardson, 1988 apud Miranda, 1999).

A intensidade da força eletromagnética é dada pela equação de Lorentz (Kim & Eagar, 1993):

$$\vec{F}_{em} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (12)$$

onde \vec{J} é a densidade de corrente e \vec{B} é o fluxo magnético.

A força eletromagnética tende a prevalecer sobre as forças de destacamento em correntes tipicamente requeridas em soldagens com modo de transferência goticular (Reutzel et al., 1995). O leitor encontrará mais detalhes sobre o efeito da força eletromagnética na formação da gota no trabalho de Jones et al. (1998).

d) A Força de Arraste pela Passagem de Gases (F_a)

A força de arraste exercida sobre a gota metálica é devida ao escoamento do gás de proteção, é dependente da velocidade do jato de plasma, da composição do gás e do tamanho da gota (Norrish & Richardson, 1988 apud Figueiredo, 2000). Atua em sentido favorável ao destacamento.

A intensidade da força de arraste pode ser estimada pela relação (Jones et al., 1997):

$$F_a = C \cdot A_g \cdot \left(\frac{\rho_p \cdot v_r^2}{2} \right) \quad (13)$$

onde C é uma constante, chamada coeficiente de arraste, A_g é a área da gota projetada perpendicularmente ao fluxo de plasma, ρ_p é a densidade do plasma, e v_r é a velocidade da gota relativa ao plasma.

A força de arraste, na maioria dos casos, é pequena e será significativa quando o tamanho da gota for grande, ou seja, em baixa corrente (Norrish & Richardson, 1988 apud Figueiredo, 2000).

e) A Força de Reação a Jatos de Vapores ou Força de Vaporização (F_v)

Em correntes elevadas pode ocorrer uma significativa vaporização metálica na superfície da gota, na área de contato com o arco. Uma aceleração térmica das partículas de vapor na coluna de plasma resulta na força de vaporização que se opõe ao destacamento da gota (Figueiredo, 2000). A força de vaporização é expressa pela seguinte fórmula (Reutzel et al., 1995):

$$F_v = \frac{m_o}{d_v} \cdot I \cdot J \quad (14)$$

onde:

- m_o = massa vaporizada por volume por ampère.
- d_v = densidade de vapor.
- I = corrente elétrica.
- J = densidade de corrente elétrica.

Em geral, a força de vaporização somente será significativa em altas correntes (Norrish & Richardson, 1988 apud Figueiredo, 2000).

Segundo a teoria do balanço estático das forças, ocorrerá o destacamento da gota quando ela ficar submetida a uma resultante, que conforme o esquema da Figura 6 é dada por (Norrish & Richardson, 1988 apud Figueiredo, 2000):

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v$$

2.6.2 Teoria da Instabilidade Pinch

A teoria da instabilidade pinch que foi desenvolvida por Rayleigh, baseia-se no modelo da instabilidade de uma coluna líquida cilíndrica, a qual se transforma em gotas – com menor energia livre – devido a um distúrbio do seu comprimento de onda característico (Machado, 1996).

Conforme a teoria, como a energia livre de uma esfera é menor que a de um cilindro, uma perturbação tenderá a quebrar a coluna líquida em várias esferas. Existe um valor crítico (λ_c), a partir do qual ocorrerá esta ruptura. Uma solução analítica aproximada para o cálculo de λ_c é dada pela equação abaixo (Kim & Eagar, 1993 e Modenesi, 1996 apud Miranda 1999):

$$\lambda_c = \frac{2\pi r}{\left(1 + \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2 r \gamma}\right)^{1/2}} \quad (15)$$

onde:

- r é o raio do eletrodo;
- μ_0 é a permeabilidade magnética do meio;
- I é a corrente de soldagem;
- r é o raio inicial do cilindro de transferência;
- γ é a tensão superficial.

O critério de destacamento da gota baseado na teoria da instabilidade pinch pode também ser postulado segundo o raio da gota metálica. Postula-se que quando o raio da gota excede um determinado valor, chamado de raio crítico, ocorrerá o destacamento da gota. O valor do raio crítico é estimado pela expressão (Reutzel et al., 1995):

$$r_{crit} = \frac{\pi(r_g + r_e)}{1,25 \left(\frac{x + r_g}{r_g} \right) \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2 \gamma (r_g + r_e)}} \right]} \quad (16)$$

onde:

- r_e é o raio do eletrodo;
- r_g é o raio da gota;
- μ_0 é a permeabilidade magnética do meio;
- I é a corrente de soldagem;
- x é o deslocamento da gota relativo a ponta do eletrodo;
- γ é a tensão superficial.

A teoria da instabilidade postula que a força pinch (força de compressão originada pelo campo magnético gerado pela passagem da corrente) aumenta a geração de gotas a partir da coluna líquida do eletrodo. Assim, a mesma explica o porquê da diminuição do tamanho da gota pelo aumento da corrente de soldagem (aumento da força pinch). De qualquer modo, esta teoria também não explica diretamente o efeito do tamanho do eletrodo e o modo de transferência repulsiva (Kim & Eagar, 1993 e Modenesi, 1996 apud Miranda, 1999).

A diferença no diâmetro da gota com a alteração do comprimento do eletrodo é explicado pela formação de um cone na extremidade do eletrodo (Kim & Eagar, 1993).

2.7 O Processo MIG/MAG

2.7.1 Fundamentos do Processo

A soldagem MIG/MAG usa o calor de um arco entre um eletrodo nu alimentado de maneira contínua e o metal de base. O calor funde o eletrodo e a superfície do metal de base para formar a solda. A proteção do arco e da poça de solda fundida vem inteiramente de um gás alimentado externamente, o qual pode ser inerte, ativo ou uma mistura destes. Portanto, dependendo do gás pode-se ter os seguintes processos:

- **Processo MIG (METAL INERT GAS):** injeção de gás inerte.

Exemplo de gases utilizados são (FBTS, 1987):

- argônio
- hélio
- argônio + 1% de O₂
- argônio + 3% de O₂
- argônio + hélio
- argônio + hélio + oxigênio, etc.

- **Processo MAG (METAL ACTIVE GAS):** injeção de gás ativo ou mistura de gases que perdem as características de inertes, quando parte do metal de base é oxidado.

Exemplo de gases utilizados são (FBTS, 1987):

- CO₂
- CO₂ + 5 a 10% de O₂
- argônio + 15 a 30% de CO₂

- argônio + 5 a 15% de O₂
- argônio + 25 a 30% de N₂

A Figura 8 ilustra o processo de soldagem MIG/MAG.

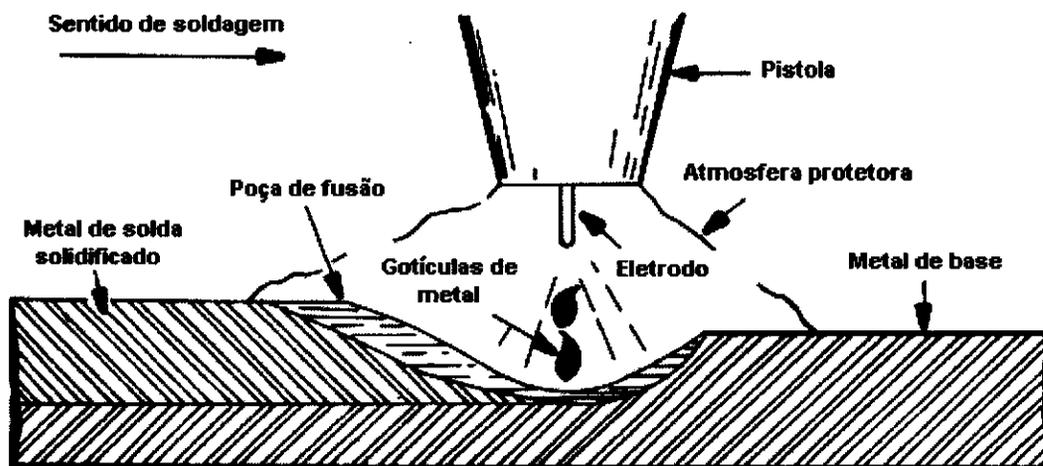


Figura 8 – Soldagem MIG/MAG (FBTS, 1987).

O processo de soldagem MIG/MAG é bastante versátil. Suas principais vantagens são:

- Taxa de deposição elevada (maior que na soldagem a eletrodo revestido) devido à alta densidade de corrente na ponta do arame;
- Penetração de raiz mais uniforme que no processo com eletrodo revestido;
- Menos gás e fumaça na soldagem;
- Alta velocidade de soldagem;
- Solda uma faixa ampla de espessura e materiais;
- Obtenção de cordões extensos sem muitas interrupções;
- Alimentação contínua do eletrodo;
- Soldagem em todas as posições;
- Problemas de distorção e tensões residuais diminuídos;
- Possibilidade de controlar a penetração e a diluição durante a soldagem;
- Facilidade de execução da soldagem;
- Como não existe escória, mínima limpeza pós-soldagem é exigida e nem se corre o risco de inclusão de escória na soldagem em vários passes e
- Permite a automatização industrial, possibilitando a utilização de robôs.

A soldagem MIG/MAG pode ser semi-automática ou automática. No processo semi-automático o eletrodo é alimentado automaticamente, através de uma pistola e o soldador controla a inclinação e a distância da pistola a peça, bem como a velocidade de deslocamento e a manipulação do arco.

2.7.2 Equipamento de Soldagem

O equipamento básico para a soldagem MIG/MAG consiste de uma tocha de soldagem, uma fonte de energia, um suprimento de gás de proteção, e um sistema alimentador de arame. A Figura 9 mostra o equipamento básico necessário para o processo de soldagem MIG/MAG.

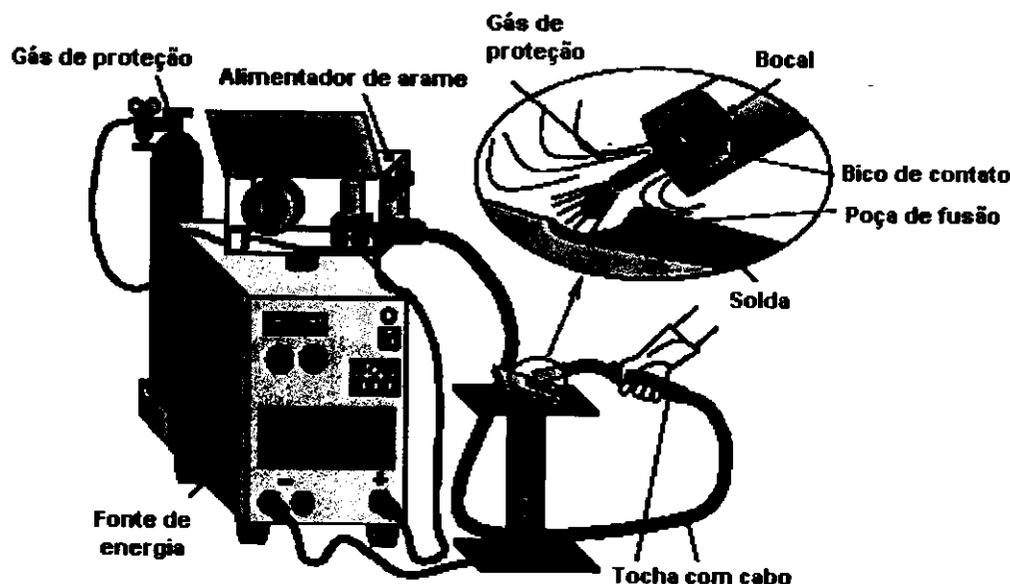


Figura 9 – Equipamento para a soldagem MIG/MAG (Miranda, 2002).

A fonte de energia tem, em geral, uma saída de tensão constante, regulável entre 15V e 50V, que é usada em conjunto com um alimentador de arame de velocidade regulável entre cerca de 1 a 18m/min. Este sistema ajusta automaticamente o comprimento do arco através de variações da corrente. Na soldagem MIG/MAG, utiliza-se, em praticamente todas as aplicações, corrente contínua com o eletrodo ligado ao pólo positivo (polaridade inversa ou CC+) (Modenesi & Marques, 2001). Nesta situação tem-se um arco mais estável, transferência estável, baixa salpicagem, e cordão de solda de boas características. Corrente contínua com polaridade direta é raramente usada, pois o arco se torna muito instável e de

pequena penetração. O processo MIG/MAG permite também o uso de corrente alternada.

A pistola ou tocha possui um contato elétrico deslizante (bico de contato), que transmite a corrente elétrica de soldagem ao arame, orifícios para a passagem de gás de proteção, bocal para dirigir o fluxo de gás e interruptor para acionamento do processo. O alimentador de arame (Figura 9) é composto basicamente de um motor, sistema de controle da velocidade do motor e rolos para impulsão do arame (Miranda, 2002).

2.7.3 A Transferência Metálica no Processo MIG/MAG

No processo MIG/MAG o metal pode ser transferido para a peça de trabalho por mais de um tipo de transferência. Classicamente, são três os meios básicos pelos quais o processo de soldagem MIG/MAG pode depositar solda numa junta:

- a) **Transferência por Curto-Circuito.**
- b) **Transferência Globular.**
- c) **Transferência por “Spray”, Goticular ou Pulverização Axial.**

2.7.3.1 Transferência por Curto-Circuito

A Transferência por curto-circuito é típica da soldagem com um pequeno comprimento de arco (menores valores de tensão de soldagem) e, em geral, com uma baixa corrente.

Neste modo de transferência, uma gota de metal se forma na ponta do eletrodo e vai aumentando de tamanho até tocar na poça de fusão ocorrendo o curto-circuito. Com o curto-circuito, a corrente eleva-se rapidamente, aquecendo o eletrodo por efeito Joule e aumentando a sua fusão. Nesse instante, o arco se extingue momentaneamente, a gota é atraída rapidamente para a poça de fusão sob a ação da tensão superficial, da força peso e de forças magnéticas intensificadas pelo

efeito de estrição (efeito pinch). Com isto, o curto-circuito é rompido e o arco é restabelecido (Modenesi, 2001).

A ponta do eletrodo toca a poça de fusão periodicamente (de 20 a 200 vezes por segundo), ocasionando os curtos-circuitos e a extinção do arco.

Durante um curto-circuito, a corrente aumenta rapidamente e a ruptura do contato entre a poça de fusão e o eletrodo tende a ser explosiva, com a vaporização de parte do material e a formação de inúmeros respingos. Por outro lado, se a corrente não aumentar de forma suficientemente rápida, o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da ruptura da ponte líquida e formar um emaranhado não fundido sobre o metal de base. As máquinas para soldagem MIG/MAG são equipadas com um controle (“indutância”) que é ajustado para controlar a velocidade de elevação da corrente e, assim, otimizar a ruptura do material ao final do curto-circuito (Modenesi, 2001).

Como o arco é extinto durante os curtos-circuitos, o calor transferido para a peça e, portanto, a capacidade de fusão da mesma fica reduzida nesta forma de transferência, o que pode levar à formação de defeitos de fusão (falta de fusão) na soldagem de peças de maior espessura. Por outro lado, este mesmo aspecto torna a soldagem por curtos-circuitos muito adequada para peças de pequena espessura. Esta é a forma de transferência mais comumente utilizada na soldagem MIG/MAG de aços estruturais com mistura de proteção rica em CO₂ e com arames de pequeno diâmetro (0,8 a 1,2mm) (Modenesi, 2001).

Quando não há o correto controle dinâmico da corrente no momento do curto-circuito, este modo de transferência se caracteriza por uma grande instabilidade no arco, podendo apresentar alto nível de salpicagem.

2.7.3.2 Transferência Globular

Na transferência globular o metal líquido forma-se na ponta do arame eletrodo e mantém-se preso a ele devido à tensão superficial. Com o aumento do tamanho da

gota, o metal de adição se destaca do eletrodo basicamente por ação da força peso (gravidade) contra a ação da tensão superficial, embora a força de arraste do plasma também contribua para o destacamento. As gotas de metal de adição se transferem para a poça de fusão antes que ocorra curto-circuito. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente (diminuem com o aumento desta), sendo comumente maior que o diâmetro do eletrodo. Esta forma de transferência é característica da soldagem com corrente baixa (força eletromagnética pequena) e elevada tensão (grande comprimento de arco elétrico), sua utilização é limitada à posição plana.

Na soldagem com misturas ricas em argônio, a transferência globular ocorre com corrente baixa e tensão elevada. Na soldagem de aços, com proteção de CO₂, em que não existem condições para a transferência goticular, a transferência globular ocorre também com valores elevados de corrente (Modenesi, 2001).

A soldagem com esta forma de transferência tende a ser muito instável devido às perturbações causadas no arco pelo destacamento de grandes gotas e a ocorrência de respingos. Nesse modo de transferência são comuns grandes flutuações de corrente e tensão de soldagens, restringindo a operação à posição plana (Modenesi & Marques, 2001). Este tipo de transferência pode gerar falta de penetração, falta de fusão e/ou reforço do cordão de solda excessivo.

2.7.3.3 Transferência Goticular

A Transferência por Spray, Goticular ou Pulverização Axial é característica da soldagem MIG/MAG com proteção rica em argônio e com o eletrodo positivo. A transferência ocorre com correntes suficientemente elevadas para que a força eletromagnética passe a controlar o processo de transferência.

À medida que se aumenta a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a peça diminui, até que, acima de uma certa faixa, ocorre uma mudança repentina no modo de transferência, passando de globular para goticular. Portanto, há uma faixa de transição entre os modos de

transferência globular e goticular. A corrente na qual ocorre esta mudança no modo de transferência é chamada de corrente de transição. A corrente de transição depende de fatores como a composição, diâmetro e comprimento do eletrodo e o tipo de gás de proteção (Modenesi, 2001).

Na transferência goticular, a extremidade fundida do eletrodo se alonga, comprimida por forças magnéticas radiais e tracionada por forças axiais formando uma coluna líquida afilada. As forças magnéticas que se originam pela passagem da corrente elétrica através deste líquido quebram esta coluna em gotas. Desse modo, da extremidade livre da coluna, desprendem-se gotas em fila, numa frequência muito alta.

A transferência goticular não é controlada pela força de gravidade, mas pela força eletromagnética, sendo as gotas lançadas para a poça de fusão independentemente da posição de soldagem. A transferência tende a ser muito estável, com mínimas perturbações no arco e pouca salpicagem.

A necessidade de uma corrente relativamente alta dificulta ou inviabiliza a soldagem de chapas finas (pela facilidade de furar o metal de base) ou a soldagem fora da posição plana (pela formação de uma poça de fusão grande e de difícil controle) com transferência goticular. Esta desvantagem da transferência goticular pode ser contornada com o emprego de corrente pulsada.

Outras formas derivadas destas são citadas na literatura, como a transferência globular repulsiva e outras diferentes formas da transferência spray (Modenesi, 2001).

No processo de soldagem MIG/MAG, mais do que em qualquer outro, a forma como o metal de adição se transfere do eletrodo para a poça de fusão pode ser controlada e determina várias de suas características operacionais. Conforme citado anteriormente, a transferência de metal através do arco depende de parâmetros operacionais, tais como o nível de corrente de soldagem, comprimento do arco, sua polaridade, diâmetro, comprimento e composição do eletrodo e a composição do gás de proteção.

Além desses parâmetros, outros podem afetar o modo de transferência metálica, em particular, a presença de contaminações tanto no metal de base como no arame eletrodo ou no gás de proteção podem perturbar fortemente a transferência metálica.

A Figura 10 mostra, esquematicamente, os campos operacionais das formas principais de transferência na soldagem MIG/MAG com eletrodo positivo e um gás de proteção à base de argônio.

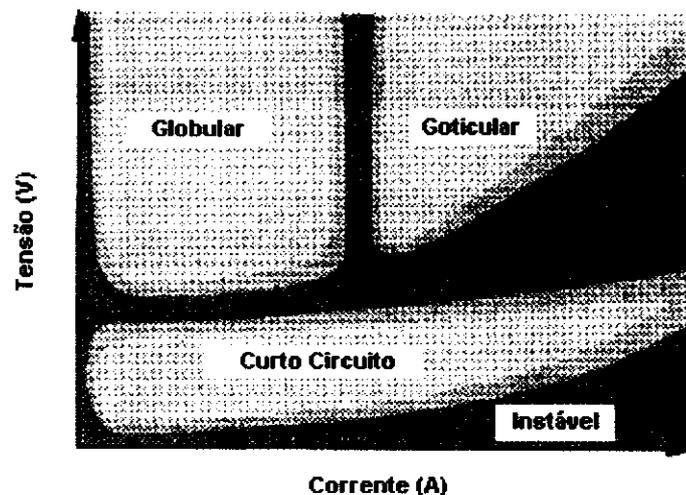


Figura 10 – Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem MIG/MAG com um gás de proteção a base de argônio (Modenesi, 2001).

Em qualquer modo de transferência, para que a deposição se dê de forma eficiente dois requisitos fundamentais devem ser satisfeitos:

- a) Sempre deverá haver equilíbrio entre a velocidade com que o eletrodo é introduzido no arco e sua velocidade de fusão a fim de evitar a ocorrência de “stubbing”, onde o eletrodo sólido toca a peça provocando a extinção definitiva do arco elétrico, ou o “burnback”, onde o eletrodo funde de maneira excessivamente rápida, provocando a fusão do bico de contato.
- b) A transferência metálica deve se dar com gotas de tamanho pequeno, aproximadamente do mesmo diâmetro do eletrodo.

2.7.4 Os Consumíveis do Processo MIG/MAG

Os consumíveis básicos do processo MIG/MAG são: os gases de proteção e os arames eletrodos. Os gases de proteção influenciam os seguintes aspectos do processo MIG/MAG (Hilton & Norrish, 1988 apud Miranda, 1999):

- nível de contaminação do metal de solda;
- estabilidade do arco;
- formato do cordão de solda;
- propriedades mecânicas da solda;
- características econômicas;
- geração de fumos.

As principais funções dos gases de proteção são (Hilton & Norrish, 1988; Lyttle & Stapon, 1990 e Norrish, 1992 apud Miranda, 1999):

- proteger a poça de fusão de elementos nocivos presentes no meio;
- melhorar a estabilidade do arco;
- proporcionar um cordão de solda com geometria adequada;
- melhorar as propriedades do metal de solda

Argônio e hélio são gases de proteção usados para a soldagem das maiorias dos metais não ferrosos. O CO₂ é largamente usado para a soldagem de aços doces. Quando da seleção de um gás protetor, o fator mais importante para se ter em mente é que quanto mais denso for o gás, mais eficiente é a sua proteção ao arco (FBTS, 1987).

Os arames eletrodos para soldagem MIG/MAG são similares ou idênticos na composição àqueles dos outros processos de soldagem que utilizam eletrodos nus, sendo que, para o caso específico da soldagem MAG, contêm elementos desoxidantes tais como silício e manganês em percentuais determinados (FBTS, 1987).

Via de regra, as composições do arame eletrodo e do metal de base devem ser tão similares quanto possível, sendo que, especificamente para o processo MAG, deve ser levado em conta o acréscimo de elementos desoxidantes (FBTS, 1987). Maiores detalhes sobre os consumíveis do processo MIG/MAG o leitor pode encontrar nas seguintes referências: (Miranda, 1999) ou em (www.infosolda.com.br, 2003).

2.7.5 Características e Aplicações de Soldagem

A soldagem MIG/MAG produz soldas de alta qualidade com procedimentos de soldagem apropriados. Como não é utilizado um fluxo, a possibilidade da inclusão de escória semelhante ao processo eletrodo revestido ou arco submerso é mínima, podendo, por outro lado, ocorrer a inclusão de uma escória vítrea característica do processo se a limpeza de interpasse não for feita adequadamente. Hidrogênio na solda é praticamente inexistente (FBTS, 1987).

A soldagem MIG/MAG pode ser realizada em todas as posições, dependendo do eletrodo e do gás ou gases usados. Pode soldar a maioria dos metais e ser utilizado inclusive para a deposição de revestimentos superficiais. Tem capacidade para soldar espessuras maiores de 0,5mm por transferência por curto-circuito ou empregando corrente pulsada. A taxa de deposição pode chegar a 15kg/h dependendo do eletrodo, modo de transferência e gás usados (FBTS, 1987).

2.7.6 Variáveis do Processo MIG/MAG

As variáveis mais importantes que afetam o aspecto e a geometria do cordão e a qualidade total da solda são (ASM, 1993 apud Miranda, 1999):

- a polaridade da corrente;
- o diâmetro do eletrodo;
- o comprimento do eletrodo;
- a velocidade de soldagem;
- a tensão do arco (comprimento do arco);

- a corrente de soldagem/velocidade de alimentação do arame eletrodo.

a) Polaridade da Corrente

Como já mencionado anteriormente, no MIG/MAG geralmente utiliza-se CC⁺(eletrodo ligado ao pólo positivo), porque produz um arco estável, com bom perfil do cordão de solda, maior penetração e menor salpicagem.

b) Diâmetro do Eletrodo

O aumento no diâmetro do eletrodo exige uma corrente mínima mais elevada para que se alcance as mesmas características de transferência de metal desejada. O diâmetro do eletrodo influencia a configuração do cordão de solda.

c) Comprimento do Eletrodo

O comprimento do eletrodo é a distância entre o contato elétrico e a ponta do eletrodo. O aumento do comprimento acarreta em aumento do calor gerado no eletrodo (devido ao aumento da resistência elétrica), colaborando para elevar a taxa de fusão. O melhor valor do comprimento do eletrodo para transferência por curto-circuito situa-se na faixa de 6 a 13mm (ASM, 1993 apud Miranda, 1999).

O aumento da resistência elétrica do eletrodo altera a energia proveniente do efeito Joule (RI^2), assim como modifica a tensão exigida da fonte de soldagem (AWS, 1992 apud Miranda, 1999). Desta forma, a soldagem com arames de pequenos diâmetros, requer uma maior tensão do arco em relação aos arames eletrodos de grandes diâmetros para a mesma corrente, pois a resistência da DBCP (distância bico de contato peça) faz parte da característica estática da fonte (AWS, 1992 apud Miranda, 1999).

d) Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem representa a taxa linear com que o arco se move ao longo da junta de solda. A penetração é máxima em velocidades intermediárias, ou

seja, a penetração primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem. Em velocidades muito baixas, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda aumenta, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e o calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base, fazendo com que a penetração seja baixa. Entretanto, para velocidades de soldagem muito altas, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui. Velocidades excessivas podem resultar em mordeduras e falta de penetração ao longo do cordão de solda (ASM, 1993 apud Miranda, 1999).

e) Tensão do Arco

A tensão do arco está relacionada com o seu comprimento. Mantendo as demais variáveis constantes, um acréscimo na tensão do arco resulta em aumento do comprimento do arco. No entanto, o mesmo comprimento do arco, poderá ser relacionado com diferentes valores de tensões, dependendo da corrente, do gás de proteção e do comprimento do eletrodo. Em termos de controle, apesar da importância do comprimento do arco, utiliza-se a tensão do arco justamente pela maior facilidade de monitoração. Uma diminuição na tensão resulta em cordões com perfil estreito e mais abaulado. Um aumento tende a ocasionar cordões mais planos com maior largura da zona de fusão (ASM, 1993 apud Miranda, 1999).

f) Corrente de Soldagem

Utilizando uma fonte com controle de tensão (tensão constante), a corrente varia diretamente proporcional à velocidade de alimentação do arame eletrodo. A explicação para este fato é que a corrente para estas fontes altera drasticamente com pequenas modificações no comprimento do arco. Um aumento na corrente (mantendo as demais variáveis constantes) ocasiona um aumento na taxa de deposição, na taxa de penetração e na largura do cordão de solda (ASM, 1993 apud Miranda, 1999).

Para que as soldas sejam produzidas com a qualidade exigida, é essencial o conhecimento e o controle destas variáveis, pois as mesmas não são completamente

independentes umas das outras, e muitas vezes, a modificação em uma delas pode requerer alteração de outras para produzir o resultado desejado. A habilidade e o conhecimento do operador para alcançar o melhor ajuste dos parâmetros são essenciais, pois esse melhor ajuste é também influenciado pelo material de base, pela posição de soldagem, pela composição do eletrodo, pela inclinação da tocha de soldagem, pelo tipo e vazão de gás de proteção, pelas exigências de qualidade e pelo número de passes (ASM, 1993 apud Miranda, 1999).

2.8 Dimensão Fractal

2.8.1 Introdução

A Dimensão Fractal tem sido aplicada na análise das características de vários processos matemáticos, físicos, biológicos, econômicos etc, onde as estruturas investigadas não podem ser avaliadas através da tradicional geometria euclidiana, uma vez que esta não pode fornecer informações suficientes sobre as propriedades em estudo (Rocha, 2003).

Na ecologia estuda-se a característica dos aglomerados de grãos de areia, a estrutura das árvores, a organização de um gramado em um campo, o comportamento dos animais através das trilhas abertas por eles na mata etc (Rocha, 2003).

Em meteorologia procuram-se modelos que possam representar a previsão das condições climáticas, sendo investigadas também a morfologia de nuvens na atmosfera e o contorno do litoral de continentes ou ilhas (Laux, 2001).

Em ciências biológicas utiliza-se a dimensão fractal para estudo do contorno de células, procurando-se diferenciar processos normais e patológicos, sendo ainda utilizada na investigação da organização dos tecidos celulares, a disposição de artérias no sistema renal, a fragmentação da árvore tráqueo-bronquial e da estrutura da rede das células nervosas (Cagy, 1997 apud Rocha, 2003).

Na medicina a dimensão fractal é empregada para a identificação e classificação de padrões oriundos de sinais biológicos como eletrocardiograma, eletroencefalograma, estabilometria, na evolução de focos epidêmicos, etc (Hernández et al, 1995 apud Rocha, 2003).

Na computação a dimensão fractal é utilizada na identificação, representação e compressão de imagens digitalizadas, enquanto na economia têm sido investigadas as propriedades inerentes às flutuações nas bolsas de valores (Rocha, 2003).

Em engenharia, a quantidade de pesquisas envolvendo propriedades mecânicas e a teoria dos fractais tem aumentado substancialmente, em particular na análise de superfícies de fraturas (Silva, 2002). Estudos experimentais sobre as relações entre a dimensão fractal de superfícies fraturadas e a tenacidade a fratura têm se revelado importante ferramenta para a análise de falhas de elementos estruturais (Hein, 2002).

Encontra-se na natureza diversas formas geométricas, as quais são difíceis de serem descritas pela geometria tradicional Euclidiana. Suas formas apresentam uma maior complexidade, que necessita de uma nova linguagem para descrevê-las, surge então a geometria fractal ou geometria da natureza.

As primeiras investigações sobre a auto-semelhança de figuras e sinais datam do final do século XIX e início do século XX, como os trabalhos de George Cantor (1872), Giuseppe Peano (1890), David Hilbert (1891), Helge Von 'Koch (1904), Waclaw Sierpinski (1916), Gaston Julia (1918) e Felix Hausdorff (1919), que desenvolveram estudos sobre aspectos relacionados à irregularidade de processos matemáticos. Tais trabalhos forneceram as bases teóricas para o matemático Benoit Mandelbrot, o qual estudou e caracterizou esse tipo de processo denominado-os "fractais". O termo fractal provém da palavra latina fractus que significa fragmentado, irregular, partido, fracionário (Mandelbrot, 1989; Peitgen et al., 1992), e foi definido no final da década de 70 quando Mandelbrot trabalhava no Centro de Pesquisas Thomas J. Watson da IBM, para descrever os sistemas com dimensão fracionária.

2.8.2 As Características Fractais

As Dimensões Euclidianas geralmente são as mais utilizadas na investigação de sistemas, onde um ponto apresenta dimensão zero, uma reta tem dimensão unitária, uma superfície mostra duas dimensões e um volume apresenta três dimensões.

Sistemas matemáticos, físicos, etc. mais elaborados podem apresentar dimensões superiores ou mesmo intermediárias às citadas, conforme sugerido por (Mandelbrot, 1983 apud Rocha, 2003).

Exemplos de sistemas apresentando dimensões fracionárias estão mostrados na Figura 11.

Nesta figura, no item “a”, está mostrado o conjunto de Cantor, no qual é retirado sistematicamente o terço médio central do segmento de reta anterior. Neste sistema, que apresenta dimensão fractal igual a 0,6309, a estrutura mostra mais informações que um ponto e menos que uma reta.

No item “b” é mostrada a curva de Koch, a qual é formada através da sucessiva inserção de triângulos proporcionalmente menores nos lados da figura formada anteriormente. A curva de Koch apresenta dimensão fracionária 1,2618, possuindo mais informação que uma reta e menos que um plano.

O item “c” exhibe o esquema da esponja de Menger-Sierpinski, onde para um cubo com uma dada aresta é retirado sistematicamente outro cubo com a terça parte da referida aresta. O conjunto apresenta mais informações que um plano e menos que um volume, tendo dimensão fractal igual a 2,7268.

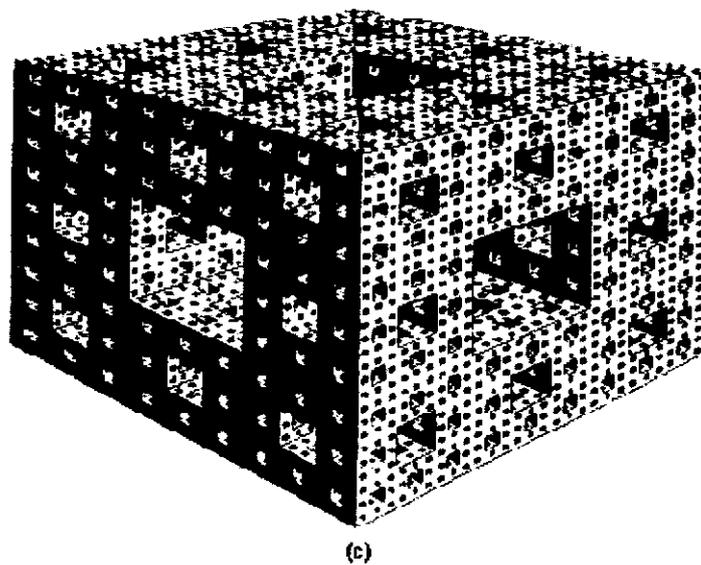
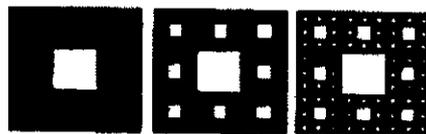
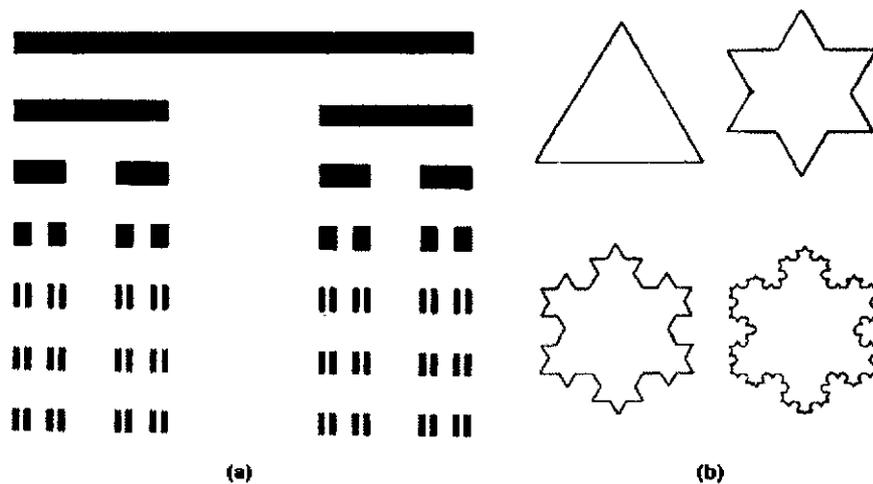


Figura 11 – (a) Conjunto de Cantor (dimensão fractal 0,6309), (b) Curva de Kock (dimensão fractal 1,2618) e (c) Esponja de Menger-Sierpinsky (dimensão fractal 2,7268) (Rocha, 2003).

2.8.3 A Dimensão Fractal - Df

Os objetos e sinais com propriedades fractais apresentam características de auto-similaridade, invariância em escala e detalhamento infinito (Mandelbrot, 1983), podendo ser caracterizados através da primeira dimensão generalizada denominada dimensão fractal (Fiedler-Ferrara & Prado, 1995 apud Rocha, 2003).

Sinais oriundos de sistemas teóricos podem apresentar as propriedades fractais matemáticas citadas anteriormente, diferindo de sinais experimentais que podem mostrar características fractais a nível estatístico. Para estes sinais experimentais a dimensão fractal pode ser estimada considerando segmentos inteiros ou trechos consecutivos (superpostos ou não) (Rocha, 2003).

Deve-se ressaltar que a dimensão fractal global de um sinal experimental, estimada para o segmento total, pode não corresponder às dimensões fractais locais, obtidas para trechos específicos (Peitgen et al., 1992).

Sinais ou sistemas com propriedades fractais apresentam relacionamento em forma de lei de potências (Peitgen et al., 1992), através da qual duas variáveis quaisquer x e y relacionam-se como:

$$y = k \cdot x^d \quad (17)$$

onde k é uma constante arbitrária, e d é um número relacionado com o conceito de dimensão, podendo ser determinado através da equação:

$$\log y = d \cdot \log x + \log k \quad (18)$$

Através de uma investigação numérica pode-se ajustar uma reta aos valores logarítmicos de “ x ” e “ y ”, utilizando-se o método de mínimos quadrados, através do qual obtém-se o valor da dimensão fractal d , considerando-se a constante “ k ” igual à unidade.

$$d = \frac{\log y - \log k}{\log x} \quad (19)$$

Algumas técnicas para estimativa da dimensão fractal D são descritas a seguir.

2.8.4 Técnicas para Estimativa da Dimensão Fractal

Aparentemente a primeira técnica utilizada para estimativa da dimensão fractal foi baseada na superposição de uma rede quadriculada ao sinal, sendo denominada método de contagem de caixas (“box-counting”) (Rocha, 2003).

Procedimentos semelhantes baseados na superposição do sinal por uma rede utilizando círculos (Dubuc et al., 1989 apud Rocha, 2003), retângulos ou triângulos (Maragos & Sun, 1989, 1993 apud Rocha 2003), foram propostos posteriormente.

Uma outra técnica visando estimar a dimensão fractal foi proposta por Frameshift-Richardson (Voss, 1988 apud Rocha, 2003), que desenvolveu procedimento para avaliação do perímetro de figuras, denominado “método da régua”.

Voss, no mesmo intuito, sugeriu que a dimensão fractal fosse investigada através da variabilidade logarítmica do espectro de potências do sinal (método do expoente espectral η) e Higuchi propôs a utilização da variabilidade da amplitude dos incrementos do sinal (Rocha, 2003).

2.8.5 A Técnica da Contagem de Caixas

A dimensão fractal de um objeto auto-semelhante pode ser obtida, na prática, através do método de “contagem de caixas” (Peitgen et al., 1992). Esse método utiliza a superposição do objeto por uma estrutura quadriculada de aresta ε , obtendo-se o número de quadrados $N(\varepsilon)$ necessários para cobertura, i.e. que contenham pelo menos um ponto do objeto conforme Figura 12 (Voss, 1988 apud Rocha, 2003).

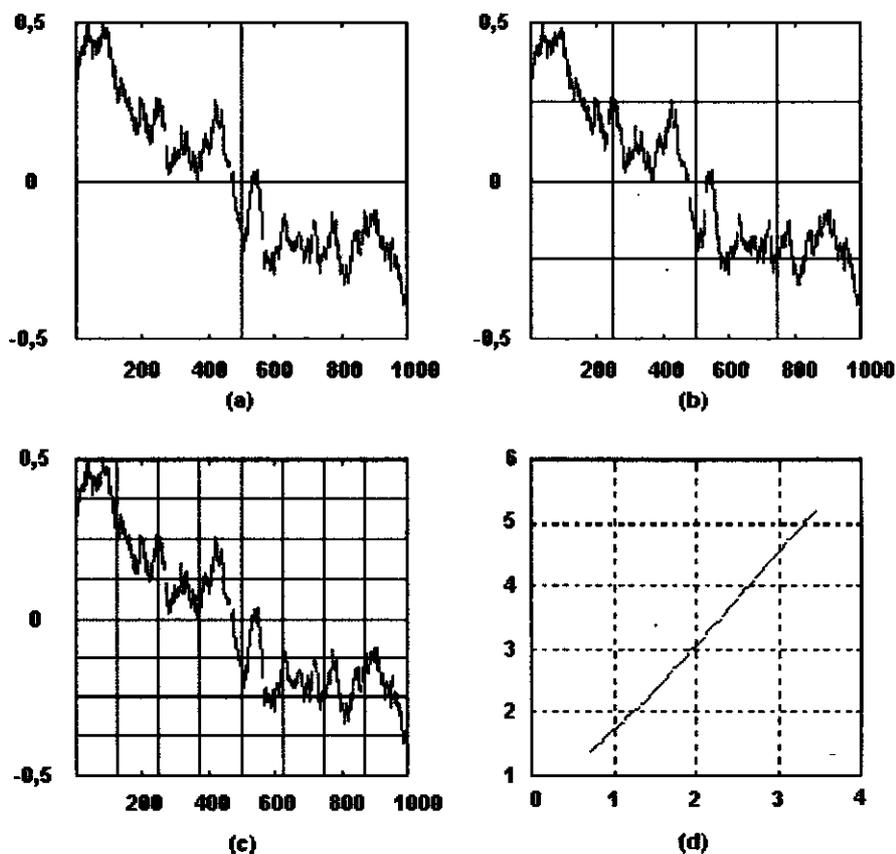


Figura – 12 Procedimento para estimativa da dimensão fractal de um sinal, utilizando o método de superposição por quadrados. Observa-se que o número de quadrados $N(\epsilon)$ necessários à cobertura do sinal aumenta com o decréscimo da aresta ϵ dos quadrados (a), (b) e (c). O gráfico da relação entre os logaritmos do número de quadrados e aresta dos mesmos é exibido em (d) (Rocha, 2003).

Reduzindo-se ϵ , o número de quadrados aumenta e o gráfico do logaritmo de ϵ pode ser obtido. Assumindo-se que $N(\epsilon)$ segue a lei de potências (17), o coeficiente de inclinação da reta é uma estimativa da dimensão fractal como em (19), conforme ilustrado na Figura 12 (a), (b) e (c) (processo de cobertura por inúmeros quadrados) e na Figura 12 (d), para a qual a inclinação da reta é D (Peitgen et al., 1992):

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log \left(\frac{1}{\epsilon} \right)} \quad (20)$$

2.8.6 O Algoritmo de Estimativa da Dimensão Fractal

O método de contagem de caixas, como mencionado anteriormente, consiste em superpor uma rede quadriculada a um sinal, no domínio do tempo, estabelecendo uma relação logarítmica entre o comprimento da aresta “ ϵ ” dos quadrados da rede e o número de quadrados “ $N(\epsilon)$ ” necessários à cobertura do sinal.

Para o procedimento de superposição considera-se o comprimento da primeira aresta “ ϵ ” igual a 1 sendo as arestas subseqüentes o dobro do comprimento da aresta imediatamente anterior. O comprimento da maior aresta é igual ao número de amostras do sinal, considerado como potência de base 2 para simplificação. O procedimento é ilustrado na Figura 13.

O procedimento de estimativa de contagem de caixas, “box-counting”, considera que a malha de cobertura do sinal é composta de quadrados cujas arestas tendem a zero.

Para um sinal contínuo, cada quadrado da malha pode conter mais de um ponto do sinal sendo necessário um número infinito de quadrados para sua cobertura. A relação entre este número de quadrados e a aresta que tende a zero fornece a estimativa da dimensão fractal teórica.

Para um sinal discreto cada quadrado da malha contem apenas um ponto do sinal sendo possível utilizar um número menor de quadrados do que aquele esperado para cobertura de um sinal contínuo (veja Figura 13 e equação 21).

A reta ajustada, através do método de mínimos quadrados, à relação logarítmica entre o número de quadrados utilizados na cobertura do sinal e o inverso da aresta do quadrado, apresenta um coeficiente de inclinação que fornece uma estimativa do valor da dimensão fractal como mostrado na equação (21) e explicado na Figura 14.

$$D = \frac{\log_2[N(s)]}{\log_2(1/s)} \quad (21)$$

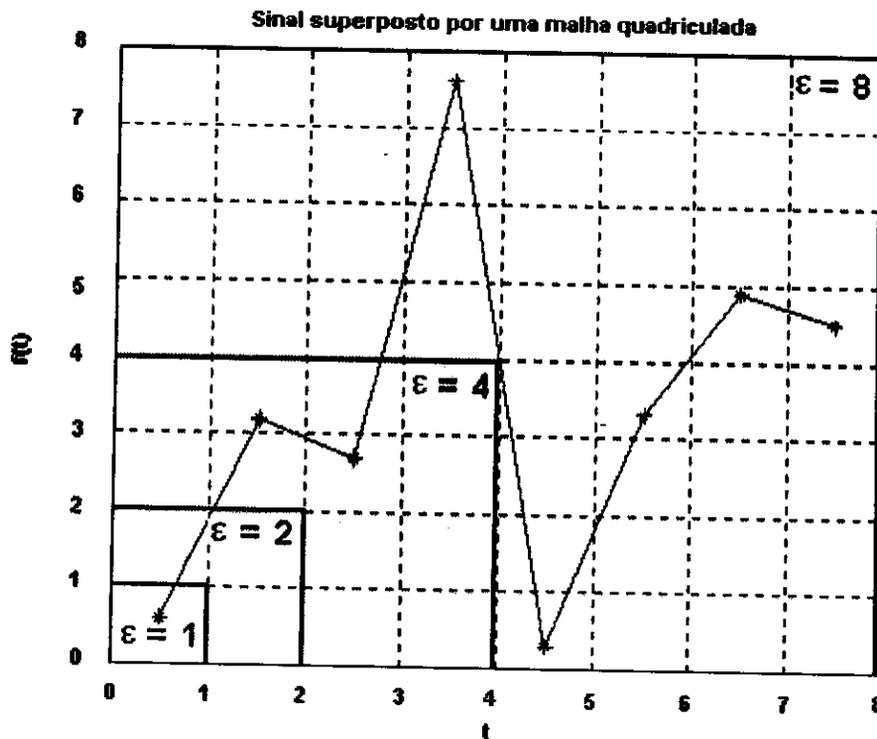


Figura 13 – Sinal superposto por uma malha quadriculada, ilustrando o procedimento de contagem de caixas (Rocha, 2003).

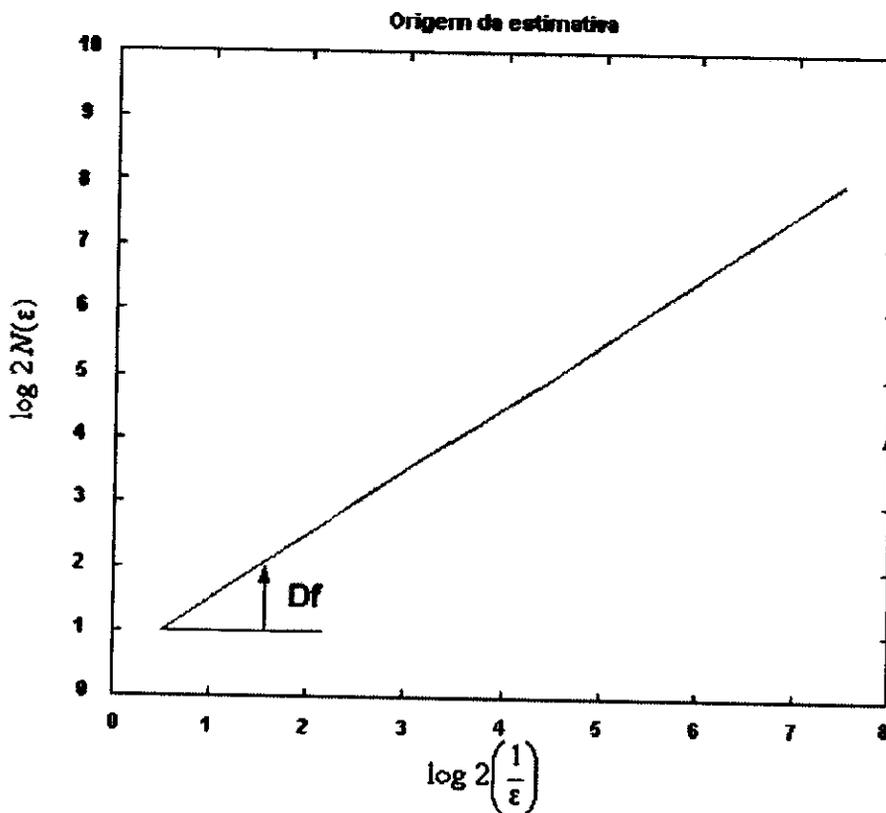


Figura 14 – Relação logarítmica entre o número de caixas para cobertura do sinal e a aresta das referidas caixas, mostrando uma reta cuja inclinação fornece o valor da dimensão fractal D (Rocha, 2003).

Experimentalmente, para sinais amostrados (discretos) a menor aresta é considerada com valor unitário, o que atribui aos quadrados uma área maior do que o sinal pode, efetivamente, cobrir, diminuindo a precisão dos resultados (Rocha, 2003).

Diante das diversas aplicações da técnica de medidas da dimensão fractal já mencionadas, neste trabalho será verificado se o evento da transferência metálica revela um comportamento de auto-similaridade dos sinais de tensão de soldagem.

Será investigado se medidas da dimensão fractal do sinal de tensão de soldagem são capazes de revelar o fenômeno da transferência metálica. Será estudado se há relação entre variáveis elétricas do sinal, como tensão e corrente elétrica, com a dimensão fractal e se a técnica mostra-se, também, promissora para o caso de sinais elétricos de soldagem.

Capítulo 3

3. Materiais e Métodos

Será mostrado como foram obtidos os sinais de tensão utilizados para análise da dimensão fractal, e também o procedimento para o cálculo da dimensão fractal dos sinais. É feita uma descrição sumária dos equipamentos, dos acessórios e dos materiais de consumo empregados. É também apresentada a montagem da bancada experimental de onde foram obtidos os dados dos sinais de tensão.

Os sinais analisados neste trabalho foram cedidos pelo Professor Doutor Hélio Cordeiro de Miranda do Laboratório de Engenharia de Soldagem da Universidade Federal do Ceará, o Engesolda.

A Figura 15 é uma ilustração da bancada experimental de onde os sinais foram adquiridos. A bancada consiste da fonte de soldagem, do sistema de alimentação do arame eletrodo, do suporte do corpo de prova, da tocha de soldagem e dos sistemas de monitoramento e de aquisição de dados.

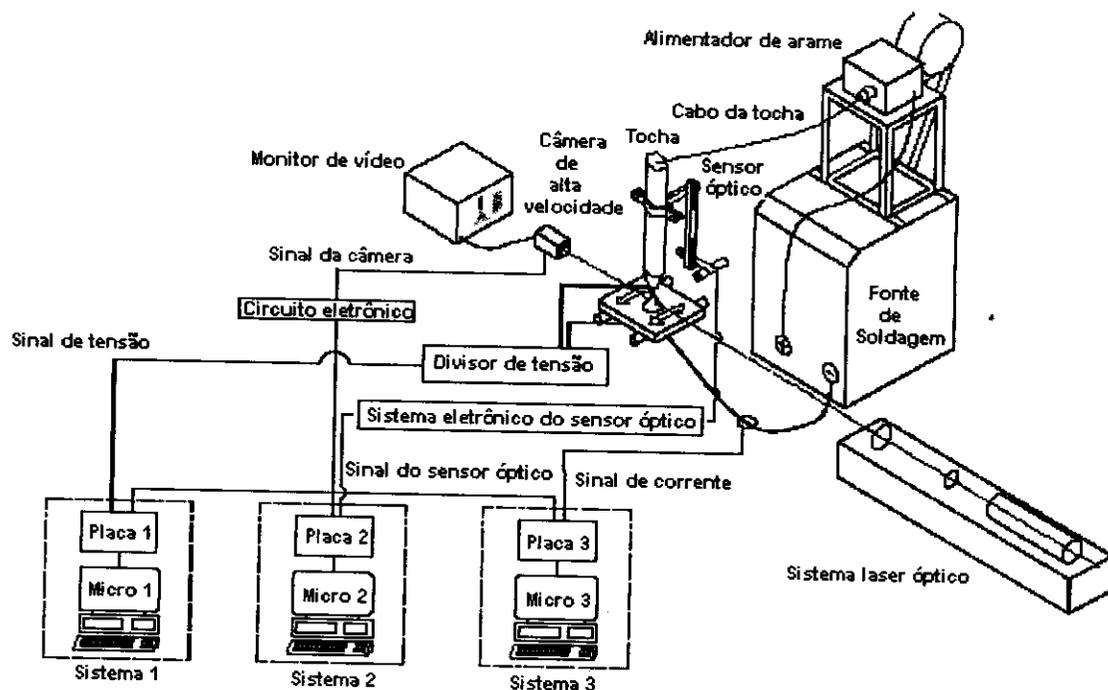


Figura 15 - Ilustração da bancada utilizada para obtenção dos sinais de tensão (Miranda, 2002).

Será feita a seguir uma breve descrição dos componentes da bancada experimental.

3.1 A Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem utilizada foi do tipo eletrônica multiprocesso que permite, durante a soldagem, o ajuste dos parâmetros através de seu painel ou via microcomputador.

3.2 Sistema de Alimentação do Arame Eletrodo

O sistema de alimentação do arame eletrodo é parte integrante da fonte de soldagem. É constituído de roletes de tração e acionamento eletrônico de rotação. Com a fonte selecionada com imposição de corrente, o sistema de alimentação pode operar em dois modos distintos: normal e especial. No modo normal, a velocidade de alimentação do arame eletrodo é constantemente variada de modo a manter uma tensão de referência que é ajustada no cabeçote, denominada de tensão de referência. Já operando no modo especial, a fonte impõe uma velocidade de alimentação do arame eletrodo constante, independente de variações de tensão que ocorram no arco.

O sistema de alimentação foi montado sobre um suporte na fonte de soldagem de modo que a tocha ficasse numa posição mais reta possível, a fim de evitar problemas com a velocidade de alimentação e facilitar a alimentação do arame.

3.3 Mesa de Deslocamento do Corpo de Prova

É a mesa responsável pelo deslocamento do corpo de prova, sua velocidade é programável e pode chegar até 80cm/min. A mesa é constituída de uma base, no qual a velocidade e o sentido de deslocamento são controlados por um sistema motor/fuso. O corpo de prova é fixado na base do sistema de deslocamento.

3.4 Materiais Consumidos

Para a aquisição dos sinais elétricos de tensão e corrente de soldagem foi realizada uma soldagem automática de simples deposição na posição plana. Na soldagem de posição plana a face da solda é aproximadamente horizontal. A figura 16 mostra uma soldagem na posição plana. Foram utilizados como corpos de prova chapas de aço ABNT 1020 com as seguintes dimensões: 150 x 50 x 60mm.

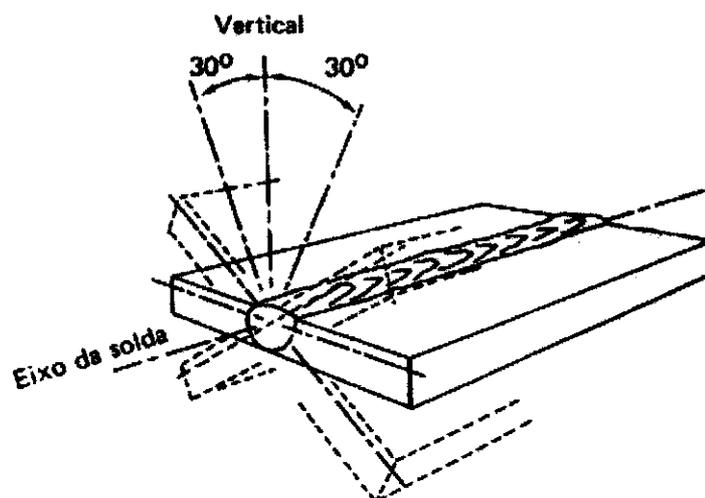


Figura 16 - Soldagem na posição plana (FBTS, 1987).

Os arames eletrodos usados tinham 1,0 e 1,2mm de diâmetro e especificação AWS E60-S1.

A proteção gasosa era uma mistura de 80% de Ar com 20% de CO₂, com vazão de 12litros/min. A soldagem foi executada com velocidade de soldagem de 25 a 30cm/min e com velocidade de alimentação do arame eletrodo de 7m/min. A posição da tocha era mantida perpendicular à chapa com distância bico de contato peça (DBCP) de 18mm.

3.5 O Sistema de Monitoramento

O sistema de monitoramento é composto pelo conjunto de geração e armazenamento de imagens e pelo sistema de aquisição e sincronização dos sinais da tensão e da corrente de soldagem.

3.5.1 Conjunto de Geração e Armazenamento de Imagens

O conjunto de geração e armazenamento de imagens é constituído por um feixe de laser, uma filmadora de alta velocidade, um monitor, um gravador digital e um analógico (Miranda, 2002). A Figura 15 ilustra o conjunto de geração e armazenamento de imagens.

Utilizou-se a técnica de shadowgrafia para geração de imagens. A shadowgrafia é um sistema óptico utilizado para obter a sombra da imagem, que é gravada em uma câmera de filmagem, ou seja, é obtida a fotografia da sombra. O sistema consiste de um cabeçote laser, conjunto de lentes e câmera de filmagem (Figueiredo, 2000). A Figura 17 representa um esquema da técnica de shadowgrafia.

Para o sistema de shadowgrafia foi utilizado um cabeçote de laser de 20mW que emite um feixe de diâmetro de 1,2mm, que passa por um conjunto de filtros e lentes, a fim de se obter a luminosidade adequada para a visualização da imagem. Usou-se, também, uma filmadora com capacidade de filmagem de 2000 quadros por segundo, sistema de gravação de imagem e monitor de vídeo para visualização e ajuste do sistema (Miranda, 2002).

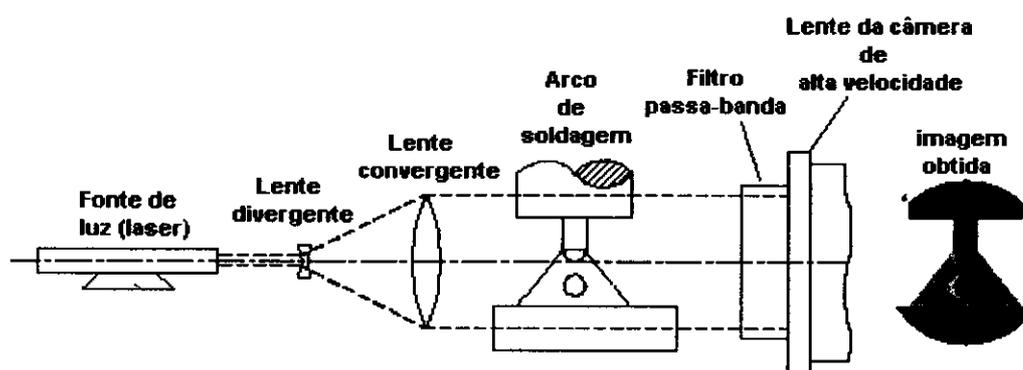


Figura 17 – Ilustração da técnica de shadowgrafia (Vilarinho, 2000 apud Miranda, 2002).

3.5.2 Sistema de Aquisição e Sincronização dos Sinais

A aquisição dos sinais foi feita por duas placas. Cada placa capturava dois sinais. Uma placa para o sinal de tensão sincronizado com a imagem da transferência

metálica, representada na Figura 15 pelo sistema 1, e a outra placa para o sinal de corrente, também sincronizado com a imagem da transferência, e que na Figura 15 está representada pelo sistema 3.

Como as placas de aquisição eram de dois canais, foram utilizados dois microcomputadores, conforme mostrado na Figura 15. Os sinais eram adquiridos numa frequência de 10khz com 12 bits de resolução durante 5s.

Para a aquisição dos dados do sinal da corrente elétrica foi utilizado um sensor de corrente por efeito Hall. Este sensor faz a leitura da corrente e envia o sinal para a placa de aquisição.

Já para a leitura dos dados de tensão, foi utilizado um redutor de tensão isolado com fator de 60V:10V e 100V:10V. As medições de tensão foram realizadas entre o bico de contato e a peça de trabalho. Os sinais de tensão lidos, depois de passados pelo redutor, eram enviados para a placa de aquisição.

Foi feita a captura do sinal de tensão da câmera, para se fazer o sincronismo dos sinais de tensão e corrente com o respectivo quadro do filme, no instante em que estava ocorrendo a transferência metálica.

Para sincronizar os sinais de tensão e de corrente com as imagens da transferência metálica foi utilizado um software específico desenvolvido no laboratório Laprosolda da Universidade Federal de Uberlândia. Todo o sistema da bancada experimental da Figura 15 foi desenvolvido e montado no laboratório Laprosolsa.

Maiores detalhes dos componentes da bancada experimental da Figura 15 podem ser encontrados nos trabalhos de (Miranda, 2002) e de (Vilarinho, 2000).

3.6 Sinais e Dimensão Fractal

Foram analisados três sinais de tensão. Para facilitar a identificação, os sinais foram classificados do seguinte modo:

- a) Sinal CC1;
- b) Sinal CC2;
- c) E Sinal CC3.

Dos três sinais, o CC1 foi o que melhor apresentou um comportamento regular com transferência metálica, apenas, do tipo curto-circuito, os sinais CC2 e CC3 apresentaram transferência do tipo curto-circuito com presença também de transferência do tipo goticular.

3.6.1 Gráficos do Sinal de Tensão

Os dados dos sinais, sincronizados no tempo, eram obtidos do sistema de aquisição, na seguinte ordem: tempo, tensão, sinal da câmera e corrente. Para obter os gráficos de tensão foi utilizado o programa ORIGIN.

A Figura 18 mostra o gráfico da tensão x tempo do sinal CC1 de todo o intervalo de aquisição, correspondente a aproximadamente 5s.

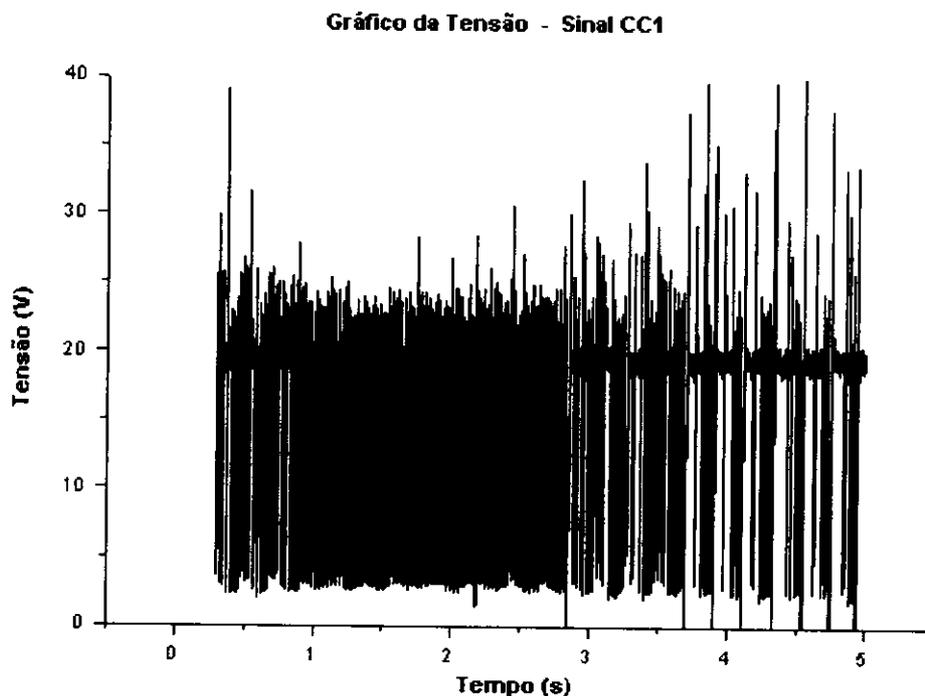


Figura 18 – Gráfico completo da tensão do sinal CC1 (todo o intervalo de amostragem do sinal).

Tinha-se também os registros fotográficos dos eventos ocorridos durante a transferência metálica. Apesar do tempo de duração da soldagem ser de aproximadamente 5s, dispunha-se de apenas 600 fotografias de cada sinal.

Na Figura 19, tem-se o gráfico da tensão do sinal CC1, para o intervalo de tempo de 293,85ms a 593,85ms no qual dispunha-se das fotografias. Portanto, a Figura 19 é a representação de uma amostra de 300ms do sinal CC1. Como a frequência de aquisição dos dados era de 10khz, no intervalo de tempo de 300ms tem-se 3000 valores de tensão.

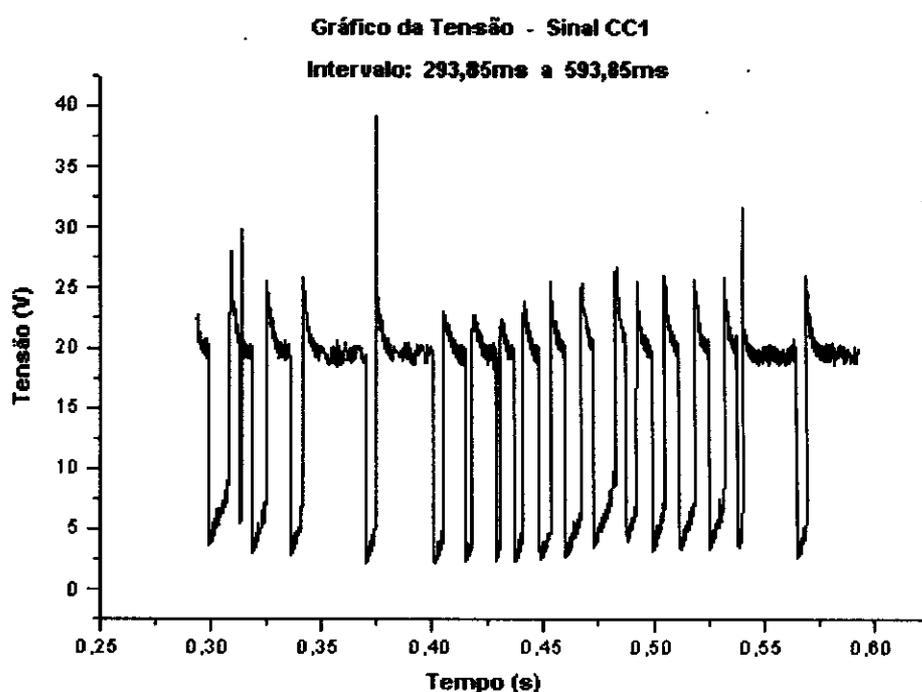


Figura 19 - Gráfico da tensão do sinal CC1 para o intervalo das fotografias.

3.6.2 Dimensão Fractal dos Sinais - (Df)

Para o cálculo da dimensão fractal dos sinais de tensão foi utilizado o método de contagem de caixas ("box-counting"). O programa utilizado para obter a dimensão fractal foi o IMAGEJ, obtido gratuitamente na Internet. Obtém-se o IMAGEJ baixando-o através do site buscador "Google"!

Para cada sinal, foi calculada a dimensão fractal para todo o intervalo de tempo no qual dispunha-se das fotografias. A dimensão fractal foi calculada em intervalos de tempo de 0,015s para todos os sinais. As 600 fotografias de cada sinal, no tempo, estavam distribuídas em 20 intervalos de 0,015s, perfazendo um total de 300ms para cada sinal.

A tabela 1 mostra o intervalo de tempo para o cálculo da dimensão fractal por tipo de sinal.

Tabela 1 – Intervalo de tempo para o cálculo da dimensão fractal.

Tipo de Sinal	Intervalo para o cálculo da dimensão fractal
CC1	293,85ms - 593,85ms
CC2	251,65ms - 551,65ms
CC3	247,65ms - 547,65ms

Conforme os dados da tabela, pode-se explicitar qualquer intervalo para o qual foi calculada a dimensão fractal.

Por exemplo, para o sinal CC1 o instante inicial era 293,85ms, o intervalo para o cálculo da dimensão fractal do 1º intervalo foi de 293,85ms a 308,85 ms. O segundo intervalo ia de 308,85ms a 323,85ms e assim sucessivamente até completar todos os 20 intervalos de tempo do sinal.

Para cada sinal, foram feitos também, gráficos, com intervalo de cálculo para dimensão fractal de 0,003s e 0,005s. Como o tamanho de cada sinal no tempo era de 300ms (ver Tabela 1), percorrendo-se cada sinal com um intervalo de 0,003s, tem-se 100 intervalos no gráfico da dimensão fractal por intervalo de tempo. E para o intervalo de 0,005s, tem-se 60 intervalos no gráfico. Quando se construía os gráficos da dimensão fractal do sinal para esses intervalos eles ficavam quase indistinguíveis. Por esse motivo eles não foram apresentados. Com o intervalo de 0,015s pôde-se melhor reproduzir os gráficos da dimensão fractal por intervalo de tempo, conforme será visto no item 4.1.

Como o sinal CC1 teve o melhor comportamento com transferência tipicamente do tipo curto-circuito, ele foi escolhido para retratar a natureza fractal dos sinais elétricos de tensão. Na Figura 20 é mostrado o gráfico da tensão do sinal CC1, para o intervalo de tempo correspondente a um período de curto-circuito (T), ou seja, o intervalo de tempo entre um contato e outro do eletrodo com a poça de fusão.

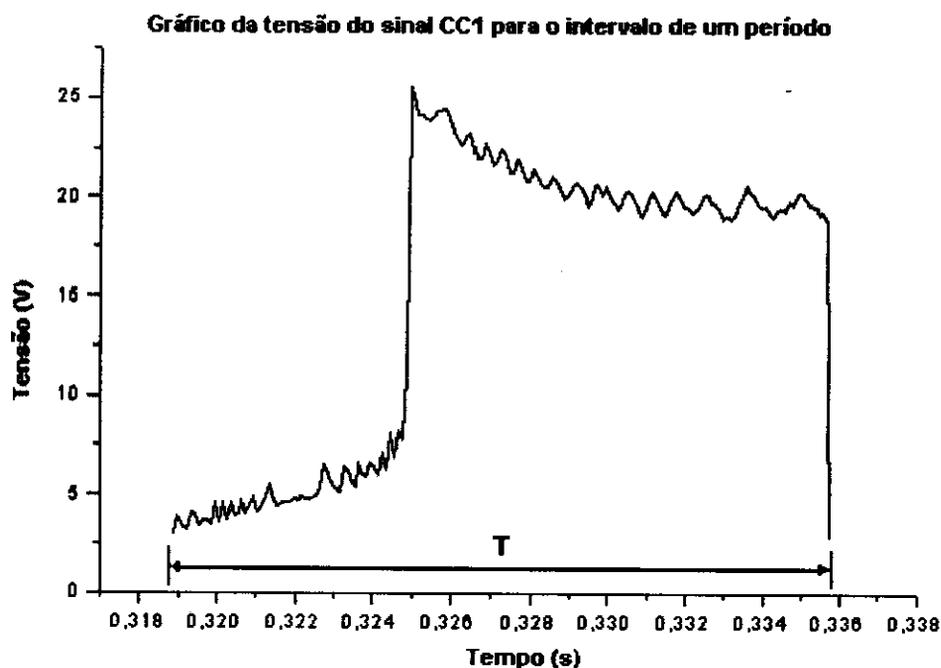


Figura 20 – Gráfico da tensão do sinal CC1 para o intervalo de um período.

O intervalo de tempo no gráfico da Figura 20 corresponde aos instantes de tempo entre duas extinções consecutivas do arco elétrico. Para o sinal CC1 o período médio de curto-circuito (T_m), obtido através do software ANALISER, foi de aproximadamente 0,015s.

O período médio de curtos-circuitos do sinal CC1 foi considerado como critério de escolha do intervalo de tempo para o cálculo da dimensão fractal do sinal de tensão, pois esse intervalo corresponde aproximadamente ao padrão de repetição dos eventos registrados no gráfico da tensão em função do tempo (Figura 19). Pretende-se, portanto, através de medidas da dimensão fractal do sinal de tensão caracterizar o evento correspondente à transferência por curto-circuito.

Espera-se que a presença de outros eventos, como por exemplo, formação de gota ou transferência goticular, possam ser detectados por variações nos valores da dimensão fractal do sinal. A seguir estão representados os gráficos da tensão do sinal CC1, para dois e três períodos consecutivos:

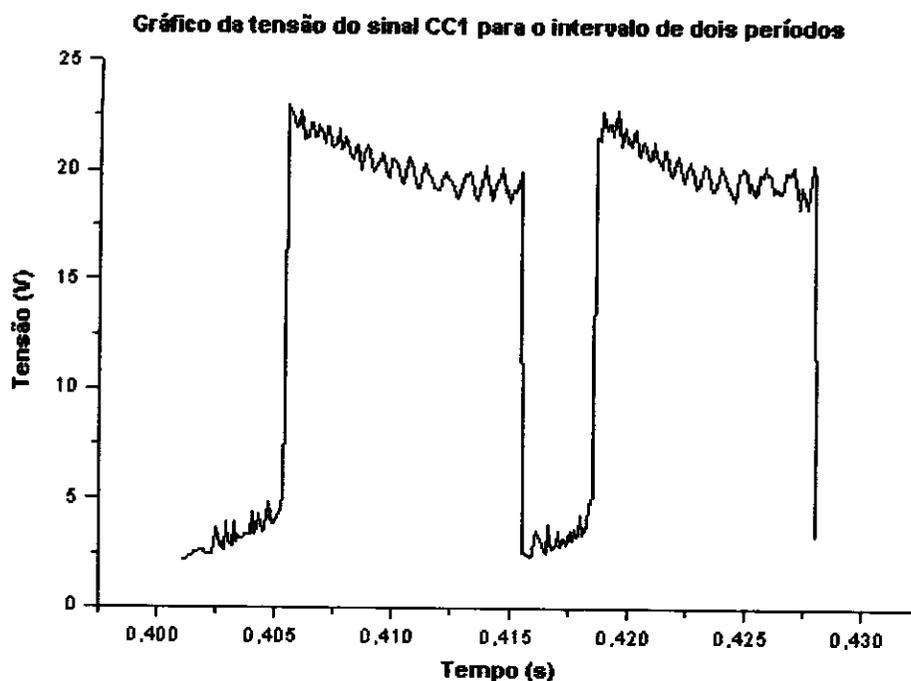


Figura 21 – Gráfico da tensão do sinal CC1 para dois períodos.

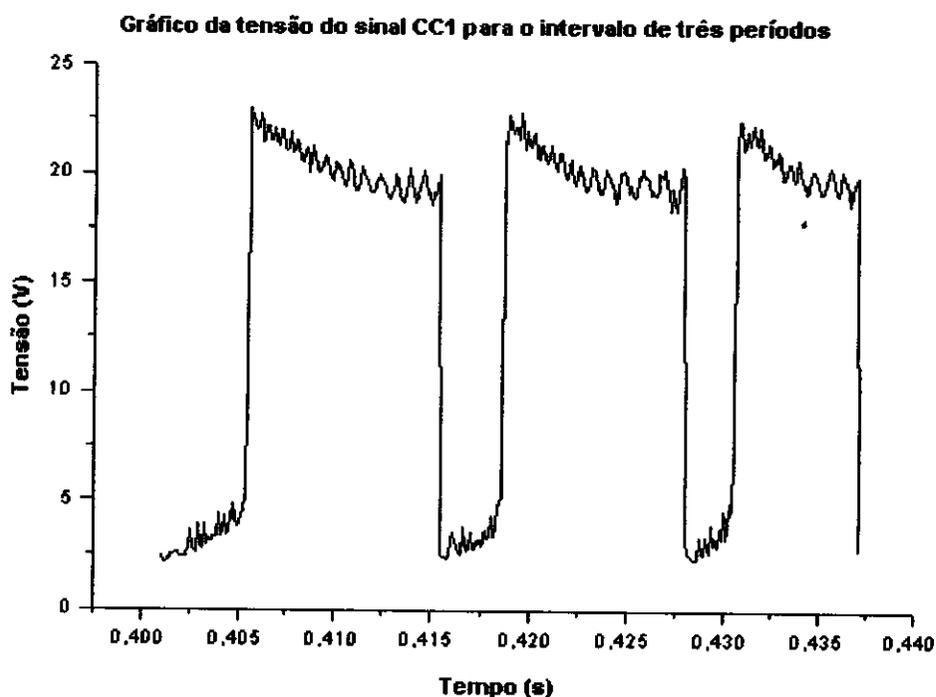


Figura 22 – Gráfico da tensão do sinal CC1 para três períodos.

Conforme os gráficos de tensão do sinal CC1 acima, os eventos que envolvem o fenômeno da transferência metálica por curto-circuito parecem evidenciar uma característica peculiar de fractalidade, a auto-similaridade.

3.6.3 Dados de Soldagem dos Sinais

A Tabela 2 traz dados de soldagem dos sinais analisados como: velocidade de alimentação do arame eletrodo (V_a), velocidade de soldagem (V_s) e distância bico de contato peça (DBCP).

Na Tabela 2, I_m e U_m são, respectivamente, corrente média e tensão média.

Tabela 2 – Dados de Soldagem dos Sinais Analisados.

Sinal	I_m (A)	U_m (U)	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	DBCP
CC1	157	15,8	7	25 - 30	18mm
CC2	161	20,6	7	25 - 30	18mm
CC3	158	23,1	7	25 - 30	18mm

3.6.4 Sinais e o Software ANALISER

Com os dados de tensão e corrente dos sinais, empregou-se o programa ANALISER que permite o processamento completo dos sinais ou de intervalos específicos definidos.

A partir dos valores instantâneos da tensão e da corrente de soldagem, obtém-se, através do programa, dentre outras, as seguintes variáveis:

1. A tensão média (U_m) e seu desvio padrão (σ_U);
2. A corrente média (I_m) e seu desvio padrão (σ_I);
3. O período médio de transferência (T_m) e seu desvio padrão (σ_T);
4. O tempo médio de curto-circuito (t_{cc}) e seu desvio padrão ($\sigma_{t_{cc}}$);
5. A frequência de curto-circuito (f_{cc}) e o número de curto-circuito (n° de CC).

O ANALISER, desenvolvido durante a tese de doutorado do Professor Doutor Jesualdo Pereira Farias, foi cedido, também, pelo Professor Doutor Hélio Cordeiro de Miranda.

Capítulo 4

4. Resultados e Discussões

Na Tabela 3, está representada a média da dimensão fractal dos vinte intervalos de tempo por sinal.

Tabela 3 – Média da Dimensão Fractal dos 20 intervalos de Tempo.

Tipo de Sinal	Média da Dimensão Fractal
CC1	1,1523
CC2	1,2312
CC3	1,3507

Os gráficos no item seguinte representam a tensão em função do tempo e a dimensão fractal por intervalo de tempo, de cada sinal, para os intervalos da Tabela 1. Convém frisar que no gráfico da dimensão fractal por intervalo de tempo, tem-se 20 intervalos de 0,015s, que corresponde, como já foi mencionado, ao intervalo de tempo no qual dispunha-se das fotografias.

Nos gráficos da dimensão fractal por intervalo de tempo, o traço em vermelho corresponde à média da dimensão fractal dos vinte intervalos do sinal CC1, de acordo com os dados da Tabela 3 (1,1523), cuja transferência metálica foi somente do tipo curto-circuito, e o intervalo em azul, ao intervalo de confiança de 95% da dimensão fractal de um sinal com transferência tipicamente por curto-circuito ($1,1523 \pm 0,04712$).

4.1 Gráficos da Dimensão Fractal dos Sinais

A seguir será apresentado o gráfico da tensão em função do tempo, e da dimensão fractal do sinal por intervalo de tempo.

4.1.1 Dados da Dimensão Fractal do Sinal CC1

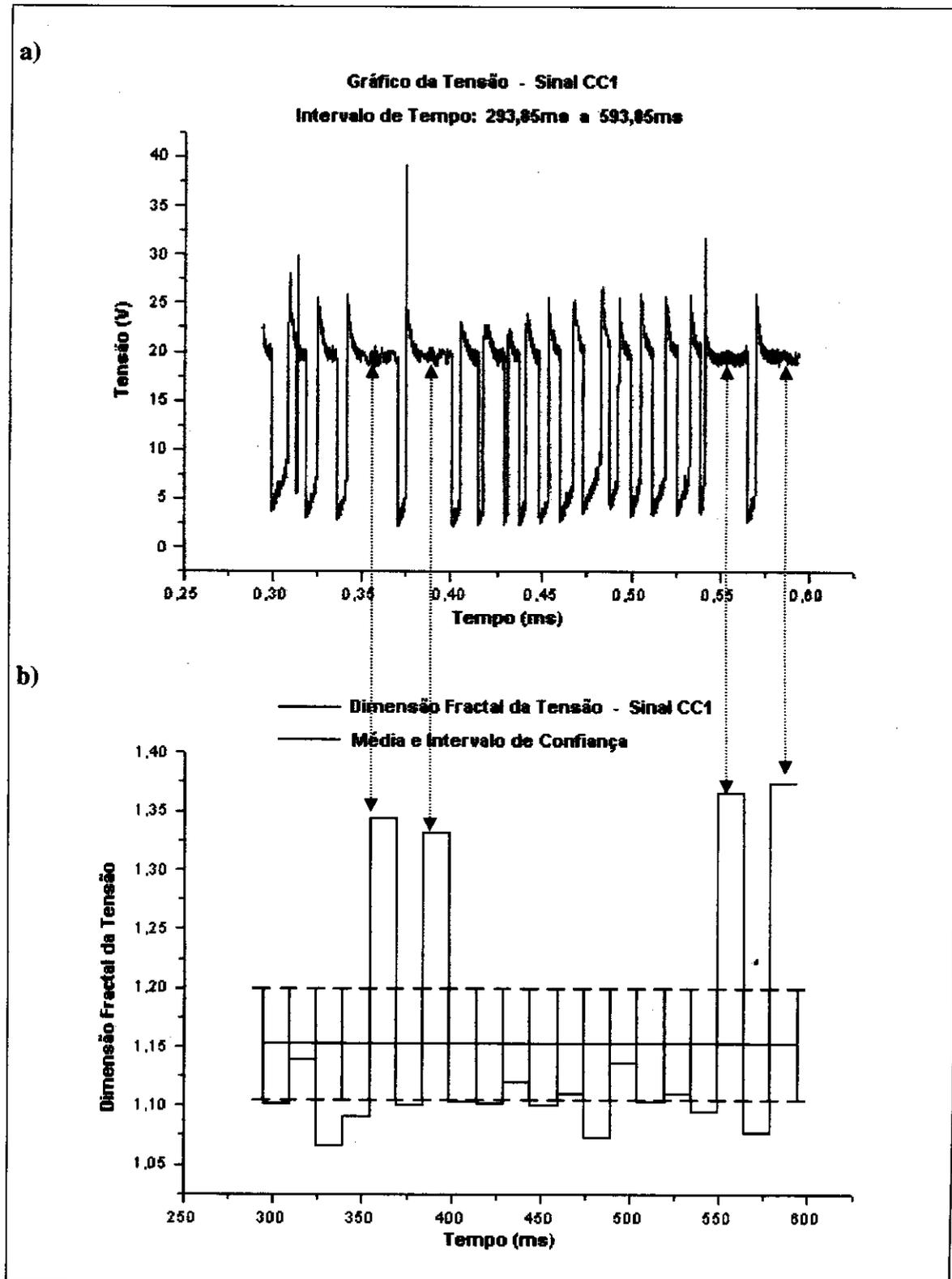
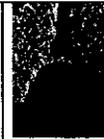
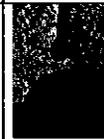


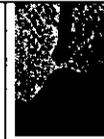
Figura 23 – a) Tensão x tempo ; b) Dimensão fractal por intervalo de tempo.

O sinal CC1 apresentou, para uma amostra no tempo de 300ms, quatro intervalos com dimensão fractal superior ao valor médio de 1,1523. Esses intervalos, conforme o gráfico da dimensão fractal do sinal CC1, foram: 5°, 7°, 18° e 20° (↔). Abaixo estão representadas as fotografias correspondentes a cada um desses intervalos. Nos demais intervalos a dimensão fractal do sinal ficou abaixo de 1,1523.

Sinal CC1 – 5° intervalo – Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo: 1,3445

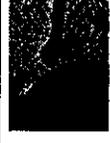
										
Quadro 122	Quadro 123	Quadro 124	Quadro 125	Quadro 126	Quadro 127	Quadro 128	Quadro 129	Quadro 130	Quadro 131	Quadro 132
										
Quadro 133	Quadro 134	Quadro 135	Quadro 136	Quadro 137	Quadro 138	Quadro 139	Quadro 140	Quadro 141	Quadro 142	Quadro 143

Sinal CC1 – 7° intervalo – Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo: 1,3316

										
Quadro 182	Quadro 183	Quadro 184	Quadro 185	Quadro 186	Quadro 187	Quadro 188	Quadro 189	Quadro 190	Quadro 191	Quadro 192
										
Quadro 193	Quadro 194	Quadro 195	Quadro 196	Quadro 197	Quadro 198	Quadro 199	Quadro 200	Quadro 201	Quadro 202	Quadro 203

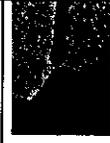
Sinal CC1 – 18° intervalo – Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,3662

										
Quadro 513	Quadro 514	Quadro 515	Quadro 516	Quadro 517	Quadro 518	Quadro 519	Quadro 520	Quadro 521	Quadro 522	Quadro 523
										
Quadro 525	Quadro 526	Quadro 527	Quadro 528	Quadro 529	Quadro 530	Quadro 531	Quadro 532	Quadro 533	Quadro 534	Quadro 535

Sinal CC1 – 20° intervalo – Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

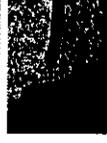
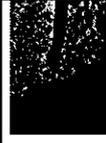
1,3748

										
Quadro 574	Quadro 575	Quadro 576	Quadro 577	Quadro 578	Quadro 579	Quadro 580	Quadro 581	Quadro 582	Quadro 583	Quadro 584
										
Quadro 585	Quadro 586	Quadro 587	Quadro 588	Quadro 589	Quadro 590	Quadro 591	Quadro 592	Quadro 593	Quadro 594	Quadro 595

Será apresentada apenas uma seqüência de quadros para aqueles intervalos nos quais a dimensão fractal foi inferior a 1,1523.

Observando-se o gráfico da dimensão fractal do sinal CC1, o 3° intervalo apresentou o menor valor de dimensão fractal, que foi de 1,0668. A seqüência de fotografias correspondente ao 3° intervalo é:

**Sinal CC1 – 3º intervalo – Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,0668**

										
Quadro 72	Quadro 73	Quadro 74	Quadro 75	Quadro 76	Quadro 77	Quadro 78	Quadro 79	Quadro 80	Quadro 81	Quadro 82
										
Quadro 83	Quadro 84	Quadro 85	Quadro 86	Quadro 87	Quadro 88	Quadro 89	Quadro 90	Quadro 91	Quadro 92	Quadro 93

Analizando cada intervalo da dimensão fractal do sinal CC1, pode-se constatar que nos intervalos onde há a ocorrência de curto-circuito, a dimensão fractal do sinal atingia sempre valores inferiores a 1,1523 (Ver Tabela 4). No curto-circuito a dimensão fractal do sinal se reduzia. E durante a formação da gota a dimensão fractal do sinal elevava-se para valores superiores a 1,3000 (5º, 7º, 18º e 20º intervalos).

4.1.2 Dados do ANALISER para o Sinal CC1

A Tabela 4 mostra dados obtidos a partir do programa ANALISER e a dimensão fractal do sinal de tensão por intervalo de tempo. Os dados da Tabela 4 foram utilizados nos gráficos da Figura 24.

Na Figura 23 a) percebe-se, o registro de 17 curtos-circuitos. O emprego do ANALISER revelou que tais curtos-circuitos ocorreram com transferência metálica, que pode ser constatado na Tabela 4.

Os valores da dimensão fractal da Tabela 4 caracterizam, basicamente, dois eventos distintos no sinal: formação da gota e curto-circuito.

Nota-se na Tabela 4, que aos intervalos de menor valor do desvio padrão da tensão estão associados os maiores valores da dimensão fractal do sinal (Df), correspondendo a eventos onde não houve curto-circuito. Nesses intervalos a tensão média (U_m) do arco assume os maiores valores e a frequência de curto-circuito (f_{cc}) é, obviamente, nula (\leftrightarrow) (Ver Figuras 24 a e 24 b).

E naqueles intervalos de maior valor do desvio padrão da tensão (σ_U), onde a tensão média (U_m) do arco assumia os menores valores com frequência de curto-circuito (f_{cc}) diferente de zero, os valores da dimensão fractal (Df) são os menores, e o evento é de transferência por curto-circuito.

Tabela 4 – Dados do Sinal CC1 obtidos através do ANALISER.

Intervalo	U_m	σ_U	I_m	σ_I	t_{cc}	f_{cc}	n° de CC	Df
1°	11,2	7,05	213	65,44	0,0094	67,1	1	1,1021
2°	15,0	8,31	176	46,02	0,0005	67,1	1	1,1393
3°	16,2	7,46	156	44,97	0,0006	67,1	1	1,0668
4°	17,9	5,88	147	47,28	0,0022	67,1	1	1,0914
5°	19,4	0,46	110	2,39	-	-	0	1,3445
6°	15,1	8,22	146	38,12	0,0048	67,1	1	1,1007
7°	19,5	0,40	109	3,36	-	-	0	1,3316
8°	15,2	7,83	147	34,17	0,0043	67,1	1	1,1030
9°	15,6	7,49	144	23,67	0,0030	67,1	1	1,1020
10°	14,4	8,46	164	27,72	0,0023	134,2	2	1,1199
11°	14,7	8,16	170	41,03	0,0050	67,1	1	1,1010
12°	11,4	8,58	210	53,57	0,0076	67,1	1	1,1106
13°	11,7	8,04	255	63,77	0,0084	67,1	1	1,0732
14°	12,2	8,11	184	39,61	0,0033	67,1	1	1,1359
15°	12,4	7,97	196	49,99	0,0010	67,1	1	1,1034
16°	14,2	8,41	200	47,55	0,0067	67,1	1	1,1097
17°	17,9	5,88	146	17,79	0,0022	67,1	1	1,0944
18°	19,3	0,42	123	2,78	-	-	0	1,3662
19°	15,2	7,86	152	36,65	0,0044	67,1	1	1,0764
20°	19,4	0,40	113	2,46	-	-	0	1,3748

Em relação à corrente elétrica, o evento correspondente à formação da gota, também está associado aos intervalos de menor valor do desvio padrão da corrente (σ_I) e de maior valor da dimensão fractal do sinal de tensão (Df).

A dimensão fractal do sinal CC1 oscilou entre valores inferiores a 1,1523, que correspondia a ocorrência de um curto-circuito, e valores acima de 1,3000, correspondendo ao intervalo de tempo de formação da gota. A gota ainda em formação era transferida por contato do eletrodo com a peça. A média dos vinte intervalos de tempo do sinal CC1 dos quais se tinha os registros fotográficos, ficou próxima de 1,1523, conforme a Tabela 3, o que revela a presença de curtos-circuitos no sinal. Não foi registrada a presença de transferência do tipo globular nem do tipo goticular no sinal CC1.

Na Figura 24, têm-se os gráficos da tensão média e dimensão fractal do sinal, e também frequência de curto-circuito e dimensão fractal do sinal.

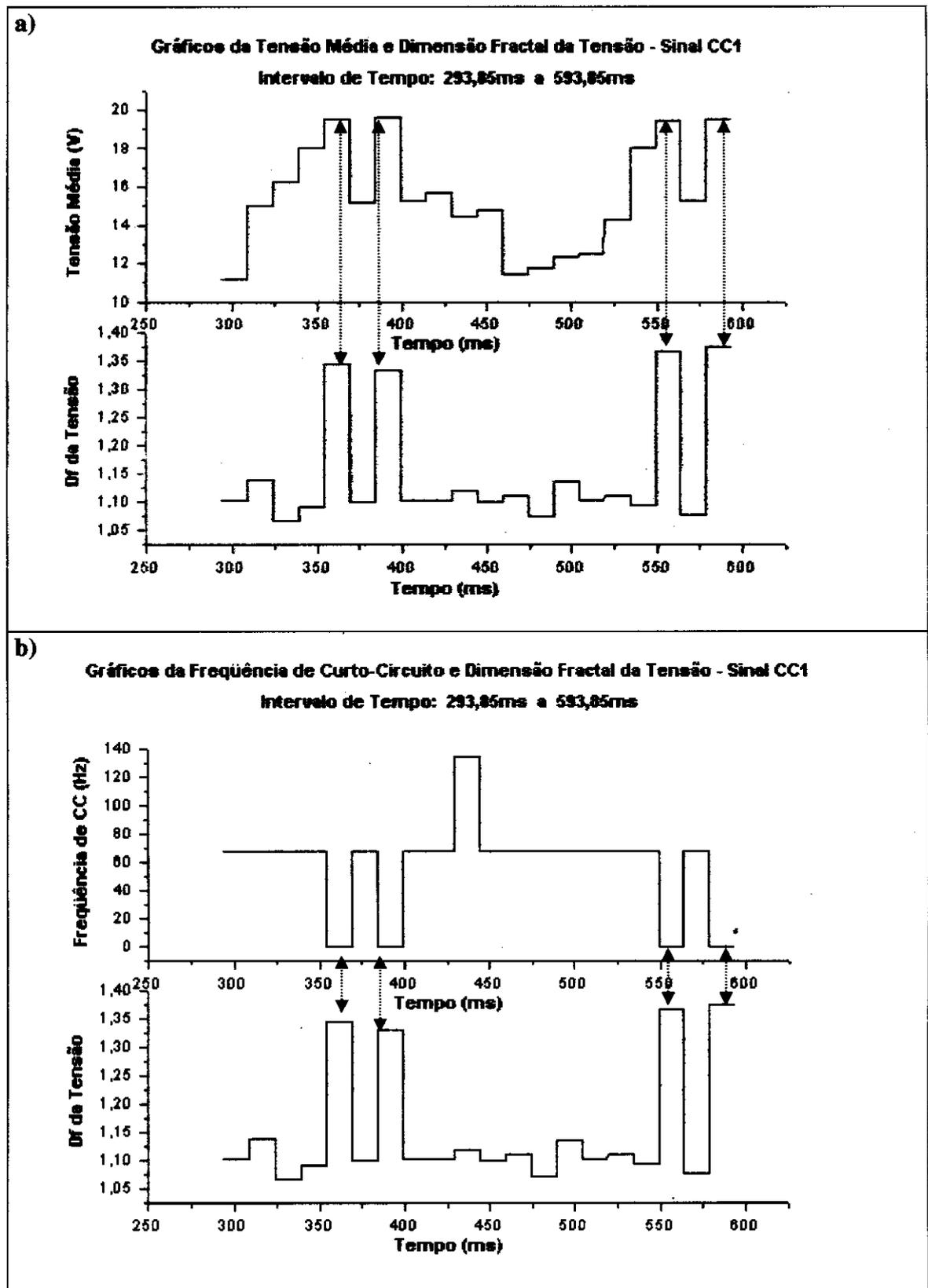


Figura 24 – a) Tensão média x tempo e Dimensão fractal x tempo ; b) Frequência de Curto-Circuito x tempo e Dimensão fractal x tempo.

4.1.3 Dados da Dimensão Fractal do Sinal CC2

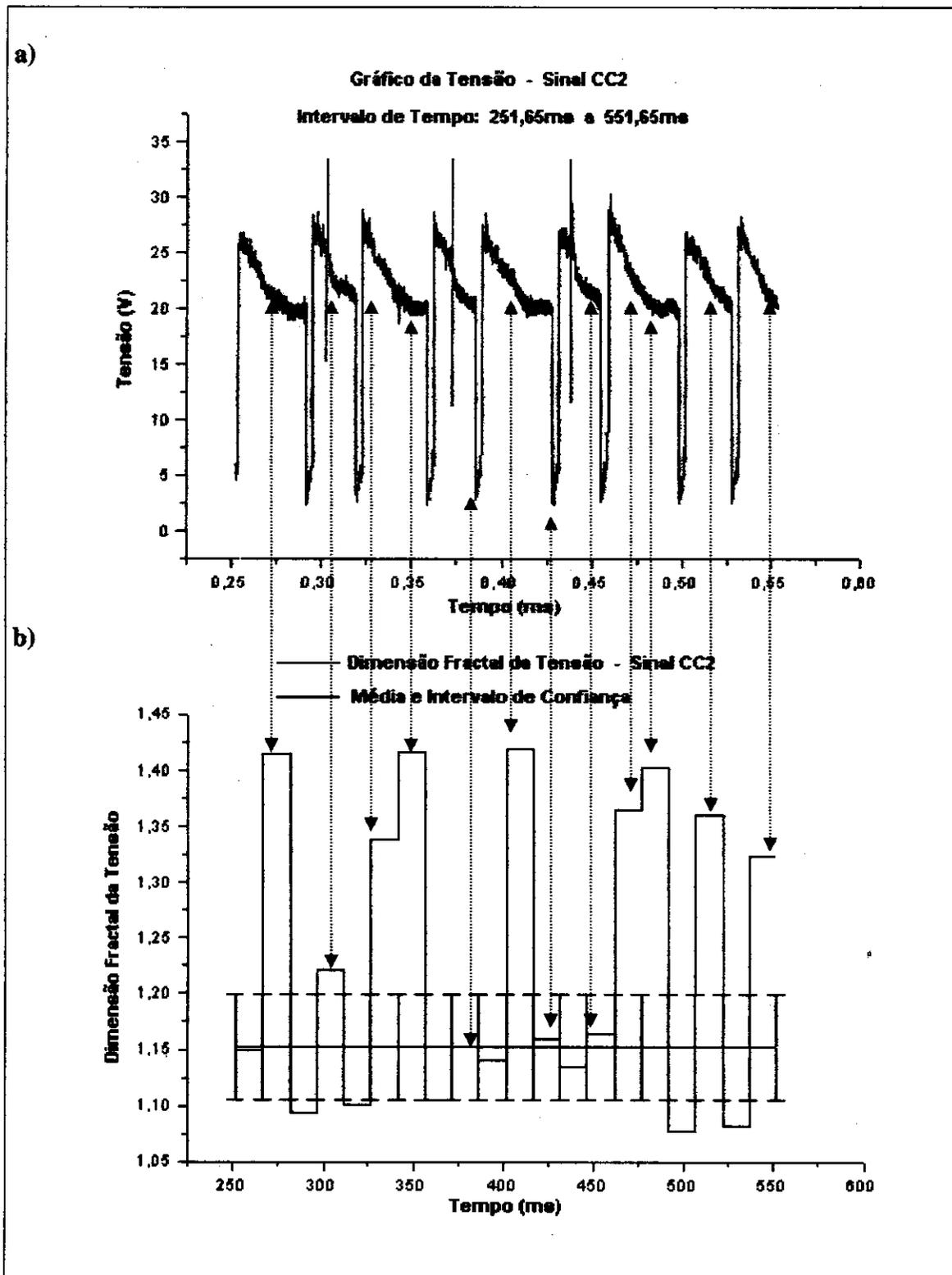
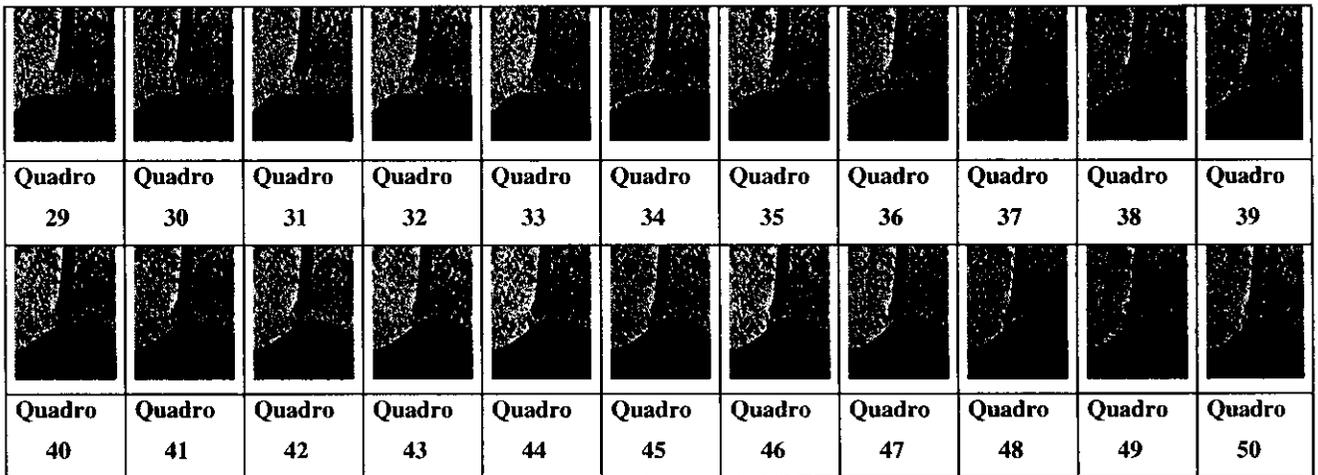


Figura 25 – a) Tensão x tempo ; b) Dimensão fractal por intervalo de tempo.

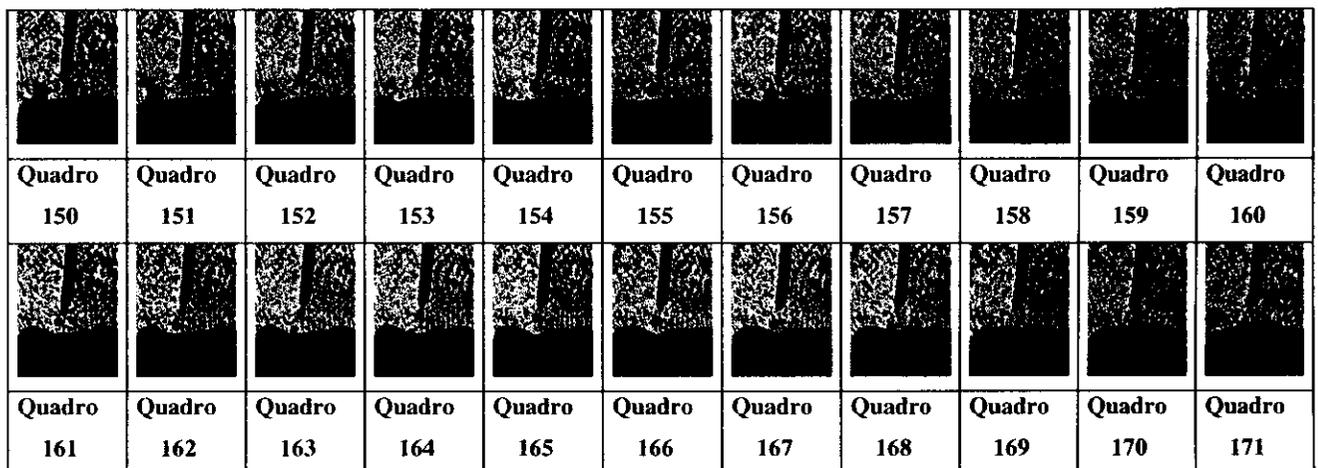
No sinal CC2, foram doze os intervalos nos quais a dimensão fractal do sinal de tensão foi superior ou igual ao valor médio de 1,1523: 2°, 4°, 6°, 7°, 9°, 11°, 12°, 14°, 15°, 16°, 18° e 20°, conforme o gráfico da dimensão fractal do sinal CC2 (↔) (Figura 25).

Abaixo figuram as fotografias de oito desses intervalos.

Sinal CC2 - 2° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,4147

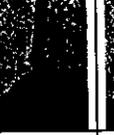
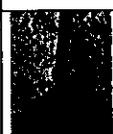
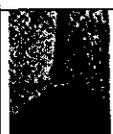
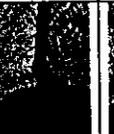


Sinal CC2 - 6° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,3388



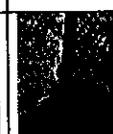
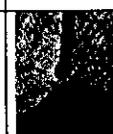
Sinal CC2 - 7º intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,4156

										
Quadro 180	Quadro 181	Quadro 182	Quadro 183	Quadro 184	Quadro 185	Quadro 186	Quadro 187	Quadro 188	Quadro 189	Quadro 190
										
Quadro 191	Quadro 192	Quadro 193	Quadro 194	Quadro 195	Quadro 196	Quadro 197	Quadro 198	Quadro 199	Quadro 200	Quadro 201

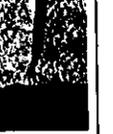
Sinal CC2 - 11º intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

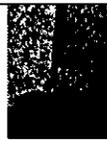
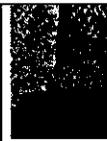
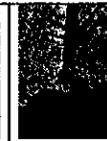
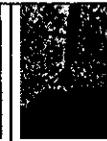
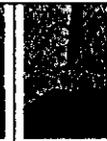
1,4197

										
Quadro 301	Quadro 302	Quadro 303	Quadro 304	Quadro 305	Quadro 306	Quadro 307	Quadro 308	Quadro 309	Quadro 310	Quadro 311
										
Quadro 312	Quadro 313	Quadro 314	Quadro 315	Quadro 316	Quadro 317	Quadro 318	Quadro 319	Quadro 320	Quadro 321	Quadro 322

Sinal CC2 - 15º intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

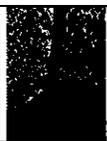
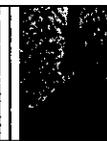
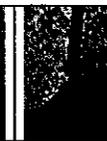
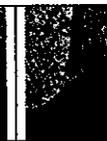
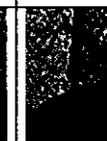
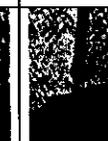
1,3652

										
Quadro 421	Quadro 422	Quadro 423	Quadro 424	Quadro 425	Quadro 426	Quadro 427	Quadro 428	Quadro 429	Quadro 430	Quadro 431

										
Quadro 432	Quadro 433	Quadro 434	Quadro 435	Quadro 436	Quadro 437	Quadro 438	Quadro 439	Quadro 440	Quadro 441	Quadro 442

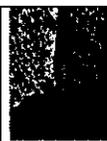
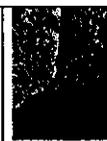
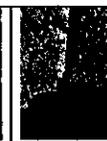
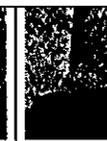
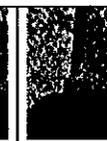
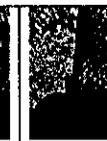
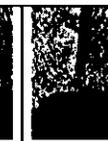
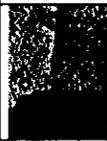
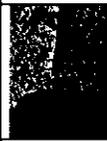
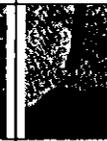
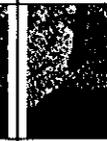
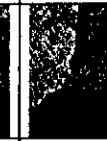
Sinal CC2 - 16° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,4033

										
Quadro 451	Quadro 452	Quadro 453	Quadro 454	Quadro 455	Quadro 456	Quadro 457	Quadro 458	Quadro 459	Quadro 460	Quadro 461
										
Quadro 462	Quadro 463	Quadro 464	Quadro 465	Quadro 466	Quadro 467	Quadro 468	Quadro 469	Quadro 470	Quadro 471	Quadro 472

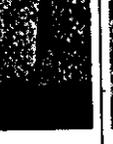
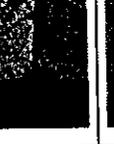
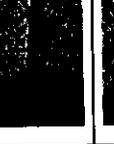
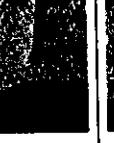
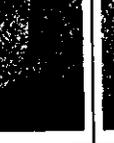
Sinal CC2 - 18° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,3605

										
Quadro 512	Quadro 513	Quadro 514	Quadro 515	Quadro 516	Quadro 517	Quadro 518	Quadro 519	Quadro 520	Quadro 521	Quadro 522
										
Quadro 523	Quadro 524	Quadro 525	Quadro 526	Quadro 527	Quadro 528	Quadro 529	Quadro 530	Quadro 531	Quadro 532	Quadro 533

Sinal CC2 - 20° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,3241

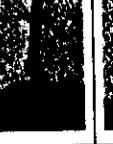
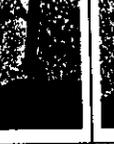
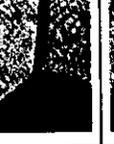
										
Quadro 572	Quadro 573	Quadro 574	Quadro 575	Quadro 576	Quadro 577	Quadro 578	Quadro 579	Quadro 580	Quadro 581	Quadro 582
										
Quadro 583	Quadro 584	Quadro 585	Quadro 586	Quadro 587	Quadro 588	Quadro 589	Quadro 590	Quadro 591	Quadro 592	Quadro 593

Nos intervalos em que a dimensão fractal do sinal ficou abaixo de 1,1700, a transferência metálica foi tipicamente por curto-circuito, como pode ser conferido na Tabela 5.

Para esses intervalos será apresentada apenas a seqüência de quadros do intervalo de menor dimensão fractal, o 17° intervalo.

Sinal CC2 - 17° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,0776

										
Quadro 481	Quadro 482	Quadro 483	Quadro 484	Quadro 485	Quadro 486	Quadro 487	Quadro 488	Quadro 489	Quadro 490	Quadro 491
										
Quadro 492	Quadro 493	Quadro 494	Quadro 495	Quadro 496	Quadro 497	Quadro 498	Quadro 499	Quadro 500	Quadro 501	Quadro 502

No sinal CC2, quando ocorria um curto-circuito a dimensão fractal do sinal atingia valores inferiores a 1,1700 (Ver a Tabela 5). Durante a formação da gota, como pode ser visto pelos quadros, a dimensão fractal do sinal se elevava a valores superiores a 1,4000 (2°, 7°, 11° e 16° intervalos).

Nos intervalos em que ocorriam transferências do tipo goticular (6°, 15°, 18° e 20° intervalos) os valores da dimensão fractal do sinal também eram superiores aos valores da dimensão fractal do sinal na transferência por curto-circuito. Valores típicos da dimensão fractal do sinal CC2, quando ocorria apenas transferência goticular, ficavam entre 1,3000 e 1,3700. Não houve ocorrência de transferência globular.

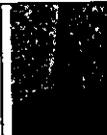
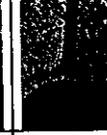
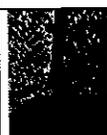
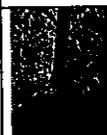
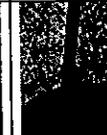
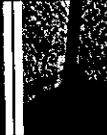
Nos intervalos onde ocorria curto-circuito e também formação da gota, os efeitos dos dois eventos se superpunham, refletindo-se nos valores da dimensão fractal.

Enquanto nos curtos-circuitos os valores da dimensão fractal eram reduzidos, durante a formação da gota os valores da dimensão fractal se elevavam. No sinal CC2 esse caso aconteceu em quatro intervalos: 4°, 9°, 12° e 13°. Serão apresentados os quadros de dois desses intervalos.

Sinal CC2 - 4° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo: 1,2215

Quadro 89	Quadro 90	Quadro 91	Quadro 92	Quadro 93	Quadro 94	Quadro 95	Quadro 96	Quadro 97	Quadro 98	Quadro 99
Quadro 100	Quadro 101	Quadro 102	Quadro 103	Quadro 104	Quadro 105	Quadro 106	Quadro 107	Quadro 108	Quadro 109	Quadro 110

Sinal CC2 - 12° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,1590

										
Quadro 338	Quadro 339	Quadro 340	Quadro 341	Quadro 342	Quadro 343	Quadro 344	Quadro 345	Quadro 346	Quadro 347	Quadro 348
										
Quadro 349	Quadro 350	Quadro 351	Quadro 352	Quadro 353	Quadro 354	Quadro 355	Quadro 356	Quadro 357	Quadro 358	Quadro 359

4.1.4 Dados do ANALISER para o Sinal CC2

A Tabela 5 fornece os dados do sinal CC2 obtidos a partir do programa ANALISER e a dimensão fractal do sinal por intervalo de tempo.

Nota-se na Tabela 5, que aos intervalos de maior valor do desvio padrão da tensão (σ_U) estão associados os menores valores da dimensão fractal do sinal (D_f), correspondendo aos eventos de transferência por curto-circuito. Nesses intervalos a tensão média (U_m) do arco assume, geralmente, os menores valores (\leftrightarrow) (Ver Figuras 26 a e 26 b).

E nos intervalos de menor valor do desvio padrão da tensão (σ_U), onde a tensão média (U_m) do arco assumia os maiores valores com frequência de curto-circuito (f_{cc}) zero, os valores da dimensão fractal (D_f) são os maiores, e o evento é de formação da gota ou transferência metálica goticular (\leftrightarrow), como se pode constatar nos quadros.

Verifica-se, através dos quadros fotográficos, que nos intervalos 2°, 7° e 16°, a dimensão fractal do sinal de tensão assume valores elevados, porém não há

transferência metálica do tipo goticular, tratando-se, portanto, de formação da gota.

Tabela 5 – Dados do Sinal CC2 obtidos através do ANALISER.

Intervalo	U_m	σ_U	I_m	σ_I	t_{cc}	f_{cc}	n° de CC	Df
1°	21,6	7,38	206	37,61	0,0014	67,1	1	1,1501
2°	21,1	0,77	122	11,41	-	-	0	1,4147
3°	16,1	7,32	151	69,10	0,0040	67,1	1	1,0940
4°	24,4	2,51	200	42,75	-	-	0	1,2215
5°	18,4	8,17	179	64,18	0,0032	67,1	1	1,1014
6°	23,8	1,41	174	35,73	-	-	0	1,3388
7°	20,4	0,65	112	6,06	-	-	0	1,4156
8°	19,5	8,75	199	56,41	0,0032	67,1	1	1,1056
9°	21,1	3,70	140	13,97	-	-	0	1,1530
10°	20,7	8,30	219	38,25	0,0026	67,1	1	1,1401
11°	21,5	1,19	128	14,73	-	-	0	1,4197
12°	16,2	6,82	135	54,29	-	-	0	1,1590
13°	24,5	3,03	203	44,41	-	-	0	1,1353
14°	18,1	8,24	186	68,40	0,0039	67,1	1	1,1634
15°	24,2	1,79	179	37,64	-	-	0	1,3652
16°	20,4	0,65	116	5,69	-	-	0	1,4033
17°	18,1	8,18	183	70,11	0,0036	67,1	1	1,0776
18°	23,0	1,43	160	28,12	-	-	0	1,3605
19°	18,9	8,36	188	64,44	0,0039	67,1	1	1,0823
20°	22,8	1,49	153	26,12	-	-	0	1,3241

Nos intervalos onde ocorreu transferência goticular os valores do desvio padrão da tensão eram baixos. Nesses intervalos a dimensão fractal do sinal ficava entre 1,3000 e 1,3700, como mencionado anteriormente.

Para a corrente elétrica os eventos correspondentes à transferência por curto-circuito ocorriam nos intervalos de maior valor do desvio padrão da corrente (σ_I), onde estavam associados os menores valores da dimensão fractal do sinal de tensão (Df).

Na amostra de 300ms do sinal CC2 ocorreram 8 curtos-circuitos, conforme indica a Tabela 5, ou como se pode verificar no gráfico da Figura 25 a).

No sinal CC2 os eventos de formação da gota e transferência goticular elevaram a dimensão fractal do sinal.

A média dos vinte intervalos de tempo do sinal CC2 dos quais se tinha os registos fotográficos, ficou acima de 1,1523, conforme a Tabela 3, revelando a presença, além da transferência por curto-circuito, os eventos de formação da gota e eventualmente transferência goticular.

Na Figura 26, têm-se os gráficos da tensão média e dimensão fractal do sinal, e também frequência de curto-circuito e dimensão fractal do sinal.

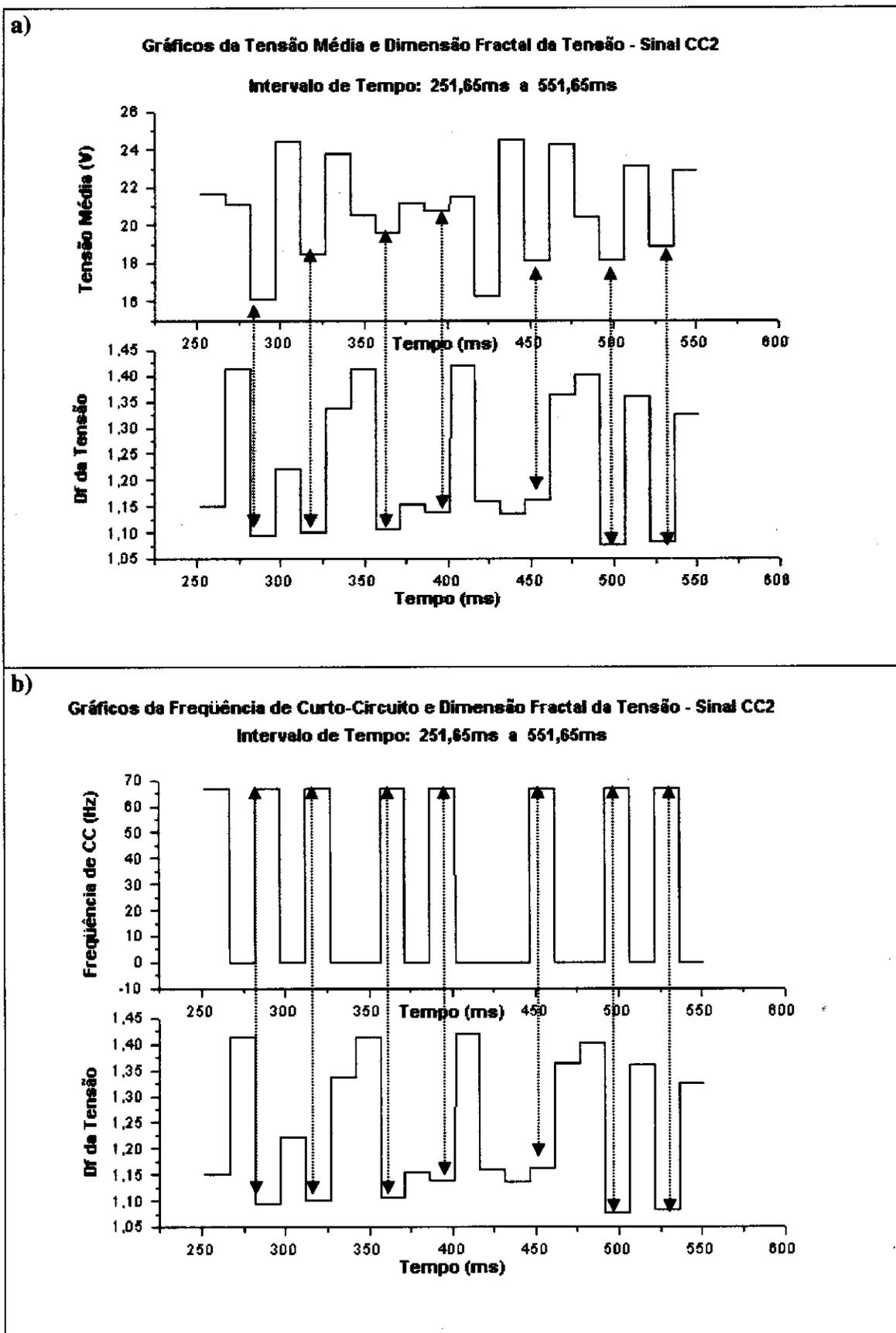


Figura 26 – a) Tensão média x tempo e Dimensão fractal x tempo ; b) Frequência de Curto-Circuito x tempo e Dimensão fractal x tempo.

4.1.5 Dados da Dimensão Fractal do Sinal CC3

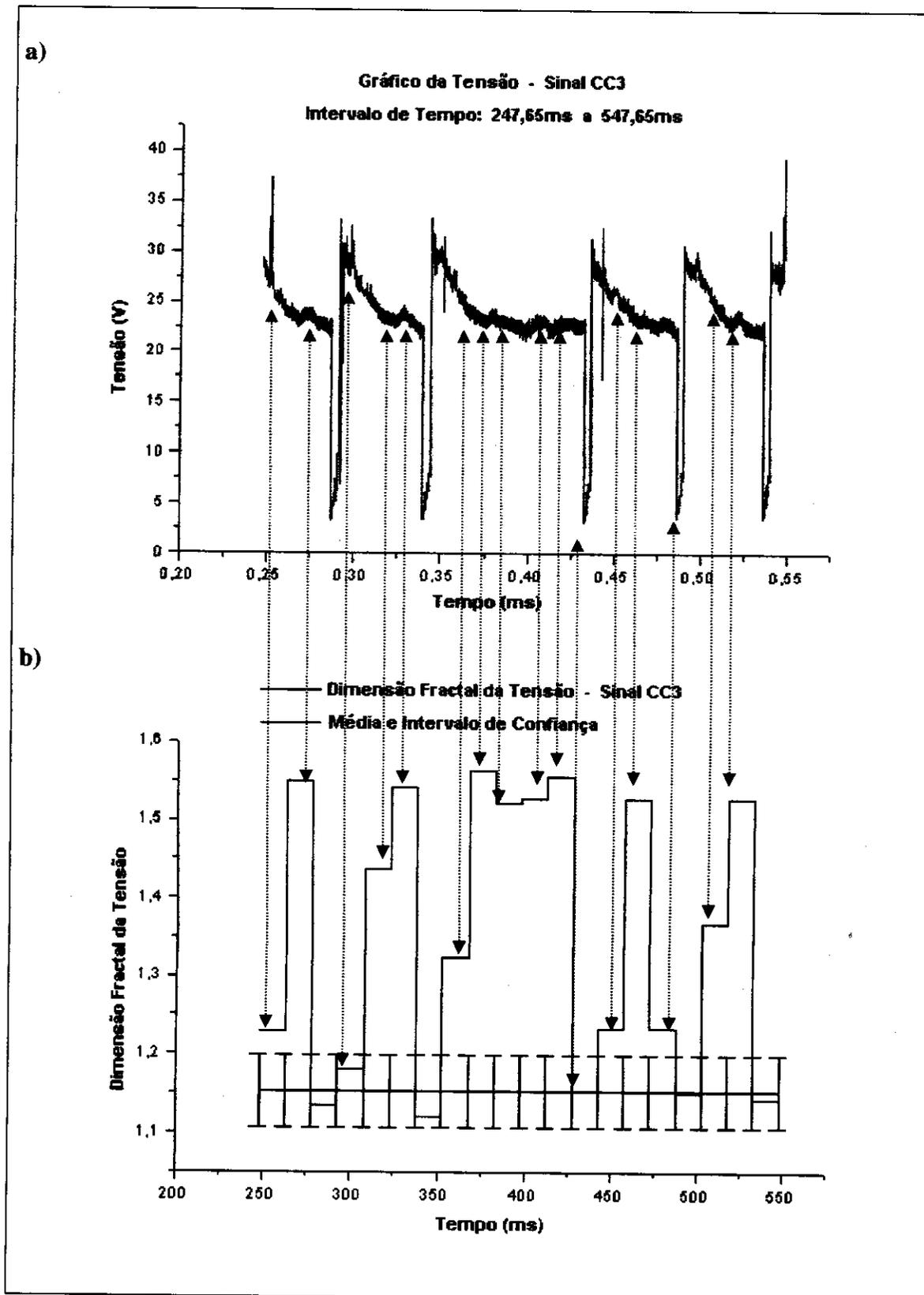
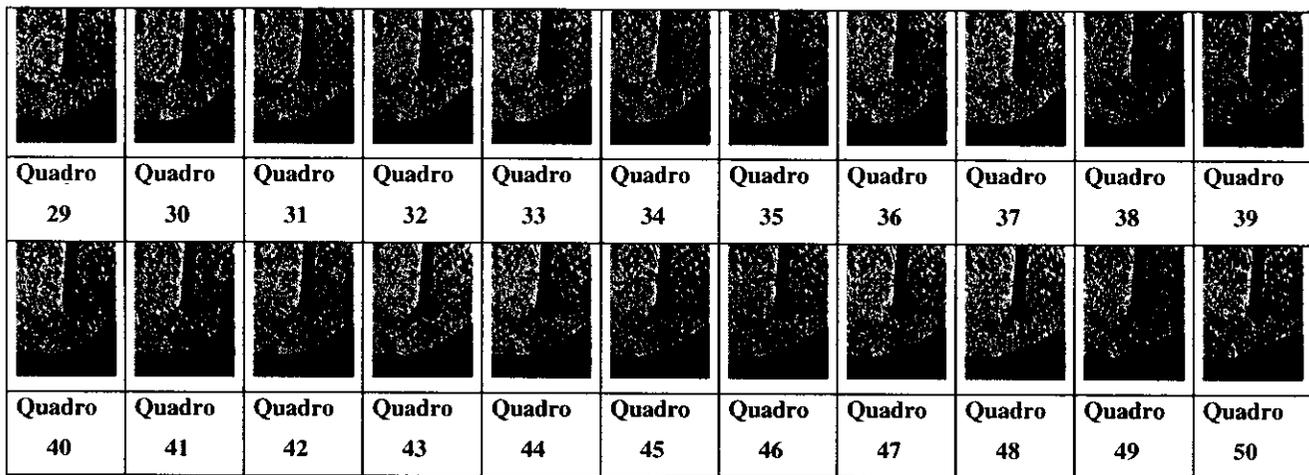


Figura 27 – a) Tensão x tempo ; b) Dimensão fractal por intervalo de tempo.

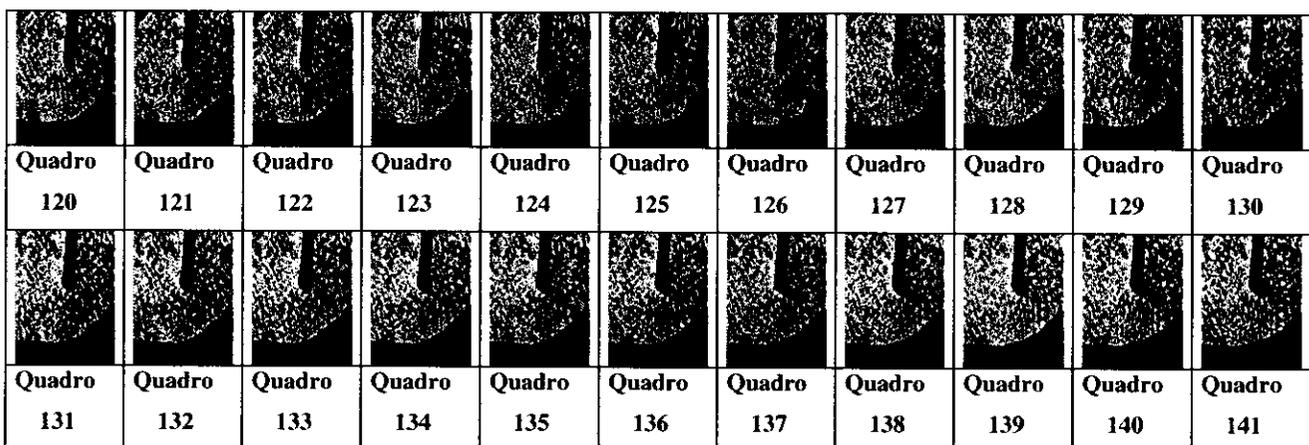
O sinal CC3 foi o que mais apresentou intervalos com valor de dimensão fractal igual ou superior ao valor médio de 1,1523. Conforme o gráfico da dimensão fractal do sinal CC3, esses intervalos foram: 1°, 2°, 4°, 5°, 6°, 8°, 9°, 10°, 11°, 12°, 13°, 14°, 15°, 16°, 18° e 19° (\leftrightarrow) (Figura 27).

Abaixo estão as fotografias correspondentes a onze desses intervalos.

Sinal CC3 - 2° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,5489

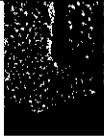
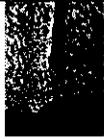
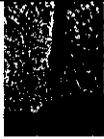


Sinal CC3 - 5° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,4370



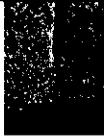
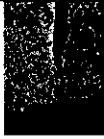
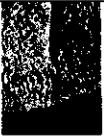
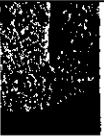
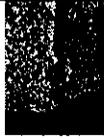
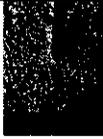
Sinal CC3 - 6º intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,5420

										
Quadro 150	Quadro 151	Quadro 152	Quadro 153	Quadro 154	Quadro 155	Quadro 156	Quadro 157	Quadro 158	Quadro 159	Quadro 160
										
Quadro 161	Quadro 162	Quadro 163	Quadro 164	Quadro 165	Quadro 166	Quadro 167	Quadro 168	Quadro 169	Quadro 170	Quadro 171

Sinal CC3 - 8º intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

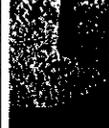
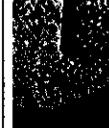
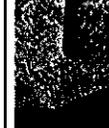
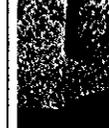
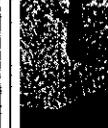
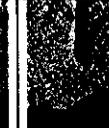
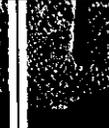
1,3244

										
Quadro 210	Quadro 211	Quadro 212	Quadro 213	Quadro 214	Quadro 215	Quadro 216	Quadro 217	Quadro 218	Quadro 219	Quadro 220
										
Quadro 221	Quadro 222	Quadro 223	Quadro 224	Quadro 225	Quadro 226	Quadro 227	Quadro 228	Quadro 229	Quadro 230	Quadro 231

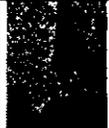
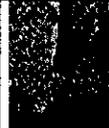
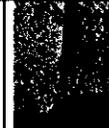
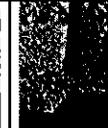
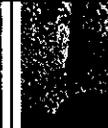
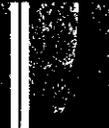
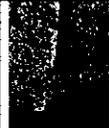
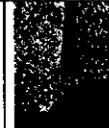
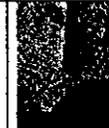
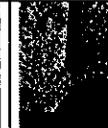
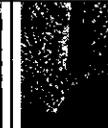
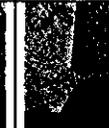
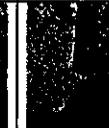
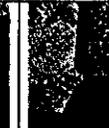
Sinal CC3 - 9º intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,5638

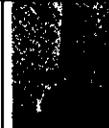
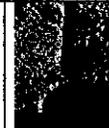
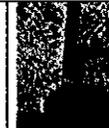
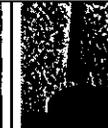
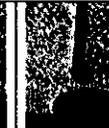
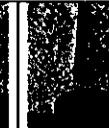
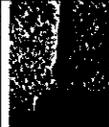
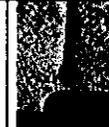
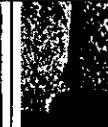
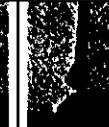
										
Quadro 241	Quadro 242	Quadro 243	Quadro 244	Quadro 245	Quadro 246	Quadro 247	Quadro 248	Quadro 249	Quadro 250	Quadro 251

										
Quadro 252	Quadro 253	Quadro 254	Quadro 255	Quadro 256	Quadro 257	Quadro 258	Quadro 259	Quadro 260	Quadro 261	Quadro 262

Sinal CC3 - 10° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,5211

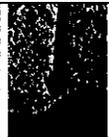
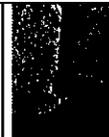
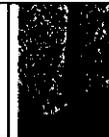
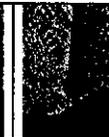
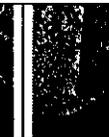
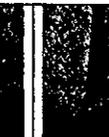
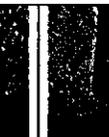
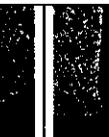
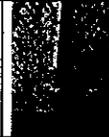
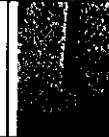
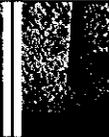
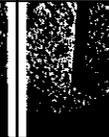
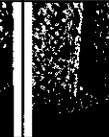
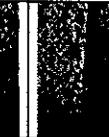
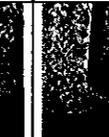
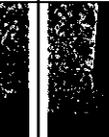
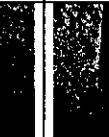
										
Quadro 271	Quadro 272	Quadro 273	Quadro 274	Quadro 275	Quadro 276	Quadro 277	Quadro 278	Quadro 279	Quadro 280	Quadro 281
										
Quadro 282	Quadro 283	Quadro 284	Quadro 285	Quadro 286	Quadro 287	Quadro 288	Quadro 289	Quadro 290	Quadro 291	Quadro 292

Sinal CC3 - 11° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,5265

										
Quadro 301	Quadro 302	Quadro 303	Quadro 304	Quadro 305	Quadro 306	Quadro 307	Quadro 308	Quadro 309	Quadro 310	Quadro 311
										
Quadro 312	Quadro 313	Quadro 314	Quadro 315	Quadro 316	Quadro 317	Quadro 318	Quadro 319	Quadro 320	Quadro 321	Quadro 322

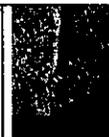
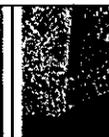
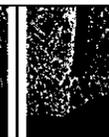
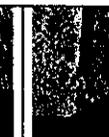
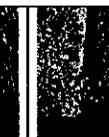
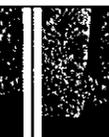
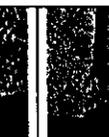
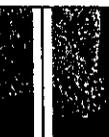
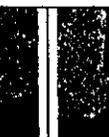
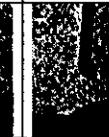
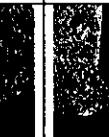
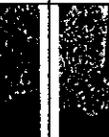
Sinal CC3 - 12° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,5548

										
Quadro 330	Quadro 331	Quadro 332	Quadro 333	Quadro 334	Quadro 335	Quadro 336	Quadro 337	Quadro 338	Quadro 339	Quadro 340
										
Quadro 341	Quadro 342	Quadro 343	Quadro 344	Quadro 345	Quadro 346	Quadro 347	Quadro 348	Quadro 349	Quadro 350	Quadro 351

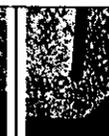
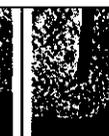
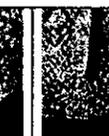
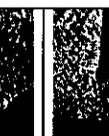
Sinal CC3 - 15° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

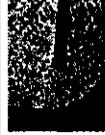
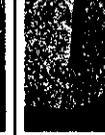
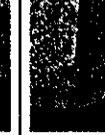
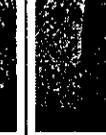
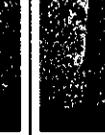
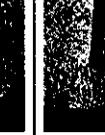
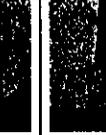
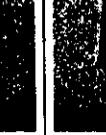
1,5264

										
Quadro 421	Quadro 422	Quadro 423	Quadro 424	Quadro 425	Quadro 426	Quadro 427	Quadro 428	Quadro 429	Quadro 430	Quadro 431
										
Quadro 432	Quadro 433	Quadro 434	Quadro 435	Quadro 436	Quadro 437	Quadro 438	Quadro 439	Quadro 440	Quadro 441	Quadro 442

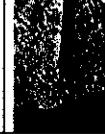
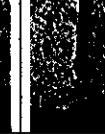
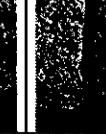
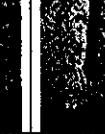
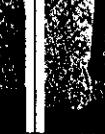
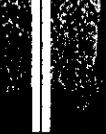
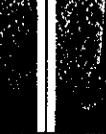
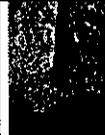
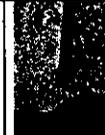
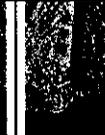
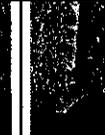
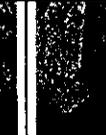
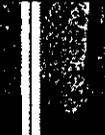
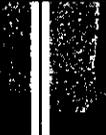
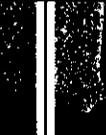
Sinal CC3 - 18° intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:

1,3686

										
Quadro 512	Quadro 513	Quadro 514	Quadro 515	Quadro 516	Quadro 517	Quadro 518	Quadro 519	Quadro 520	Quadro 521	Quadro 522

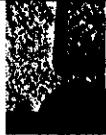
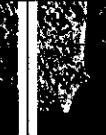
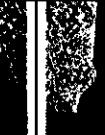
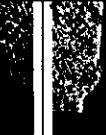
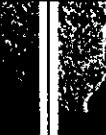
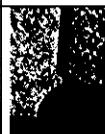
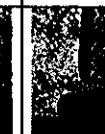
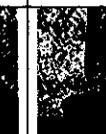
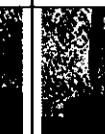
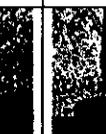
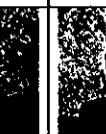
										
Quadro 523	Quadro 524	Quadro 525	Quadro 526	Quadro 527	Quadro 528	Quadro 529	Quadro 530	Quadro 531	Quadro 532	Quadro 533

Sinal CC3 - 19º intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,5267

										
Quadro 541	Quadro 542	Quadro 543	Quadro 544	Quadro 545	Quadro 546	Quadro 547	Quadro 548	Quadro 549	Quadro 550	Quadro 551
										
Quadro 552	Quadro 553	Quadro 554	Quadro 555	Quadro 556	Quadro 557	Quadro 558	Quadro 559	Quadro 560	Quadro 561	Quadro 562

O intervalo que apresentou o menor valor de dimensão fractal no sinal CC3, foi o
7º intervalo. A seqüência de fotografias correspondente é:

Sinal CC3 - 7º intervalo - Dimensão Fractal do Sinal de Tensão no Intervalo:
1,1193

										
Quadro 180	Quadro 181	Quadro 182	Quadro 183	Quadro 184	Quadro 185	Quadro 186	Quadro 187	Quadro 188	Quadro 189	Quadro 190
										
Quadro 191	Quadro 192	Quadro 193	Quadro 194	Quadro 195	Quadro 196	Quadro 197	Quadro 198	Quadro 199	Quadro 200	Quadro 201

Pode-se verificar, a partir dos dados da Tabela 6 a seguir, que também para o sinal CC3, curtos-circuitos reduziam a dimensão fractal do sinal de tensão a valores inferiores a 1,1700 (3°, 7°, 13°, 17° e 20° intervalos).

Observa-se, também para o sinal CC3, a partir dos quadros apresentados, que a presença de outros eventos faziam elevar a dimensão fractal do sinal a patamares superiores a 1,1700 (Ver Tabela 6).

O sinal CC3 apresentou, dentre os sinais investigados, a maior média da dimensão fractal, conforme a Tabela 3.

4.1.6 Dados do ANALISER para o Sinal CC3

Na Tabela 6 estão representados os valores da dimensão fractal do sinal CC3, por intervalo de tempo, e os dados obtidos a partir do ANALISER.

Nota-se, a partir dos dados da Tabela 6, a mesma tendência que ocorria nos sinais CC1 e CC2, ou seja, aos intervalos de maior valor do desvio padrão da tensão (σ_U) estão associados os menores valores da dimensão fractal do sinal (Df), correspondendo aos eventos de transferência por curto-circuito. Nesses intervalos a tensão média (U_m) do arco assume, geralmente, os menores valores, conforme os gráficos da Figura 28 (\leftrightarrow).

Observa-se também, que nos intervalos de menor valor do desvio padrão da tensão (σ_U), onde a tensão média (U_m) do arco assumia os maiores valores com frequência de curto-circuito (f_{cc}) zero, os valores da dimensão fractal (Df) são os maiores, e os eventos correspondentes são de formação da gota e eventualmente transferência metálica goticular, conforme pode ser visto nos quadros fotográficos apresentados.

Para intervalos com valores baixos do desvio padrão da tensão e com dimensão fractal superior a 1,5000 (2°, 6°, 9°, 10°, 11°, 12°, 15° e 19° intervalos), o evento era de formação da gota.

Na amostra de 300ms do sinal CC3 ocorreram 5 curtos-circuitos, conforme indica a Tabela 6, ou como se pode verificar no gráfico da Figura 27 a).

Tabela 6 – Dados do Sinal CC3 obtidos através do ANALISER.

Intervalo	U_m	σ_U	I_m	σ_I	t_{cc}	f_{cc}	n° de CC	Df
1°	26,0	2,09	177	31,88	-	-	0	1,2282
2°	23,5	0,47	123	8,08	-	-	0	1,5489
3°	18,2	7,99	162	83,38	0,0039	67,1	1	1,1339
4°	27,7	2,31	236	49,09	-	-	0	1,1807
5°	24,0	0,88	136	12,96	-	-	0	1,4370
6°	23,1	0,57	110	5,24	-	-	0	1,5420
7°	21,2	10,38	244	77,60	0,0042	67,1	1	1,1193
8°	25,9	1,48	168	28,65	-	-	0	1,3244
9°	23,3	0,46	118	6,46	-	-	0	1,5638
10°	22,7	0,51	106	1,69	-	-	0	1,5211
11°	22,6	0,54	112	1,59	-	-	0	1,5265
12°	22,6	0,46	112	1,41	-	-	0	1,5548
13°	20,4	9,30	219	82,20	0,0039	67,1	1	1,1529
14°	25,7	1,07	193	27,47	-	-	0	1,2340
15°	23,2	0,56	137	7,13	-	-	0	1,5264
16°	20,7	0,55	132	22,97	-	-	0	1,2331
17°	24,8	7,69	256	44,58	0,0019	67,1	1	1,1504
18°	24,4	1,23	148	15,86	-	-	0	1,3686
19°	22,8	0,63	122	3,11	-	-	0	1,5267
20°	21,3	8,99	230	66,66	0,0036	67,1	1	1,1417

Pode-se constatar na Tabela 6 que os maiores valores do desvio padrão da corrente elétrica (σ_I) ocorreram nos intervalos onde houve curtos-circuitos e, conseqüentemente, onde os valores da dimensão fractal do sinal de tensão (Df) foram os menores.

Na Figura 28, têm-se os gráficos da tensão média e dimensão fractal do sinal, e também frequência de curto-circuito e dimensão fractal do sinal.

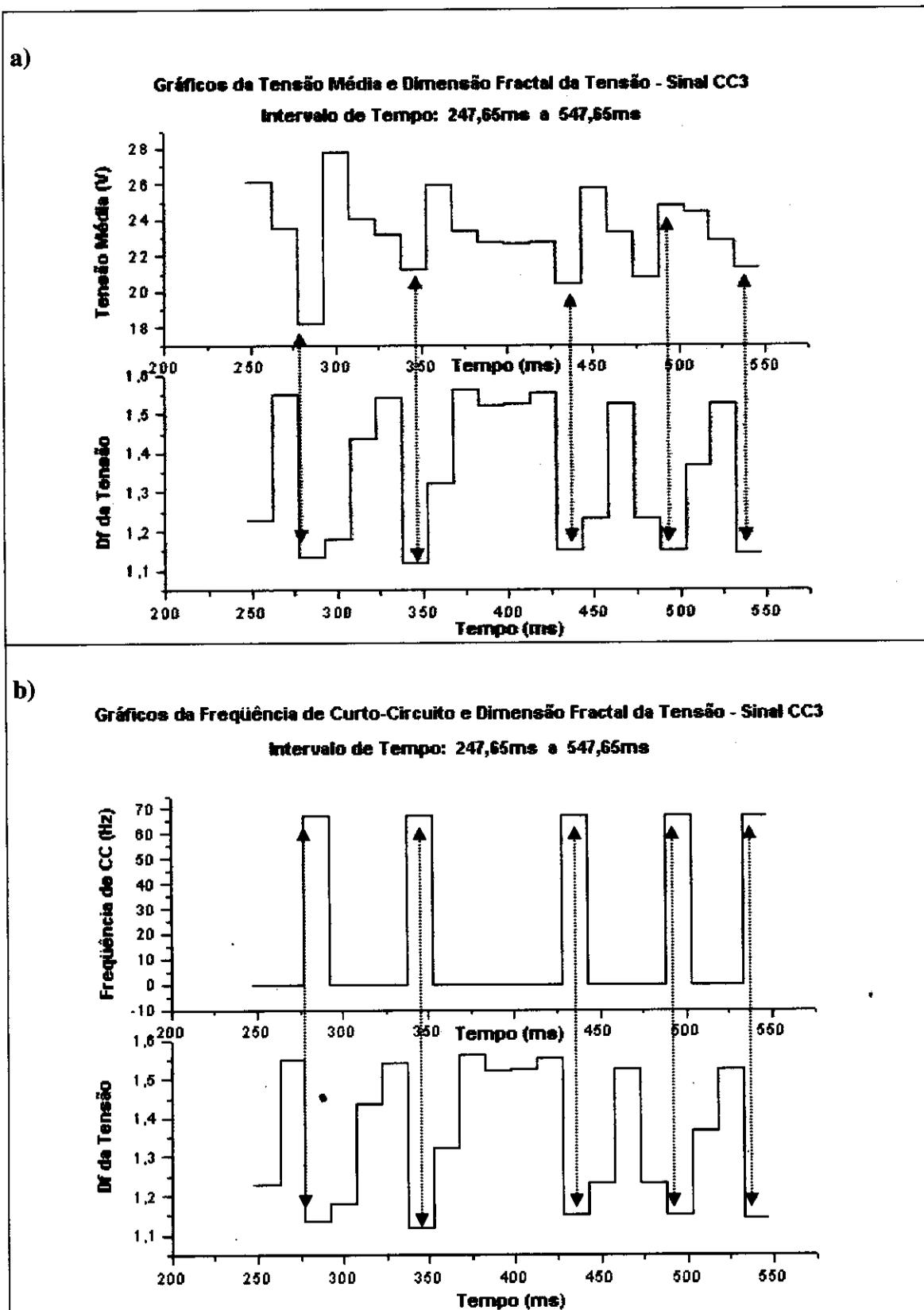


Figura 28 – a) Tensão média x tempo e Dimensão fractal x tempo ; b) Frequência de Curto-Circuito x tempo e Dimensão fractal x tempo.

4.2 Considerações Finais

Os agentes físicos responsáveis pela transferência metálica nos processos de soldagem a arco voltaico atuam de modo distinto de um tipo de transferência para outro. Nos três modos básicos de transferência metálica do processo de soldagem MIG/MAG, o fenômeno da transferência metálica ocorre reconhecidamente em situações físicas distintas entre si. Alguns desses fatores que alteram a forma de transferência já foram mencionados anteriormente.

Tratando-se, desse modo, de situações físicas distintas para o material se transferir, era de se esperar que o sinal de tensão apresentasse um padrão típico para cada tipo de evento: curto-circuito, formação da gota e transferência metálica; e que medidas da dimensão fractal do sinal de tensão pudessem revelar a natureza de cada um desses eventos.

Neste trabalho, pôde-se constatar que as medidas de dimensão fractal estavam relacionadas com a transferência por curto-circuito e com os processos de formação da gota e eventuais transferências. Os três sinais apresentaram transferência por curto-circuito, porém os sinais CC2 e CC3 distinguiram-se do CC1 por apresentarem também transferências do tipo goticular. Formação de gota e ocasionais transferências no sinal faziam elevar a média da dimensão fractal do mesmo.

Foi possível verificar que os valores da dimensão fractal estavam relacionados com a frequência de curto-circuito. O aumento da frequência de curtos-circuitos diminuía a média da dimensão fractal (Ver Figura 29).

Apesar da pequena diferença entre as medidas dos valores da dimensão fractal dos sinais, mostra-se, pelo método de comparação das médias, que estatisticamente a diferença entre elas é significativa (Magalhães & Lima, 2002).

Comparando-se, pelo referido método, os sinais CC1 e CC2, e o sinal CC1 com o CC3, mostra-se que dois a dois os sinais são distintos, com um nível de significância de 5%, ou seja, com 95% de confiança.

A Tabela 7 apresenta dados de variáveis elétricas, para os três sinais investigados, obtidos através do software ANALISER. Constam, também, a média dos valores da dimensão fractal dos vinte intervalos de cada sinal.

Tabela 7 – Dados dos sinais obtidos a partir do ANALISER.

Sinal	I_m (A)	U_m (V)	T_m (ms)	t_{cc} (ms)	σ_T (ms)	σ_{tcc} (ms)	σ_I (A)	σ_U (V)	$\frac{\sigma_m}{U_m}$	n° de CC	f de CC (Hz)	Df
CC1	163	15,4	16,62	5,55	7,49	2,23	54,20	7,45	0,48	17	56,6	1,1523
CC2	167	20,7	33,72	3,68	7,30	0,17	54,92	6,07	0,29	8	26,6	1,2312
CC3	162	23,2	62,17	3,89	20,07	0,29	63,46	5,19	0,22	5	16,6	1,3507

As variáveis da Tabela 7, conforme mencionado no capítulo anterior, seguem a seguinte nomenclatura:

- Corrente média (I_m) e seu desvio padrão (σ_I);
- Tensão média (U_m) e seu desvio padrão (σ_U);
- Período médio de curto-circuito (T_m) e seu desvio padrão (σ_T);
- Tempo médio de curto-circuito (t_{cc}) e seu desvio padrão (σ_{tcc});
- Desvio padrão relativo à tensão (σ_U / U_m);
- Frequência de curto-circuito (f_{cc}), número de curto-circuito (n° de CC) e
- Dimensão fractal do sinal de tensão (Df).

No caso dos sinais analisados, de acordo com a Tabela 7, quanto menor a frequência de curto-circuito (f_{cc}) do sinal (menor intervalo de tempo de arco apagado) menor era, também, os valores do desvio padrão da tensão (σ_T) e maior os valores médios da dimensão fractal (Df), como pode ser visto na Figura 29.

O sinal CC1, que apresentou a maior frequência de curto-circuito (f_{cc}), conseqüentemente menor período médio de curto-circuito (T_m), registrou também o maior tempo médio de curto-circuito (t_{cc}), conforme a Tabela 7.

Verifica-se, também, uma relação entre os valores da dimensão fractal do sinal com o tempo de arco elétrico apagado. O aumento na frequência de curto-circuito está associado ao número de extinções do arco elétrico.

O gráfico da Figura 29 mostra, para os sinais analisados, os comportamentos do desvio padrão relativo da tensão com a dimensão fractal, e também da frequência de curto-circuito com a dimensão fractal.

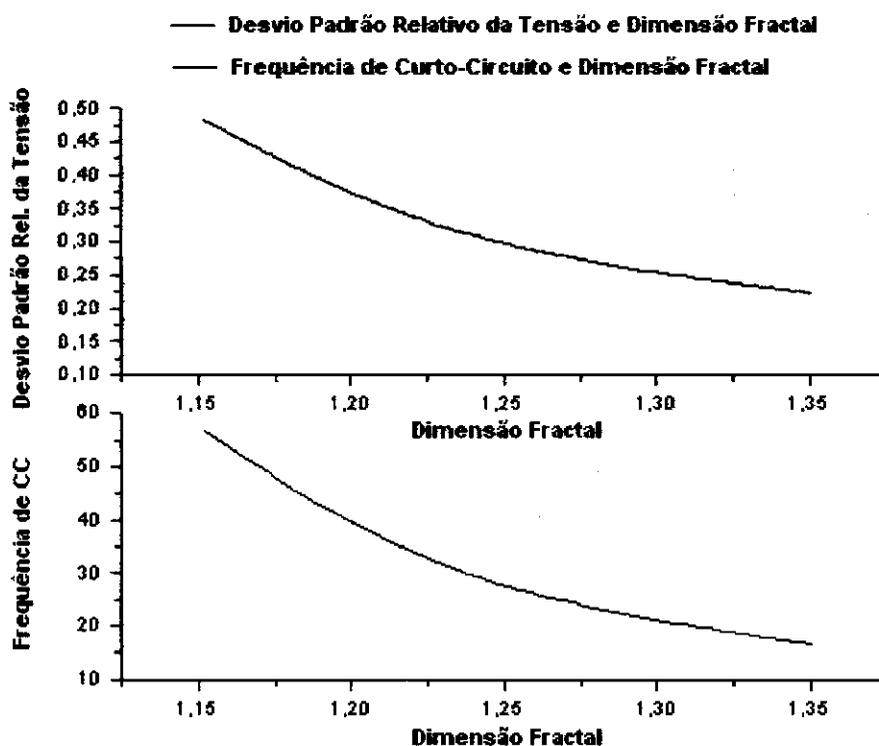


Figura 29 – Desvio padrão da tensão x dimensão fractal e Frequência de curto-circuito x dimensão fractal.

Ressalte-se, por fim, que durante a pesquisa, trabalhos relacionando dimensão fractal e sinais elétricos de tensão e corrente de soldagem não foram encontrados.

Trata-se, portanto, de uma contribuição inicial da utilização da dimensão fractal dos sinais de tensão do arco para a avaliação da estabilidade do arco.

Capítulo 5

5. Conclusões

Neste trabalho foram estudados os modos de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG de três sinais, conforme as variações nos valores da dimensão fractal do sinal de tensão do arco voltaico.

Apresentam-se as conclusões referentes à dimensão fractal do sinal de tensão dos sinais avaliados nesse estudo.

- A média da dimensão fractal dos vinte intervalos de tempo dos sinais estudados, foi menor naquele que apresentou apenas transferência metálica por curto-circuito, no caso o sinal CC1.
- Com base nos sinais analisados, verificou-se que a dimensão fractal do sinal sofria variações com o comportamento do arco e que havia tendência de redução da dimensão fractal do sinal para transferência por curto-circuito e elevação durante a formação da gota e, também, quando ocorria eventualmente transferência metálica.
- Pôde-se perceber uma relação entre a dimensão fractal do sinal de tensão com a frequência de curto-circuito (f_{cc}) e com o desvio padrão da tensão (σ_U). A redução na frequência de curtos-circuitos aumentava a dimensão fractal do sinal e aos intervalos para os quais o desvio padrão da tensão (σ_U) era maior estavam associados os menores valores da dimensão fractal do sinal (Df).
- No sinal CC1 a dimensão fractal do sinal de tensão nos intervalos que ocorria uma transferência por curto-circuito ficava sempre abaixo de 1,1500.

- Para os sinais CC2 e CC3, os eventos de formação da gota e transferência metálica elevaram os valores da dimensão fractal, a ocorrência de uma transferência por curto-circuito naqueles sinais, ocorria com valores da dimensão fractal do sinal acima dos valores alcançados no caso do sinal CC1, porém sempre abaixo de 1,1700.
- Os valores da dimensão fractal dos intervalos onde ocorreram transferências metálicas no sinal CC2 ficavam entre 1,1700 e 1,3700. E no sinal CC3, que apresentou menor frequência de curto-circuito, transferências metálicas ocorreram nos intervalos com valores da dimensão fractal entre 1,1700 e 1,4500.
- O intervalo definido para o cálculo da dimensão fractal dos sinais estudados não permitiu uma análise mais precisa, pois eventualmente acontecia em um mesmo intervalo, sobreposição de eventos, ou seja, ocorrência de curto-circuito e também formação de gota ou transferência metálica. Os valores da dimensão fractal nesses intervalos eram influenciados conforme a tendência do evento.

O método de estimativa da dimensão fractal do sinal de tensão, devido ao elevado intervalo de definição utilizado para o cálculo da dimensão fractal dos sinais estudados, não mostrou ser eficiente para se distinguir, transferência metálica do tipo curto-circuito dos eventos de formação da gota e transferência goticular. No entanto, os desdobramentos desses resultados certamente devem ser motivos de exames ulteriores.

Capítulo 6

6. Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir, apresentam-se algumas sugestões de continuidade a este estudo.

- Avaliar a dimensão fractal dos sinais de tensão através de outras técnicas de estimativa da dimensão fractal, como por exemplo, o método do expoente espectral η , o método da régua, a variabilidade da amplitude, o método de Minkowsky, etc.
- Desenvolver um software que possibilite o cálculo da dimensão fractal do sinal de tensão durante a soldagem.
- Fazer um estudo comparativo entre a técnica de dimensão fractal com técnicas que permitem uma melhor análise local do sinal, como por exemplo, a análise de wavelets.
- Verificar a possibilidade de distinguir transferências goticulares e globulares através de medidas da dimensão fractal do sinal de tensão.

Capítulo 7

7. Bibliografia

BAIXO, C. E. I., 1990, “Registro Fotográfico do Arco e Relações Paramétricas Tensão/Corrente Duas Metodologias para o Estudo da Otimização da Soldagem MIG/MAG”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, pp. 17-22.

EAGAR, T. W.; WEISS, D.; MENDEZ, P.; JONES, L. A., 1997, “Dynamic Behavior of Gas Metal Arc Welding”, Presented at the 9th Annual Conference on Iron and Steel Technology, Pohang, Korea.

EDELS, H., 1961, “Properties and Theory of Electric Arcs”. IEE Proc., 108 A, n° 37, pp. 55-69.

Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem, Volume 1, Fascículo 1, Módulo 05 Processos de Soldagem.

FARIAS, J. P., 1998, “Desempenho da Fonte de Energia na Soldagem ao Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos”. Tese para Concurso de Professor Titular da Área de Soldagem, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará – CE.

FARIAS, J. P., 1993, “Magnésio Metálico como Componente do Revestimento na Soldagem com Eletrodos ao C-Mn-Ni”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC.

FIGUEIREDO, K. M., 2000, “Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem Mig de Alumínio”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, pp 27-31.

GUILE, A. E., 1984, “Electric Arcs Their Electrode Process and Engineering Applications”. IEE Proc., vol 131, Pt A, n° 7, pp. 450-480.

HEIN, L. R. O.; JESUÍNO, G. A.; HOROVISTIZ, A. L.; RIBEIRO, L. M. F., 2002, “Comportamento Fractal em Fratura por Impacto da liga Ti-4Al-4V por Fractografia Quantitativa e Processamento Digital de Imagens”, Laboratório de Análise de Imagens de Materiais, Universidade Estadual Paulista, UNESP.

Haidar, J., 1998, “An analysis of the formation of metal droplets in arc welding”, J. Physics D: Applied Physics 31 (1998), pp 1233-1244. Printed in the UK.

Haidar, J.; Lowke J. J., 1996, “Predictions of Metal Droplet Formation in Arc Welding”, J. Physics D: Applied Physics 29 (1996), pp 2951-2960. Printed in the UK.

- JONES, L. A.; EAGAR, T. W.; LANG, J. H., 1997, "A Dynamical Model of Drops Detaching from a Gas Metal Arc Welding Electrode", J. Physics D: Applied Physics 31 (1998), pp 107-123. Printed in the UK.**
- JONES, L. A.; EAGAR, T. W.; LANG, J. H., 1998, "A Dynamical Model of Drops Detaching from a Gas Metal Arc Welding Electrode", J. Physics D: Applied Physics 31 (1998), pp 93-106. Printed in the UK.**
- KIM, Y. S.; EAGAR, T.W., 1993, "Analysis of Metal Transfer in Gás Metal Arc Welding", Welding Journal, pp 296s-277s.**
- LAUX, P. R.; AGUIRRE, A. J., 2001 "Estimativa da Dimensão Fractal de Nuvens em Imagem de Satélites Meteorológicos", Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS.**
- MACHADO, I. G., 1996, "Soldagem & Técnicas Conexas", Porto Alegre, editado pelo autor, 477 pp.**
- MARROTA, A., 1992, "Revista de Física Aplicada e Instrumentação", Vol.7, Nº 4, pp.146-148.**
- MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P., 2002, "Noções de Probabilidade e Estatística", Editora Edusp, 2002.**
- MIRANDA, H. C., 1999, "Influência da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição Sobrecabeça". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG, pp 25-29.**
- MIRANDA, H. C., 2002, "Reconhecimento e Controle da Transferência Metálica no Processo MIG/MAG Pulsado". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG.**
- MARQUES, L. S. B., 1997, "Controle da Corrente de Soldagem através de um Conversor Buck Utilizando a Técnica da Modulação por Valores Extremos". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE, 7 pp**
- MODENESI, P. J., 1996, Apostila Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais, Curso Pós-graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG.**
- MODENESI, P. J., 2001, Apostila Introdução à Física do Arco Elétrico, Curso Pós-graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG.**
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V., 2001, "Soldagem I Introdução aos Processos de Soldagem", Curso Pós-graduação, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG.**
- NEMCHINSKY, V. A., 1994, J. Physics D: Applied Physics 27, pp 1433-1442.**

PEITGEN, H. O.; JÜRGENS, H.; SAUPE, D., 1992, "Fractals for the Classroom". Part One - Introduction to Fractal and Chaos, New York, Springer-Verlag.

QUITES, A. M., 2002, "Introdução à Soldagem a Arco Voltaico", Editora Soldasoft, Florianópolis - SC.

REUTZEL, E. W.; EINERSON, C. J.; JOHNSON, J. A.; SMARTT, H. B.; HARMER, T.; MOORE, K. L., 1995, "Derivation and Calibration of a Gas Metal Arc Welding (GMAW) Dynamic Droplet Model", 4th International Conference on Trends in Welding Research, Gatlinburg, Tennessee, June 5-8, 1995.

ROCHA, L. S., 2003, "Investigação Preliminar das Propriedades Fractais de Sinais Simulados e Reais utilizando a Dimensão Fractal". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora - MG.

SILVA, E. M., 2002, "Análise da Superfície de Fratura do Aço Inoxidável Duplex UNS S31803 Através da Aplicação da Teoria dos Fractais". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - CE, pp 27-46.

SIMPSON, S.W.; ZHU, P., 1995, J. Physics D: Applied Physics 28, pp 1594-1600.

VILARINHO, L. O., 2000, "Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem MIG Sinérgica de Alumínio", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia - Uberlândia - MG, 111 pp.