

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**COMPARAÇÃO ENTRE ELETRODOS DE TUNGSTÊNIO PURO E  
DOPADOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW COM CA ONDA  
RETANGULAR**

Dissertação apresentada  
à Universidade Federal de Uberlândia por:

**JULIANO OKAMOTO ANTUNES**

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Aprovada por:

Prof. PhD Américo Scotti (UFU) – Orientador

Prof. PhD Sadek C. Absi Alfaro (UnB)

Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi (UFU)

Uberlândia, Abril de 1999

Aos meus pais, Sother e Sônia  
e demais familiares.  
À Stael.

## **Agradecimentos**

Ao professor e orientador Américo Scotti, pela orientação e oportunidade de realizar este trabalho.

Aos professor Valtair Antônio Ferraresi, pelo suporte técnico e amizade.

Ao Departamento de Metalurgia e Materiais da UFMG pelo suporte técnico para realização dos ensaios de EDX e em especial ao professor Paulo José Modenesi, por proporcionar esta oportunidade e pelas sugestões e discussões.

Aos meus companheiros e amigos de “república”.

A todos integrantes do LAPROSOLDA-UFU.

A todos os membros da oficina mecânica.

Aos professores, funcionários e companheiros de trabalho, que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

Ao apoio do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFU.

Ao LAPROSOLDA-UFU e ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM-UFU) pela possibilidade de se usar suas infra-estruturas.

A TELEDYNE ADVANCED MATERIALS, pelo fornecimento dos eletrodos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro, através da concessão de bolsa.

## **Sumário**

|                                                                                                                                     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                                                                                             | vii  |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                                                                                             | ix   |
| <b>Lista de Abreviaturas e Símbolos</b>                                                                                             | xi   |
| <b>Resumo</b>                                                                                                                       | xii  |
| <b><i>Abstract</i></b>                                                                                                              | xiii |
| <b>1 - Introdução</b>                                                                                                               | 1    |
| <b>2 - Revisão Bibliográfica</b>                                                                                                    | 4    |
| 2.1 - Eletrodos de Tungstênio para o Processo GTAW<br>( <i>Gas Tungsten Arc Welding</i> )                                           | 4    |
| 2.2 - As Aplicações e Limitações do Eletrodo de<br>Tungstênio Puro ou com Óxido de Tório na Soldagem GTAW                           | 5    |
| 2.3 - Propriedades Físico-Químicas e Comportamento dos Óxidos Metálicos<br>usados como Elementos Dopantes no Eletrodo de Tungstênio | 8    |
| 2.3.1 - Definições de Função de Trabalho, Cátodos “Quentes” e “Frios”                                                               | 9    |
| 2.3.2 - Efeito da Densidade dos Óxidos sobre a Capacidade de Corrente                                                               | 11   |
| 2.3.3 - Distribuição de Temperatura e Emissividade ao longo do Eletrodo                                                             | 12   |
| 2.3.4 - Comportamento dos Óxidos Metálicos durante Arco Aberto                                                                      | 14   |
| 2.3.5 - O Mecanismo de Emissividade                                                                                                 | 20   |
| 2.4 - Desgaste do Eletrodo de Tungstênio                                                                                            | 25   |
| 2.5 - Formas de Caracterizar o Efeito de Elementos Dopantes<br>Sobre o Desempenho dos Eletrodos                                     | 27   |
| 2.5.1 - Características de Abertura do Arco                                                                                         | 27   |
| 2.5.2 - Característica Estática do Arco                                                                                             | 28   |
| 2.5.3 - Pressão do Arco                                                                                                             | 29   |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 2.6 - Influência da Impureza do Gás de Proteção no         |    |
| Comportamento dos Eletrodos                                | 30 |
| 2.6.1 - Consumo do Eletrodo                                | 30 |
| 2.6.2 - Mecanismo de Formação da Auréola                   |    |
| 32                                                         |    |
| 2.7 - Outros Efeitos dos Elementos Dopantes                | 33 |
| 2.7.1 - Efeito sobre a Microestrutura da Ponta do Eletrodo | 33 |
| 2.7.2 - Efeito sobre a Susceptibilidade à Trinca a Quente  | 35 |
| <b>3 - Procedimento Experimental</b>                       | 36 |
| 3.1 - Introdução                                           | 36 |
| 3.2 - Equipamentos e Montagem Experimental                 | 36 |
| 3.2.1 - Sistema de Aquisição e Tratamento de Sinais        | 37 |
| 3.2.2 - Fonte de Soldagem                                  | 38 |
| 3.2.3 - Tocha de soldagem                                  | 41 |
| 3.2.4 - Mesa de Coordenadas                                | 41 |
| 3.2.5 - Placa Arrefecida para Soldagem                     | 42 |
| 3.3 - Consumíveis Utilizados                               | 44 |
| 3.3.1 - Eletrodos                                          | 44 |
| 3.3.2 - Gás                                                | 44 |
| 3.4 - Planejamento Experimental                            | 44 |
| 3.5 - Desenvolvimento dos Experimentos                     | 47 |
| 3.5.1 - Soldagens                                          | 47 |
| 3.5.2 - Abertura do Arco                                   | 48 |
| 3.5.3 - Comprimento Útil do Eletrodo                       |    |
| 48                                                         |    |
| 3.5.4 - Comprimento do Arco                                | 48 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6 - Metodologia para Avaliar o Desgaste e Comportamento dos Eletrodos | 49  |
| 3.6.1 - Perda de Massa                                                  | 49  |
| 3.6.2 - Aspecto Visual                                                  | 49  |
| 3.6.3 - EDX (Energia Dispersiva de raios X)                             | 50  |
| <b>4 - Resultados e Discussões</b>                                      | 51  |
| 4.1 - Monitoramento dos Sinais Elétricos                                | 51  |
| 4.2 - Variação de Massa e Taxa de Desgaste                              | 53  |
| 4.2.1 - Escolha do melhor Parâmetro para análise dos resultados         | 53  |
| 4.2.2 - Tratamento dos dados (critério de eliminação de dados)          | 53  |
| 4.2.3 - Análise de Variância (ANOVA)                                    | 55  |
| 4.3 – Variação da Tensão                                                | 61  |
| 4.4 - Ensaio de Confirmação                                             | 65  |
| 4.5 - Variação da Geometria da Ponta do Eletrodo                        | 68  |
| 4.6 - Variação da Concentração de Óxidos ao Longo da Ponta do Eletrodo  | 75  |
| <b>5 - Conclusões</b>                                                   | 79  |
| <b>6 - Trabalhos Futuros</b>                                            | 81  |
| <b>7 - Referências Bibliográficas</b>                                   | 83  |
| <b>Anexo A</b>                                                          | 87  |
| <b>Anexo B</b>                                                          | 96  |
| <b>Anexo C</b>                                                          | 99  |
| <b>Anexo D</b>                                                          | 102 |
| <b>Anexo E</b>                                                          | 103 |
| <b>Anexo F</b>                                                          | 108 |

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.1</b> - Distribuição da temperatura ao longo do eixo do eletrodo                                                                                                                                                                                            | 12 |
| <b>Figura 2.2</b> - Distribuição emissividade ao longo do eixo do eletrodo                                                                                                                                                                                              | 13 |
| <b>Figura 2.3</b> - Ilustração de um eletrodo com suas respectivas terminologias                                                                                                                                                                                        | 13 |
| <b>Figura 2.4</b> - Aparência da superfície do eletrodo e linha de análise por EDX para La, Th e Ce, respectivamente                                                                                                                                                    | 15 |
| <b>Figura 2.5</b> - Análise de raio X das partículas internas do eletrodo                                                                                                                                                                                               | 16 |
| <b>Figura 2.6</b> - Ilustração esquemática da distribuição e comportamento do óxido acompanhado pela distribuição de temperatura ao longo do eixo do eletrodo. As áreas hachuradas representam o óxido restante depois da operação e as setas representam a vaporização | 18 |
| <b>Figura 2.7</b> - Função de trabalho e densidade de corrente em função da corrente para vários tipos de eletrodos                                                                                                                                                     | 21 |
| <b>Figura 2.8</b> - Variação da função de trabalho e densidade de corrente em função do tempo de arco aberto                                                                                                                                                            | 23 |
| <b>Figura 2.9</b> - Efeito do tempo de arco aberto na temperatura da ponta do eletrodo e na área de emissão de elétrons em relação a fração volumétrica de óxido na ponta do eletrodo                                                                                   | 24 |
| <b>Figura 2.10</b> - Performance do eletrodo (abertura do arco em relação OCV) para vários GTAW eletrodos com adição de terra raras                                                                                                                                     | 27 |
| <b>Figura 2.11</b> - Característica estática do arco para vários eletrodos de Tungstênio                                                                                                                                                                                | 28 |
| <b>Figura 2.12</b> - Distribuição da pressão do arco, medida no ânodo utilizando CC-                                                                                                                                                                                    | 29 |
| <b>Figura 2.13</b> - Efeito do Oxigênio e Nitrogênio introduzido no Argônio na perda de massa nos eletrodos de Tungstênio                                                                                                                                               | 30 |

|                                                                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.14</b> - Variação do peso devido ao arco aberto numa atmosfera de Ar + 0,2% O <sub>2</sub> a uma corrente de 100 e 200 A para eletrodo W- La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | 31 |
| <b>Figura 2.15</b> - Ilustração esquemática do mecanismo de formação da auréola                                                                                                                        | 32 |
| <b>Figura 2.16</b> - Instabilidade do arco devido a formação da auréola e de sua forma                                                                                                                 | 33 |
| <b>Figura 2.17</b> - Microestrutura da seção transversal do eletrodo depois uma pesada operação                                                                                                        | 34 |
| <b>Figura 3.1</b> - Ilustração da montagem experimental                                                                                                                                                | 36 |
| <b>Figura 3.2</b> - Esquema de medição dos parâmetros de soldagem a partir de um oscilograma real                                                                                                      | 37 |
| <b>Figura 3.3</b> - Curva de calibração do tpos com sua respectiva equação, onde o tpos nominal se refere ao valor de ajuste na fonte e o tpos real ao valor obtido pelo sistema de aquisição de dados | 39 |
| <b>Figura 3.4</b> - Curva de calibração do tneg com sua respectiva equação, onde o tneg nominal se refere ao valor de ajuste na fonte e o tneg real ao valor obtido pelo sistema de aquisição de dados | 39 |
| <b>Figura 3.5</b> - Mesa de coordenadas para movimentação da tocha no plano XY                                                                                                                         | 41 |
| <b>Figura 3.6</b> - Sistema de arrefecimento                                                                                                                                                           | 42 |
| <b>Figura 3.7</b> - Esboço da parte interna da caixa de arrefecimento                                                                                                                                  | 43 |
| <b>Figura 3.8</b> - Detalhe da montagem da caixa de arrefecimento                                                                                                                                      | 43 |
| <b>Figura 4.1</b> - Gráfico de médias considerando todo intervalo                                                                                                                                      | 57 |
| <b>Figura 4.2</b> - Gráfico de médias considerando o intervalo $M \pm 2\delta$                                                                                                                         | 57 |
| <b>Figura 4.3</b> - Gráfico de médias considerando o intervalo $M \pm \delta$                                                                                                                          | 58 |
| <b>Figura 4.4</b> - Gráfico de médias para Vpos                                                                                                                                                        | 62 |
| <b>Figura 4.5</b> - Gráfico de médias para Vneg                                                                                                                                                        | 62 |

**Figura 4.6** - Aumento da tensão dentro do período negativo 64

**Figura 4.7** - Linha de análise por EDX para o Tório

76

**Figura 4.8** - Linha de análise por EDX para o Lantânio 77

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 2.1</b> - Composição Química para Eletrodos de Tungstênio                                                   | 4  |
| <b>Tabela 2.2</b> - Sistema de Identificação de Eletrodos                                                             | 5  |
| <b>Tabela 2.3</b> - Propriedades dos Óxidos Metálicos usados como<br>Ligantes para Eletrodos de Tungstênio Comerciais | 8  |
| <b>Tabela 2.4</b> - Resumo do comportamento dos óxidos                                                                | 17 |
| <b>Tabela 2.5</b> - Função de trabalho do Tungstênio e vários óxidos                                                  | 22 |
| <b>Tabela 3.1</b> - Amplitude e tempos do sinal para 2 canais/8 bit<br>através do programa UBMIG                      | 40 |
| <b>Tabela 3.2</b> - Combinação de Fatores conforme a Matriz L9 de Taguchi                                             | 45 |
| <b>Tabela 3.3</b> - Valores nominais dos parâmetros de soldagem<br>durante os testes                                  | 47 |
| <b>Tabela 4.1</b> - Valores médios de $I_{pos}$ , $I_{neg}$ , $t_{pos}$ , $t_{neg}$ , $V_{pos}$ e $V_{neg}$           | 51 |
| <b>Tabela 4.2</b> - Variação do valor medido (monitorado) em relação<br>ao valor nominal                              | 52 |
| <b>Tabela 4.3</b> - Diferentes formas de apresentar a média da<br>taxa de desgaste por parada                         | 54 |
| <b>Tabela 4.4</b> - Análise de variância considerando todo intervalo                                                  | 55 |
| <b>Tabela 4.5</b> - Análise de variância considerando o intervalo $M \pm 2\delta$                                     | 55 |
| <b>Tabela 4.6</b> - Análise de variância considerando o intervalo $M \pm \delta$                                      | 56 |
| <b>Tabela 4.7</b> - Análise de variância para $V_{pos}$                                                               | 61 |
| <b>Tabela 4.8</b> - Análise de variância para $V_{neg}$                                                               | 61 |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 4.9</b> - Valores nominais dos parâmetros de soldagem para os testes de confirmação                                           | 65 |
| <b>Tabela 4.10</b> - Valores médios de $I_{pos}$ , $I_{neg}$ , $t_{pos}$ , $t_{neg}$ , $V_{pos}$ e $V_{neg}$ dos ensaios de confirmação | 65 |
| <b>Tabela 4.11</b> - Diferentes formas de apresentar a média da taxa de desgaste por parada para os ensaios de confirmação              | 66 |
| <b>Tabela 4.12</b> - Dados estimados ( $y$ ) para a taxa de desgaste e tensão dos testes de confirmação                                 | 67 |
| <b>Tabela 4.13</b> - Dados para análise das formas geométricas das pontas dos eletrodos ensaiados                                       | 68 |
| <b>Tabela 4.14</b> - Resumo da evolução das formas geométricas das pontas dos eletrodos em função das diferentes condições de ensaio    | 69 |
| <b>Tabela 4.15</b> - Reprodução da geometria das pontas dos eletrodos após 1,5 horas de arco aberto                                     | 72 |
| <b>Tabela 4.16</b> - Dados para fins comparativos entre os ensaios 4 e 7                                                                | 76 |

### Lista de Abreviaturas e Símbolos

|        |                                                                                                                                  |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A/D    | Analógico/Digital                                                                                                                |
| AF     | Alta frequência                                                                                                                  |
| Âng.   | Ângulo                                                                                                                           |
| ANSI   | American National Standards Institute                                                                                            |
| AWS    | American Welding Society                                                                                                         |
| CA     | Corrente alternada                                                                                                               |
| CC     | Corrente contínua                                                                                                                |
| CC-    | Corrente contínua na polaridade direta                                                                                           |
| Compr. | Comprimento                                                                                                                      |
| EDX    | Energia dispersiva de raios X                                                                                                    |
| EWCe   | Eletrodo de Tungstênio cerinado                                                                                                  |
| EWG    | Eletrodo de Tungstênio que contém uma adição não especificada de um óxido não especificado de terra rara ou uma combinação deles |
| EWLa   | Eletrodo de Tungstênio lantanado                                                                                                 |
| EWP    | Eletrodo de Tungstênio puro                                                                                                      |
| EWTh   | Eletrodo de Tungstênio torinado                                                                                                  |
| EWZr   | Eletrodo de Tungstênio zirconado                                                                                                 |
| GMAW   | Gas Metal Arc Welding                                                                                                            |
| GTAW   | Gas Tungsten Arc Welding                                                                                                         |
| I      | Corrente                                                                                                                         |
| Ineg   | Corrente na polaridade negativa                                                                                                  |
| Ipos   | Corrente na polaridade positiva                                                                                                  |
| mig.   | Migração                                                                                                                         |
| min.   | mínimo                                                                                                                           |
| OCV    | Tensão em vazio                                                                                                                  |
| p.f.   | Ponto de fusão                                                                                                                   |
| t      | Tempo                                                                                                                            |
| tneg   | Tempo de permanência na polaridade negativa                                                                                      |
| tpos   | Tempo de permanência na polaridade positiva                                                                                      |

|       |                                                     |
|-------|-----------------------------------------------------|
| UBMIG | Programa para aquisição de dados durante a soldagem |
| vap.  | Vaporização                                         |
| Vneg  | Tensão na polaridade negativa                       |
| Vpos  | Tensão na polaridade positiva                       |

ANTUNES, J. O. (1999). Comparação entre Eletrodos de Tungstênio Puro e Dopados no Processo de Soldagem GTAW com CA Onda Retangular. Uberlândia, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

### Resumo

Com o surgimento das fontes eletrônicas foi possível obter-se soldagens GTAW com onda retangular em CA, condição que supera os problemas (eficiência térmica e tempo para transição de polaridades) oriundos da onda de forma senoidal na soldagem de Alumínio. Este tipo de fonte beneficiou muito a soldagem deste material e suas ligas, pois com ela é possível ajustar independentemente o tempo de permanência, como também sua intensidade de corrente, em cada polaridade. Mas, como o desenvolvimento deste tipo de fonte é recente, há poucas informações do comportamento desta nova versão do processo GTAW. Desta forma, este trabalho se propôs a estudar um dos aspectos da soldagem CA com onda retangular, ou seja, a influência de diferentes tipos de eletrodos de Tungstênio (puro, torinado e lantanado) sobre o desgaste dos mesmos, sob diferentes níveis de corrente, tempos de permanência na polaridade negativa e ângulos de apontamento.

Para realização dos ensaios, foi montado uma bancada de teste que permitisse soldagens com o processo GTAW por longos períodos. Uma série de ensaios com diferentes combinações das variações acima mencionadas foi realizada, cada ensaio com duração de 1,5 horas e paradas intermitentes a cada 10 minutos, para avaliação da perda de massa e variações da forma da ponta do eletrodo.

Verificou-se que os eletrodos com óxido de Lantânio apresentam menor taxa de desgaste e, consequentemente, vida mais longa. No entanto, mesmo em faixas de corrente recomendadas em manuais para CA e com o eletrodo trabalhando a maior parte do tempo como cátodo, é observado a destruição de sua ponta. O eletrodo com óxido de lantânio pode sofrer um abaulamento de sua ponta ao invés de sua destruição é possível se os parâmetros de soldagem forem corretamente selecionados. Comportamento semelhante, mas com maior taxa de desgaste, vida mais curta e sem abaulamento da ponta, foi observado para o eletrodo torinado. Já os eletrodos de W puro, apesar de apresentar a maior taxa de desgaste, não apresentam “destruição” da ponta e sim abaulamento, independentemente das condições de soldagem. Os resultados também permitiram elaborar um modelo para explicar a influência da intensidade de corrente e da relação  $t_{neg}/t_{pos}$  sobre o abaulamento da ponta de eletrodos de Tungstênio puro e uma crítica quanto aos modelos

existentes para justificar o mecanismos de desgaste dos eletrodos dopados, os quais não consideram as iterações da temperatura e emissividade.

**Palavras chave:** *Eletrodos de Tungstênio; GTAW; Desgaste; CA Onda Retangular.*

ANTUNES, J. O. (1999). Comparison between Pure and Doped Electrodes used in GTAW with Rectangular CA Output. Uberlândia, Master Science Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Brazil.

## Abstract

With the availability in the market of electronic power supplies, GTA welding with rectangular wave AC output has become possible. This feature overcomes problems (thermal efficiency and reversal polarity duration) due to the sine-shaped wave current output during Aluminum welding. This type of power supply improved remarkably welding of this material and its alloys, since an independent setting of current levels and durations is possible at each polarity. However, as the development of this type of power supply is recent, there is little information about this new version of the process. Therefore, the objective of this work was studying one of the parameters of rectangular AC GTAW, that is, the influence of some types of tungsten electrodes (pure, with Thorium oxides and with Lanthanum oxides) on electrode wear, under different current levels, negative duration times and tip angles.

To carry out the experiments, a rig was set up in such a way that long time welds could be performed. A series of tests was carried out with different parameter combinations, each test taking 1,5 hours and with stops at every 10 minutes, to evaluate loss of mass and variation of tip electrode shape.

The results indicated that electrodes with Lanthanum oxides exhibit lower wear rates and, consequently, longer life. Nevertheless, even using current levels recommended by handbooks and the electrode working mainly as the cathode, tip damage was observed. The Lanthanum electrode could have a balling tip instead of having its tip damaged if correct welding parameters are used. Similar behavior, but with higher wear rate, shorter life and no tip balling, was observed with Thorium electrodes. Pure Tungsten electrode, despite its larger wear rates, presented no tip damage with its tip becoming balled, independently of the welding parameters.

The results also permitted to elaborate a model to explain the influence of current level and  $t_{neg}/t_{pos}$  ratio on pure electrode tip balling. The existing models to explain wear mechanisms of doped electrodes were criticized, since those do not consider temperature and emissivity iteration.

**Key words:** *Tungsten electrodes; GTAW; Wear; Rectangular CA Output.-*

## Capítulo I

### Introdução

#### 1.1 - Motivação e Objetivo

As principais características do alumínio como material de engenharia é devido à baixa densidade e também a sua boa resistência a corrosão além de apresentar excelente condutibilidade térmica e elétrica. A densidade do alumínio é da ordem de  $2,75 \text{ g/cm}^3$ , que é aproximadamente  $1/3$  da densidade do aço ( $7,95 \text{ g/cm}^3$ ) ou do cobre ( $8,9 \text{ g/cm}^3$ ). Sua boa resistência à corrosão em ar, água, óleo e muitos produtos químicos é devida a uma fina camada de óxido, que se forma rapidamente na sua superfície (SCOTTI, 1993).

O alumínio cristaliza-se numa estrutura cúbica de face centrada, que lhe confere excelente ductilidade, mesmo a temperaturas criogênicas (abaixo de zero  $^{\circ}\text{C}$ ) e baixa resistência mecânica, da ordem de apenas  $6,0 \text{ Kg/mm}^2$  para o alumínio puro (99,99% de pureza) no estado recozido. Porém sua resistência pode ser aumentada em mais de 50% pela adição de elementos de liga (Mn, Mg, Si, Cu, Fe, entre outros) e que aliado a tratamentos termo-mecânicos (refinamento de grão e encruamento do material) podem atingir valores da ordem de  $60 \text{ Kg/mm}^2$ , da ordem do aço estrutural, atingindo então grandes valores na relação resistência/peso (SCOTTI, 1993).

Para ser competitivo na indústria moderna mundial, um metal estrutural deve ser facilmente soldável. Para muitos o alumínio era considerado como um material não soldável. Porém hoje esta afirmação não é mais verdadeira porque há vários processos, como principais o GMAW e GTAW que são bem efetivos para soldagem do alumínio principalmente devido sua proteção gasosa eliminando os problemas de corrosão criados pelos fluxos de outros processos como: eletrodo revestido, arco submerso e eletrodo tubular (SAUDERS, 1989).

As aplicações do alumínio soldado são encontradas em todos campos estruturais, mas especialmente naqueles que necessitam de baixo peso combinado com boa resistência à corrosão (SAUDERS, 1989). As indústrias aeronáutica e de transporte são entre outras os exemplos das que mais utilizam do alumínio soldado (SAUDERS, 1989 e SCOTTI, 1993). Produtos altamente bem sucedidos são carcaças para foguetes aeroespacial, corpos e cabinas de caminhões (visto grandes capacidades são solicitadas sem aumento do peso

bruto). Há numerosos exemplos de componentes de alumínio fabricado por soldagem como: sinais de trânsito, poste de iluminação, grades de proteção nas auto-estradas, viveiro para plantas, ponte de pedestres, tanques de armazenagem, oleodutos, tubulações para transportar certas substâncias químicas e etc (SAUDERS, 1989).

A camada de óxido que se forma rapidamente na superfície do metal é refratária e de alto ponto de fusão (2038 °C) e representa uma barreira para a fonte de calor para soldagem (BILONI et al., 1981). Esta camada deve ser removida por meios químicos ou mecânicos antes da soldagem, principalmente nas ligas tratadas termicamente, onde a camada de óxido é muito espessa, podendo impedir a abertura do arco (SCOTTI, 1993). BARHORST (1985) cita que uso somente da limpeza química, como etapa para remoção do óxido, não é suficiente para produzir uma requerida qualidade, pois as taxas de rejeição devido a porosidade pode ser de 25% ou maior. Mesmo quando utilizado limpeza química juntamente com limpeza mecânica, a porcentagem de soldas rejeitadas continua inaceitável.

Uma opção é a limpeza catódica, que ocorre quando a camada de óxido de metais como o alumínio ou magnésio é exposta ao eletrodo positivo da soldagem a arco. A limpeza catódica é um passo da produção que pode ser usada em conjunto com a limpeza química para produzir soldas de alumínio de alta qualidade com o processo GTAW. Com apropriadas técnicas, esta remoção de óxido pode ser usada para produzir uma quase totalidade de soldas aceitáveis (BARHORST, 1985).

O princípio da limpeza catódica para remoção da camada de óxido em soldagens de alumínio por GTAW tem sido aplicado através do uso corrente alternada (CA) senoidal sobreposta por um sinal de alta tensão e alta frequência (AF). Durante o semi ciclo em que o eletrodo está positivo, o óxido da poça de fusão é limpo, enquanto a solda é realizada principalmente durante o semi ciclo negativo. Quando o eletrodo torna-se negativo, ele fornece elétrons imediatamente para reignição do arco (emissão termoiônica). No entanto, quando a poça torna-se negativa, ela não fornece elétrons tão facilmente, a menos que a tensão seja elevada suficientemente para iniciar a emissão a frio (AWS, 1991a). Além disso, como o tempo para transição de polaridades é muito longo na onda senoidal, a tensão e a corrente do arco podem atingir valores insuficientes para manter a requerida estabilidade do arco (REIS & SCOTTI, 1996). Desta forma, a alta frequência e alta tensão tem a função de ajudar na estabilidade do arco. Entretanto, o uso de CA senoidal com AF tem seus problemas. Destaca-se fato dos ignitores de alta frequência e, assim, afetarem componentes eletrônicos (computadores, rádios, etc.) mesmo posicionados à distância (interferência pela rede e pelo ar) (REIS & SCOTTI, 1996). Outra desvantagem resultante da soldagem com CA senoidal se

refere ao maior desgaste do eletrodo além do maior aquecimento da tocha (REIS & SCOTTI, 1996).

Devido ao avanço da eletrônica foi possível obter uma onda retangular com polaridade variável, que aparentemente supera os problemas causados pela CA com onda de forma senoidal. O primeiro propósito dessa forma de onda é a redução do tempo de transição entre as polaridades. O segundo propósito do uso da onda retangular é o aumento da eficiência térmica do processo pela maior duração do período com polaridade negativa (tneg) à custa do período com polaridade positiva (tpos). Na verdade, o período de polaridade positiva é selecionado adequadamente para limpeza do óxido, permitindo longo tempo para transferência de calor obtido no ciclo com polaridade negativa. Esta abordagem é pretendida para aumentar a fusão do metal (penetração) e para reduzir desgaste do eletrodo, fatores que melhoram a produtividade do processo. Desta forma, a correta denominação do processo deve ser "GTAW CA com Onda Retangular Assimétrica", em vez do termo onda quadrada popularmente utilizado (SCOTTI & REIS, 1999).

Apesar das evidentes vantagens da onda retangular, há pouca informação sobre a regulação dos parâmetros da onda retangular, sobretudo quando se usa chanfros e alimentação de arame (condições práticas) e sobre o comportamento dos eletrodos para este tipo de onda, podendo limitar o uso desta técnica. Portanto o LAPROSOLDA-UFU vêm trabalhando em cima deste assunto, buscando alcançar um melhor entendimento do processo, visando a otimização da seleção dos parâmetros de soldagem para uma maior automatização do processo.

Muitas lacunas ainda necessitam ser preenchidas para um melhor entendimento dos fenômenos que governam o processo, tais como; a influência do tipo de eletrodo de tungstênio, a influência da superfície a ser soldada e um maior conhecimento a respeito da limpeza catódica.

Desta forma, neste trabalho propõem-se a preencher uma destas lacunas, ou seja, estudar a influência da composição química dos eletrodos no seu desgaste para diferentes níveis de corrente, tempo de permanência na polaridade negativa e ângulo de apontamento utilizando CA onda retangular.

É importante salientar que o desgaste do eletrodo de Tungstênio é um assunto importante a ser estudado pois sistemas de soldagem em geral e particularmente os robotizados exigem boa estabilidade e confiabilidade por longo tempo de operação dos eletrodos. (SADEK et al., 1990).

## Capítulo II

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1 - Eletrodos de Tungstênio para o Processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)

Materiais a base de Tungstênio (W) são usados em variadas aplicações, devido a suas favoráveis propriedades mecânica, química e física. Mas o Tungstênio é freqüentemente ligado com outros metais especiais ou compostos metálicos para melhorar algumas características específicas, especialmente para aplicações elétricas. Para o caso da soldagem GTAW (também conhecido por TIG de Tungstênio Inerte Gás), que utiliza eletrodos “não consumível” de Tungstênio ou de ligas de Tungstênio, a mesma regra se aplica. A *American Welding Society* (1992) especifica e classifica estes eletrodos com base nas composições químicas, conforme a norma ANSI/AWS A5.12-92. Esta classificação é resumida na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** - Composição Química para Eletrodos de Tungstênio (AWS, 1992)

| Classificação AWS | Porcentagem em Peso   |                  |                                |                  |                  |                                     |
|-------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|
|                   | W min. <sup>(*)</sup> | CeO <sub>2</sub> | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ThO <sub>2</sub> | ZrO <sub>2</sub> | Total de outros Elementos ou Óxidos |
| EWP               | 99.5                  | —                | —                              | —                | —                | 0.5                                 |
| EWCe-2            | 97.3                  | 1.8 - 2.2        | —                              | —                | —                | 0.5                                 |
| EWLa-1            | 98.3                  | —                | 0.9 - 1.2                      | —                | —                | 0.5                                 |
| EWTh-1            | 98.3                  | —                | —                              | 0.8 - 1.2        | —                | 0.5                                 |
| EWTh-2            | 97.3                  | —                | —                              | 1.7 - 2.2        | —                | 0.5                                 |
| EWZr-1            | 99.1                  | —                | —                              | —                | 0.15 - 0.4       | 0.5                                 |
| EWG               | 94.5                  | Não Especificado |                                |                  |                  |                                     |

(\*) Conteúdo de Tungstênio deve ser determinado pela diferença de todos óxidos especificados e outros óxidos e elementos, de um total de 100%.

Em particular, o eletrodo EWG é um eletrodo de Tungstênio que contém uma adição não especificada de algum óxido ou uma combinação deles (terra rara ou outros). O

fabricante deve identificar a quantidade e o(s) óxido(s) ou elemento(s) adicionado(s). A finalidade desta adição é de afetar a natureza ou características do arco (AWS, 1992). Embora o óxido de Magnésio não seja um óxido de terra rara, a referência AWS (1991a), o inclui na classificação EWG.

Um sistema de identificação foi também desenvolvido para os eletrodos de Tungstênio. Assim, cada classe de eletrodos no sistema ANSI/AWS A5.12-92 possui uma marca (cor) na sua extremidade, como mostra a Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Sistema de Identificação de Eletrodos (AWS, 1992)

| <b>Classificação AWS</b> | <b>Cor</b> |
|--------------------------|------------|
| <b>EWP</b>               | Verde      |
| <b>EWCe-2</b>            | Laranja    |
| <b>EWLa-1</b>            | Preto      |
| <b>EWTh-1</b>            | Amarelo    |
| <b>EWTh-2</b>            | Vermelho   |
| <b>EWZr-1</b>            | Marrom     |
| <b>EWG</b>               | Cinza      |

## **2.2 - As Aplicações e Limitações do Eletrodo de Tungstênio Puro ou com Óxido de Tório na Soldagem GTAW**

Tungstênio com adição de Tório ou óxido de Tório (tória) são correntemente utilizados em várias aplicações, incluindo eletrodos para soldagem (89% quantidade produzida), lâmpadas a arco voltaico (7%), componentes endurecidos por dispersão (3%) e emissores catódicos (1%) (PASCHEN, 1996). Especificamente quanto a soldagem, os eletrodos de Tungstênio são ligados com pequena quantidade de óxido de Tório para facilitar abertura do arco, pois esta adição, diminui a função de trabalho (veja detalhes nos itens 2.3.1 e 2.3.5), melhorando as condições de emissão eletrônica de forma significativa, quando comparado ao eletrodo de Tungstênio puro (NORRISH, 1992). A adição deste óxido também conduz a um Tungstênio com estrutura de grãos mais finos, justificando o melhor comportamento na ignição e maior estabilidade do arco e uma menor taxa de consumo. Assim para igual diâmetro, os eletrodos torinados podem operar com maiores correntes de soldagem do que os eletrodos de

Tungstênio puro (RESCH & LEICHTFRIED, 1995). Entretanto, a performance de um eletrodo torinado depende muito de sua homogeneidade, em particular da regularidade na distribuição do óxido de Tório (NORRISH, 1992).

Na prática, os eletrodos de Tungstênio puro (ou zirconados) são recomendados em soldagem em CA, enquanto que para CC tem sido especificados os demais eletrodos com elementos de ligas, o que inclui o Tório. A razão para o uso em CA baseia-se na importância da forma geométrica da ponta; o abaulamento da ponta do eletrodo proporciona maior estabilidade do arco e este efeito é conseguido devido à maior função de trabalho dos eletrodos de Tungstênio puro e zirconado, que conseqüentemente eleva a temperatura de operação (AWS, 1991a). Os eletrodos de Tungstênio puro também podem ser utilizados em CC, apesar de não fornecerem boa abertura do arco e estabilidade satisfatórias quando comparados aos eletrodos de Tungstênio torinado, cerinado ou lantanado (AWS, 1991a).

Pontas de eletrodos de Tungstênio puro com estabilidade e uniformidade do abaulamento são fatores essenciais para uma soldagem satisfatória em CA. Baseando-se nesta afirmação SAUDERS (1989), recomenda que se deve ter cuidado com o diâmetro do eletrodo, pois, se ele for de diâmetro maior do que o recomendado para a corrente nominal de trabalho, ele não irá formar uma ponta totalmente abaulada e o arco tenderá a se desviar. No entanto, BILONI et al. (1981) contrastam esta recomendação e sugerem essa condição para facilitar a manutenção da forma semi esférica da ponta do eletrodo. Já se o diâmetro do eletrodo for menor do que o exigido pela corrente nominal de trabalho, pode-se formar um grande abaulamento (maior que o diâmetro do eletrodo), tornando o arco mais instável e com possibilidade de projetar Tungstênio para dentro da poça de fusão (SAUDERS, 1989).

A literatura clássica informa que os eletrodos torinados (baixa função de trabalho), quando utilizados com CA, não fundem sua ponta, assim não formando o abaulamento requerido. Ao contrário, produzem uma ponta com protuberâncias, que torna o arco mais instável e introduz Tungstênio para dentro da poça de fusão, além de proporcionar pobre ação de limpeza (SAUDERS, 1989). Portanto, eletrodos torinados não são recomendados para trabalhar em CA. Apesar da literatura clássica defender estas afirmações, REIS (1996) mostra resultados satisfatórios na utilização do eletrodo torinado em soldagem GTAW, em comparação ao eletrodo de Tungstênio puro. É importante ressaltar que Reis utilizou CA de onda retangular balanceada, enquanto que na literatura clássica acredita-se tratar de CA onda senoidal.

Um outro aspecto ligado ao uso do Tório está relacionado aos problemas de radioatividade. O fato do Tório ( $Z=90$  e  $A=232$ ) ser um emissor de raios alfa sempre foi conhecido, pois há uma preferência deste tipo de emissão para isótopos com número atômico

(Z) maior que 83 (KELLER, 1981) ou, de acordo com MAHAN (1981), para os elementos com número de massa atômica (A) superior a 200, existindo poucas exceções dessas regras. Desta forma, o Tório pode ser considerado um material radioativo, porém de baixo nível.

Alguns autores (AWS, 1994; CAMPBELL & LACOURSIERE, 1995; PASCHEN, 1996), acreditam que o risco do uso do Tório para os trabalhadores é insignificante, pois os raios alfa podem ser facilmente adsorvidos, devido a sua alta interação com a matéria. Assim, uma fina folha de papel, ou alguns centímetros de ar, são suficientes para sua total adsorção (KELLER, 1981; RESCH & LEICHTFRIED, 1995). No caso dos eletrodos de soldagem, nos quais o óxido de Tório está completamente blindado pela matriz de Tungstênio, eles emitem uma quantidade insignificante de radiação (durante sua armazenagem, soldagem ou remoção de seus resíduos), quando comparado com o seu nível natural de radiação (RESCH & LEICHTFRIED, 1995).

Entretanto, o Tório se inalado ou ingerido em quantidades suficientes, durante longos períodos, pode apresentar riscos à saúde (AWS, 1994; CAMPBELL & LACOURSIERE, 1995). Uma típica ocorrência desta condição é durante o esmerilhamento da ponta do eletrodo, quando há formação de pó radioativo, ou durante a soldagem com a geração de fumos. Desta maneira, o pó ou fumo podem ir direto para os pulmões (exposição interna) (AWS, 1994; CAMPBELL & LACOURSIERE, 1995; PASCHEN, 1996; RESCH & LEICHTFRIED, 1995; BARWA & SCHWAB, 1988). Para prevenir esses riscos, é necessário o uso de exaustores, uso de equipamentos para proteção respiratória e cuidados devem ser tomados durante a remoção do pó resultante do apontamento (AWS, 1994; CAMPBELL & LACOURSIERE, 1995). Contudo a literatura (AWS, 1994) esclarece que o risco de uma exposição interna durante a soldagem devido aos fumos, pode-se tornar insignificante, desde que a taxa de consumo do eletrodo seja muito baixa.

A conscientização da opinião pública contra perigos à saúde em locais de trabalho tem aumentado consideravelmente, o que leva à minimização dos possíveis riscos até onde tecnicamente e comercialmente for possível (PASCHEN, 1996). Em uma nota da CEU (*Commission of the European Union*), em 1992, foi proposto limites novos e substancialmente baixos para o uso do Tório. No futuro, há de se considerar com mais severidade a produção e uso do eletrodo torinado, como também a remoção de seus resíduos (RESCH & LEICHTFRIED, 1995). Esta é uma das razões da necessidade da substituição dos eletrodos torinados (adição de  $\text{ThO}_2$ ) por eletrodos com adição de outros elementos, entre eles os óxidos de terra raras (adição de  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$  e  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ).

### 2.3 - Propriedades Físico-Químicas e Comportamento dos Óxidos Metálicos usados como Elementos Dopantes no Eletrodo de Tungstênio

Dentre os óxidos mais utilizados como dopantes para eletrodos de Tungstênio estão o  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$  e os chamados óxidos de terra raras ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ). GREENWOOD & EARNSHAW (1994), recomendam usar a expressão “metais de terra raras” para os elementos que vão do Ce ao Lu, mas são geralmente incluídos o La, Sc e Y. Esta recomendação está de acordo com a Comissão de Nomenclatura em Química Inorgânica da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*), que recomenda usar a expressão “metais de terra raras” para os elementos que vão do La ao Lu, incluindo o Sc e Y (COMMISSION ON NOMENCLATURE OF INORGANIC CHEMISTRY, 1960 apud Serra, O. A\*, comunicação verbal).

Algumas propriedades desses óxidos usados para ligar eletrodos de Tungstênio podem ser vistas na Tabela 2.3, onde pode-se verificar que o  $\text{Y}_2\text{O}_3$  e  $\text{La}_2\text{O}_3$  são os mais estáveis, o  $\text{MgO}$  e o  $\text{ThO}_2$  possuem os mais altos pontos de fusão, e o  $\text{Y}_2\text{O}_3$  e o  $\text{ThO}_2$  possuem os mais altos pontos de ebulição.

**Tabela 2.3** - Propriedades dos Óxidos Metálicos usados como Ligantes para Eletrodos de Tungstênio Comerciais (PASCHEN, 1996)

| Óxido Metálico          | Entalpia de Formação [kJ/mol] | Relação para um Mol de Oxigênio | Ponto de Fusão [°C] | Ponto de Ebulição [°C] |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|
| MgO                     | 609                           | 609                             | 2832                | 3260                   |
| $\text{Y}_2\text{O}_3$  | 1935                          | 645                             | 2435                | 4300                   |
| $\text{ZrO}_2$          | 1112                          | 556                             | 2677                | 4275                   |
| $\text{La}_2\text{O}_3$ | 1832                          | 611                             | 2217                | 4200                   |
| $\text{CeO}_2$          | 1107                          | 554                             | 2600                | —                      |
| $\text{ThO}_2$          | 1246                          | 623                             | 3050                | 4400                   |

\* Professor do Departamento de Química da Universidade de São Paulo em Ribeirão Preto.

O comportamento desses óxidos metálicos durante o arco aberto é um fator muito importante para determinar as características de operação do eletrodo, o qual é dependente da função de trabalho, temperatura de operação, emissão de elétrons e estabilidade do eletrodo (USHIO et al., 1991), que serão detalhados nos itens a seguir.

### 2.3.1 - Definições de Função de Trabalho, Cátodos “Quentes” e “Frios”

Várias propriedades do Tungstênio (alto ponto de fusão, relação favorável entre pressão de vapor e emissividade de elétron, elevado peso atômico, boa resistência ao desgaste e também elevada condutibilidade térmica e elétrica) determinam sua utilização e de seus ligantes para aplicações em elétrica e eletrônica. Dentre todas essas propriedades acima, a função de trabalho é que determina a energia de emissão de elétrons, sendo assim primordial para uso elétrico (PASCHEN, 1996).

Segundo a teoria eletrônica mostrada por DUTRA et al. (1991), a função de trabalho procura quantificar, analogamente ao potencial de ionização, a energia necessária para remover elétrons de um átomo de um material sólido. O conceito de função de trabalho deriva de uma teoria formulada por Einstein. Este demonstrou que a incidência de radiação eletromagnética sobre um átomo pode fornecer energia suficiente para promover a liberação de elétrons. Segundo esta teoria, a energia cinética máxima adquirida pelos elétrons emitidos a partir da incidência de radiação é quantificada pela relação:

$$E_2 = E_1 - w \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde  $E_2$  é a energia cinética máxima dos elétrons livres,  $E_1$  a energia da radiação incidente e  $w$  a parcela associada a energia de atração dos elétrons. Einstein denominou de função de trabalho esta parcela de energia representando, essencialmente, a energia necessária para produzir um elétron com energia cinética zero. A medida de energia quantificada pela função de trabalho equivale a energia de ligação de um dos muitos elétrons liberados da superfície do emissor.

De acordo com PASCHEN (1996), a energia de emissão é dada em elétron-volt ( $1\text{eV} = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ J}$ ) e é a energia requerida para remover um elétron de um material no estado sólido. Esta quantidade de energia depende da orientação cristalográfica da superfície e é

fortemente influenciada pela estrutura das camadas atômicas perto da superfície que são as responsáveis pela emissão de elétrons (PASCHEN, 1996; NIKOLIC et al., 1996).

A função de trabalho de um eletrodo pode ser numericamente calculada a partir da equação de Richardson-Dushman (Equação 2.2) mostrada abaixo. Mas, primeiro, é necessário que se conheça a área de emissão de elétrons para um determinado eletrodo, pois conhecendo esta área, pode-se calcular a densidade de corrente, e finalmente encontrar a função de trabalho (SADEK et al., 1990; PASCHEN, 1996):

$$I_s = AT^2 \exp(-e\phi / kT) \quad (\text{Equação 2.2})$$

onde:  $I_s$  = densidade de corrente resultante do efeito termoiônico [ $A / m^2$ ],  $A$  = constante =  $1.2 \times 10^6$  [ $A / m^2 \times K^2$ ],  $k$  = constante de Boltzman,  $T$  = temperatura [K],  $e$  = carga do elétron =  $1,6 \times 10^{-19}$  [C] e  $\phi$  = função de trabalho [V].

Outro método de se calcular a função de trabalho foi citado por NIKOLIC et al. (1996). Estes autores chamam a atenção para que se utilize valores de função de trabalho obtidos pelo mesmo método, pois assim, pode-se fazer, de certa forma, uma comparação entre eles.

Uma alta emissividade eletrônica significa uma baixa função de trabalho. O óxido de Tório vem sendo geralmente adicionado ao Tungstênio com o propósito de diminuir esta função de trabalho (PASCHEN, 1996). No entanto, a capacidade de emissão de elétrons por um metal não depende somente da função de trabalho, mas também da temperatura de operação do arco (veja detalhes no item 2.3.5), levando em conta que quanto maior a função de trabalho, maior a temperatura necessária para que o cátodo passe a condição de emissor (DUTRA et al., 1991).

Entretanto, uma baixa função de trabalho não significa necessariamente alta emissividade. Por exemplo, o Tungstênio, apesar de ter uma função de trabalho maior do que o Alumínio e o Ferro ( $W = 4.1$  a  $4.4$  eV;  $Al = 3.8$  a  $4.3$  eV;  $Fe = 3.5$  a  $4.0$  eV; AWS, 1991b), ele possui uma maior emissividade. Isto se deve ao fato do Alumínio e o Ferro atingirem o estado de vaporização antes de alcançar a temperatura exigida para que a emissão de elétrons permita manter o arco voltaico. O suprimento de elétrons passa a originar de estruturas formadas a partir de filmes óxidos depositados sobre a superfície do cátodo. Ao serem submetidos às condições de temperaturas e pressões elevadas, estes óxidos sofrem um processo de dissociação e liberação de oxigênio. A reação resulta na formação de uma microestrutura com função de trabalho inferior a do metal puro, permitindo a emissão de elétrons em quantidade suficiente para manter o arco, a uma temperatura inferior a de vaporização do metal (DUTRA et al., 1991). De acordo com os autores citados anteriormente,

os materiais que necessitam da presença de óxidos para emissão de elétrons são classificados como cátodos não-refratários ou cátodos “frios”.

Já o Tungstênio, devido a sua alta temperatura de vaporização, pode alcançar a temperatura requerida para que ocorra uma emissão de elétrons sem haver dissipação na forma de vapor metálico. Esta propriedade de emissão a temperaturas elevadas permite classificar o metal tungstênio como cátodo refratário ou cátodo “quente”, e são estes os responsáveis por uma emissão eletrônica de forma distribuída, fazendo com que o arco voltaico apresente menor mobilidade, resultando em maior estabilidade espacial (DUTRA et al., 1991).

### **2.3.2 - Efeito da Densidade dos Óxidos sobre a Capacidade de Corrente**

A capacidade de corrente de um eletrodo pode ser definida como a máxima corrente suportada pelo eletrodo, sem danificá-lo e/ou instabilizar o arco. Esta capacidade está ligada ao aquecimento do eletrodo, o qual não é somente função da corrente, mas também da própria composição química (Américo Scotti, comunicação verbal).

Portanto a capacidade de corrente de um eletrodo pode ser afetada pela adição de óxidos que são uniformemente distribuídos por todo comprimento do eletrodo. Isto é devido ao fato que o Tungstênio puro ser um metal condutor, enquanto os óxidos adicionados são isolantes. Assim, o eletrodo com mais baixo volume de óxidos deve ter a mais alta capacidade de corrente, mantendo todos os outros fatores iguais (CAMPBELL & LACOURSIERE, 1995). Por exemplo, o  $\text{La}_2\text{O}_3$  possui uma menor densidade em relação ao  $\text{ThO}_2$ , ou seja, o volume ocupado pelo óxido de Lantânio em um eletrodo com 1,5%  $\text{La}_2\text{O}_3$  é maior que o volume ocupado pelo óxido de Tório em um eletrodo com 2%  $\text{ThO}_2$  (considerando estas percentagens em peso). Assim, para um mesmo diâmetro de eletrodo, o W- $\text{ThO}_2$  (2%) deve apresentar uma capacidade de corrente um pouco maior que o W- $\text{La}_2\text{O}_3$  (1.5%), considerando que os dois elementos tenham a mesma função de trabalho (CAMPBELL & LACOURSIERE, 1995). É importante ressaltar que SADEK et al. (1990) não encontraram mesmos valores de função de trabalho para o Lantânio e o Tório.

No entanto, o efeito isolante dos óxidos não é exclusivamente o fator que determina a capacidade de corrente de um eletrodo; CAMPBELL & LACOURSIERE (1995) citam que a

adição do óxido de Tório aumenta a vida dos eletrodos e promovem uma melhora em termos de abertura e estabilidade do arco quando comparado com eletrodos de Tungstênio puro. Este fenômeno é justificado pelo fato do óxido de Tório possuir menor função de trabalho e consequentemente favorecer a emissividade de elétrons, que aumenta a capacidade de corrente de aproximadamente 20% (CAMPBELL & LACOURSIERE (1995) e RESCH & LEICHTFRIED (1995)). Portanto, eles concluíram que os eletrodos de Tungstênio dopados suportam maiores correntes de soldagem do que os eletrodos de Tungstênio puro, apesar de menor condutividade elétrica.

### **2.3.3 - Distribuição de Temperatura e Emissividade ao longo do Eletrodo**

USHIO et al. (1991) propuseram um método para medição da temperatura catódica em GTAW, através do qual é possível medir simultaneamente a distribuição de temperatura e a distribuição de emissividade ao longo do eixo dos eletrodos. Neste método, eles consideram o espectro de emissividade variável, ao contrário de outros métodos citados pelos mesmos autores, nos quais se considerava um espectro de emissividade constante, não levando em conta que mudanças morfológicas do cátodo e distribuição de óxidos pudessem ter grande influência na emissividade de um eletrodo. As distribuições de temperatura e emissividade para os eletrodos de W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, W-ThO<sub>2</sub> e W-CeO<sub>2</sub>, medidos por este método, podem ser vistas nas Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente.

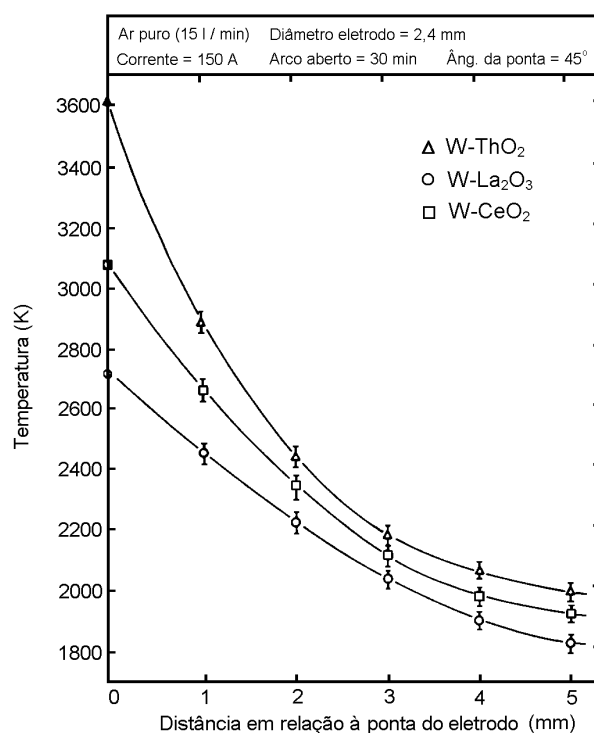


**Figura 2.1** - Distribuição da temperatura ao longo do eixo do eletrodo (USHIO et al., 1991)

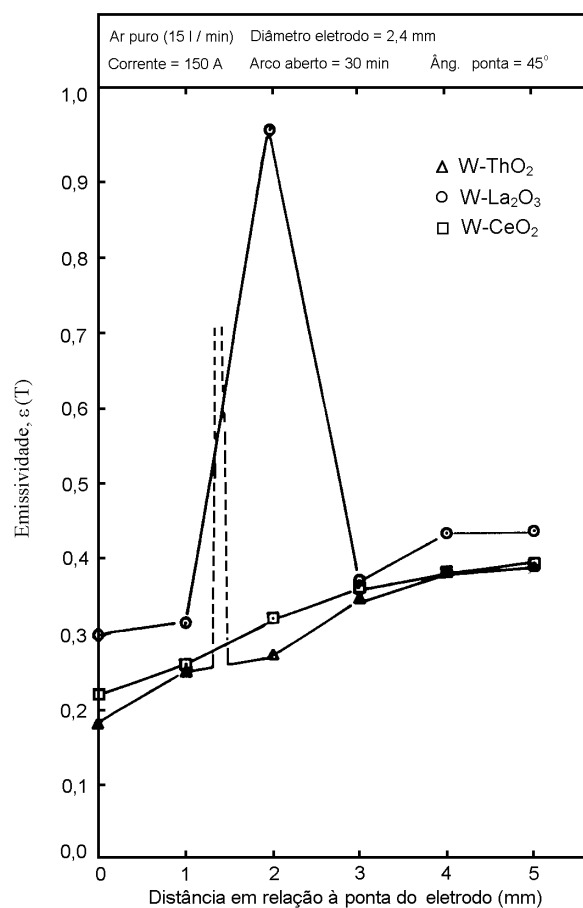


**Figura 2.2** - Distribuição emissividade ao longo do eixo do eletrodo (USHIO et al., 1991)

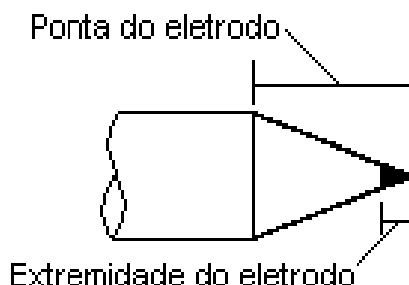


**Figura 2.3** - Ilustração de um eletrodo com suas respectivas terminologias

Para facilitar o entendimento da terminologia usada pelos autores citados para descrever diferentes regiões do eletrodo, tais como, ponta do eletrodo e extremidade do eletrodo, o autor desta dissertação padroniza uma terminologia, ilustrada pela Figura 2.3. Portanto, a partir de agora quando surgirem essas terminologias, elas estarão obedecendo esta figura.

Através da Figura 2.1, pode-se notar que o eletrodo  $W-La_2O_3$  apresentou os mais baixos valores de temperatura, seguido pelo  $W-CeO_2$  e  $W-ThO_2$ . Quanto à emissividade, observa-se picos de emissividade ao longo da ponta do eletrodo (Figura 2.2), principalmente no caso do eletrodo lantanado. No caso do eletrodo torinado, os autores usaram uma linha tracejada representando valores calculados, já que os picos não foram detectados devido a estreita zona de concentração de óxidos na superfície do eletrodo, concentração esta verificada por análise por EDX (Energia Dispersiva de raios X). Já o eletrodo  $W-CeO_2$  não apresentou picos, devido à distribuição uniforme do  $CeO_2$  ao longo da superfície do eletrodo. Assim, há uma grande evidência que a emissividade do eletrodo esteja diretamente ligado com a distribuição de óxidos ao longo da superfície da ponta do eletrodo. O eletrodo  $W-La_2O_3$ , por apresentar os maiores valores de emissividade, seguido pelo  $W-CeO_2$  e  $W-ThO_2$ , justifica a menor temperatura mostrada na Figura 2.1 (USHIO et al., 1991).

#### 2.3.4 - Comportamento dos Óxidos Metálicos durante Arco Aberto

Para verificar o comportamento dos óxidos dopantes no eletrodo de Tungstênio e suas mudanças metalúrgicas durante arco aberto, USHIO et al. (1992) utilizaram uma fonte do tipo corrente constante com polaridade direta e uma corrente de 200 A, e como proteção gasosa o

argônio puro. Durante a ação do arco eles verificaram que o óxido contido no interior do eletrodo muda sua morfologia devido sua fusão e move para zonas de maior temperatura, próximo à extremidade do eletrodo, como mostram as Figuras 2.4-2.6.

Na Figura 2.4 é apresentado a linha de análise por EDX do Lantânio, Tório e Cério após 30 e 60 minutos de arco aberto, para os eletrodos de  $W-La_2O_3$ ,  $W-ThO_2$  e  $W-CeO_2$ , respectivamente. O eletrodo  $W-Y_2O_3$  não está ilustrado devido a dificuldade em diferenciar a linha do Ítrio da linha do Tungstênio numa análise por EDX, pois há uma interferência entre os picos desses elementos (USHIO et al., 1991).

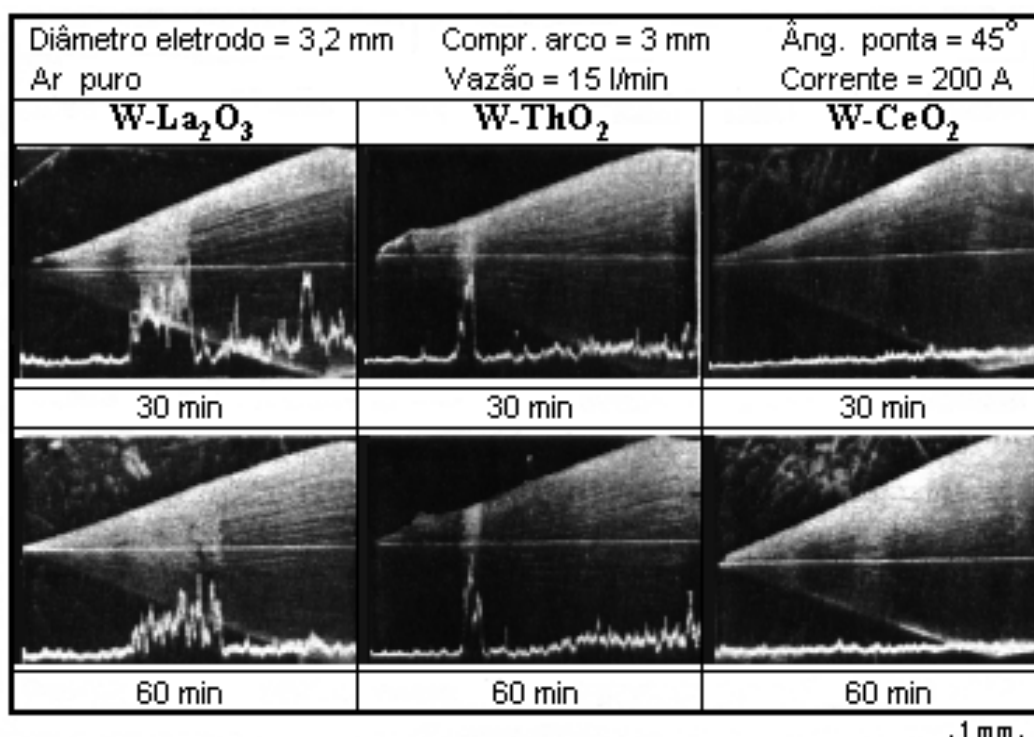


**Figura 2.4** - Aparência da superfície do eletrodo e linha de análise por EDX para La, Th e Ce, respectivamente (USHIO et al., 1992)

Fica claro que a distribuição dos óxidos ( $La_2O_3$  e  $ThO_2$ ) não é uniforme, havendo uma concentração em certos locais que são determinados pela distribuição de temperatura. Esta concentração próximo à extremidade do eletrodo se justifica pelo fenômeno de migração dos óxidos ou difusão do Tório para regiões de maiores temperatura. Entretanto, na extremidade do eletrodo, a temperatura se torna tão elevada que a taxa de vaporização supera a taxa de migração ou difusão (USHIO et al., 1991). Por outro lado, pode-se observar que o  $CeO_2$  tem uma distribuição uniforme por toda a ponta do eletrodo, sem picos de concentração, sugerindo que as taxas de migração e vaporização do  $CeO_2$  são muito maiores que a dos outros óxidos (USHIO et al., 1991).

Na Figura 2.5 é mostrado os resultados da análise de difração por raio X, feita após a soldagem com diferentes eletrodos. Nesta figura é evidenciado a presença de óxidos complexos, resultado das reações do Tungstênio com os óxidos metálicos de terra raras originalmente adicionados em cada eletrodo, ou seja, a formação dos tungstatos e/ou oxitungstatos. Já no caso do eletrodo torinado não foi detectado a presença de tungstato e oxitungstato (USHIO et al., 1992).

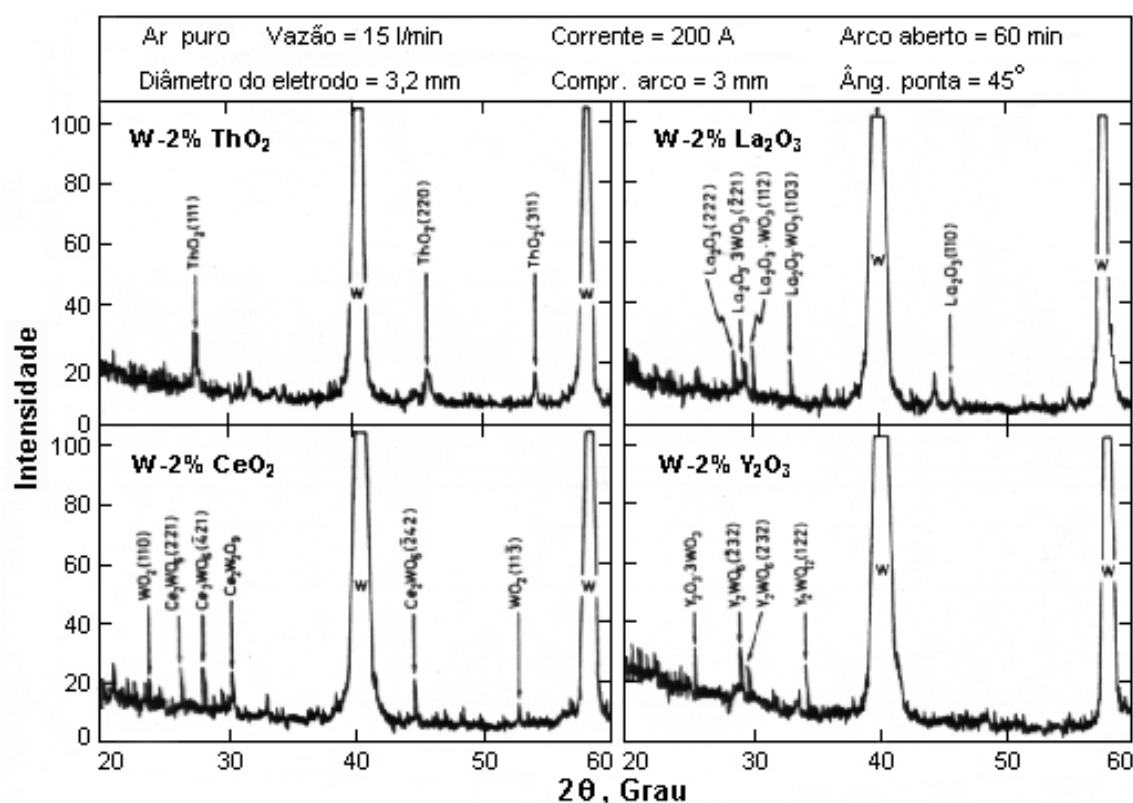


**Figura 2.5** - Análise de raio X das partículas internas do eletrodo (USHIO et al., 1992)

USHIO et al. (1992) apresentam na Tabela 2.4 propriedades físicas e termodinâmicas e suas observações experimentais para o comportamento dos principais óxidos usados em eletrodos para soldagem GTAW. Também usam uma ilustração esquemática (Figura 2.6) para sugerir o comportamento dos óxidos em relação à migração e vaporização, acompanhado pela distribuição de temperatura por toda a ponta do eletrodo depois de 30 minutos de arco aberto.

**Tabela 2.4** - Resumo do comportamento dos óxidos (USHIO et al., 1992)

| <b>Tipo de óxido</b>                        | <b>ThO<sub>2</sub></b>                                                                                         | <b>La<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>                                                                                                                                                 | <b>CeO<sub>2</sub></b>                                                                                                                                | <b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>                                      |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ponto de fusão (p.f.) [°C]</b>           | 3050<br>(Th: 1755)                                                                                             | 2217<br>(La: 920)                                                                                                                                                                  | 2600<br>(Ce: 798)                                                                                                                                     | 2435<br>(Y: 1526)                                                      |
| <b>Calor de decomposição [KJ]</b>           | 1227,6                                                                                                         | 1244,7                                                                                                                                                                             | (523,4)                                                                                                                                               | 1271,1                                                                 |
| <b>Tipo de óxido depois da sinterização</b> | ThO <sub>2</sub>                                                                                               | La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                                                                                                                     | Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(1690 °C)                                                                                                           | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                          |
| <b>Reação com Tungstênio</b>                | Ocorre redução do ThO <sub>2</sub> pelo W, formando Th puro                                                    | Formação de tungstato (p.f.: 1080 °C) e oxitungstato (p.f.: >1500 °C)                                                                                                              | Formação de tungstato (p.f.: 1090 °C).                                                                                                                | Formação de tungstato (p.f.: 1470 °C) e oxitungstato (p.f.: > 2200 °C) |
| <b>Comportamento dos óxidos</b>             | 1- Difusão de átomos de Th para superfície do eletrodo<br><br>2- Vaporização do Th pela superfície do eletrodo | 1- Migração do La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ocorre do centro para a ponta do eletrodo<br><br>2- Vaporização do La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ocorre pela superfície do eletrodo | 1- Taxa de migração por toda aresta do eletrodo é maior do que do centro para aresta<br><br>2- Vaporização do óxido de Ce pela superfície do eletrodo | Baixas taxas de migração e vaporização                                 |
| <b>Estabilidade dos óxidos</b>              | Baixa estabilidade                                                                                             | Alta estabilidade                                                                                                                                                                  | Razoável estabilidade na aresta do eletrodo mas baixa estabilidade                                                                                    | Alta estabilidade                                                      |

|  |  |  |                         |
|--|--|--|-------------------------|
|  |  |  | na ponta do<br>eletrodo |
|--|--|--|-------------------------|

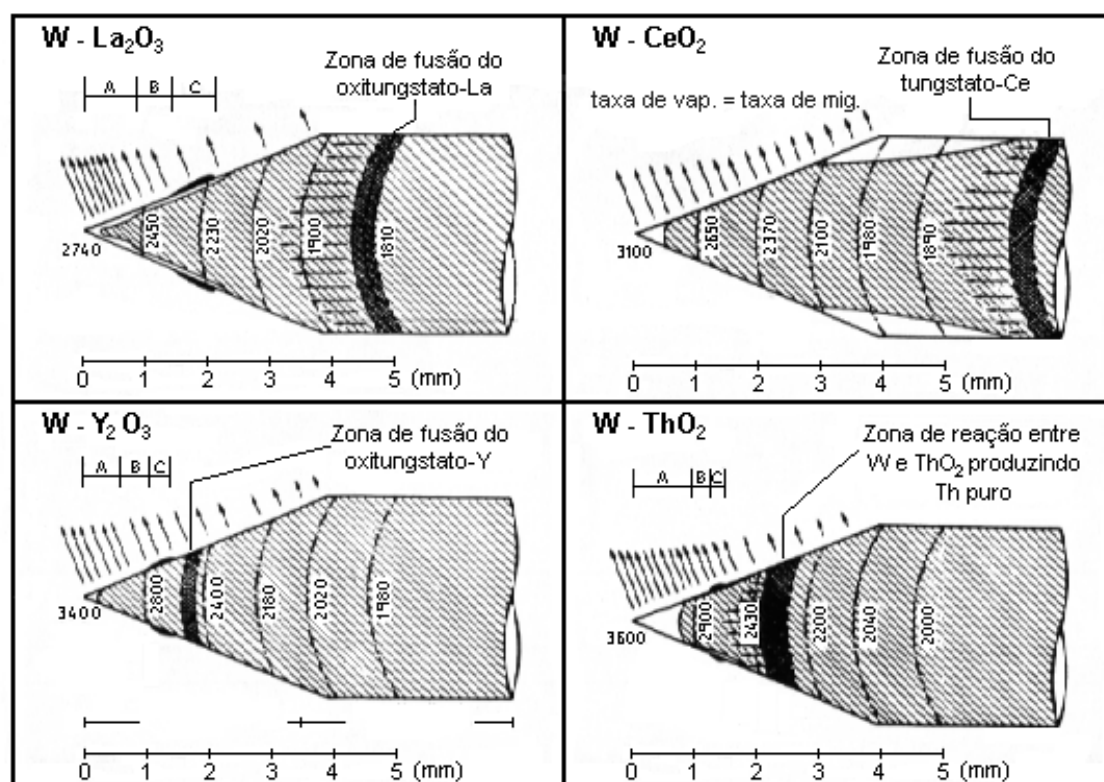


**Figura 2.6** - Ilustração esquemática da distribuição e comportamento do óxido acompanhado pela distribuição de temperatura ao longo do eixo do eletrodo. As áreas hachuradas representam o óxido restante depois da operação e as setas representam a vaporização (USHIO et al., 1992)

Estes autores (USHIO et al., 1992 e 1991) explicam a Figura 2.6 como a seguir. Entretanto, o autor desta dissertação chama atenção para certas incoerências quando se compara as explicações abaixo com os dados do mesmo autor apresentados na Tabela 2.4.

**a)** No caso dos óxidos metálicos de terra raras, seus tungstatos e oxitungstatos fundem-se e migram de zonas de menor temperatura para zonas de maior temperatura (os pontos de fusão desses tungstatos e oxitungstatos são mais baixos do que os dos óxidos originalmente adicionados ou do Tungstênio puro, facilitando assim a migração pelo eletrodo). Esta migração se dá ao longo dos contornos de grãos devido ação capilar (os grãos de Tungstênio geralmente possuem forma longitudinal). A taxa de migração aumenta consideravelmente com aumento do gradiente de temperatura e depende sobretudo do ponto de fusão dos tungstatos e oxitungstatos.

**b)** A mais alta taxa de migração entre os óxidos é a do  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ , cujo tungstato possui o mais baixo ponto de fusão, tanto o próprio óxido, como para o tungstato (esta afirmação do autor não é suportada totalmente pela Tabela 2.4 do próprio autor). Este migra facilmente e alimenta continuamente a ponta do eletrodo. Assim, a taxa de consumo deste óxido é muito maior.

**c)** A estabilidade do  $\text{La}_2\text{O}_3$  está relacionada ao seu ponto de fusão ser levemente alto, como também de seu oxitungstato. Também há uma razoável compensação entre a taxa de migração e vaporização. Porém, na Tabela 2.4 fica claro que o  $\text{La}_2\text{O}_3$  e seu oxitungstato não apresentam os pontos de fusão mais elevados.

**d)** Devido ao alto ponto de fusão do  $\text{Y}_2\text{O}_3$  e seus tungstatos e oxitungstatos, e a forma dos contornos de grãos (forma granular), a taxa de migração ao longo dos contornos de grãos é menor, levando-se muito mais tempo para se atingir a ponta ou superfície do eletrodo.

**e)** A formação de tungstatos e oxitungstatos não ocorre para os eletrodos dopados com Th, pois neste caso ocorre uma redução do  $\text{ThO}_2$  pelo W, formando Th puro. Devido ao alto ponto de fusão do  $\text{ThO}_2$  e o intervalo de temperatura em que ele é reduzido pelo Tungstênio (2000-2300 °C, MATSUDA et al., 1988), a taxa de alimentação e difusão são muito mais baixas que a taxa de vaporização. Assim, na ponta do eletrodo será eliminado o  $\text{ThO}_2$  e trabalhar-se-á como Tungstênio puro (esta última afirmação do autor também não é suportada pela Tabela 2.4 do próprio autor, pois, o que difunde e/ou vaporiza é o Tório e não seu óxido).

**f)** Outro fenômeno pode ser considerado para explicar o porque de uma área de alta concentração de óxidos na superfície do eletrodo. Devido a geometria da ponta, suas arestas cortam transversalmente os contornos de grãos longitudinais do Tungstênio e as partículas migram ao longo desses contornos, atingindo a superfície da ponta do eletrodo devido a ação capilar. Os óxidos evaporam nas áreas de mais altas temperaturas (zona A), mas permanecem e acumulam-se em outras áreas (zona C), onde a temperatura não é suficiente para evaporar o óxido (ou Tório) ou onde a taxa de vaporização é menor do que a taxa de migração ou difusão. Note que, no caso do eletrodo cerinado, devido as taxas de vaporização e migração serem praticamente iguais, não existe uma região de concentração de óxidos.

Das observações acima, foi deduzido que o balanço entre a vaporização do óxido ou do Tório na superfície e sua alimentação de dentro do eletrodo é muito importante para se atingir a estabilidade e longa vida de operação. Este balanço, ou seja, a distribuição dos óxidos ou do Tório e sua concentração numa determinada região, é governada pela distribuição de temperatura (USHIO et al., 1992).

Chama-se à atenção para o fato de que as explicações de Ushio et al. levaram em consideração o gradiente de temperatura e as temperaturas de fusão dos óxidos, como condições ativadoras da migração, no caso dos eletrodos de terra raras e difusão, no caso do eletrodo torinado. Entretanto, não há evidências deles terem considerado no modelo a temperatura em si (que varia de acordo com o tipo de eletrodo), tanto na ponta do eletrodo (aquecimento pela região catódica), como ao longo do eletrodo (aquecimento por efeito Joule e por condução da região catódica). Considerando ainda que não é demonstrado como foram obtidos os valores dos pontos de fusão dos tungstatos e oxitungstatos mostrado na Tabela 2.4.

### **2.3.5 - O Mecanismo de Emissividade**

Como já dito anteriormente, uma alta emissividade eletrônica está relacionada com uma baixa função de trabalho. Porém, a capacidade de emissão de elétrons não depende somente da função de trabalho, mas também da temperatura da ponta do eletrodo. Porém, é bom deixar claro que as temperaturas na ponta do eletrodo dependem, por sua vez, da função de trabalho (aquecimento catódico) e da resistência elétrica do eletrodo (efeito Joule). Desta forma, a emissividade é um mecanismo bastante complexo e interativo.

É com o propósito de diminuir a função de trabalho que os óxidos de Tório e terra raras são adicionados aos eletrodos de Tungstênio. Mas seus efeitos sobre a emissividade não é diretamente proporcional ao seus teores na mistura com o Tungstênio. Existem ainda alguns mecanismos físico-químicos que devem ser considerados, como descrito a seguir; o que torna o fenômeno mais complexo.

A emissão de elétrons nos eletrodos dopados é governada inicialmente por dois mecanismos: a taxa de vaporização de átomos depositados na superfície do eletrodo e a taxa de migração ou difusão na matriz de Tungstênio (PASCHEN, 1996). Se a taxa de migração ou difusão é maior ou igual à de vaporização, tem-se uma região de concentração de óxidos perto da extremidade do eletrodo. Nesta região, a função de trabalho torna-se menor do que a do Tungstênio puro, facilitando assim a emissão de elétrons (maior emissividade). Por outro lado, se a taxa de vaporização é superior à taxa de migração ou difusão, haverá uma rarefação de óxidos e a emissão pode ser reduzida ao nível da emissão do eletrodo de Tungstênio puro (maior função de trabalho) (PASCHEN, 1996).

Naturalmente, se a emissividade varia com a concentração ou rarefação de óxidos na região catódica da ponta do eletrodo, a função de trabalho destes óxidos assume sua

importância. A função de trabalho, por sua vez, é dependente de outro fator além da composição química, como mostra SADEK et al. (1990) através da Figura 2.7. Como visto na seção 2.3.1, a função de trabalho em função da corrente é calculada levando em conta a densidade de corrente à partir da área de emissão do eletrodo (região catódica), utilizando a equação de Richardson-Dushman. Desta forma, tem-se na Figura 2.7 a variação da função de trabalho em relação a composição química do eletrodo, como também em relação à corrente de soldagem.

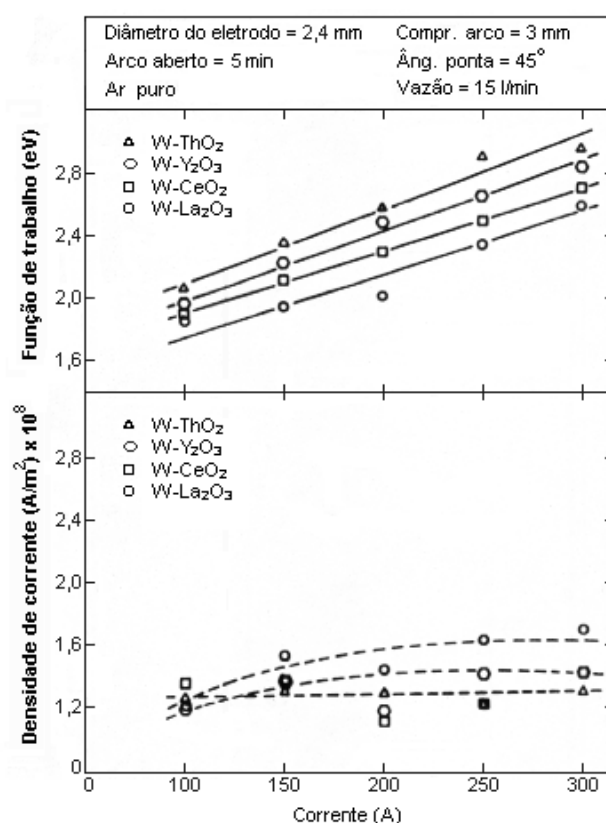


**Figura 2.7** - Função de trabalho e densidade de corrente em função da corrente para vários tipos de eletrodos (SADEK et al., 1990)

Quanto ao efeito da temperatura, pode-se verificar através da Figura 2.7 que, com aumento da corrente (consequentemente aumento da temperatura), a função de trabalho do eletrodo também aumenta (SADEK et al., 1990). O autor desta dissertação considerava o fenômeno inesperado e sugere uma explicação para o que foi citado acima da seguinte forma: este fenômeno pode estar relacionado com a migração e vaporização dos óxidos, pois, se aumenta a temperatura (aumento da corrente), a taxa de vaporização torna-se superior à taxa de migração, fazendo com que a função de trabalho tenda à função de trabalho do Tungstênio puro, ou seja, tenda a crescer. No entanto, apesar do pequeno intervalo de valores para a função de trabalho (1,6 - 2,8 eV, Figura 2.7), era de se esperar uma

convergência das curvas à medida que se aumenta a corrente, pois todas as curvas tenderiam para um mesmo valor, ou seja, o valor da função de trabalho do Tungstênio puro.

Quanto ao efeito da composição química, SADEK et al. (1990) mostraram que o eletrodo W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresenta a mais baixa função trabalho entre os eletrodos investigados, seguido pelo W-CeO<sub>2</sub>, W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e W-ThO<sub>2</sub>, respectivamente. Isto significa que o eletrodo W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> emite elétrons mais facilmente. Já o eletrodo W-ThO<sub>2</sub> possui a mais alta função de trabalho e, conseqüentemente, maior energia será necessária para emissão de elétrons neste tipo de eletrodo. Portanto, quanto maior a função de trabalho, maior deve ser a temperatura do eletrodo, para a mesma corrente.

RESCH & LEICHTFRIED (1995) apresentam na Tabela 2.5 intervalos de valores para a função de trabalho do Tungstênio e vários óxidos. Pode-se verificar que estes intervalos estão próximos aos resultados com eletrodos obtidos por SADEK et al. (1990) (Figura 2.7), quando se variou a amperagem.

**Tabela 2.5** - Função de trabalho do Tungstênio e vários óxidos (RESCH & LEICHTFRIED, 1995)

| Material                                          | Função de Trabalho [eV] |
|---------------------------------------------------|-------------------------|
| Tungstênio, W                                     | 4,25 - 5,01             |
| Óxido de Tório, ThO <sub>2</sub>                  | 2,0 - 3,0               |
| Óxido de Cério, CeO <sub>2</sub>                  | 1,8 - 2,6               |
| Óxido de Lantânio, La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,7 - 4,2               |
| Óxido de Ítrio, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1,9 - 3,8               |

Estes intervalos de função de trabalho deixa claro a existência de uma complexa relação com fatores circunstanciais, como a temperatura e tempo de arco aberto. Afim de observar melhor o efeito temporal, USHIO et al. (1991) realizaram testes com eletrodos de W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e W-ThO<sub>2</sub> mantendo uma corrente constante e calculando a função de trabalho para vários intervalos de tempo de arco aberto. Os resultados são mostrados na Figura 2.8.

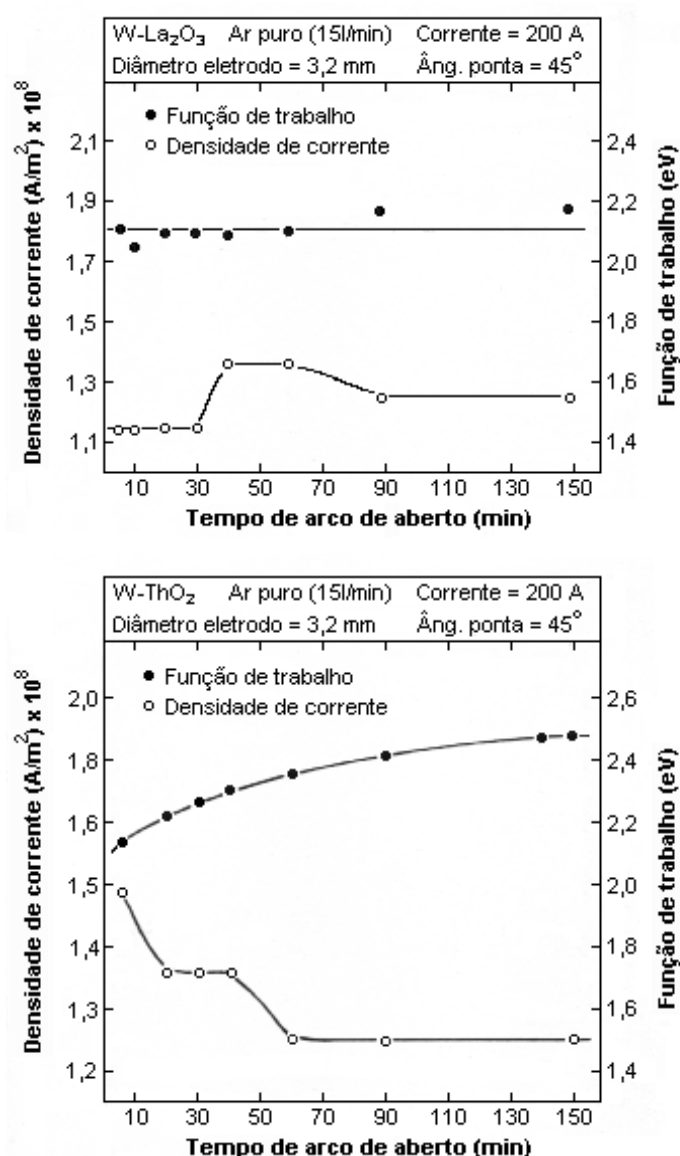


**Figura 2.8** - Variação da função de trabalho e densidade de corrente em função do tempo de arco aberto (USHIO et al., 1991)

No caso do eletrodo de W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, é evidente que a mudança nos valores da função de trabalho é pequena e seu valor pode ser considerado como constante ( $\cong 2.1$  eV), mas que a densidade de corrente muda com o tempo. Isto pode ser entendido através da Figura 2.9, que mostra as mudanças na área de emissão de elétrons (densidade de corrente) e temperatura da ponta do eletrodo (Ushio et al. não especificam o ponto onde foi medido a temperatura) em função do tempo de arco aberto e também uma ilustração esquemática da distribuição do óxido na ponta do eletrodo.

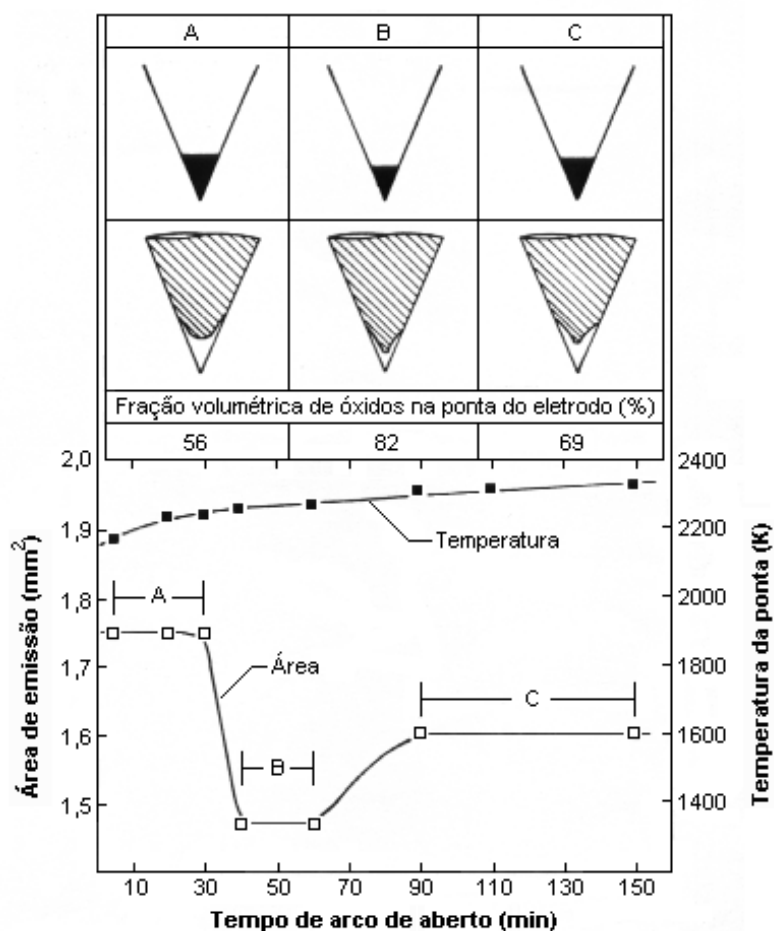


**Figura 2.9** - Efeito do tempo de arco aberto na temperatura da ponta do eletrodo e na área de emissão de elétrons em relação a fração volumétrica de óxido na ponta do eletrodo (USHIO et al., 1991)

Essas mudanças temporais segundo os autores (USHIO et al., 1991) acontecem em 4 etapas:

1<sup>a</sup>) Durante a fase inicial, a quantidade de  $\text{La}_2\text{O}_3$  diminui devido ao fenômeno de abertura do arco (o autor não deixa claro o significado dessa afirmação). Isto leva a um aumento da área emissão que consequentemente diminui a densidade de corrente.

2<sup>a</sup>) Depois o  $\text{La}_2\text{O}_3$  reage com Tungstênio formando os tungstatos e oxiungstatos de Lantânio que possuem menores pontos de fusão. Esses novos compostos migram para a ponta do eletrodo elevando a quantidade de  $\text{La}_2\text{O}_3$  na mesma que consequentemente diminui a área de emissão e aumenta a densidade de corrente.

3<sup>a</sup>) Depois de longo tempo, a vaporização do  $\text{La}_2\text{O}_3$  na ponta do eletrodo aumenta, levando a uma diminuição da quantidade de óxido, que, conseqüentemente, aumenta a área de emissão e diminui a densidade de corrente.

4<sup>a</sup>) A temperatura da ponta do eletrodo aumenta suavemente com o aumento do tempo de arco aberto, resultando numa pequena mudança no valor da função de trabalho calculado.

Com isso, pode-se concluir que a densidade de corrente é uma função da taxa de migração e vaporização dos óxidos metálicos de terra raras, enquanto a função de trabalho é função da temperatura do eletrodo e da quantidade de óxidos metálicos de terra raras na superfície do eletrodo.

Já no caso do eletrodo W- $\text{ThO}_2$  (ainda pela Figura 2.8), a função de trabalho aumenta com o tempo de arco aberto. Isto pode ser uma indicação das baixas taxas de migração do  $\text{ThO}_2$  para a ponta do eletrodo, fazendo com que a mesma opere como Tungstênio puro (USHIO et al., 1991). O autor desta dissertação discorda em parte por considerar que o óxido de tório não migra, pois este óxido, de acordo com os próprios Ushio et al., reage com tungstênio, formando tório. A função de trabalho aumenta provavelmente pela baixa taxa de difusão do Th.

## 2.4 - Desgaste do Eletrodo de Tungstênio

Já foi citado anteriormente que o balanço entre a taxa vaporização de óxido na superfície do eletrodo e a taxa de migração ou difusão possuem um papel fundamental para se atingir a estabilidade e longa vida de operação de um eletrodo ligado.

A extremidade de um eletrodo de tungstênio é a região responsável pelo desgaste e apresenta as temperaturas mais elevadas. Em altas temperaturas, tem-se que a taxa de vaporização dos óxidos (terra raras) e do elemento Tório é maior do que a taxa de migração dos óxidos ou difusão do Tório. Este fato faz com que a extremidade do eletrodo se aproxime do Tungstênio puro (maior função de trabalho)(USHIO et al., 1991).

No caso do eletrodo de Tungstênio torinado a situação é ainda mais crítica, pois como a taxa de difusão do Tório é bem inferior à taxa de migração dos tungstatos e/ou oxiungstatos de elementos de terra raras, há uma maior tendência da extremidade desse tipo de eletrodo em se aproximar do Tungstênio puro do que a extremidades dos eletrodos de terra raras (as extremidades destes eletrodos não são totalmente reduzidas a Tungstênio puro).

SADEK et al. (1990) investigaram vários tipos de eletrodos em relação a forma da ponta e microestrutura. Entre eles, o eletrodo W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresentou maior estabilidade do apontamento e mostrou maior resistência à contaminação e erosão. Já o eletrodo de W-puro e W-MgO foram pobres neste aspecto, enquanto W-ThO<sub>2</sub> e W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostraram resultados intermediários (Veja mais detalhes no item 2.7.1).

O *Institut de Soudure* (Paris) e o *Institut für Schweißtechnische FerGTAWungsverfahren* e *Schweißtechnische Zentralanstalt* (Viena), também obtiveram alguns resultados similares, citando que em todos casos a vida de operação dos eletrodos cerinados e lantanados foi superior aos dos eletrodos torinados (RESCH & LEICHTFRIED, 1995).

USHIO et al. (1992) mostraram que os eletrodos também podem perder massa pela simples presença de uma pequena quantidade de oxigênio no gás de proteção (veja detalhes no item 2.6.1). Neste estudo mostra-se que o eletrodo de Tungstênio puro apresenta a maior perda de massa e que a presença de nitrogênio e hidrogênio tem pouca influência no fenômeno.

Resumindo, tem-se que o desgaste dos eletrodos puros e torinados é maior do que os eletrodos ligados com terra raras. No caso do eletrodo torinado sua ponta se aproxima do Tungstênio puro (baixa taxa de difusão do Tório), levando a um maior aquecimento e consequentemente maior desgaste do eletrodo. No caso dos eletrodos ligados com terra raras, o desgaste vai depender da relação entre taxa de migração e taxa de vaporização dos óxidos, que por sua vez dependem da corrente. Mas de uma forma geral, o desgaste é menor pois sempre haverá uma certa alimentação de óxidos na ponta do eletrodo, que leva a uma menor função de trabalho, consequentemente menor temperatura e menos vaporização do Tungstênio.

## 2.5 - Formas de Caracterizar o Efeito de Elementos Dopantes Sobre o Desempenho dos Eletrodos

### 2.5.1 - Características de Abertura do Arco

SADEK et al. (1990) mostram uma melhor performance (abertura do arco) dos eletrodos dopados com  $\text{La}_2\text{O}_3$  e  $\text{Y}_2\text{O}_3$  em relação aos eletrodos torinados. Nesses testes foram avaliados o número de aberturas do arco bem sucedidas usando alta frequência (AF) e tensão em vazio (OCV - *Open Circuit Voltage*) com intervalo de 18 a 36V. O intervalo de corrente selecionado foi de 20-30 A (em CC-), com ângulo de ponta de  $45^\circ$  e o número total de tentativas foi de 30 para cada tensão em vazio. Os resultados estão resumidos na Figura 2.10, onde pode-se inicialmente observar a sensível superioridade dos eletrodos dopados sobre o eletrodo de Tungstênio puro. Também pode-se notar que a 36 V OCV, as performances do  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  e  $\text{CeO}_2$  são similares, enquanto que a 24 V OCV, o óxido de Lantânio apresentou os melhores resultados.

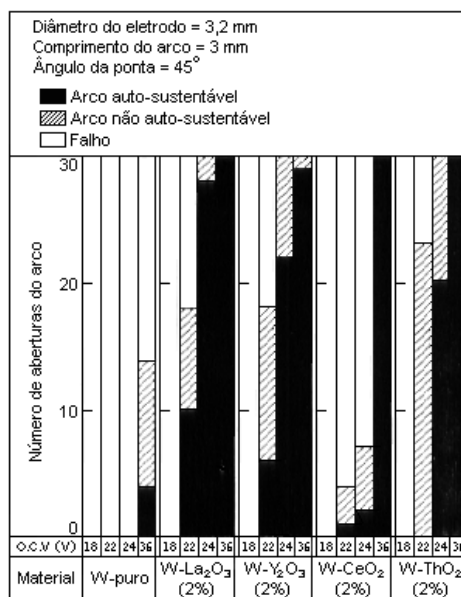


**Figura 2.10** - Performance do eletrodo (abertura do arco em relação OCV) para vários GTAW eletrodos com adição de terra raras (SADEK et al., 1990)

Já o *Institut de Soudure* (Paris), *Institut für Schweißtechnische FerGTAWungsverfahren* e *Schweißtechnische Zentralanstalt* (Viena) (RESCH & LEICHTFRIED, 1995), citam que os eletrodos livre de Tório e os torinados podem ser

considerados equivalentes em relação ao comportamento de ignição, em contraste com os resultados de SADEK et al. (1990).

### 2.5.2 - Característica Estática do Arco

A comparação entre características estáticas de arcos pode ser uma forma de demonstrar a maior ou menor facilidade com que um arco se ioniza. Este aspecto foi estudado por SADEK et al. (1990), como mostra a Figura 2.11, para o processo GTAW, em CC-, com eletrodos de Tungstênio puro e dopados.

Pode-se verificar que os eletrodos dopados conseguem manter o arco com uma menor tensão comparado ao eletrodo de Tungstênio puro. Porém, à medida que se aumenta a corrente há uma convergência das curvas. Neste ponto pode-se relembrar o que foi apontado pelo autor desta dissertação no item 2.3.5, sobre o fato do fenômeno da migração e vaporização dos óxidos ser o responsável pelo aumento da função de trabalho com o aumento da corrente, mas que não havia a convergência das curvas para altas correntes. Já para as curvas de característica estática do arco, pode-se notar claramente uma certa convergência, reforçando assim a idéia de que com aumento da corrente os eletrodo tendem a se aproximar das propriedades do Tungstênio puro.

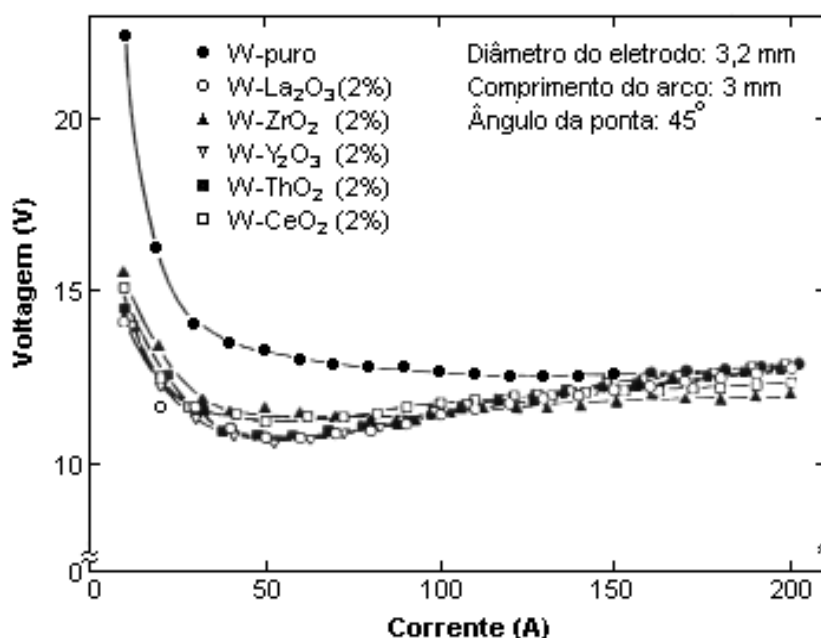


**Figura 2.11** - Característica estática do arco para vários eletrodos de Tungstênio (SADEK et al., 1990)

### 2.5.3 - Pressão do Arco

A pressão do arco origina-se de um fluxo de plasma induzido devido à expansão da seção do arco à partir da ponta do cátodo (eletrodo). A deformação devido a fusão da ponta do eletrodo deve mudar a distribuição de corrente próximo ao cátodo, consequentemente levando à uma mudança da pressão do arco. Assim, os eletrodos W-CeO<sub>2</sub>, W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, por apresentarem menor deformação da ponta, levam à mais altas pressões de arco como mostra a Figura 2.12 (SADEK et al., 1990).

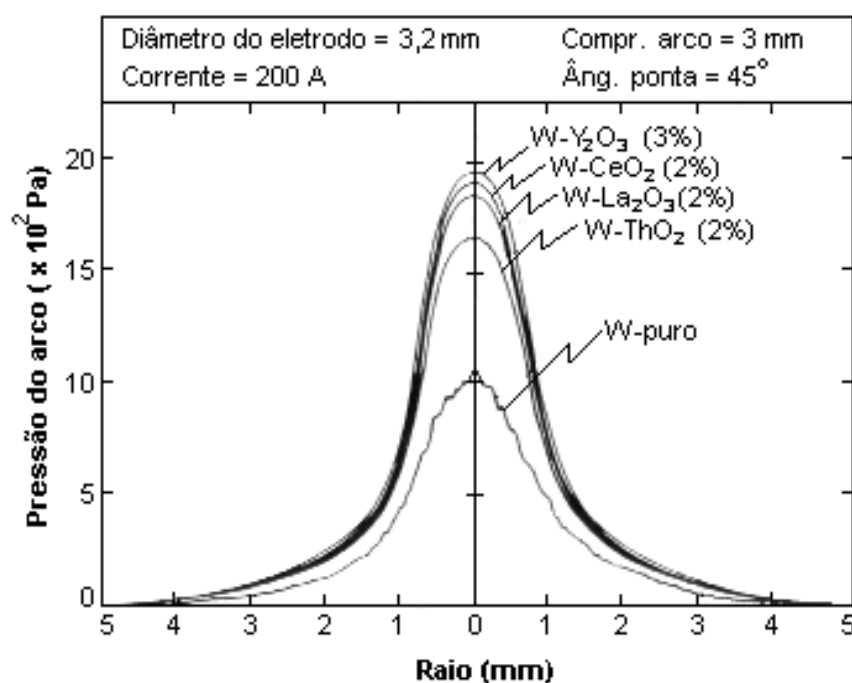


**Figura 2.12** - Distribuição da pressão do arco, medida no ânodo utilizando CC- (SADEK et al., 1990)

## 2.6 - Influência da Impureza do Gás de Proteção no Comportamento dos Eletrodos

### 2.6.1 - Consumo do Eletrodo

USHIO et al. (1992), mostraram a influência na perda de massa pela introdução de uma pequena quantidade de oxigênio no gás de proteção. O eletrodo de Tungstênio puro é que apresentou maior desgaste. O uso do nitrogênio e hidrogênio tiveram pouca influência na perda de massa. Isto pode ser melhor visualizado na Figura 2.13.

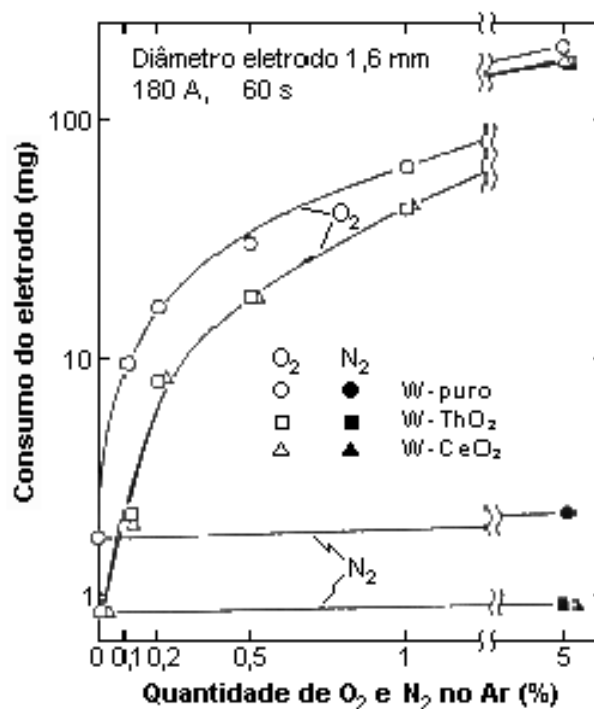


**Figura 2.13** - Efeito do Oxigênio e Nitrogênio introduzido no Argônio na perda de massa nos eletrodos de Tungstênio (USHIO et al., 1992)

SADEK et al. (1990), também demonstraram (Figura 2.14) o efeito da adição do oxigênio no argônio sobre o consumo do eletrodo W-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, porém introduzindo as variáveis tempo de arco aberto e intensidade de corrente.

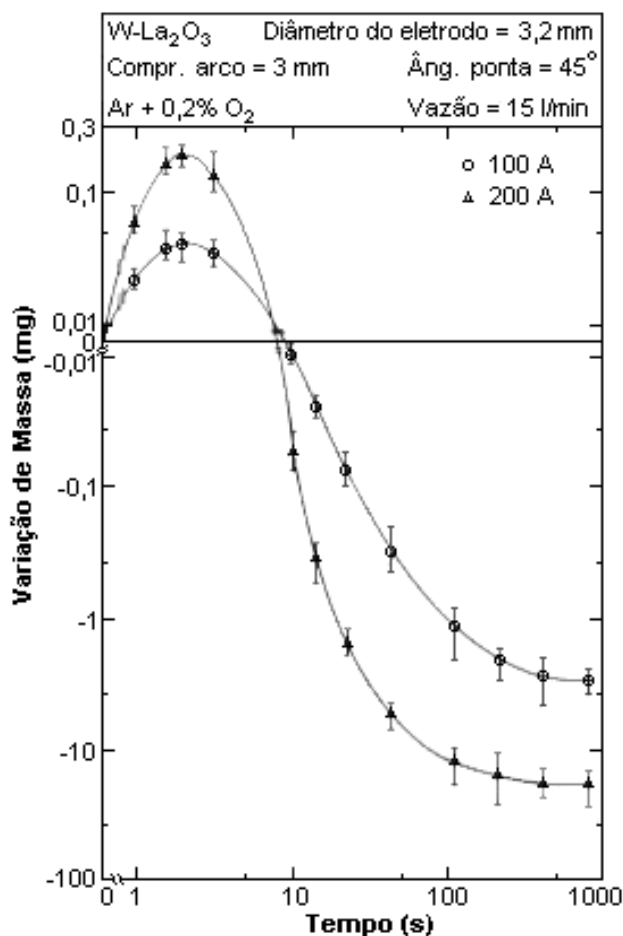


**Figura 2.14** - Variação do peso devido ao arco aberto numa atmosfera de Ar + 0,2% O<sub>2</sub> a uma corrente de 100 e 200 A para eletrodo W- La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (SADEK et al., 1990)

Então SADEK et al. (1990) chegaram as seguintes conclusões:

1<sup>a</sup>) Durante um determinado período de arco aberto, há um aumento do peso, devido a formação de óxido de Tungstênio na superfície do eletrodo.

2<sup>a</sup>) Depois que a taxa molar de vaporização do óxido de Tungstênio excede à taxa molar de consumo do metal (formação do óxido), tem-se uma perda de peso.

3<sup>a</sup>) Depois de um longo período, o óxido de Tungstênio concentra e precipita na superfície do eletrodo e a taxa líquida de perda de metal diminui.

A presença de oxigênio no gás de proteção promove a formação de uma auréola (detalhes no item 2.6.2), acompanhado pelo estreitamento de área na direção transversal logo atrás desta auréola. O tamanho da auréola e, conseqüentemente, o estreitamento da área logo atrás dela, é uma função da quantidade de oxigênio no gás de proteção, do tempo de arco aberto e a da intensidade de corrente aplicada (SADEK et al., 1990).

### 2.6.2 - Mecanismo de Formação da Auréola

A auréola é formada pela deposição do Tungstênio puro na superfície do eletrodo, onde a situação é adequada para crescimento do cristal, com formação tipicamente dendrítica (SADEK et al., 1990). A Figura 2.15 mostra uma ilustração esquemática da vaporização e o movimento do óxido de Tungstênio volátil ao longo da superfície do eletrodo.

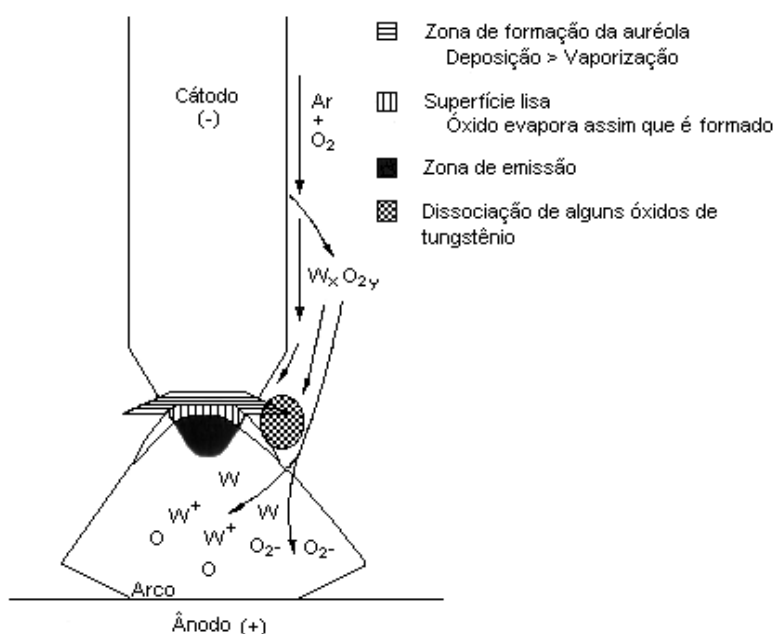


**Figura 2.15** - Ilustração esquemática do mecanismo de formação da auréola (SADEK et al., 1990)

Devido a mudança na taxa de vaporização ao longo da superfície do eletrodo, há regiões com maior e outras com menores taxas de vaporização. Assim, os óxidos sob o efeito do fluxo de gás, movem ao longo do eletrodo e concentram em uma determinada região. Essa região é favorável ao crescimento de grãos, onde a taxa de vaporização atinge valor mínimo e também onde a taxa de deposição excede a taxa de vaporização (SADEK et al., 1990).

A formação dessa auréola é prejudicial para o processo, pois ela provoca uma instabilidade do arco e conseqüentemente grandes flutuações na tensão e pressão do arco como mostra a Figura 2.16 (USHIO et al., 1992).

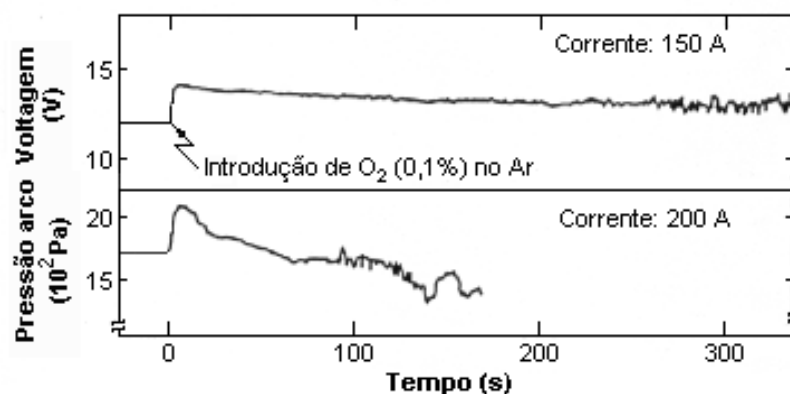


**Figura 2.16** - Instabilidade do arco devido a formação da auréola e de sua forma (USHIO et al., 1992)

## 2.7 - Outros Efeitos dos Elementos Dopantes

### 2.7.1 - Efeito sobre a Microestrutura da Ponta do Eletrodo

Quanto à microestrutura da ponta do eletrodo (Figura 2.17), depois de uma hora de arco aberto, corrente de 180 A e proteção com Argônio puro, o eletrodo de Tungstênio puro tende a recrystalizar e formar grandes grãos, enquanto, alguns eletrodos ativados, com  $\text{ThO}_2$  e  $\text{ZrO}_2$  tendem a perder óxidos e iniciar a formação de grandes cristais de Tungstênio na ponta do eletrodo (caso do  $\text{W-ThO}_2$ ) ou sofrer severa fusão da ponta (caso do eletrodo  $\text{W-ZrO}_2$ ) (SADEK et al., 1990). Contudo, os eletrodos ativados com  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$  e  $\text{Y}_2\text{O}_3$  mostraram as microestruturas mais estáveis.

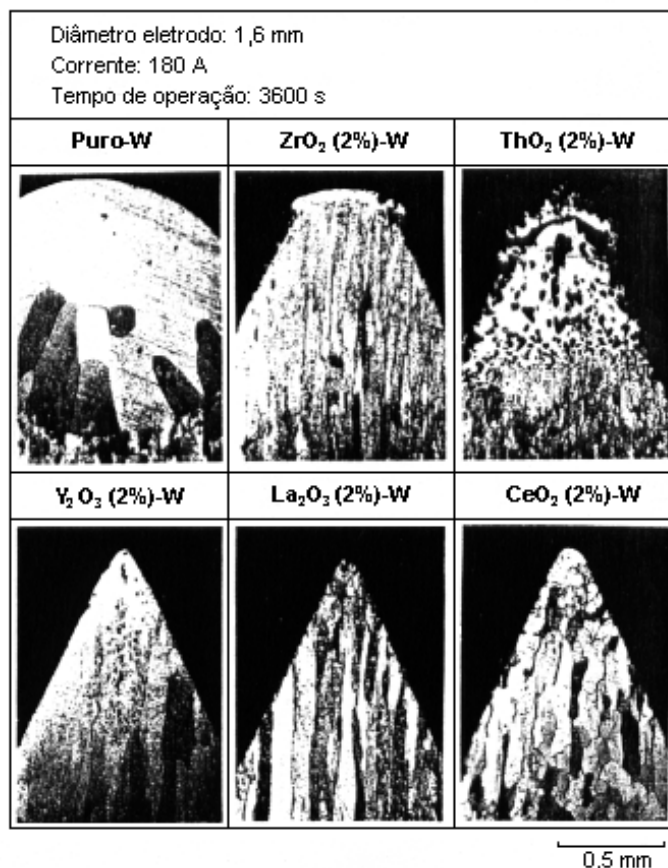


**Figura 2.17** - Microestrutura da seção transversal do eletrodo depois uma pesada operação (SADEK et al., 1990)

SADEK et al. (1990) acreditam que mudanças metalúrgicas afetam o comportamento quanto à erosão do eletrodo, conseqüentemente mudando as características de operação e a distribuição de temperatura. Por exemplo, a perda de óxidos leva à uma diminuição da emissividade de elétrons e a um aumento da temperatura, devido a ponta do eletrodo passar a operar como Tungstênio puro. PASCHEN (1996) cita somente que o tamanho do grão tem influência na taxa de difusão (que de acordo com SADEK et al. (1990) o termo difusão é usado para eletrodo torinado e o termo migração para os eletrodos de terra raras). Porém, nada é comentado pelos autores sobre o efeito real da microestrutura, outro assunto de interesse para se pesquisar mais profundamente.

### 2.7.2 - Efeito sobre a Susceptibilidade à Trinca a Quente

Além da durabilidade dos eletrodos, outros aspectos indiretos podem ser usados para avaliar a substituição de eletrodos torinados por de terra raras. SADEK (1995) mostrou a influência dos eletrodos de Tungstênio ( $\text{ThO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  e  $\text{CeO}_2$ ) na susceptibilidade à trinca a quente de uma liga de Alumínio 800 em forma de tubo (900 mm de diâmetro e 3 mm de espessura), sob diferentes correntes de soldagem e níveis de deformação. Os eletrodos ativados com  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  e  $\text{CeO}_2$  tiveram o menor número de trincas, menor comprimento total das trincas e o menor comprimento entre as maiores trincas, comparado com eletrodo W- $\text{ThO}_2$ , sob diferentes níveis de deformação. E entre os vários tipos de eletrodos, o de melhor desempenho foi o eletrodo W- $\text{La}_2\text{O}_3$ .

## Capítulo III

### Procedimento Experimental

#### 3.1 - Introdução

Este capítulo tem como objetivo descrever todos equipamentos que fizeram parte da bancada experimental com suas respectivas disposições, os materiais e consumíveis empregados nos ensaios e os procedimentos experimentais utilizados. Para alcançar o objetivo deste trabalho, inicialmente determinou-se o tipo de planejamento experimental a ser utilizado, para que em seguida estabelecesse as variáveis do processo a serem analisadas com relação ao estudo do desgaste e do comportamento dos eletrodos usados no processo GTAW, baseando-se em literaturas da área.

#### 3.2 - Equipamentos e Montagem Experimental

Para realização dos testes, os equipamentos foram montados como ilustrado na Figura 3.1 e maiores detalhes sobre cada equipamento utilizado neste trabalho será descrito a seguir.

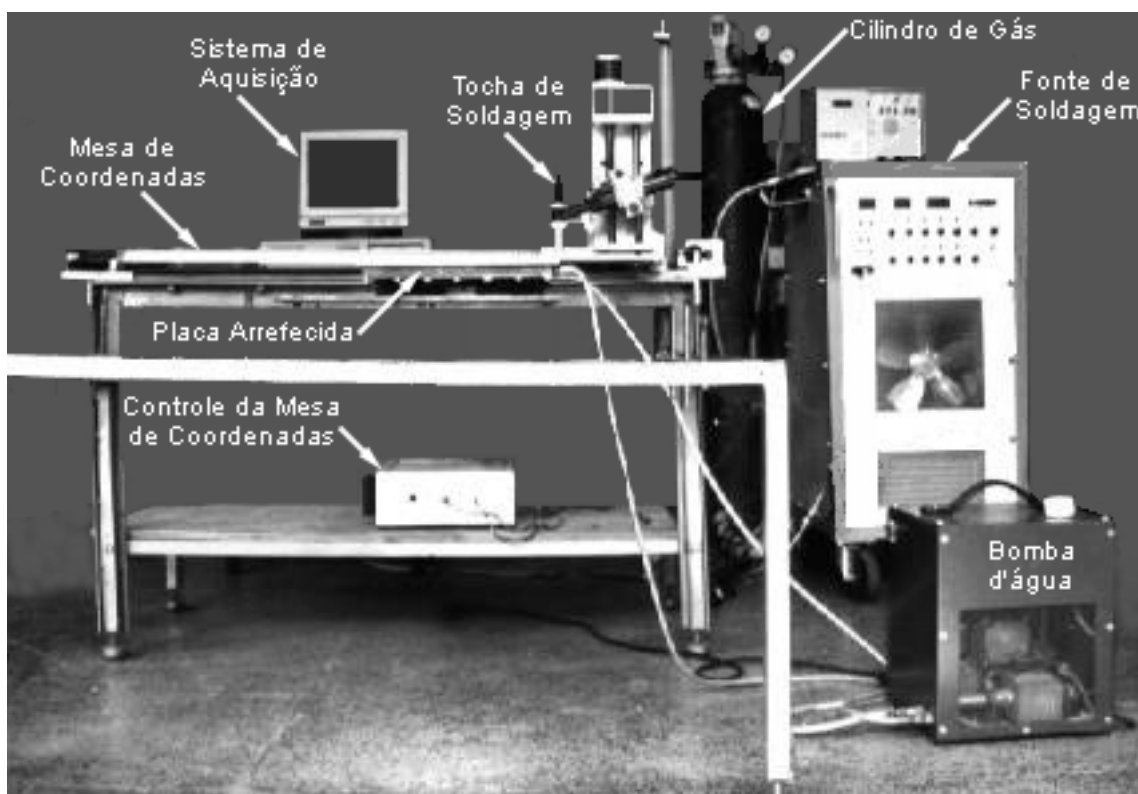
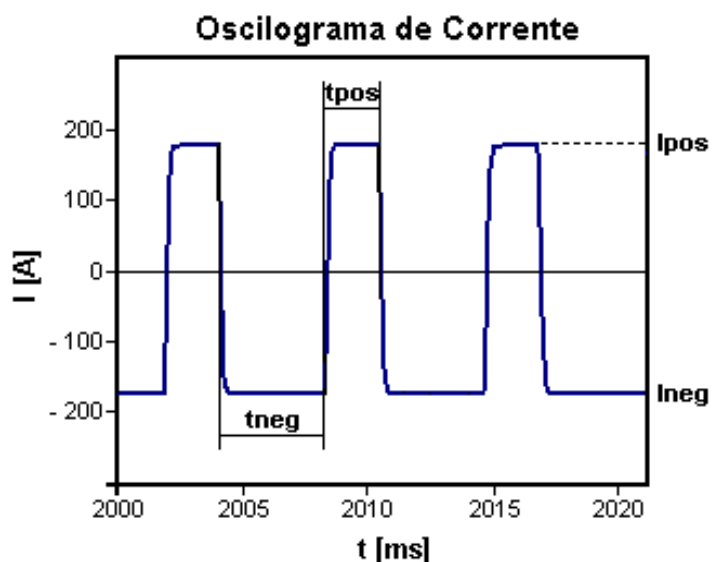


**Figura 3.1** - Ilustração da montagem experimental**3.2.1 - Sistema de Aquisição e Tratamento de Sinais**

Para monitorar os sinais elétricos (corrente, tensão e tempo de duração em cada polaridade) do arco de soldagem, foi utilizado um sistema constituído de um micro computador, uma placa de conversão A/D e um programa (UBMIG) para aquisição e tratamento dos sinais.

O programa UBMIG permite apresentar os oscilogramas dos sinais elétricos na forma de gráficos, assim como selecionar trechos ampliados. A Figura 3.2 ilustra como são medidos os valores de  $I_{pos}$ ,  $I_{neg}$ ,  $t_{pos}$  e  $t_{neg}$  a partir de um trecho de um oscilograma de corrente real. Estes parâmetros são medidos manualmente, fazendo-se um cursor mover sobre trechos de interesse dos oscilogramas (o programa fornece o valor da variável de interesse e do tempo para cada posição do cursor). Este programa, entretanto, não permite a medida direta (via cursor) dos parâmetros dos ciclos de tensão. É necessário que se converta, através de um programa específico, os arquivos de dados com extensão DAD para um arquivo em ASCII (com extensão TXT), para ser lido no aplicativo *Microsoft Excel*, possibilitando determinar os valores médios da tensão positiva ( $V_{pos}$ ) e da tensão negativa ( $V_{neg}$ ).

**Figura 3.2** - Esquema de medição dos parâmetros de soldagem a partir de um oscilograma real

Durante todos os ensaios os sinais elétricos foram monitorados usando-se 2 canais, 8 bits, a uma taxa de 10 kHz durante 6 s (6000 ms). Foram efetuadas nove aquisições para cada um dos nove experimentos a ser descrito no planejamento experimental, item 3.4. Para cada uma das aquisições eram efetuadas três medidas de  $I_{pos}$ ,  $I_{neg}$ ,  $t_{pos}$  e  $t_{neg}$  nos intervalos de

1000-1050, 3000-3050 e 5000-5050 ms, de um total de 6000 ms de aquisição. Já no caso da  $V_{pos}$  e  $V_{neg}$ , converteu-se os dados no intervalo de 2900-3100 ms e daí tirou-se três valores de  $V_{pos}$  e três de  $V_{neg}$ , sendo cada um destes valores resultado de uma média dos valores do patamar na polaridade positiva e negativa da onda retangular.

### 3.2.2 - Fonte de Soldagem

Para realização dos testes foi utilizada uma fonte de soldagem multiprocesso (INVERSAL 300). A especificação INVERSAL tenta especificar uma fonte com chaveamento no secundário, inversão, com o caráter universal multiprocesso, enquanto 300 está relacionado com a corrente nominal máxima que a máquina pode operar com fator de trabalho igual a 1 (100% carga). Para a soldagem GTAW com CA de onda retangular, esta fonte permite ajustar independentemente tanto os níveis de corrente na polaridade positiva, como os na negativa e também seus respectivos tempos de permanência, independentemente, facilitando o estudo separado de cada variável.

Durante alguns ajustes preliminares, suspeitou-se que os valores de  $t_{pos}$  e  $t_{neg}$  obtidos não correspondiam aos valores ajustados na fonte. Por isto decidiu-se fazer uma calibração da fonte de soldagem referente aos parâmetros de tempo. As Figuras 3.3 e 3.4 apresentam as curvas de calibração com suas respectivas equações (obtidas através de regressão linear) para o  $t_{pos}$  e  $t_{neg}$ , respectivamente. Os parâmetros constantes utilizados para realização desta calibração foram os seguintes:  $I_{pos} = I_{neg} = 180$  A, vazão do Ar = 12 l/min, velocidade de soldagem = 35 cm/min, comprimento do arco = 3 mm, eletrodo torinado (2%) e aquisição a 8 bit e 10 kHz durante 5 s.

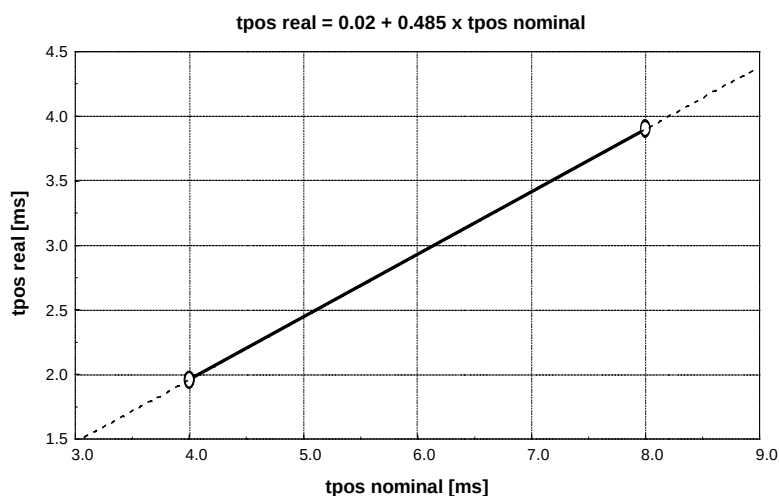


**Figura 3.3** - Curva de calibração do tpos com sua respectiva equação, onde o tpos nominal se refere ao valor de ajuste na fonte e o tpos real ao valor obtido pelo sistema de aquisição de dados

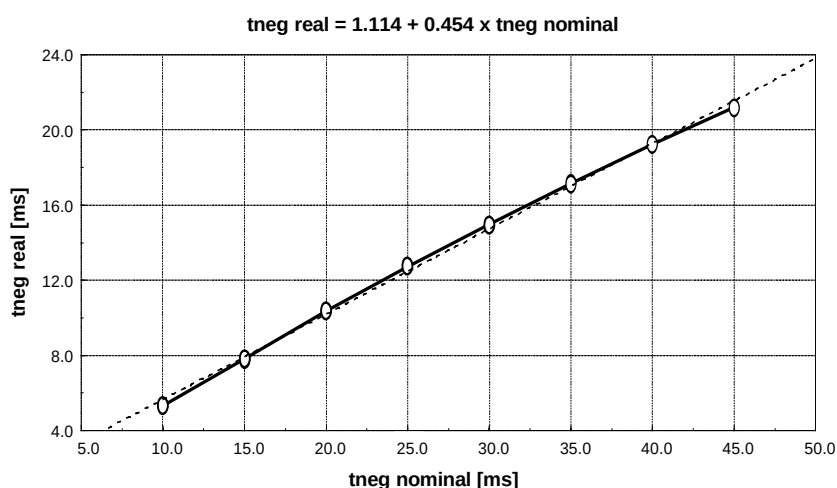


**Figura 3.4** - Curva de calibração do tneg com sua respectiva equação, onde o tneg nominal se refere ao valor de ajuste na fonte e o tneg real ao valor obtido pelo sistema de aquisição de dados

Verificou-se uma relação de aproximadamente 50% entre o valor real e o nominal. Desta forma, todos os parâmetros de tempo ajustados na fonte como a ser descrito no item 3.4, foram na verdade definidos assumindo um fator de correção correspondente as equações das Figuras 3.3 e 3.4, de tal forma que o sinal de saída fosse o planejado. Por exemplo, se o planejado fosse  $\text{tpos} = 2,00 \text{ ms}$ , ajustava-se na fonte  $\text{tpos} = 4,08 \text{ ms}$ .

Entretanto, com intuito de encontrar a causa da variação entre o valor de ajuste e o valor real, RICHETTI (1998) realizou um trabalho onde, através de um sinal de entrada

conhecido (gerador de função diretamente acoplado aos canais de entrada da placa de aquisição) e variando-se a frequência de aquisição, encontrou-se os resultados mostrados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Amplitude e tempos do sinal para 2 canais/8 bit através do programa UBMIG

| Frequência de aquisição [kHz] | tpos ou tneg conhecido [ms] | tpos ou tneg medido no oscilograma [ms] |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| 1                             | 5,00                        | 4,64                                    |
| 3                             | 5,00                        | 4,54                                    |
| 5                             | 5,00                        | 4,91                                    |
| 7                             | 5,00                        | 4,93                                    |
| 8                             | 5,00                        | 4,84                                    |
| 9                             | 5,00                        | 2,47                                    |
| 10                            | 5,00                        | 2,48                                    |
| 11,69                         | 5,00                        | 5,05                                    |

Através da Tabela 3.1, pode-se verificar que para determinadas frequências tem-se uma variação do sinal de saída em relação ao sinal de entrada de aproximadamente 50%. Com isso, chegou-se a conclusão de que o problema estava no sistema de aquisição de dados, quando se utiliza determinadas frequências de aquisição, e não na fonte. Desta forma, ao ajustar, por exemplo, tpos = 4,08 ms, para se obter um sinal de leitura do sistema de aquisição de tpos = 2,00 ms, na realidade estava-se obtendo como sinal de saída, tpos = 4,08 ms.

Como nesta dissertação todas aquisições de dados foram realizadas utilizando 2 canais, 8 bits e a uma taxa de 10 kHz, e feitas antes da consciência de que o problema estava no sistema de aquisição, os valores de ajuste foram erroneamente especificados em relação aos valores desejados, e também erroneamente medidos pelo sistema de aquisição. Ou seja, ao se desejar tpos = 2,00 ms, ajustou-se tpos = 4,08 ms, obteve-se no programa tpos = 2,00 ms mas na verdade o valor real foi de 4,08 ms. Concluindo, foi possível usar valores corretos nos resultados mostrados daqui para frente, mas os valores de ajuste dos tempos tpos e tneg foram sempre aproximadamente o dobro do desejado.

Obs: Foi posteriormente verificado que o erro do sistema de aquisição se deve a um problema de incompatibilidade do *hardware* e não do *software*.

### 3.2.3 - Tocha de soldagem

Utilizou-se uma tocha de soldagem resfriada a água, capacidade máxima nominal de 320A (CC) ou 240A (CA) e capaz de usar eletrodos de 0,5 até 4,0 mm.

Apesar do valor de corrente máxima indicado acima para CA, neste trabalho utilizou-se uma corrente de 275A. Porém, este valor é válido para corrente alternada de onda senoidal, onde, durante 50% do tempo, o eletrodo fica na polaridade positiva e o outro 50% na polaridade negativa. No presente trabalho, usou-se uma corrente alternada de onda retangular onde a situação mais crítica em relação a permanência do eletrodo na polaridade positiva foi de aproximadamente 29%, permitindo desta forma a utilização de uma corrente de 275A.

### 3.2.4 - Mesa de Coordenadas

Devido ao longo tempo de duração dos ensaios realizados neste trabalho, utilizou-se uma mesa de coordenadas para movimentar a tocha de soldagem. A Figura 3.5 ilustra a mesa de coordenadas mostrando os trilhos para movimentação nos eixos x e y como também o suporte para fixação da tocha de soldagem.

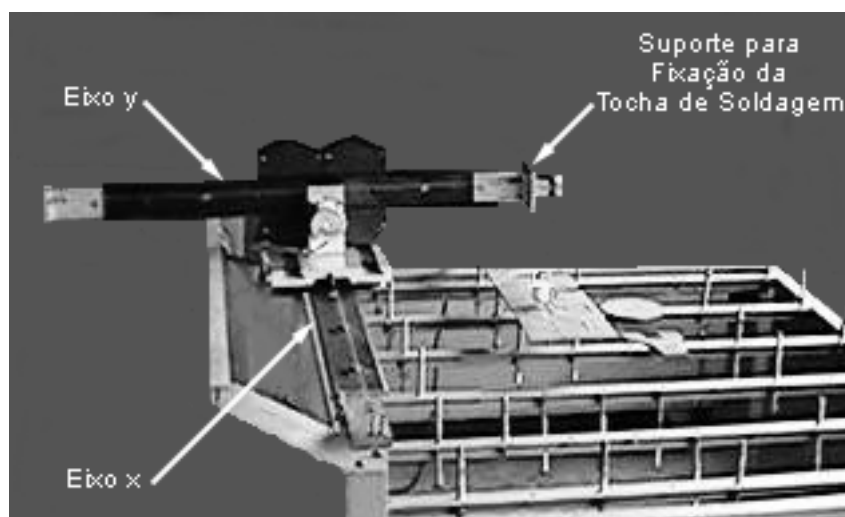


**Figura 3.5** - Mesa de coordenadas para movimentação da tocha no plano XY

Com esta mesa de coordenadas é possível determinar o percurso a ser realizado pela tocha de soldagem. Os movimentos nos eixos x e y são efetuados por motores de passo que são alimentados por um circuito elétrico que controla seus pulsos.

### 3.2.5 - Placa Arrefecida para Soldagem

A tocha foi movimentada sobre uma placa de alumínio. Com o objetivo de evitar ao máximo a fusão e a vaporização da placa de alumínio pelo arco e, assim, diminuir possíveis riscos de contaminações do eletrodo por vapores metálicos, foi desenvolvido um sistema de arrefecimento (Figura 3.6). Este sistema constitui basicamente de uma placa de alumínio (substituída mais ou menos a cada 2 horas de arco aberto) aparafusada a uma caixa de arrefecimento, que esta ligado a um sistema de bombeamento e arrefecimento de água.

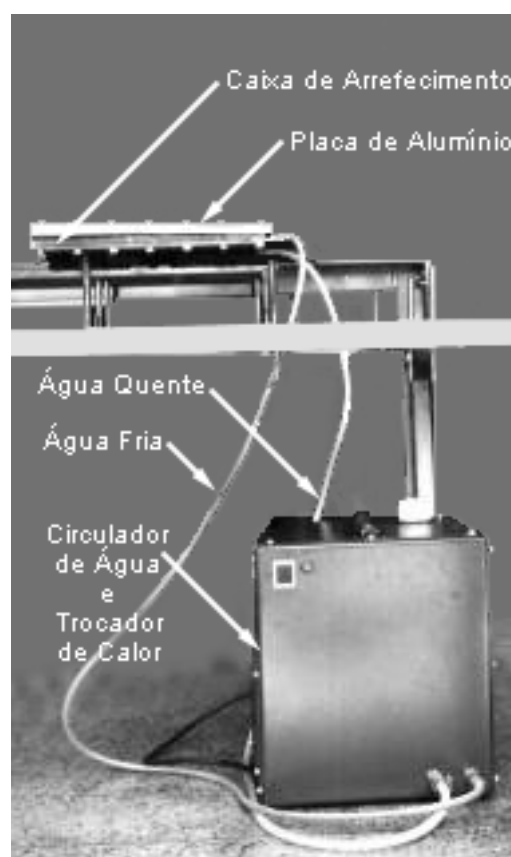


**Figura 3.6** - Sistema de arrefecimento

Maiores detalhes do interior da caixa de arrefecimento pode ser visto na Figura 3.7. As ramificações feitas nesta caixa tem como objetivo fazer com que a água circule por toda a área da placa de alumínio, garantindo assim um melhor e mais uniforme arrefecimento.

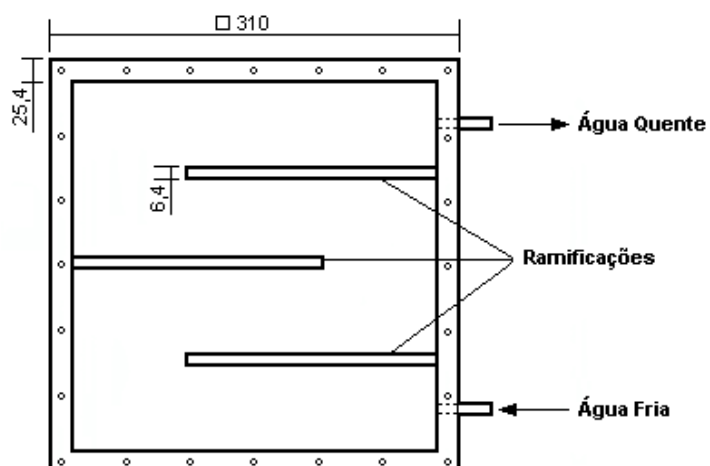


**Figura 3.7** - Esboço da parte interna da caixa de arrefecimento

Na Figura 3.8 vê-se com maiores detalhes a montagem da placa de alumínio sobre a caixa de arrefecimento, indicando ainda o posicionamento da tocha sobre a mesma.

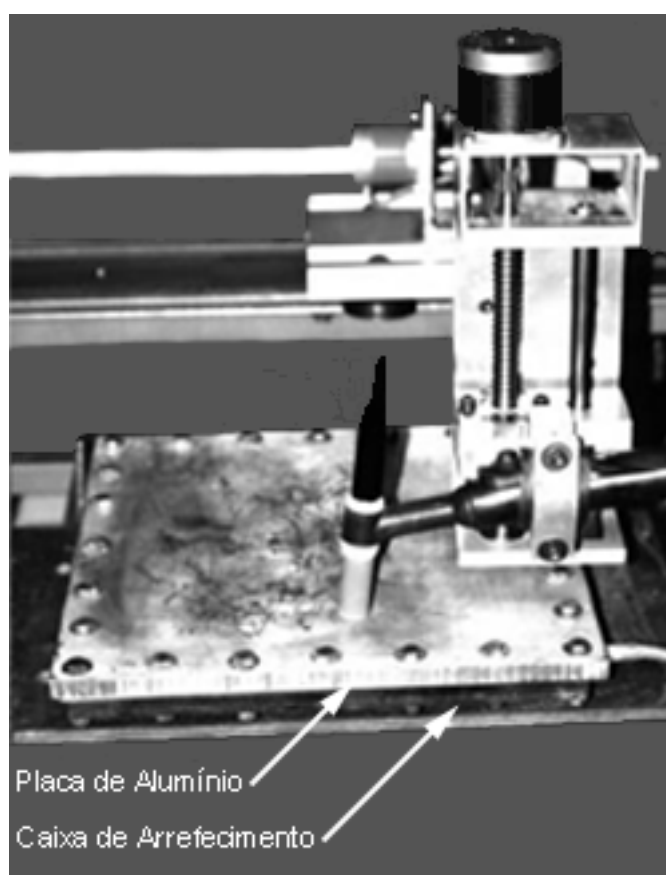


**Figura 3.8** - Detalhe da montagem da caixa de arrefecimento

### 3.3 - Consumíveis Utilizados

#### 3.3.1 - Eletrodos

Neste trabalho foram utilizados eletrodos de Tungstênio puro, torinado (2% ThO<sub>2</sub>) e lantanado (1,5% La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de diâmetro 3,2 mm (1/8”), que de acordo com a norma ANSI/AWS A5.12-92 (AWS, 1992) são classificados como EWP, EWTh-2 e EWG, respectivamente. No entanto, a partir de agora estes eletrodos serão chamados de EWP, EWTh e EWLa.

#### 3.3.2 - Gás

Como gás de proteção foi utilizado o Argônio puro a uma vazão de 12 l/min. Esta vazão foi controlada através da leitura do medidor de vazão digital. A capacidade de vazão deste equipamento situa-se entre 2,0 e 18,0 l/min e o controle da vazão requerida foi efetuado através da válvula do cilindro de gás.

### 3.4 - Planejamento Experimental

Para execução dos testes foi escolhido o planejamento experimental de Taguchi, matriz L9 (maiores detalhes no Anexo E), pois com esta técnica é possível combinar quatro fatores com três níveis cada um com apenas nove ensaios. O uso desta técnica visou a redução do número de ensaios devido à longa duração de cada um deles.

A Tabela 3.2 apresenta a matriz L9 de Taguchi seguida pelas designações dos fatores com seus respectivos níveis.

**Tabela 3.2** - Combinação de Fatores conforme a Matriz L9 de Taguchi

| Ensaio | Fator 1 | Fator 2 | Fator 3 | Fator 4 |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| 2      | 1       | 2       | 2       | 2       |
| 3      | 1       | 3       | 3       | 3       |
| 4      | 2       | 1       | 2       | 3       |
| 5      | 2       | 2       | 3       | 1       |
| 6      | 2       | 3       | 1       | 2       |
| 7      | 3       | 1       | 3       | 2       |
| 8      | 3       | 2       | 1       | 3       |
| 9      | 3       | 3       | 2       | 1       |

Onde:

**Fator 1** = Tipo de eletrodo

Nível 1 = EWP

Nível 2 = EWTh

Nível 3 = EWLa

**Fator 2** = Corrente ( $I_{pos}$  =  $I_{neg}$ )

Nível 1 = 180 A

Nível 2 = 215 A

Nível 3 = 275 A

**Fator 3** = tempo de permanência na polaridade negativa

Nível 1 =  $t_{neg}$  = 10,0 ms

Nível 2 =  $t_{neg}$  = 20,0 ms

Nível 3 =  $t_{neg}$  = 40,0 ms

**Fator 4** = Ângulo da ponta do eletrodo

Nível 1 =  $45^\circ$

Nível 2 =  $60^\circ$

Nível 3 =  $90^\circ$

A escolha de três tipos de eletrodos como níveis do fator 1 foi devido à proposta básica desta dissertação, ou seja, a comparação entre dois eletrodos ligados e o eletrodo de

Tungstênio puro. A escolha do eletrodo lantanado como nível 3 se deve à procura de um substituto para os eletrodos torinados, os quais possuem problemas relacionados com radioatividade.

Já a escolha dos três níveis de corrente (fator 2), foram baseado nos dados da AWS (1992). O nível 1 representa o valor médio do intervalo de corrente para o EWP, o nível 2 o valor intermediário entre o EWP e EWTh ou EWLa e o nível 3 o valor médio do intervalo para o EWTh ou EWLa. Chama-se a atenção para o fato de que os intervalos de correntes fornecidos por estes autores são referentes à corrente alternada de onda senoidal e neste trabalho estará se utilizando corrente alternada de onda retangular (não foi encontrado na literatura recomendações específicas para onda retangular).

Em relação ao fator 3, apesar de ambos os tempos tneg e tpos estarem diretamente ligados à temperatura do eletrodo, e portanto de grande importância no estudo do desgaste de um eletrodo, optou-se por utilizar somente o tneg como variável para o processo, mantendo o tpos constante, por questão de economia de ensaios. No entanto, é de conhecimento do autor desta dissertação que variando o tempo positivo haveria a possibilidade de encontrar uma combinação entre tneg e tpos que forneceria uma melhor estabilidade para o arco e, como consequência, uma maior durabilidade para o eletrodo.

Havia-se planejado outros valores para os níveis do tempo tneg, ou seja, 5, 10 e 20 ms, como também outro valor do tempo tpos (2 ms), baseado em vários trabalhos (ANTUNES 1996; DUTRA et al. 1992; NORRISH & OOI 1993; REIS 1996; SCOTTI 1996; e TOMSIC et al. apud REIS 1996) já realizados com corrente alternada de onda retangular. Mas, como justificado no item 3.2.2, os valores de ajuste dos tempos tpos e tneg tornaram-se aproximadamente o dobro do desejado, ou seja, tpos = 4,0 ms e tneg = 10,0 ms (nível 1); 20,0 ms (nível 2); 40,0 ms (nível 3).

Finalmente, devido a forma da ponta do eletrodo ser uma variável de grande importância no processo GTAW, ela também foi selecionada para que se pudesse analisar sua relação com o desgaste e comportamento dos eletrodos. O ângulo de 45 graus foi muito utilizado por USHIO et al. (1992) que estudou o comportamento dos óxidos adicionados ao eletrodo de Tungstênio durante arco aberto e os ângulos de 60 e 90 graus são recomendados por CAMPBELL & LACOURSIERE (1995) quando se trabalha com eletrodos de 3,2 mm de diâmetro. É bom deixar claro que ambos trabalhos utilizaram corrente contínua com polaridade direta.

### **3.5 - Desenvolvimento dos Experimentos**

#### **3.5.1 - Soldagens**

Para cada um dos nove ensaios estabelecidos pela matriz L9, foi estabelecido 1 hora e 30 minutos de arco aberto, sendo este tempo dividido em nove paradas (de 10 minutos). Este tempo foi determinado em ensaios preliminares, onde se procurava um tempo suficiente para se obter um desgaste apreciável de todos os tipos de eletrodos e paradas que permitissem acompanhar este desgaste. Cada parada é constituída de um ciclo de procedimentos, ou seja, antes de abrir o arco, pesa-se o eletrodo para se ter sua massa inicial e realiza-se uma aquisição da imagem de sua ponta. Em seguida, abre-se o arco, fazendo com que o mesmo percorra a placa de alumínio arrefecida (item 3.2.5) durante os 10 minutos. Durante este intervalo de arco aberto, efetua-se aquisição de dados (corrente e tensão). Ao desligar o arco, realiza-se uma nova pesagem do eletrodo, como também uma nova aquisição da imagem de sua ponta, finalizando assim o ciclo de procedimentos.

Para se conseguir as soldagens com tais durações, programou-se a mesa de coordenada para fazer movimentos repetitivos de um quadrado de 200 x 200 mm sobre a placa arrefecida de alumínio. Para garantir a repetibilidade de condições, mesmo após trocar as placas de alumínio, as mesmas eram pré soldadas. Desta forma, todas as soldas eram realizadas sobre regiões já soldadas, consequentemente sobre um alumínio já limpo catodicamente.

A Tabela 3.3 mostra como ficou a matriz experimental L9 com seus respectivos fatores e níveis. Já os valores de tpos, comprimento do arco, vazão do Argônio e velocidade de soldagem foram mantidos constantes em 4,0 ms, 3 mm, 12 l/min e 35 cm/min respectivamente.

**Tabela 3.3** - Valores nominais dos parâmetros de soldagem durante os testes

| Ensaio | Tipo de Eletrodo | Corrente I <sub>pos</sub> = I <sub>neg</sub> [A] | t <sub>neg</sub> [ms] | Ângulo da Ponta [Graus] |
|--------|------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1      | EWP              | 180                                              | 10,0                  | 45                      |
| 2      | EWP              | 215                                              | 20,0                  | 60                      |
| 3      | EWP              | 275                                              | 40,0                  | 90                      |
| 4      | EWTh             | 180                                              | 20,0                  | 90                      |
| 5      | EWTh             | 215                                              | 40,0                  | 45                      |
| 6      | EWTh             | 275                                              | 10,0                  | 60                      |
| 7      | EWL <sub>a</sub> | 180                                              | 40,0                  | 60                      |
| 8      | EWL <sub>a</sub> | 215                                              | 10,0                  | 90                      |
| 9      | EWL <sub>a</sub> | 275                                              | 20,0                  | 45                      |

### 3.5.2 - Abertura do Arco

Em todos testes, o arco foi aberto por meio de curto-circuito promovido pelo toque de um bastão na peça e no eletrodo simultaneamente. Para evitar danos na fonte de soldagem e principalmente evitar contaminação e/ou fusão do eletrodo, o curto-circuito foi sempre realizado com muita rapidez e com um bastão de Tungstênio puro (alto ponto de fusão e com diâmetro suficientemente elevado para evitar sua fusão que consequentemente provocaria contaminações nos eletrodos em estudo).

### **3.5.3 - Comprimento Útil do Eletrodo**

Considerando que uma grande parte do calor gerado no eletrodo é dissipada pelo bico de contato da tocha e que, por comparação, esta dissipação deveria ser a mesma para todos os eletrodos, um dos parâmetros fundamentais foi a manutenção do comprimento do eletrodo constante. Desta forma, a cada introdução do eletrodo na tocha de soldagem, o comprimento do eletrodo para fora do bico de contato era conferido através de um gabarito e mantido em 17 mm.

### **3.5.4 - Comprimento do Arco**

Também por questões de comparação, procurou-se usar um mesmo comprimento de arco em todas situações. Para se garantir o comprimento de arco constante e igual a 3 mm, primeiro fazia-se um nivelamento da placa por onde o arco iria passar e em seguida o ajuste do comprimento do arco requerido. Este ajuste era efetuado através de um gabarito (chapa de aço com espessura igual 3 mm) introduzido entre a ponta do eletrodo e a peça.

## **3.6 - Metodologia para Avaliar o Desgaste e Comportamento dos Eletrodos**

O desgaste dos eletrodos foram avaliados através da perda de massa após cada parada. Já para avaliar o comportamento da forma geométrica da ponta do eletrodo e o comportamento dos elementos dopantes, utilizou-se o aspecto visual após cada parada e análise EDX de algumas condições respectivamente.

### **3.6.1 - Perda de Massa**

A perda de massa foi avaliada através de uma balança analítica com capacidade de 100 g e com resolução de quatro casas decimais. Todo manuseio dos eletrodos foram realizados com luvas para que se evitasse uma possível contaminação dos mesmos, comprometendo-se os resultados experimentais.

O desgaste dos eletrodos foram avaliados de três formas, ou seja, variação de massa por parada, variação acumulada de massa e taxa de desgaste por parada.

A variação de massa por parada foi obtida fazendo-se a diferença entre a massa inicial do eletrodo (antes de abrir o arco) e a massa final do eletrodo (após 10 minutos de arco aberto). Já a variação acumulada de massa foi obtida fazendo-se a soma das variações de massa por parada. E finalmente, a relação entre a variação de massa e o tempo de arco aberto por parada, nos fornece a taxa de desgaste do eletrodo na parada em questão.

### **3.6.2 - Aspecto Visual**

Para se obter um acompanhamento das alterações visuais da ponta do eletrodo desde o seu estado inicial (antes de iniciar a soldagem) até a finalização do teste (depois de 1 hora e 30 minutos de arco aberto), a imagem da ponta do eletrodo era registrada a cada parada de cada ensaio. Para isto, utilizou-se de um sistema computadorizado que adquire e trata digitalmente as imagens. Este sistema é constituído por uma placa de aquisição de imagem Vision-EZDT-55 acoplada a um microcomputador, uma câmera CCD Hitachi KP-110, um monitor monocromático HITACHI-Kente modelo UM-902 de 9" e o *software "Global Lab Image"*- GLI. Maiores detalhes desta operação pode ser encontrada na referência SILVA, 1995. Também foram utilizadas imagens das pontas obtidas por microscopia eletrônica após 1 hora e 30 minutos de teste.

### **3.6.3 - EDX (Energia Dispersiva de raios X)**

Microanálise por raios X consiste da interação de um feixe de elétrons com átomos, originando raios X característicos dos elementos contidos na região da amostra em que o feixe incidiu. Estes raios X são normalmente analisados ou por seus comprimentos de onda (análise por comprimento de onda) ou por suas energias (análise de energia dispersiva), sendo esta última, a utilizada neste trabalho.

Na análise de energia dispersiva (EDX), os vários comprimentos de onda da radiação emitida pela amostra são separados com base nas suas energias, utilizando-se um contador Si(Li) e um analisador de amplitude multicanal. Este contador produz pulsos com alturas proporcionais à energia do feixe incidente, e os classificam segundo estas alturas (CULLITY, 1978).

A análise química por energia dispersiva permite identificar de forma qualitativa o elemento químico presente na amostra, independente de como ele esteja combinado ou em que fase ele esteja (CULLITY, 1978). Mais detalhes podem ser encontrados na referência GOLDSTEIN (1976).

Desta forma, para obtermos maiores informações sobre o comportamento dos óxidos adicionados ao eletrodo de Tungstênio, duas amostras (ensaios 4 e 7), após 1 hora e 30 minutos de arco aberto, foram enviadas para o Departamento de Metalurgia e Materiais da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) para análise por EDX.

## Capítulo IV

### Resultados e Discussões

#### 4.1 - Monitoramento dos Sinais Elétricos

A Tabela 4.1 apresenta os valores médios de cada parâmetro elétrico, com seu respectivo desvio padrão, para cada ensaio (o Anexo A apresenta todas as medições efetuadas que geraram esta tabela). Estes resultados estão dispostos de acordo com o planejamento experimental empregado (matriz L9 de Taguchi, Tabelas 3.2 e 3.3).

**Tabela 4.1** - Valores médios de  $I_{pos}$ ,  $I_{neg}$ ,  $t_{pos}$ ,  $t_{neg}$ ,  $V_{pos}$  e  $V_{neg}$

|                  |        | $I_{pos}$ [A] | $I_{neg}$ [A] | $t_{pos}$ [ms] | $t_{neg}$ [ms] | $V_{pos}$ [V] | $V_{neg}$ [V] |
|------------------|--------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Ensaio 1<br>EWP  | Média  | 178,07        | 176,00        | 4,18           | 8,90           | 24,80         | 12,05         |
|                  | Desvio | 1,21          | 0,00          | 0,08           | 0,34           | 0,41          | 0,95          |
| Ensaio 2<br>EWP  | Média  | 208,89        | 208,11        | 4,11           | 18,95          | 25,85         | 15,13         |
|                  | Desvio | 2,20          | 2,20          | 0,04           | 1,77           | 0,58          | 0,44          |
| Ensaio 3<br>EWP  | Média  | 266,00        | 266,33        | 4,12           | 35,25          | 26,79         | 15,71         |
|                  | Desvio | 0,00          | 2,50          | 0,05           | 3,36           | 0,49          | 0,48          |
| Ensaio 4<br>EWTh | Média  | 174,00        | 176,00        | 4,12           | 18,54          | 24,88         | 13,30         |
|                  | Desvio | 0,00          | 0,00          | 0,03           | 1,14           | 1,08          | 0,68          |
| Ensaio 5<br>EWTh | Média  | 208,15        | 208,11        | 4,16           | 35,07          | 25,20         | 14,56         |
|                  | Desvio | 1,76          | 2,20          | 0,06           | 2,80           | 0,65          | 0,71          |
| Ensaio 6<br>EWTh | Média  | 261,93        | 263,00        | 4,07           | 7,57           | 28,12         | 13,90         |
|                  | Desvio | 1,69          | 0,00          | 0,08           | 0,35           | 1,10          | 1,00          |
| Ensaio 7<br>EWLa | Média  | 170,67        | 179,33        | 4,03           | 35,22          | 23,29         | 14,63         |
|                  | Desvio | 2,50          | 2,50          | 0,08           | 1,38           | 0,38          | 0,25          |
| Ensaio 8<br>EWLa | Média  | 205,00        | 207,00        | 4,03           | 7,27           | 27,65         | 12,93         |
|                  | Desvio | 0,00          | 0,00          | 0,03           | 0,27           | 0,93          | 0,64          |
| Ensaio 9<br>EWLa | Média  | 264,33        | 266,33        | 4,16           | 17,46          | 27,85         | 16,58         |
|                  | Desvio | 2,50          | 2,50          | 0,04           | 1,39           | 0,38          | 0,76          |

Como pode-se ver na Tabela 4.1, o desvio padrão de todos os parâmetros monitorados podem ser considerados baixos, mostrando uma boa estabilidade da fonte de soldagem quanto ao sinal de saída.

Já a Tabela 4.2 apresenta uma comparação entre os valores médios apresentados na Tabela 4.1 com os valores nominais, ou seja, com os valores propostos pelo planejamento experimental.

**Tabela 4.2** - Variação do valor medido (monitorado) em relação ao valor nominal

|                                |                   | Ipos [A] | Ineg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] |
|--------------------------------|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| <b>Ensaio 1</b><br><b>EWP</b>  | <b>Média real</b> | 178,07   | 176,00   | 4,18      | 8,90      |
|                                | <b>Nominal</b>    | 180,00   | 180,00   | 4,00      | 10,00     |
| <b>Ensaio 2</b><br><b>EWP</b>  | <b>Média real</b> | 208,89   | 208,11   | 4,11      | 18,95     |
|                                | <b>Nominal</b>    | 215,00   | 215,00   | 4,00      | 20,00     |
| <b>Ensaio 3</b><br><b>EWP</b>  | <b>Média real</b> | 266,00   | 266,33   | 4,12      | 35,25     |
|                                | <b>Nominal</b>    | 275,00   | 275,00   | 4,00      | 40,00     |
| <b>Ensaio 4</b><br><b>EWTh</b> | <b>Média real</b> | 174,00   | 176,00   | 4,12      | 18,54     |
|                                | <b>Nominal</b>    | 180,00   | 180,00   | 4,00      | 20,00     |
| <b>Ensaio 5</b><br><b>EWTh</b> | <b>Média real</b> | 208,15   | 208,11   | 4,16      | 35,07     |
|                                | <b>Nominal</b>    | 215,00   | 215,00   | 4,00      | 40,00     |
| <b>Ensaio 6</b><br><b>EWTh</b> | <b>Média real</b> | 261,93   | 263,00   | 4,07      | 7,57      |
|                                | <b>Nominal</b>    | 275,00   | 275,00   | 4,00      | 10,00     |
| <b>Ensaio 7</b><br><b>EWLa</b> | <b>Média real</b> | 170,67   | 179,33   | 4,03      | 35,22     |
|                                | <b>Nominal</b>    | 180,00   | 180,00   | 4,00      | 40,00     |
| <b>Ensaio 8</b><br><b>EWLa</b> | <b>Média real</b> | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,27      |
|                                | <b>Nominal</b>    | 215,00   | 215,00   | 4,00      | 10,00     |
| <b>Ensaio 9</b><br><b>EWLa</b> | <b>Média real</b> | 264,33   | 266,33   | 4,16      | 17,46     |
|                                | <b>Nominal</b>    | 275,00   | 275,00   | 4,00      | 20,00     |

Pode-se verificar na Tabela 4.2 que o tpos não sofreu praticamente nenhum desvio (maior variação foi de 3,5% para o ensaio 1 e ensaio 9), o Ipos sofreu um desvio pequeno (maior variação foi de 5,5% para o ensaio 7), o Ineg também sofreu um desvio pequeno (maior variação foi de 4,6% para ensaio 6) e o tneg foi o que sofreu o maior desvio em relação ao valor nominal (maior variação foi de 38,9% para ensaio 8).

Estas variações do tpos, tneg, Ipos e Ineg podem ser atribuídas a calibragem da fonte de soldagem. No entanto, no caso do tneg, algum fator a mais e desconhecido deve estar influenciando o valor do sinal de saída de forma significativa. Foi notado durante a realização dos testes que a medida que se soldava sem desligar a fonte, havia uma tendência dos valores monitorados do tneg decrescerem em relação ao valor nominal. Também notou-se que durante intervalos de um dia para outro ou até mesmo nas paradas para almoço, quando a fonte de soldagem era desligada, este desvio era menor, pois, ao se retornar as atividades sem alterar o valor ajustado (sem mexer no botão de ajuste), notava-se uma nova aproximação do valor monitorado em relação ao valor nominal. Detalhe desta observação pode ser verificada no Anexo A.

## **4.2 - Variação de Massa e Taxa de Desgaste**

### **4.2.1 - Escolha do melhor Parâmetro para Análise dos Resultados**

Ao se fazer a análise dos resultados obtidos, verificou-se que a análise baseada nos valores da variação acumulada de massa e taxa acumulada de desgaste podem trazer uma certa dificuldade, pois, se um ponto sofrer alguma variação fora da tendência (um acaso) em relação aos outros, este ponto seria responsável por um efeito cumulativo nos resultados subsequentes do ensaio em questão. Isto pode ser verificado claramente no Anexo B, ensaio 6, a partir da 2ª parada, quando a variação acumulada de massa sofre um acréscimo fora do normal e o leva até o final do ensaio.

Já para a variação de massa por parada, mesmo quando há um ponto que foge da tendência (um acaso), este não vai influenciar outras paradas do ensaio em questão, facilitando assim uma melhor visualização do comportamento do fenômeno. Similarmente, a mesma idéia pode ser aplicada para taxa de desgaste por parada. Porém, como a taxa de desgaste por parada leva em conta não somente a variação de massa, mas também o tempo de arco aberto, ela se torna na opinião do autor, um melhor critério para analisar o desgaste dos eletrodos. Por isto, optou-se por usar como parâmetro a média das taxas de desgaste por parada.

De qualquer forma, o Anexo B apresenta todos os resultados obtidos em relação a variação de massa do eletrodo em cada parada (diferença entre a massa final e inicial da parada em questão), a variação acumulada (diferença entre a massa final da parada em questão com a massa inicial do eletrodo), como também, a taxa de desgaste do eletrodo por parada. O tempo total representa o tempo de arco aberto do respectivo eletrodo até o momento em questão.

### **4.2.2 - Tratamento dos Dados (critério de eliminação de dados)**

Devido a uma grande oscilação da taxa de desgaste entre paradas de um dado ensaio procurou-se um critério para eliminar alguns pontos que fugissem muito da média do ensaio em questão (filtragem).

A Tabela 4.3 apresenta na primeira coluna referente a taxa de desgaste o seu valor médio com seu respectivo desvio padrão, considerando todos os valores obtidos no ensaio conforme as tabelas para cada ensaio apresentadas no Anexo B. Já na segunda e terceira

coluna subsequentes tem-se a média e desvio padrão dos pontos considerando apenas aqueles contidos num dado intervalo especificado. Na coluna cujo intervalo é identificado com  $M \pm 2\delta$  (onde “M” representa a média de todos os valores do ensaio e “ $\delta$ ” seu desvio padrão), eliminou-se todos os dados fora deste intervalo antes do cálculo da média e seu respectivo desvio padrão. Da mesma forma foram calculados os dados apresentados na coluna identificada pelo intervalo  $M \pm \delta$ .

**Tabela 4.3** - Diferentes formas de apresentar a média da taxa de desgaste por parada

|                  |        | Taxa de desgaste considerando todo intervalo [g/s] | Taxa de desgaste considerando intervalo ( $M \pm 2\delta$ ) [g/s] | Taxa de desgaste considerando intervalo ( $M \pm \delta$ ) [g/s] |
|------------------|--------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Ensaio 1<br>EWP  | Média  | 6,187E-06                                          | 5,175E-06                                                         | 5,568E-06                                                        |
|                  | Desvio | 2,905E-06                                          | 1,209E-06                                                         | 0,791E-06                                                        |
| Ensaio 2<br>EWP  | Média  | 5,846E-06                                          | 5,082E-06                                                         | 5,333E-06                                                        |
|                  | Desvio | 2,417E-06                                          | 1,146E-06                                                         | 0,998E-06                                                        |
| Ensaio 3<br>EWP  | Média  | 9,764E-06                                          | 9,764E-06                                                         | 10,344E-06                                                       |
|                  | Desvio | 2,420E-06                                          | 2,420E-06                                                         | 1,315E-06                                                        |
| Ensaio 4<br>EWTh | Média  | 3,971E-06                                          | 3,971E-06                                                         | 4,047E-06                                                        |
|                  | Desvio | 0,945E-06                                          | 0,945E-06                                                         | 0,575E-06                                                        |
| Ensaio 5<br>EWTh | Média  | 3,955E-06                                          | 3,955E-06                                                         | 2,898E-06                                                        |
|                  | Desvio | 2,228E-06                                          | 2,228E-06                                                         | 1,150E-06                                                        |
| Ensaio 6<br>EWTh | Média  | 15,222E-06                                         | 8,861E-06                                                         | 6,768E-06                                                        |
|                  | Desvio | 18,724E-06                                         | 5,497E-06                                                         | 2,154E-06                                                        |
| Ensaio 7<br>EWLa | Média  | 0,850E-06                                          | 0,850E-06                                                         | 0,831E-06                                                        |
|                  | Desvio | 0,298E-06                                          | 0,298E-06                                                         | 0,166E-06                                                        |
| Ensaio 8<br>EWLa | Média  | 3,305E-06                                          | 3,299E-06                                                         | 3,299E-06                                                        |
|                  | Desvio | 0,962E-06                                          | 0,224E-06                                                         | 0,224E-06                                                        |
| Ensaio 9<br>EWLa | Média  | 11,719E-06                                         | 11,719E-06                                                        | 10,179E-06                                                       |
|                  | Desvio | 7,233E-06                                          | 7,233E-06                                                         | 3,971E-06                                                        |

É válido salientar que as oscilações (grande desvio padrão) podem ser inerente ao próprio processo de desgaste, principalmente no caso dos eletrodos dopados, pois, observa-se que as maiores oscilações se deram com os eletrodos dopados em condições de alta corrente (ensaios 6 e 9). Apesar de ser mais claro o efeito desta oscilação nos eletrodos dopados, pode-se observar que o eletrodo de Tungstênio puro evidência este mesmo fato nos

intervalos ( $M \pm 2\delta$  e  $M \pm \delta$ ) da taxa de desgaste quando comparado aos desvios dos eletrodos dopados.

#### 4.2.3 - Análise de Variância (ANOVA)

A técnica estatística mais empregada para interpretação de dados experimentais é conhecida como ANOVA (análise de variância). Este nome é derivado do fato de que para testes de significância estatística entre médias, na realidade está se comparando variâncias. Em geral, a finalidade da ANOVA é testar diferentes significâncias entre médias (PHADKE, 1989).

A maioria dos programas computacionais de estatística realizam esta análise para os usuários. Normalmente esta análise é apresentada na forma de uma tabela, onde na 1ª coluna é listado os fatores e nas colunas subsequentes o SS (soma dos quadrados), df (grau de liberdade), MS (razão soma dos quadrados/grau de liberdade), F(razão de variância) e p (significância) para cada fator e para o resíduo (erro). Maiores detalhes da análise estatística são dados no Anexo E.

Em concordância com o método de Taguchi (ver detalhes no Anexo E), aplicou-se sobre os dados da Tabela 4.3 uma transformada do tipo “menor é o melhor”. A Tabela 4.4 mostra a análise de variância para a taxa de desgaste considerando todo o intervalo (Tabela 4.3).

**Tabela 4.4** - Análise de variância considerando todo intervalo

|                 | SS      | df | MS      | F | p |
|-----------------|---------|----|---------|---|---|
| <b>Eletrodo</b> | 81,422  | 2  | 40,711  | - | - |
| <b>Corrente</b> | 260,090 | 2  | 130,045 | - | - |
| <b>tneg</b>     | 80,061  | 2  | 40,031  | - | - |
| <b>Ângulo</b>   | 22,656  | 2  | 11,328  | - | - |
| <b>Resíduo</b>  | -       | 0  | -       | - | - |

Já a Tabela 4.5 mostra a análise de variância da taxa de desgaste considerando o intervalo  $M \pm 2\delta$  e a Tabela 4.6 para o intervalo  $M \pm \delta$  (Tabela 4.3).

**Tabela 4.5** - Análise de variância considerando o intervalo  $M \pm 2\delta$

|                 | SS      | df | MS      | F | p |
|-----------------|---------|----|---------|---|---|
| <b>Eletrodo</b> | 56,042  | 2  | 28,021  | - | - |
| <b>Corrente</b> | 215,529 | 2  | 107,765 | - | - |

|                |        |   |        |   |   |
|----------------|--------|---|--------|---|---|
| <b>tneg</b>    | 53,935 | 2 | 26,967 | - | - |
| <b>Ângulo</b>  | 43,748 | 2 | 21,874 | - | - |
| <b>Resíduo</b> | -      | 0 | -      | - | - |

**Tabela 4.6** - Análise de variância considerando o intervalo  $M \pm \delta$

|                 | <b>SS</b> | <b>df</b> | <b>MS</b> | <b>F</b> | <b>p</b> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Eletrodo</b> | 72,736    | 2         | 36,368    | -        | -        |
| <b>Corrente</b> | 177,730   | 2         | 88,865    | -        | -        |
| <b>tneg</b>     | 64,106    | 2         | 32,053    | -        | -        |
| <b>Ângulo</b>   | 44,036    | 2         | 22,019    | -        | -        |
| <b>Resíduo</b>  | -         | 0         | -         | -        | -        |

Pode-se perceber em todas as três tabelas (Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6) que não aparecem valores de F e p, pois, como o grau de liberdade para o resíduo é zero, F e p não podem ser calculados. Contudo, como o método de Taguchi permite analisar os resultados de forma qualitativa (Anexo E), as análises estatísticas seguintes serão realizadas à partir de SS e de gráficos de médias (obtidos a partir das tabelas fornecidas no Anexo F). Assumiu-se que quanto maior SS, maior a influência do fator em questão. Os gráficos de médias são usados para avaliar o sentido da influência dos níveis de cada um dos fatores.

Pelas Tabela 4.4 a 4.6, mesmo sem um suporte quantitativo, acredita-se que o fator mais influente sobre o desgaste seja a corrente, seguida pelo tipo de eletrodo, tneg e ângulo.

Chama-se à atenção para o fato de que a escala dos gráficos de médias estão invertidas, pois, devido ao tipo de transformada utilizada, procura-se o quanto menor, melhor. A Figura 4.1 mostra a tendência de cada um destes fatores em função de seus respectivos níveis, usando-se como dados os valores médios de  $\eta$  (sinal/ruído) apresentados no Anexo F considerando todo intervalo. Similarmente, as Figuras 4.2 e 4.3 apresentam as mesmas tendências, usando-se os valores médios de  $\eta$  considerando os intervalos  $M \pm 2\delta$  e  $M \pm \delta$ , respectivamente.

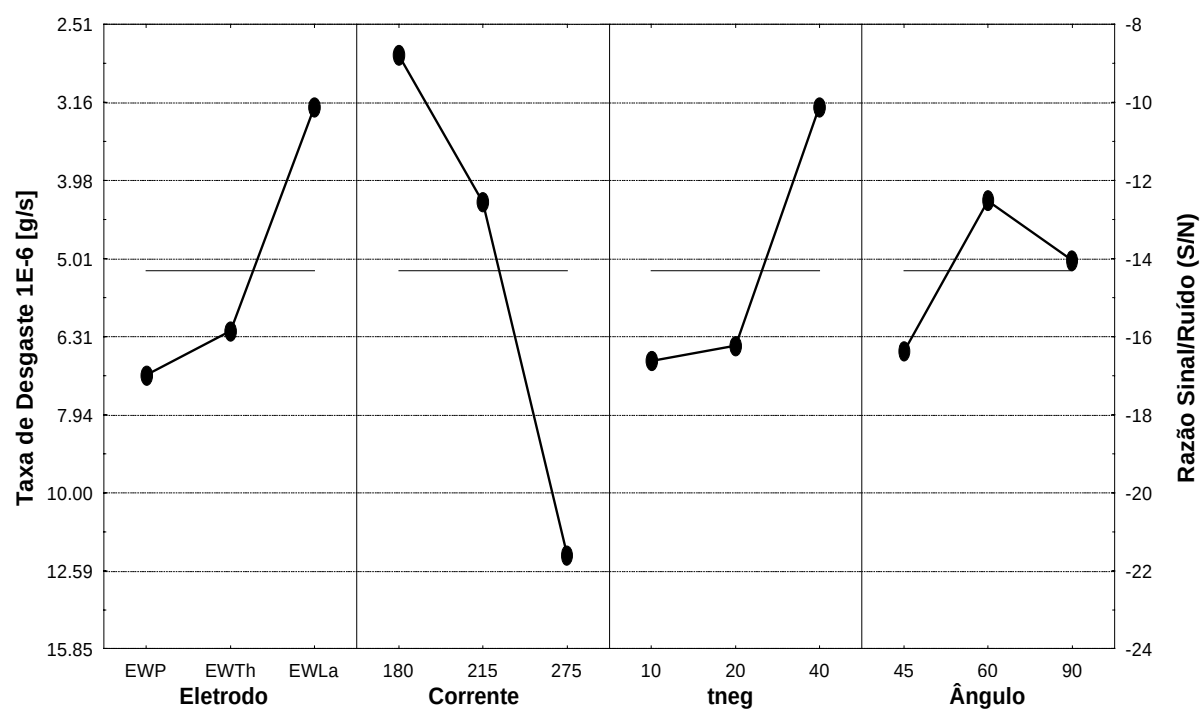


**Figura 4.1** - Gráfico de médias considerando todo intervalo

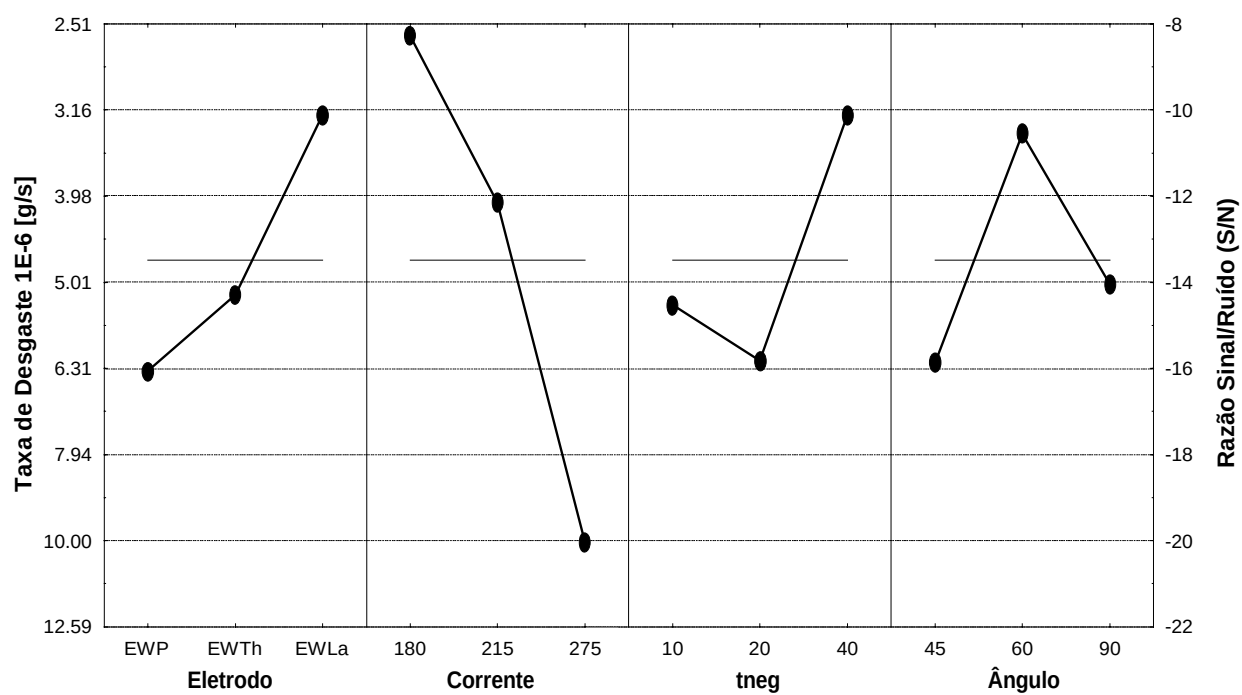


**Figura 4.2** - Gráfico de médias considerando o intervalo  $M \pm 2\delta$

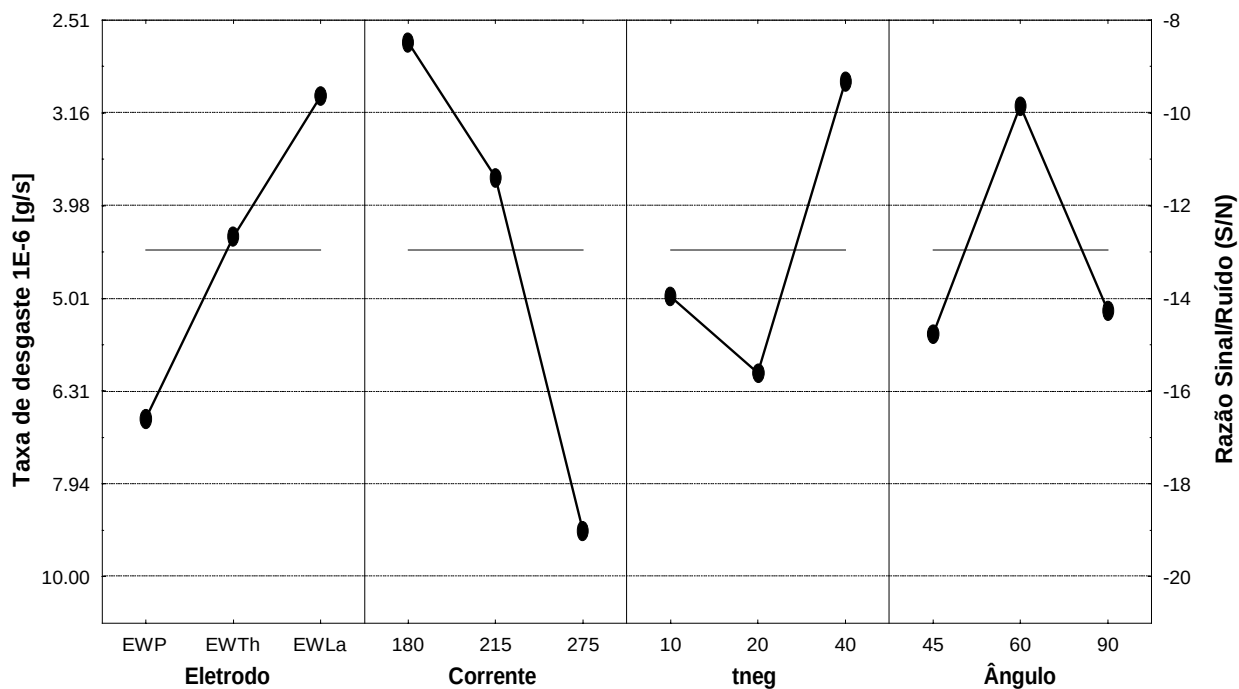


**Figura 4.3** - Gráfico de médias considerando o intervalo  $M \pm \delta$

Analisando-se o efeito de cada nível de corrente, como já era esperado, tem-se que quanto maior a corrente (nível 3), maior a temperatura de operação do eletrodo e, consequentemente, maior o desgaste.

Já quanto ao tipo de eletrodo, percebe-se que o eletrodo nível 3 (EWLa) é o que apresenta o menor desgaste, seguido pelo eletrodo nível 2 (EWTh) e finalmente o nível 1 (EWP). Este resultado era também esperado, pois, como já visto no Capítulo II (item 2.3.4), tem-se que o eletrodo lantanado consegue um melhor balanceamento entre a taxa de migração e vaporização dos óxidos na ponta do eletrodo, quando comparado com o balanceamento entre a taxa de difusão e vaporização do Tório no eletrodo torinado. De acordo com estas teorias, este fato faz com que o eletrodo lantanado possua uma maior concentração de óxidos na ponta do eletrodo (veja detalhes item 4.6), diminuindo a função de trabalho, que, consequentemente, vai diminuir a temperatura de operação, reduzindo o desgaste da ponta do eletrodo. Já no caso do eletrodo torinado, como certas regiões da ponta do eletrodo trabalham sem a presença de Tório, a função de trabalho dessas regiões vai ser próxima da função de trabalho do Tungstênio puro e, consequentemente, as regiões devem operar em maiores temperaturas, levando a um maior desgaste. Já o eletrodo de Tungstênio puro, como o próprio nome diz, contém somente Tungstênio e, por conseguinte, possui maior função de trabalho do que os eletrodos ligados, consequentemente, deve operar a uma maior temperatura, sofrendo um maior desgaste.

Já o efeito do tneg somente apresentou os resultados esperados na Figura 4.1, ou seja, quanto maior o tneg, menor desgaste do mesmo (menor a porcentagem de tempo que o eletrodo opera como ânodo, que esta diretamente ligado com a temperatura de operação). No entanto, nas Figuras 4.2 e 4.3 o tneg apresenta um comportamento não esperado com relação ao nível 2. Chama-se atenção para o fato de que as diferenças entre os níveis 1 e 2 são muito pequenas e que seus desvios padrão são consideráveis (Anexo F), podendo ser a causa desta divergência.

Finalmente, o ângulo manteve o mesmo comportamento nas três figuras (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3) dos gráficos de médias. De acordo com estas figuras, o nível 2 ( $60^\circ$ ) foi o que apresentou menor consumo, seguido pelo nível 3 ( $90^\circ$ ) e finalmente pelo nível 1 ( $45^\circ$ ). Entretanto, o ângulo é o fator que possui a menor influência sobre a taxa de desgaste entre os fatores estudados. Isto, pelo menos em parte, deve-se ao fato de que, para vários ensaios, perdeu-se o apontamento do eletrodo logo no início dos ensaios, dificultando a análise do efeito desta variável.

Uma observação importante realizada a partir das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 foi que, de uma forma geral, o critério de filtragem dos dados não alterou as tendências dos níveis de cada fator sobre a taxa de desgaste, ou seja, os níveis ótimos com relação a taxa de desgaste não se alteraram em relação ao método de filtragem dos dados e são: EWLa, corrente de 180 A, tneg de 40 ms e ângulo de  $60^\circ$ . Reforçando a idéia que a oscilação da taxa de desgaste é inerente do próprio processo de desgaste.

Pode-se observar que a análise de desgaste acima mencionada foi baseada basicamente no efeito da temperatura de operação. Entretanto, apesar de parecer lógico que um aumento da corrente e/ou do percentual de tempo que o eletrodo opera como ânodo causem um aumento da temperatura de operação e, conseqüentemente, um maior desgaste, algumas considerações adicionais precisam serem feitas:

- 1) Ao se elevar a corrente de soldagem tem-se um aumento da temperatura do eletrodo, que conseqüentemente leva a uma maior emissividade de elétrons. Um eletrodo com maior emissividade tende a ter um cátodo mais frio, o que inverteria, anularia ou amenizaria a tendência do aumento de temperatura. Não conduziria automaticamente a um maior desgaste.

- 2) Por outro lado, SADEK et al. (1990) mostrou, como ilustrado na Figura 2.7 que, com aumento da corrente, houve um aumento da função de trabalho dos eletrodos dopados (e não necessariamente dos elementos W ou dos óxidos). Sugere-se que este fato seja causado por

fenômenos de migração (e/ou difusão) e vaporização na ponta do eletrodo. Lamentavelmente, SADEK et al. (1990) não compararam seus resultados com os de um eletrodo de Tungstênio puro. Se assim eles fizessem, e se a função de trabalho do EWP (a do eletrodo coincide com o do elemento W), da forma como estimada por Sadek et al., reduzisse, seria provado que quanto maior a temperatura, maior a emissividade (como também suportaria o efeito da emissividade citado no item anterior). Poder-se-ia assumir que para eletrodos puros, maior temperatura significa maior emissividade, o que não pode ser afirmado para os eletrodos dopados.

3) Similarmente à corrente de soldagem, o ângulo do eletrodo, por si só, deve caracterizar-se como um caso iterativo, ou seja, tem-se que quanto mais agudo o ângulo de apontamento mais rápido deverá ser seu aquecimento (menor massa na ponta). Com isto, tem-se um aumento da emissividade (pelo menos para o EWP), o que reduziria a queda catódica. Isto faria com que o calor gerado fosse menor e a estabilização térmica se daria em uma temperatura de equilíbrio menor que a temperatura inicialmente atingida. Já considerando um eletrodo com ângulo de  $180^\circ$  (sem ponta), acredita-se que a temperatura máxima alcançada por este já seria a temperatura de equilíbrio.

4) Como a resistividade elétrica é função do material e da temperatura, tem-se que ao introduzir elementos dopantes ao eletrodo de Tungstênio, duas situações podem ocorrer ao mesmo tempo, ou seja:

a)  $\uparrow$  emissividade  $\Rightarrow \downarrow$  temperatura  $\Rightarrow \downarrow$  resistividade

b)  $\downarrow$  condutividade elétrica (efeito isolante)  $\Rightarrow \uparrow$  temperatura  $\Rightarrow \uparrow$  resistividade

Como CAMPBELL & LACOURSIERE (1995) concluíram que os eletrodos de Tungstênio dopados suportam maiores capacidades de correntes de soldagem do que os eletrodos de Tungstênio puro (maiores detalhes item 2.3.2). Supõe-se que o efeito do elemento dopante em melhorar a emissividade está sobressaindo sobre seu efeito isolante.

5) Além disto, é difícil saber se a temperatura atingida pelo eletrodo durante operação seja suficiente para que a taxa de vaporização exceda a taxa de migração e/ou difusão e vice versa. Esta observação afeta a conclusão anterior (item 2) quanto aos eletrodos dopados.

Desta forma, pode-se afirmar que há vários fatores interagem ao mesmo tempo e que uma análise de desgaste baseado apenas numa relação de corrente ou presença de elementos dopantes com a temperatura de operação pode ser considerada simplória, negligenciando outros fatores importantes.

### 4.3 – Variação da Tensão

Para verificar a influência dos fatores sobre a  $V_{pos}$  e a  $V_{neg}$ , também aplicou-se ANOVA com uma transformada do tipo “menor é o melhor” (detalhes no Anexo E), sobre os valores monitorados de tensão apresentados na Tabela 4.1. Com esta análise, pretende-se encontrar os parâmetros que favorecem a emissão termoiônica ( $V_{neg}$ ) e a emissão de campo ( $V_{pos}$ ).

A Tabela 4.7 apresenta o resultado da análise de variância para  $V_{pos}$  e a Tabela 4.8 para  $V_{neg}$ .

**Tabela 4.7** - Análise de variância para  $V_{pos}$

|                 | SS    | df | MS    | F | p |
|-----------------|-------|----|-------|---|---|
| <b>Eletrodo</b> | 0,024 | 2  | 0,012 | - | - |
| <b>Corrente</b> | 1,823 | 2  | 0,912 | - | - |
| <b>tneg</b>     | 0,537 | 2  | 0,268 | - | - |
| <b>Ângulo</b>   | 0,094 | 2  | 0,047 | - | - |
| <b>Resíduo</b>  | -     | 0  | -     | - | - |

**Tabela 4.8** - Análise de variância para  $V_{neg}$

|                 | SS    | df | MS    | F | p |
|-----------------|-------|----|-------|---|---|
| <b>Eletrodo</b> | 0,297 | 2  | 0,149 |   |   |
| <b>Corrente</b> | 2,382 | 2  | 1,191 |   |   |
| <b>tneg</b>     | 3,153 | 2  | 1,576 |   |   |
| <b>Ângulo</b>   | 0,214 | 2  | 0,107 |   |   |
| <b>Resíduo</b>  |       | 0  |       |   |   |

Novamente pode-se observar nas Tabelas 4.7 e 4.8 que os valores de F e p não puderam ser calculados devido ao fato de que o grau de liberdade para o resíduo é zero. Similarmente, mesmo sem o suporte da significância estatística, tem-se de uma forma qualitativa que o fator mais influente sobre a  $V_{pos}$  é a corrente, seguida pelo tneg e, com bem

menos influência, aparecem o ângulo, e o tipo de eletrodo. Já para a  $V_{neg}$ , tem-se que o fator mais influente foi o  $t_{neg}$ , seguido pela corrente e, com menor influência, o tipo de eletrodo e o ângulo.

Para analisar a tendência dos níveis de cada um destes fatores, usou-se os gráficos de médias apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5.

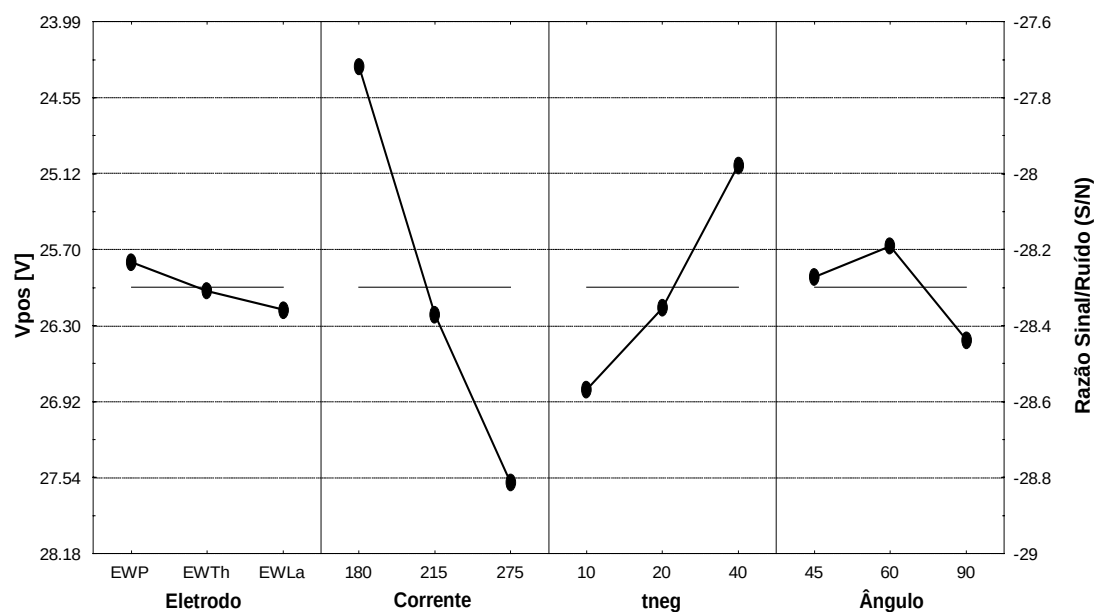


**Figura 4.4** - Gráfico de médias para  $V_{pos}$

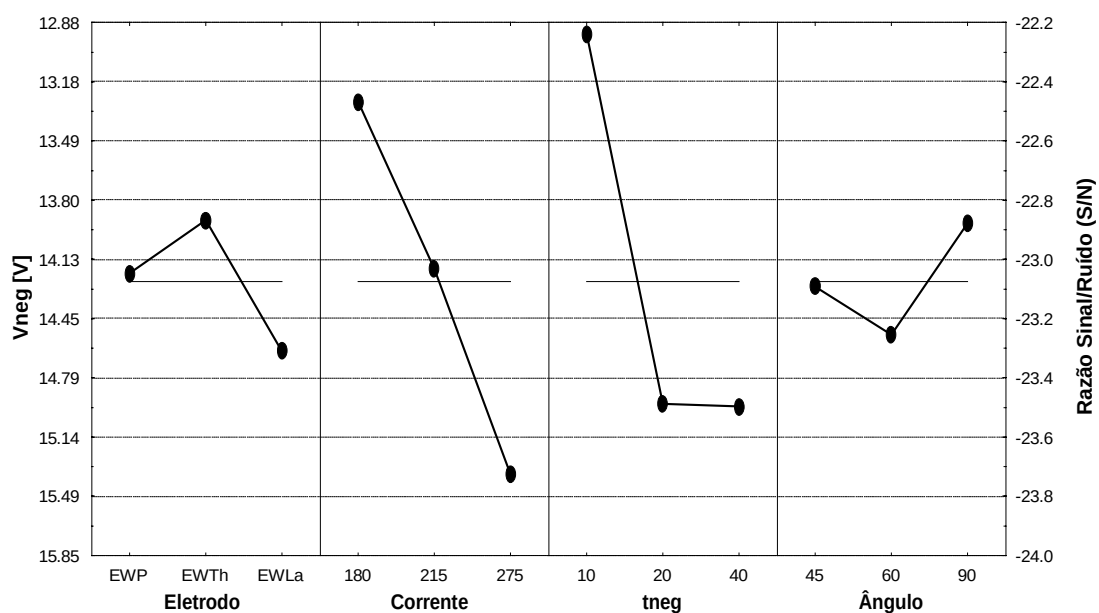


**Figura 4.5** - Gráfico de médias para  $V_{neg}$

De uma forma geral, pode-se notar que os valores de  $V_{pos}$  são praticamente o dobro dos valores de  $V_{neg}$ . Este fato é devido ao mecanismo de emissão menos favorável (emissão de campo), que atua quando o eletrodo está na polaridade positiva, comparado com a emissão termoiônica que acontece quando o eletrodo está na polaridade negativa.

Pode-se observar ainda que o efeito causado pelos níveis de corrente assemelham-se quanto às tendências, tanto para  $V_{pos}$ , quanto para  $V_{neg}$  (Figuras 4.4 e 4.5), ou seja, quanto maior a corrente, maior a  $V_{pos}$  e a  $V_{neg}$ . Esta observação se deve ao fato de que, como a tensão é diretamente proporcional ao produto da resistência elétrica pela corrente elétrica (devido aos níveis de corrente utilizados, supõe-se que esteja-se trabalhando na região linear da característica estática do arco), tem-se que, ao aumentar-se a corrente há um aumento da tensão. Acredita-se que neste caso o efeito do aumento da emissividade, devido ao aumento da temperatura, foi sobreposto pelo efeito citado anteriormente.

Com relação ao  $t_{neg}$ , os níveis deste fator atuaram de forma inversa de uma polaridade para outra. Para  $V_{pos}$  tem-se que quanto maior o  $t_{neg}$ , menor o valor médio desta tensão. Isto pode ser explicado pelo fato de que a emissão a “frio” (emissão de campo) é favorecida pela presença de filmes de óxidos de espessura microscópica presentes na superfície do cátodo (MODENESI, 1996). Desta forma, tem-se que quanto maior o  $t_{neg}$ , menor o efeito da limpeza catódica e, conseqüentemente, maior a quantidade de óxidos na superfície do cátodo para contribuir com a emissão a “frio”.

Já para  $V_{neg}$ , tem-se que quanto maior o  $t_{neg}$ , maior o valor desta tensão. Este resultado pode ser explicado com o auxílio da equação de Richardson-Dushman (Equação 2.2, item 2.3.1) que mostra que a densidade de corrente ( $I_s$ ) resultante do efeito termoiônico é diretamente proporcional à temperatura, ou seja, a medida que se aumenta a corrente e/ou diminui o percentual de tempo na polaridade negativa (no positivo, o eletrodo aquece mais do que no negativo), tem-se um aumento da temperatura, conseqüentemente favorecendo a emissão termoiônica e diminuindo a  $V_{neg}$ . SCOTTI (1996), também observou que mesmo dentro do ciclo negativo, há um aumento da  $V_{neg}$  ao longo do tempo em que o eletrodo está carregado negativamente (Figura 4.6). SCOTTI usou este fato para suportar sua hipótese, ou seja, quanto maior o  $t_{neg}$ , maior a oxidação, maior dificuldade para penetração dos elétrons na chapa e, conseqüentemente, maior  $V_{neg}$ .

Mas, a primeira hipótese também é suportada, ou mesmo torna-se mais consistente, pois ao longo de  $t_{neg}$ , tem-se uma queda de temperatura, queda esta que tende a um ponto de equilíbrio. Pode-se perceber que  $V_{neg}$  tende a se estabilizar ao final do período negativo (Figura 4.6).

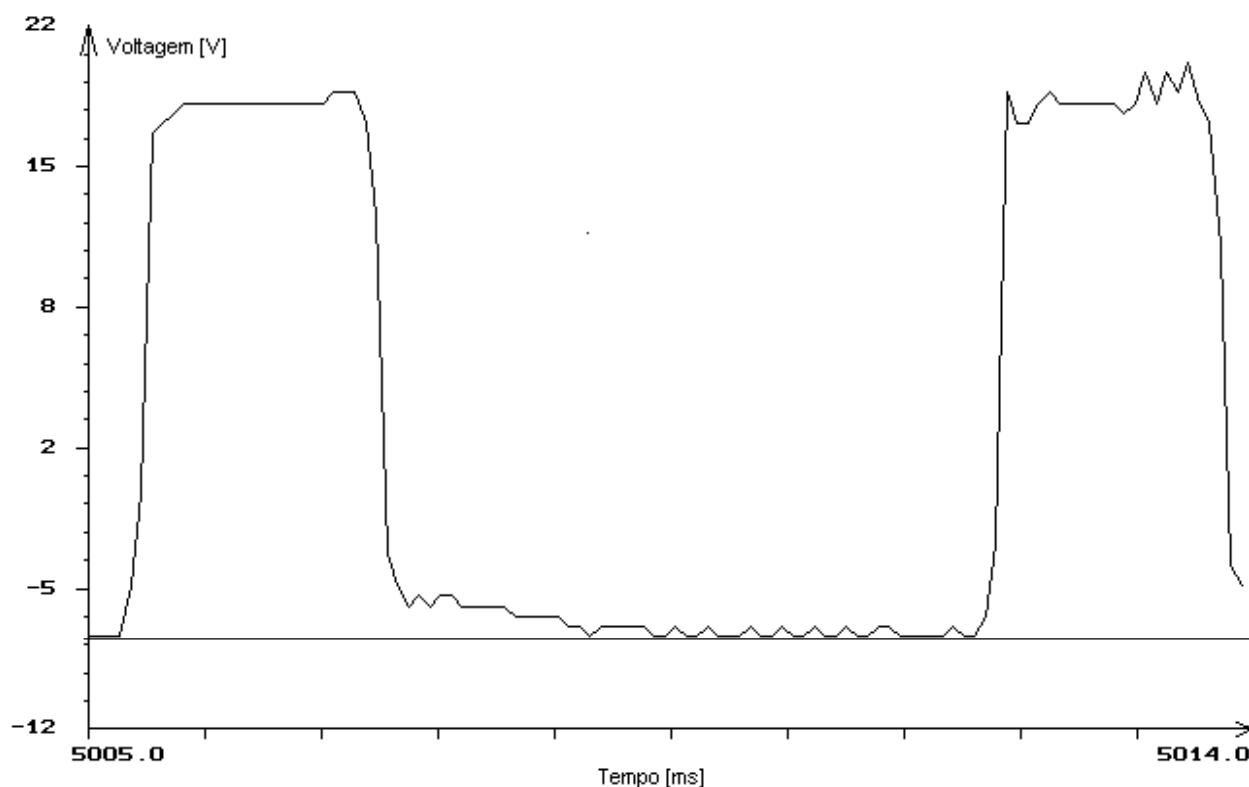


**Figura 4.6** - Aumento da tensão dentro do período negativo SCOTTI (1996)

Mesmo de forma qualitativa, fica difícil analisar a influência do tipo de eletrodo sobre as tensões ( $V_{pos}$  e  $V_{neg}$ ), pois, além de apresentar pequena significância, os vários tipos de eletrodos comportam-se de forma semelhante em relação a característica estática do arco, a partir de uma dada corrente, como ilustrado pela Figura 2.11 desta dissertação. No caso da  $V_{pos}$  já era esperado uma pequena influência do tipo de eletrodo devido ao tipo de emissão (emissão de campo) presente nesta situação. De acordo com MODENESI (1996), os eletrodos dopados tendem a apresentar uma queda de tensão catódica de 1 a 2 volts menor em relação ao eletrodo de Tungstênio puro, o que não foi observado pelos gráficos de média.

Semelhante ao tipo de eletrodo, a análise da tendência do ângulo de apontamento em relação às tensões é difícil de ser efetuada, pois, também apresenta pequena significância e, de uma forma geral, o apontamento foi perdido logo nos primeiros instantes de arco aberto e que diferentes formas geométricas foram observadas para cada eletrodo ensaiado (maiores detalhes no item 4.5), dificultando a análise deste fator.

#### 4.4 - Ensaios de Confirmação (Validação)

Em conformidade com o método de Taguchi, é necessário verificar se houve aditividade na matriz experimental, ou seja, verificar se o comportamento da resposta, no caso a média da taxa de desgaste por parada, pode ser avaliada pelos fatores principais (tipo de eletrodo, corrente, tneg e ângulo de apontamento) sem considerar possíveis interações (Anexo E).

Uma forma de se verificar essa aditividade é através dos ensaios de confirmação. No caso, repete-se soldagens usando-se combinações de parâmetros não previstos na matriz experimental, comparando-se em seguida suas respostas com valores estimados.

A escolha dos parâmetros de soldagem para realização dos testes de confirmação foram baseados na premissa acima e também procurando diminuir ao máximo a transferência de calor para a placa de alumínio (amenizar os problemas de empenamento da placa). Desta forma, foram selecionados os parâmetros nominais apresentados na Tabela 4.9, mantendo-se os mesmos valores já citados no capítulo III para a velocidade de soldagem, vazão do Argônio, comprimento do arco, comprimento útil do eletrodo e tpos.

**Tabela 4.9** - Valores nominais dos parâmetros de soldagem para os testes de confirmação

| Ensaio de Confirmação | Tipo de Eletrodo | Corrente Ipos = Ineg [A] | Ângulo da Ponta [Graus] | tneg [ms] |
|-----------------------|------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
| Extra 1               | EWP              | 215                      | 60                      | 10,00     |
| Extra 2               | EWTh             | 215                      | 60                      | 10,00     |
| Extra 3               | EWL <sub>a</sub> | 215                      | 60                      | 10,00     |

A Tabela 4.10 apresenta os valores médios dos sinais elétricos monitorados durante a realização dos testes de confirmação (o Anexo C apresenta todas as medições que geraram os valores médios apresentados nesta tabela).

**Tabela 4.10** - Valores médios de Ipos, Ineg, tpos, tneg, Vpos e Vneg dos ensaios de confirmação

|                 |        | Ipos [A] | Ineg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|-----------------|--------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| Extra 1<br>EWP  | Média  | 213,33   | 212,00   | 4,21      | 7,77      | 27,17    | 13,56    |
|                 | Desvio | 2,20     | 0,00     | 0,11      | 0,57      | 0,80     | 0,46     |
| Extra 2<br>EWTh | Média  | 210,00   | 207,56   | 4,13      | 7,72      | 26,99    | 13,95    |
|                 | Desvio | 0,00     | 1,67     | 0,13      | 0,61      | 0,73     | 0,83     |
| Extra 3         | Média  | 206,25   | 207,00   | 4,12      | 7,16      | 27,68    | 14,59    |

|                        |               |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| <b>EWL<sub>a</sub></b> | <b>Desvio</b> | 2,31 | 0,00 | 0,07 | 0,41 | 0,74 | 1,12 |
|------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|

Como no item 4.2.2, a Tabela 4.11 apresenta os valores médios da taxa de desgaste por parada dos ensaios de confirmação, considerando os três diferentes intervalos de dados. Todos os valores referentes à taxa de desgaste por parada, obtidos durante o ensaio de confirmação, podem ser vistos no Anexo D.

**Tabela 4.11** - Diferentes formas de apresentar a média da taxa de desgaste por parada para os ensaios de confirmação

|                                          |               | Taxa de desgaste considerando todo intervalo [g/s] | Taxa de desgaste considerando intervalo ( $M \pm 2\delta$ ) [g/s] | Taxa de desgaste Considerando intervalo ( $M \pm \delta$ ) [g/s] |
|------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Extra 1</b><br><b>EWP</b>             | <b>Média</b>  | 5,336E-06                                          | 5,336E-06                                                         | 5,213E-06                                                        |
|                                          | <b>Desvio</b> | 2,213E-06                                          | 2,213E-06                                                         | 0,979E-06                                                        |
| <b>Extra 2</b><br><b>EWTh</b>            | <b>Média</b>  | 9,105E-06                                          | 9,105E-06                                                         | 6,059E-06                                                        |
|                                          | <b>Desvio</b> | 6,564E-06                                          | 6,564E-06                                                         | 3,585E-06                                                        |
| <b>Extra 3</b><br><b>EWL<sub>a</sub></b> | <b>Média</b>  | 3,030E-06                                          | 3,226E-06                                                         | 3,120E-06                                                        |
|                                          | <b>Desvio</b> | 0,627E-06                                          | 0,379E-06                                                         | 0,314E-06                                                        |

Para calcular os valores estimados de taxa de desgaste e tensão dos ensaios de confirmação (visando a comparação com os valores encontrados), inicialmente calcula-se o valor da função objetiva ( $\eta$ ), conhecida também como “valor da razão Sinal/Ruído” (ver maiores detalhes no Anexo E), através da Equação 4.1.

$$\eta = m + (m_{A_1} - m) + (m_{B_3} - m) + \dots \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde: -  $\eta$  é o valor estimado da função objetiva;

-  $m$  é a média geral;

-  $m_{A_1}$ ,  $m_{B_3}$ , etc; são as médias obtidas para as condições  $A_1$ ,  $B_3$ , etc. Onde o índice literal representa o fator e o índice numérico representa o nível deste fator.

O Anexo F fornece as tabelas com os valores das médias gerais e as médias obtidas para cada condição, ou seja, para cada nível.

Como utilizou-se transformada do tipo “menor é o melhor” (itens 4.2.3 e 4.3), para encontrar o valor estimado da resposta ( $y$ ), substitui-se o valor  $\eta$ , encontrado pela Equação 4.1 na Equação 4.2 (resultado do isolamento de  $y$  na Equação E.2, Anexo E)

$$y = \sqrt[10]{\left(\frac{-\eta}{10}\right)} \quad (\text{Equação 4.2})$$

A Tabela 4.12 apresenta os valores estimados ( $y$ ) dos testes de confirmação. Os valores em negrito indicam que o valor estimado ficou contido no intervalo média  $\pm$  desvio padrão, cujos dados estão apresentados na Tabela 4.10 (para  $V_{pos}$  e  $V_{neg}$ ) e 4.11 (para taxa de desgaste).

**Tabela 4.12** - Dados estimados ( $y$ ) para a taxa de desgaste e tensão dos testes de confirmação

|         | Taxa de desgaste considerando todo intervalo [g/s] | Taxa de desgaste considerando intervalo ( $M \pm 2\delta$ ) [g/s] | Taxa de desgaste considerando intervalo ( $M \pm \delta$ ) [g/s] | $V_{pos}$ [V] | $V_{neg}$ [V] |
|---------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| Extra 1 | <b>6,114E-06</b>                                   | <b>4,379E-06</b>                                                  | <b>4,411E-06</b>                                                 | <b>26,49</b>  | <b>13,10</b>  |
| Extra 2 | <b>5,369E-06</b>                                   | <b>3,570E-06</b>                                                  | <b>2,810E-06</b>                                                 | <b>26,72</b>  | 12,83         |
| Extra 3 | <b>2,773E-06</b>                                   | 2,207E-06                                                         | 1,983E-06                                                        | 26,88         | <b>13,51</b>  |

Apesar da análise dos resultados ter sido efetuada de forma qualitativa, a Tabela 4.12 sugere que há uma concordância entre estes e os resultados estimados pela análise de Taguchi. Isto suporta a hipótese da aditividade e, conseqüentemente, que a aplicação da matriz ortogonal baseada no método de Taguchi para planejamento experimental foi correta.

#### 4.5 - Variação da Geometria da Ponta do Eletrodo

Devido a grande importância da forma geométrica da ponta do eletrodo na estabilidade do arco e na geometria do cordão de solda no processo GTAW, este item será destinado para verificar as possíveis causas das diferentes formas das pontas dos eletrodos.

Para facilitar as análises do comportamento geométrico da ponta do eletrodo, é apresentado na Tabela 4.13 a faixa de corrente recomendada em CA para cada tipo de eletrodo, de acordo com a AWS (1992), como também os valores nominais de corrente e tneg para cada ensaio utilizados neste trabalho.

**Tabela 4.13** - Dados para análise das formas geométricas das pontas dos eletrodos ensaiados

|                 | Faixa de<br>Corrente<br>Recomendada<br>[A] | Corrente<br>Nominal<br>[A] | tneg<br>Nominal<br>[ms] |
|-----------------|--------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| <b>Ensaio 1</b> | 150 - 210                                  | 180                        | 10,00                   |
| <b>Ensaio 2</b> | 150 - 210                                  | 215                        | 20,00                   |
| <b>Ensaio 3</b> | 150 - 210                                  | 275                        | 40,00                   |
| <b>Ensaio 4</b> | 225 - 325                                  | 180                        | 20,00                   |
| <b>Ensaio 5</b> | 225 - 325                                  | 215                        | 40,00                   |
| <b>Ensaio 6</b> | 225 - 325                                  | 275                        | 10,00                   |
| <b>Ensaio 7</b> | 225 - 325                                  | 180                        | 40,00                   |
| <b>Ensaio 8</b> | 225 - 325                                  | 215                        | 10,00                   |
| <b>Ensaio 9</b> | 225 - 325                                  | 275                        | 20,00                   |

A Tabela 4.14 resume a evolução das mudanças geométricas das pontas dos eletrodos, verificado através dos perfis registrados, após cada parada em cada ensaio, como mencionado no capítulo III (item 3.6.2).

**Tabela 4.14** - Resumo da evolução das formas geométricas das pontas dos eletrodos em função das diferentes condições de ensaio (ver Tabela 4.13)

| <b>EWP</b>      | <b>Ensaio 1</b>                                                                        | <b>Ensaio 2</b>                                                                                         | <b>Ensaio 3</b>                                                                                        |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Parada 1</b> | Abaulamento da ponta                                                                   | Abaulamento da ponta                                                                                    | Abaulamento da ponta                                                                                   |
| <b>Parada 2</b> | Mantém-se o abaulamento                                                                | Mantém-se o abaulamento e surge uma trinca                                                              | O diâmetro da base da semi esfera começa a ficar menor que o diâmetro do eletrodo                      |
| <b>Parada 3</b> | Mantém-se o abaulamento                                                                | Mantém-se o abaulamento e a trinca evolui de tamanho                                                    | Há uma evolução bem pequena da redução do diâmetro da base da semi esfera em relação a parada anterior |
| <b>Parada 4</b> | O abaulamento começa a exceder o diâmetro do eletrodo                                  | Mantém-se o abaulamento e a trinca continua evoluindo e surge também uma auréola na base da semi esfera | O diâmetro da base da semi esfera continua a diminuir em relação a parada anterior                     |
| <b>Parada 5</b> | O abaulamento excede um pouco mais o diâmetro do eletrodo em relação a parada anterior | Mantém-se o abaulamento, surgem mais trincas, evolui as já existentes e aumenta a auréola               | O diâmetro da base da semi esfera continua a diminuir em relação a parada anterior                     |
| <b>Parada 6</b> | O abaulamento excede um pouco mais o diâmetro do eletrodo em relação a parada anterior | Aumento progressivo das trincas e da auréola em relação a parada anterior                               | O diâmetro da base da semi esfera continua a diminuir em relação a parada anterior                     |
| <b>Parada 7</b> | O abaulamento excede um pouco mais o diâmetro do eletrodo em relação a parada anterior | Aumento progressivo das trincas e da auréola em relação a parada anterior                               | Nota-se a partir desta parada uma estabilidade da forma da ponta do eletrodo                           |
| <b>Parada 8</b> | O abaulamento excede um pouco mais o diâmetro do eletrodo em relação a parada anterior | Aumento progressivo das trincas e da auréola em relação a parada anterior                               | Mantém-se a estabilidade da ponta do eletrodo                                                          |
| <b>Parada 9</b> | O abaulamento excede um pouco mais o diâmetro do eletrodo em relação a parada anterior | Aumento progressivo das trincas e da auréola em relação a parada anterior                               | Mantém-se a estabilidade da ponta do eletrodo                                                          |

Tabela 4.14 - Continuação

| EWTh            | Ensaio 4                                                                                                           | Ensaio 5                                                                                                         | Ensaio 6                                                                                                                                       |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Parada 1</b> | Manteve-se a forma do apontamento e perdeu a extremidade do eletrodo                                               | Manteve-se a forma do apontamento e perdeu a extremidade do eletrodo. Há o surgimento de pequenas protuberâncias | Perdeu-se totalmente o apontamento, apresenta pequenas protuberâncias por toda a ponta além de uma maior localizada na extremidade do eletrodo |
| <b>Parada 2</b> | Manteve-se a mesma aparência da parada anterior. No entanto, apresenta uma grande protuberância em sua extremidade | A aparência da ponta do eletrodo se mantém, mas, as protuberância aumentam de tamanho                            | As protuberâncias aumentam de tamanho e novamente há uma grande protuberância na extremidade do eletrodo                                       |
| <b>Parada 3</b> | Manteve-se a mesma aparência da parada 1                                                                           | A aparência da ponta do eletrodo se mantém, mas, as protuberância continuam aumentando de tamanho                | Observa-se nesta imagem somente as protuberâncias menores                                                                                      |
| <b>Parada 4</b> | Nota-se a formação de pequenas protuberâncias em toda ponta do eletrodo                                            | A aparência da ponta do eletrodo se mantém, mas, as protuberância continuam aumentando de tamanho                | As protuberâncias continuam presentes e evoluindo de tamanho                                                                                   |
| <b>Parada 5</b> | Permanecem a mesma aparência e novamente surge uma grande protuberância na extremidade do eletrodo                 | A aparência da ponta do eletrodo se mantém, mas, as protuberância continuam aumentando de tamanho                | Nota-se nesta imagem uma grande evolução no tamanho das protuberâncias                                                                         |
| <b>Parada 6</b> | Mesma aparência da parada anterior, porém, sem a presença de uma grande protuberância                              | A aparência da ponta do eletrodo se mantém, mas, as protuberância continuam aumentando de tamanho                | As protuberâncias continuam evoluindo de tamanho e observa-se uma grande protuberância na extremidade do eletrodo                              |
| <b>Parada 7</b> | O desgaste faz com que o eletrodo comece a perder a forma do apontamento                                           | Devido ao tamanho das protuberâncias, o eletrodo começa a perder parte de seu apontamento                        | As protuberâncias continuam presentes e evoluindo de tamanho                                                                                   |
| <b>Parada 8</b> | O desgaste continua evoluindo fazendo com que a região apontada diminua                                            | Continua de forma gradativa, a perda do apontamento e o aumento do tamanho das protuberâncias                    | As protuberâncias continuam presentes e evoluindo de tamanho                                                                                   |
| <b>Parada 9</b> | O desgaste continua                                                                                                | Continua de forma gradativa,                                                                                     | As protuberâncias                                                                                                                              |

|  |                                                     |                                                                  |                                            |
|--|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|  | evoluindo fazendo com que a região apontada diminua | a perda do apontamento e o aumento do tamanho das protuberâncias | continuam presentes e evoluindo de tamanho |
|--|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|

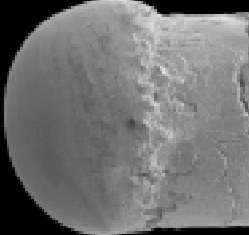
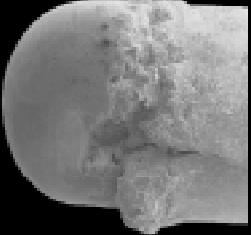
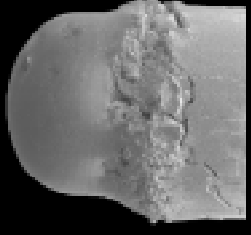
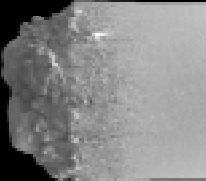
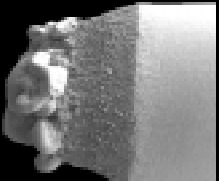
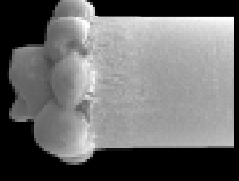
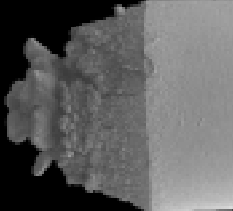
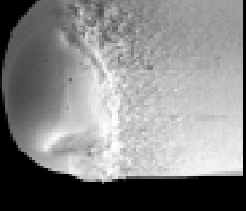
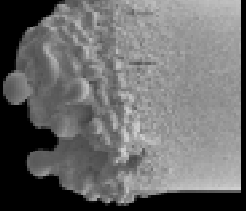
Tabela 4.14 - Continuação

| EWLa            | Ensaio 7                                                                                         | Ensaio 8                                                                                    | Ensaio 9                                                                                                    |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Parada 1</b> | Perda da extremidade do eletrodo com surgimento de pequenas protuberâncias                       | Abaulamento da ponta do eletrodo                                                            | Perda da extremidade do eletrodo com surgimento de pequenas protuberâncias                                  |
| <b>Parada 2</b> | Pequeno aumento no tamanho das protuberâncias acompanhado por uma perda por parte do apontamento | O abaulamento permanece praticamente idêntico ao da parada anterior                         | As protuberâncias evoluem de tamanho                                                                        |
| <b>Parada 3</b> | Pequeno aumento no tamanho das protuberâncias acompanhado por uma perda por parte do apontamento | O abaulamento permanece praticamente idêntico ao da parada anterior                         | As protuberâncias continuam aumentando de tamanho e o eletrodo começa perder a forma do apontamento         |
| <b>Parada 4</b> | Pequeno aumento no tamanho das protuberâncias acompanhado por uma perda por parte do apontamento | O abaulamento permanece praticamente idêntico ao da parada anterior                         | As protuberâncias continuam aumentando de tamanho e o eletrodo continua a perder a forma do apontamento     |
| <b>Parada 5</b> | Pequeno aumento no tamanho das protuberâncias acompanhado por uma perda por parte do apontamento | O abaulamento permanece praticamente idêntico ao da parada anterior                         | O eletrodo perde totalmente a forma do apontamento                                                          |
| <b>Parada 6</b> | Pequeno aumento no tamanho das protuberâncias acompanhado por uma perda por parte do apontamento | O abaulamento permanece praticamente idêntico ao da parada anterior                         | Mantém-se mesma aparência da parada anterior. No entanto, as protuberâncias continuam aumentando de tamanho |
| <b>Parada 7</b> | Pequeno aumento no tamanho das protuberâncias acompanhado por uma perda por parte do apontamento | O abaulamento permanece praticamente idêntico ao da parada anterior                         | Mantém-se mesma aparência da parada anterior. No entanto, as protuberâncias continuam aumentando de tamanho |
| <b>Parada 8</b> | Pequeno aumento no tamanho das protuberâncias acompanhado por uma perda por parte do apontamento | A forma semi esférica do abaulamento começa a ter um pequeno achatamento em sua extremidade | Mantém-se mesma aparência da parada anterior. No entanto, as protuberâncias continuam aumentando de tamanho |
| <b>Parada 9</b> | Pequeno aumento no tamanho das protuberâncias acompanhado por uma perda por parte do             | O achatamento torna-se mais evidente nesta imagem                                           | Mantém-se mesma aparência da parada anterior. No entanto, as protuberâncias                                 |

|  |             |  |                                 |
|--|-------------|--|---------------------------------|
|  | apontamento |  | continuam aumentando de tamanho |
|--|-------------|--|---------------------------------|

A Tabela 4.15 mostra as formas finais das pontas dos eletrodos após aproximadamente 1 hora e 30 minutos de arco aberto, através de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura. O abaulamento das pontas é creditado à fusão (devido à alta função de trabalho) de toda superfície da ponta do eletrodo, enquanto as protuberâncias são creditadas ao desprendimento de materiais que se fundem localmente e independentemente na ponta do eletrodo (não é do conhecimento do autor o mecanismo de formação das mesmas, mas sugere-se que há uma semelhança com o mecanismo de formação da auréola, item 2.6.2).

**Tabela 4.15** - Reprodução da geometria das pontas dos eletrodos após 1,5 horas de arco aberto

|       | Ensaio 1                                                                            | Ensaio 2                                                                             | Ensaio 3                                                                              |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| EWP   |   |   |   |
|       | Ensaio 4                                                                            | Ensaio 5                                                                             | Ensaio 6                                                                              |
| EWTh  |  |  |  |
|       | Ensaio 7                                                                            | Ensaio 8                                                                             | Ensaio 9                                                                              |
| EWL a |  |  |  |

Obs.: As imagens das pontas dos eletrodos estão fora de escala, mas lembrando que todos eles possuem 3,2 mm de diâmetro.

Através das Tabelas 4.13 a 4.15, pode-se observar que de uma forma geral, que os parâmetros de soldagem não interferiram na forma geométrica dos eletrodos de Tungstênio puro, pois, mesmo para correntes fora da faixa recomendada, todos eles apresentaram logo nos primeiros instantes de arco aberto o formato abaulado e o mantiveram até o final, resultado este creditado a alta função de trabalho deste tipo de eletrodo. No entanto, pode-se verificar através das formas geométricas finais do EWP (Tabela 4.15), que a medida que a corrente nominal foi aumentada (de um ensaio para outro), o tneg também o foi, e que o diâmetro da semi esfera em relação ao diâmetro do eletrodo sofreu uma pequena diminuição (deixou de fundir).

De acordo com SAUDERS (1989), se o diâmetro do eletrodo for menor do que o exigido pela corrente nominal de trabalho (como nos ensaios 2 e 3), pode-se formar um grande abaulamento (maior que o diâmetro do eletrodo), tornando o arco mais instável e com possibilidade de projetar Tungstênio para dentro da poça de fusão. Esta afirmação foi contrariada pelos eletrodos dos ensaios 2 e 3, pois, apesar da corrente de soldagem estar acima da faixa de corrente recomendada, apresentou um menor diâmetro da semi esfera.

Para explicar esta divergência de resultados, pode-se formular algumas hipóteses. Supondo-se haver ação apenas da força da gravidade (e considerando que a tensão superficial não varia com a temperatura), um eletrodo de maior desgaste (consumo) deveria desprender mais material, que no caso teria de ser na forma de gotas de mesmo diâmetro e em vôo livre, proporcionando um abaulamento igual da ponta indiferentemente da corrente. Esta hipótese é facilmente renegada, pois não é real (existem outras forças atuantes) e nem o que aconteceu.

Considere agora que, além da gravidade, estará atuando também a força devido à tensão superficial (agora variável). Uma maior temperatura deveria diminuir a tensão superficial, o que faria com que o eletrodo de maior desgaste (maior temperatura) desprendesse em maior quantidade, mas com gotas menores.

Na realidade, além da gravidade e tensão superficial, estará agindo também o efeito da força eletromagnética. Pode-se esperar uma diminuição maior ainda do abaulamento do eletrodo sob maior corrente (efeito “pinch”).

Esta duas últimas hipóteses poderiam justificar o encontrado neste trabalho, mas não suportaria a afirmação de Sauders. Deve-se chamar atenção para o fato de Sauders estar se referindo ao desgaste com eletrodo em CA com onda senoidal, onde  $t_{pos} = t_{neg}$ . Nos resultados deste trabalho, tem-se que  $t_{neg}$  é muito maior que o  $t_{pos}$ . Se, por um lado, um aumento da corrente leva a um aumento da temperatura do eletrodo (e do desgaste), principalmente durante permanência na polaridade positiva, por outro lado um aumento da

relação entre  $t_{neg}$  e  $t_{pos}$  leva a uma diminuição da temperatura do eletrodo (e do desgaste) para uma dada corrente.

Uma nova hipótese pode então ser levantada, baseada no processo GMAW pulsado. Durante o tempo na polaridade positiva (equivalente ao pulso no GMAW pulsado), há uma grande fusão e desgaste do eletrodo, mas durante a polaridade negativa (equivalente a base no GMAW pulsado), a fusão da ponta do eletrodo não acontece (como em soldagem em CC-), ou seja, a intensidade de corrente controla a taxa de desgaste e o tempo na polaridade negativa controla o tamanho da gota (evita abaulamento do eletrodo, ou seja, mantém a forma geométrica).

No caso das afirmações de Sauders, como  $t_{neg} = t_{pos}$ , o efeito do controle do tamanho da ponta fundida pelo  $t_{neg}$  é menor, prevalecendo apenas o efeito de desgaste pela corrente. No caso dos resultados deste trabalho, o aumento da corrente levou a um maior desgaste, mas aumento da relação entre  $t_{neg}$  e  $t_{pos}$  proporcionou um abaulamento menor. Esta última hipótese, então, está em concordância com os dois resultados.

Outro aspecto analisado além do fenômeno de abaulamento da ponta dos eletrodos, foi a taxa de desgaste após a primeira parada. Pode-se verificar através do Anexo B, que os EWP apresentam uma elevada taxa de desgaste na primeira parada, que pode ser atribuído à perda do apontamento logo nos primeiros instantes de arco aberto. Em relação aos eletrodos dopados, somente duas condições levaram a perda do apontamento logo na primeira parada, ensaios 6 e 8. Entretanto, estas duas condições não apresentaram uma taxa de desgaste maior na primeira parada quando comparado com as demais. Então, falta evidências para afirmar que a maior taxa de desgaste na primeira parada seja devido unicamente à perda do apontamento.

Outra forma geométrica da ponta do eletrodo foi observada, ou seja, a formação de protuberâncias, que de forma semelhante a auréola (item 2.6.2), pode provocar grande instabilidade no arco e consequentemente grandes flutuações de tensão e pressão (Figura 2.16). Para os eletrodos torinados, pode-se notar que a medida que a corrente nominal aumentou, o tamanho das protuberâncias também aumentaram. Pode-se observar no ensaio 6 que as condições em relação ao calor transferido para o eletrodo são as mais críticas (maior corrente com menor  $t_{neg}$ ). Desta forma, assume-se que as altas temperaturas são as responsáveis pelas formações das grandes protuberâncias. Pode-se notar através da Tabela 4.14 e do Anexo B que nos ensaios 4 e 6, onde é verificado a presença de uma grande protuberância na extremidade do eletrodo, que futuramente vai ser responsável por uma maior taxa de desgaste na parada seguinte, devido a seu desprendimento do eletrodo.

Finalmente, os eletrodos lantanados, de uma forma geral, apresentaram melhor comportamento do que os eletrodos torinados, pois, mesmo para maior corrente nominal e com um tneg relativamente pequeno, as protuberâncias não foram tão grandes. Este comportamento pode ser explicado pelo fato do eletrodo lantanado possuir uma maior concentração de óxidos em sua ponta (ver detalhes no item 4.6), que conseqüentemente aumenta a emissão de elétrons, diminuindo a temperatura do eletrodo.

Um fato não esperado foi o aparecimento de uma ponta abaulada no eletrodo lantanado do ensaio 8. Esta observação foi ratificada no ensaio de confirmação com o eletrodo lantanado que também apresentou a forma abaulada. Estes ensaios (ensaio 8 e extra 3) possuem 2 parâmetros de suma importância em comum, além do tipo de eletrodo, a corrente nominal (215 A) e o tneg (10 ms), que podem ter sido os parâmetros responsáveis pelo abaulamento do eletrodo. Embora não se conheça a causa deste abaulamento, acredita-se que o mesmo esteja relacionado com a menor relação entre tneg e tpos, ou seja, no ensaio 8 e extra 3 esta relação foi de 2,5 (a menor entre todas as utilizadas), promovendo um maior aquecimento da ponta do eletrodo, fazendo com que a taxa de vaporização do elemento dopante supere a sua taxa de migração e, assim, aproximando o EWLa do EWP.

Esta mesma explicação não pode ser aplicada aos eletrodos torinados até o momento, pois pode haver combinações de parâmetros que promovem seu abaulamento (assunto para futuros trabalhos). De forma mais concreta, tem-se que a questão do abaulamento do EWLa é também tema para futuras pesquisas, pois, se conseguir encontrar o intervalo dos parâmetros que promovem o abaulamento do eletrodo lantanado, poderia se na sequência realizar um trabalho comparativo com o eletrodo de Tungstênio puro (recomendado principalmente para soldagem do alumínio, devido promover o abaulamento da ponta do eletrodo), mas que deixa a desejar em termos de emissividade e desgaste quando comparado aos eletrodos dopados.

#### **4.6 - Variação da Concentração de Óxidos ao Longo da Ponta do Eletrodo**

Como visto na revisão bibliográfica, o balanço entre a vaporização dos óxidos na superfície e sua alimentação (migração, no caso dos eletrodos de terra raras ou difusão, no caso dos eletrodos torinados) do interior do eletrodo para a superfície é quem governa a estabilidade e longa vida de operação do eletrodo. Este balanço pode levar à uma distribuição não uniforme dos óxidos ao longo do eletrodo, podendo haver uma concentração numa determinada região. A distribuição de temperatura a partir da conexão arco eletrodo, que é

uma função da função de trabalho, é quem governa a distribuição e/ou concentração de óxidos.

Para verificar a concentração de óxidos dois eletrodos foram submetidos a análise por EDX (detalhes no item 3.6.3), ou seja, o eletrodo do ensaio 4 (EWTh) e o eletrodo do ensaio 7 (EWLa). A Tabela 4.16 apresenta alguns dados referentes aos respectivos ensaios citado anteriormente, para que se possa melhor analisá-los.

**Tabela 4.16** - Dados para fins comparativos entre os ensaios 4 e 7

|                                    | <b>Ensaio 4<br/>(EWTh)</b> | <b>Ensaio 7<br/>(EWLa)</b> |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>I<sub>pos</sub> [A]</b>         | 174                        | 171                        |
| <b>I<sub>neg</sub> [A]</b>         | 176                        | 179                        |
| <b>t<sub>pos</sub> [ms]</b>        | 4,12                       | 4,03                       |
| <b>t<sub>neg</sub> [ms]</b>        | 18,54                      | 35,22                      |
| <b>V<sub>pos</sub> [V]</b>         | 24,9                       | 23,3                       |
| <b>V<sub>neg</sub> [V]</b>         | 13,3                       | 14,6                       |
| <b>ângulo da ponta [Graus]</b>     | 90                         | 60                         |
| <b>Taxa de desgaste [1E-6 g/s]</b> | 3,97                       | 0,85                       |

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam as distribuições do Tório e Lantânio na superfície do eletrodo depois de 1 hora e 30 minutos de arco aberto. Chama-se à atenção para o fato de que a escala dos eixos da ordenada serve somente como indicação do teor do elemento em questão ao longo da ponta do eletrodo, e que não deve ser utilizada como meio comparativo de uma figura para outra.

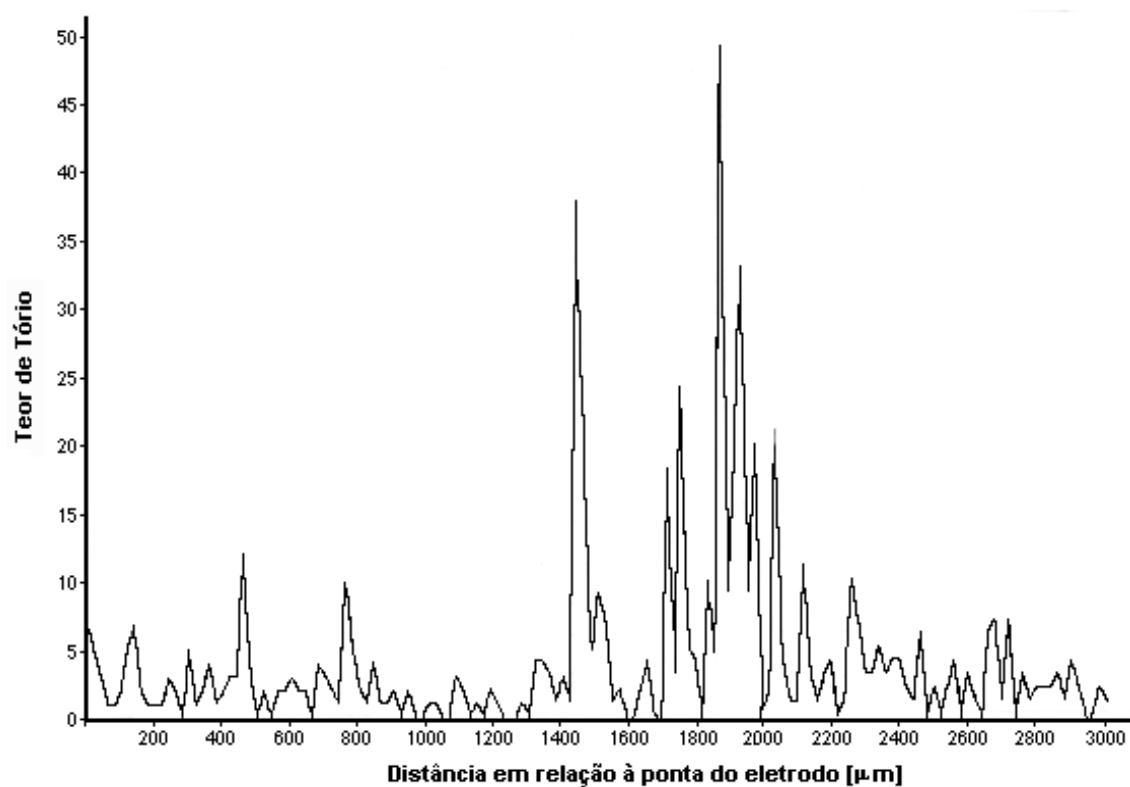


Figura 4.7 - Linha de análise por EDX para o Tório

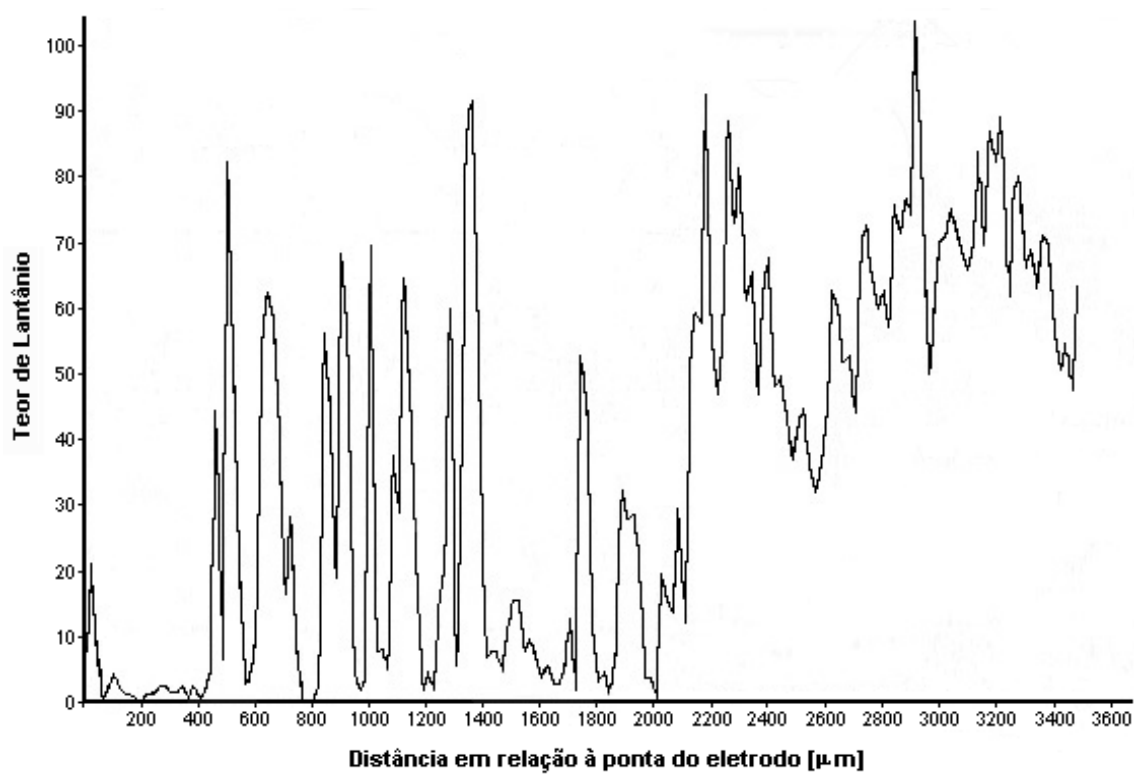


Figura 4.8 - Linha de análise por EDX para o Lantânio

Esta claramente evidenciado na Figura 4.7 que há uma concentração de Tório em uma determinada região perto da extremidade do eletrodo. Já na Figura 4.8 fica claro a existência de uma distribuição de óxidos de Lantânio por praticamente toda extensão da ponta do eletrodo. Estes resultados estão de acordo com os resultados de USHIO et al. (1992), pois, através da Figura 2.4 pode-se verificar uma estreita área de concentração de Tório e uma maior área de concentração dos óxidos de Lantânio. Se comparar a análise por EDX desse trabalho com a mostrada por Ushio et al., pode-se notar que tanto para o Tório como para o Lantânio tem-se relativamente uma maior área de concentração de óxidos. Isto pode ser explicado pelo fato de que Ushio et al. utilizou CC- enquanto nesse trabalho utilizou-se CA de onda retangular. Então, tem-se ao utilizar CC- uma distribuição de temperatura bem mais uniforme do que quando se opera com CA. Além disso, quando trabalha-se com CA tem-se uma maior temperatura do eletrodo devido a cada semi ciclo da onda o eletrodo operar como ânodo.

A concentração de óxidos de Lantânio (EWLa) ou de Tório (EWTh) próximo à extremidade do eletrodo é justificado pelo fenômeno de migração de óxidos (EWLa) ou difusão do Tório (EWTh) para regiões de maiores temperaturas (Figura 2.6). Entretanto, na extremidade do eletrodo, a temperatura se torna tão elevada que taxa de vaporização supera a de migração ou difusão e faz com que esta região se aproxime do Tungstênio puro.

Observando-se as Figuras 4.7 e 4.8 pode-se notar ainda que a região que tende ao Tungstênio puro do eletrodo torinado é muito maior do que a do eletrodo lantanado. Este resultado pode ser explicado pela maior taxa de migração dos óxidos de Lantânio em relação à taxa de difusão do Tório (concordando com USHIO et al., 1992 e 1991). Porém, é válido salientar que o Ensaio 4 (EWTh) trabalhou-se em condições de maior temperatura, devido seu tempo na polaridade negativa ser menor em relação ao Ensaio 7 (EWLa), portanto, ele não conseguiu suprir Tório na mesma proporção que ele vaporiza. Já no caso do EWLa há uma compensação entre a taxa de migração e a taxa de vaporização em uma extensa área da ponta do eletrodo.

Apesar da análise em relação às tensões de arco não serem estatisticamente significativa para evidenciar um melhor comportamento do eletrodo lantanado sobre o torinado e também dos eletrodos dopados em relação ao puro, a análise por EDX deixa claro que devido a maior área de concentração de óxidos na ponta do eletrodo lantanado, acredita-se que este tipo de eletrodo promoverá uma melhor emissividade de elétrons e longa vida de operação, sendo esta última afirmação comprovada pela análise da taxa de desgaste por parada.

## Capítulo V

### Conclusões

De acordo com as condições de trabalho desta dissertação e com os resultados, pode-se concluir que:

- 1) Os eletrodos com óxido de Lantânio apresentam menor taxa de desgaste e, conseqüentemente, vida mais longa em soldagens de Alumínio em CA com onda retangular. No entanto, mesmo em faixas de corrente recomendadas por manuais e trabalhando maioritariamente como cátodo, a destruição de sua ponta foi observada em alguns testes. Esta condição não é considerada adequada pela literatura corrente, para soldagem de Alumínio em CA;
- 2) Um abaulamento da ponta do eletrodo lantanado, ao invés de sua destruição, é possível se os parâmetros de soldagem forem corretamente selecionados, adequando-os para soldagem de Alumínio em CA;
- 3) Os eletrodos torinados apresentaram um comportamento semelhante aos dos eletrodos com óxido de Lantânio, mas com maior taxa de desgaste, vida mais curta e ausência de abaulamento da ponta;
- 4) Os eletrodos de W puro, apesar de apresentarem a maior taxa de desgaste, sempre apresentaram um abaulamento de sua ponta, independentemente das condições de soldagem.

Além das conclusões acima, pode-se ainda verificar que:

- a) A forma abaulada constatada em alguns eletrodos mostrou ser estável por longo tempo de operação, apesar de poderem ter uma maior taxa de desgaste;
- b) Praticamente só a corrente e o tneg influenciaram sobre a  $V_{pos}$  e a  $V_{neg}$ , sendo o tipo de eletrodo sem significância. A medição de  $V_{pos}$  e  $V_{neg}$  não serviu para auxiliar na diferenciação de emissividade entre eletrodos de Tungstênio puro e dopados;

c) A análise por EDX evidenciou a superioridade do eletrodo lantanado sobre o torinado com relação ao comportamento dos óxidos adicionados nestes tipos de eletrodos;

d) O modelo de migração (e/ou difusão) e vaporização proposto por USHIO et al. confirmaram-se mesmo em CA onda retangular. Entretanto, o tratamento dado à análise de emissividade e desgaste baseado apenas numa relação de corrente ou presença de elementos dopantes com a temperatura de operação é muito simplória, negligenciando outros fatores importantes.

Finalmente, uma nova hipótese para explicar o efeito da intensidade de corrente e da relação entre  $t_{neg}$  e  $t_{pos}$  sobre o abaulamento da ponta de eletrodos de Tungstênio puro foi proposta: durante o tempo na polaridade positiva há uma grande fusão e desgaste do eletrodo, mas durante a polaridade negativa a fusão da ponta do eletrodo não acontece, ou seja, a intensidade de corrente controla a taxa de desgaste e o tempo na polaridade negativa controla o tamanho da gota (abaulamento do eletrodo).

## **Capítulo VI**

### **Trabalhos Futuros**

- 1) Elaborar uma tabela de parâmetros (corrente, tempo negativo, tempo positivo e tipo de eletrodo) para soldagem GTAW com CA onda retangular, pois os valores fornecidos pela literatura corrente são baseados em CA senoidal e não são adequados à realidade das fontes CA onda retangular;
- 2) Comprovar se realmente o abaulamento da ponta do eletrodo fornece maior estabilidade de arco e/ou favorece a limpeza catódica para quando se trabalha com CA soldando Alumínio. Encontrar os intervalos dos parâmetros de soldagem que promovem o abaulamento da ponta do eletrodo de tungstênio lantanado e, depois, fazer um trabalho comparativo com o eletrodo de Tungstênio puro (mais recomendado para soldagem de Alumínio devido promover uma ponta abaulada). Verificar se há parâmetros de soldagem que também promove o abaulamento do eletrodo torinado. Verificar também a influência da forma geométrica da ponta do eletrodo (comparando ponta abaulada com ponta com protuberância), na estabilidade do arco e na geometria do cordão de solda;
- 3) Desenvolver um trabalho utilizando filmagem, para que se possa analisar o comportamento do eletrodo de tungstênio durante arco aberto e assim identificar a formação temporal de diferentes formas geométricas e suas influencias sobre a estabilidade do arco e do eletrodo;
- 4) Verificar de forma mais aprofundada a influência da microestrutura da ponta do eletrodo sobre o desgaste e estabilidade do mesmo. Estudar o mecanismo da formação de protuberâncias mostradas nesta dissertação;
- 5) Procurar um método para medir os pontos de fusão dos óxidos adicionados ao eletrodo de Tungstênio como também dos tungstatos e oxiungstatos mencionados nesta dissertação, pois, Ushio et al. (1992) apenas apresentaram valores, sem mencionar a fonte;
- 6) Devido às grandes oscilações da taxa desgaste que conseqüentemente leva a uma dificuldade de analisar estatisticamente o fenômeno, um novo estudo sobre desgaste deve ser efetuado, utilizando um planejamento experimental do tipo Fatorial Completo;

7) Verificar a influência dos parâmetros de soldagem em CA onda retangular na distribuição de temperatura da ponta do eletrodo. Desta forma, pode-se verificar o comportamento em relação a migração e/ou vaporização dos óxidos inicialmente adicionados ao eletrodo de Tungstênio. Verificar através de EDX, como se comporta os óxidos de Lantânio quando o EWLa possuir a forma abaulada;

8) Estudar o comportamento da função de trabalho do EWP em relação a variação da corrente;

9) Elaborar um modelo para verificar a influência do ângulo de apontamento na elevação da temperatura na ponta do eletrodo e as consequências sobre a emissividade e desgaste em soldagem GTAW em CC-;

10) Avaliar o desgaste dos eletrodos de Tungstênio utilizados no processo GTAW, utilizando Controle Dinâmico de Óxidos (NORRISH & OOI, 1993), como também a eficiência da limpeza catódica e térmica do processo.

Além das sugestões para futuros trabalhos, recomenda-se aos próximos pesquisadores as seguintes práticas experimentais:

a) Utilizar em testes com GTAW abertura de arco feita por alta frequência (AF), evitando assim contaminações e/ou desgastes indesejáveis;

b) Não utilizar o ângulo de apontamento do eletrodo como fator de análise, devido este parâmetro geralmente perder sua influência logo nos primeiros instantes de arco aberto em CA onda retangular;

c) Criar um critério para determinar o tempo de permanência do apontamento num eletrodo de tungstênio;

d) Utilizar AVC (*Automatic Voltage Control*) para manter o comprimento do arco constante (devido a possíveis deformações da chapa a ser soldada, principalmente em testes de longa duração), evitando assim resultados indesejáveis.

## **Capítulo VII**

### **Referências Bibliográficas**

ANTUNES, J.O. (1996). Soldagem de Alumínio Anodizado pelo Processo TIG CA com Onda Retangular. Uberlândia. /Relatório Interno PROSOLDA - UFU, n. 08/96, 19p./

AWS (1994). Safety & Health, Thoriated Tungsten Electrodes Studied for Effects on Welders' Health. Welding Journal, p. 88-89, May.

AWS (1992). Specification for Tungsten and Tungsten Alloy Electrodes for Arc Welding and Cutting. ANSI/AWS A5.12-92, Apr.

AWS (1991a). Welding Handbook. Welding Processes, Eighth Edition, American Welding Society, USA, v. 2, Cap. 3, p. 74-107.

AWS (1991b). Welding Handbook. Welding Technology, Eighth Edition, American Welding Society, USA, v. 1, Cap. 2, p. 32-63.

BARHORST, S. (1985). The Cathodic Etching Technique for Automated Aluminum Tube Welding. Welding Journal, p. 28-31, May.

BARWA, E.; SCHWAB, R. (1998). Operating Experiences of the Behavior of Tungsten Electrodes with Different Oxide Additions During Inert Gas Tungsten Arc Welding. Welding and Cutting, p. 17-20, Jan.

BILONI, H. et al. (1981). Manual de Soldadura do Alumínio. Buenos Aires - Argentina, Gerencia de Investigacion y Desarrollo, Aluar Alumínio Argentino, 127p.

CAMPBELL, R.D.; LACOURSIERE E.J. (1995). A Guide to the Use of Tungsten Electrodes for GTA Welding. Welding journal, p. 39-45, Jan.

COMISSION ON NOMENCLATURE OF INORGANIC CHEMISTRY (1960). J. Am. Chem., 5523, 82.

CULLITY, B.D. (1978). Elements of X-Ray Diffraction. Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Cap. 15, p. 421-446.

DUTRA, J.C. et al. (1992). Corrente Alternada de Onda Retangular: Uma Inovação com Tecnologia Nacional para a Soldagem a Arco do Alumínio. In: Congresso Regional Latino Americano de Soldagem, Rio de Janeiro, vol. 2, p. 989-999, abr.

DUTRA, J.C. et al. (1991). Estabilidade do Arco Voltaico TIG em Corrente Alternada. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Recife, p. 577-589, set.

GOLDSTEIN, J.I.; YAKOWITZ, H. (1976). Practical Scanning Electron Microscopy. Second Printing, Plenum Press - New York, 573p.

GREENWOOD, N.N.; EARNSHAW, A. (1994). Chemistry of the Elements. First Edition, Pergamon Press, Cap. 30, p.1423.

KELLER, C. (1981). Radioquímica. Recife, Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco, 348p.

MAHAN, B.H. (1981). Química um curso universitário. 2<sup>a</sup> edição, Editora Edgard Blücher LTDA, Cap. 19, p.621-635.

MATSUDA, F.; USHIO, M.; SADEK, A.A. (1988). Behavior of Rare Earth Metal Oxides during Arcing. Transactions of JWRI, v.17, n. 2, p. 281-289.

MATSUDA, F.; USHIO, M.; SADEK, A.A. (1990). Roles and Behaviors of Rare Earth Metal Oxides During the Operation of Tungsten Doped Electrodes. Transactions of the Japan Welding Society, v. 21, n. 2, p. 3-12, Oct.

MODENESI, P.J. (1996). Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Belo Horizonte: Laboratório de Soldagem da UFMG, 80p.

NIKOLIC, M.V. et al. (1996). The dependence of the Work Function of Rare Earth Metals on their Electron Structure. Microelectronics Journal, v. 27, n. 1, p. 93-96.

NORRISH, J. (1992). Advanced Welding Processes. Institute of Physics Publishing Bristol, Philadelphia and New York, Cap. 6, p. 95-129.

NORRISH, J.; OOI, C.L. (1993). Adaptive Asymmetric Waveform Control in Bipolar Gas Tungsten Arc Welding of Aluminum. Welding & Metal Fabrication, p. 230-232, June.

PASCHEN, P. (1996). Alternatives to Thorium Additions to Tungsten-Based Materials. JOM, p. 45-47, jan.

PHADKE, M.S. (1989). Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall Englewood Cliffs New Jersey, 334p.

REIS, R.A. (1996). Determinação de Parâmetros de Soldagem TIG com Arame Frio e Onda Retangular. Uberlândia. 141p. Dissertação (Mestrado) - CETEC, Universidade Federal de Uberlândia.

REIS, R.A.; SCOTTI, A. (1996). Determinação de Parâmetros da Soldagem de Alumínio com Onda Retangular. In: XXII ENCONTRO NACIONAL TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, Blumenau, p. 619-630, Jul.

RESCH, J.; LEICHTFRIED, G. (1995). Thorium Free Electrodes for Welding and Cutting Engineering. Welding & Metal Fabrication, p. 344-345, Aug./Sept.

RICHETTI, A. (1998). Avaliação do Desempenho do Programa de Aquisição de Dados MIG-REV (UBMIG). Uberlândia. /Relatório Interno PROSOLDA - UFU n. 13/98, 9p./

SADEK, A.A.; USHIO, M.; MATSUDA, F. (1990). Effect of Rare Earth Metal Oxide Additions to Tungsten Electrodes. Metallurgical Transactions A, v. 21A, p. 3221-3236, Dec.

SADEK, A.A. (1995). Effect of new Tungsten Electrodes on Hot Cracking Susceptibility. Materials Letters, p. 229-234, dec.

SAUDERS, H.L. (1989). Welding Aluminum: Theory and Practice, First Edition, Aluminum Association, Cap. 6, Mar.

SCOTTI, A. (1993). Soldagem de Alumínio e suas Ligas. Uberlândia: LAPROSOLDA - UFU. (Notas de aula).

SCOTTI, A.; DUTRA, J.C. (1996). Um Estudo sobre o Efeito dos Parâmetros sobre a Estabilidade do Arco e Geometria do Cordão em Soldagens GTAW usando CA com Onda Retangular Assimétrica. Uberlândia. /Relatório Interno PROSOLDA - UFU, n. 14/96, 27p./

SCOTTI, A.; REIS, R.A. (1999). Parameter Optimization of AC Rectangular Wave Outputs for Aluminum Cold Wire GTAW. Submetido para publicação na Revista Brasileira de Ciências Mecânicas.

SILVA, C.R. (1995). Confecção de um Manual de Utilização dos *Softwares* "Global Lab Acquire" e "Global Lab Image" V3.0 Aplicados à Soldagem. Uberlândia. /Relatório Interno PROSOLDA - UFU, n. 02/95, 33p./

TOMSIC, M.J. et al. (19--). Welding of Aluminum With Variable Polarity Power. IIW doc n. XII-839-84, 17p.

USHIO, M.; SADEK, A.A.; MATSUDA, F. (1991). Comparison of Temperature and Work Function Measurements Obtained with Different GTA Electrodes. Plasma Chemistry and Plasma Processing, v. 11, n. 1, p. 81-101.

USHIO, M.; MATSUDA, F.; SADEK, A.A. (1992). GTA Welding Electrode. In: International Trends in Welding Science and Technology, Tennessee, USA, p. 405-409, June.

## Anexos

### Anexo A - Apresentação de todas as medições dos sinais monitorados, para cada ensaio

#### Ensaio 1 - EWP

|                      | lpos [A] | lneg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Parada 1</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,37      | 8,59      | 24,09    | 12,90    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,37      | 8,59      | 24,12    | 12,90    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,03      | 8,75      | 24,09    | 12,81    |
| <b>Parada 2</b>      | 179,00   | 176,00   | 4,19      | 9,09      | 24,64    | 10,92    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,37      | 8,93      | 24,75    | 10,91    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,21      | 9,09      | 24,71    | 10,96    |
| <b>Parada 3</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 8,77      | 25,26    | 10,51    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,05      | 8,75      | 25,50    | 10,43    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,21      | 8,75      | 25,29    | 10,51    |
| <b>Parada 4</b>      | 179,00   | 176,00   | 4,21      | 8,75      | 25,50    | 11,60    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,19      | 8,93      | 25,40    | 11,70    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,37      | 8,59      | 25,23    | 11,64    |
| <b>Parada 5</b>      | 179,00   | 176,00   | 4,21      | 8,59      | 25,09    | 11,61    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,03      | 8,75      | 24,78    | 11,53    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,19      | 8,59      | 24,85    | 11,64    |
| <b>Parada 6</b>      | 179,00   | 176,00   | 4,21      | 8,59      | 24,60    | 12,10    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,21      | 8,57      | 24,50    | 12,14    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,03      | 8,59      | 24,57    | 12,12    |
| <b>Parada 7</b>      | 179,00   | 176,00   | 4,21      | 9,76      | 24,88    | 12,74    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,03      | 9,60      | 24,88    | 12,68    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,05      | 9,60      | 25,19    | 12,77    |
| <b>Parada 8</b>      | 179,00   | 176,00   | 4,19      | 9,09      | 24,87    | 12,97    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,19      | 9,09      | 24,75    | 13,08    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,21      | 9,25      | 24,82    | 12,99    |
| <b>Parada 9</b>      | 179,00   | 176,00   | 4,21      | 8,91      | 24,47    | 13,11    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 3,89      | 8,93      | 24,37    | 13,06    |
|                      | 179,00   | 176,00   | 4,03      | 8,91      | 24,50    | 13,11    |
| <b>Média</b>         | 178,07   | 176,00   | 4,18      | 8,90      | 24,80    | 12,05    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,21     | 0,00     | 0,08      | 0,34      | 0,41     | 0,95     |

## Ensaio 2 - EWP

|                      | <b>Ipos [A]</b> | <b>Ineg [A]</b> | <b>tpos [ms]</b> | <b>tneg [ms]</b> | <b>Vpos [V]</b> | <b>Vneg [V]</b> |
|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Parada 1</b>      | 205,00          | 207,00          | 4,05             | 19,17            | 26,94           | 15,90           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,05             | 19,01            | 26,74           | 15,93           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,21             | 18,85            | 26,94           | 15,94           |
| <b>Parada 2</b>      | 205,00          | 207,00          | 4,05             | 18,00            | 25,23           | 14,55           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,19             | 18,02            | 25,12           | 14,54           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,03             | 18,00            | 25,20           | 14,58           |
| <b>Parada 3</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 19,70            | 26,09           | 15,23           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 19,86            | 26,16           | 15,17           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 19,68            | 25,80           | 15,22           |
| <b>Parada 4</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 18,35            | 26,09           | 15,20           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 18,33            | 26,05           | 15,19           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 18,51            | 26,05           | 15,26           |
| <b>Parada 5</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 17,50            | 25,36           | 14,83           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 17,84            | 25,25           | 14,86           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 17,82            | 25,47           | 14,88           |
| <b>Parada 6</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 17,16            | 25,94           | 14,97           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 16,99            | 25,91           | 14,97           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 17,16            | 26,01           | 15,05           |
| <b>Parada 7</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 17,18            | 25,63           | 15,04           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 17,16            | 25,76           | 15,10           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 17,18            | 25,94           | 15,08           |
| <b>Parada 8</b>      | 210,00          | 212,00          | 4,37             | 22,06            | 26,27           | 15,58           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,05             | 22,03            | 26,49           | 15,68           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,03             | 22,22            | 26,25           | 15,63           |
| <b>Parada 9</b>      | 210,00          | 212,00          | 4,37             | 21,03            | 24,97           | 14,67           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,03             | 21,37            | 25,15           | 14,62           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,05             | 21,37            | 25,11           | 14,71           |
| <b>Média</b>         | 208,89          | 208,11          | 4,11             | 18,95            | 25,85           | 15,13           |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,20            | 2,20            | 0,04             | 1,77             | 0,58            | 0,44            |

## Ensaio 3 - EWP

|                      | Ipos [A] | Ineg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Parada 1</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 41,73     | 26,46    | 16,64    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,05      | 41,73     | 26,45    | 16,67    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 41,57     | 26,36    | 16,59    |
| <b>Parada 2</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,19      | 38,20     | 26,09    | 15,23    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 38,36     | 26,16    | 15,21    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 38,04     | 26,12    | 15,16    |
| <b>Parada 3</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 36,69     | 26,31    | 15,89    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 36,67     | 26,38    | 15,92    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 36,69     | 26,34    | 15,93    |
| <b>Parada 4</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 36,85     | 26,38    | 15,24    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,19      | 37,03     | 26,25    | 15,17    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 36,67     | 26,29    | 15,38    |
| <b>Parada 5</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,05      | 34,33     | 27,14    | 15,86    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 34,33     | 27,14    | 15,91    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 34,17     | 27,14    | 15,89    |
| <b>Parada 6</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,19      | 32,48     | 27,10    | 15,72    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,05      | 32,64     | 26,90    | 15,76    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,19      | 32,48     | 26,90    | 15,66    |
| <b>Parada 7</b>      | 266,00   | 263,00   | 4,21      | 32,14     | 27,66    | 15,50    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,05      | 32,48     | 27,49    | 15,62    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,03      | 32,48     | 27,25    | 15,78    |
| <b>Parada 8</b>      | 266,00   | 263,00   | 4,21      | 33,32     | 27,38    | 16,00    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,21      | 33,32     | 27,27    | 16,02    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,03      | 33,49     | 27,27    | 16,03    |
| <b>Parada 9</b>      | 266,00   | 263,00   | 3,87      | 31,47     | 27,10    | 15,27    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,37      | 31,13     | 27,10    | 15,06    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,21      | 31,29     | 26,84    | 15,06    |
| <b>Média</b>         | 266,00   | 266,33   | 4,12      | 35,25     | 26,79    | 15,71    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 0,00     | 2,50     | 0,05      | 3,36      | 0,49     | 0,48     |

## Ensaio 4 - EWTh

|                      | lpos [A] | lneg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Parada 1</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 18,85     | 23,47    | 12,93    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,05      | 19,01     | 23,54    | 13,10    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,21      | 19,01     | 23,33    | 13,11    |
| <b>Parada 2</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,05      | 18,00     | 25,70    | 12,94    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 17,84     | 25,43    | 12,98    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 18,00     | 25,26    | 12,86    |
| <b>Parada 3</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,21      | 17,16     | 24,02    | 12,65    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,21      | 17,34     | 23,98    | 12,65    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 16,99     | 24,02    | 12,78    |
| <b>Parada 4</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,21      | 17,16     | 25,40    | 12,28    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 17,50     | 25,53    | 12,41    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 17,16     | 25,36    | 12,46    |
| <b>Parada 5</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 20,87     | 23,83    | 14,75    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 21,05     | 23,86    | 14,70    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,21      | 20,87     | 23,76    | 14,75    |
| <b>Parada 6</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,21      | 19,35     | 23,99    | 13,61    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 19,19     | 24,06    | 13,61    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 19,35     | 24,08    | 13,52    |
| <b>Parada 7</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 18,85     | 25,42    | 13,50    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 18,53     | 25,13    | 13,32    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 18,69     | 25,51    | 13,24    |
| <b>Parada 8</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 18,51     | 25,54    | 13,18    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 18,35     | 25,72    | 13,27    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 18,35     | 26,22    | 13,30    |
| <b>Parada 9</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,05      | 18,16     | 26,44    | 13,68    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 18,16     | 26,74    | 13,75    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,19      | 18,18     | 26,54    | 13,70    |
| <b>Média</b>         | 174,00   | 176,00   | 4,12      | 18,54     | 24,88    | 13,30    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 0,00     | 0,00     | 0,03      | 1,14      | 1,08     | 0,68     |

## Ensaio 5 - EWTh

|                      | <b>Ipos [A]</b> | <b>Ineg [A]</b> | <b>tpos [ms]</b> | <b>tneg [ms]</b> | <b>Vpos [V]</b> | <b>Vneg [V]</b> |
|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Parada 1</b>      | 205,00          | 207,00          | 4,21             | 36,35            | 25,64           | 15,55           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,21             | 36,51            | 25,26           | 15,63           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,21             | 36,35            | 25,59           | 15,60           |
| <b>Parada 2</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 34,15            | 25,19           | 14,00           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 33,99            | 25,19           | 14,01           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 33,99            | 25,37           | 13,96           |
| <b>Parada 3</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 32,64            | 23,99           | 13,51           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,21             | 32,48            | 24,02           | 13,53           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,21             | 32,64            | 24,09           | 13,48           |
| <b>Parada 4</b>      | 205,00          | 207,00          | 4,05             | 32,14            | 24,46           | 14,02           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 32,16            | 24,37           | 13,92           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 32,32            | 24,39           | 13,97           |
| <b>Parada 5</b>      | 205,00          | 207,00          | 4,05             | 33,65            | 25,43           | 14,15           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 33,49            | 25,26           | 14,15           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 33,49            | 25,16           | 14,21           |
| <b>Parada 6</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 33,49            | 25,94           | 14,73           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,21             | 33,49            | 25,91           | 14,77           |
|                      | 205,00          | 207,00          | 4,19             | 33,51            | 26,01           | 14,81           |
| <b>Parada 7</b>      | 205,00          | 207,00          | 4,05             | 34,82            | 25,60           | 14,64           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 34,68            | 25,60           | 14,58           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 35,00            | 25,64           | 14,54           |
| <b>Parada 8</b>      | 210,00          | 212,00          | 4,05             | 40,88            | 24,83           | 15,45           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,03             | 40,88            | 24,78           | 15,46           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,19             | 40,90            | 25,01           | 15,49           |
| <b>Parada 9</b>      | 210,00          | 212,00          | 4,21             | 37,68            | 25,81           | 14,94           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,05             | 37,68            | 25,94           | 14,94           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,21             | 37,52            | 25,87           | 14,97           |
| <b>Média</b>         | 208,15          | 208,11          | 4,16             | 35,07            | 25,20           | 14,56           |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,76            | 2,20            | 0,06             | 2,80             | 0,65            | 0,71            |

## Ensaio 6 - EWTh

|                      | Ipos [A] | Ineg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Parada 1</b>      | 261,00   | 263,00   | 4,19      | 7,92      | 27,14    | 14,26    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 8,08      | 27,28    | 14,34    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,90      | 27,28    | 14,45    |
| <b>Parada 2</b>      | 261,00   | 263,00   | 4,37      | 7,40      | 28,79    | 15,01    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,21      | 7,40      | 29,10    | 14,36    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,05      | 7,40      | 29,14    | 14,27    |
| <b>Parada 3</b>      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,58      | 29,64    | 14,82    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,58      | 29,33    | 14,23    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,21      | 7,56      | 29,43    | 14,40    |
| <b>Parada 4</b>      | 266,00   | 263,00   | 4,19      | 7,24      | 28,01    | 13,96    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,24      | 28,18    | 14,73    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,21      | 7,06      | 28,38    | 13,96    |
| <b>Parada 5</b>      | 261,00   | 263,00   | 3,87      | 7,40      | 29,00    | 14,18    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,24      | 28,83    | 14,19    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,24      | 28,55    | 14,26    |
| <b>Parada 6</b>      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,24      | 28,52    | 14,83    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,21      | 7,24      | 28,55    | 14,83    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,08      | 28,45    | 14,97    |
| <b>Parada 7</b>      | 266,00   | 263,00   | 4,05      | 8,25      | 28,25    | 14,06    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,05      | 8,06      | 28,35    | 13,98    |
|                      | 266,00   | 263,00   | 4,05      | 8,06      | 28,42    | 14,06    |
| <b>Parada 8</b>      | 261,00   | 263,00   | 3,87      | 7,90      | 25,50    | 11,91    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 3,87      | 7,90      | 25,95    | 12,56    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,05      | 7,90      | 25,87    | 12,32    |
| <b>Parada 9</b>      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,58      | 27,69    | 12,25    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,40      | 27,75    | 12,01    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 7,58      | 27,87    | 12,14    |
| <b>Média</b>         | 261,93   | 263,00   | 4,07      | 7,57      | 28,12    | 13,90    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,69     | 0,00     | 0,08      | 0,35      | 1,10     | 1,00     |

## Ensaio 7 - EWLa

|                      | lpos [A] | lneg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Parada 1</b>      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 36,85     | 23,07    | 14,70    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 36,69     | 23,06    | 14,64    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 36,69     | 23,03    | 14,68    |
| <b>Parada 2</b>      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 34,49     | 23,58    | 14,42    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,21      | 34,33     | 23,30    | 14,50    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,37      | 34,15     | 23,34    | 14,43    |
| <b>Parada 3</b>      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 34,17     | 23,44    | 14,62    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 34,17     | 23,55    | 14,76    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 33,99     | 23,16    | 14,73    |
| <b>Parada 4</b>      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 34,51     | 23,51    | 13,98    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 3,87      | 34,68     | 23,95    | 14,04    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 34,68     | 23,91    | 14,11    |
| <b>Parada 5</b>      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 34,33     | 23,62    | 14,90    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,05      | 34,31     | 23,62    | 14,82    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,05      | 34,49     | 23,82    | 14,91    |
| <b>Parada 6</b>      | 169,00   | 181,00   | 4,05      | 34,31     | 23,55    | 14,82    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 34,17     | 23,44    | 14,84    |
|                      | 169,00   | 181,00   | 4,03      | 34,33     | 23,41    | 14,82    |
| <b>Parada 7</b>      | 174,00   | 176,00   | 3,71      | 38,18     | 22,51    | 14,79    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,05      | 38,02     | 22,43    | 14,76    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,05      | 37,86     | 22,61    | 14,65    |
| <b>Parada 8</b>      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 36,03     | 23,30    | 14,77    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,05      | 36,01     | 23,26    | 14,70    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 35,84     | 23,26    | 14,79    |
| <b>Parada 9</b>      | 174,00   | 176,00   | 3,87      | 34,49     | 22,96    | 14,57    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 34,49     | 23,12    | 14,66    |
|                      | 174,00   | 176,00   | 4,03      | 34,51     | 23,09    | 14,70    |
| <b>Média</b>         | 170,67   | 179,33   | 4,03      | 35,22     | 23,29    | 14,63    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,50     | 2,50     | 0,08      | 1,38      | 0,38     | 0,25     |

## Ensaio 8 - EWLa

|                      | lpos [A] | lneg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Parada 1</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,56      | 26,83    | 12,60    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,40      | 26,69    | 12,84    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,56      | 26,81    | 12,63    |
| <b>Parada 2</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,24      | 28,01    | 12,87    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,24      | 28,66    | 13,38    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,24      | 28,09    | 13,80    |
| <b>Parada 3</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,74      | 29,26    | 13,93    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,74      | 29,39    | 12,39    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 3,87      | 7,90      | 28,92    | 12,97    |
| <b>Parada 4</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,06      | 27,92    | 14,06    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,40      | 27,85    | 14,27    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 6,89      | 27,41    | 13,88    |
| <b>Parada 5</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 6,89      | 26,99    | 12,80    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 3,87      | 7,08      | 27,23    | 12,87    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,06      | 27,40    | 13,25    |
| <b>Parada 6</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 6,89      | 28,25    | 11,93    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 6,91      | 28,47    | 12,46    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,06      | 28,65    | 12,62    |
| <b>Parada 7</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,40      | 26,29    | 11,54    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,58      | 26,20    | 11,85    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,24      | 26,65    | 12,10    |
| <b>Parada 8</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,08      | 27,06    | 12,62    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,08      | 27,01    | 12,91    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,08      | 26,24    | 12,85    |
| <b>Parada 9</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,24      | 28,22    | 13,17    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,24      | 28,11    | 13,19    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,40      | 27,99    | 13,29    |
| <b>Média</b>         | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,27      | 27,65    | 12,93    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 0,00     | 0,00     | 0,03      | 0,27      | 0,93     | 0,64     |

## Ensaio 9 - EWLa

|                      | Ipos [A] | Ineg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Parada 1</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 20,36     | 28,48    | 17,99    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 20,36     | 28,63    | 17,70    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,05      | 20,52     | 28,74    | 18,09    |
| <b>Parada 2</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 18,85     | 27,35    | 15,50    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,19      | 18,69     | 27,28    | 15,50    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 18,51     | 27,45    | 15,60    |
| <b>Parada 3</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 16,65     | 27,80    | 17,37    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 16,81     | 28,00    | 17,22    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,37      | 16,83     | 27,90    | 17,33    |
| <b>Parada 4</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 16,67     | 27,83    | 16,28    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 16,49     | 28,07    | 16,41    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,37      | 16,49     | 28,25    | 16,56    |
| <b>Parada 5</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,03      | 16,17     | 27,89    | 17,13    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,21      | 16,15     | 28,17    | 17,23    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,37      | 15,83     | 28,11    | 17,05    |
| <b>Parada 6</b>      | 266,00   | 268,00   | 4,05      | 17,66     | 27,66    | 16,65    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,19      | 17,84     | 27,49    | 16,57    |
|                      | 266,00   | 268,00   | 4,19      | 17,84     | 27,70    | 16,72    |
| <b>Parada 7</b>      | 261,00   | 263,00   | 4,37      | 16,49     | 27,61    | 16,28    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 16,65     | 27,35    | 15,91    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 16,65     | 27,58    | 16,06    |
| <b>Parada 8</b>      | 261,00   | 263,00   | 4,05      | 16,49     | 27,67    | 15,89    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,05      | 16,65     | 27,59    | 15,99    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,21      | 16,33     | 27,56    | 16,03    |
| <b>Parada 9</b>      | 261,00   | 263,00   | 4,37      | 17,66     | 27,90    | 16,18    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 18,00     | 28,04    | 16,00    |
|                      | 261,00   | 263,00   | 4,03      | 17,68     | 27,97    | 16,34    |
| <b>Média</b>         | 264,33   | 266,33   | 4,16      | 17,46     | 27,85    | 16,58    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,50     | 2,50     | 0,04      | 1,39      | 0,38     | 0,76     |

## Anexo B - Variação de massa e taxa de desgaste de todos eletrodos ensaiados

**Ensaio 1 - EWP**

| Parada | Tempo total<br>[s] | Variação de massa por parada<br>[g] | Variação acumulada de massa<br>[g] | Taxa de desgaste por parada<br>[g/s] |
|--------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1      | 603                | 8,00E-03                            | 8,00E-03                           | 13,27E-06                            |
| 2      | 1206               | 3,60E-03                            | 1,16E-02                           | 5,97E-06                             |
| 3      | 1809               | 1,70E-03                            | 1,33E-02                           | 2,82E-06                             |
| 4      | 2411               | 2,70E-03                            | 1,60E-02                           | 4,49E-06                             |
| 5      | 3012               | 4,20E-03                            | 2,02E-02                           | 6,99E-06                             |
| 6      | 3614               | 3,40E-03                            | 2,36E-02                           | 5,65E-06                             |
| 7      | 4215               | 3,20E-03                            | 2,68E-02                           | 5,32E-06                             |
| 8      | 4816               | 3,00E-03                            | 2,98E-02                           | 4,99E-06                             |
| 9      | 5418               | -                                   | -                                  | -                                    |

**Ensaio 2 - EWP**

| Parada | Tempo total<br>[s] | Variação de massa por parada<br>[g] | Variação acumulada de massa<br>[g] | Taxa de desgaste por parada<br>[g/s] |
|--------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1      | 602                | 7,20E-03                            | 7,20E-03                           | 11,96E-06                            |
| 2      | 1204               | 2,00E-03                            | 9,20E-03                           | 3,32E-06                             |
| 3      | 1805               | 3,50E-03                            | 1,27E-02                           | 5,82E-06                             |
| 4      | 2407               | 2,80E-03                            | 1,55E-02                           | 4,65E-06                             |
| 5      | 3009               | 3,30E-03                            | 1,88E-02                           | 5,48E-06                             |
| 6      | 3610               | 2,70E-03                            | 2,15E-02                           | 4,49E-06                             |
| 7      | 4212               | 3,00E-03                            | 2,45E-02                           | 4,98E-06                             |
| 8      | 4732               | 2,30E-03                            | 2,68E-02                           | 4,42E-06                             |
| 9      | 5334               | 4,50E-03                            | 3,13E-02                           | 7,48E-06                             |

**Ensaio 3 - EWP**

| Parada | Tempo total<br>[s] | Variação de massa por parada<br>[g] | Variação acumulada de massa<br>[g] | Taxa de desgaste por parada<br>[g/s] |
|--------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1      | 602                | 8,10E-03                            | 8,10E-03                           | 13,46E-06                            |
| 2      | 1205               | 4,00E-03                            | 1,21E-02                           | 6,63E-06                             |
| 3      | 1807               | 4,20E-03                            | 1,63E-02                           | 6,98E-06                             |
| 4      | 2409               | 4,30E-03                            | 2,06E-02                           | 7,14E-06                             |
| 5      | 3011               | 7,00E-03                            | 2,76E-02                           | 11,63E-06                            |
| 6      | 3613               | 7,40E-03                            | 3,50E-02                           | 12,29E-06                            |
| 7      | 4214               | 4,90E-03                            | 3,99E-02                           | 8,15E-06                             |
| 8      | 4816               | 6,40E-03                            | 4,63E-02                           | 10,63E-06                            |
| 9      | 5418               | 6,60E-03                            | 5,29E-02                           | 10,96E-06                            |

**Ensaio 4 - EWTh**

| <b>Parada</b> | <b>Tempo total<br/>[s]</b> | <b>Variação de massa por parada<br/>[g]</b> | <b>Variação acumulada de massa<br/>[g]</b> | <b>Taxa de desgaste por parada<br/>[g/s]</b> |
|---------------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1             | 602                        | 2,10E-03                                    | 2,10E-03                                   | 3,49E-06                                     |
| 2             | 1204                       | 1,70E-03                                    | 3,80E-03                                   | 2,82E-06                                     |
| 3             | 1805                       | 2,90E-03                                    | 6,70E-03                                   | 4,83E-06                                     |
| 4             | 2407                       | 2,40E-03                                    | 9,10E-03                                   | 3,99E-06                                     |
| 5             | 3008                       | 2,90E-03                                    | 1,20E-02                                   | 4,83E-06                                     |
| 6             | 3610                       | 3,50E-03                                    | 1,55E-02                                   | 5,81E-06                                     |
| 7             | 4212                       | 1,70E-03                                    | 1,72E-02                                   | 2,82E-06                                     |
| 8             | 4813                       | 2,20E-03                                    | 1,94E-02                                   | 3,66E-06                                     |
| 9             | 5414                       | 2,10E-03                                    | 2,15E-02                                   | 3,49E-06                                     |

**Ensaio 5 - EWTh**

| <b>Parada</b> | <b>Tempo total<br/>[s]</b> | <b>Variação de massa por parada<br/>[g]</b> | <b>Variação acumulada de massa<br/>[g]</b> | <b>Taxa de desgaste por parada<br/>[g/s]</b> |
|---------------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1             | 601                        | 4,40E-03                                    | 4,40E-03                                   | 7,32E-06                                     |
| 2             | 1202                       | 4,80E-03                                    | 9,20E-03                                   | 7,99E-06                                     |
| 3             | 1804                       | 3,20E-03                                    | 1,24E-02                                   | 5,32E-06                                     |
| 4             | 2406                       | 1,10E-03                                    | 1,35E-02                                   | 1,83E-06                                     |
| 5             | 3007                       | 1,20E-03                                    | 1,47E-02                                   | 2,00E-06                                     |
| 6             | 3608                       | 1,20E-03                                    | 1,59E-02                                   | 2,00E-06                                     |
| 7             | 4209                       | 2,20E-03                                    | 1,81E-02                                   | 3,66E-06                                     |
| 8             | 4810                       | 1,70E-03                                    | 1,98E-02                                   | 2,83E-06                                     |
| 9             | 5412                       | 1,60E-03                                    | 2,14E-02                                   | 2,66E-06                                     |

**Ensaio 6 - EWTh**

| <b>Parada</b> | <b>Tempo total<br/>[s]</b> | <b>Variação de massa por parada<br/>[g]</b> | <b>Variação acumulada de massa<br/>[g]</b> | <b>Taxa de desgaste por parada<br/>[g/s]</b> |
|---------------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1             | 601                        | 2,30E-03                                    | 2,30E-03                                   | 3,83E-06                                     |
| 2             | 1203                       | 3,98E-02                                    | 4,21E-02                                   | 66,11E-06                                    |
| 3             | 1805                       | 1,14E-02                                    | 5,35E-02                                   | 18,94E-06                                    |
| 4             | 2377                       | 4,90E-03                                    | 5,84E-02                                   | 8,57E-06                                     |
| 5             | 2978                       | 1,30E-03                                    | 5,97E-02                                   | 2,16E-06                                     |
| 6             | 3580                       | 2,90E-03                                    | 6,26E-02                                   | 4,82E-06                                     |
| 7             | 4182                       | 9,60E-03                                    | 7,22E-02                                   | 15,95E-06                                    |
| 8             | 4784                       | 4,30E-03                                    | 7,65E-02                                   | 7,14E-06                                     |
| 9             | 5385                       | 5,70E-03                                    | 8,22E-02                                   | 9,48E-06                                     |

**Ensaio 7 - EWLa**

| <b>Parada</b> | <b>Tempo total<br/>[s]</b> | <b>Variação de massa por parada<br/>[g]</b> | <b>Variação acumulada de massa<br/>[g]</b> | <b>Taxa de desgaste por parada<br/>[g/s]</b> |
|---------------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1             | 602                        | 6,00E-04                                    | 6,00E-04                                   | 0,97E-06                                     |
| 2             | 1203                       | 6,00E-04                                    | 1,20E-03                                   | 0,98E-06                                     |
| 3             | 1805                       | 7,00E-04                                    | 1,90E-03                                   | 1,16E-06                                     |
| 4             | 2406                       | 3,00E-04                                    | 2,20E-03                                   | 0,50E-06                                     |
| 5             | 3008                       | 4,00E-04                                    | 2,60E-03                                   | 0,66E-06                                     |
| 6             | 3609                       | 4,00E-04                                    | 3,00E-03                                   | 0,67E-06                                     |
| 7             | 4211                       | 7,00E-04                                    | 3,70E-03                                   | 1,16E-06                                     |
| 8             | 4812                       | 7,00E-04                                    | 4,40E-03                                   | 1,16E-06                                     |
| 9             | 5413                       | 2,00E-04                                    | 4,60E-03                                   | 0,33E-06                                     |

**Ensaio 8 - EWLa**

| <b>Parada</b> | <b>Tempo total<br/>[s]</b> | <b>Variação de massa por parada<br/>[g]</b> | <b>Variação acumulada de massa<br/>[g]</b> | <b>Taxa de desgaste por parada<br/>[g/s]</b> |
|---------------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1             | 602                        | 8,00E-04                                    | 8,00E-04                                   | 1,33E-06                                     |
| 2             | 1204                       | 2,10E-03                                    | 2,90E-03                                   | 3,49E-06                                     |
| 3             | 1806                       | 2,10E-03                                    | 5,00E-03                                   | 3,49E-06                                     |
| 4             | 2408                       | 2,00E-03                                    | 7,00E-03                                   | 3,32E-06                                     |
| 5             | 3010                       | 2,10E-03                                    | 9,10E-03                                   | 3,49E-06                                     |
| 6             | 3611                       | 3,20E-03                                    | 1,23E-02                                   | 5,32E-06                                     |
| 7             | 4213                       | 1,90E-03                                    | 1,42E-02                                   | 3,16E-06                                     |
| 8             | 4815                       | 2,00E-03                                    | 1,62E-02                                   | 3,32E-06                                     |
| 9             | 5416                       | 1,70E-03                                    | 1,79E-02                                   | 2,83E-06                                     |

**Ensaio 9 - EWLa**

| <b>Parada</b> | <b>Tempo total<br/>[s]</b> | <b>Variação de massa por parada<br/>[g]</b> | <b>Variação acumulada de massa<br/>[g]</b> | <b>Taxa de desgaste por parada<br/>[g/s]</b> |
|---------------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1             | 601                        | 1,40E-03                                    | 1,40E-03                                   | 2,33E-06                                     |
| 2             | 1203                       | 7,20E-03                                    | 8,60E-03                                   | 11,96E-06                                    |
| 3             | 1804                       | 6,70E-03                                    | 1,53E-02                                   | 11,15E-06                                    |
| 4             | 2405                       | 7,80E-03                                    | 2,31E-02                                   | 12,98E-06                                    |
| 5             | 3006                       | 1,29E-02                                    | 3,60E-02                                   | 21,46E-06                                    |
| 6             | 3607                       | 1,49E-02                                    | 5,09E-02                                   | 24,79E-06                                    |
| 7             | 4208                       | 7,50E-03                                    | 5,84E-02                                   | 12,48E-06                                    |
| 8             | 4809                       | 2,50E-03                                    | 6,09E-02                                   | 4,16E-06                                     |
| 9             | 5410                       | 2,50E-03                                    | 6,34E-02                                   | 4,16E-06                                     |

**Anexo C - Apresentação de todas as medições efetuadas para cada ensaio de confirmação**

**Extra 1 - EWP**

|                      | <b>lpos [A]</b> | <b>lneg [A]</b> | <b>tpos [ms]</b> | <b>tneg [ms]</b> | <b>Vpos [V]</b> | <b>Vneg [V]</b> |
|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Parada 1</b>      | 210,00          | 212,00          | 4,21             | 8,93             | 26,30           | 13,35           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,37             | 8,75             | 26,46           | 13,32           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,21             | 8,91             | 26,56           | 13,34           |
| <b>Parada 2</b>      | 210,00          | 212,00          | 4,37             | 8,43             | 26,64           | 12,92           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,54             | 8,25             | 26,57           | 12,94           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,21             | 8,41             | 26,43           | 12,90           |
| <b>Parada 3</b>      | 210,00          | 212,00          | 4,03             | 8,08             | 27,34           | 13,59           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,03             | 8,08             | 27,05           | 13,44           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,03             | 7,92             | 26,89           | 13,35           |
| <b>Parada 4</b>      | 215,00          | 212,00          | 4,21             | 7,90             | 27,20           | 13,02           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,21             | 7,58             | 27,26           | 13,10           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,21             | 7,74             | 27,26           | 13,10           |
| <b>Parada 5</b>      | 215,00          | 212,00          | 4,03             | 7,58             | 26,54           | 13,46           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,37             | 7,58             | 26,51           | 13,46           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,19             | 7,58             | 26,51           | 13,50           |
| <b>Parada 6</b>      | 215,00          | 212,00          | 4,05             | 7,74             | 28,91           | 14,26           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,19             | 7,58             | 28,95           | 14,28           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,21             | 7,58             | 28,67           | 14,34           |
| <b>Parada 7</b>      | 215,00          | 212,00          | 4,21             | 7,58             | 27,97           | 14,04           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,37             | 7,40             | 28,07           | 14,15           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,37             | 7,40             | 28,17           | 14,20           |
| <b>Parada 8</b>      | 215,00          | 212,00          | 4,05             | 7,24             | 26,80           | 13,43           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,03             | 7,24             | 26,85           | 13,51           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,19             | 7,24             | 26,82           | 13,37           |
| <b>Parada 9</b>      | 215,00          | 212,00          | 4,21             | 7,06             | 27,05           | 13,95           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,21             | 7,06             | 26,84           | 13,84           |
|                      | 215,00          | 212,00          | 4,21             | 7,06             | 27,08           | 13,89           |
| <b>Média</b>         | 213,33          | 212,00          | 4,21             | 7,77             | 27,17           | 13,56           |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,20            | 0,00            | 0,11             | 0,57             | 0,80            | 0,46            |

## Extra 2 - EWTh

|                      | <b>lpos [A]</b> | <b>lneg [A]</b> | <b>tpos [ms]</b> | <b>tneg [ms]</b> | <b>Vpos [V]</b> | <b>Vneg [V]</b> |
|----------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Parada 1</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 7,90             | 27,94           | 14,07           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 8,08             | 27,72           | 14,26           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 8,08             | 27,56           | 14,26           |
| <b>Parada 2</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 7,56             | 26,35           | 13,33           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 3,71             | 7,74             | 26,42           | 13,31           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 7,74             | 26,06           | 13,27           |
| <b>Parada 3</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 7,24             | 26,31           | 12,89           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,19             | 7,24             | 26,11           | 12,80           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 7,24             | 26,17           | 12,80           |
| <b>Parada 4</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 7,24             | 26,13           | 13,39           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 7,24             | 26,22           | 13,40           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,19             | 7,24             | 26,13           | 13,35           |
| <b>Parada 5</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 7,40             | 27,47           | 13,90           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 7,40             | 27,88           | 13,82           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 7,40             | 27,74           | 13,86           |
| <b>Parada 6</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,19             | 7,24             | 26,83           | 13,94           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,37             | 7,24             | 26,83           | 13,94           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 7,56             | 26,78           | 13,92           |
| <b>Parada 7</b>      | 210,00          | 212,00          | 4,21             | 9,09             | 26,70           | 14,49           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,72             | 9,09             | 26,85           | 14,46           |
|                      | 210,00          | 212,00          | 4,03             | 9,09             | 26,73           | 14,50           |
| <b>Parada 8</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 8,06             | 27,94           | 15,68           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,37             | 8,08             | 28,12           | 15,73           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,21             | 8,25             | 28,30           | 15,75           |
| <b>Parada 9</b>      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 7,40             | 27,18           | 13,82           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,03             | 7,42             | 27,07           | 13,97           |
|                      | 210,00          | 207,00          | 4,05             | 7,22             | 27,21           | 13,78           |
| <b>Média</b>         | 210,00          | 207,56          | 4,13             | 7,72             | 26,99           | 13,95           |
| <b>Desvio Padrão</b> | 0,00            | 1,67            | 0,13             | 0,61             | 0,73            | 0,83            |

## Extra 3 - EWLa

|                      | Ipos [A] | Ineg [A] | tpos [ms] | tneg [ms] | Vpos [V] | Vneg [V] |
|----------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Parada 1</b>      | 210,00   | 207,00   | 4,03      | 6,89      | 27,90    | 15,27    |
|                      | 210,00   | 207,00   | 4,03      | 7,08      | 27,98    | 15,37    |
|                      | 210,00   | 207,00   | 4,03      | 7,08      | 27,99    | 15,32    |
| <b>Parada 2</b>      | 210,00   | 207,00   | 4,05      | 7,90      | 28,55    | 15,26    |
|                      | 210,00   | 207,00   | 4,19      | 7,92      | 28,49    | 14,96    |
|                      | 210,00   | 207,00   | 4,37      | 7,58      | 28,38    | 15,42    |
| <b>Parada 3</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,19      | 7,74      | 28,40    | 16,14    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,74      | 27,99    | 15,73    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 7,90      | 27,96    | 15,96    |
| <b>Parada 4</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,24      | 27,56    | 15,60    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,19      | 7,24      | 27,93    | 15,86    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,37      | 7,08      | 27,89    | 14,71    |
| <b>Parada 5</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,21      | 6,89      | 26,24    | 12,78    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,21      | 6,89      | 26,17    | 13,05    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 6,91      | 26,14    | 12,93    |
| <b>Parada 6</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 6,91      | 26,85    | 13,23    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 6,89      | 27,06    | 13,31    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 6,89      | 26,96    | 13,80    |
| <b>Parada 7</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 7,08      | 28,13    | 15,13    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,21      | 6,89      | 28,06    | 15,56    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,03      | 6,73      | 28,10    | 14,17    |
| <b>Média</b>         | 205,00   | 207,00   | 4,09      | 6,90      | 28,10    | 14,95    |
| <b>Desvio</b>        | 0,00     | 0,00     | 0,10      | 0,17      | 0,04     | 0,71     |
| <b>Parada 8</b>      | 205,00   | 207,00   | 4,05      | 6,89      | 27,74    | 13,74    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,21      | 6,55      | 27,74    | 13,46    |
|                      | 205,00   | 207,00   | 4,21      | 6,89      | 28,00    | 13,29    |
| <b>Média</b>         | 206,25   | 207,00   | 4,12      | 7,16      | 27,68    | 14,59    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,31     | 0,00     | 0,07      | 0,41      | 0,74     | 1,12     |

## Anexo D - Variação de massa e taxa de desgaste de todos ensaios de confirmação

### Extra 1 - EWP

| Parada | Tempo total<br>[s] | Variação de massa por parada<br>[g] | Variação acumulada de massa<br>[g] | Taxa de desgaste por parada<br>[g/s] |
|--------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1      | 602                | 5,70E-03                            | 5,70E-03                           | 9,47E-06                             |
| 2      | 1204               | 2,90E-03                            | 8,60E-03                           | 4,82E-06                             |
| 3      | 1806               | 3,00E-03                            | 1,16E-02                           | 4,98E-06                             |
| 4      | 2408               | 2,40E-03                            | 1,40E-02                           | 3,99E-06                             |
| 5      | 3011               | 4,20E-03                            | 1,82E-02                           | 6,97E-06                             |
| 6      | 3613               | -                                   | 1,82E-02                           | -                                    |
| 7      | 4215               | -                                   | 1,82E-02                           | -                                    |
| 8      | 4761               | 2,90E-03                            | 2,11E-02                           | 5,31E-06                             |
| 9      | 5255               | 9,00E-04                            | 2,20E-02                           | 1,82E-06                             |

### Extra 2 - EWTh

| Parada | Tempo total<br>[s] | Variação de massa por parada<br>[g] | Variação acumulada de massa<br>[g] | Taxa de desgaste por parada<br>[g/s] |
|--------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1      | 602                | 2,90E-03                            | 2,90E-03                           | 4,82E-06                             |
| 2      | 1204               | 4,10E-03                            | 7,00E-03                           | 6,81E-06                             |
| 3      | 1806               | 8,70E-03                            | 1,57E-02                           | 14,45E-06                            |
| 4      | 2408               | 2,50E-03                            | 1,82E-02                           | 4,15E-06                             |
| 5      | 3010               | 1,09E-02                            | 2,91E-02                           | 18,11E-06                            |
| 6      | 3462               | 1,60E-03                            | 3,07E-02                           | 3,54E-06                             |
| 7      | 4064               | 3,10E-03                            | 3,38E-02                           | 5,15E-06                             |
| 8      | 4666               | 1,29E-02                            | 4,67E-02                           | 21,43E-06                            |
| 9      | 5268               | 2,10E-03                            | 4,88E-02                           | 3,49E-06                             |

### Extra 3 - EWL<sub>a</sub>

| Parada | Tempo total<br>[s] | Variação de massa por parada<br>[g] | Variação acumulada de massa<br>[g] | Taxa de desgaste por parada<br>[g/s] |
|--------|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1      | 602                | 1,00E-03                            | 1,00E-03                           | 1,66E-06                             |
| 2      | 1204               | 1,90E-03                            | 2,90E-03                           | 3,16E-06                             |
| 3      | 1806               | 2,30E-03                            | 5,20E-03                           | 3,82E-06                             |
| 4      | 2408               | 1,90E-03                            | 7,10E-03                           | 3,16E-06                             |
| 5      | 3010               | 2,00E-03                            | 9,10E-03                           | 3,32E-06                             |
| 6      | 3612               | 2,10E-03                            | 1,12E-02                           | 3,49E-06                             |
| 7      | 4214               | 1,90E-03                            | 1,31E-02                           | 3,16E-06                             |
| 8      | 4698               | 1,20E-03                            | 1,43E-02                           | 2,48E-06                             |
| 9      | -                  | -                                   | -                                  | -                                    |

## **Anexo E - Projeto Robusto / Método de Taguchi**

### **1 - Introdução**

O Projeto Robusto (ou Método Taguchi) é uma metodologia que tem como objetivo obter economicamente os melhores ajustes dos fatores de controle (são os parâmetros de projeto, ou seja, fatores que são controlados ou ajustados pelo operador) de forma a tornar as respostas (resultados) insensíveis aos fatores ruídos.

Taguchi considera que ruídos são fatores indesejáveis e muitas vezes não podem ser controlados. Os mesmos ocasionam alterações nos valores ideais das características funcionais de um processo ou produto (respostas), diminuindo a qualidade. Segundo Taguchi, a idéia não é exatamente ter que eliminar as causas dos problemas (isto pode ser oneroso e muitas vezes impossível), e sim encontrar soluções para reduzir os efeitos dos ruídos (não precisa eliminá-los) (PHADKE, 1989).

Portanto, o objetivo do Método Taguchi é obter níveis dos fatores de controle que minimizem a sensibilidade da função produto em relação aos fatores de ruído. Desta forma, esta metodologia é direcionada na determinação dos efeitos dos fatores de controle na robustez da função produto.

A técnica estatística mais empregada para interpretação dos dados experimentais é ANOVA (análise de variância). O conceito de Taguchi simplifica a análise de dados, reduz a quantidade de experimentos (em relação ao método tradicional multifatorial) para avaliação de um mesmo número de fatores de controle, sem prejudicar significativamente a qualidade das informações retiradas. Os efeitos dos fatores são relativamente estimados em poucos experimentos e, as condições ótimas de ajustes são determinadas pela avaliação do efeito de cada fator separadamente (PHADKE, 1989).

As duas principais ferramentas usadas no Projeto Robusto são: Arranjos ortogonais e razão sinal/ruído (função objetiva), que serão detalhadas nos itens a seguir (PHADKE, 1989).

### **2 - Arranjos Ortogonais**

O primeiro passo na construção de um Arranjo Ortogonal é a contagem dos graus de liberdade, definidos como o número total de comparações independentes que podem ser feitas dentro de um conjunto de dados. Os graus dizem o número mínimo de experimentos

que devem ser conduzidos para o estudo de todos os fatores de controle escolhidos. Regra geral, o número de graus de liberdade associados com um fator é igual ao número de níveis deste fator menos um. Já o valor dos graus associados com as interações é dado pelo produto dos graus de liberdade para cada um dos fatores em questão (PHADKE, 1989).

Estes arranjos permitem que os efeitos de vários fatores sejam determinados simultaneamente e, em conjunto com os experimentos de confirmação, são uma poderosa ferramenta para a economia do número de ensaios e para a detecção de interações entre os fatores. A Tabela E.1 mostra um arranjo do tipo L9 com 4 fatores de 3 níveis, onde cada coluna representa um fator e cada linha representa o nível de cada fator durante determinado experimento (PHADKE, 1989).

**Tabela E.1** - Matriz ortogonal L9

| Ensaio | Fator 1 | Fator 2 | Fator 3 | Fator 4 |
|--------|---------|---------|---------|---------|
| 1      | 1       | 1       | 1       | 1       |
| 2      | 1       | 2       | 2       | 2       |
| 3      | 1       | 3       | 3       | 3       |
| 4      | 2       | 1       | 2       | 3       |
| 5      | 2       | 2       | 3       | 1       |
| 6      | 2       | 3       | 1       | 2       |
| 7      | 3       | 1       | 3       | 2       |
| 8      | 3       | 2       | 1       | 3       |
| 9      | 3       | 3       | 2       | 1       |

No Projeto Robusto, a combinação ótima dos valores é estabelecida pelo exame do efeito de cada fator separadamente. A justificativa para este procedimento vem do uso do Arranjo Ortogonal para o planejamento da matriz experimental e do uso do modelo aditivo como aproximação (PHADKE, 1989).

Em um modelo aditivo ideal, o efeito total de vários fatores é igual à soma dos efeitos dos valores individuais. Se o efeito de um fator depende do nível de outro fator, então os dois fatores estão interagindo. No modelo aditivo, essas interações são consideradas como erros. No entanto, as interações só são descobertas durante a análise de dados.

A interação ocorre quando dois fatores produzem um efeito diferente da soma de seus efeitos individuais. Isto acontecendo, o emprego do modelo aditivo no Método Taguchi pode

resultar em previsão errada dos ótimos ajustes e do efeito de cada fator sobre  $\eta$  (razão sinal/ruído - função objetiva, que será melhor detalhada a seguir). Portanto o modelo aditivo é muito adequado para situações onde não existam interações entre os fatores. Na Figura E.1 três exemplos esclarecem melhor a idéia de interação. No exemplo “a”, não ocorre interação entre os fatores A e B. Neste caso, as curvas do efeito de A para os ajustes de B1, B2 e B3, são paralelas entre si. Isto implica em alterações da mesma natureza em  $\eta$ , na mudança de nível de A1 para A2 e/ou A3 em cada ajuste de B. O mesmo pode ser dito para mudança de  $\eta$  na alteração de B em cada nível da A. No exemplo “b”, existe uma interação não muito forte. As curvas para esta situação, apesar de não serem paralelas, obedecem a mesma direção de alteração. Os ótimos níveis previstos pelo modelo aditivo ainda podem ser empregados neste tipo de interação (também chamada de sinérgica).

O exemplo “c” indica a presença de forte interação entre os fatores (também chamada de interação antisinérgica). As curvas não seguem a direção de alteração e nem são paralelas. O modelo aditivo é geralmente para esta condição, inconsistente, e os ajustes previstos para os maiores valores de  $\eta$ , possuem grande chance de estarem errados. Interações entre três ou mais fatores podem também ser tratadas pelo mesmo raciocínio que foi feito na Figura E.1 (PHADKE, 1989).

A presença de interação entre fatores pode ser estudada pelo Método Taguchi. Neste caso, existe a necessidade de mais parâmetros no modelo aditivo, aumentando com isso o número de experimentos para estimar essa quantidade maior de parâmetros. Em algumas situações, pela avaliação técnica, o estudo de interações pode ser muito importante (PHADKE, 1989).

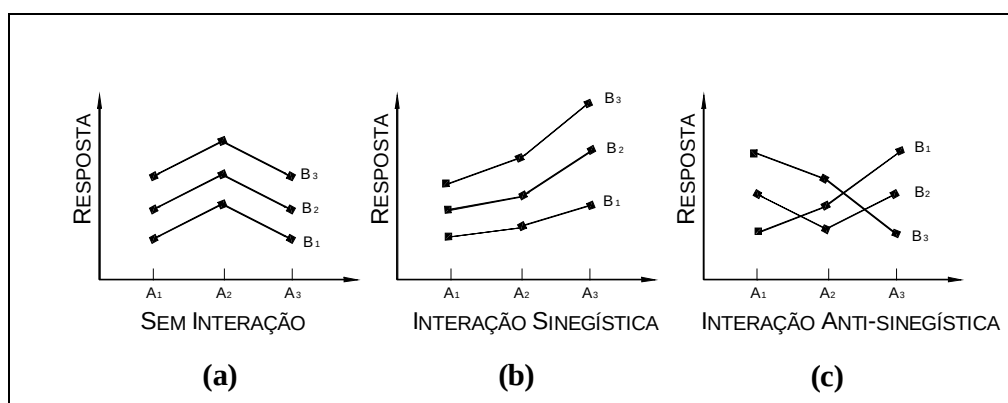


**Figura E.1** - Exemplos associados às interações (PHADKE, 1989).

### 3 - Razão Sinal/Ruído (função objetiva)

Para cada linha de experimentos da matriz ortogonal, os resultados são reunidos em um sumário estatístico por uma função objetiva ( $\eta$ ), chamada razão sinal/ruído (S/N). A razão sinal/ruído é uma medida de qualidade, usada para quantificar os efeitos de diferentes fatores na robustez do sistema. O uso da razão S/N tem a vantagem que, uma vez obtido o melhor ajuste que minimize a sensibilidade ao ruído para um dado valor médio de um parâmetro estudado, esse ajuste também é válido para outro valor médio deste parâmetro (PHADKE, 1989).

As razão S/N pode ser aplicada para problemas estático e dinâmicos. Para cada classe de problema, tem-se um conjunto de funções específicas e, é essencial a escolha correta da função objetiva. No caso da soldagem, são mais comuns os problemas estáticos e tem-se como exemplos as seguintes funções objetivas: "menor é o melhor"; "nominal é o melhor"; "maior é o melhor" (PHADKE, 1989).

Como nesta dissertação utilizou-se a função menor é o melhor, a seguir detalhar-se-á especificamente esta função.

O valor desejado para esta característica de qualidade é zero (a escala é contínua e não negativa e varia de 0 a  $\infty$ ). Nestes tipos de problemas, os fatores de escala ou qualquer outra espécie de fatores de ajustes são ausentes. Pode-se citar como exemplos de menor o melhor, o número de defeitos de uma peça, a espessura de corrosão e a radiação emitida de um reservatório. O  $\eta$  neste caso é dado pela Equação E.1.

$$\eta = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n_i} \times \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (\text{E.1})$$

onde: - " $\eta$ " é a função objetiva

- " $y_i$ " é a característica da qualidade (resposta observada)

- " $n_i$ " é o número de observações da característica da qualidade dentro de diferentes condições de ruídos

Como neste trabalho o número de observações da característica da qualidade é igual a um, temos através da Equação E.1 que:

$$\eta = -10 \log_{10} (y^2) \quad (\text{E.2})$$

#### 4 - Interpretação das tabelas de ANOVA

A intensidade do efeito de um fator relativo à variância do erro pode ser julgado pela coluna F (razão de variância). Quanto maior o valor de F, maior é o efeito do fator comparado com a variância do erro. A razão de variância F, é definida como a razão entre a média quadrática devido ao fator e o erro médio quadrático. Um valor elevado de F significa que o efeito do fator é grande comparado ao erro de variância e que mais importante é este fator na influência do valor de  $\eta$  (razão sinal/ruído - função objetiva) (PHADKE, 1989). Um valor de F menor que 1 significa que o efeito do fator é menor que o erro do modelo aditivo. Um valor de F maior que 2 significa que o efeito do fator não é tão pequeno, enquanto um valor maior que 4 significa que o efeito do fator é bem expressivo. No Método Taguchi, F é utilizado somente no entendimento qualitativo dos efeitos dos diversos fatores (PHADKE, 1989).

O propósito da condução da ANOVA é determinar a magnitude relativa do efeito de cada fator na função  $\eta$  e estimar a variância do erro. Não é intenção de se fazer quaisquer considerações de probabilidade sobre a significância de um fator como é feito rotineiramente em estatística.

## **5 - Experimento de Confirmação (Verificação)**

O Método Taguchi permite a predição da melhor resposta possível com base nos dados da matriz experimental. Após a determinação das condições ótimas e a predição da resposta nestas condições, deve-se conduzir um ensaio com os ajustes ótimos dos parâmetros e comparar o valor observado de  $\eta$  com a predição. Se os valores de  $\eta$  predito e observado são próximos, pode-se concluir que o modelo aditivo é adequado para descrever a dependência de  $\eta$  dos vários parâmetros. Do contrário, se a observação é drasticamente diferente da predição, diz-se então que o modelo aditivo é inadequado. Isto é evidência de forte interação entre os parâmetros (PHADKE, 1989). O principal motivo da verificação experimental é de alertar quando o modelo aditivo não é adequado e, desta forma, prevenir falhas de projetos de processos/produtos.

**Anexo F - Médias dos valores de  $\eta$  (sinal/ruído) para cada nível do respectivo fator, para auxiliar no cálculo das estimativas**

**Tabela F.1** - Médias dos valores de  $\eta$  (sinal/ruído) para cada nível do respectivo fator, com relação a taxa de desgaste, considerando todo intervalo (Tabela 4.3)

|                 | Nível | Média      | Desvio   |
|-----------------|-------|------------|----------|
| <b>Eletrodo</b> | 1     | -16,986444 | 2,442604 |
|                 | 2     | -15,856788 | 6,748653 |
|                 | 3     | -10,11654  | 11,39706 |
| <b>Corrente</b> | 1     | -8,7986593 | 9,049646 |
|                 | 2     | -12,554512 | 2,532869 |
|                 | 3     | -21,6066   | 1,938591 |
| <b>tneg</b>     | 1     | -16,620823 | 6,668302 |
|                 | 2     | -16,230995 | 4,763225 |
|                 | 3     | -10,107955 | 10,72052 |
| <b>Ângulo</b>   | 1     | -16,383448 | 4,741762 |
|                 | 2     | -12,524997 | 12,76501 |
|                 | 3     | -14,051328 | 5,035567 |
| <b>Geral</b>    | -     | -14.320    | 7.45176  |

**Tabela F.2** - Médias dos valores de  $\eta$  (sinal/ruído) para cada nível do respectivo fator, com relação a taxa de desgaste, considerando o intervalo  $M \pm 2\delta$  (Tabela 4.3)

|                 | Nível | Média      | Desvio   |
|-----------------|-------|------------|----------|
| <b>Eletrodo</b> | 1     | -16,063818 | 3,230141 |
|                 | 2     | -14,290195 | 4,035249 |
|                 | 3     | -10,111279 | 11,39688 |
| <b>Corrente</b> | 1     | -8,2815275 | 8,472933 |
|                 | 2     | -12,143757 | 1,884566 |
|                 | 3     | -20,040007 | 1,232846 |
| <b>tneg</b>     | 1     | -14,531837 | 4,296622 |
|                 | 2     | -15,8255   | 4,926347 |
|                 | 3     | -10,107955 | 10,72052 |
| <b>Ângulo</b>   | 1     | -15,866316 | 4,913839 |
|                 | 2     | -10,552909 | 10,63918 |
|                 | 3     | -14,046066 | 5,04132  |
| <b>Geral</b>    | -     | -13.488    | 6.79387  |

**Tabela F.3** - Médias dos valores de  $\eta$  (sinal/ruído) para cada nível do respectivo fator, com relação a taxa de desgaste, considerando o intervalo  $M \pm \delta$  (Tabela 4.3)

|                 | Nível | Média      | Desvio   |
|-----------------|-------|------------|----------|
| <b>Eletrodo</b> | 1     | -16,582396 | 3,219596 |
|                 | 2     | -12,664613 | 3,71125  |
|                 | 3     | -9,6379232 | 10,89938 |
| <b>Corrente</b> | 1     | -8,4828901 | 8,848124 |
|                 | 2     | -11,383016 | 2,79088  |
|                 | 3     | -19,019026 | 2,088133 |
| <b>tneg</b>     | 1     | -13,963613 | 3,227487 |
|                 | 2     | -15,612066 | 4,112018 |
|                 | 3     | -9,3092527 | 10,95103 |
| <b>Ângulo</b>   | 1     | -14,770019 | 5,457492 |
|                 | 2     | -9,8468866 | 9,974039 |
|                 | 3     | -14,268027 | 5,293379 |
| <b>Geral</b>    | -     | -12.962    | 6.69521  |

**Tabela F.4** - Médias dos valores de  $\eta$  (sinal/ruído) para cada nível do respectivo fator, com relação a  $V_{pos}$ , para os valores monitorados da  $V_{pos}$  apresentados na Tabela 4.1

|                 | Nível | Média      | Desvio   |
|-----------------|-------|------------|----------|
| <b>Eletrodo</b> | 1     | -28,232567 | 0,33552  |
|                 | 2     | -28,308441 | 0,584493 |
|                 | 3     | -28,357933 | 0,879177 |
| <b>Corrente</b> | 1     | -27,716476 | 0,323406 |
|                 | 2     | -28,370375 | 0,416384 |
|                 | 3     | -28,812088 | 0,222764 |
| <b>tneg</b>     | 1     | -28,567747 | 0,592324 |
|                 | 2     | -28,35424  | 0,498123 |
|                 | 3     | -27,976952 | 0,609638 |
| <b>Ângulo</b>   | 1     | -28,271183 | 0,545984 |
|                 | 2     | -28,190969 | 0,820011 |
|                 | 3     | -28,436789 | 0,470595 |
| <b>Geral</b>    | -     | -28.300    | .556579  |

**Tabela F.5** - Médias dos valores de  $\eta$  (sinal/ruído) para cada nível do respectivo fator, com relação a Vneg, para os valores monitorados da Vneg apresentados na Tabela 4.1

|                 | Nível | Média      | Desvio   |
|-----------------|-------|------------|----------|
| <b>Eletrodo</b> | 1     | -23,04668  | 1,246519 |
|                 | 2     | -22,866852 | 0,393138 |
|                 | 3     | -23,309515 | 1,079867 |
| <b>Corrente</b> | 1     | -22,46722  | 0,842616 |
|                 | 2     | -23,030659 | 0,711506 |
|                 | 3     | -23,72517  | 0,78473  |
| <b>tneg</b>     | 1     | -22,237335 | 0,620295 |
|                 | 2     | -23,488501 | 0,96191  |
|                 | 3     | -23,497213 | 0,369783 |
| <b>Ângulo</b>   | 1     | -23,091553 | 1,393926 |
|                 | 2     | -23,253986 | 0,37087  |
|                 | 3     | -22,877508 | 0,914125 |
| <b>Geral</b>    | -     | -23.074    | .869363  |