

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

**“ESTUDO DO EFEITO DE FLUXOS
NA SOLDAGEM ATIG DE ALUMÍNIO”**

Autor: Wagner Custódio de Oliveira
Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Abril/2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Wagner Custódio de Oliveira

**“ESTUDO DO EFEITO DE FLUXOS
NA SOLDAGEM ATIG DE ALUMÍNIO”**

**Tese de Doutorado apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais**

Área de concentração: Metalurgia de Transformação
Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2007

À Renata, minha esposa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração deste trabalho e, em especial:

- Ao professor Paulo José Modenesi pela seriedade, competência e profissionalismo demonstrados durante a orientação deste trabalho.
- Ao professor Cícero Murta Diniz Starling pelas sugestões e envolvimento com o trabalho.
- Aos professores Vicente Tadeu Lopes Buono, Berenice Mendonça Gonzalez, Dagoberto Brandão Santos, Luiz Fernando Andrade de Castro, Geralda Cristina Durães de Godoy, Wander Luís Vasconcelos, Herman Sander Mansur, Vanessa de Freitas Cunha Lins, Paulo Villani Marques, Paulo Roberto Gomes Brandão e George Eduardo Sales Valadão da Escola de Engenharia da UFMG.
- Ao amigo Eustáquio Roberto Apolinário, pelo desenvolvimento da técnica de preparação e aplicação de fluxos para soldagem ATIG e ao aluno de iniciação científica, Carlos Henrique Lopes, do curso de Engenharia Metalúrgica da UFMG, pela colaboração na realização dos experimentos.
- Aos alunos e funcionários do CPGEM pelo companheirismo e encorajamento, em particular a Rogério, Alberto, Charleston, Giovane, Leandro, Renato Ávila, Renato Machado, Paulo César, Rafael, Ildeu, Jaqueline, Janaína, Marta, Cíntia, Welbert, Wesley, Vander, Bruno, Juliano, Ronald, Avelino, Maria Celeste, Elaine, Iaci, Ana, Denilson, Ioná, Clênio, José Felipe, Olívia, Ilda, João, Estevenson, Patrícia, Andréia, Nelson, Cida, Vicente, Efigênia, Ivair e Urias.

- Aos professores e funcionários do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais: Wanderley, Nilton, Edson Peixoto, Carlos Alberto, Rogério, Ernane, José Eustáquio, Walkíria, Raquel, Cleide, Geraldo, Paulo, Élcio, Alberto, Ivete, Joel Romano, Ivan, Leonardo, Edson e Euclides.
- À minha esposa Renata pelo amor, carinho, incentivo e compreensão pelas muitas horas dedicadas a este trabalho. Aos amigos Moacir, Antônio, Ronaldo, André e a todos meus familiares, em especial, a meu pai Vicente, minha mãe Marieta e meus irmãos Geraldo, Agmar, Adenilce e Patrícia.
- Ao CNPQ, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro.

“Ninguém é tão ignorante que não tenha algo a ensinar; e ninguém é tão sábio que não tenha algo a aprender”

Blaise Pascal (1623-1662)
Filósofo e matemático francês

“Tanto maior uma época histórica, quanto mais altos os seus homens representativos. Dos acidentes vulgares do terreno, dos seixos do caminho, da poeira da estrada, a posteridade não se apercebe”

Lindolfo Collor (1890-1942)
Jornalista e político brasileiro

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o efeito de diversas formulações de fluxo na soldagem ATIG (“Activated Tungsten Inert Gas”) de alumínio, operando o processo com corrente contínua e eletrodo negativo, visando selecionar os mais efetivos na remoção da alumina, camada superficial de óxido que dificulta a passagem da corrente elétrica e a soldagem deste material. Esta configuração possui muitas vantagens em termos de estabilidade e capacidade de fundir o metal base, aumentando ainda, a vida útil do eletrodo. Além disto, dispensa o uso de um ignitor de alta frequência, o qual é prejudicial para equipamentos eletrônicos localizados próximo à área de soldagem, ou de fontes de energia mais sofisticadas usadas na soldagem com corrente alternada e na soldagem com polaridade do eletrodo variável e onda retangular, configurações atualmente adotadas na soldagem do alumínio e suas ligas. Além da efetividade na remoção da camada de alumina, a influência de diferentes condições de acabamento superficial do corpo de prova, de variações nos parâmetros de soldagem e o efeito do metal base também foram avaliados. E, ainda, a estabilidade e as características operacionais da soldagem ATIG com polaridade do eletrodo variável e corrente retangular. Os corpos de prova de alumínio foram soldados utilizando soldagem mecanizada e uma fonte do tipo corrente constante com sistemas de deslocamento de tocha e aquisição de dados. Os componentes usados na elaboração dos fluxos foram fluoretos, cloretos ou óxidos. As superfícies dos cordões de solda foram analisadas por inspeção visual e análise de imagem. Microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de energia dispersiva, difração de raios-X e análise macrográfica foram usadas somente para cordões de solda obtidos com fluxos selecionados. Os resultados foram comparados ao obtido na soldagem TIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular sem a utilização de fluxo. Mudanças no fluxo de metal líquido na poça de fusão (Efeito Marangoni) ou diferenças entre as propriedades físicas dos componentes de fluxo e o metal base foram responsáveis pela tendência de contaminação por resíduos de fluxo ou de escória na região central ou lateral da superfície dos cordões de solda. Um fluxo simples elaborado com a diluição de cloreto de zinco em acetona foi considerado como o mais efetivo na remoção da camada de alumina. O mecanismo responsável foi a dissolução da alumina pelos componentes do fluxo durante a soldagem. O uso deste fluxo favoreceu o aumento da penetração e da área de fusão do cordão de solda na soldagem ATIG de alumínio e, este efeito, foi maior para a liga Al-Mg. Este efeito deve estar associado com alguma interação entre o fluxo e a poça de fusão ou entre este e o arco elétrico.

ABSTRACT

The feasibility of using ATIG (active flux TIG) welding for surface oxide removal in aluminum welding with direct polarity was evaluated. The influence of the flux on different conditions of specimen surface, variations in welding parameters and the effect of metal base composition was also evaluated. Welding trials were performed in a mechanized jig using a constant current power supply. Welding parameters were recorded using a digital data acquisition system. The fluxes were formed by fluoride, chloride or oxides, mixed with acetone. The flux was applied to aluminum specimen immediately before welding. Welding surface was observed using low power optical and scanning electronic microscopes, analyzed by an image processing software, and compared with welds performed with alternate current and no flux. It is proposed that changes in liquid metal movement inside the weld pool (Marangoni Effect) or differences between flux physical properties and metal causes variations in flux distribution that is retained on the weld surface. A simple flux elaborated with the zinc chloride diluted in acetone was the most effective to remove the alumina surface layer. The responsible mechanism for this flux activity was probably the dissolution of alumina by the flux during welding. The increase in the geometric parameters of the weld bead in aluminum and aluminum-magnesium can be associates with some interaction between the flux and the pool or between this and the electric arc.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE NOTAÇÕES	xx
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	22
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	25
CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1 <i>Introdução</i>	26
3.2 <i>Soldabilidade do alumínio</i>	26
3.3 <i>Soldagem TIG</i>	28
3.4 <i>Soldagem a plasma</i>	30
3.5 <i>Soldagem ATIG</i>	31
3.5.1 <i>Fluxos para soldagem ATIG</i>	33
3.5.2 <i>Geometria do cordão de solda</i>	34
3.5.3 <i>Construção do arco elétrico</i>	34
3.5.4 <i>Influência da tensão superficial na poça de fusão</i>	36
3.6 <i>Soldagem TIG do alumínio</i>	42
3.6.1 <i>A camada de alumina</i>	43
3.6.2 <i>Mecanismos de limpeza</i>	44
3.7 <i>Soldagem ATIG de alumínio</i>	45
3.8 <i>Análise de imagem</i>	48
CAPÍTULO 4. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	50
4.1 <i>Introdução</i>	50
4.2 <i>Equipamentos</i>	50
4.2.1 <i>Fonte de soldagem, acessórios e equip. auxiliares</i>	50
4.2.2 <i>Sistema de aquisição de dados</i>	53
4.3 <i>Materiais</i>	54
4.3.1 <i>Metal base</i>	54

4.3.2 Componentes para a elaboração dos fluxos	54
CAPÍTULO 5. METODOLOGIA	62
5.1 Introdução	62
5.2 Confeção dos corpos de prova	63
5.3 Preparação dos corpos de prova para soldagem	64
5.4 Preparação e aplicação dos fluxos	66
5.4.1 Fluxos simples	67
5.4.2 Fluxos compostos	68
5.5 Soldagem e aquisição de dados	72
5.5.1 Soldagem ATIG com corrente contínua e o eletrodo ligado ao pólo negativo (ATIG-CC)	73
5.5.2 Corpo de prova padrão	74
5.5.3 Soldagem ATIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (ATIG-CA)	76
5.6 Caracterização dos cordões de solda	77
5.6.1 Análise visual	77
5.6.2 Análise de Imagem	77
5.6.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia Dispersiva de Elétrons (EDS) e Difração de Raios-X (DRX)	80
5.6.4 Macrografia	80
CAPÍTULO 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
6.1 Introdução	83
6.2 Efeito dos fluxos simples na soldagem ATIG-CC	83
6.3 Efeito dos fluxos compostos na soldagem ATIG-CC	99
6.4 Influência do acabamento superficial na soldagem ATIG-CC	113
6.5 Influência dos parâmetros de soldagem ATIG-CC	115
6.6 Influência dos parâmetros de soldagem ATIG-CA	118
6.7 Efeito do metal de base na soldagem ATIG-CC	120

<i>6.8 Considerações finais</i>	<i>127</i>
CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES	130
CAPÍTULO 8. CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS E RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS	133
CAPÍTULO 9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	134
CAPÍTULO 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
APÊNDICE A – Composição química dos componentes usados na elaboração dos fluxos	
APÊNDICE B – Características físico-químicas dos componentes usados na elaboração dos fluxos	
APÊNDICE C – Difratoograma de raios-X sintético do cloreto de zinco	
APÊNDICE D – Oscilogramas de tensão e corrente	
ANEXO A - Instrumentos de monitoramento da soldagem com polaridade variável e onda retangular	
ANEXO B - Programa SINAL	

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1 Soldagem TIG (esquemático): (a) região do arco, (b) equipamento básico (MARQUES *et al.*, 2005).
- Figura 3.2 Processo PAW operando no modo “Keyhole” (esquemático) (MARQUES *et al.*, 2005).
- Figura 3.3 Soldagem ATIG (LUCAS & HOWSE, 1996).
- Figura 3.4 Representação esquemática do mecanismo de constrição do arco no processo ATIG (LUCAS & HOWSE, 1996).
- Figura 3.5 Representação dos mecanismos propostos para o fluxo de metal líquido na poça de fusão: (a) Efeito Marangoni { $Ma > 0$ ou $Ma < 0$ }, (b) Efeito Eletromagnético {E}, (c) Convecção natural de calor {B} e (d) Arraste aerodinâmico {A} (MILLS & KEENE, 1990).
- Figura 3.6 Representação esquemática das forças de Marangoni atuantes em uma poça de fusão: (a) coeficiente de Marangoni negativo; (b) coeficiente de Marangoni positivo (HEIPLE & ROPER, 1990).
- Figura 3.7 Representação esquemática do mecanismo de emissão de elétrons a frio assistido por camadas de óxido na superfície do catodo (MODENESI, 2002).
- Figura 3.8 Soldagem FBTIG (SIRE *et al.*, 2002).
- Figura 3.9 A imagem digital.

- Figura 3.10 Exemplos de diferentes dinâmicas de (a) imagem e de (b) histogramas.
- Figura 4.1 Materiais usados na preparação e aplicação dos fluxos.
- Figura 4.2 Dispositivo de corte da fita adesiva (Dimensões em mm).
- Figura 4.3 Diagrama $V_2O_5-Al_2O_3$ (LEVIN *et al.*, 1964).
- Figura 4.4 Diagrama $CaO-Al_2O_3$. C_3A : $Ca_3Al_2O_6$, CA : $CaAl_2O_4$, CA_2 : $CaAl_4O_7$, CA_6 : $CaAl_{12}O_{19}$, $C_{12}A_7$: $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$, C_5A_3 : $Ca_5Al_6O_{14}$. (LEVIN *et al.*, 1964).
- Figura 4.5 Diagrama $K_2O-SiO_2-Al_2O_3$ (LEVIN *et al.*, 1964). A região sombreada indica as composições em que a temperatura de fusão é próxima da do alumínio.
- Figura 4.6 Diagrama $Na_2O-SiO_2-Al_2O_3$ (LEVIN *et al.*, 1964). A região sombreada indica as composições em que a temperatura de fusão é próxima da do alumínio.
- Figura 4.7 Diagrama $Al_2O_3-Na_3AlF_6$ (LEVIN *et al.*, 1964).
- Figura 5.1 Representação esquemática da metodologia usada:
(a) Blocos de testes. (b) Seqüência de operações usuais em cada bloco.
- Figura 5.2 Corpo de prova (Dimensões em mm).
- Figura 5.3 Seqüência de operações de acabamento manual da superfície dos corpos de prova. As setas indicam as direções de lixamento ou escovação.

- Figura 5.4 Posição e direção das medições para caracterização do acabamento superficial dos corpos de prova.
- Figura 5.5 Corpo de prova mostrando a direção de soldagem e a camada de fluxo simples aderida à superfície do corpo de prova.
- Figura 5.6 Metodologia para obtenção de uma área delimitada para aplicação de fluxo: (a) Um pedaço de fita adesiva é pressionado com um tubo de PVC contra a superfície cortante do dispositivo; (b) A fita adesiva recortada é retirada; (c) Uma espátula é usada para fixar a fita adesiva ao corpo de prova; (d) Área obtida para aplicação de fluxo.
- Figura 5.7 Preparação e aplicação de um fluxo composto por dois componentes: (a) Os componentes foram moídos separadamente; (b) Foram adicionadas 25mg do primeiro componente (c) A esta quantidade foram adicionadas 25mg do segundo componente totalizando 50mg de fluxo; (d) As partes foram misturadas a seco e distribuídas sobre a área do corpo de prova; (e) Adicionou-se acetona à mistura; (f) A fita adesiva foi retirada.
- Figura 5.8 Disposição dos equipamentos de soldagem e aquisição de dados (esquemático).
- Figura 5.9 Parâmetros de soldagem TIG-CA do corpo de prova padrão.
- Figura 5.10 Mesa fotográfica mostrando no detalhe a fixação das folhas de papel usadas como anteparo.

- Figura 5.11 Imagens mostrando a área fixa de 500x120pixels (linha tracejada) nos cordões de solda TIG-CC⁻ (esquerda), TIG-CA (centro) e ATIG-CC⁻ [NaCl] (direita) e seus respectivos histogramas.
- Figura 5.12 Seções transversais A-A, B-B e C-C retiradas para macrografia (Dimensões em mm).
- Figura 6.1 Imagens dos cordões de solda ATIG-CC⁻ [NaCl] (esquerda), ATIG-CC⁻ [SiO₂] (centro) e ATIG-CC⁻ [NaF] (direita). Ampliação: 3x.
- Figura 6.2 Média e desvio padrão dos valores de tom de cinza dos cordões de solda do corpo de prova padrão: a) TIG-CC⁻ b) TIG-CA.
- Figura 6.3 Correlação entre os valores médios de tom de cinza nas imagens das superfícies dos cordões para diferentes intervalos de tempo entre a soldagem e a realização da medida.
- Figura 6.4 Imagens, valores de tom de cinza e de IL do cordão de solda padrão e dos cordões de solda obtidos com a aplicação de fluxos simples.
- Figura 6.5 Classificação dos fluxos simples com base em IL.
- Figura 6.6 Imagens da região central dos cordões de solda. (a) TIG-CA (b) ATIG-CC⁻ [NaCl]. Ampliação: 1000x.

- Figura 6.7 Imagens da ZTA dos cordões de solda.
(a) TIG-CA (b) ATIG-CC⁻ [NaCl]. Ampliação: 100x.
- Figura 6.8 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície
do cordão de solda TIG-CA. α = Al.
- Figura 6.9 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície
do cordão de solda ATIG-CC⁻ [KCl]. α = Al.
- Figura 6.10 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície
do cordão de solda ATIG-CC⁻ [NaCl]. α = Al.
- Figura 6.11 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície
do cordão de solda ATIG-CC⁻ [CaF₂]. α : Al; β : CaF₂.
- Figura 6.12 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície
do cordão de solda ATIG-CC⁻ [V₂O₅]. α : Al; β : VO.
- Figura 6.13 Energia livre padrão (ΔG^0) das reações químicas entre os
componentes dos fluxos selecionados e a alumina. Curvas
calculadas a partir de dados de Carvalho et al. (1977).
- Figura 6.14 Difratogramas sintéticos de raios-X. (a) Al (b) VO.
- Figura 6.15 Escória aderida à superfície dos cordões de solda
ATIG-CC⁻ (a) ZnCl₂-acetona (b) KCl-AlF₃ (c) AlF₃-CaF₂
(d) NaCl-AlF₃-CaF₂ (e) KCl- NaCl-AlF₃-CaF₂
(f) Na₃AlF₆-Al₂O₃. Ampliação: 3x.
- Figura 6.16 Imagens, valores de tom de cinza e de IL dos cordões de
solda obtidos com fluxo compostos.

- Figura 6.17 Imagens, valores de tom de cinza e de IL dos cordões de solda obtidos com fluxos compostos baseados em diagramas de fase binários e ternários.
- Figura 6.18 Imagens de MEV dos cordões de solda ATIG-CC⁻.
(a) ZnCl_2 -acetona (b) KCl-AlF_3 (c) NaCl-AlF_3
(d) KCl-NaCl-AlF_3 (e) $\text{KCl-NaCl-CaF}_2\text{-AlF}_3$ Ampliação: 30x.
- Figura 6.19 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻ [ZnCl_2 -acetona]. α : Al; β : Zn.
- Figura 6.20 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻ [KCl-AlF_3].
 α : Al; β : AlF_3 ; γ : 0,9Al0,7O1,3F.
- Figura 6.21 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻ [NaCl-AlF_3].
 α : Al; β : 0,9Al0,7O1,3F.
- Figura 6.22 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻ [KCl-NaCl-AlF_3].
 α : Al; β : AlF_3 ; γ : 0,9Al0,7O1,3F.
- Figura 6.23 Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻ [$\text{KCl-NaCl-CaF}_2\text{-AlF}_3$]. α = Al.
- Figura 6.24 Rugosidade superficial dos corpos de prova.
- Figura 6.25 Imagens, valores de tom de cinza e de IL dos cordões de solda ATIG-CC⁻ com o fluxo ZnCl_2 -acetona para diferentes condições de acabamento superficial.

- Figura 6.26 Imagens, valores de tom de cinza e de IL para os cordões de solda obtidos com parâmetros de soldagem variados.
- Figura 6.27 Valores médios de IL para os diferentes parâmetros de soldagem.
- Figura 6.28 Imagens, valores de tom de cinza e de Δ Tom de cinza dos cordões de solda TIG-CA e ATIG-CA.
- Figura 6.29 Imagens, valores de tom de cinza e de IL dos cordões de solda TIG-CA e ATIG-CC⁻[ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg.
- Figura 6.30 Imagens dos cordões de solda ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona].
(a) Al (b) Al-Mg. Ampliação: 3x.
- Figura 6.31 Imagens da superfície dos cordões de solda após limpeza.
(a) TIG-CC⁻ / TIG-CA (b) TIG-CC⁻ / ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona] em Al (c) TIG-CC⁻ / ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona] em Al-Mg. Ampliação: 1,5x.
- Figura 6.32 Espectros de energia dispersiva (EDS) do cordão de solda ATIG-CC⁻[ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg.
(a) Área central. (b) Área lateral.
- Figura 6.33 Difrátograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻[ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg. α : Al; β : Zn.

- Figura 6.34 Imagens de MEV da lateral do cordão de solda ATIG-CC-
[ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg. As setas
indicam as partículas de zinco dispersas em sua superfície.
Ampliação: 30x (esquerda); Ampliação: 1000x (direita).
- Figura 6.35 Resultados de macrografia dos cordões de solda TIG-CC⁻ e
ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona] em alumínio (Al) e alumínio-
magnésio (Al-Mg).
- Figura 6.36 Parâmetros geométricos dos cordões de solda TIG-CC⁻ e
ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-Acetona] em alumínio (Al) e alumínio
magnésio (Al-Mg).

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1	Dados técnicos da fonte Inversal 300.
Tabela IV.2	Composição química (% em peso).
Tabela IV.3	Composição química (% em peso).
Tabela IV.4	Componentes selecionados para a elaboração dos fluxos.
Tabela IV.5	Toxicidade dos componentes selecionados classificados como produtos químicos perigosos.
Tabela V.1	Etapas para limpeza química superficial do alumínio.
Tabela V.2	Formulação dos fluxos compostos obtidos a partir de misturas baseadas em diagramas binários e ternários.
Tabela V.3	Parâmetros de soldagem ATIG-CC ⁻ .
Tabela V. 4	Variações nos parâmetros de soldagem ATIG-CC ⁻ .
Tabela V.5	Parâmetros de soldagem ATIG-CA.
Tabela V.6	Configuração da placa de aquisição de dados.
Tabela VI.1	Valores médios de tensão e corrente de soldagem.
Tabela VI.2	Valores médios de tensão e corrente de soldagem medidos durante a soldagem ATIG-CC ⁻ com fluxos compostos.

LISTA DE NOTAÇÕES

A	Ampère
ATIG	Activated Tungsten Inert Gas
ATIG-CC ⁻	Soldagem ATIG com corrente contínua e eletrodo negativo
ATIG-CA	Soldagem ATIG com polaridade do eletrodo variável e corrente retangular
B	Convecção natural de calor
DRX	Difração de Raios-X
E	Efeito eletromagnético
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
FBTIG	Flux Bounded Tungsten Inert Gas
FSW	Friction Stir Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
I	Corrente elétrica [A]
L	Comprimento característico do sistema [m]
M _a	Efeito Marangoni
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
<i>n</i>	Número de componentes
OFW	Oxi Fuel Welding
P/L	Penetração/Largura
PAW	Plasma Arc Welding
RW	Resistance Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
T	Temperatura [°C]
t	Tempo [ms]
TIG	Tungsten Inert Gas
TIG-CA	Soldagem TIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular
TIG-CC ⁻	Soldagem TIG com corrente contínua e eletrodo negativo
TIG-CC ⁺	Soldagem TIG com corrente contínua e eletrodo positivo

V	Tensão [V]
ZTA	Zona Termicamente Afetada
x	Coordenada no plano da superfície do líquido [m]
α	Difusividade térmica [m ² /s]
ΔG^0	Energia livre padrão [kcal/mol]
γ	Tensão superficial [N/m]
μ	Viscosidade dinâmica [N.s/m ²]

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O alumínio, por suas excelentes propriedades físico-químicas, entre as quais se destaca o baixo peso específico, a resistência à corrosão, uma elevada condutividade térmica e elétrica e, por ser altamente reciclável, apresenta uma ampla utilização, tornando este o metal não-ferroso mais consumido no mundo (ABAL, 2004). Algumas de suas ligas apresentam elevados níveis de resistência mecânica que são obtidas através de tratamentos térmicos e/ou mecânicos, fazendo com que o mesmo seja extremamente competitivo em relação aos seus concorrentes em diversas aplicações estruturais. Assim, estudos para o desenvolvimento ou a otimização de processos de união por soldagem de alumínio, com qualidade e baixo custo, são de fundamental importância.

Um dos processos mais usados na soldagem do alumínio é o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) ou TIG (Tungsten Inert Gas), como é mais conhecido no Brasil. Neste processo, um arco elétrico é formado entre um eletrodo de tungstênio e a peça. A proteção é realizada por um gás ou por uma mistura de gases inertes. Uma das principais limitações deste processo é a sua baixa capacidade de fundir o metal base, o que dificulta sua aplicação na soldagem de componentes de maior espessura. Por exemplo, a maior espessura soldável sem preparação por este processo em aços é cerca de 3mm, com uma corrente de 150 a 200A. Se a corrente for aumentada, a poça de fusão tende a aumentar mais na largura com apenas um pequeno ganho na penetração. Um aumento limitado na penetração, de 1 a 2mm, pode ser obtido com alterações na composição do gás de proteção e, em particular, pela adição de hélio ou hidrogênio na soldagem dos aços inoxidáveis.

Além da baixa penetração, que é um problema ainda mais crítico na soldagem do alumínio devido à sua elevada condutividade térmica, este material

apresenta uma camada superficial de óxido refratário, a alumina (Al_2O_3). Esta camada forma-se quase que instantaneamente e, portanto, deve ser removida imediatamente antes da soldagem, pois pode levar a um mau acabamento do cordão de solda e à formação de inclusões e porosidades.

Desenvolvida na União Soviética na década de 60, a soldagem TIG com fluxos (Processo TIG ativado – ATIG, Activated Tungsten Inert Gas) representa um método alternativo para aumentar fortemente a penetração neste processo, sendo possível a soldagem em um único passe e sem metal de adição de componentes de até 6mm de espessura. Este processo foi estudado principalmente por pesquisadores de países ligados à antiga União Soviética, os quais associaram o aumento na penetração a um efeito de constrição do arco devido à redução da condutividade elétrica nas suas camadas externas, em função da captura de elétrons livres para a formação de íons negativos, principalmente de elementos halogênicos e, eventualmente, de oxigênio (ZAMKOV *et al.*, 1977a e b; KAZAKOV *et al.*, 1991; KAZAKOV, 1991; MECHEV, 1993; LUCAS & HOWSE, 1996; ANDERSON & WIKTOROWICZ, 1996). Este efeito teria um resultado similar à constrição mecânica usada no processo de soldagem a plasma (PAW, Plasma Arc Welding), causando uma maior densidade de corrente na região anódica do arco e, desta forma, aumentando a densidade de energia transferida à peça.

Trabalhos desenvolvidos em alumínio indicam que a soldagem ATIG com fluxos compostos por cloretos ou fluoretos pode levar a um certo aumento na penetração do cordão de solda (CASTRO, 2000; PEREIRA, 2000). Mais importante, contudo, estes estudos mostram que, através da seleção adequada de um fluxo, pode-se obter uma razoável remoção da camada de alumina, usando-se corrente contínua e eletrodo negativo. Esta configuração, que não é usualmente utilizada na soldagem do alumínio e suas ligas possui muitas vantagens em termos de estabilidade e capacidade de fusão do metal base, aumentando ainda a vida útil do eletrodo. Além disto, dispensa o uso de um

ignitor de alta frequência, o qual é prejudicial para equipamentos eletrônicos localizados próximo à área de soldagem.

O processo de soldagem ATIG é uma variante simples do processo TIG convencional, que permite a obtenção das melhorias citadas anteriormente sem elevar significativamente o custo, pois não exige o uso de nenhum equipamento especial. O processo consiste apenas na aplicação de uma camada fina de fluxo sobre o material a ser soldado antes do início da operação de soldagem. Os fluxos são constituídos por materiais misturados em acetona e, em geral, aplicados com um pincel. A acetona evapora-se em segundos, deixando a camada do fluxo aderida à superfície do metal base. Durante a soldagem, parte dos materiais do fluxo é vaporizada para o arco que seria afetado por esses componentes.

O processo de soldagem ATIG atraiu na última década, um grande interesse nos países desenvolvidos, sendo realizados projetos de pesquisa na Inglaterra (pelo The Welding Institute - TWI) e nos Estados Unidos (pelo Navy Joining Center - NJC). Como resultado deste trabalho, patentes recentes envolvendo este processo de soldagem começaram a surgir. No Laboratório de Soldagem e Ensaio Não Destrutivos (LabSEND) da UFMG tem-se estudado a soldagem ATIG desde 1996 (APOLINÁRIO, 1998; PEREIRA, 2000).

Este trabalho apresenta um estudo sobre o processo de soldagem ATIG de alumínio, operando o processo com corrente contínua e eletrodo negativo (ATIG-CC⁻) visando identificar os fluxos mais efetivos na remoção da camada de alumina. Após a seleção destes fluxos avaliou-se a influência do acabamento superficial, dos parâmetros de soldagem e do tipo de metal base no efeito dos mesmos nesta configuração de soldagem. A estabilidade e as características operacionais da soldagem ATIG com polaridade do eletrodo variável e corrente retangular (ATIG-CA) aplicando-se estes fluxos também foi avaliada.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a viabilidade de aplicação do processo de soldagem ATIG de alumínio, operando o processo com corrente contínua e eletrodo negativo (ATIG-CC⁻) visando selecionar os fluxos mais efetivos na remoção da camada superficial de alumina. Os objetivos específicos em relação à soldagem ATIG aplicando-se somente estes fluxos selecionados foram:

- Avaliar a influência de diferentes condições de acabamento superficial do metal base na soldagem ATIG-CC⁻;
- Estudar a influência de variações nos parâmetros de soldagem ATIG-CC⁻, como corrente, comprimento de arco e velocidade;
- Avaliar a possibilidade de reduzir o tempo em que o eletrodo opera no ciclo positivo na soldagem ATIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (ATIG-CA);
- Avaliar o efeito do metal base nas características geométricas do cordão de solda na soldagem ATIG-CC⁻.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados tópicos considerados relevantes para um melhor entendimento dos objetivos e da metodologia adotada deste trabalho. Para isto, serão abordados inicialmente as características do alumínio, seus processos usuais de soldagem e as dificuldades encontradas na operação de soldagem deste material. Será dada uma breve descrição dos processos de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) e de soldagem a plasma (PAW, Plasma Arc Welding). Após um breve histórico da soldagem TIG com fluxos (ATIG, Activated Tungsten Arc Welding), serão vistos mecanismos já conhecidos e estudados nos aços e em ligas de titânio sobre os efeitos da adição dos fluxos, no arco elétrico e na poça de fusão. Serão apresentadas as configurações atuais da soldagem TIG de alumínio, as características da camada de alumina e os mecanismos de sua remoção durante a soldagem. Finalmente, serão apresentadas conclusões de alguns trabalhos realizados sobre a soldagem ATIG do alumínio, dentre os quais, se destaca o efeito dos fluxos na remoção da camada superficial de alumina além do ganho na penetração observado em trabalhos sobre a soldagem ATIG de outros materiais.

3.2 Soldabilidade do alumínio

O alumínio apresenta características como elevada afinidade pelo oxigênio, elevada condutividade térmica, elevado coeficiente de expansão térmica e baixo ponto de fusão, 660°C (AWS, 1998). Estas diferenças nas propriedades físicas e químicas em relação a outros materiais, como por exemplo, os aços, exigem que alguns cuidados sejam tomados durante o processo e, especialmente, na preparação antes do início da soldagem do alumínio e suas

ligas. Mesmo assim, o alumínio pode ainda ser considerado um metal facilmente soldável (MATERIALS ENGINEERING, 2004).

O alumínio reage com o oxigênio quase que instantaneamente formando uma camada superficial refratária de óxido, a alumina (Al_2O_3), cujo ponto de fusão, acima de 2000°C , é muito superior ao do próprio alumínio. Esta camada, durante a soldagem, pode representar uma barreira física que impede o contato e a mistura entre o metal base fundido e o metal de adição formando inclusões na solda. Além disto, ela pode levar também a um mau acabamento do cordão de solda e à formação de porosidades. Desta forma, a alumina deve ser removida imediatamente antes da soldagem. Esta remoção pode ser realizada por meios químicos através da limpeza por solventes ou decapagem, ou por meios mecânicos, como lixamento, escovamento, abrasão ou forjamento (ABAL, 2004).

Os processos mais utilizados na soldagem do alumínio são o TIG (Tungsten Inert Gas) e o MIG (Metal Inert Gas). Estes processos também são atualmente conhecidos como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) e GMAW (Gas Metal Arc Welding), respectivamente. Além destes, podem ser utilizados outros processos, como soldagem a plasma (PAW, Plasma Arc Welding), chama oxigás (OFW, Oxi Fuel Welding), soldagem por resistência elétrica (RW, Resistance Welding), soldagem a arco com eletrodos revestidos (SMAW, Shielded Metal Arc Welding) e, mais recentemente, soldagem por fricção linear (FSW, Friction Stir Welding). A escolha do processo de soldagem mais adequado para o alumínio depende de inúmeros fatores, como por exemplo, da espessura da peça a ser soldada e da sua aplicação. A seguir, será dada uma breve descrição de aspectos relevantes dos processos de soldagem TIG e PAW. Uma descrição completa destes processos e de todos os demais citados anteriormente, abrangendo desde técnicas de operação e recentes inovações, pode ser obtida em um grande número de referências, como por exemplo, em Marques *et al.* (2005) e em AWS (1991).

3.3 Soldagem TIG

O processo TIG foi desenvolvido para a soldagem de materiais de fácil oxidação como o alumínio e o magnésio, particularmente para a indústria de aviação no início da segunda guerra mundial. Atualmente, este processo é também utilizado na soldagem de materiais especiais como na costura e união de topo de tubos de aço inoxidável e, em diversas aplicações específicas, nas quais a qualidade e o controle da geometria do cordão de solda são de fundamental importância, como por exemplo, na soldagem de passes de raiz em tubulações de aço carbono e de outros materiais.

É um processo de soldagem por fusão que utiliza como proteção um único gás inerte, geralmente o argônio, ou uma mistura de gases, como por exemplo, argônio e hélio. O arco elétrico é formado entre um eletrodo de tungstênio não consumível e o metal base a ser soldado. A figura 3.1 mostra uma representação esquemática do processo e dos equipamentos usados.

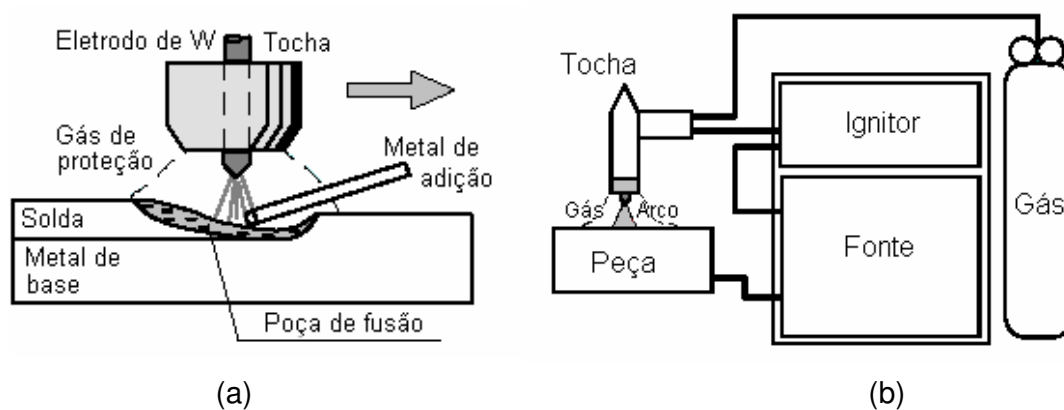


Figura 3.1 - Soldagem TIG (esquemático): (a) região do arco, (b) equipamento básico (MARQUES *et al.*, 2005).

A função do ignitor de alta frequência, mostrado na figura 3.1(b), na soldagem com corrente contínua, é apenas gerar um sinal de alta frequência (cerca de 5kHz), o qual associado a um valor elevado de alta tensão (3kV) promove a abertura do arco elétrico dando início ao processo. Durante a soldagem com este tipo de corrente, ele é mantido desligado. O arco elétrico pode ainda ser estabelecido através de outros métodos, como por exemplo, através de um arco piloto ou através do toque do eletrodo à peça.

A soldagem TIG autógena, ou seja, quando não se utiliza metal de adição, é adequada na união de tubulações e de chapas com tubulações. Na união de peças ou componentes de pequena espessura, permite a realização de soldas com um bom acabamento e um alto nível de qualidade através de ajustes nos parâmetros de soldagem (LUCAS & HOWSE, 1996).

As principais desvantagens do processo TIG são a limitação da espessura dos materiais que podem ser soldados em um único passe, a elevada sensibilidade da geometria do cordão de solda às variações na composição química do metal base e a baixa produtividade (LUCAS & HOWSE, 1996; AWS, 1991). A maior espessura soldável sem preparação por este processo nos aços é cerca de 3mm com uma corrente de 150 a 200A. Se a corrente for aumentada, a poça de fusão tende a aumentar mais na largura com apenas um pequeno ganho na penetração.

Um aumento limitado na penetração de 1 a 2mm pode ser obtido com alterações na composição do gás de proteção, em particular pela adição de hélio ou de hidrogênio na soldagem de aços inoxidáveis. Uma mistura de 70% de hélio, 25% de argônio e 5% de hidrogênio foi usada com sucesso para aumentar a profundidade de penetração sem aumentar excessivamente a largura do cordão de solda nestes materiais (LUCAS & HOWSE, 1996). Entretanto, deve ser ressaltado que o uso de uma mistura particular de gases não é uma solução universal para o aumento na profundidade de penetração, a qual depende também da composição química do material a ser soldado, dos

parâmetros de soldagem, da presença de filmes de óxidos (escória líquida), dos gradientes de temperatura e da convecção de fluidos na superfície da poça de fusão (MILLS & KEENE, 1990).

3.4 Soldagem a plasma

A soldagem a arco plasma (Plasma Arc Welding, PAW) foi desenvolvida baseada no processo TIG com o objetivo de se obter uma maior penetração do cordão de solda, através de uma constrição mecânica do arco elétrico, que é forçado a passar por um bocal constritor. Esta constrição do arco limita o seu diâmetro e aumenta de forma considerável a sua intensidade, ou densidade de energia, possibilitando atingir uma pequena área na superfície do metal base. São utilizados dois fluxos de gases no processo de soldagem PAW. O primeiro, chamado de gás de plasma, protege o eletrodo e sai por um orifício no bocal constritor, na forma de um gás fortemente aquecido. Este gás deve ser inerte e freqüentemente é usado o argônio. O segundo é responsável pela proteção da poça de fusão e passa por um bocal externo, concêntrico ao bocal constritor. Este gás pode ser inerte ou uma mistura de gases. A soldagem a arco plasma pode ser feita utilizando-se duas técnicas: por fusão, semelhante a outros processos a arco, e “keyhole” ou furo, que também é utilizada em processos de alta intensidade, como a soldagem a laser e por feixe eletrônico. A figura 3.2 ilustra o processo.

A soldagem a plasma pode ser feita em qualquer posição, com velocidade elevada e, em geral, com menor energia de soldagem e maior razão penetração/largura (P/L) do cordão de solda. Isto pode resultar em vantagens significativas na soldagem de materiais de má soldabilidade ou em aplicações em que se deseja alta produtividade ou uma maior precisão dimensional da peça soldada, como por exemplo, na fabricação de tubos com costura de parede fina de alumínio, titânio ou aço inoxidável e, soldagem em passe único, sem metal de adição, até espessuras em torno de 12mm.

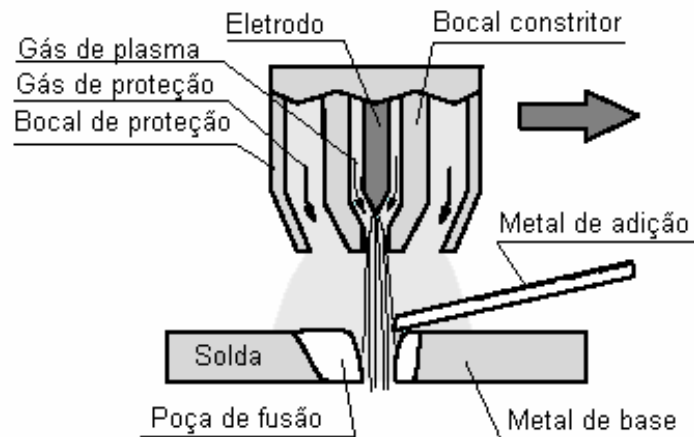


Figura 3.2 - Processo PAW operando no modo “Keyhole” (esquemático)
(MARQUES *et al.*, 2005).

A alta estabilidade do arco permite o uso de uma intensidade de corrente muito baixa, situação adequada para a soldagem de peças de pequena espessura, inferior a um milímetro, difícil ou mesmo impossível de serem soldadas por outro processo a arco (MARQUES *et al.*, 2005).

3.5 Soldagem ATIG

A soldagem TIG com fluxos (Processo TIG ativado – ATIG, Activated Tungsten Inert Gas) foi desenvolvida na União Soviética na década de 60 para a soldagem de titânio (LUCAS & HOWSE, 1996; ANDERSON & WIKTOROWICZ, 1996). Este processo representa um método alternativo para aumentar fortemente a penetração na soldagem TIG e reduzir a sensibilidade à variações na composição química do metal base. Resultados da literatura indicam que componentes de até 10mm podem ser soldados em um único passe, com um aumento de duas a seis vezes na produtividade (LUCAS & HOWSE, 1996).

O processo de soldagem ATIG foi estudado principalmente por pesquisadores de países associados à antiga União Soviética. Estes estudos associaram o aumento na penetração com um efeito de constrição do arco elétrico devido à redução da condutividade elétrica em suas camadas externas, em função da captura de elétrons livres para a formação de íons negativos, principalmente de elementos halogênicos e, eventualmente, de oxigênio (ZAMKOV *et al.*, 1977a e b; KAZAKOV *et al.*, 1991; KAZAKOV, 1991; MECHEV, 1993; LUCAS & HOWSE, 1996; ANDERSON & WIKTOROWICZ, 1996). Este efeito promoveria um resultado similar à constrição mecânica obtida no processo de soldagem a plasma (seção 3.4), causando uma maior densidade de corrente na região anódica do arco e, desta forma, aumentando a densidade de energia transferida à peça.

A soldagem ATIG é uma variante simples do processo TIG convencional e não exige nenhum equipamento especial. Antes da soldagem, uma camada fina de fluxo é aplicada sobre o material a ser soldado (Figura 3.3). Os fluxos são formados por uma mistura de materiais com acetona até a obtenção de uma consistência pastosa, podendo ser aplicados com um simples pincel. A acetona evapora-se em segundos deixando uma camada de fluxo aderida à superfície da peça. Durante a soldagem, parte dos materiais do fluxo é vaporizada para o arco que seria afetado por esses componentes.

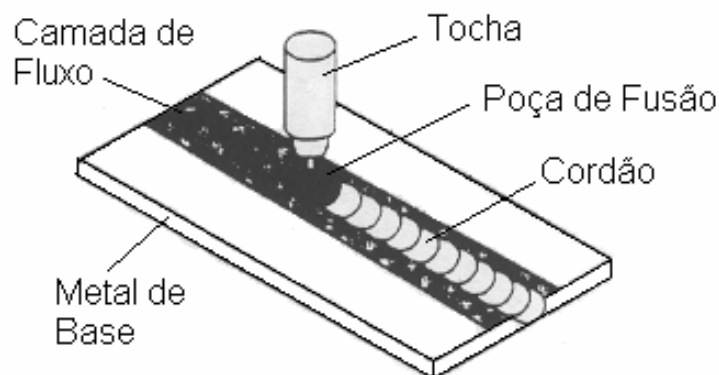


Figura 3.3 - Soldagem ATIG (LUCAS & HOWSE, 1996).

3.5.1 Fluxos para soldagem ATIG

Um fluxo pode interagir com a camada de óxido e de outras contaminações na superfície de uma peça metálica, durante a operação de soldagem, de três maneiras: (i) por reação química, formando uma escória de baixo ponto de fusão, (ii) pela redução do óxido e (iii) pela dissolução do óxido ou contaminação no fluxo, o qual não teria os seus pontos de fusão e viscosidade significativamente alterados (LINNERT, 1994). Na soldagem do alumínio, cloretos e fluoretos seriam mais eficientes para desempenhar estas funções porque estes têm uma alta solubilidade pelo óxido de alumínio.

A maioria dos estudos disponíveis sobre a soldagem ATIG não informa, possivelmente por razões comerciais, a composição dos fluxos usados, identificando-os por nomenclaturas próprias. Em grande parte destes trabalhos, os autores pesquisaram o efeito de fluxos de formulação complexa dificultando uma análise particular da função dos seus componentes. O efeito de fluxos simples foi estudado por Apolinário (1998) e Modenesi *et al.* (2000), que observaram aumentos na penetração do cordão de solda de até 300% na soldagem ATIG de aços inoxidáveis, usando a sílica como único componente.

O efeito de fluxos compostos foi observado em diversos materiais. Nos aços inoxidáveis, por exemplo, uma melhor soldabilidade associada a um aumento na velocidade de soldagem foi obtida com a utilização de fluxos à base de óxidos de cromo, silício, titânio, manganês, níquel, cobalto, molibdênio ou cálcio (U.S. PATENT, 1969 *apud* LUCAS & HOWSE, 1996). Na soldagem de titânio, um aumento na profundidade de penetração atribuído à constrição do arco foi obtido com o uso de fluxos à base de sais halogênicos como fluoretos de cálcio e de alumínio (SIMONIK, 1976). Fan *et al.* (2001) estudaram o efeito do uso de fluxos de óxidos de silício, titânio, cálcio, magnésio, cromo e de sais halogênicos na soldagem de chapas de aço médio carbono. Os autores observaram um aumento na penetração duas vezes maior em relação ao processo TIG convencional.

Além do aumento na penetração, foi observado também que os fluxos podem proporcionar uma melhoria nas propriedades mecânicas do metal de solda em relação às obtidas no processo de soldagem TIG autógena convencional (LUCAS & HOWSE, 1996) e, ainda, uma limpeza da camada de óxido superficial em ligas de fácil oxidação, como o alumínio (CASTRO, 2000, PEREIRA, 2000).

3.5.2 Geometria do cordão de solda

A geometria do cordão de solda pode ser influenciada pela atração do arco elétrico por regiões de escória líquida e partículas sólidas flutuando sobre a poça de fusão (MILLS & KEENE, 1990). Leinonen & Karjalainen (1989); Heiple & Roper (1990); Mills & Keene (1990) e Paskell *et al.* (1997) propuseram que a geometria do cordão de solda pode ser controlada por variações no fluxo de metal líquido na poça de fusão. Os fatores principais, considerados como controladores deste fluxo, foram as forças resultantes da variação na tensão superficial ao longo da superfície da poça de fusão (Efeito Marangoni), forças eletromagnéticas (Forças de Lorentz) resultantes da passagem de corrente elétrica para a poça de fusão e forças de arraste causadas pela passagem do gás de proteção sobre a mesma.

Em relação ao processo de soldagem ATIG, dois mecanismos foram propostos para explicar o efeito dos fluxos nas variações da geometria do cordão de solda. O primeiro é relacionado com a constrição do arco elétrico e o segundo às variações na tensão superficial da poça de fusão.

3.5.3 Constrição do arco elétrico

Diversos pesquisadores (ZAMKOV *et al.*, 1977a e b; KAZAKOV *et al.*, 1991; KAZAKOV, 1991; MECHEV, 1993; LUCAS & HOWSE, 1996; ANDERSON & WIKTOROWICZ, 1996; ISHIZAKI *et al.*, 1996 *apud* LUCAS & HOWSE, 1996; FAN *et al.*, 2001) associaram o aumento na penetração observado no processo

de soldagem ATIG com uma constrição do arco elétrico. Segundo estes autores, esta constrição ocorre devido à captura de elétrons livres nas regiões externas do arco por átomos de certos elementos vaporizados do fluxo, particularmente os elementos halogênicos. Este efeito seria responsável por uma redução no diâmetro (ou constrição) do arco elétrico. De acordo com esta proposição, na região central do arco, onde a temperatura é mais elevada, os átomos do gás e do fluxo são ionizados gerando elétrons e íons positivos. Contudo, o número de moléculas e átomos dissociados nas camadas externas do arco é suficientemente grande para interagir com os elétrons de forma significativa. Em particular, elementos mais eletronegativos, como o flúor, cloro e oxigênio, tendem a capturar os elétrons livres, reduzindo, desta forma, a mobilidade dos transportadores de corrente elétrica e, portanto, a condutividade elétrica desta região do arco. Como resultado deste efeito, o arco tende a constriir-se, aumentando a densidade de corrente em sua região central (Figura 3.4). Ocorre, então, uma redução no diâmetro da coluna de plasma e, portanto, da área de contato do arco com a superfície do metal base e, desta forma, a densidade de energia transferida para o metal base é aumentada. Como o grau de constrição do arco é determinado pela capacidade dos elementos do fluxo, que foram vaporizados no arco, de combinarem com os elétrons (LABORIE *et al.*, 1996 *apud* LUCAS & HOWSE, 1996), elementos de maior eletronegatividade seriam mais eficazes para causar a constrição do arco. Por exemplo, quando um sal de flúor é dissociado, este elemento apresenta uma grande afinidade por elétrons causando uma forte constrição do arco.

O oxigênio tem uma eletronegatividade menor que a do flúor e maior que a do cloro, os quais são elementos halogênicos. Entretanto, os óxidos metálicos apresentam, em geral, temperaturas de dissociação mais altas, o que poderia melhorar a sua efetividade na absorção de elétrons da região periférica do arco (LUCAS & HOWSE, 1996). Seguindo a mesma linha de raciocínio, os sais halogênicos com afinidade similar por elétrons e com uma temperatura de

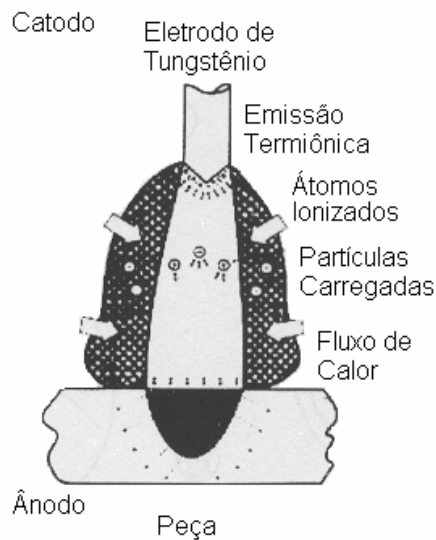


Figura 3.4 – Representação esquemática do mecanismo de constrição do arco no processo ATIG (LUCAS & HOWSE, 1996).

dissociação ainda mais elevada que a dos óxidos metálicos, seriam mais efetivos para causar a constrição do arco elétrico (SIMONIK, 1976).

Entretanto, Leinonen & Karjalainen (1989); Heiple & Roper (1990); Mills & Keene (1990) e Paskell *et al.* (1997) obtiveram em diferentes situações, dados contrários de que um efeito no arco elétrico fosse o principal controlador do formato do cordão de solda. Apolinário (1998) e Perry (2000) concluíram, através de uma comparação entre os parâmetros operacionais do processo, o aspecto do arco e os parâmetros geométricos do cordão de solda dos processos de soldagem TIG e ATIG, que mecanismos atuantes na poça de fusão seriam os principais responsáveis pelas alterações no formato do cordão de solda ATIG.

3.5.4 Influência da tensão superficial na poça de fusão

Heiple & Roper (1982); Leinonen & Karjalainen (1989); Heiple & Roper (1990); Mills & Keene (1990) & Paskell *et al.* (1997) associaram variações na penetração do cordão de solda obtido com o processo de soldagem TIG

convencional com efeitos na poça de fusão e, principalmente, com mudanças no fluxo de metal líquido. Segundo estes autores, que teriam se baseado no efeito Marangoni, gradientes de tensão superficial devido a gradientes térmicos poderiam afetar de forma significativa o movimento de líquidos na poça de fusão.

Foi demonstrado por Marangoni que um gradiente de tensão superficial em um líquido tenderá a movê-lo da região de menor para a de maior tensão superficial. O fluxo de material induzido por este processo é conhecido comumente como corrente (ou efeito de) Marangoni (HEIPLE & ROPER, 1990). As variações na profundidade de penetração do cordão de solda em aços seriam resultantes da convecção de metal líquido na poça de fusão, influenciada pela composição química da mesma, particularmente, pelo teor de enxofre dissolvido. Por outro lado, existem outros mecanismos (Figura 3.5) que influenciam o movimento de metal líquido na poça de fusão e que podem afetar a geometria do cordão de solda (MILLS & KEENE, 1990).

O efeito Marangoni pode ser expresso pelo número adimensional (Ma):

$$Ma = \frac{d\gamma}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} \cdot \frac{L^2}{\mu\alpha} \quad (3.1)$$

onde x [m] é uma coordenada no plano da superfície do líquido, γ [N/m] a tensão superficial, T [°C] a temperatura, L [m] um comprimento característico do sistema, μ [N.s/m²] a viscosidade dinâmica e α [m²/s] a difusividade térmica (MILLS K.C. *et al.*, 1998).

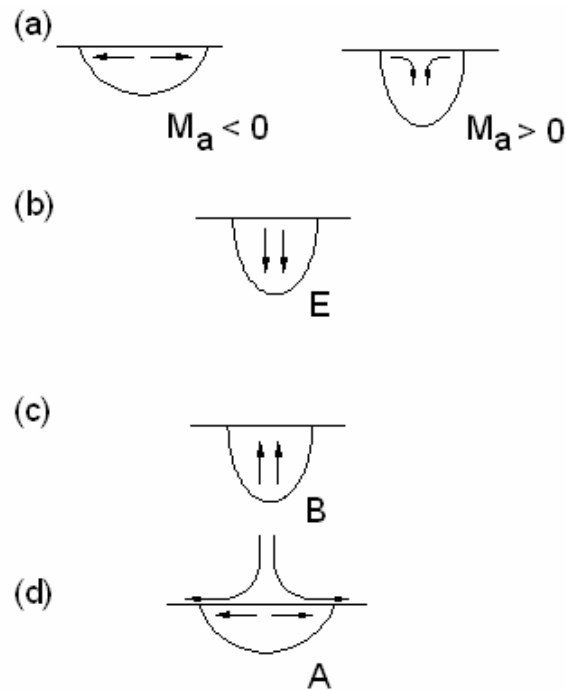


Figura 3.5 – Representação dos mecanismos propostos para o fluxo de metal líquido na poça de fusão: (a) Efeito Marangoni $\{M_a > 0 \text{ ou } M_a < 0\}$, (b) Efeito Eletromagnético $\{E\}$, (c) Convecção natural de calor $\{B\}$ e (d) Arraste aerodinâmico $\{A\}$ (MILLS & KEENE, 1990).

Para um gradiente térmico (dT/dx) positivo, M_a será negativo quando a tensão superficial diminuir com a temperatura, como é observado, por exemplo, nos metais líquidos puros. Por outro lado, a presença de elementos tensoativos em solução no líquido tende a reduzir a tensão superficial no líquido e inverter a sua variação com a temperatura, tornando assim, M_a maior que zero (MILLS & KEENE, 1990).

O sinal de M_a determina o sentido dos fluxos de metal líquido devido ao efeito Marangoni. Assim, se M_a for negativo, Figura 3.6(a), o fluxo ocorrerá das regiões do centro para as regiões da borda da poça de fusão. Por outro lado, se M_a for positivo, Figura 3.6(b), o fluxo ocorrerá das regiões das bordas para as regiões do centro da poça de fusão (HEIPLE & ROPER, 1990).

A presença de elementos tensoativos em solução e de elevados gradientes de temperatura são condições que possibilitam a ocorrência do efeito Marangoni na poça de fusão, de forma que a magnitude das forças geradas pelo gradiente de tensão superficial pode ser predominante em relação às forças de outros mecanismos atuantes. Mudanças inesperadas na geometria do cordão de solda observadas na soldagem TIG mecanizada de aços inoxidáveis e associadas com pequenas variações na concentração de elementos residuais podem ser explicadas como resultado de variações na forma da curva da tensão superficial do metal líquido em função da temperatura (ISHIZAKI *et al.*, 1996 *apud* LUCAS & HOWSE, 1996). Sendo assim, o fluxo de metal líquido na poça de fusão muda de sentido alterando a geometria do cordão de solda devido à presença de alguns elementos na poça de fusão, principalmente de elementos do grupo VIA da tabela periódica (O, S, Se, Te), os quais teriam um forte efeito sobre γ e $d\gamma/dT$.

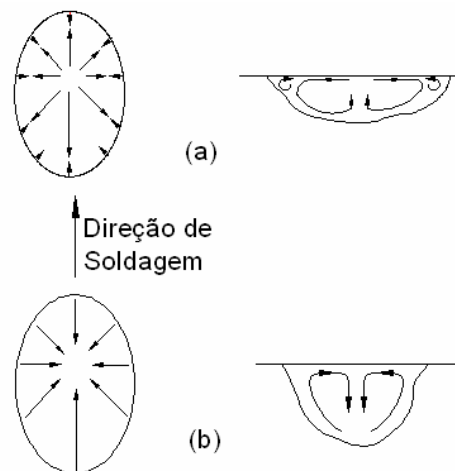


Figura 3.6 - Representação esquemática das forças de Marangoni atuantes em uma poça de fusão: (a) coeficiente de Marangoni negativo; (b) coeficiente de Marangoni positivo (HEIPLE & ROPER, 1990).

Outros elementos que teriam um efeito similar seriam o N, P, Sb e alguns elementos halogênicos (MILLS & KEENE, 1990). Estes elementos tendem a ser fortemente segregados para a superfície quando estão presentes em solução em um metal líquido e, em pequenas proporções, tendem a causar uma forte redução na tensão superficial do líquido e modificar a relação entre a tensão superficial do metal ou da liga com a temperatura. Como resultado, para uma faixa limitada de temperatura acima do ponto de fusão, a tensão superficial do líquido passa a aumentar com a temperatura.

Alguns elementos tais como Al, Si, Mn, Ti, Ca, Ce, La, C e Cr, que não são tensoativos, podem também provocar mudanças na geometria da poça de fusão e conseqüentemente do cordão de solda. Estes elementos podem reagir com os elementos tensoativos existentes e formar compostos, os quais não são ativadores de superfície, retirando desta forma, os elementos tensoativos da solução. Com isto, o efeito destes elementos no metal líquido pode ser até mesmo eliminado.

Variações na penetração do cordão de solda em aços inoxidáveis foram inicialmente associadas com a presença de elementos como alumínio e titânio. (HEIPLE & ROPER, 1982). Heiple & Roper (1990); Mills & Keene (1990) associaram um efeito similar, embora em sentido contrário, às alterações nos teores de enxofre e oxigênio. Os teores para os quais estes elementos produziram este efeito foram superiores a 60ppm e 40ppm, para o enxofre e para o oxigênio, respectivamente.

Heiple & Roper (1982) atribuíram o papel do alumínio neste fenômeno à sua capacidade de reagir, na poça de fusão, com o oxigênio (elemento tensoativo em aços) para formar a alumina, a qual não afeta a tensão superficial dos aços. Na ausência de uma concentração substancial de outro elemento tensoativo, por exemplo, o enxofre, a elevada desoxidação da poça de fusão promoveria alterações na geometria do cordão de solda, produzindo soldas largas e rasas, semelhantes à representada na figura 3.6(a).

Lambert (1989a e b) sugeriu que filmes de óxidos (escórias) formados na superfície da poça de fusão podem também exercer algum efeito na penetração do cordão de solda. Estes podem se formar de inclusões flutuando na superfície ou, até mesmo, pela oxidação da poça de fusão. Alguns dos compostos formados apresentam elevado ponto de fusão, por exemplo, CaO (2.600°C), Al_2O_3 (2.050°C), Ce_2O_3 (2.300°C), CeS (2.100°C) e o $(\text{CeO}_2)\text{S}$ (1.950°C), e podem estar na forma sólida ou pastosa. Estes filmes de escórias formados na superfície da poça de fusão podem ser classificados em escórias do tipo A e escórias do tipo B. O primeiro tipo corresponderia a um filme de óxidos que protege toda a superfície da poça de fusão, exceto a região diretamente abaixo do arco. E, o segundo, escórias do tipo B, corresponderiam a um filme denso (pastoso ou sólido) de óxidos localizados na região da borda da poça de fusão. A profundidade de penetração para escórias do tipo B tende a ser muito baixa, devido a maior possibilidade de se obter anodos pontuais, evidenciando que escórias mais densas ou parcialmente sólidas apresentam um efeito negativo na penetração do cordão de solda. Além disso, o arco elétrico é forçado a uma operação de soldagem com maior instabilidade. Por outro lado, para escórias do tipo A, a penetração tende a ser maior e o arco elétrico apresenta uma maior estabilidade.

Conforme Yamauchi (1986) *apud* Mills e Keene (1990), em aços o volume de escória tende a aumentar com o aumento dos teores de silício, manganês e alumínio e a reduzir com o aumento do teor de enxofre. Foi verificado, também, que a presença de enxofre na superfície da poça de fusão reduz severamente a formação de óxidos. Por outro lado, observou-se que a oxidação da superfície da poça de fusão pode causar uma redução da pressão do arco sobre a mesma, sendo, conseqüentemente necessária, uma redução na velocidade de soldagem.

3.6 Soldagem TIG do alumínio

O alumínio pode ser soldado pelo processo TIG com corrente contínua e o eletrodo ligado ao pólo positivo (CC^+) ou com corrente alternada (CA), configurações estas que permitem a remoção da camada de alumina através de mecanismos de limpeza bem estabelecidos e que serão ainda abordados nesta seção. Contudo, na soldagem com CC^+ , o balanço térmico é muito desfavorável, levando a um processo extremamente ineficiente, apresentando um arco menos estável, um maior aquecimento do eletrodo e uma menor penetração do cordão de solda, sendo, portanto, utilizado somente na soldagem de peças muito finas (MARQUES *et al.* 2005). Na soldagem com CA, o ignitor de alta frequência (Figura 3.1) deve permanecer ligado durante toda a operação para estabilizar a descarga elétrica e evitar a extinção do arco quando a corrente se anula a cada inversão de polaridade. A alta frequência gerada pode danificar os circuitos eletrônicos de equipamentos próximos à área de trabalho. Algumas fontes de energia modernas possibilitam a soldagem com polaridade do eletrodo variável e onda de formato retangular (em oposição à corrente alternada comum cuja onda tem um formato senoidal). Nesse caso, como a troca de polaridade é quase instantânea, o uso de alta frequência para manter o arco pode ser dispensado. Estas fontes permitem ainda ajustar a relação entre os tempos de cada polaridade da corrente, permitindo, assim, otimizar a ação de limpeza do arco e minimizar o desgaste do eletrodo.

Na soldagem de alumínio com corrente contínua e eletrodo ligado ao pólo negativo (CC^-), devido à presença da camada de alumina, o arco não apresenta a mesma estabilidade que naturalmente apresentaria na soldagem de outros materiais (REIS & SCOTTI, 1996). Além disso, nesta situação, a camada de alumina dificulta a passagem da corrente elétrica comprometendo o resultado final da soldagem. Esta camada apresenta uma elevada temperatura de fusão (2050°C), muito superior a do próprio alumínio (660°C), representando uma barreira física que impede o contato e a mistura entre o metal base fundido e o metal de adição formando inclusões na solda.

3.6.1 A camada de alumina

A alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3) é um produto da oxidação deste metal. Os óxidos metálicos são substâncias iônicas, com os íons do metal e do oxigênio regularmente distribuídos em uma rede cristalina. O óxido de alumínio possui uma estrutura com elevada concentração de lacunas (CSANÁDY *et al.*, 1984), sendo classificado devido a esta imperfeição, como um óxido ou um semiconductor do tipo *n* (negativo), em que a condutividade é devida a elétrons em excesso (GENTIL, 1996).

A espessura da camada de alumina depende do meio ao qual o material é exposto. Em contato com o oxigênio seco, por exemplo, à temperatura ambiente, a espessura é de 2,5 a 3nm. Ao ar atmosférico, a espessura normalmente é da ordem de 5nm. A espessura típica em ambientes úmidos pode chegar a 10nm sendo que podem ser gerados filmes duplos com óxidos hidratados próximos à superfície (ASM, 1984).

A caracterização precisa da camada de alumina, que envolveria a determinação da sua morfologia microestrutural e de sua espessura, não tem sido uma tarefa simples. Fuerschbach (1998), por exemplo, avalia que um método considerado bastante apropriado, a Espectroscopia de Elétrons Auger, seria bastante dispendioso devido à grande quantidade de testes que seriam necessários. Na tentativa de avaliar quantitativamente as condições de limpeza de chapas de uma liga de alumínio laminada, Vieira (1999), que estudou a influência das condições superficiais do alumínio na estabilidade do arco em soldagem TIG, pesquisou a viabilidade de utilização de vários métodos de análise superficial para a medição da espessura da camada de óxido. Dentre os vários métodos analisados pelo autor, a Espectroscopia Fotoeletrônica por Raios-X (XPS) e a Elipsometria (através da deflexão do ângulo do plano de polarização de um feixe de luz refletido da superfície metálica) mostraram-se inviáveis devido à sua complexidade. E, em relação ao Método de Redução Eletrométrica, que se baseia na estimativa da quantidade de óxido reduzida

eletroquimicamente pela passagem de uma carga elétrica quantificável pela amostra e por um eletrólito, o autor encontrou também algumas dificuldades em utilizá-lo. Uma das dificuldades é que o eletrólito provocaria modificações na estrutura, na hidratação e na composição química da camada de óxido.

3.6.2 Mecanismos de limpeza

A limpeza catódica consiste na remoção da camada de óxido superficial pela ação do arco elétrico quando o eletrodo é positivo e o gás de proteção rico em argônio. Assim, o uso deste tipo de corrente e polaridade é bastante vantajoso na soldagem de metais fortemente reativos como magnésio, titânio e alumínio (MARQUES *et al.*, 2005). Este efeito é bem conhecido em soldagem e de importância tecnológica na soldagem com proteção gasosa do alumínio (GUILLE, 1971; MODENESI, 2002). É relacionada a uma emissão “a frio” de elétrons e ocorre através de mecanismos bem menos compreendidos do que a emissão termiônica observada em catodos de material refratário como o tungstênio. Maiores informações sobre este mecanismo podem ser encontradas em Modenesi (2002) e Guile (1971).

Existem evidências de que na soldagem a arco com proteção gasosa e possivelmente com proteção de fluxo, a presença de filmes de óxidos de espessura microscópica na superfície do catodo desempenha um papel fundamental na emissão “a frio” de elétrons. Segundo Modenesi (2002), embora o mecanismo desta emissão não seja completamente conhecido, este aparentemente envolve a formação de campos elétricos extremamente intensos na camada de óxido, pela adsorção de íons positivos, o que leva a formação de filetes condutores de óxido, à emissão de elétrons, à destruição da camada neste local e, conseqüentemente, do ponto de emissão (figura 3.7). Tem sido sugerido que dois diferentes mecanismos de emissão de elétrons e erosão de catodo podem ocorrer: (a) para filmes de óxido com espessura inferior a 10nm, ocorre o mecanismo de tunelamento (“tunneling”) e

evaporação e, (b) para filmes mais espessos, o chaveamento (“switching”) de canais condutores através de óxido (GUILLE & JÜTTNER, 1980).

Uma outra forma de efetuar a limpeza de óxidos superficiais de metais altamente reativos como o alumínio é através do uso de fluxos. Os processos que utilizam este mecanismo para o alumínio são a soldagem com eletrodos revestidos e a brasagem. E, por fim, no processo de soldagem ATIG, este mecanismo parece promissor como uma alternativa para efetuar esta limpeza na soldagem do alumínio, como será visto a seguir.

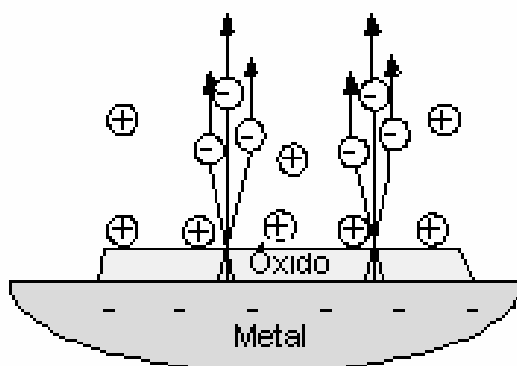


Figura 3.7 – Representação esquemática do mecanismo de emissão de elétrons a frio assistido por camadas de óxido na superfície do catodo (MODENESI, 2002).

3.7 Soldagem ATIG de alumínio

Trabalhos desenvolvidos em alumínio indicaram que a soldagem ATIG com fluxos compostos por cloretos ou fluoretos pode levar a um certo aumento na penetração do cordão de solda (CASTRO, 2000; PEREIRA, 2000). Mais importante, contudo, estes estudos mostraram ainda que pode se obter uma razoável remoção da camada superficial de óxido da superfície da chapa de alumínio usando-se corrente contínua e eletrodo negativo, a qual não é usualmente utilizada na soldagem de alumínio, mas apresenta muitas

vantagens em termos de estabilidade e capacidade de fundir o metal base. Nestes trabalhos, entretanto, não foi feita uma análise sistemática do efeito dos fluxos usados visando identificar dentre eles o mais efetivo.

Pereira (2000) utilizou diversos fluoretos e cloretos, variando-se a proporção de mistura na elaboração de fluxos. Observou que os fluoretos apresentaram uma maior tendência em aumentar a penetração do cordão de solda enquanto que os cloretos foram mais capazes de promover a limpeza da camada de alumina. Concluiu ainda que mudanças pequenas na composição, na proporção e até mesmo na densidade superficial de fluxo são capazes de interferir na relação penetração/largura (P/L) do cordão de solda, na forma e estabilidade do arco.

Fluoretos e cloretos também foram testados por Castro (2000) que comparou ainda, a utilização de acetona e de uma tinta a base de silicone como solvente. Concluiu também que os cloretos apresentam uma maior eficiência na limpeza da camada de óxido em relação aos fluoretos. Avaliou que a espessura da camada de fluxo parece ser um fator importante no processo, pois foram obtidos melhores resultados, quando camadas mais espessas de fluxo foram aplicadas. Em relação ao uso da tinta como um solvente alternativo, verificou-se que esta apresentou uma melhor adesão, mas com uma evaporação mais demorada quando comparada à acetona. Entretanto, a impossibilidade de sua utilização ficou clara devido à sua tendência à combustão.

Sire *et al.* (2002) desenvolveram uma nova técnica variante do processo ATIG com o objetivo de aumentar a penetração do cordão de solda na soldagem de uma liga de alumínio com corrente alternada (CA). Este processo foi chamado pelos autores de FBTIG (Flux Bounded Tungsten Inert Gas) e se baseia na aplicação de duas camadas laterais de fluxo deixando uma camada estreita sem fluxo ao centro, na qual é depositado o cordão de solda (Figura 3.8).

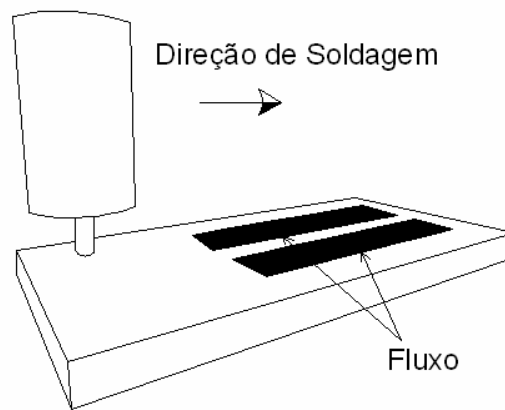


Figura 3.8 – Soldagem FBTIG (SIRE *et al.*, 2002).

Foram testados fluxos à base de óxidos e de fluoretos na tentativa de identificar possíveis candidatos para a otimização do processo FBTIG. O melhor desempenho foi obtido com o fluxo à base de SiO_2 . Entretanto, os autores neste trabalho não identificaram os possíveis mecanismos que contribuíram para o aumento na penetração obtido com o fluxo a base de SiO_2 , e nem para a redução na penetração observada quando da utilização de fluxos a base de Al_2O_3 e de TiO_2 .

Em outro trabalho (SIRE & MARYA, 2002) os autores observaram um aumento superior a duas vezes na relação penetração/largura (P/L) do cordão de solda FBTIG em relação ao cordão de solda TIG obtido com corrente alternada em uma liga de alumínio. Eles atribuíram este resultado à constrição do arco elétrico, observada na filmagem do processo de soldagem FBTIG, associada ao elevado ponto de fusão e a alta resistividade elétrica da sílica.

3.8 Análise de imagem

Métodos de processamento de análise de imagem digital têm sido aplicados para resolver uma série de problemas em diversas áreas como a medicina, meteorologia, arqueologia, geologia, física, astronomia, biologia, defesa, direito e na engenharia em diversas aplicações industriais.

Uma imagem digital (Figura 3.9) pode ser considerada como uma matriz na qual linhas e colunas identificam os pontos da imagem e sua correspondência aos valores de tom de cinza, cuja escala é compreendida entre 0 (preto) até 255 (branco). Os elementos de uma imagem são chamados de “*image elements*”, “*pixels*” ou simplesmente “*pels*” que corresponde à abreviação de “*picture elements*” (GONZALEZ & WOODS, 1992)

O histograma consiste em uma operação global que fornece a frequência de ocorrência dos níveis de cinza da função f , como mostra a figura 3.10. Ele dá informações sobre a distribuição dos níveis de cinza, ou seja, da dinâmica da imagem. Pode ser aplicado na filtragem, segmentação e reconhecimento de padrões e imagens (CAMAPUM, 2002).

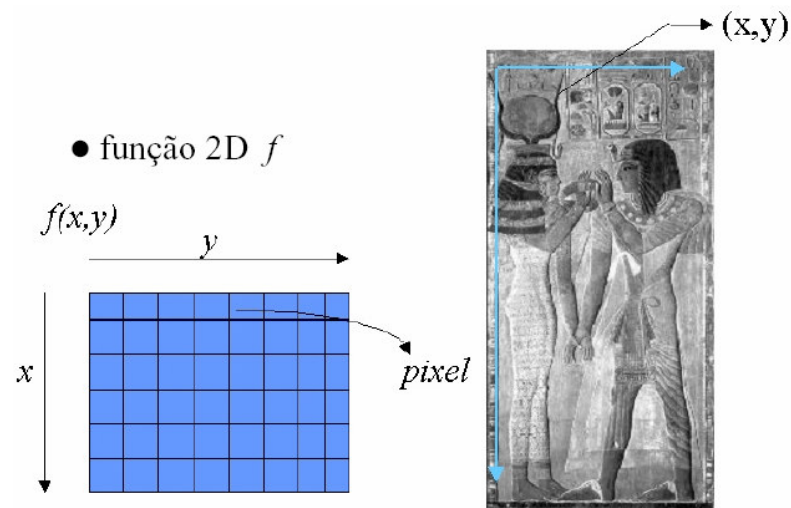


Figura 3.9 – A imagem digital.

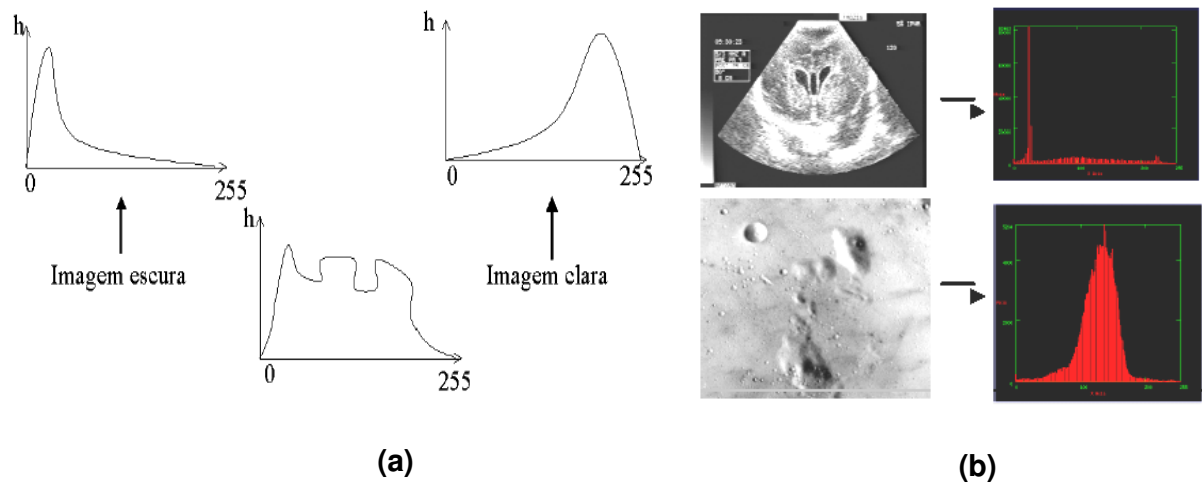


Figura 3.10 – Exemplos de diferentes dinâmicas de (a) imagem e de (b) histogramas.

CAPÍTULO 4

EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma descrição dos equipamentos e materiais utilizados neste estudo. Esta descrição envolve características como dados técnicos, dimensões, tipo, marca e modelo do fabricante. Para os materiais usados na elaboração dos fluxos é apresentada também uma justificativa para a seleção dos mesmos.

4.2 Equipamentos

4.2.1 Fonte de soldagem, acessórios e equipamentos auxiliares

O equipamento de soldagem utilizado foi uma fonte transistorizada chaveada no secundário INVERSAL 300. A tabela IV.1 apresenta os principais dados técnicos desta fonte. Na tocha foi acoplado um bocal de proteção cerâmico de diâmetro interno igual a 10mm e um eletrodo de tungstênio torinado com 3,2mm de diâmetro, cujo ângulo de ponta (60°) foi obtido em um afiador elétrico IMC LABSOLDA/UFSC.

Tabela IV.1 – Dados técnicos da fonte Inversal 300.

Item	Valores de referência
Tensão de alimentação	220, 380 ou 440V trifásica
Tensão em vazio	68V
Tipo de corrente	Contínua ou alternada (constante ou pulsada)
Fator de potência	0,95

Fonte: Manual de Instruções IMC-Soldagem.

Para a execução dos cordões de solda foi utilizada uma mesa de soldagem mecanizada, equipada com um sistema de deslocamento da tocha ou do corpo de prova (tartaruga). Este sistema permite controlar a velocidade e o sentido de deslocamento de soldagem dentro de uma faixa de operação de 5 a 60 cm/min.

Na confecção dos corpos de prova usou-se uma guilhotina, uma furadeira elétrica e uma plaina horizontal. Na preparação da superfície dos mesmos usou-se estopa, acetona de pureza analítica (PA), lixa d' água de 400 mesh, uma escova de aço inoxidável para escovamento manual, uma escova de aço inoxidável circular de diâmetro igual a 152,4mm (6") para escovamento mecânico, um esmerilador elétrico SOWA EBM-150, soda cáustica (NaOH), ácido nítrico (HNO₃), recipientes plásticos e toalhas de papel. Um perfilômetro HOMMEL TESTER T8000 foi usado para a caracterização do acabamento superficial dos corpos de prova. Dois parafusos M8 foram usados na fixação dos corpos de prova em um gabarito de cobre de comprimento igual a 200mm por 150mm de largura e 10mm de espessura.

Na preparação dos fluxos usou-se um forno tipo mufla, uma estufa, uma balança analítica digital com precisão de 10⁻⁴g, um gral de ágata e um béquer, (ambos com capacidade igual a 50mL), estopa, acetona, uma pinça metálica, papel alumínio e toalhas de papel. Para a aplicação usou-se um pincel com 10mm de largura, um conta-gotas, uma espátula com 50mm de largura e 210mm de comprimento, um tubo de PVC com 26mm de diâmetro externo, 20mm de diâmetro interno e 210mm de comprimento, uma haste metálica de diâmetro igual a 3mm e 200mm de comprimento, uma tesoura, fita adesiva e um dispositivo para o corte da mesma (Figura 4.1). As dimensões detalhadas deste dispositivo são mostradas na figura 4.2.

Como medida de segurança, além do uso de equipamentos de proteção individual, um exaustor permaneceu ligado durante toda a operação de soldagem, devido à toxicidade de alguns componentes usados na elaboração dos fluxos, como será exposto em 4.3.2.

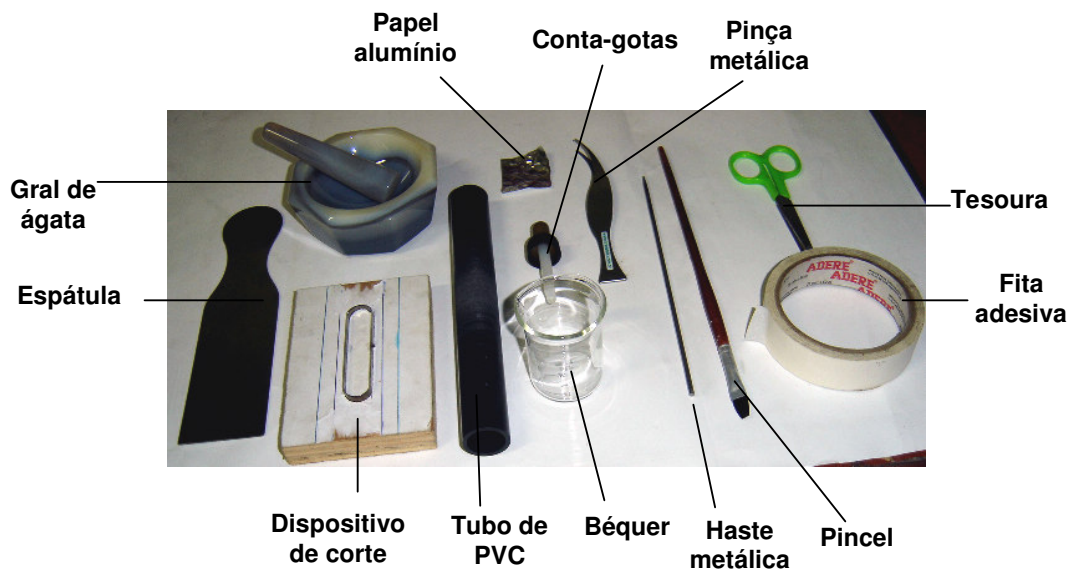


Figura 4.1 Materiais usados na preparação e aplicação dos fluxos.

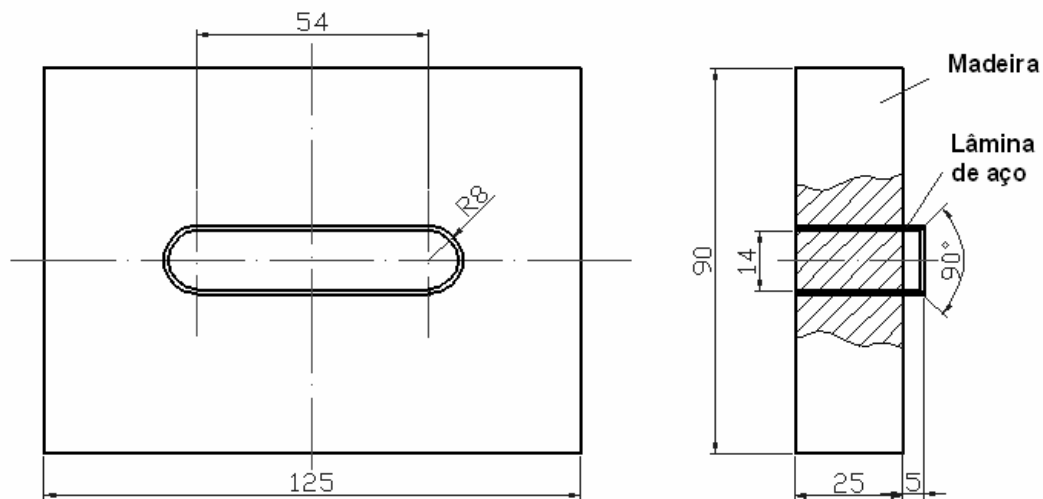


Figura 4.2 Dispositivo de corte da fita adesiva (Dimensões em mm).

Para a caracterização da superfície dos cordões de solda usou-se uma lupa estereoscópica marca ZEIZZ, uma mesa fotográfica equipada com dois holofotes, uma câmera digital SONY CYBER-SHOT, programas de análise de imagem, GLOBAL LAB IMAGE (fabricado por DATA TRANSLATION Inc.) e QUANTIKOV (PINTO, 1996), um microscópico eletrônico de varredura JEOL JSM 6360LV, um difratômetro de raios-X PHILIPS PW1710, um projetor de perfil MITUTOYO MOD. PJ311 e um aparelho scanner SCANJET IV HEWLETT PACKARD.

Na preparação das amostras para avaliar as características geométricas dos cordões de solda foram usadas lixas d'água de 180, 220, 320, 400 e 600 mesh e ataque com reagente Keller (HF, HCl, HNO₃ e H₂O).

4.2.2 Sistema de aquisição de dados

Na aquisição e registro de tensão e corrente de soldagem contínua usou-se um sistema específico para soldagem (ADM – ARC DATA MONITOR DA CRC, USA) conectado a um microcomputador.

O sistema de monitoramento da soldagem com polaridade do eletrodo variável e onda retangular foi composto por um microcomputador, equipado com uma placa de aquisição de dados ADVANTECH modelo PCL-818H, a qual possui um conversor A/D de 16 canais com resolução de 12 bits com capacidade de adquirir sinais com frequência máxima de 100 kHz; um instrumento de medição de tensão e corrente modelo TC-1, da IMC Soldagem e Instrumentação, e um transdutor de corrente (efeito Hall) modelo HT 500-SBD. Mais detalhes dos instrumentos deste sistema e do programa SINAL, desenvolvido no LabSEND (Laboratório de Soldagem e Ensaios Não Destrutivos) e usado no processamento dos dados encontram-se descritos nos anexos A e B, respectivamente.

4.3 MATERIAIS

4.3.1 Metal base

O metal base usado para a confecção dos corpos de prova, alumínio comercialmente puro, foi recebido na forma de chapas laminadas com uma espessura igual a 6,35mm (1/4"). A composição química deste material é apresentada na tabela IV.2.

Tabela IV.2 - Composição química (% em peso).

Al	Mn	Cu	Mg	Si	Fe	Zn
99,09	0,126	0,026	0,005	0,032	0,680	0,046

Fonte: Laboratório de Análises Químicas – UFMG

Alguns testes foram feitos na liga Al-Mg cuja composição química é mostrada na tabela IV.3.

Tabela IV.3 - Composição química (% em peso).

Al	Mn	Cu	Mg	Si	Fe	Zn
96,39	0,059	0,021	3,09	0,051	0,351	0,030

Fonte: Laboratório de Análises Químicas – UFMG

4.3.2 Componentes para a elaboração dos fluxos

Os componentes selecionados para a elaboração de fluxos simples e compostos são apresentados na tabela IV.4. São fluoretos, cloretos, óxidos e minerais.

Tabela IV.4 – Componentes selecionados para a elaboração dos fluxos.

KF, NaF, AlF_3 , CaF_2
KCl, NaCl, AlCl_3 , CaCl_2 , BaCl_2 , ZnCl_2
SiO_2 , V_2O_5 , CaO
KAlSi_3O_8 (Microclina), $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (Albita), Na_3AlF_6 (Criolita)

A seleção destes componentes foi baseada:

- Na composição de fluxos usados em trabalhos realizados anteriormente sobre soldagem ATIG de alumínio e aços inoxidáveis;
- Na análise de diagramas de fase entre a alumina e outros compostos (óxidos, cloretos, fluoretos) os quais indicavam a formação de uma fase líquida de baixo ponto de fusão, preferencialmente próximo do ponto de fusão do alumínio puro;
- Na composição de fluxos ou minerais usados no processo de fabricação de alumínio;
- Na composição de revestimentos de eletrodos, usados comercialmente na soldagem do alumínio e suas ligas.

A seleção dos fluoretos, cloretos e da sílica (SiO_2), com exceção do cloreto de zinco (ZnCl_2), foi baseada na composição de fluxos usados em trabalhos realizados anteriormente sobre soldagem ATIG de alumínio e aços inoxidáveis (CASTRO, 2000; PEREIRA, 2000; APOLINÁRIO, 1998; MODENESI *et al.*, 2000).

O ZnCl_2 foi selecionado devido ao seu efeito corrosivo no alumínio e suas ligas, com evidência de “pitting” localizado à temperatura ambiente (ABAL, 2003). Esperava-se que este efeito corrosivo poderia intensificar-se com a temperatura durante a soldagem. A sua escolha foi motivada também, pelo fato

do mesmo ser um produto usado na composição de fluxos para soldagem, devido à sua propriedade de quando fundido, dissolver óxidos metálicos. Devido à sua natureza corrosiva, o ZnCl_2 não é ideal para aplicações onde todo seu resíduo não possa ser removido, como por exemplo, na fabricação de componentes eletrônicos (WIKIPEDIA, 2004).

O pentóxido de Vanádio (V_2O_5) e o óxido de Cálcio (CaO) foram selecionados a partir de diagramas de fase binários entre os mesmos e a alumina (LEVIN *et al.*, 1964). Estes diagramas são apresentados nas figuras 4.3 e 4.4, respectivamente. Apesar do diagrama $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ mostrar que a temperatura do eutético formado é de aproximadamente 1400°C , muito superior à temperatura de fusão do alumínio (660°C), o óxido de cálcio foi selecionado devido ao efeito brusco que o mesmo provoca na redução do ponto de fusão da alumina. Assim, esperava-se que este óxido tivesse um efeito escorificante sob a ação do arco elétrico.

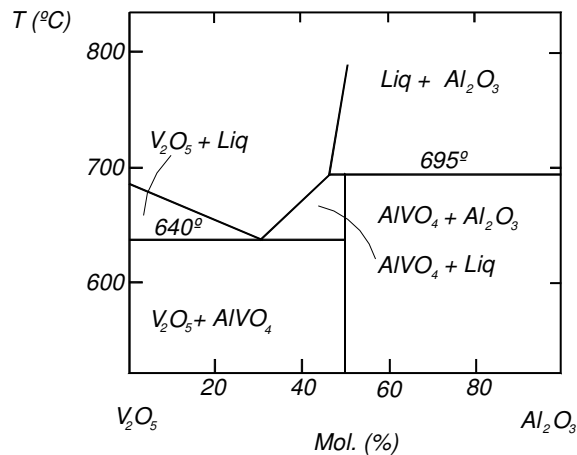


Figura 4.3 - Diagrama de equilíbrio $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3$ (LEVIN *et al.*, 1964).

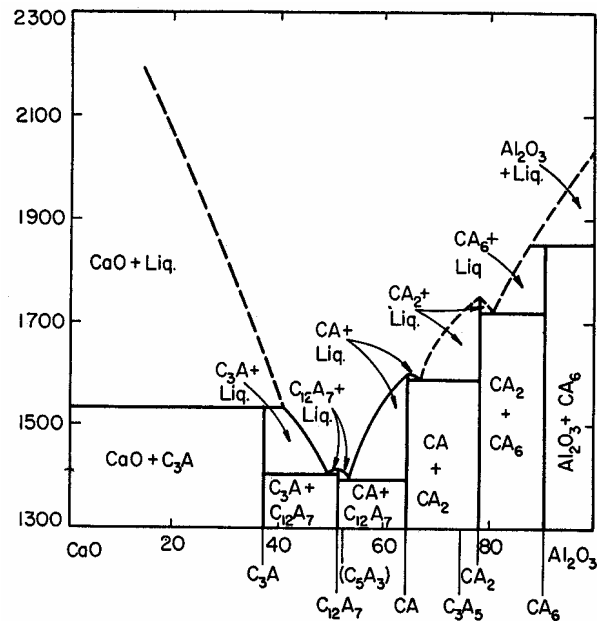


Figura 4.4 - Diagrama CaO-Al₂O₃. Fases presentes: C₃A: Ca₃Al₂O₆, CA: CaAl₂O₄, CA₂: CaAl₄O₇, CA₆: CaAl₁₂O₁₉, C₁₂A₇: Ca₁₂Al₁₄O₃₃, C₅A₃: Ca₅Al₆O₁₄. (LEVIN *et al.*, 1964).

Os minerais, microclina (KAlSi₃O₈) e albita (NaAlSi₃O₈), foram selecionados a partir dos diagramas de fase ternários K₂O-SiO₂-Al₂O₃ e Na₂O-SiO₂-Al₂O₃, respectivamente (Figuras 4.5 e 4.6). Os pontos eutéticos, localizados nas regiões sombreadas destes diagramas, indicam a formação de uma fase líquida de baixo ponto de fusão, próximo do ponto de fusão do alumínio puro, correspondente à formação dos minerais acima.

O mineral criolita (Na₃AlF₆) foi selecionado devido à sua utilização no processo de redução da alumina em alumínio primário a partir do mineral bauxita nas indústrias de produção de alumínio. O diagrama binário Na₃AlF₆-Al₂O₃ (Figura 4.7) mostra que este mineral forma um composto com a alumina, cuja temperatura de fusão é de aproximadamente 960°C (ESCARD, 1921; GOMES, 1966).

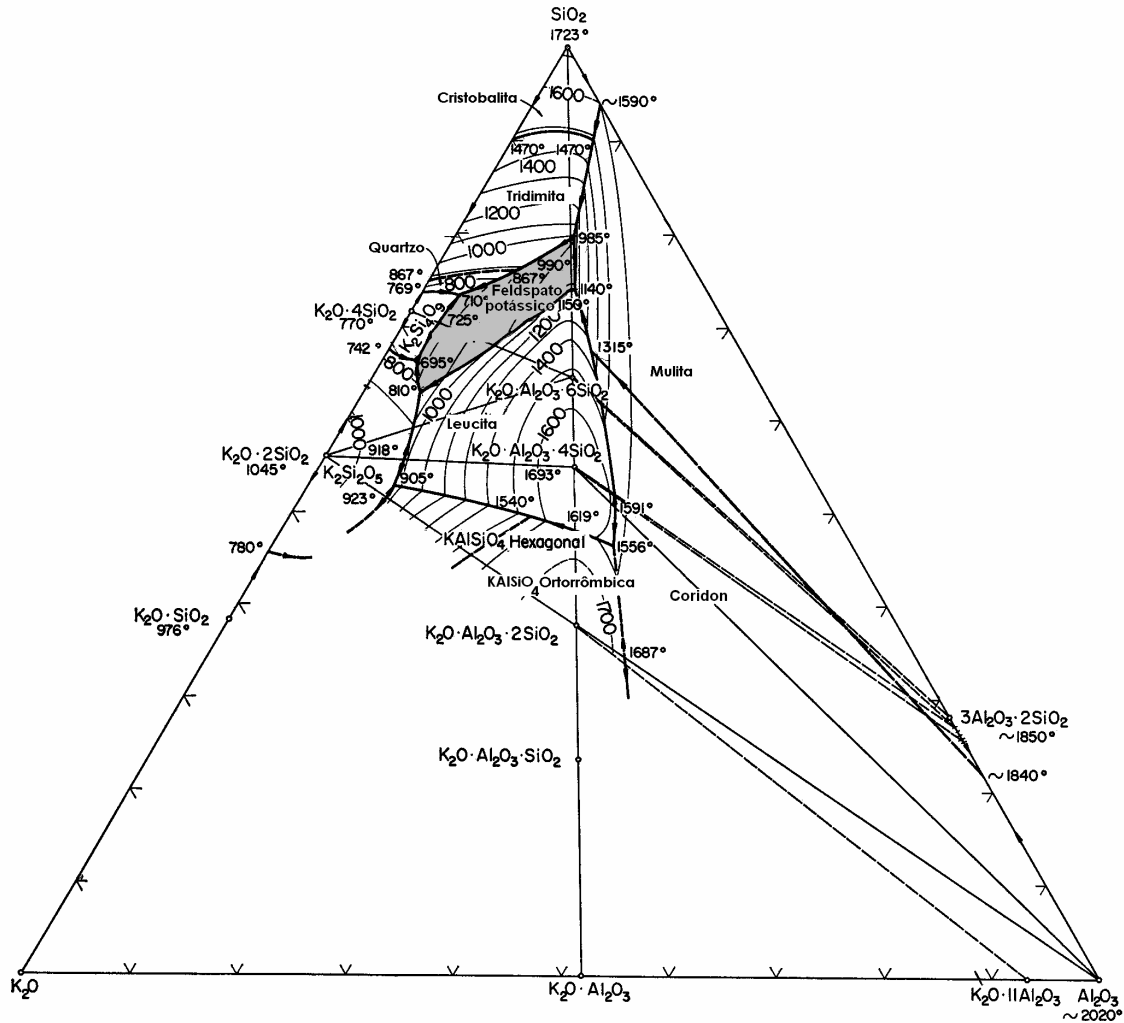


Figura 4.5 - Diagrama K_2O - SiO_2 - Al_2O_3 (LEVIN *et al.*, 1964). A região sombreada indica as composições em que a temperatura de fusão é próxima da do alumínio.

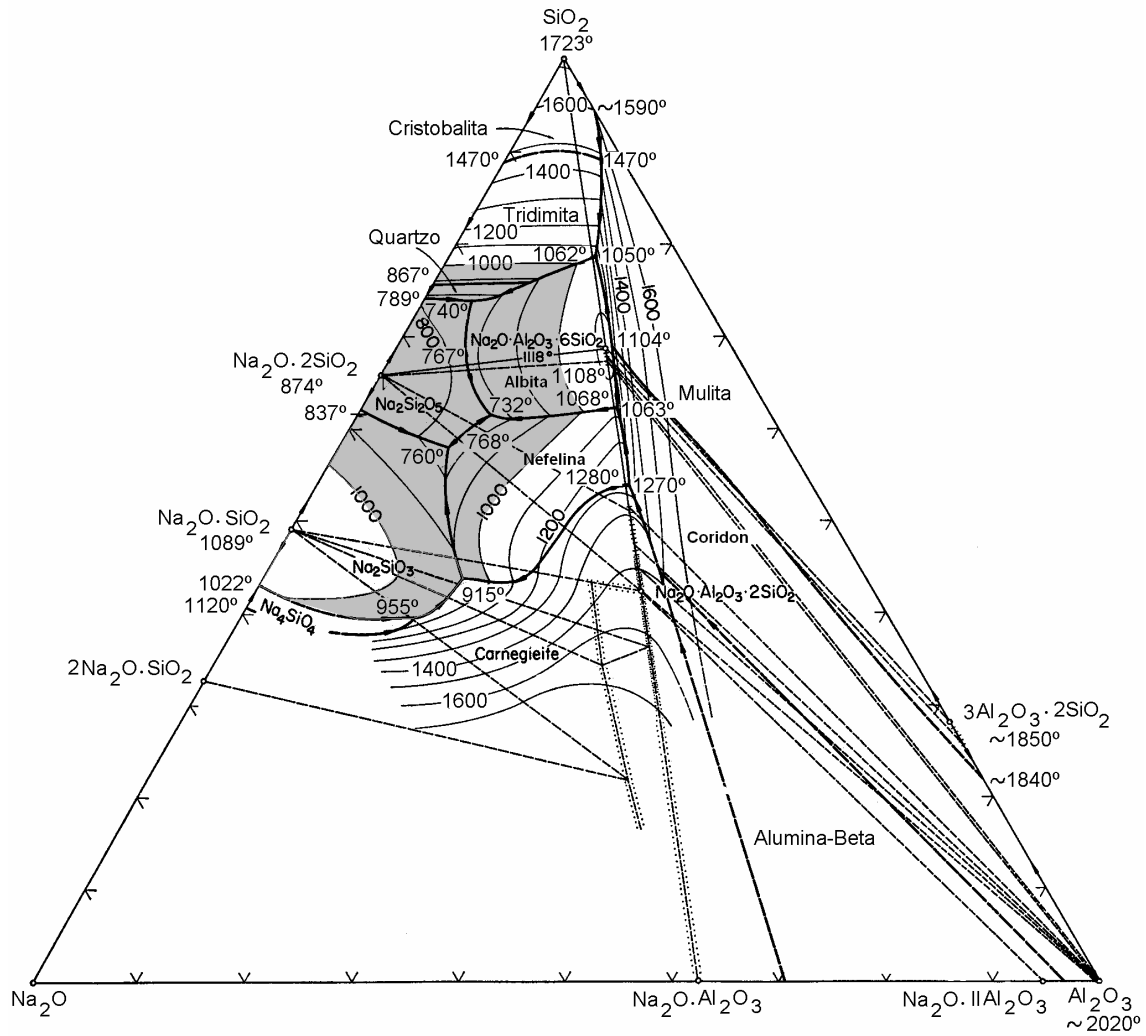


Figura 4.6 - Diagrama $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ (LEVIN *et al.*, 1964). A região sombreada indica as composições em que a temperatura de fusão é próxima da do alumínio.

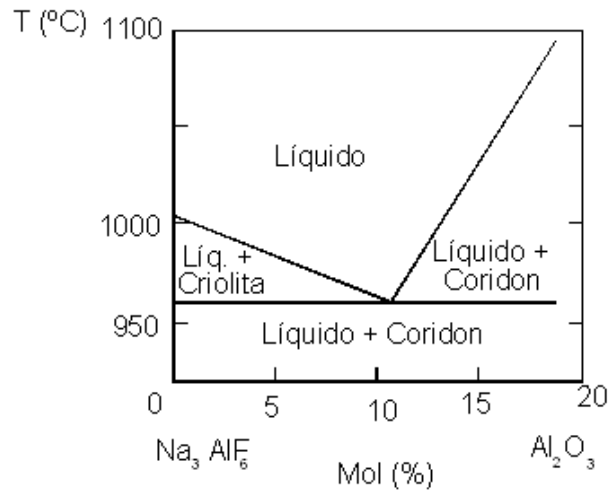


Figura 4.7 - Diagrama $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_3\text{AlF}_6$ (LEVIN *et al.*, 1964).

A partir das análises de difração e fluorescência de raios-X do revestimento de eletrodos usados comercialmente na soldagem do alumínio e suas ligas, foi possível identificar, como seus principais componentes, o cloreto de sódio (NaCl) e o cloreto de potássio (KCl), selecionados anteriormente de acordo com o primeiro critério adotado.

Fez-se um levantamento da toxicidade destes materiais, antes de seu manuseio e aplicação em soldagem. Alguns destes componentes são classificados como produtos químicos perigosos (CETESB, 2005). A Tabela IV.5 apresenta a toxicidade destes componentes.

Tabela IV.5 – Toxicidade dos componentes selecionados classificados como produtos químicos perigosos.

Nome do produto	Fórmula molecular	Síndrome tóxica
Fluoreto de cálcio	CaF_2	Prejudicial se ingerido. Não é irritante para a pele e para os olhos.
Fluoreto de alumínio	AlF_3	Se inalado poderá irritar o nariz e a garganta.
Fluoreto de sódio	NaF	Venenoso se ingerido.
Cloreto de cálcio	CaCl_2	Irritante para a pele e para os olhos. Se ingerido causará náusea ou vômito.
Cloreto de alumínio	AlCl_3	Irritante para os olhos, nariz e garganta. Prejudicial se ingerido.
Cloreto de zinco	ZnCl_2	Irritante para a pele e para os olhos. Se ingerido causará náusea ou vômito.
Óxido de cálcio	CaO	Irritante para os olhos, nariz e garganta. Prejudicial se ingerido.
Pentóxido de vanádio	V_2O_5	Irritante para a pele, olhos, nariz e garganta. Se inalado causará tosse ou dificuldade respiratória.

Fonte: CETESB, 2005.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

5.1 Introdução

Este trabalho envolveu, inicialmente, em sua parte experimental, uma série de testes de soldagem ATIG com corrente contínua e o eletrodo ligado ao pólo negativo (ATIG-CC⁻) em corpos de prova de alumínio comercialmente puro, visando identificar, dentre diversas formulações de fluxos simples e compostos, os mais efetivos na remoção da camada de óxido superficial de alumina. Após a seleção destes fluxos, estudou-se o efeito dos mesmos em diferentes condições de acabamento superficial dos corpos de prova, em diferentes parâmetros de soldagem ATIG-CC⁻ e da soldagem com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (ATIG-CA) e ainda, no efeito do metal base. A figura 5.1 mostra uma representação esquemática da metodologia adotada neste estudo, a qual foi subdivida em seis etapas.

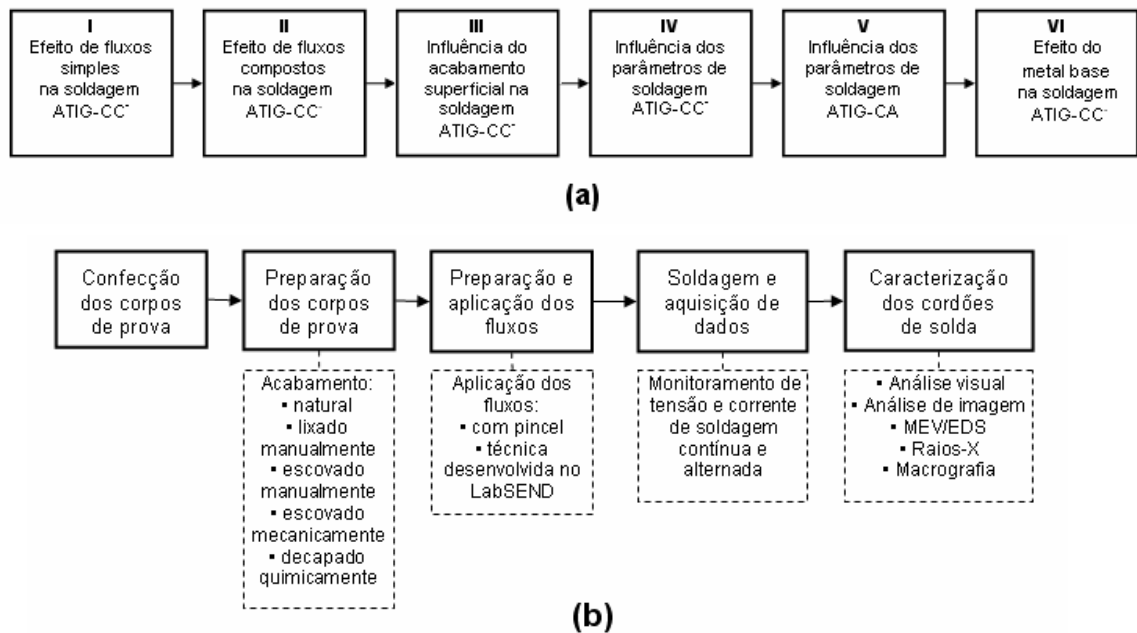


Figura 5.1 – Representação esquemática da metodologia usada:

(a) Blocos de testes. (b) Seqüência de operações usuais em cada bloco.

A primeira etapa deste estudo consistiu na seleção de fluxos simples, formados por apenas um componente, mais efetivos na remoção da camada de alumina durante a soldagem ATIG-CC⁻. A segunda etapa, na seleção de fluxos compostos, obtidos a partir da mistura de componentes dos fluxos simples selecionados na primeira etapa e, em misturas baseadas em diagramas de fase entre a alumina e outros compostos. A partir da terceira etapa, na qual avaliou-se a influência de diferentes condições de acabamento superficial do corpo de prova na soldagem ATIG-CC⁻, foram usados nos testes, apenas os fluxos mais efetivos selecionados nas etapas anteriores. Na quarta etapa estudou-se a influência dos parâmetros de soldagem no efeito destes fluxos, durante a soldagem ATIG-CC⁻ e na quinta etapa na soldagem ATIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (ATIG-CA). E, finalmente na sexta e última etapa, foi estudado o efeito do metal base no processo de soldagem ATIG-CC⁻. Em todas estas etapas adotou-se a mesma metodologia, desde a confecção dos corpos de prova até a caracterização dos cordões de solda, com algumas variações em função do objetivo de cada uma delas, as quais encontram-se evidenciadas nos retângulos desenhados com linhas tracejadas na figura 5.1(b).

5.2 Confecção dos corpos de prova

As chapas laminadas de alumínio, com espessura igual a 6,35mm, foram cortadas em uma guilhotina para a obtenção de corpos de prova nas dimensões aproximadas de 168mm de comprimento por 53mm de largura, coincidindo sua maior dimensão com a direção de laminação. Em seguida, os corpos de prova foram usinados em uma plaina horizontal até a dimensão final de 165x50mm. Estas dimensões foram determinadas visando-se um melhor aproveitamento do material e prevendo-se a deposição de apenas um cordão de solda por corpo de prova. Os corpos de prova foram lavados com água e detergente para a remoção de resíduos, como poeira e óleo, e secos em toalhas de papel. Para permitir a fixação dos mesmos em um gabarito de cobre, foram feitos dois furos com 8mm de diâmetro. Linhas de simetria foram

traçadas com uma ponta de aço na direção longitudinal e transversal dos corpos de prova. Estas foram usadas, posteriormente, como referência na aplicação da camada de fluxo e execução do cordão de solda (Figura 5.2).

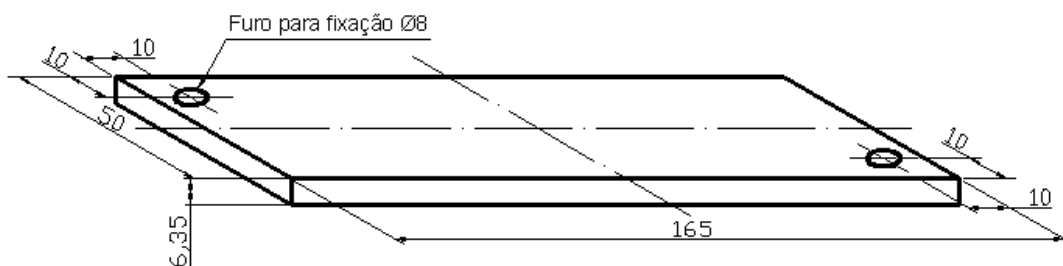


Figura 5.2– Corpo de prova (Dimensões em mm).

Dispondo-se também de algumas chapas laminadas de Al-Mg, foram confeccionados corpos de prova nestas mesmas dimensões para o estudo do efeito do metal base na soldagem ATIG-CC⁻, previsto na etapa final deste trabalho.

5.3 Preparação dos corpos de prova para soldagem

Os corpos de prova foram parafusados em um gabarito de cobre e, com exceção da terceira etapa prevista no fluxograma da figura 5.1(a), eles foram testados com acabamento natural (como recebido) e apenas limpos com uma estopa umedecida em acetona. Fez-se o alinhamento dos mesmos com o eletrodo de tungstênio sob a tocha TIG, orientando-se pela linha de referência longitudinal, e o ajuste de posição e velocidade no dispositivo de deslocamento da tocha.

Na terceira etapa, na qual estudou-se a influência do acabamento superficial na soldagem ATIG-CC⁻, além da condição natural, foram testados corpos de prova com os seguintes acabamentos:

- Lixado manualmente,
- Escovado manualmente,
- Escovado mecanicamente e
- Decapado.

No lixamento manual do corpo de prova usou-se uma lixa água fina de 400 mesh. A escovação manual foi realizada com uma escova de aço inoxidável separada exclusivamente para uso em alumínio a fim de se evitar a contaminação da superfície do corpo de prova. Os corpos de prova foram presos em uma morsa e as operações manuais de lixamento e escovação foram realizados obedecendo-se a uma sequência pré-determinada (Figura 5.3).

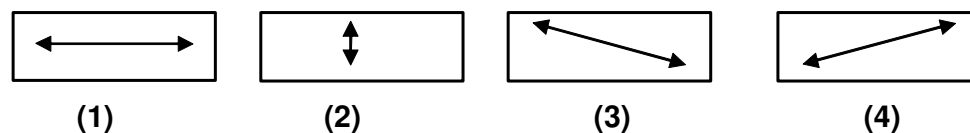


Figura 5.3 – Sequência de operações de acabamento manual da superfície dos corpos de prova. As setas indicam as direções de lixamento ou escovação.

A escovação mecânica foi realizada com uma escova de aço inoxidável giratória, também separada para uso exclusivo em alumínio, e acoplada em um esmerilador elétrico. A superfície do corpo de prova foi pressionada contra a escova de aço e escovada aleatoriamente.

Na decapagem, adotou-se o procedimento recomendado por um fabricante de alumínio (ALCAN, 1993). A tabela V.1 apresenta as etapas deste procedimento.

Tabela V.1 Etapas para limpeza química superficial do alumínio.

Etapas	Descrição
1ª	O corpo de prova foi imerso em uma solução de 5% de soda cáustica (NaOH) por 120s à temperatura ambiente (solvente: água).
2ª	O corpo de prova foi lavado em água corrente.
3ª	O corpo de prova foi imerso em uma solução de 1:1 de ácido nítrico (HNO ₃)(65%), à temperatura ambiente por 30s (solvente: água).
4ª	O corpo de prova foi lavado novamente em água corrente.
5ª	O corpo de prova foi seco em toalhas de papel.

Fonte: ALCAN, 1993.

Foi usado um perfilômetro para caracterizar as diferentes condições de acabamento superficial dos corpos de prova. Foram realizadas quatro medições em cada corpo de prova variando-se posição e direção (Figura 5.4).

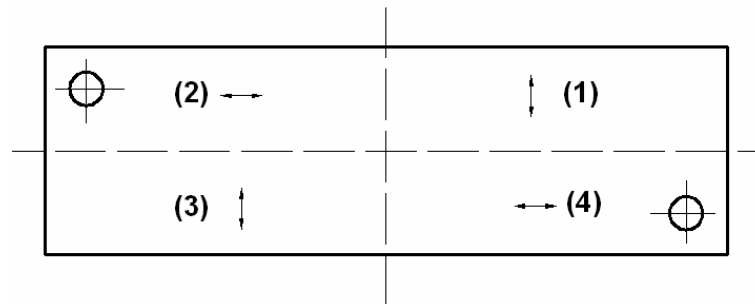


Figura 5.4 – Posição e direção das medições para caracterização do acabamento superficial dos corpos de prova.

5.4 Preparação e aplicação dos fluxos

Na primeira etapa foram preparados e aplicados apenas fluxos simples, contendo apenas um componente e, na segunda, fluxos compostos, contendo mais de um componente. Nas demais etapas, fluxos selecionados, simples e/ou compostos, considerados os mais efetivos na remoção da camada de alumina foram usados.

As características físico-químicas dos componentes usados na elaboração dos fluxos encontram-se no apêndice B. Eles foram fornecidos com pureza analítica por diferentes laboratórios químicos da UFMG e mantidos em um forno tipo mufla a uma temperatura de 250°C por um tempo de duas horas para secagem. Após este tempo, os mesmos foram transferidos para uma estufa onde permaneceram a uma temperatura de 100°C, armazenados em frascos de vidro para evitar qualquer tipo de contaminação, em particular, a absorção de umidade.

A formulação dos fluxos simples e compostos e sua metodologia de preparação e aplicação são descritos a seguir.

5.4.1 Fluxos simples

Foram realizados treze testes de soldagem para selecionar os fluxos simples mais efetivos na soldagem ATIG-CC⁺ de alumínio. Dentre os componentes apresentados na tabela IV.4, avaliou-se o efeito de fluxos simples elaborados com os quatro fluoretos (KF, NaF, AlF₃ e CaF₂), seis cloretos (KCl, NaCl, AlCl₃, CaCl₂, BaCl₂ e ZnCl₂) e três óxidos (V₂O₅, CaO e SiO₂).

A preparação dos fluxos simples, a exceção do fluxo formado pelo cloreto de zinco, consistiu na mistura de 50mg de cada componente com acetona em um béquer após a moagem dos mesmos em um gral de ágata até se obter uma menor granulometria. Esta quantidade foi definida a partir de testes de soldagem preliminares. O objetivo do uso da acetona, a exemplo de outros trabalhos sobre soldagem ATIG, foi para permitir a aplicação dos fluxos que se apresentam em forma de pó e, geralmente, possuem pouca aderência à superfície do corpo de prova. Entre a moagem de um e outro componente, os recipientes foram lavados com água e limpos com uma estopa umedecida em acetona. O cloreto de zinco, após ser retirado da estufa, devido à sua alta higroscopicidade, apresentou rapidamente a formação de uma fase líquida

superficial hidratada, a qual foi aplicada sem a necessidade da adição de acetona.

Os fluxos simples foram aplicados com um pincel sobre a metade direita da linha de simetria longitudinal na superfície do corpo de prova, imediatamente antes da soldagem. A figura 5.5 mostra a direção de soldagem e a camada de fluxo simples aderida ao corpo de prova.

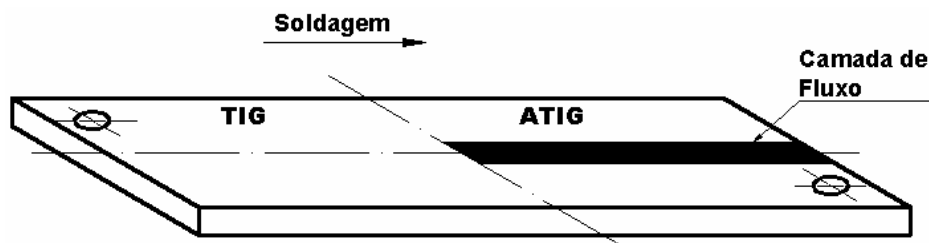


Figura 5.5 - Corpo de prova mostrando a direção de soldagem e a camada de fluxo simples aderida à superfície do corpo de prova.

5.4.2 Fluxos compostos

Na segunda etapa do trabalho estudou-se o efeito de fluxos compostos na soldagem ATIG-CC⁻. Estes fluxos foram constituídos pela mistura de massas iguais dos componentes dos fluxos simples mais efetivos na remoção da camada de alumina, selecionados na primeira etapa, e por fluxos elaborados a partir de misturas baseadas em diagramas binários e ternários. Foram preparados 50mg de fluxos compostos, a mesma quantidade adotada para o estudo do efeito de fluxos simples.

A formulação do segundo grupo de fluxos compostos (tabela V.2), baseou-se em diagramas binários e ternários, entre a alumina e outros compostos, cujos pontos eutéticos indicavam a formação de uma fase líquida de baixo ponto de fusão, preferencialmente próximo do ponto de fusão do alumínio puro (Figuras 4.5 a 4.9).

Tabela V.2 Formulação dos fluxos compostos obtidos a partir de misturas baseadas em diagramas binários e ternários.

Fluxo	Eutético	Formulação
$V_2O_5-Al_2O_3$	640°C	39mg de V_2O_5 e 11mg de Al_2O_3
$CaO-Al_2O_3$	1400°C	25mg de CaO e 25mg de Al_2O_3
$KCl-SiO_2-Al_2O_3$	695°C	16mg de KCl , 32mg de SiO_2 e 2mg de Al_2O_3
$NaCl-SiO_2-Al_2O_3$	732°C	14mg de $NaCl$, 30mg de SiO_2 e 6mg de Al_2O_3
$Na_3AlF_6-Al_2O_3$	960°C	28mg de NaF , 19mg de AlF_3 e 3mg de Al_2O_3

A composição dos fluxos $KCl-SiO_2-Al_2O_3$ e $NaCl-SiO_2-Al_2O_3$, foi definida da composição dos minerais microclina e albita (tabela IV.4). Diante da impossibilidade de encontrar estes minerais em uma composição específica, cujo eutético fosse da ordem da temperatura de fusão do alumínio puro (660°C), os componentes dos fluxos foram misturados substituindo-se os óxidos de potássio e sódio por seus respectivos cloretos. A alumina que compõem os fluxos foi adicionada na forma de pó para compensar a pequena quantidade a ser removida presente na superfície do corpo de prova. De fato, considerando-se a densidade teórica da alumina igual à $4g.cm^{-3}$, as dimensões do cordão de solda ATIG de 7cm de comprimento por $6 \times 10^{-1}cm$ de largura e a espessura da camada de alumina de $5 \times 10^{-7}cm$, esta quantidade pode ser estimada em $8,4 \times 10^{-3}mg$.

Além destes, na segunda etapa do trabalho, foi testado ainda, um fluxo simples formado por uma solução entre o cloreto de zinco e acetona ($ZnCl_2$ -acetona). Este fluxo não foi testado anteriormente, pois somente nesta fase do trabalho, verificou-se que o $ZnCl_2$ é o único, dentre os demais componentes, como já mencionado, solúvel em acetona (WIKIPEDIA, 2004). Julgou-se desnecessária a adição de acetona ao cloreto de zinco, na primeira etapa deste trabalho, porque sua forma hidratada permitiu a aplicação com pincel, proporcionando uma boa aderência à superfície do corpo de prova.

A aplicação do fluxo ZnCl_2 -acetona e dos fluxos compostos foi realizada usando-se uma técnica desenvolvida no LabSEND a qual permitiu aplicar uma quantidade determinada de fluxo em uma área conhecida do corpo de prova. Esta técnica consistiu na deposição dos componentes dos fluxos em uma área delimitada na superfície do corpo de prova por um pedaço de fita adesiva recortada, figura 5.6. Embora ocorram variações locais na quantidade de fluxo depositado, esta técnica pode ser considerada como sensivelmente melhor, em termos do controle da densidade do fluxo, em comparação com a técnica usual (deposição com pincel).

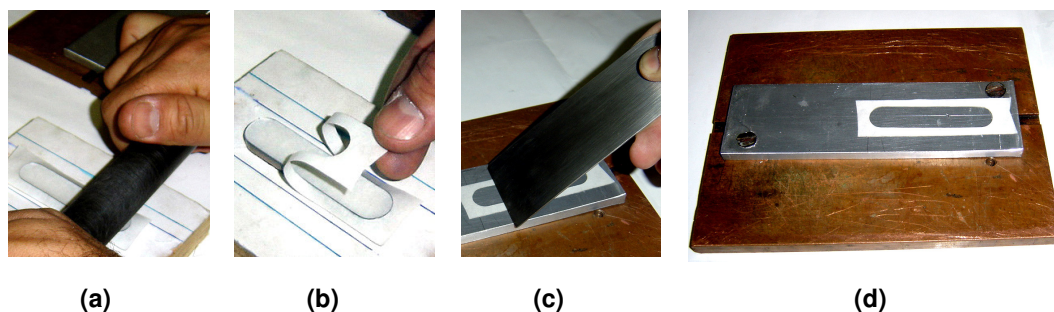


Figura 5.6 – Metodologia para obtenção de uma área delimitada para aplicação de fluxo: (a) Um pedaço de fita adesiva é pressionado com um tubo de PVC contra a superfície cortante do dispositivo; (b) A fita adesiva recortada é retirada; (c) Uma espátula é usada para fixar a fita adesiva ao corpo de prova; (d) Área obtida para aplicação de fluxo.

O processo de preparação e aplicação do fluxo ZnCl_2 -acetona foi concluído no menor tempo possível, devido à elevada higroscopicidade do ZnCl_2 à temperatura ambiente. A aplicação foi realizada, depositando-se e distribuindo com uma haste metálica sobre a área delimitada do corpo de prova, uma massa também igual a 50mg deste componente. Uma quantidade mínima de acetona foi adicionada com um conta-gotas até a diluição completa do cloreto de zinco, formando uma camada líquida pastosa.

Os fluxos compostos tiveram massas iguais de seus componentes misturadas a seco e distribuídas sobre a área delimitada. Adicionou-se acetona com um conta-gotas deixando uma camada de fluxo aplicada, após a evaporação da mesma. A figura 5.7 exemplifica a metodologia de preparação e aplicação de um fluxo composto por dois componentes.

Os fluxos compostos por um número de componentes (n) maior que dois foram preparados e aplicados da mesma forma, sendo as quantidades pesadas de cada componente dadas por $50.n^{-1}$ mg.

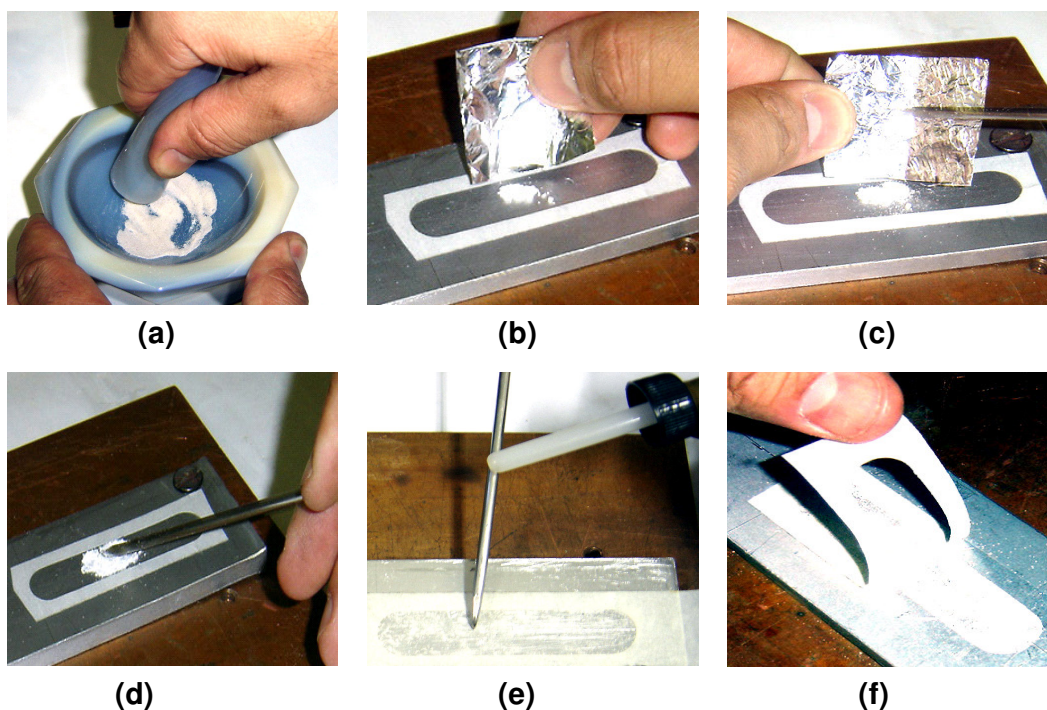


Figura 5.7 – Preparação e aplicação de um fluxo composto por dois componentes: (a) Os componentes foram moídos separadamente; (b) Foram adicionadas 25mg do primeiro componente (c) A esta quantidade foram adicionadas 25mg do segundo componente totalizando 50mg de fluxo; (d) As partes foram misturadas a seco e distribuídas sobre a área do corpo de prova; (e) Adicionou-se acetona à mistura; (f) A fita adesiva foi retirada.

Na preparação e aplicação dos fluxos compostos baseados em diagramas binários e ternários, as quantidades pesadas foram as mesmas indicadas anteriormente na tabela V.2.

5.5 Soldagem e aquisição de dados

Em todas as etapas deste estudo usou-se soldagem mecanizada com uma fonte de soldagem do tipo corrente constante, argônio como gás de proteção e sistemas de aquisição de dados (Figura 5.8). O corpo de prova foi sempre fixado em um gabarito de cobre (ver seção 4.2.1). Para cada corpo de prova foi soldada pelo menos uma réplica para avaliar qualitativamente a reprodutividade do efeito do fluxo.

Com exceção da quinta etapa, todos os demais testes de soldagem ATIG deste estudo foram realizados com corrente contínua e o eletrodo ligado ao pólo negativo (ATIG-CC⁻), adotando-se os mesmos parâmetros de soldagem, exceto na quarta etapa, quando foi avaliada a influência dos mesmos no efeito de fluxos selecionados.

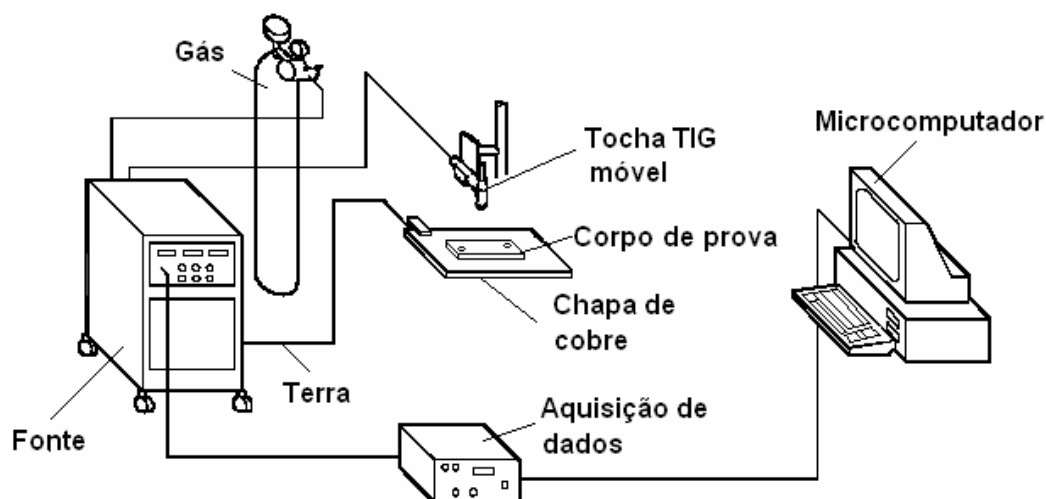


Figura 5.8 - Disposição dos equipamentos de soldagem e aquisição de dados (esquemático).

Uma outra configuração, soldagem TIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (TIG-CA), foi usada na soldagem de um corpo de prova padrão de limpeza (seção 5.5.2) e, na quinta etapa, para avaliar a influência dos parâmetros de soldagem nesta configuração com aplicação de fluxo (ATIG-CA). O objetivo nesta etapa foi avaliar se o efeito de fluxos selecionados permitiu reduzir o tempo em que o eletrodo opera no ciclo positivo, minimizando o desgaste do mesmo e aumentando a eficiência térmica do processo.

Os tópicos seguintes apresentam a metodologia de soldagem e de aquisição de dados para estas situações.

5.5.1 Soldagem ATIG com corrente contínua e o eletrodo ligado ao pólo negativo (ATIG-CC⁻)

Antes do início da soldagem ATIG-CC⁻, fez-se a configuração do sistema de monitoramento de tensão e corrente (ADM, seção 4.2.2) a uma taxa de aquisição de 10 Hz e tempo de soldagem de aproximadamente 30 s. A abertura do arco elétrico foi realizada com o auxílio de um eletrodo-piloto fechando-se um curto-circuito entre o eletrodo de tungstênio e o corpo de prova. Foi depositado apenas um cordão de solda sobre cada corpo de prova, em um único passe de soldagem, para cada tipo de fluxo. Após o resfriamento, os corpos de prova foram lavados em água corrente usando uma esponja macia para retirar o excesso de fluxo, secos em toalhas de papel e identificados. Os parâmetros de soldagem adotados são apresentados na tabela V.3. Estes parâmetros foram estabelecidos baseados em trabalhos da literatura e em testes preliminares.

Na quarta etapa, foram realizados testes de soldagem variando-se a corrente de soldagem, velocidade de soldagem e comprimento de arco, mantendo-se inalterados os demais parâmetros. Para a corrente e a velocidade de soldagem foram selecionadas mais duas condições para teste, uma inferior e outra

Tabela V.3 – Parâmetros de soldagem ATIG-CC⁻.

Corrente	150 A
Comprimento de arco	3mm
Velocidade de soldagem	20cm/min
Tipo do eletrodo	W-2%ThO ₂
Diâmetro do eletrodo	3,2mm
Ângulo da ponta do eletrodo	60º
Gás	Argônio Puro
Vazão	12L/min

superior aos valores da tabela V.3. O valor máximo da corrente, igual a 170 A, foi definido a partir de testes de soldagem nos quais não foi observada penetração total do cordão de solda. Para o comprimento de arco foi selecionada somente mais uma condição igual a 1,5 mm (tabela V.4). Na identificação dos corpos de prova, os números após as letras I, V e C referem-se, respectivamente, aos valores de corrente (A), velocidade de soldagem (cm/min) e comprimento de arco (mm) multiplicado por dez. Assim, o primeiro corpo de prova identificado como I150V20C30 foi soldado com os parâmetros inicialmente adotados.

5.5.2 Corpo de prova padrão

Para comparar a remoção da camada de alumina foi soldado um corpo de prova nas mesmas dimensões dos anteriores (figura 5.2), porém com a metade final do cordão de solda usando-se corrente de soldagem com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (TIG-CA). A figura 5.9 apresenta os valores das correntes e tempos adotados, os quais foram determinados a partir da realização de testes preliminares até a obtenção de um cordão de solda TIG-CA, em que a limpeza catódica foi mais efetiva. Os demais parâmetros de soldagem foram os mesmos adotados na soldagem ATIG-CC⁻ (Tabela V.3).

Tabela V. 4 Variações nos parâmetros de soldagem ATIG-CC⁺.

Identificação dos corpos de prova	Corrente elétrica (A)	Velocidade (cm/min)	Comprimento de arco (mm)
I150V20C30	150	20	3
I120V20C30	120	20	3
I170V20C30	170	20	3
I150V15C30	150	15	3
I120V15C30	120	15	3
I170V15C30	170	15	3
I150V25C30	150	25	3
I120V25C30	120	25	3
I170V25C30	170	25	3
I150V20C15	150	20	1,5
I120V20C15	120	20	1,5
I170V20C15	170	20	1,5
I150V15C15	150	15	1,5
I120V15C15	120	15	1,5
I170V15C15	170	15	1,5
I150V25C15	150	25	1,5
I120V25C15	120	25	1,5
I170V25C15	170	25	1,5

Os corpos de prova foram soldados com a metade inicial pelo processo TIG-CA sem fluxo e a metade final pelo processo ATIG-CA aplicando-se os fluxos selecionados. Os parâmetros de soldagem adotados e suas variações são apresentados na tabela V.5. Na identificação dos corpos de prova os números após CP indicam, respectivamente, os tempos (ms) em que o eletrodo opera no ciclo positivo multiplicado por dez e no ciclo negativo, Estas variações permitiram uma redução do tempo em que o eletrodo opera no ciclo positivo de 4,8 a 2%.

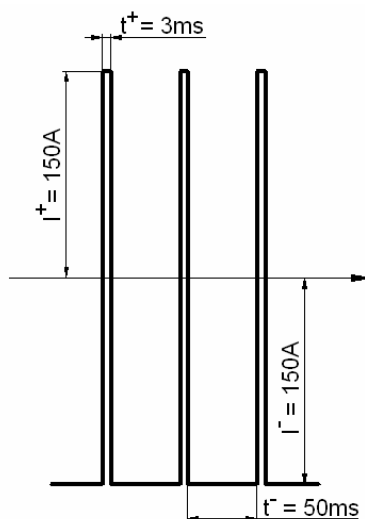


Figura 5.9 – Parâmetros de soldagem TIG-CA do corpo de prova padrão.

5.5.3 Soldagem ATIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (ATIG-CA)

Na aquisição e registro de tensão e corrente de soldagem, usou-se uma placa de aquisição de dados (ADVANTECH PCL-818H, ver seção 4.2.2) colocada em um microcomputador. Na tabela V.6 é apresentada a configuração desta placa de aquisição de dados.

Tabela V.5 - Parâmetros de soldagem ATIG-CA.

Identificação do corpo de prova	Ciclo positivo do eletrodo			Ciclo negativo do eletrodo		
	I ⁺ (A)	t ⁺ (ms)	t ⁺ (%)	I ⁻ (A)	t ⁻ (ms)	t ⁻ (%)
CP15-50	150	1,5	2,9	150	50	97,1
CP15-40	150	1,5	3,6	150	40	96,4
CP15-30	150	1,5	4,8	150	30	95,2
CP10-50	150	1,0	2,0	150	50	98,0
CP10-40	150	1,0	2,4	150	40	97,6
CP10-30	150	1,0	3,2	150	30	96,8

Tabela V.6. Configuração da placa de aquisição de dados.

Frequência de aquisição (kHz)	5,0
Número de pontos	15000
Tempo de aquisição (s)	3,0

5.6 Caracterização dos cordões de solda

Em todas as etapas previstas deste trabalho, os cordões de solda ATIG foram caracterizados por análise visual e análise de imagem. Macrografia, microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de raios-X (DRX) foram usadas somente para caracterização de cordões de solda obtidos com os fluxos selecionados.

5.6.1 Análise visual

Os cordões de solda ATIG-CC e ATIG-CA foram observados com o auxílio de uma lupa estereoscópica e comparados aos cordões de solda TIG-CA sem fluxo. Foram avaliados qualitativamente a aparência geral do cordão de solda e especificamente, a presença de regiões escuras de óxido (escória) aderido à sua superfície.

5.6.2 Análise de Imagem

A superfície dos cordões de solda foi registrada por três vezes consecutivas com uma câmera fotográfica digital e resolução de três megapixels, mantendo-se constante e igual a 95mm, à distância da lente da câmera ao corpo de prova.

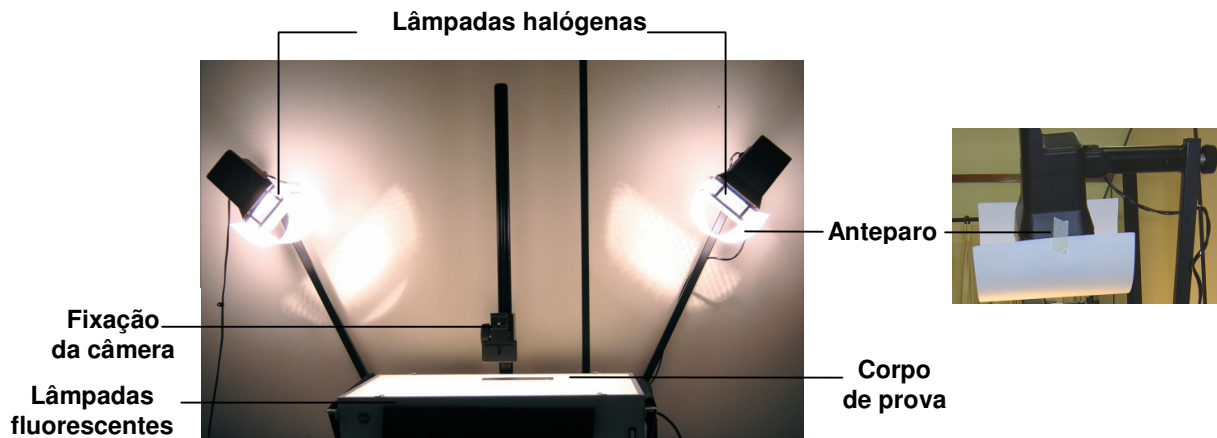


Figura 5.10 – Mesa fotográfica mostrando no detalhe a fixação das folhas de papel usadas como anteparo.

Usou-se uma mesa fotográfica, a qual permitiu a fixação da câmera e a padronização da iluminação. Foram usadas duas lâmpadas fluorescentes de 18W, sob o corpo de prova, e duas lâmpadas halógenas de 300W nos holofotes. Para minimizar a incidência direta da luz sobre a superfície do corpo de prova e obter uma iluminação uniforme, usou-se uma folha de papel formato A4 (210x297mm), como anteparo, em cada um dos holofotes (Figura 5.10).

Desenvolveu-se uma metodologia para quantificar o efeito dos fluxos na remoção da camada de alumina. Com o auxílio de um programa de análise de imagem (GLOBAL LAB IMAGE), analisou-se uma área fixa de 500x120pixels nas imagens dos cordões de solda convertidas para a escala de cinza. Esta área foi definida usando-se uma ferramenta de seleção do programa de análise de imagem, de forma a se registrar uma região do cordão representativa para a análise do efeito do fluxo sobre o mesmo. O programa forneceu a média e o desvio padrão dos valores de tom de cinza em um histograma (Figura 5.11).

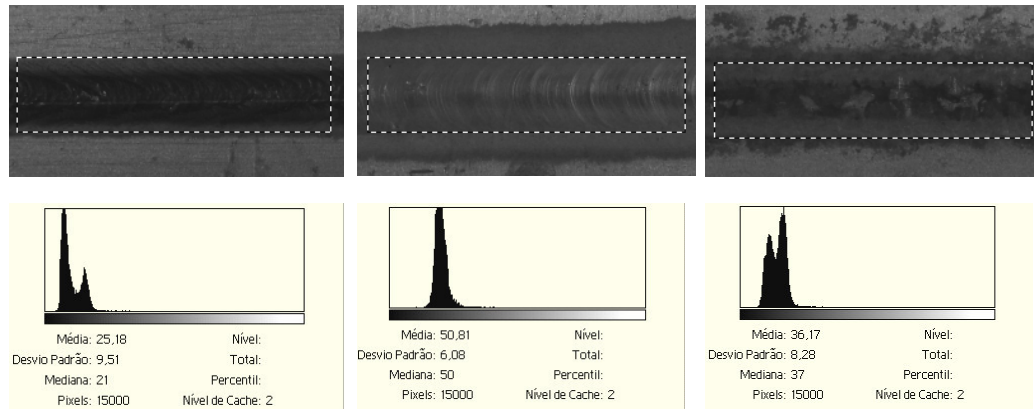


Figura 5.11 – Imagens mostrando a área fixa de 500x120pixels (linha tracejada) nos cordões de solda TIG-CC⁻ (esquerda), TIG-CA (centro) e ATIG-CC⁻ [NaCl] (direita) e seus respectivos histogramas.

Devido às variações obtidas na largura do cordão de solda em função das variações nos parâmetros de soldagem (Etapa IV), para a aquisição de dados por análise de imagem reduziu-se a largura da área analisada (120pixels) gradativamente. Por exemplo, a menor área analisada foi igual a 500 x 50pixels para o cordão de solda mais estreito (I120V25C15), obtido com os menores valores de corrente e comprimento de arco e maior velocidade de soldagem.

Foi estabelecido um índice para caracterizar a ação de limpeza promovida pelo fluxo nos cordões de solda ATIG-CC⁻, arbitrariamente definido, como:

$$IL = \frac{P_{ATIG} - P_{TIG}}{P_{CA} - P_{TIG'}} \quad (5.1)$$

em que P_{ATIG} é a média dos valores de tom de cinza do cordão de solda ATIG-CC⁻, P_{TIG} a média dos valores de tom de cinza do cordão de solda TIG-CC⁻, P_{CA} , a média dos valores de tom de cinza do cordão de solda TIG-CA e $P_{TIG'}$ a média dos valores de tom de cinza do cordão de solda TIG-CC⁻ do corpo de prova padrão. O valor de IL igual a um corresponde à limpeza obtida na soldagem

TIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (TIG-CA) sem adição de fluxo. Valores menores de IL indicam uma tonalidade mais escura do cordão de solda e, foram associados, neste trabalho, a uma menor ação de limpeza.

Para avaliar a reprodutividade da metodologia de caracterização de limpeza do cordão de solda por análise de imagem e determinar os valores das constantes P_{CA} e P_{TIG} , o corpo de prova padrão foi fotografado durante um mês (1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 10º, 15º, 20º, 25º e 30º dia), adotando-se a metodologia descrita acima. A média e o desvio padrão dos valores de tom de cinza dos cordões de solda TIG-CC⁻ e TIG-CA foram calculados.

O efeito dos fluxos na soldagem ATIG-CA foi avaliado somente pela diferença entre os valores de tom cinza das metades final e inicial dos cordões de solda ($P_{ATIG-CA} - P_{TIG-CA}$).

5.6.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia Dispersiva de Elétrons (EDS) e Difração de Raios-X (DRX)

Para caracterizar a soldagem ATIG-CC⁻ com os fluxos selecionados, em relação à soldagem TIG-CA sem fluxo, foram realizadas imagens da superfície dos cordões de solda e espectroscopia de energia dispersiva, usando um microscópio eletrônico de varredura em amostras de 18x7x6,35mm. Estas amostras também foram usadas para difração de raios-X.

5.6.4 Macrografia

Macrografias foram realizadas para avaliar o efeito dos fluxos selecionados na geometria do cordão de solda ATIG-CC⁻. Para isto, comparou-se a seção do cordão de solda ATIG-CC⁻, em termos de largura, profundidade de penetração e área da zona fundida, às seções dos cordões de solda TIG-CC⁻ e TIG-CA sem fluxo.

Testes preliminares mostraram que, devido à elevada condutividade térmica do alumínio, mesmo com o uso de um gabarito de cobre, houve um aumento progressivo na largura dos cordões de solda TIG, o que inviabilizou o uso do corpo de prova padrão para este fim. Em função disto, foram soldados cordões de solda TIG-CC⁻ e TIG-CA com 140mm de extensão, adotando-se os mesmos parâmetros de soldagem. Foram retiradas três seções transversais destes cordões de solda e do cordão de solda ATIG-CC⁻, como mostra a figura 5.12.

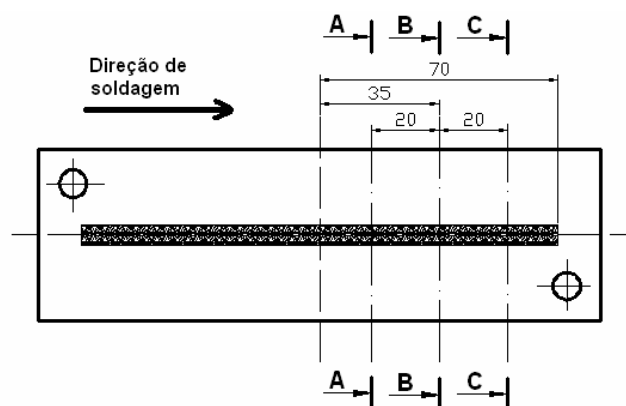


Figura 5.12 – Seções transversais A-A, B-B e C-C retiradas para macrografia (Dimensões em mm).

As superfícies das amostras foram lixadas mecanicamente passando por uma série de seis lixas, sendo a última de 600 mesh, obtendo-se um lixamento fino. Em seguida, sofreram ataque por imersão durante 25 s em uma solução Keller:

- 0,5% HCl,
- 1,5% HF,
- 2,0% HNO₃,
- 96% H₂O.

Para as medições de penetração e largura do cordão de solda usou-se um projetor de perfis. Os valores foram obtidos através de medição direta na imagem do cordão de solda ampliada 20 vezes. O perfil do cordão de solda foi desenhado, com a mesma ampliação, em uma folha transparente fixada na tela

do equipamento. Esta folha foi escaneada e calculou-se a área com o auxílio do programa de análise de imagem QUANTIKOV (PINTO, 1996).

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes de soldagem realizados nas seis etapas deste estudo (Figura 5.1a). Estes resultados foram discutidos visando a caracterização do efeito dos fluxos na remoção da camada de alumina durante a soldagem ATIG de alumínio. Das ferramentas previstas para a caracterização dos cordões de solda (Figura 5.1b), a análise visual e a análise de imagem foram usadas em todas as etapas. Usou-se MEV/EDS e Raios-X apenas para a caracterização de cordões de solda selecionados. A macrografia foi usada somente na última etapa para caracterização do efeito do metal base na geometria do cordão de solda ATIG-CC⁻.

6.2 Efeito dos fluxos simples na soldagem ATIG-CC⁻

A tabela VI.1 apresenta os valores médios de tensão e corrente de soldagem calculados pelo programa SINAL. A corrente média em toda a extensão dos cordões de solda foi de $137,3 \pm 1,3$ A, a tensão média na soldagem TIG-CC⁻ foi de $11,9 \pm 0,2$ V e na soldagem ATIG-CC⁻ de $12,0 \pm 0,3$ V. Como os valores de tensão medidos na soldagem ATIG-CC⁻ não apresentaram uma variação significativa em relação à soldagem TIG-CC⁻, estes resultados indicam que este parâmetro não pode ser usado para caracterizar o efeito dos fluxos simples na soldagem ATIG-CC⁻ de alumínio.

Na observação com a lupa estereoscópica verificou-se a presença de resíduos de fluxo aderidos na superfície dos cordões de solda. Na soldagem ATIG-CC⁻ com cloretos e óxidos, observou-se que parte destes resíduos ficou aderida na região central do cordão de solda, enquanto que, na soldagem ATIG-CC⁻ com

Tabela VI.1 – Valores médios de tensão e corrente de soldagem.

Fluxo	Corrente(A)	V_{TIG-CC-}	V_{ATIG-CC-}	V_{ATIG-CC-} - V_{TIG-CC-}
KF	137,5± 0,5	11,9±0,4	11,8±0,2	-0,1
NaF	136,4±0,5	12,2±0,2	12,2±0,2	0
AlF ₃	138,2±0,2	11,9±0,3	12,3±0,8	0,4
CaF ₂	137,6±0,5	12,0±0,4	12,0±0,2	0
KCl	138,3±0,4	12,0±0,3	12,0±0,4	0
NaCl	139,0±0,3	11,8±0,4	12,0±0,1	0,2
AlCl ₃	136,5±0,5	12,0±0,4	12,0±0,1	0
CaCl ₂	137,0±0,3	11,7±0,3	11,7±0,2	0
BaCl ₂	137,1±0,3	11,9±0,3	11,7±0,1	-0,2
ZnCl ₂	139,3±0,5	11,3±0,3	11,1±0,4	-0,2
V ₂ O ₅	137,2±0,4	12,3±0,2	12,3±0,2	0
CaO	135,1±0,4	12,0±0,4	12,1±0,4	0,1
SiO ₂	135,3±0,5	11,8±0,3	12,3±0,1	0,4

fluoretos, os resíduos tenderam a se localizar nas laterais do cordão de solda (Figura 6.1). Este resultado pode estar associado a mudanças na intensidade e no sentido do movimento das correntes de metal líquido na poça de fusão devido à presença de elementos tensoativos (Efeito Marangoni) ou a diferenças nas propriedades físicas dos componentes de fluxo e do metal, particularmente, os seus pontos de fusão (ver APÊNDICE B). Pode-se esperar, por exemplo, que, quando o fluxo tiver uma temperatura superior ao metal base, o primeiro não chegue a fundir nas laterais do cordão, tendendo a permanecer aderido à superfície do cordão após a solidificação da poça.

Observou-se uma coloração cinza claro na região central e cinza escuro com porosidades nas laterais dos cordões de solda ATIG-CC⁻ obtidos com fluoretos de sódio e potássio e em maior quantidade em todo o cordão de solda ATIG-CC⁻[CaF₂]. Nos cordões de solda obtidos com cloretos e óxidos não foram observadas porosidades e, especificamente nos cordões de solda ATIG-CC⁻ obtidos com cloretos de sódio e potássio, foram observadas regiões com

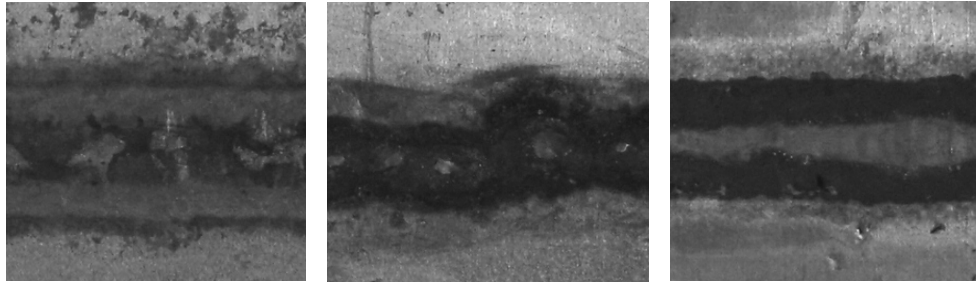


Figura 6.1 – Imagens dos cordões de solda ATIG-CC⁻ [NaCl] (esquerda), ATIG-CC⁻ [SiO₂] (centro) e ATIG-CC⁻ [NaF] (direita). Ampliação: 3x.

alternância de pontos claros e escuros na região central. No cordão de solda ATIG-CC⁻ [SiO₂] observou-se também uma redução na largura do mesmo em relação ao cordão de solda TIG-CC⁻ e a ocorrência de pontos no lado inferior do corpo de prova indicando que houve penetração total do cordão de solda.

Os gráficos da figura 6.2 mostram a média e o desvio padrão dos valores de tom de cinza dos cordões de solda TIG-CC⁻ e TIG-CA do corpo de prova padrão, o qual foi fotografado em um intervalo de 30 dias conforme a metodologia de análise de imagem descrita em 5.6.2. Cada valor representa a média de três medições.

As equações de regressão obtidas com valores dos coeficientes angulares próximos de zero indicam a reprodutividade da metodologia de caracterização por análise de imagem dos cordões de solda TIG-CC⁻ e TIG-CA do corpo de prova padrão e uma influência do intervalo de tempo entre a soldagem e a análise do cordão que pode ser considerada desprezível para intervalos de até 30 dias. Os valores das constantes P_{TIG} e P_{CA} adotados para o cálculo de IL (equação 5.1) foram definidos como 25 e 51, que são os valores médios nominais de tom de cinza destes cordões de solda, respectivamente. A figura 6.3 indica a existência de uma correlação entre os valores de tom de cinza medidos para os cordões TIG (CC⁻ e CA) nos diferentes dias. Este resultado indica que, apesar de pequenas mudanças nas condições de medida, o método adotado permite detectar com sucesso mudanças relativas de tonalidade das superfícies dos cordões de solda.

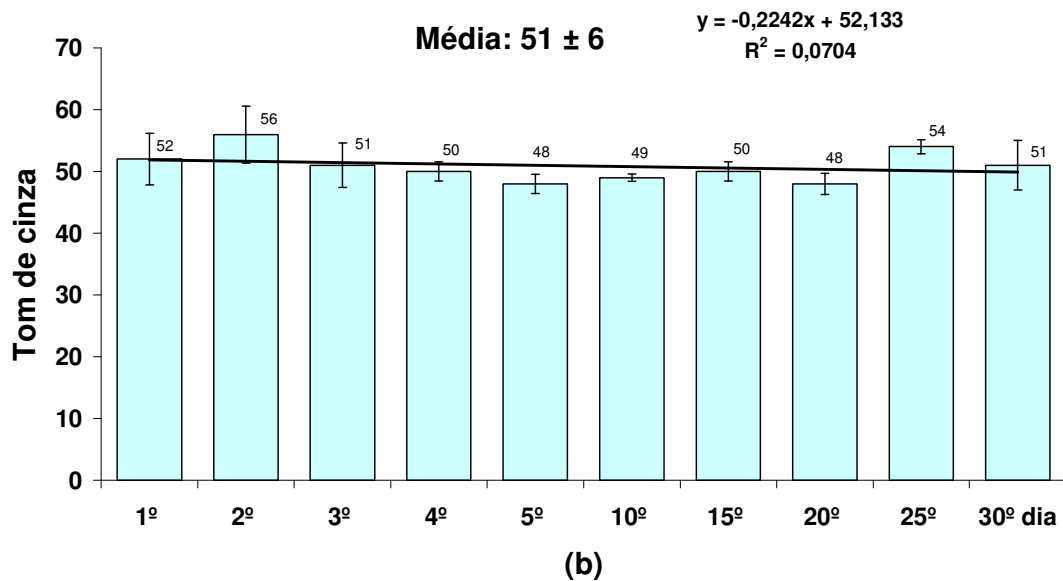
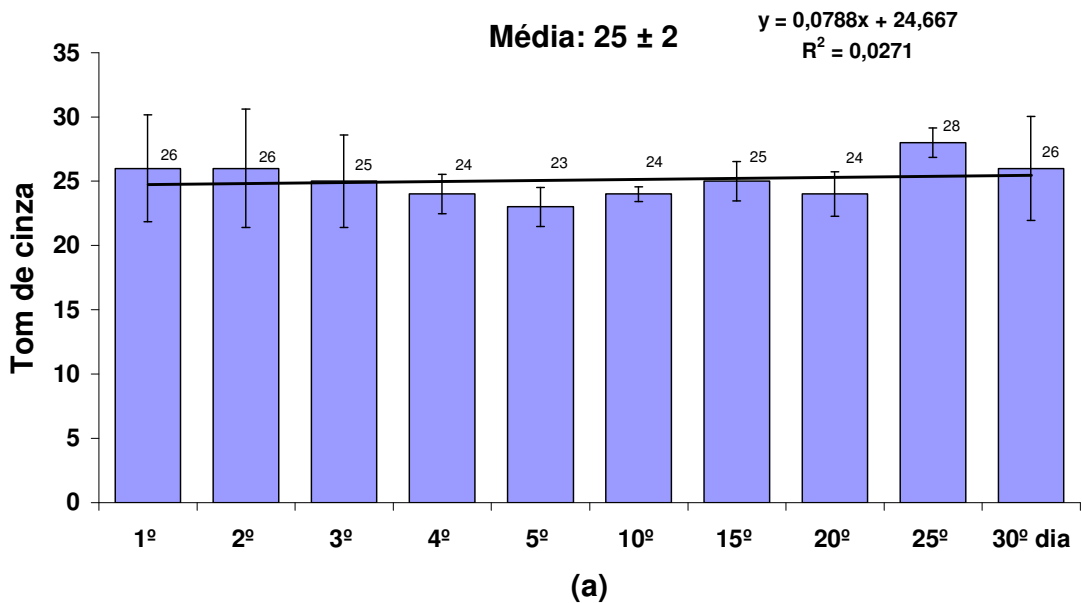


Figura 6.2 – Média e desvio padrão dos valores de tom de cinza dos cordões de solda do corpo de prova padrão: a) TIG-CC b) TIG-CA.

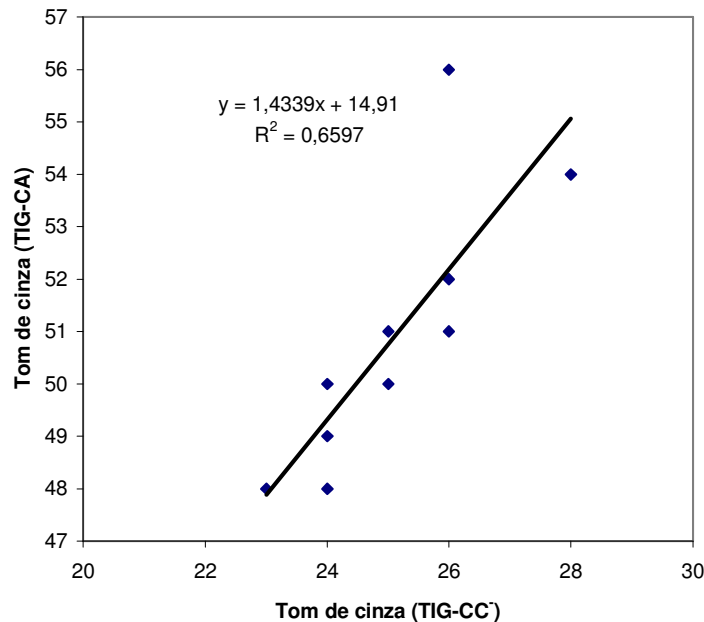


Figura 6.3 – Correlação entre os valores médios de tom de cinza nas imagens das superfícies dos cordões para diferentes intervalos de tempo entre a soldagem e a realização da medida.

A figura 6.4 apresenta as imagens, valores de tom de cinza e de IL do cordão de solda padrão e dos cordões de solda obtidos com a aplicação de fluxos simples. O desvio padrão dos valores de tom de cinza, nesta figura, refere-se à área analisada de 500x120 pixels.

O gráfico da figura 6.5 classifica os fluxos simples a partir dos valores do índice de limpeza IL. Considerando-se arbitrariamente valores de IL iguais ou superiores a 0,4, os fluxos que apresentaram maior efeito na remoção da camada de alumina foram os cloretos de zinco, potássio e sódio e os fluoretos de alumínio e cálcio, respectivamente. Entretanto, mesmo para estes fluxos, o maior valor de IL foi igual a 0,5. Ou seja, supondo que IL correlacione bem com a limpeza ou remoção da camada de óxido da superfície da solda, os resultados obtidos sugerem que, mesmo nos melhores casos, o efeito de limpeza atingiu apenas a metade da eficiência obtida na soldagem TIG-CA.

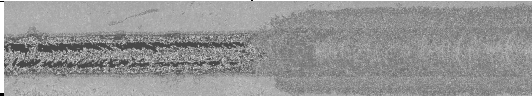
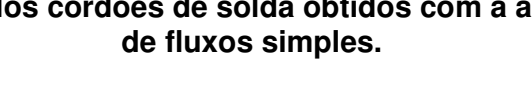
TIG-CC ⁺ (Tom de cinza)		CORDÃO DE SOLDA PADRÃO		TIG-CA (Tom de cinza)	IL
		TIG-CC ⁺	TIG-CA		
25±9				51±6	1,0
Fluxo	TIG-CC ⁺ (Tom de cinza)	CORDÕES DE SOLDA		ATIG-CC ⁺ (Tom de cinza)	IL
		TIG-CC ⁺	ATIG-CC ⁺		
KF	25±12			30±9	0,2
NaF	26±11			30±11	0,2
AlF ₃	26±12			35±5	0,4
CaF ₂	25±13			36±7	0,4
KCl	24±11			37±10	0,5
NaCl	24±11			36±9	0,4
AlCl ₃	23±9			25±5	0,1
CaCl ₂	23±5			31±5	0,3
BaCl ₂	25±13			31±9	0,2
ZnCl ₂	27±8			40±6	0,5
SiO ₂	24±11			27±11	0,1
V ₂ O ₅	22±11			17±6	-0,2
CaO	26±13			33±5	0,3

Figura 6.4 – Imagens, valores de tom de cinza e de IL do cordão de solda padrão e dos cordões de solda obtidos com a aplicação de fluxos simples.

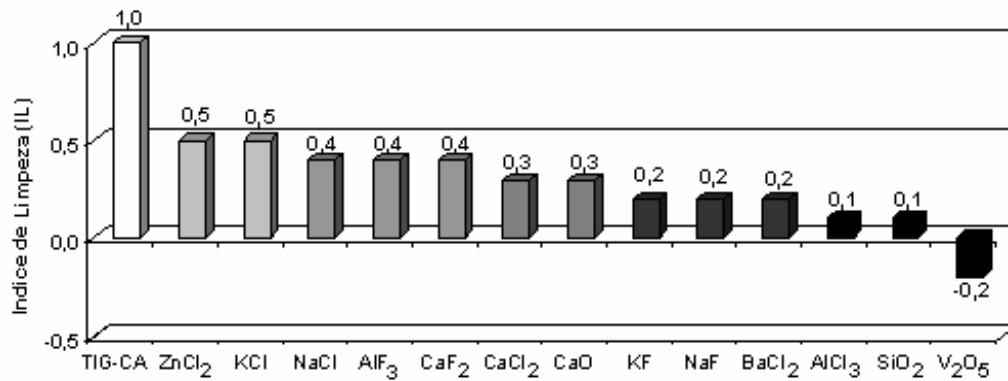


Figura 6.5 - Classificação dos fluxos simples com base em IL.

A análise das imagens da região central e da zona termicamente afetada (ZTA) na superfície dos cordões de solda, observadas por microscopia eletrônica de varredura (Figuras 6.6 e 6.7), mostra que o mecanismo de limpeza atuante no processo de soldagem ATIG-CC⁻ difere do mecanismo obtido na soldagem TIG-CA. No primeiro caso, um fluxo pode interagir com a camada de óxido e de outras contaminações na superfície de uma peça metálica, durante a operação de soldagem, de três maneiras: (i) por reação química formando uma escória de menor ponto de fusão que o metal de solda, (ii) pela redução do óxido ou (iii) pela dissolução do óxido ou contaminação pelo fluxo, o qual não teria os seus pontos de fusão e viscosidade significativamente alterados (LINNERT,1994). Observa-se nas imagens a presença de resíduos de fluxo ou de escória aderidos na superfície dos cordões de solda provenientes destas interações químicas. No segundo caso, ocorre a limpeza catódica, que consiste na remoção da camada de óxidos superficiais pela ação do arco elétrico quando o eletrodo é positivo. Este efeito é bem conhecido em soldagem e de importância tecnológica na soldagem com proteção gasosa do alumínio (GUILLE,1971; MODENESI, 2002). As imagens de MEV neste caso mostram que a região central e a ZTA do cordão de solda são isentas de resíduos. A ZTA apresenta um acabamento mais grosseiro em relação ao centro do cordão. Nesta, o efeito da limpeza catódica é visível, com a presença de regiões de dano distribuídas uniformemente resultantes da ação de limpeza pelo arco elétrico durante a soldagem TIG-CA.

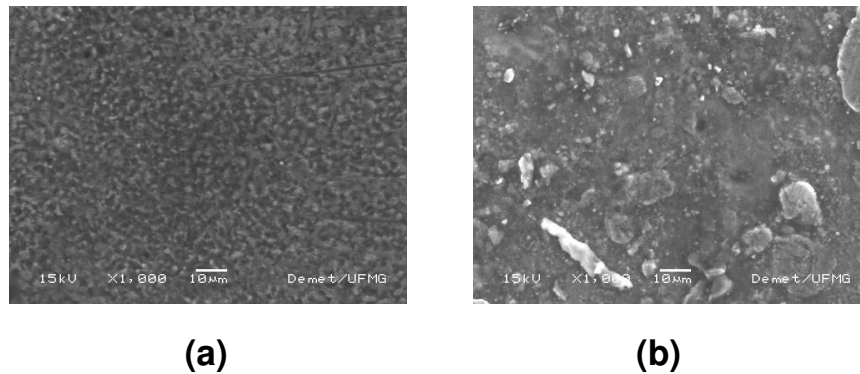


**Figura 6.6 – Imagens da região central dos cordões de solda. (a) TIG-CA
(b) ATIG-CC⁻ [NaCl]. Ampliação: 1000x.**

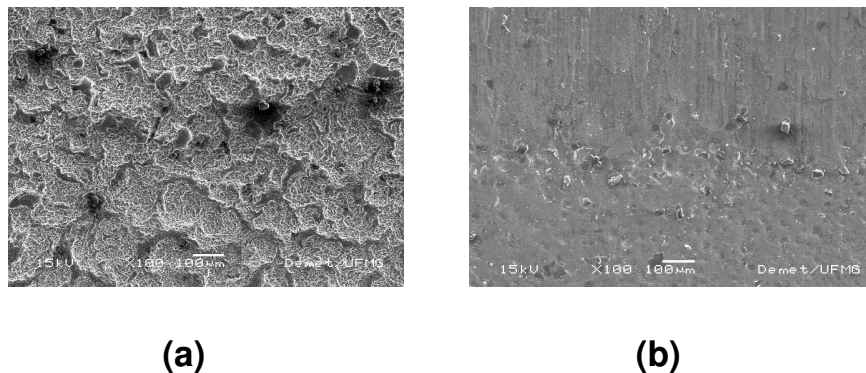


**Figura 6.7 – Imagens da ZTA dos cordões de solda. (a) TIG-CA
(b) ATIG-CC⁻ [NaCl]. Ampliação: 100x.**

As figuras 6.8 a 6.12 apresentam os espectrogramas de energia dispersiva de elétrons (EDS) obtidos nas regiões assinaladas nas imagens de MEV (aumento 30x) e os difratogramas de raios-X das superfícies do cordão de solda TIG-CA e de cordões de solda ATIG-CC⁻ selecionados, incluindo o ATIG-CC⁻ [V₂O₅], no qual foi usado o fluxo simples considerado como o menos efetivo na remoção da camada de alumina. À exceção do espectro de EDS do cordão de solda ATIG-CC⁻[CaF₂], os picos predominantes no cordão de solda TIG-CA e nos demais cordões de solda são do alumínio. A presença de picos de carbono e

oxigênio justifica-se por contaminações da superfície dos cordões de solda até o momento dos ensaios de caracterização. Outros elementos são provenientes do metal base como é o caso do Fe e do Si (Tabela IV.2) ou dos componentes dos fluxos (APÊNDICE A).

O difratograma de raios-X do cordão de solda TIG-CA (Figura 6.8) é um espectro típico do alumínio puro, o qual confirma a composição química obtida por via úmida do material (Tabela IV.2). Nos difratogramas de raios-X dos cordões de solda ATIG-CC[KCl] e ATIG-CC[NaCl] obtiveram-se apenas os picos referentes ao alumínio e não foram encontrados picos relativos às fases dos componentes dos fluxos (Figuras 6.9 e 6.10).

A alta concentração de aglomerados observada na imagem de MEV (Figura 6.11) refere-se à contaminação do cordão de solda pelo fluxo CaF_2 . No difratograma apresentado nesta mesma figura aparecem além dos picos de Al (fase α) somente os picos do componente deste fluxo (fase β). Isto sugere que não ocorreu, durante a soldagem, a reação química entre o mesmo e a camada de óxido ($3\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 3\text{CaO} + 2\text{AlF}_3$), apesar desta ser a única termodinamicamente estável dentre as demais reações químicas envolvendo os componentes dos fluxos selecionados e a alumina (figura 6.13). Um fator, que deve contribuir para dificultar a ocorrência desta reação em soldagem, é o fato de que o ponto de fusão do CaF_2 é duas vezes superior o ponto de fusão do alumínio (APÊNDICE B). Assim, durante a soldagem ocorreria a fusão do alumínio, permanecendo parte do CaF_2 no estado sólido sobre a poça de fusão, até se aderir à superfície do cordão de solda após a solidificação desta.

O fluxo V_2O_5 pode ter-se dissociado em moléculas de óxido de vanádio, VO (Figura 6.12). Entretanto, isto não pode ser afirmado com certeza, pois os picos deste óxido à exceção do último, são coincidentes com os picos de Al, como mostram os difratogramas sintéticos de raios-X (ICDD, 2001) na figura 6.14.

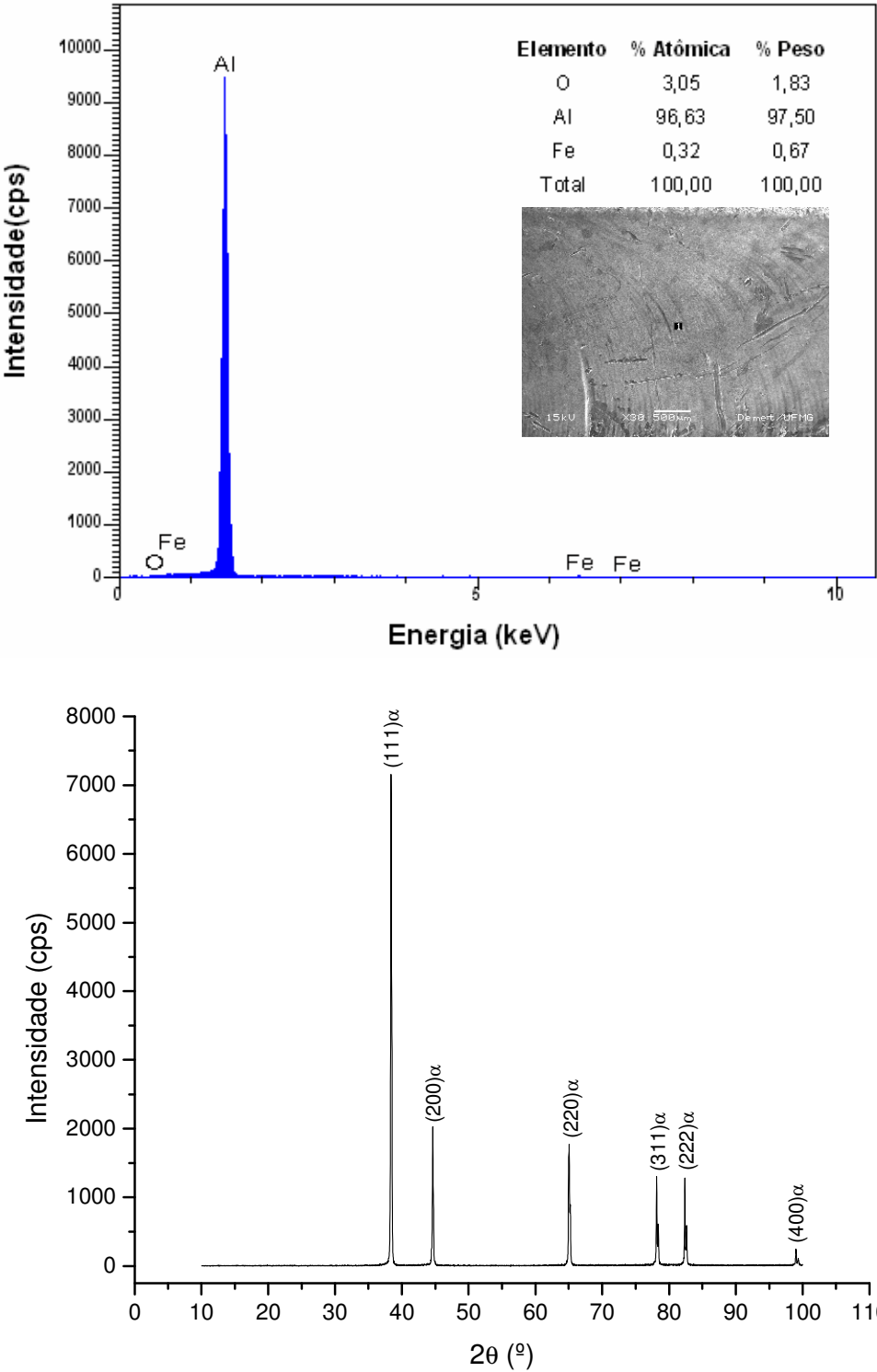


Figura 6.8– Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda TIG-CA. α : Al.

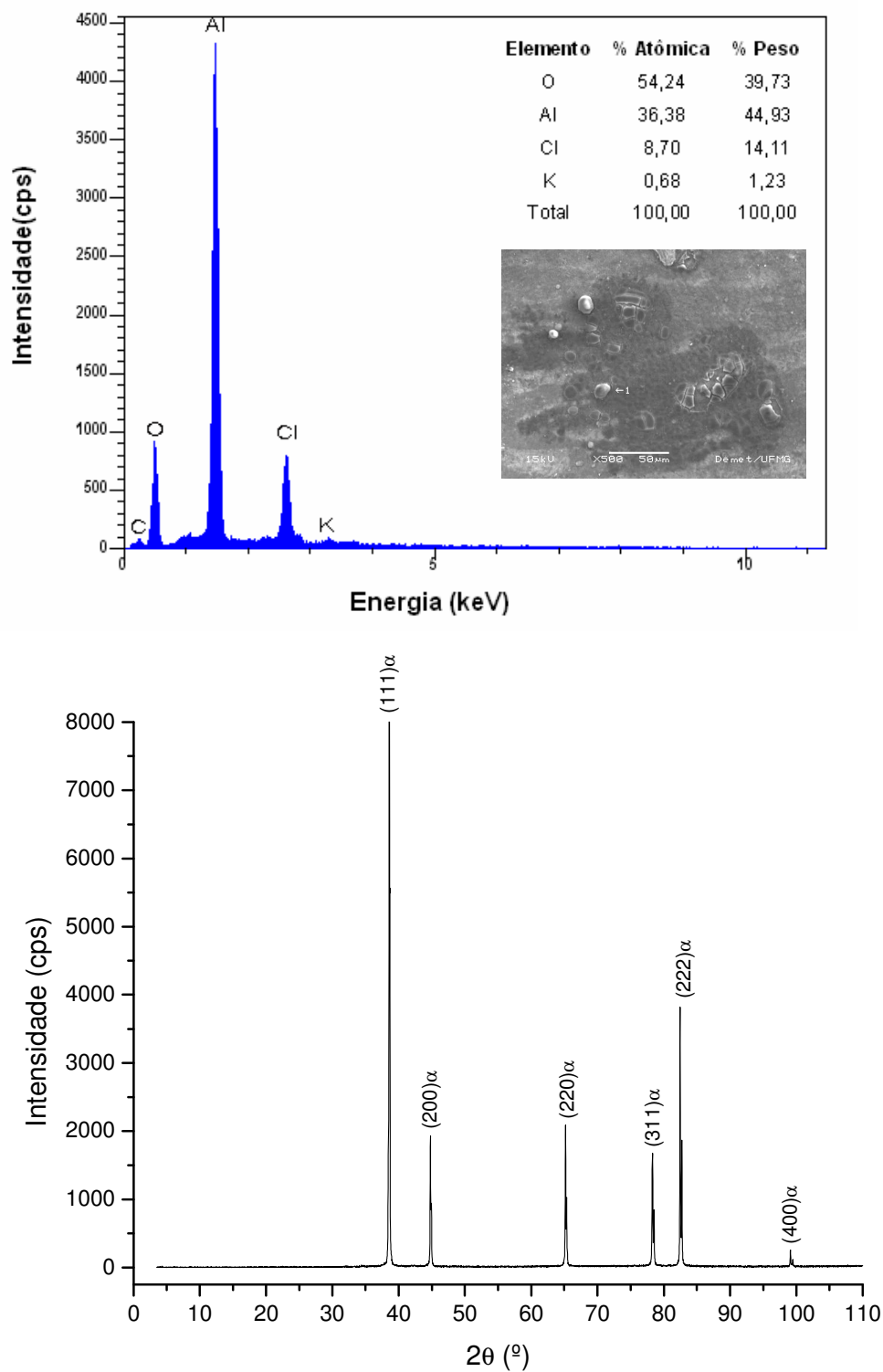


Figura 6.9 – Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC [KCl]. α : Al.

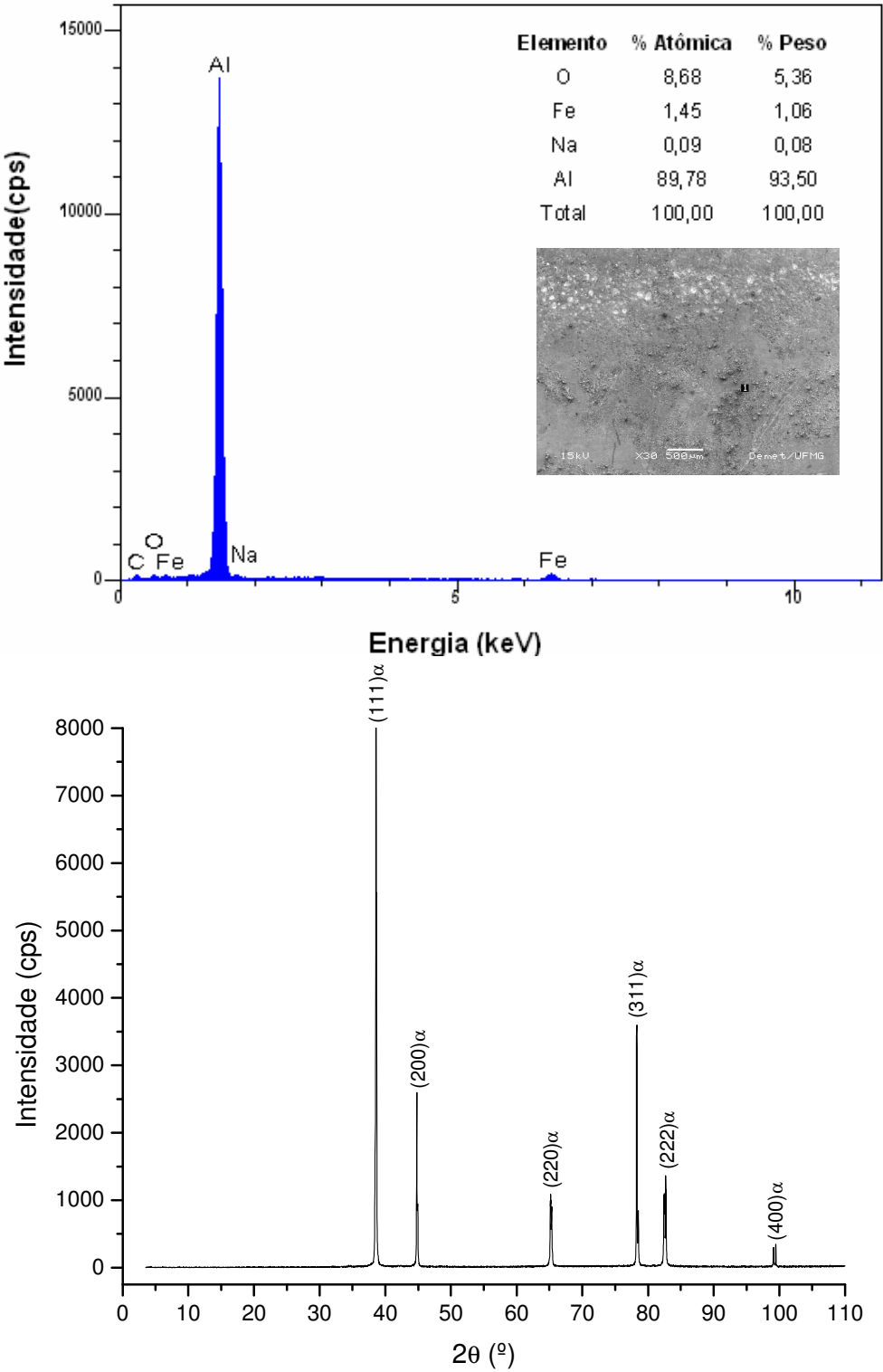


Figura 6.10 – Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻ [NaCl]. α : Al.

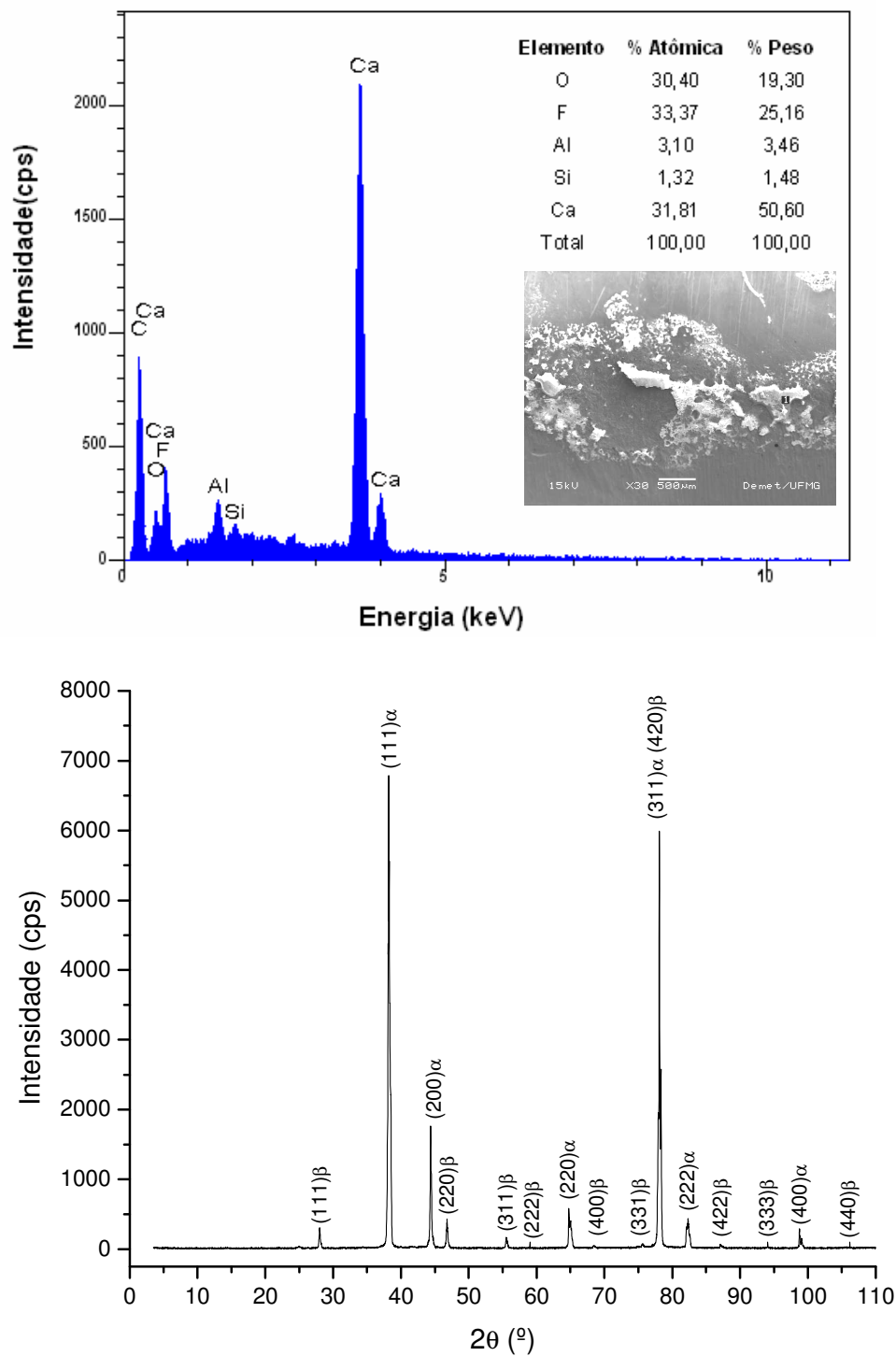


Figura 6.11 – Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC [CaF₂]. α: Al; β: CaF₂.

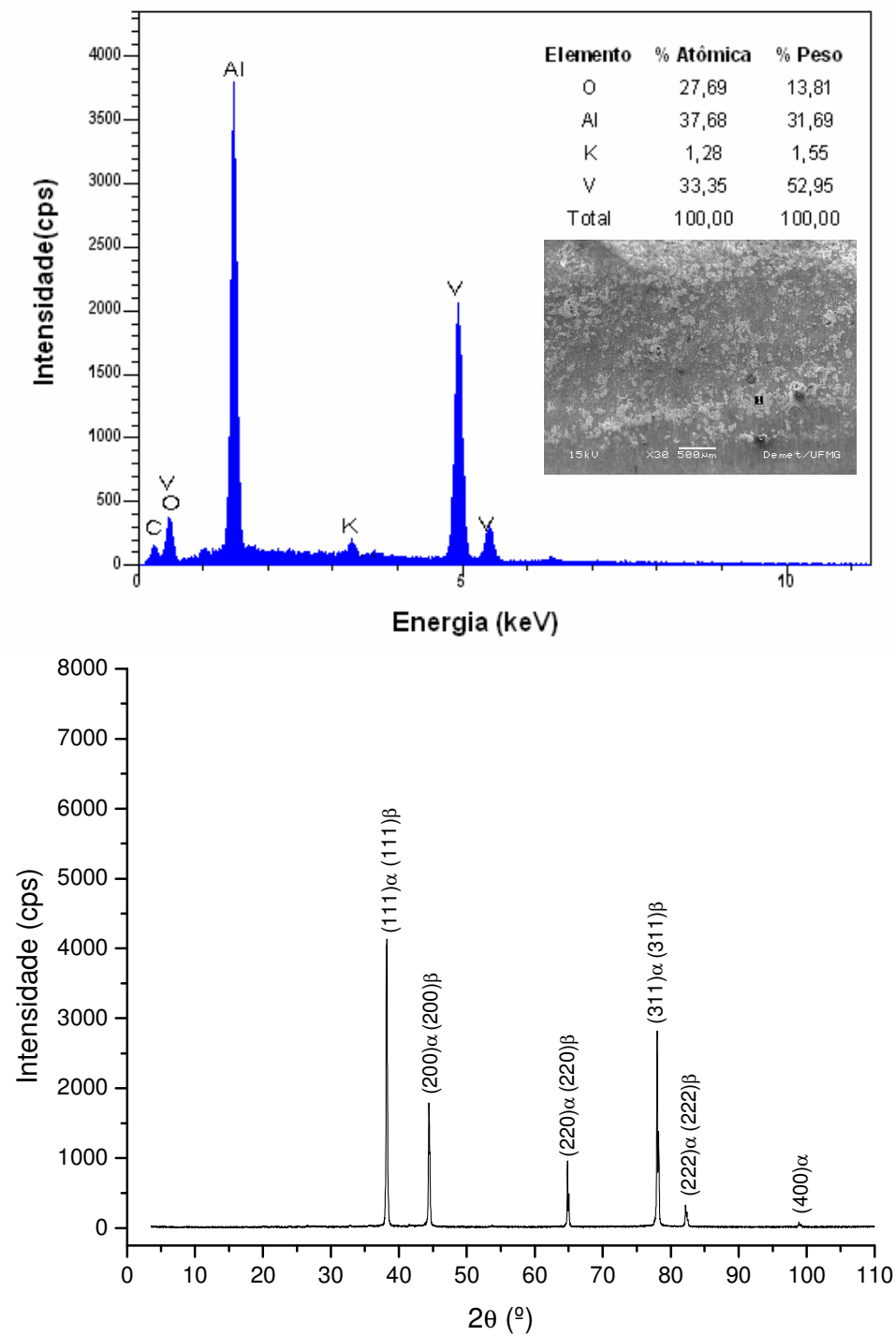


Figura 6.12– Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC $[\text{V}_2\text{O}_5]$. α : Al; β : VO.

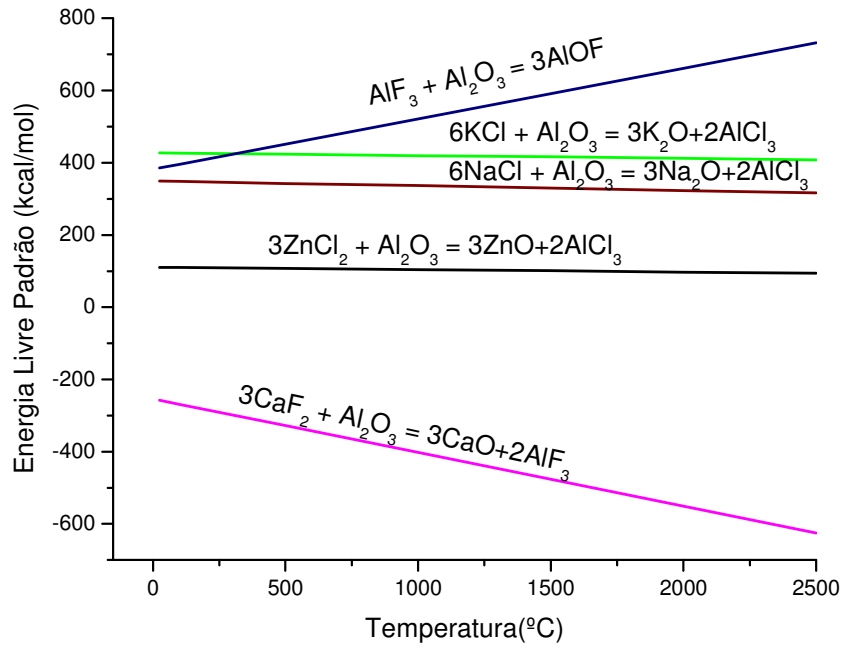
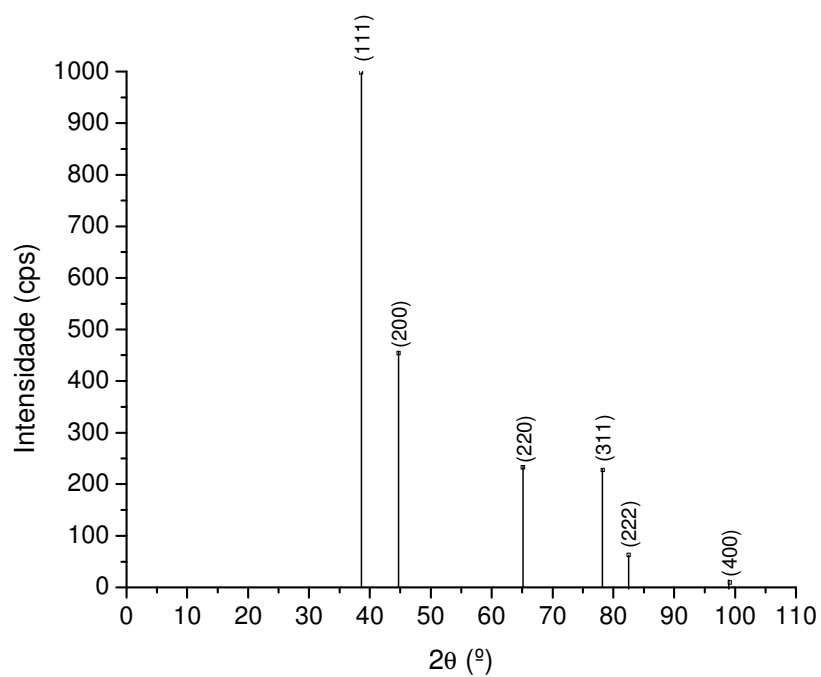
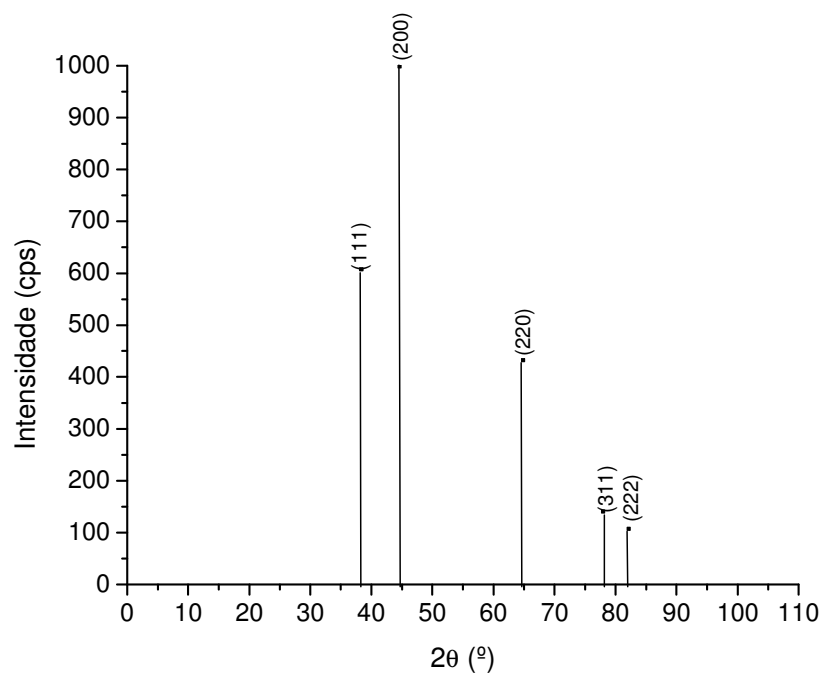


Figura 6.13– Energia livre padrão (ΔG^0) das reações químicas entre os componentes dos fluxos selecionados e a alumina. Curvas calculadas a partir de dados de Carvalho *et al.* (1977).

Estes resultados confirmam que em geral os cloretos são mais efetivos na remoção da camada de alumina durante a soldagem ATIG-CC⁻ de alumínio do que fluoretos e óxidos, pois nestes últimos observou-se uma maior quantidade de resíduos aderidos à superfície dos cordões de solda e a formação de porosidades. Dos mecanismos de interação entre um fluxo e a camada de óxido durante a soldagem, propostos por Linnert (1994), o que parece estar associado à limpeza do cordão de solda é a dissolução do óxido pelos componentes do fluxo. Este mecanismo foi mais expressivo com o uso de cloretos possivelmente devido às suas características físico-químicas, mais especificamente, o seu menor ponto de fusão (APÊNDICE B).

**(a)****(b)****Figura 6.14– Difractogramas sintéticos de raios-X. (a) Al (b) VO.**

Na próxima seção, parte dos fluxos compostos testados foi elaborada utilizando-se os componentes cloretos de zinco, potássio e sódio e os fluoretos de alumínio e cálcio, com os quais, conforme foi visto, foram formulados os fluxos simples que apresentaram melhores resultados na remoção da camada de alumina.

6.3 Efeito dos fluxos compostos na soldagem ATIG-CC⁻

A tabela VI.2 mostra os valores de corrente e tensão medidos durante a soldagem ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona] e dos cordões de solda ATIG-CC⁻ com a aplicação de fluxos compostos obtidos a partir da mistura de massas iguais dos componentes dos fluxos simples mais efetivos selecionados na primeira etapa e com fluxos compostos obtidos a partir de diagramas de fase binários e ternários. Como a elevada higroscopicidade do ZnCl₂ dificultou sua pesagem em quantidades gradativamente menores que 50mg e sua mistura a seco com os demais componentes, foram testadas apenas algumas combinações deste componente adicionando-se o fluxo ZnCl₂-acetona em substituição à acetona pura. A corrente média de soldagem foi de 138,0±0,4A. A tensão média na soldagem TIG-CC⁻ foi de 10,8±0,3 e na soldagem ATIG-CC⁻ de 10,4±0,3. Apesar de ter-se obtido para dois fluxos variações na tensão superiores a 1V, na análise visual destes cordões de solda observou-se a presença de resíduos de fluxo ou de escória aderida à superfície dos mesmos, mostrando que este resultado não pode ser associado a um efeito de limpeza durante a soldagem ATIG-CC⁻.

As tabelas VI.1 e VI.2 indicam valores de tensão mais elevados na soldagem ATIG com fluxos contendo sílica em comparação com a soldagem TIG. Resultados similares foram observados por Apolinário (1998) na soldagem ATIG de aço inoxidável e por Sire & Marya (2002) na soldagem FBTIG de alumínio. Sire & Marya (2002) sugerem que este efeito estaria ligado ao caráter refratário da sílica que causaria uma constrição do arco.

Tabela VI.2 – Valores médios de tensão e corrente de soldagem medidos durante a soldagem ATIG-CC com fluxos compostos.

Fluxo	Corrente(A)	$V_{TIG-CC-}$	$V_{ATIG-CC-}$	$V_{ATIG-CC-} - V_{TIG-CC-}$
ZnCl ₂ -acetona	138,9± 1,3	10,5±0,3	10,4±0,1	-0,1
KCl-NaCl	138,6± 0,5	10,8±0,4	10,1±0,3	-0,7
KCl-AlF ₃	137,7± 0,4	10,6±0,4	10,9±0,4	0,3
KCl-CaF ₂	138,1± 0,2	11,1±0,2	10,4±0,6	-0,7
NaCl-AlF ₃	138,1± 0,3	10,3±0,2	10,5±0,2	0,2
NaCl-CaF ₂	137,9± 0,2	10,9±0,3	10,0±0,3	-0,9
AlF ₃ -CaF ₂	137,9± 0,3	11,5±0,2	11,6±0,4	0,1
KCl- ZnCl ₂ -acetona	137,7± 0,4	11,6± 0,3	11,0± 0,2	-0,6
NaCl- ZnCl ₂ -acetona	138,6± 0,6	11,7± 0,5	11,5± 0,2	-0,2
KCl-NaCl-AlF ₃	138,1± 0,3	10,7±0,4	10,2±0,2	-0,5
KCl-NaCl-CaF ₂	137,0± 0,3	11,0±0,3	9,7±0,2	-1,3
KCl-AlF ₃ -CaF ₂	138,2± 0,4	10,8±0,2	10,1±0,3	-0,7
NaCl-AlF ₃ -CaF ₂	137,9± 0,3	11,2±0,4	11,2±0,4	0
KCl-NaCl-ZnCl ₂ -acetona	139,0±0,3	11,1±0,2	11,3±0,2	0,2
KCl-NaCl-AlF ₃ -CaF ₂	138,1± 0,4	10,5±0,4	9,5±0,2	-1,0
KCl-NaCl-AlF ₃ -ZnCl ₂ -acetona	136,8±0,4	10,9±0,3	10,4±0,2	-0,5
KCl-NaCl-AlF ₃ -CaF ₂ -ZnCl ₂ -acetona	138,2±0,4	10,6±0,3	9,9±0,2	-0,7
V ₂ O ₅ -Al ₂ O ₃	137,0± 0,3	12,6±0,2	12,7±0,1	0,1
CaO-Al ₂ O ₃	137,0±0,2	11,7±0,1	11,9±0,2	0,2
KCl-SiO ₂ -Al ₂ O ₃	136,5±0,5	12,6±0,3	13,8±0,6	1,2
NaCl-SiO ₂ -Al ₂ O ₃	136,7±0,5	12,0±0,2	12,9±0,8	0,9
Na ₃ AlF ₆ -Al ₂ O ₃	136,0± 0,4	11,9±0,2	11,2±0,3	-0,7

O cordão de solda ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona] foi o que apresentou uma menor quantidade de resíduos aderida à superfície em relação aos cordões de solda obtidos com fluxos compostos. Isto deve estar associado com o fato do cloreto de zinco fundir a uma baixa temperatura e entrar em ebulição a temperaturas pouco superiores a de fusão do alumínio (APÊNDICE B). Em relação ao cordão de solda ATIG-CC⁻ [ZnCl₂] obtido na etapa anterior, sem diluição em acetona, ele apresentou praticamente a mesma coloração cinza claro porém com uma distribuição mais uniforme dos resíduos. Além disto obteve-se também uma maior facilidade de aplicação e observou-se uma maior estabilidade do arco elétrico durante a soldagem. Da mesma forma que no estudo dos fluxos simples, resíduos dos fluxos compostos foram observados na região central e lateral do cordão de solda, porém não houve nenhuma tendência definida em relação ao sentido desta contaminação (Figura 6.15).

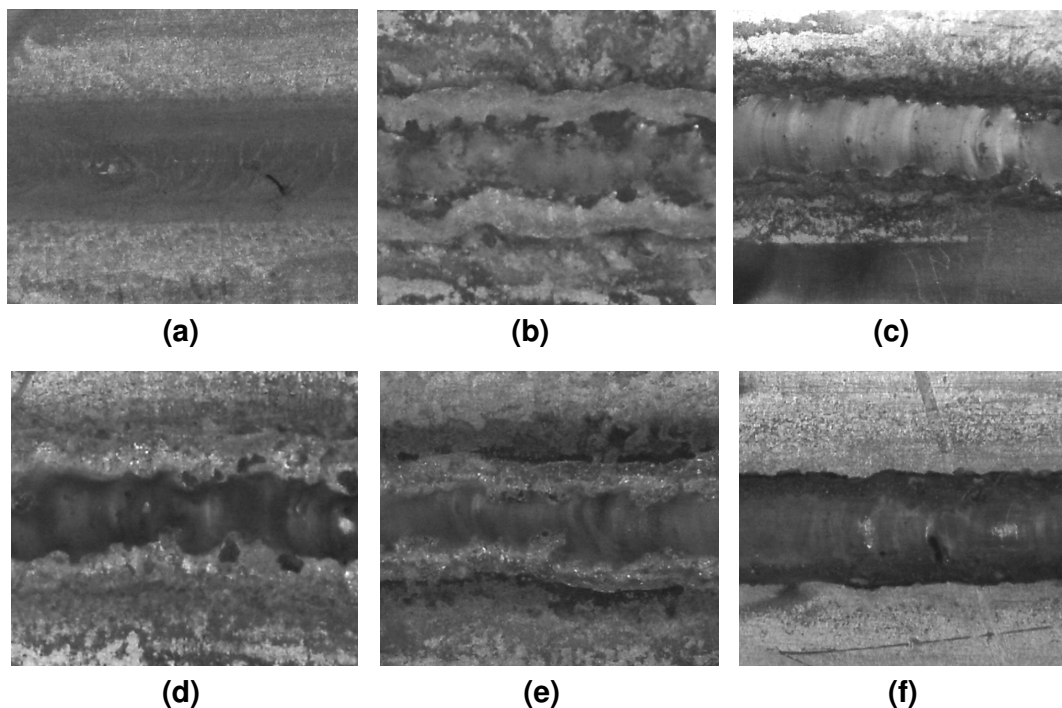


Figura 6.15 – Escória aderida à superfície dos cordões de solda ATIG-CC⁻
(a) ZnCl₂-acetona (b) KCl-AlF₃ (c) AlF₃-CaF₂ (d) NaCl-AlF₃-CaF₂
(e) KCl- NaCl-AlF₃-CaF₂ (f) Na₃AlF₆-Al₂O₃. Ampliação: 3x.

As figuras 6.16 e 6.17 mostram, respectivamente, as imagens, os valores de tom de cinza e de IL do cordão de solda ATIG-CC⁻ obtidos com o fluxos ZnCl₂-acetona, fluxos compostos por até cinco componentes e fluxos compostos baseados em diagramas de fase binários e ternários.

A análise visual da superfície dos cordões de solda mostrou que, dentre os fluxos compostos por dois componentes, o que apresentou a coloração cinza mais escura e, conseqüentemente menor valor de IL, foi o obtido com a mistura entre dois cloretos (KCl-NaCl). Este resultado pode ser devido ao fato de que os cloretos, em função das correntes de Marangoni, tendem a concentrar-se na região central do cordão, conforme mostraram os resultados obtidos na soldagem ATIG-CC⁻ com fluxos simples elaborados com estes componentes. Observou-se ainda, que foram obtidos cordões de solda com tonalidade cinza mais clara com o uso de fluxos compostos por cloreto-fluoreto, principalmente naqueles que contém o AlF₃, e de fluoreto-fluoreto (AlF₃-CaF₂), o qual apresentou o valor de IL mais elevado deste grupo. Os cordões de solda obtidos com fluxos que continham o CaF₂ em sua formulação apresentaram regiões bem definidas com tonalidade cinza escura e localizadas geralmente em sua lateral, que podem ser resíduos deste componente aderidos à superfície do cordão de solda, pois este é um dos que apresenta maior ponto de fusão (APÊNDICE B). Como discutido anteriormente, isto poderia contribuir para a adesão de resíduos do fluxo à superfície do cordão de solda.

Houve uma tendência de aumento no valor de IL com o aumento da quantidade de componentes usados na elaboração dos fluxos. Os cordões de solda obtidos com fluxos que contém três componentes apresentaram em média valores mais elevados de IL do que os obtidos com dois componentes. E, os maiores valores de IL foram obtidos para os cordões de solda em que foram aplicados fluxos que continham em comum AlF₃-CaF₂ em sua formulação. Este resultado deve-se ao fato de que a superfície destes cordões de solda foi caracterizada pela formação de uma escória de tonalidade cinza claro responsável pelo aumento de IL. A adição do fluxo ZnCl₂-acetona em

substituição à acetona pura proporcionou acréscimos nos valores de IL em alguns cordões de solda. Porém, devido ao excesso de resíduos de fluxo ou de escória na superfície dos mesmos, o resultado final foi considerado pior ao obtido com a aplicação do fluxo ZnCl_2 -acetona.

Os cordões de solda obtidos com fluxos compostos baseados em diagramas de fase binários e ternários (Figura 6.17) assemelharam-se aos da figura 6.16, ou seja, também apresentaram uma certa quantidade de resíduos de fluxo ou escória aderidos em sua superfície. Dentre estes cordões de solda, o que apresentou o valor de IL mais elevado foi o obtido com o fluxo $\text{KCl-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Entretanto, este valor foi ainda 30% inferior ao obtido para o cordão de solda TIG-CA. Este cordão de solda e o obtido com o fluxo $\text{NaCl-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ apresentaram regiões com uma tonalidade cinza escuro indicando a presença de resíduos de fluxo aderidos em sua região central, os quais podem ser do componente SiO_2 ou dos cloretos que tendem a concentrar-se nesta região (Figura 6.1). A adição de alumina aos componentes CaO e V_2O_5 , baseada em seus respectivos diagramas binários, não permitiu a obtenção de cordões de solda com uma tonalidade mais clara que indicasse uma possível remoção da alumina, em relação aos cordões de solda obtidos com fluxos simples destes componentes (Figura 6.4) como era esperado. Os valores de IL foram iguais ou inferiores aos obtidos para estes. Observou-se a presença de porosidades na superfície dos cordões de solda obtidos com os fluxos $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$. Neste último a causa para o aparecimento das mesmas pode estar relacionada a criolita que foi obtida com a mistura dos fluoretos NaF e AlF_3 , pois na primeira etapa do trabalho foram observadas porosidades somente nos cordões de solda obtidos com alguns tipos de fluoretos. Estes resultados indicam que, nos casos estudados, não foi possível obter a remoção da camada de alumina com a formação de uma escória de baixo ponto de fusão aplicando-se fluxos compostos formulados a partir dos pontos eutéticos de diagramas de fase binários e ternários.

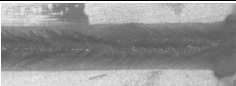
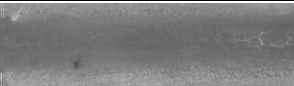
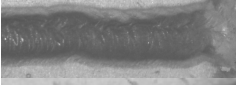
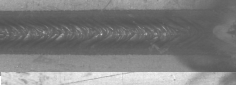
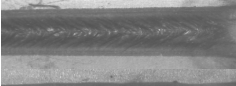
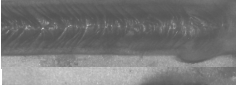
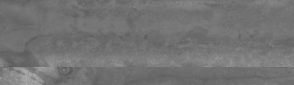
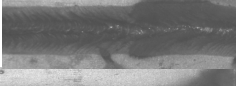
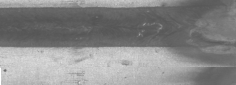
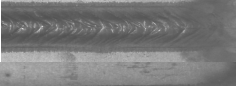
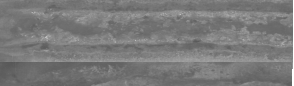
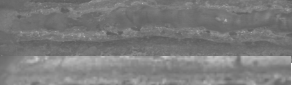
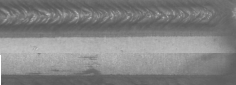
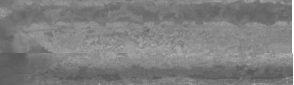
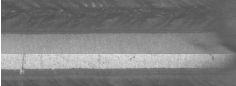
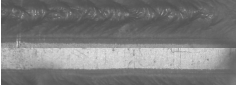
Fluxo	Tom de cinza	CORDÕES DE SOLDA		Tom de cinza	IL
		TIG-CC ⁻	ATIG-CC ⁻		
ZnCl ₂ -acetona	25±6			39±4	0,5
KCl-NaCl	27±6			38±7	0,4
KCl-AlF ₃	26±7			51±10	1,0
KCl-CaF ₂	26±7			44±14	0,7
NaCl-AlF ₃	25±8			46±9	0,8
NaCl-CaF ₂	28±10			45±11	0,7
AlF ₃ -CaF ₂	22±8			51±14	1,1
KCl- ZnCl ₂ -acetona	27±10			45±6	0,7
NaCl-ZnCl ₂ -acetona	25±11			40±6	0,6
KCl-NaCl-AlF ₃	25±6			53±11	1,1
KCl-NaCl-CaF ₂	30±14			62±14	1,2
KCl-AlF ₃ -CaF ₂	27±6			67±13	1,5
NaCl-AlF ₃ -CaF ₂	22±7			44±17	0,8
KCl-NaCl-ZnCl ₂ -acetona	27±9			42±10	0,6
KCl-NaCl-AlF ₃ -CaF ₂	28±7			51±12	0,9
KCl-NaCl-AlF ₃ -ZnCl ₂ -acetona	24±7			48±11	0,9
KCl-NaCl-AlF ₃ -CaF ₂ -ZnCl ₂ -acetona	27±8			54±12	1,0

Figura 6.16– Imagens, valores de tom de cinza e de IL dos cordões de solda obtidos com fluxo compostos.

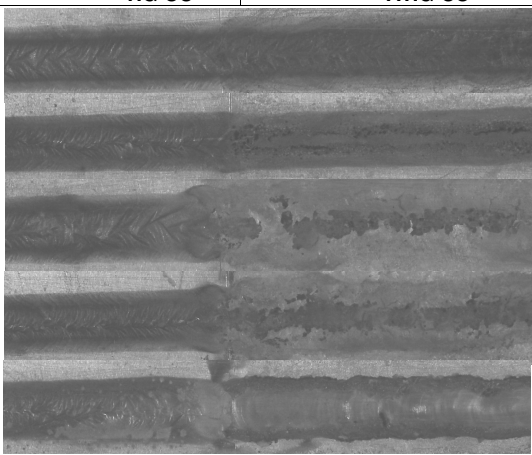
Fluxo	Tom de cinza	CORDÕES DE SOLDA		Tom de cinza	IL
		TIG-CC ⁻	ATIG-CC ⁻		
$V_2O_5-Al_2O_3$	28±10			24±6	-0,2
$CaO-Al_2O_3$	28±9			31±7	0,1
$KCl-SiO_2-Al_2O_3$	28±9			45±12	0,7
$NaCl-SiO_2-Al_2O_3$	28±10			40±11	0,5
$Na_3AlF_6-Al_2O_3$	28±10			43±9	0,6

Figura 6.17– Imagens, valores de tom de cinza e de IL dos cordões de solda obtidos com fluxos compostos baseados em diagramas de fase binários e ternários.

De forma geral, os valores de IL obtidos para os cordões de solda ATIG-CC⁻ com fluxos compostos foram em média mais elevados do que os obtidos na soldagem ATIG-CC⁻ com fluxos simples. Seis cordões de solda apresentaram valores de IL iguais ou superiores ao valor obtido para a soldagem com polaridade variável e onda retangular (IL=1). Entretanto, a análise visual destes cordões de solda mostrou que somente a obtenção de um valor elevado de IL é insuficiente para caracterizar a remoção da camada de alumina durante a soldagem ATIG-CC⁻ de alumínio com fluxos compostos, pois mesmo os cordões de solda com valores elevados de IL apresentaram resíduos de fluxo ou de escória aderidos em sua superfície. Assim, a determinação de IL deve ser associada às outras ferramentas propostas de caracterização destes resíduos de fluxo ou escória para estudar o efeito dos fluxos compostos na soldagem ATIG de alumínio (Figura 5.1b). Estas observações são válidas também para a soldagem ATIG de alumínio com fluxos simples e, não foram discutidas na etapa anterior, porque o maior valor de IL obtido foi igual a 0,5.

A figura 6.18 apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻[ZnCl₂-acetona] e dos cordões de solda ATIG-CC⁻, nos quais foram aplicados fluxos compostos de dois, três e quatro componentes. Os resultados da espectroscopia de energia dispersiva (EDS) nos pontos assinalados nestas imagens e da difração de raios-X (DRX) são mostrados nas figuras 6.19 a 6.23. No cordão de solda ATIG-CC⁻[ZnCl₂-acetona] foram observados somente resíduos de zinco metálico aderidos na superfície deste cordão de solda (Figura 6.19). Apesar deste resultado, acredita-se que além de zinco metálico, pode também ter sido formado um composto intermetálico do tipo AlZnOCl₂, produto da reação de dissolução da alumina pelo cloreto de zinco, a qual justifica o uso deste componente na composição de fluxos para soldagem (WIKIPEDIA, 2004). Não foram detectados picos de difração de raios-X indicando a presença de ZnO e de AlCl₃, que seriam os produtos da reação entre o cloreto de zinco e a alumina prevista na figura 6.13. Isto é razoável, pois a energia livre padrão (ΔG°) calculada para esta reação é positiva e, portanto, a mesma não ocorre no intervalo de temperatura considerado. Também não foram encontrados resíduos de ZnCl₂, o qual apresenta um difratograma de raios-X muito diferente do obtido para o zinco (APÊNDICE C).

Nos demais cordões de solda ATIG-CC⁻ com fluxos compostos encontraram-se somente picos relativos ao alumínio ou, além destes, de oxifluoretos de alumínio (0,9Al0,7O1,3F) e/ou do componente AlF₃. Estas observações permitem concluir que, após o uso de fluxos para soldagem ATIG contendo cloretos como componente, podem ser ou não encontrados resíduos na superfície do cordão de solda. Como exemplo da primeira situação pode ser citado o caso do ZnCl₂, descrito acima, e da segunda os componentes NaCl e KCl em que não foram encontrados resíduos de sódio e potássio na superfície dos cordões de solda. Por outro lado, deve-se ressaltar também que parte ou a totalidade dos componentes dos fluxos ou de escória podem ter sido retirados ou dissolvidos durante o processo de lavagem dos corpos de prova após a soldagem.

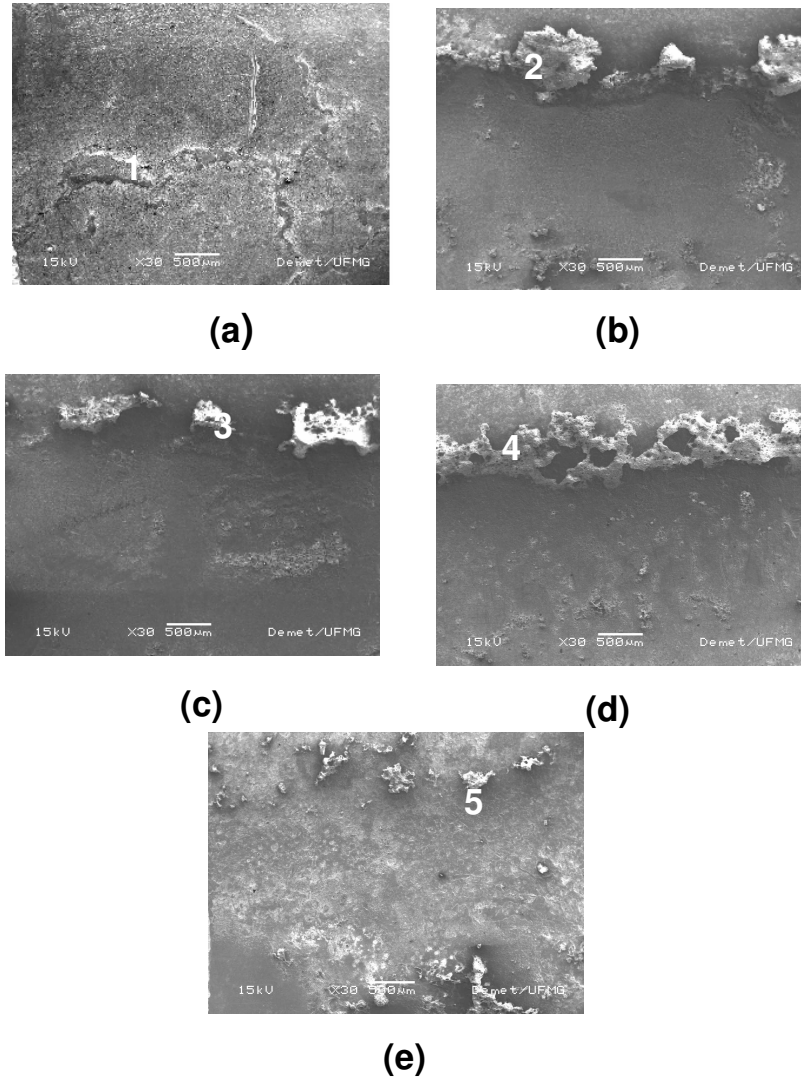


Figura 6.18 – Imagens de MEV dos cordões de solda ATIG-CC.

(a) ZnCl_2 -acetona (b) KCl-AlF_3 (c) NaCl-AlF_3 (d) KCl-NaCl-AlF_3

(e) $\text{KCl-NaCl-CaF}_2\text{-AlF}_3$ Ampliação: 30x.

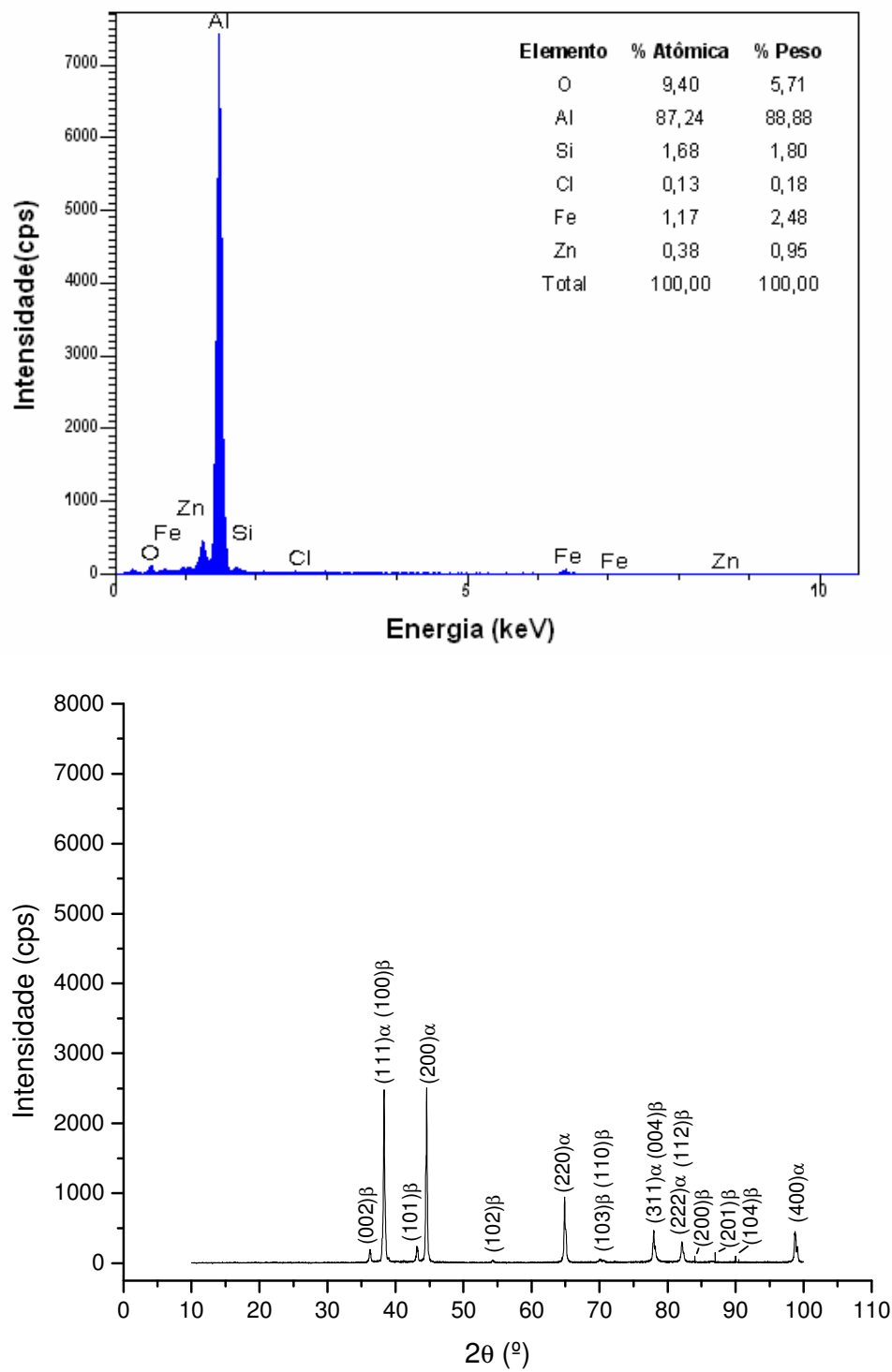


Figura 6.19 – Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC [ZnCl₂-acetona]. α : Al; β : Zn.

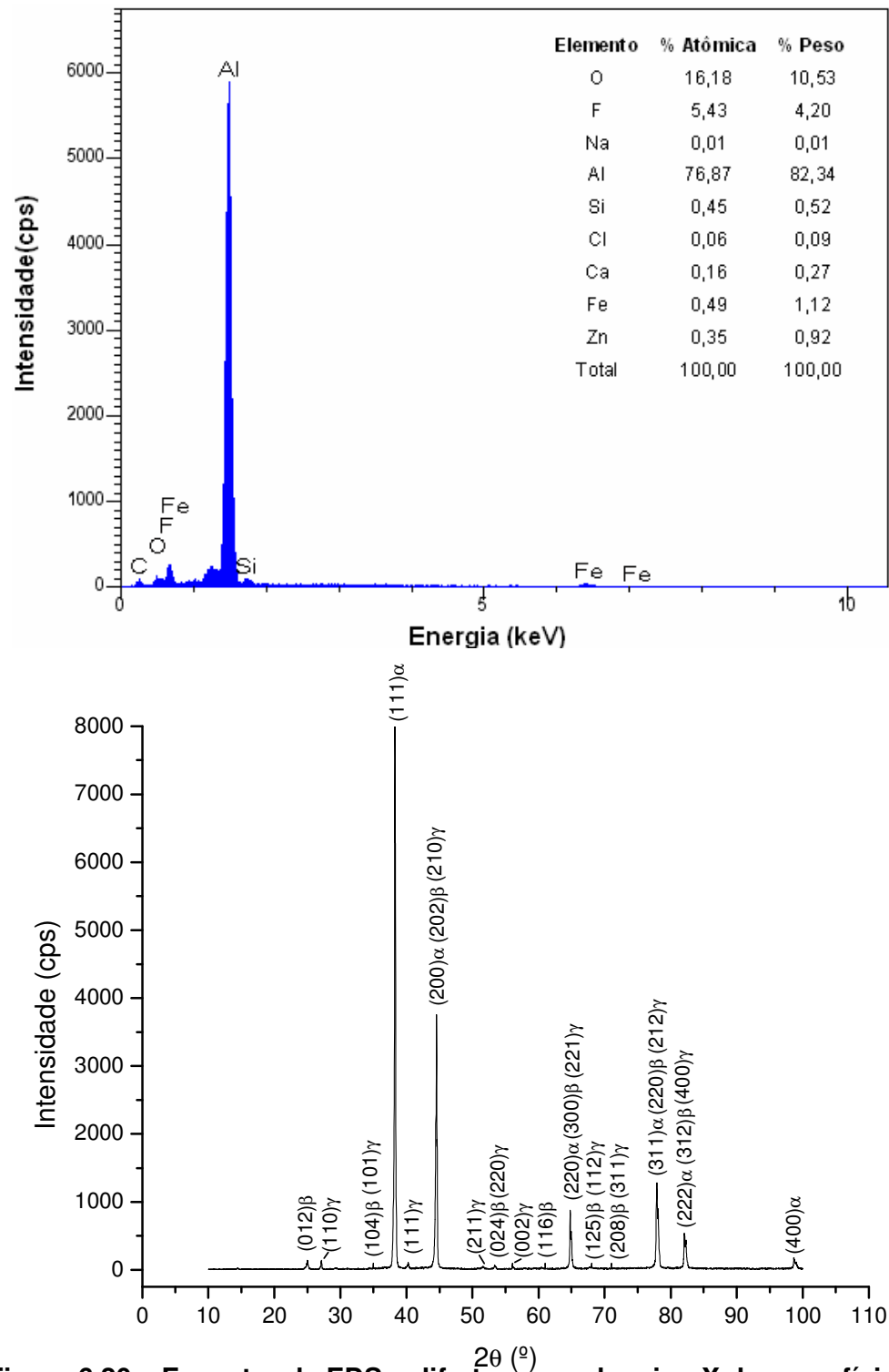


Figura 6.20 – Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC [KCl-AlF₃]. α : Al; β : AlF₃; γ : 0,9Al_{0,7}O_{1,3}F.

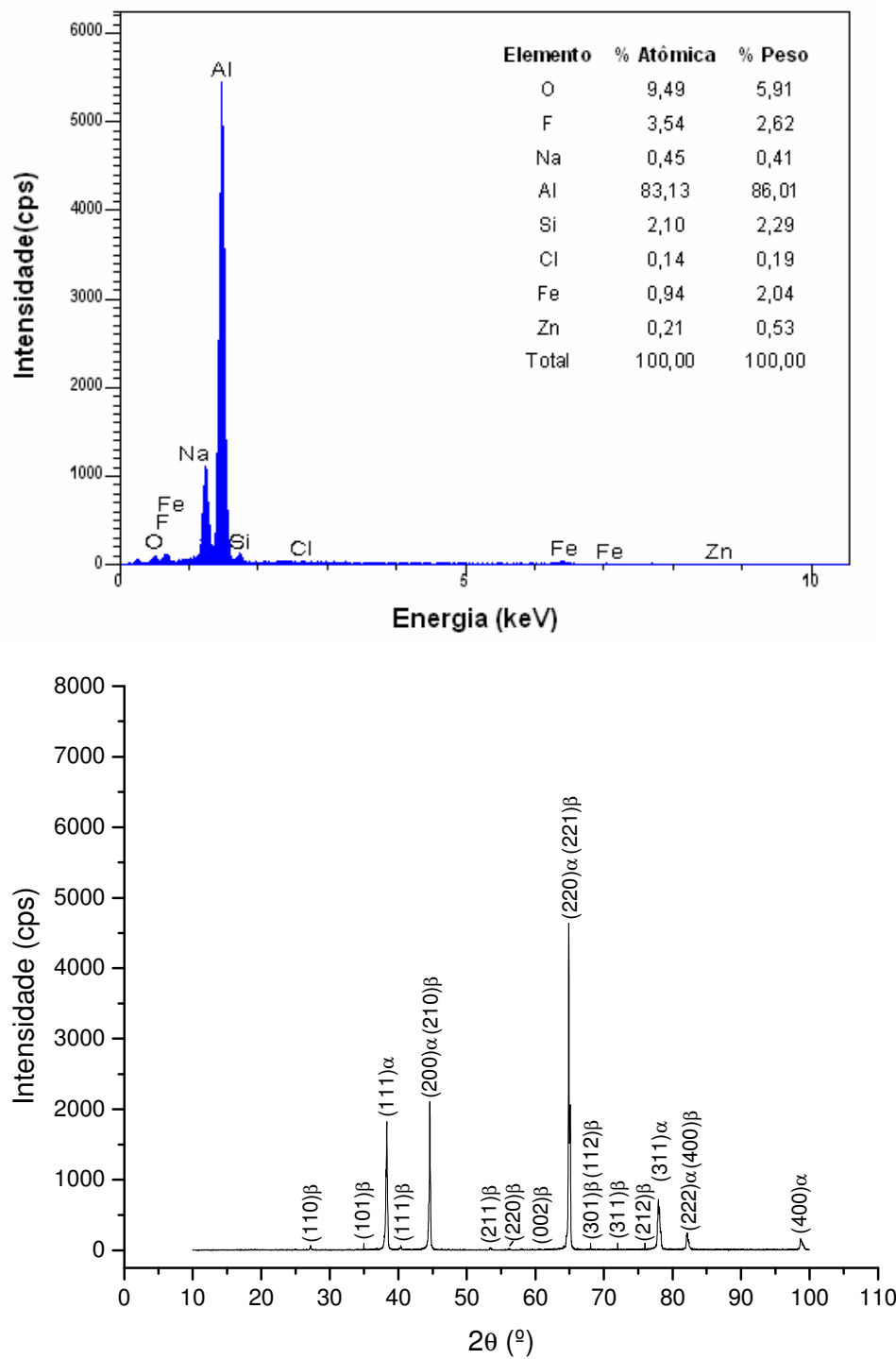


Figura 6.21 – Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC [NaCl-AlF₃]. α : Al; β : 0,9Al_{0,7}O_{1,3}F.

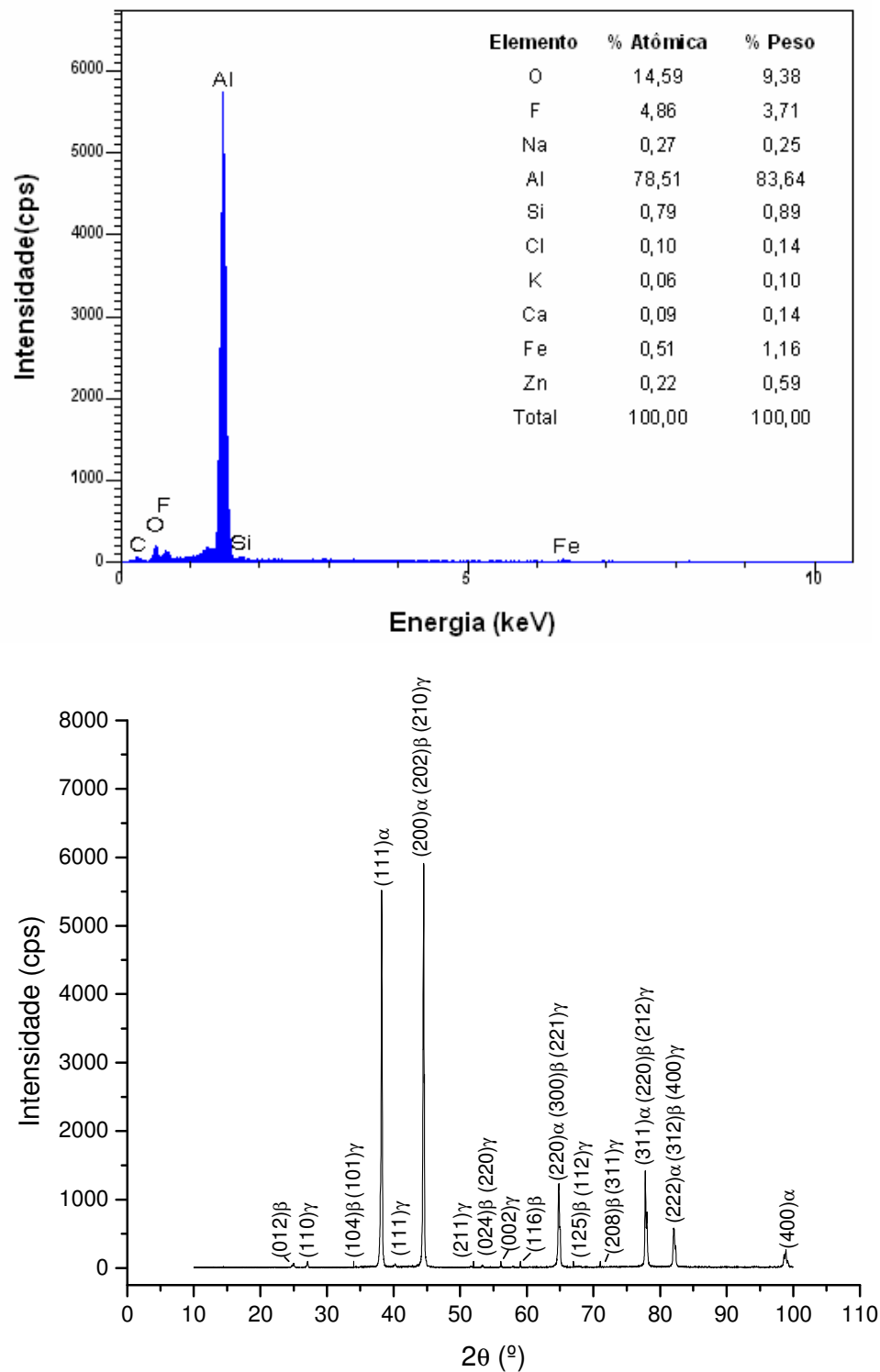


Figura 6.22 – Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC [KCl-NaCl-AlF₃].

α : Al; β : AlF₃; γ : 0,9Al0,7O1,3F.

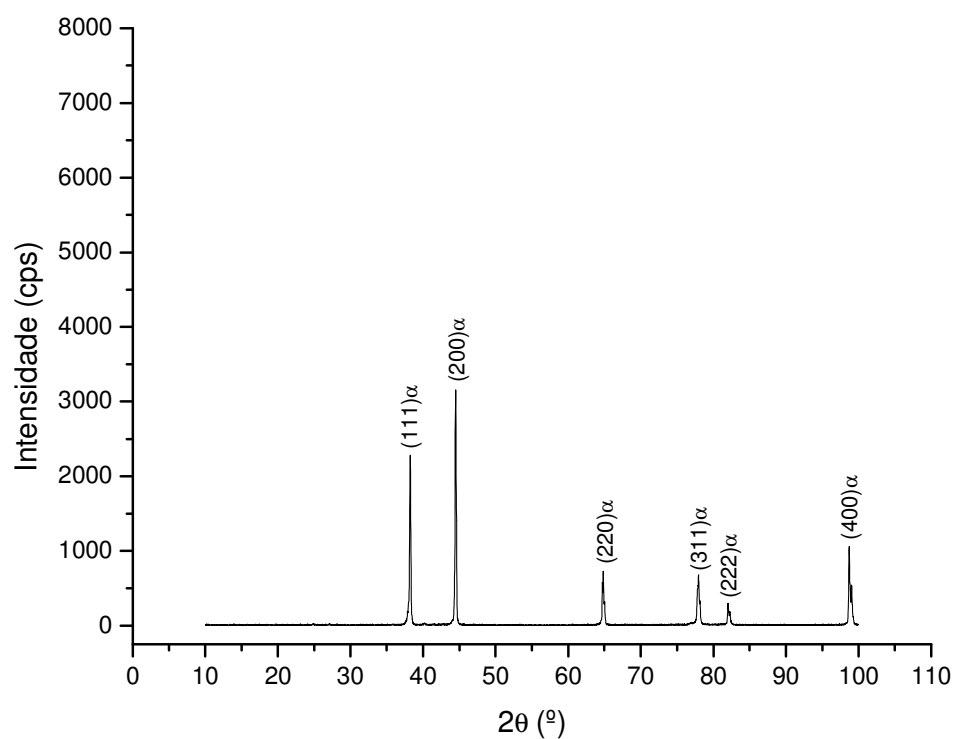
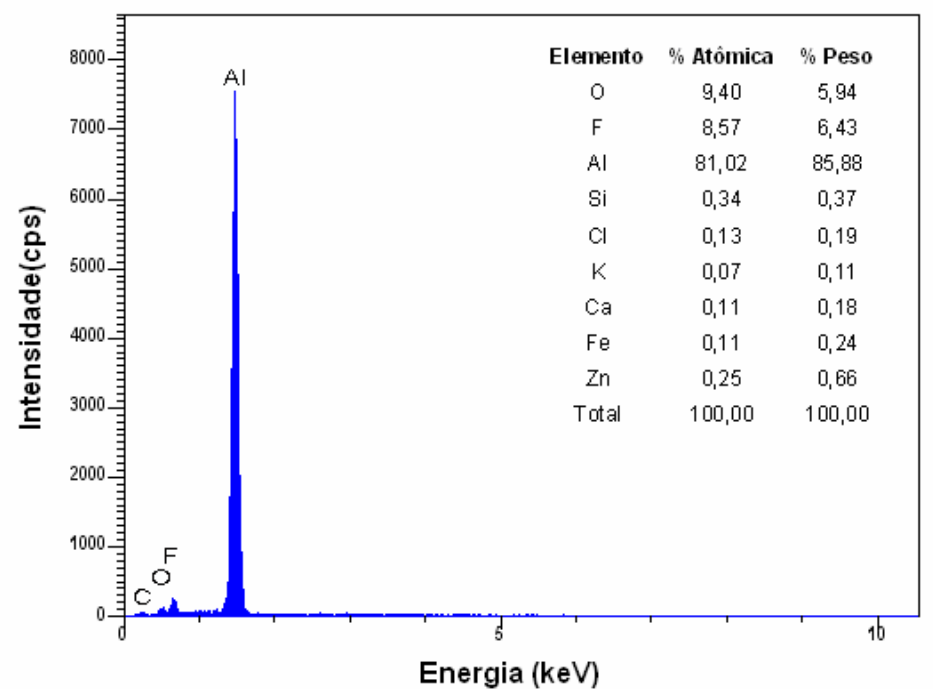


Figura 6.23– Espectro de EDS e difratograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC [KCl-NaCl-CaF₂-AlF₃].α : Al.

Das discussões apresentadas até o momento, relativas aos resultados obtidos nas etapas de seleção de fluxos simples e compostos, concluiu-se que o fluxo mais efetivo na remoção da camada de alumina durante a soldagem ATIG-CC⁻ do alumínio foi o fluxo simples ZnCl₂-acetona. Este fluxo, apesar de ter apresentado um valor de IL 50% inferior ao obtido para o cordão de solda TIG-CA para alguns fluxos compostos, foi o que apresentou uma menor quantidade de resíduos aderidos à sua superfície atribuída ao seu ponto de fusão inferior ao do alumínio e de ebulição imediatamente superior ao do mesmo, além de uma maior facilidade de aplicação devido à sua solubilidade em acetona. Conforme previsto na metodologia, os resultados que serão apresentados nas etapas subseqüentes deste estudo, referir-se-ão à soldagem ATIG usando apenas este fluxo.

6.4 Influência do acabamento superficial na soldagem ATIG-CC⁻

A figura 6.24 mostra em um gráfico os resultados das medições de rugosidade superficial para as diferentes condições de acabamento dos corpos de prova. Um acabamento mais fino foi obtido com o lixamento manual e com a decapagem e um acabamento mais grosseiro com a escovação mecânica.

Na figura 6.25 observa-se que a variação no acabamento superficial dos corpos de prova não proporcionou uma melhora significativa no efeito do fluxo ZnCl₂-acetona, pois o aspecto da superfície dos cordões de solda ATIG-CC⁻ é praticamente o mesmo observado na condição natural. O menor valor de IL foi obtido para o cordão de solda do corpo de prova de maior rugosidade superficial e o maior valor de IL para um dos que apresentou menor rugosidade superficial. Apesar de difícil observação visual confirmada pelo pequeno acréscimo no valor de IL, esta relação é válida considerando-se que um acabamento mais fino permite uma melhor distribuição do fluxo na superfície do corpo de prova, o que intensificaria o seu efeito.

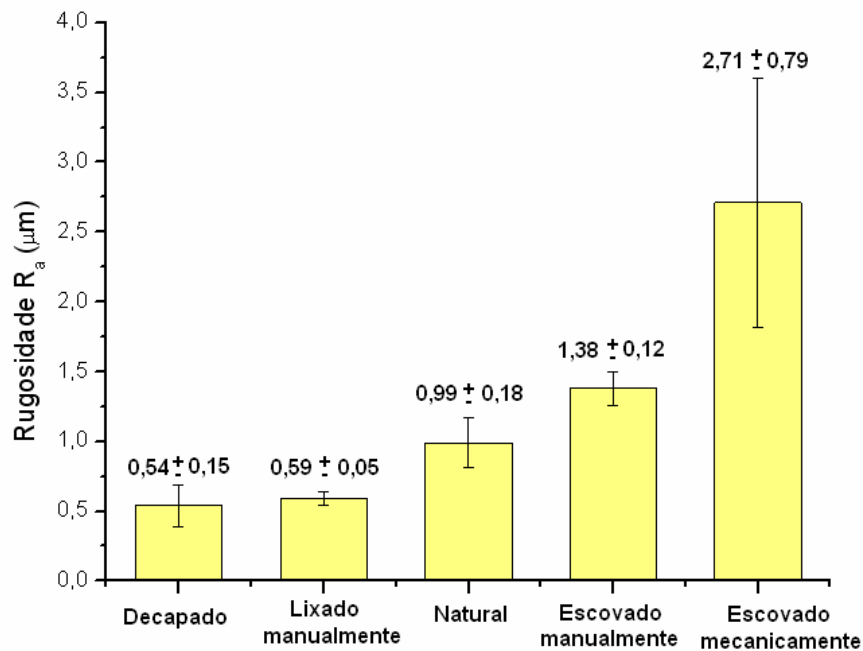


Figura 6.24 – Rugosidade superficial dos corpos de prova.

Acabamento	Tom de cinza	CORDÕES DE SOLDA		Tom de cinza	IL
		TIG-CC ⁻	ATIG-CC ⁻		
Natural	25±6			39±4	0,5
Lixado manualmente	27±4			42±5	0,6
Escovado manualmente	27±7			40±6	0,5
Escovado mecanicamente	28±8			36±5	0,3
Decapado	28±6			38±4	0,4

Figura 6.25 - Imagens, valores de tom de cinza e de IL dos cordões de solda ATIG-CC⁻ com o fluxo ZnCl₂-acetona para diferentes condições de acabamento superficial.

Nos corpos de prova, escovado mecanicamente e decapado, obteve-se uma redução do valor de IL em relação ao corpo de prova soldado na condição natural. Entretanto, deve-se considerar que estas alterações nos valores de IL podem ter sido influenciadas pelas variações de acabamento obtidas com o lixamento, a escovação e a decapagem da superfície do metal base. Após estas operações, a nova interface fluxo-metal base pode exercer alguma influência no efeito do fluxo e conseqüentemente na tonalidade da superfície do cordão de solda ATIG-CC⁻, devido ao aumento ou redução da área de contato entre a camada de fluxo e a alumina, por exemplo. Em relação ao cordão de solda TIG-CC⁻, parece que sua tonalidade não foi afetada, pois os valores de tom de cinza não variaram significativamente em relação ao valor de tom de cinza obtido para o cordão de solda TIG-CC⁻ do corpo de prova com acabamento natural.

6.5 Influência dos parâmetros de soldagem ATIG-CC⁻

A figura 6.26 mostra as imagens, os valores de tom de cinza e de IL para os cordões de solda obtidos com parâmetros de soldagem diferentes. Conforme descrito na metodologia, os números que aparecem na identificação dos corpos de prova após as letras I, V e C referem-se, respectivamente, aos valores de corrente (A), velocidade de soldagem (cm/min) e comprimento de arco multiplicado por dez (mm).

A análise visual mostrou que a maioria dos cordões de solda ATIG-CC⁻ tiveram aspecto e regularidade similares aos obtidos com os parâmetros de soldagem inicialmente adotados (I150V20C30), com a sua rugosidade tendendo a aumentar com o aumento da corrente e da velocidade de soldagem. Em relação ao cordão de solda TIG-CA, a variação nos parâmetros de soldagem não proporcionou uma melhora significativa na tonalidade dos cordões de solda.

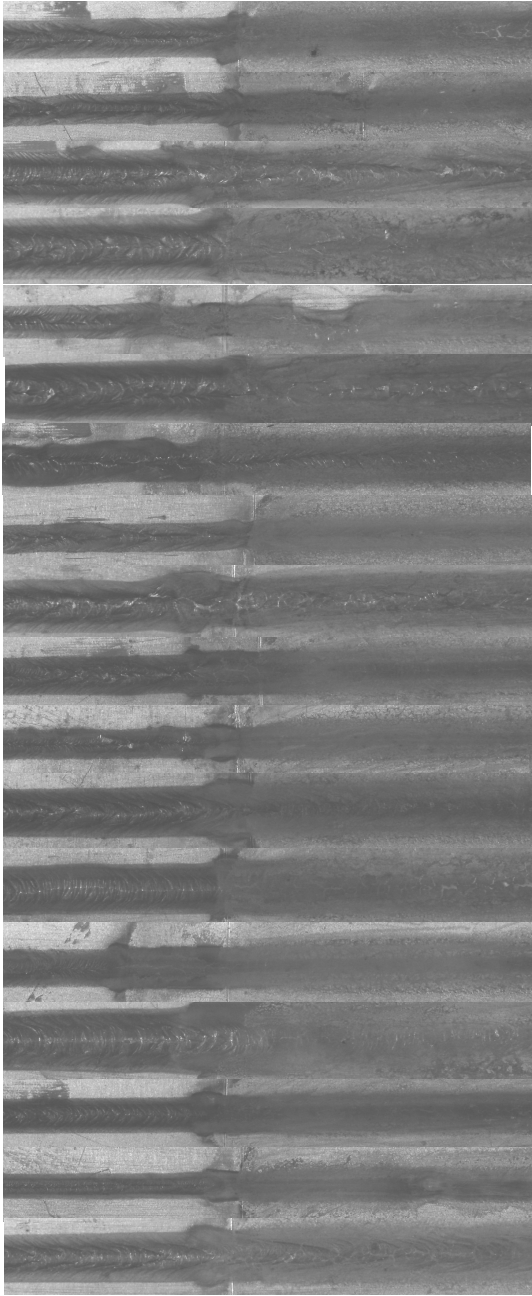
Identificação	Tom de cinza	CORDÕES DE SOLDA		Tom de cinza	IL
		TIG-CC	ATIG-CC		
I150V20C30	25±6			39±4	0,5
I120V20C30	27±10			37±5	0,4
I170V20C30	22±10			37±8	0,6
I150V15C30	22±9			37±6	0,6
I120V15C30	27±12			40±5	0,5
I170V15C30	20±9			32±6	0,5
I150V25C30	20±7			32±5	0,5
I120V25C30	28±8			43±4	0,6
I170V25C30	28±13			38±6	0,4
I150V20C15	20±7			38±6	0,7
I120V20C15	21±7			39±5	0,7
I170V20C15	20±9			34±5	0,5
I150V15C15	24±8			37±6	0,5
I120V15C15	23±5			41±5	0,7
I170V15C15	26±10			47±7	0,8
I150V25C15	20±8			35±5	0,6
I120V25C15	21±6			36±6	0,6
I170V25C15	22±9			38±5	0,6

Figura 6.26 - Imagens, valores de tom de cinza e de IL para os cordões de solda obtidos com parâmetros de soldagem variados.

Apesar de ter-se mostrado como uma ferramenta ineficiente na caracterização do efeito de fluxos compostos, o índice IL foi novamente adotado, porque os seus valores calculados nas imagens dos cordões de solda obtidos com o mesmo fluxo parecem indicar bem as variações de tom de cinza que, neste caso, poderiam ser associadas a uma maior efetividade na remoção da camada de alumina. Assim, nesta etapa o maior valor de IL foi encontrado para o cordão de solda I170V15C15, obtido com a maior corrente, menor velocidade e menor comprimento de arco.

O gráfico da figura 6.27 mostra que a tonalidade dos cordões de solda parece ser afetada pelo comprimento de arco e pela velocidade de soldagem, que apresentaram maiores variações nos valores médios nominais de IL para os diferentes parâmetros de soldagem. Este resultado indica que existem condições específicas de soldagem em que o efeito do fluxo ZnCl_2 -acetona é mais acentuado, as quais seriam um menor comprimento de arco e uma menor velocidade de soldagem.

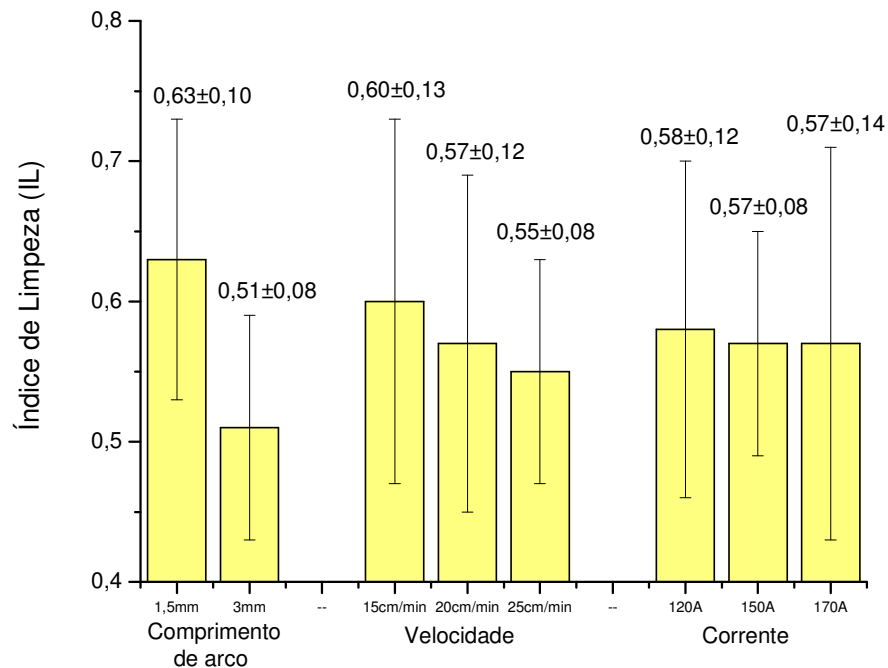


Figura 6.27 – Valores médios de IL para os diferentes parâmetros de soldagem.

Os valores de IL da maioria dos cordões de solda obtidos com o menor comprimento de arco (1,5mm) foram maiores dos que os valores de IL dos cordões de solda obtidos com o maior comprimento de arco (3mm) para os mesmos valores de corrente, velocidade de soldagem e quantidade de fluxo aplicada. Um menor comprimento de arco favorece uma maior concentração deste na junta soldada e resulta em uma redução na tensão de soldagem e na largura do cordão. Assim, uma possível explicação para a limpeza mais eficiente observada na soldagem com menor comprimento do arco, poderia ser a maior concentração do arco, resultando em maiores gradientes térmicos que minimizariam a tendência do fluxo aderir à superfície da solda.

6.6 Influência dos parâmetros de soldagem ATIG-CA

A figura 6.28 apresenta as imagens, os valores de tom de cinza dos cordões de solda TIG-CA, ATIG-CA e de Δ Tom de cinza, que representa a diferença de tonalidade entre eles. Nesta seção não se utilizou o índice de limpeza (IL), pois este, como definido, só é aplicável para quantificar o efeito de limpeza na soldagem ATIG-CC em relação à soldagem TIG-CA.

A avaliação com a lupa estereoscópica mostrou que a metade final dos cordões de solda (ATIG-CA) apresentou um melhor acabamento em sua região central, caracterizado pela ausência de escamas, em relação à metade inicial dos cordões de solda obtida na soldagem TIG-CA sem fluxo. Esta melhoria no acabamento deve-se a uma maior estabilidade do arco elétrico observada durante a soldagem, quando o mesmo atingiu a camada de fluxo e a uma maior capacidade de fundir o metal base obtida com a aplicação do fluxo ZnCl₂-acetona que será mencionada na seção 6.7. Entretanto, os cordões de solda ATIG-CA apresentaram uma coloração mais escura em relação aos cordões de solda TIG-CA, confirmada pelos valores negativos das variações de tom de cinza (Δ Tom de cinza), em função da presença de resíduos de fluxo aderidos na área central e em maior quantidade nas laterais destes cordões de solda. Esta última característica pode ser melhor observada no corpo de prova CP15-50.

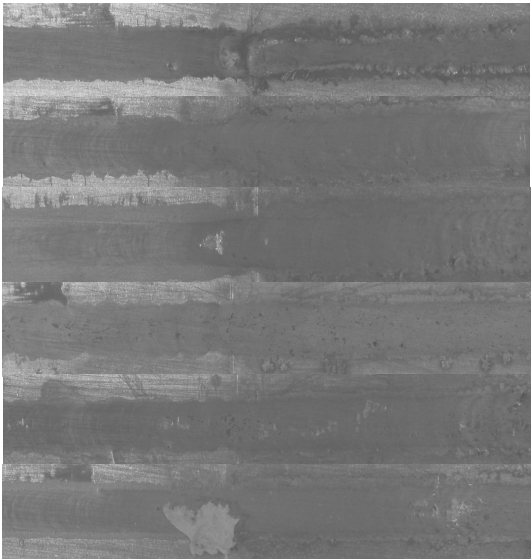
Identificação	Tom de cinza	CORDÕES DE SOLDA		Tom de cinza	Δ Tom de cinza
		TIG-CA	ATIG-CA		
CP15-50	53 $\pm$ 6			39 $\pm$ 6	-14
CP15-40	61 $\pm$ 6			47 $\pm$ 5	-14
CP15-30	61 $\pm$ 7			46 $\pm$ 5	-15
CP10-50	64 $\pm$ 6			53 $\pm$ 4	-11
CP10-40	54 $\pm$ 4			44 $\pm$ 4	-10
CP10-30	57 $\pm$ 5			46 $\pm$ 6	-11

Figura 6.28 – Imagens, valores de tom de cinza e de Δ Tom de cinza dos cordões de solda TIG-CA e ATIG-CA.

A aplicação do fluxo ZnCl_2 -acetona na soldagem ATIG-CA mostrou-se vantajosa em função do melhor acabamento e da possibilidade de se trabalhar com menores tempos de operação do eletrodo no ciclo positivo aumentando a vida útil do mesmo. Porém, a aplicação deste processo de soldagem deve ser melhor estudada devido à necessidade de remoção dos resíduos de fluxo pós-soldagem através de lixamento, escovação ou de uma limpeza com esponja e detergente para se obter uma coloração mais clara da superfície do cordão de solda. Outro dado que deve ser considerado neste estudo seria uma avaliação das características geométricas do cordão de solda ATIG-CA em relação à soldagem TIG-CA, a qual é caracterizada por baixos níveis de penetração do cordão de solda.

6.7 Efeito do metal de base na soldagem ATIG-CC⁻

A figura 6.29 apresenta as imagens, os valores de tom de cinza e de IL dos cordões de solda TIG-CA e ATIG-CC⁻[ZnCl₂-acetona] em corpos de prova de alumínio-magnésio (Al-Mg).

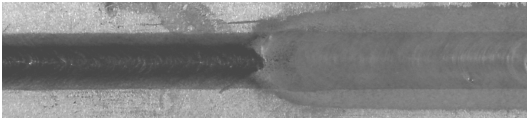
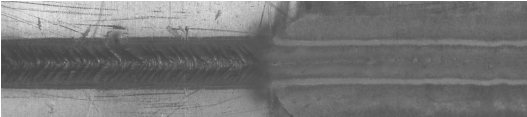
Tom de cinza		CORDÕES DE SOLDA (Al-Mg)		Tom de cinza	IL
		TIG-CC ⁻	TIG-CA		
TIG-CA	23±6			54±6	1,2
		TIG-CC ⁻	ATIG- CC ⁻		
ZnCl ₂ -acetona	27±8			43±4	0,6

Figura 6.29 - Imagens, valores de tom de cinza e de IL dos cordões de solda TIG-CA e ATIG-CC⁻[ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg.

A largura do cordão de solda TIG-CC⁻ em Al-Mg foi cerca de 2 a 3mm maior que do cordão de solda obtido no corpo de prova de alumínio para os mesmos parâmetros de soldagem adotados. Observou-se também que o cordão de solda TIG-CA em Al-Mg apresenta uma tonalidade cinza mais clara em sua região central, confirmada pelo maior valor de IL, calculado adotando-se os mesmos valores das constantes P_{CA} e P_{TIG} do alumínio (equação 5.1). Este procedimento foi considerado válido, desde que o objetivo era a comparação entre as diferenças de tonalidade entre os cordões de solda dos dois materiais. Todas estas diferenças de aspecto e de tonalidade citadas podem estar associadas ao efeito do metal base no processo de soldagem TIG, particularmente pela presença do magnésio na composição química do segundo material (Tabela IV.3). As alterações na largura do cordão de solda podem ser atribuídas à menor condutividade térmica do Al-Mg ($117 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) em relação a do alumínio puro ($210 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), que proporciona um uso mais

eficiente do calor do arco. E, os mecanismos que levaram a obtenção de uma tonalidade de cinza mais clara, possivelmente, podem estar associados a mudanças na natureza do óxido superficial.

Apesar do valor de IL do cordão de solda ATIG-CC⁻ em Al-Mg ser também 50% inferior ao valor obtido na soldagem TIG-CA, valor igual ao obtido para o cordão de solda ATIG-CC⁻ em alumínio, o primeiro apresenta duas regiões bem definidas, uma área central com tonalidade cinza claro e laterais de tonalidade cinza ainda mais clara com aproximadamente 1mm de largura (Figura 6.30). Nestas áreas laterais o índice IL calculado para uma área qualquer foi igual a 1,3, maior do que o valor de IL obtido para o cordão de solda TIG-CA. Uma justificativa para a ocorrência destas duas regiões distintas seria o fato de que o centro do cordão de solda apresenta temperaturas em média mais elevadas do que as laterais do mesmo. Nestas, ocorreria apenas uma volatilização dos componentes do fluxo causando este efeito, semelhante ao observado por Rangel *et al.* (2005) que estudaram a junta soldada em chapas zincadas de aço baixo-carbono.

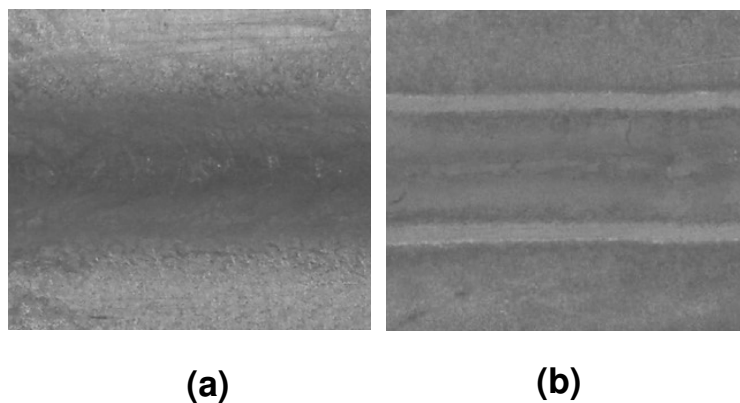
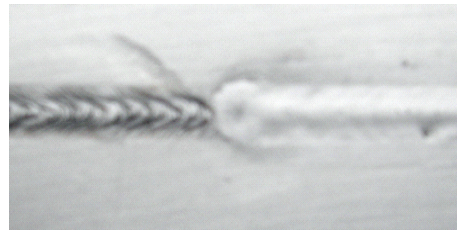


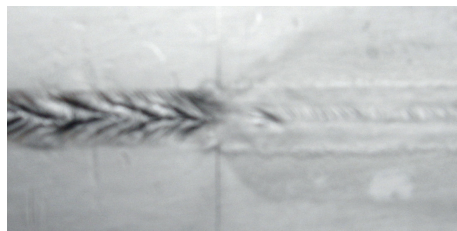
Figura 6.30 – Imagens dos cordões de solda ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona].

(a) Al (b) Al-Mg. Ampliação: 3x.

A figura 6.31 mostra que os resíduos na superfície do cordão de solda ATIG-CC[ZnCl₂-acetona] em Al e em Al-Mg podem ser facilmente removidos, com uma limpeza após soldagem usando uma esponja macia e detergente, tornando o seu aspecto bastante semelhante à superfície do cordão de solda TIG-CA.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.31 – Imagens da superfície dos cordões de solda após limpeza.

**(a) TIG-CC / TIG-CA (b) TIG-CC / ATIG-CC [ZnCl₂-acetona] em Al
(c) TIG-CC / ATIG-CC [ZnCl₂-acetona] em Al-Mg. Ampliação: 1,5x.**

A figura 6.32 mostra espectros de EDS obtidos nas duas regiões do cordão de solda ATIG-CC[ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg e a figura 6.33, o difratograma de raios-X da superfície deste cordão de solda. O difratograma de raios-X indicou somente a presença das mesmas fases (alumínio e zinco) encontradas no cordão de solda ATIG-CC[ZnCl₂-acetona] em alumínio. E, as mesmas observações feitas em relação à figura 6.19 são válidas aqui.

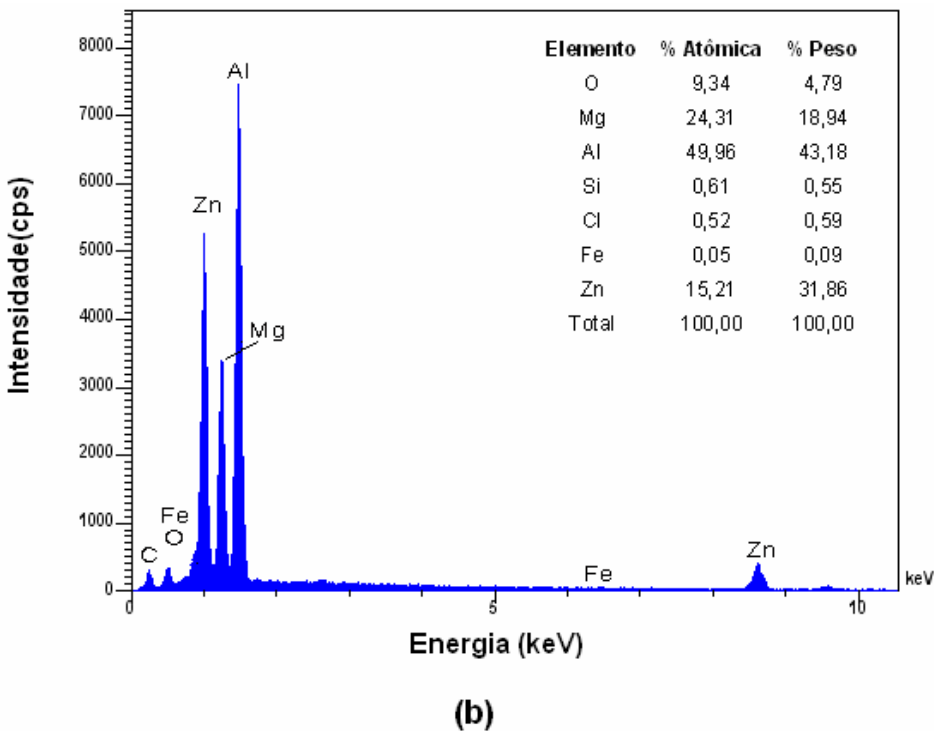
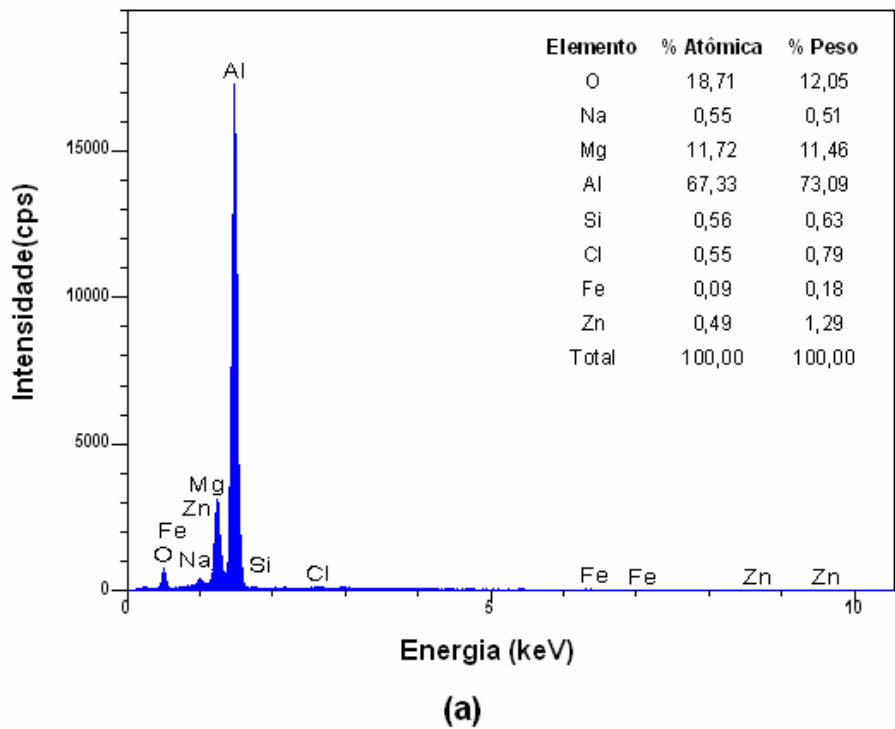


Figura 6.32 – Espectros de energia dispersiva (EDS) do cordão de solda ATIG-CC[ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg. (a) Área central. (b) Área lateral.

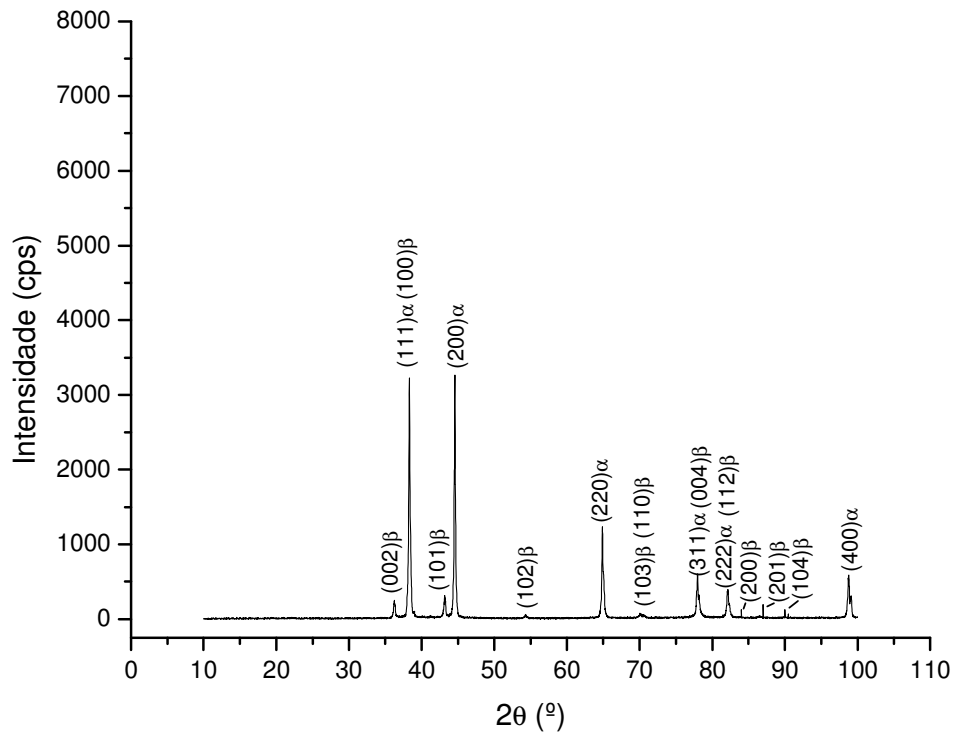


Figura 6.33 – Difratoograma de raios-X da superfície do cordão de solda ATIG-CC[ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg. α : Al; β : Zn.

Nas áreas laterais, detectou-se um percentual em peso de zinco cerca de vinte e cinco vezes superior ao da região central do cordão de solda. Este resultado também pode ser atribuído a mudanças na intensidade e no sentido do movimento das correntes de metal líquido na poça de fusão (Efeito Marangoni). As imagens de MEV da superfície da lateral do cordão de solda ATIG-CC[ZnCl₂-acetona] do corpo de prova de Al-Mg mostram as partículas de zinco dispersas na superfície do cordão de solda (Figura 6.34).

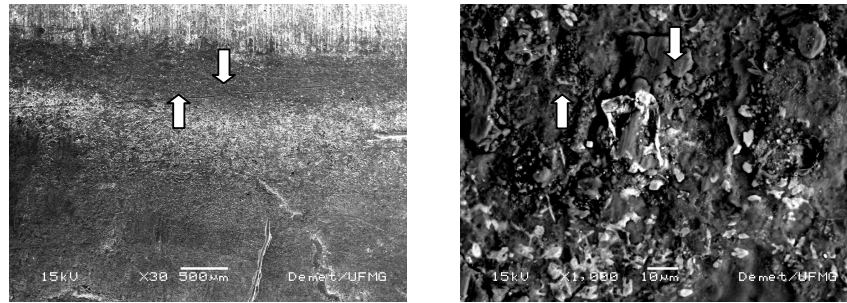


Figura 6.34– Imagens de MEV da lateral do cordão de solda ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona] em um corpo de prova de Al-Mg. As setas indicam as partículas de zinco dispersas em sua superfície. Ampliação: 30x (esquerda); Ampliação: 1000x (direita).

A figura 6.35 mostra as macrografias e os valores médios de largura, penetração e área de fusão das seções transversais (Figura 5.12) dos cordões de solda TIG-CA, TIG-CC⁻ e ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-Acetona] em corpos de prova de alumínio e Al-Mg. A Figura 6.36 mostra em um gráfico, para os mesmos cordões, os valores da razão entre a largura e a penetração do cordão e da sua área de fusão. Os resultados mostram um forte aumento na penetração e na área de fusão quando se compara a soldagem TIG com corrente alternada com a soldagem com eletrodo negativo. Este é um efeito conhecido e associado com variações na quantidade e concentração da energia fornecida pelo arco à junta (MARQUES *et al.* 2005). Observa-se, ainda, na soldagem TIG com eletrodo negativo, que o metal base parece não exercer um efeito significativo no formato do cordão. Por outro lado, os resultados sugerem que o uso do fluxo (ATIG) favorece o aumento principalmente da penetração e da área de fusão do cordão, e que, na soldagem ATIG, este efeito é maior para a liga Al-Mg. Os efeitos diferentes do metal base na soldagem TIG e ATIG, devem estar associados com alguma interação entre o fluxo e a poça de fusão (efeito Marangoni, por exemplo) ou entre este e o arco (variações de estabilidade ou no formato do arco). Estes aspectos não foram investigados no presente trabalho.

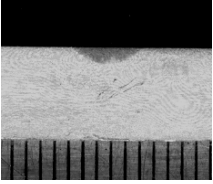
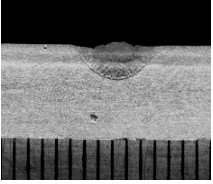
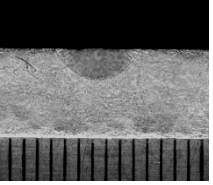
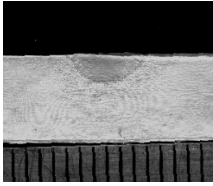
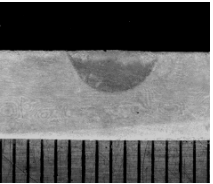
Cordão de solda	Macrografia	Seção	Largura (mm)	Penetração (mm)	Área (mm ²)
TIG-CA (Al)		Média	4,82	1,09	3,24
		Desvio Padrão	0,18	0,05	0,26
TIG-CC ⁻ (Al)		Média	6,52	2,57	10,36
		Desvio Padrão	0,41	0,23	2,34
ATIG-CC ⁻ (Al)		Média	6,73	2,75	12,90
		Desvio Padrão	0,86	0,72	5,02
TIG-CC ⁻ (Al-Mg)		Média	6,00	2,51	9,96
		Desvio Padrão	0,40	0,26	1,68
ATIG-CC ⁻ (Al-Mg)		Média	6,82	3,52	16,97
		Desvio Padrão	0,10	0,41	2,29

Figura 6.35 – Resultados de macrografia dos cordões de solda TIG-CC⁻ e ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-acetona] em alumínio (Al) e alumínio-magnésio (Al-Mg).

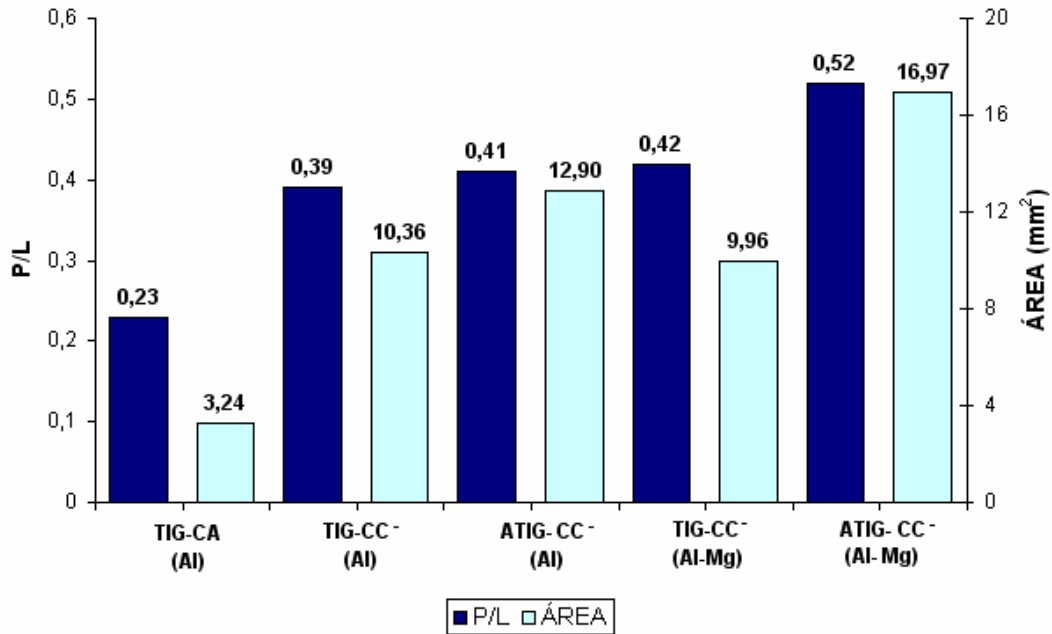


Figura 6.36 – Parâmetros geométricos dos cordões de solda TIG-CC⁻ e ATIG-CC⁻ [ZnCl₂-Acetona] em alumínio (Al) e alumínio magnésio (Al-Mg).

6.8 Considerações finais

A aplicação do fluxo simples de ZnCl₂-acetona na soldagem do alumínio pode trazer uma série de vantagens, dentre as quais a principal foi a possibilidade de se soldar alumínio usando uma configuração usualmente não adotada para este tipo de material (corrente contínua e eletrodo negativo) mas que é a usual na soldagem da maioria das outras ligas metálicas. Esta configuração apresenta uma maior estabilidade e uma maior capacidade de fundir o metal base, aumentando ainda a vida útil do eletrodo. Além disto, dispensa o uso de um ignitor de alta frequência, o qual é prejudicial para equipamentos eletrônicos localizados próximo à área de soldagem, ou de fontes de energia mais sofisticadas, necessárias para a soldagem com a chamada onda retangular.

Outras vantagens que podem ser citadas são:

- O uso de um processo soldagem que consiste em uma simples variante do processo TIG sem a necessidade de realização de grandes investimentos, pois a aplicação do fluxo pode ser realizada com um pincel sem a necessidade de aquisição de acessórios ou equipamentos mais sofisticados.
- A remoção da camada de alumina com consequente melhoria do acabamento superficial do cordão de solda deixando uma pequena quantidade de resíduos em sua superfície, associada ao aumento em sua capacidade de penetração e de sua área de fusão;
- A sua perspectiva de uso também na soldagem ATIG-CA do alumínio reduzindo os tempos em que o eletrodo opera no ciclo positivo aumentando sua vida útil, com a melhoria no acabamento do cordão de solda e a maior estabilidade do arco elétrico durante a soldagem;

Entretanto, em relação à soldagem ATIG-CA o processo apresenta algumas desvantagens:

- A aquisição de ZnCl_2 anidro e acetona para a preparação do fluxo, que apesar da quantidade necessária destes insumos para se obter o efeito desejado ser da ordem de miligramas, isto eleva o custo final do processo.
- A necessidade de preparação, aplicação do fluxo e da remoção de seus resíduos após a soldagem, o que se traduz em alguma perda de produtividade;
- A geração de fumos tóxicos durante a soldagem, que implica necessidade de uma maior proteção do soldador, a qual pode ser

realizada com o uso de equipamentos de segurança adequados e exaustores, desde que sejam respeitados os limites mínimos estabelecidos de exposição diária a estes fumos que são da ordem de 2mg.m^{-3} (CETESB, 2005).

Em relação à metodologia adotada, segue abaixo alguns comentários visando o seu aprimoramento para aplicação em trabalhos futuros:

- Na preparação e aplicação dos fluxos compostos, em que foi adotada a técnica desenvolvida no LabSEND, admite-se que melhores resultados possam ser obtidos com uma melhor homogeneização da mistura dos componentes. Sugere-se que, ao invés de uma mistura a seco sobre a superfície do corpo de prova, as partes dos componentes sejam adicionadas em um béquer e misturados e/ou agitados juntamente com a acetona.
- O índice de limpeza (IL) desenvolvido na metodologia de análise de imagem mostrou-se insuficiente para a caracterização da ação de limpeza promovida pelo fluxo nos cordões de solda ATIG-CC⁺. Os valores calculados de IL foram úteis apenas para indicar as variações de tonalidade entre os cordões de solda, entretanto, os valores mais elevados deste índice, não puderam ser associados a uma remoção mais efetiva da camada de alumina conforme sua proposta inicial. Portanto, recomenda-se a sua reformulação ou não utilização para este fim em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos e com base nas discussões feitas, pôde-se estabelecer as seguintes conclusões:

- A soldagem do alumínio pode ser realizada com corrente contínua e eletrodo negativo, a qual apresenta vantagens em relação à soldagem TIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular (TIG-CA) ou com corrente contínua e eletrodo positivo (TIG-CC⁺), configurações usualmente adotadas para este tipo de material, através do processo de soldagem ATIG aplicando-se com um pincel uma camada fina de fluxo ZnCl₂-acetona, elaborado com a diluição de cloreto de zinco anidro em acetona;
- Dentre todos os fluxos avaliados neste trabalho, o mais efetivo na remoção da camada de alumina durante a soldagem ATIG-CC⁻ do alumínio foi o fluxo simples ZnCl₂-acetona. O cordão de solda obtido com este fluxo, apesar de ter apresentado uma tonalidade inferior ao do cordão de solda TIG-CA foi o que apresentou o melhor acabamento superficial e apenas uma pequena quantidade de resíduos aderidos à sua superfície. Acredita-se que o mecanismo responsável foi a dissolução da alumina pelos componentes do fluxo durante a soldagem;
- Mudanças na intensidade e no sentido do movimento das correntes de metal líquido na poça de fusão devido à presença de elementos tensoativos (Efeito Marangoni) ou diferenças entre as propriedades físicas dos componentes de fluxo e o metal, particularmente, os seus pontos de fusão podem ser responsáveis pela tendência de contaminação por resíduos de fluxo ou de escória na região central e/ou lateral na superfície dos cordões de solda.

- Os cloretos mostraram-se mais efetivos na remoção da camada de alumina durante a soldagem ATIG com corrente contínua de alumínio do que fluoretos e óxidos. Os cordões de solda obtidos com fluxos a base de cloretos apresentaram uma menor quantidade de resíduos com tonalidade cinza clara remanescente na superfície dos cordões de solda e uma menor contaminação do cordão de solda pelo fluxo.
- O mecanismo de limpeza atuante no processo de soldagem ATIG com corrente contínua difere do mecanismo obtido na soldagem TIG-CA. No primeiro caso o mecanismo responsável é uma interação química entre o fluxo e a camada de alumina e, no segundo, a limpeza catódica, que consiste na remoção da camada de óxidos superficiais pela ação do arco elétrico quando o eletrodo é positivo;
- A tensão de soldagem não pode ser usada para caracterizar o efeito de fluxos na soldagem ATIG com corrente contínua de alumínio. Apesar da obtenção de variações significativas entre os valores medidos na tensão de soldagem ATIG-CC⁻ em relação à soldagem TIG com corrente contínua, observou-se a presença de resíduos de fluxo ou de escória na superfície dos cordões de solda;
- A variação no acabamento superficial dos corpos de prova não proporcionou uma melhora significativa no efeito do fluxo ZnCl₂-acetona durante a soldagem ATIG com corrente contínua;
- A variação nos parâmetros de soldagem não proporcionou um aumento significativo na tonalidade dos cordões de solda obtidos na soldagem ATIG com corrente contínua aplicando-se o fluxo ZnCl₂-acetona. Entretanto, observou-se que o efeito do fluxo é afetado pelas variações do comprimento de arco e pela velocidade de soldagem;

- A aplicação do fluxo ZnCl_2 -acetona na soldagem ATIG-CA mostrou-se vantajosa, pois além da obtenção de um melhor acabamento existe a possibilidade de se trabalhar com menores tempos de operação do eletrodo no ciclo positivo aumentando a vida útil do mesmo. Porém, a aplicação deste processo de soldagem deverá ser melhor estudada devido à necessidade de remoção dos resíduos de fluxo pós-soldagem para melhorar a tonalidade do cordão de solda;
- O uso do fluxo ZnCl_2 -acetona favoreceu o aumento principalmente da penetração e da área de fusão do cordão de solda na soldagem ATIG de alumínio e, este efeito, foi maior para a liga Al-Mg. Os efeitos diferentes do metal base na soldagem TIG e ATIG, devem estar associados com alguma interação entre o fluxo e a poça de fusão ou entre este e o arco elétrico.

CAPÍTULO 8

CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS E RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados desta pesquisa foi possível enumerar as seguintes contribuições originais:

- Otimização da soldagem do alumínio e da liga Al-Mg com corrente contínua e eletrodo negativo através do processo de soldagem ATIG aplicando-se o fluxo simples ZnCl_2 -acetona, obtendo-se um melhor acabamento do cordão de solda além de ganhos de penetração e da área de fusão;
- Constatação de que variações no acabamento superficial dos corpos de prova não influenciam significativamente o efeito do fluxo e que este pode ser aplicado apenas com uma limpeza da superfície do corpo de prova com acetona;
- Constatação de que o efeito do fluxo é afetado por variações do comprimento de arco e da velocidade de soldagem;
- Caracterização dos resíduos de fluxo e de escória presentes na superfície dos cordões de solda ATIG;
- Desenvolvimento de uma metodologia de análise de imagem com potencial para detectar mudanças relativas de tonalidade das superfícies dos cordões;
- Caracterização da soldagem ATIG com polaridade variável do eletrodo e onda retangular.

CAPÍTULO 9

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos acredita-se que alguns aspectos deveriam ser mais bem explorados para a complementação deste trabalho:

- Avaliar a influência da densidade superficial no efeito do fluxo ZnCl_2 -acetona;
- Estudar possíveis alterações no formato do arco elétrico através de filmagem do mesmo durante a soldagem ATIG com o fluxo ZnCl_2 -acetona;
- Analisar a influência da soldagem ATIG com o fluxo ZnCl_2 -acetona na microestrutura, nas propriedades e no desempenho do cordão de solda;
- Variar de forma mais significativa os parâmetros de soldagem ATIG com polaridade do eletrodo variável e onda retangular para uma melhor caracterização;
- Estudar o efeito de fluxos compostos obtidos a partir da mistura de ZnCl_2 -acetona a outros componentes tensoativos com maior capacidade de aumento na penetração do cordão de solda;
- Correlacionar o efeito de limpeza com a regularidade superficial do cordão de solda através de macrografias;
- Avaliar o efeito do fluxo ZnCl_2 -acetona em outras ligas de alumínio e em outros materiais.

CAPÍTULO 10**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALCAN. **Manual de soldagem**. São Paulo, 1993.133p.

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Aluminium: properties and physical metallurgy**. Metals Park. U.S.A: ASM, 1984, 424p.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook: welding processes**. 8. ed. Miami: AWS, 1991. v.2, 955p.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook: materials and applications**. 8. ed. Miami: AWS, 1998. v.4, 621p.

ANDERSON, P. C. J.; WIKTOROWICZ, R. **Improving productivity with ATIG welding**. Welding and Metal Fabrication, 1996, v. 64, n. 3, p. 108-109.

APOLINÁRIO, E. R. **Estudo da influência de fluxos no processo de soldagem TIG em aço inoxidável austenítico**. Belo Horizonte: EE-UFGM, 1998. Dissertação de mestrado. 71p.

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Compatibilidade do alumínio e suas ligas com alimentos e produtos químicos**. São Paulo: ABAL, 2003. Série Guia Técnico do Alumínio. v.7, 128p.

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Fundamentos do alumínio e suas aplicações**. São Paulo: ABAL, 2004. 81p.

CAMAPUM, J. F. **Segmentação de movimento em seqüências de imagens para codificação de vídeo**. Orlando: Conferência Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática, 2002. FL, USA : International Institute of Informaticson and Systemics, 2002. v. 2. p. 89-92.

CARVALHO, J. L. R.; ASSIS, P. S.; CAMILO, R. D.; FIGUEIRA, R. M.; CAMPOS, V. F. **Dados termodinâmicos para metalurgistas**. Belo Horizonte: Edições Engenharia, EE-UFMG, 1977. 392 p.

CASTRO, R. P. **Desenvolvimento e avaliação da soldagem ATIG em alumínio – parte 2**. Uberlândia: LAPROSOLDA/UFU, 2000. 10p.

CETESB. **Manual de produtos químicos perigosos**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/produtos/produto_consulta_completa.asp>. Acesso em: 21 mar. 2005.

CSANÁDY, A., TURMEZEY, T., IMRE-BAÁN, I., GRIGER, A., MARTON, D., FODOR, L., **The relationship between the corrosion resistance and impurity content of alumium oxide layers**. Corrosion Science, 1984. v. 24. n. 3, p. 237-248.

ESCARD, J. **L'Aluminium dans l'industrie: metal pour alliages d'aluminium**. 2. ed. Paris: Dunod, 1921. 418p.

FAN, D.; ZHANG, R.; GU Y.; USHIO M. **Effect of flux on ATIG welding of mild steels**. Trans. JWRI, 2001. v. 30, n. 1, p. 35-40.

FUERSCHBACH, P. W. **Cathodic cleaning and heat input in variable polarity plasma arc welding of aluminum**. Welding Journal, 1998. v. 77 n. 2, p. 76-85.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1996. 345 p.

GOMES, M. R. **Metais não ferrosos**. Belo Horizonte: EE-UFMG, 1966. p. irregular.

GONZALEZ, R. C.; WOODS. R. E. **Digital image processing**. Reading Mass.,1992. 716p.

GUILLE, A. E. **Arc-electrode phenomena**. Proceedings IEE, 1971. v.118, n. 9R, p. 1131-1154.

GUILLE, A. E.; JÜTTNER B. **Basic erosion processes of oxidized and clean metal cathodes by electric arcs**. IEEE Trans. Plasma Sci. v. PS-8, 1980, p. 259-269.

HEIPLE, C. R.; ROPER J. R. **Mechanism of minor element effect on GTA fusion zone geometry**. Miami: Welding Journal, 1982. v. 61 n. 4, p. 97-102.

HEIPLE, C. R., ROPER J. R. **The geometry of gas tungsten arc, gas metal arc, and submerged arc weld beads, welding: theory and practice**. Materials Processing, 1990. v. 8. n.1, p. 1-34.

ICDD, THE INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA - **PCPDFWIN**. Newtown Square, PA, U.S.A: ICDD, 2001. Version 2.2, 2001.

KAZAKOV, Y. V.; KORYAGIN, K. B.; POTEKHIN, V. P. **Effect of activating fluxes on penetration in welding steels thicker than 8mm**. Welding International, 1991. v. 5, n.3, p. 202-205.

KAZAKOV, Y. V., **Effect of activating fluxes on the structure of the welding arc in argon**. Svarochnoe Proizvodstvo, 1991. v. 4, p. 30-32.

LAMBERT, J. A. **Assesment of cast-to-cast variations on the quality of thin-section nickel alloy welded joints**. CEGB, Marchwood, 1989a.

LAMBERT, J. A. **Welding procedure selection to minimise cast-to cast variability**. CEGB, Marchwood, 1989b.

LEINONEN, J. I., KARJALAINEN. L. P. **Unexpected weld pool profiles in GTA welding with oxidizing shielding gas**. Finland: ASM, 1989. p. 387-390. In: S.A. David, J.M. Vitek (Eds), Recent Trends in Welding Science and Technology, Proceedings of the Second International Conference on Trends in Welding Research.

LEVIN, E. M.; ROBINS, C. R.; McMURDIE H. F. **Phase diagrams for ceramists**. The American Ceramic Society, Inc., Columbus, 1964, 286p.

LINNERT, G. E. **Welding metallurgy; fundamentals**. 4. ed. Miami: AWS, 1994. 950p.

LUCAS, W.; HOWSE, D. S. **Activating flux-Increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes**. Welding & Metal Fabrication, 1996. v.64 n.1, p. 11-17.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: EE-UFMG, 2005. 362p.

MATERIALS ENGINEERING (UK) LTD. **Welding of aluminium**. Disponível em: <<http://www.meg.co.uk/meg/app20.htm>>. Acesso em: 21 mai. 2004.

MECHEV, V.S. **Mechanism of contraction of the welding arc in the presence of electronegative particles**. Welding International, 1993. v. 7, p.154-156.

MILLS, K. C.; KEENE, B. J. **Factors affecting variable weld penetration**. International Materials Reviews, 1990. v. 35, n. 4, p.185-216.

MILLS, K. C.; KEENE, B. J.; BROOKS R. F; SHIRALI A. **Marangoni effects in welding**. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 1998. v. 356, p.911-925.

MODENESI, P. J.; APOLINÁRIO, E. R.; PEREIRA, I. M.; **TIG Welding with single-component fluxes**. Journal of Materials Processing Technology, 2000. v.99, p. 260-265.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico**. Belo Horizonte:EE-UFG, 2002. Apostila, 141p.

PASKELL, T.; LUNDIN, C.; CASTNER, H. **GTAW flux increases weld joint penetration**. Welding Journal, 1997. v. 76 n.4, p. 57-62.

PEREIRA, I. M. **Soldagem TIG com fluxos de aços inoxidáveis e de alumínio**. Belo Horizonte: EE-UFG, 2000. Iniciação Científica, 19p.

PERRY, N. **Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables**. Nantes: Universidade de Nantes, 2000. Tese de Doutorado, 244p.

PINTO, L. C. M. **Quantikov - Um analisador microestrutural para o ambiente Windows™**. São Paulo: USP, 1996. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Tese de Doutorado, 160p.

RANGEL A. F.; MATLAKHOVA, L. A.; PARANHOS, R. P. R.; MATLAKHOV A. N. **Avaliação de junta soldada pelo processo Mig-Brazing por meio de técnicas metalográficas**. Soldagem Insp., 2005. v. 10, n. 2, p. 48-53.

REIS, R. A.; SCOTTI, A. **Determinação de parâmetros da soldagem de alumínio com onda retangular**. Blumenau: XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1996, p. 619-630, 1996.

SIMONIK, A. G. **The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of electro-negative elements.** Welding Production, 1976. v. 3, p. 49-51.

SIRE S.; RUCKERT G.; MARYA S. **Flux optimisation for enhanced weld penetration in aluminium contribution to FBTIG process.** Le Soudage Dans Le Monde, 2002. v 46, p. 207-217.

SIRE S.; MARYA S. **On the selective silica application to improve welding performance of the tungsten arc process for a plain carbon steel and for aluminium.** C. R. Mechanique , 2002. v. 330, p. 83-89.

VIEIRA Jr, A. B. **Influência das condições superficiais do alumínio na estabilidade do arco em soldagem TIG.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1999. Dissertação de Mestrado, 103 p.

WIKIPEDIA, The free encyclopedia. **Zinc Chloride.** Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_chloride>. Acesso em: 2 dez. 2004.

ZAMKOV, V. N.; PRILUTSKII, V. P.; GUREVICH, S. M. **The effective ionization potential of the arc when titanium is welded by the semi-submerged arc process.** Avtomaticheskaya Svarka, 1977a. v.1, p.13-15.

ZAMKOV, V. N.; PRILUTSKII, V. P.; GUPREVICH, S. M. **The effects of the composition of the flux on the process of welding titanium with a non consumable electrode.** Avtomaticheskaya Svarka, 1977b. v.4, p.22-26.

APÊNDICE A – Composição química dos componentes usados na elaboração dos fluxos

Nome do componente	Fórmula molecular	Teor mínimo	Ferro (Fe)	Magnésio (Mg)	Potássio (K)	Sódio (Na)	Cálcio (Ca)	Cobre (Cu)	Bário (Ba)
Fluoreto de potássio	KF	99,0	0,001% máx			0,2% máx			
Fluoreto de Sódio	NaF	99,0	0,003% máx		0,02% máx				
Fluoreto de alumínio	AlF ₃	91,0	0,10 máx.			0,5 máx.			
Fluoreto de Cálcio	CaF ₂	96,0	0,03% máx						
Cloreto de Potássio	KCl	99,0	0,0003% máx.	0,003% máx		0,005% máx.	0,003% máx.		
Cloreto de sódio	NaCl	99,5	0,0001% máx.	0,001% máx.	0,005% máx.		0,002% máx.	0,0002% máx.	0,001% máx.
Cloreto de Alumínio	AlCl ₃	98,0	0,05% máx.						
Cloreto de Cálcio	CaCl ₂	96,0		1% máx.					
Cloreto de Bário	BaCl ₂	99,0	2ppm máx.		0,0025% máx.	0,005% máx.	0,05% máx.		
Cloreto de zinco	ZnCl ₂	97,0	0,001% máx.	0,01% máx.	0,02% máx.	0,005% máx.	0,001% máx.	0,001% máx.	
Sílica	SiO ₂	99,9	0,02% máx.						
Pentóxido de vanádio	V ₂ O ₅	99,5	0,02% máx.		0,02% máx.				
Óxido de cálcio	CaO	95,0	0,1% máx.						
Alumina	Al ₂ O ₃	99,9							

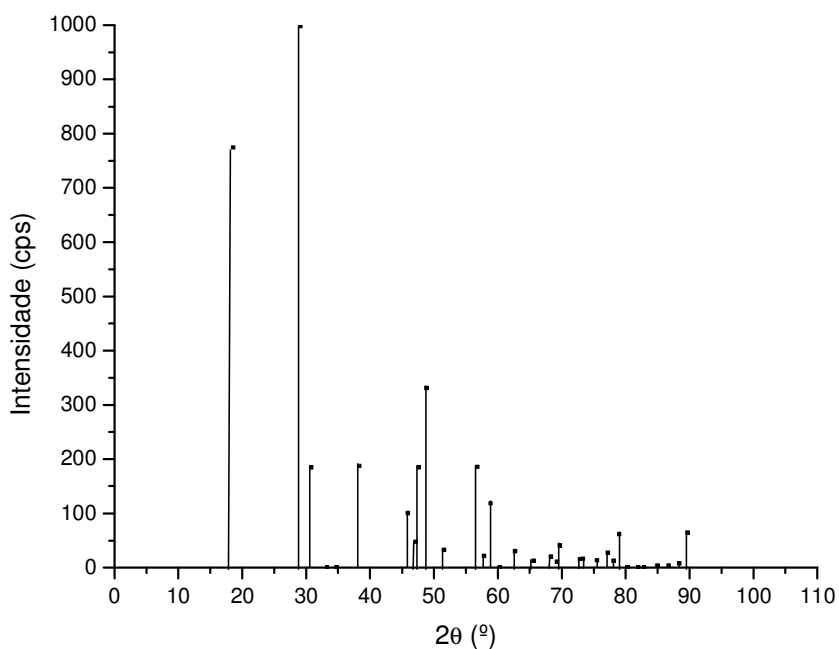
Nome do componente	Fórmula molecular	Mercúrio (Hg)	Chumbo (Pb)	Estrôncio (Sr)	Arsênio (As)	Nitrogênio (N)	Sulfatos (SO ₄)	Nitratos (NO ₃)	Fosfatos (PO ₄)
Fluoreto de Potássio	KF		0,001% máx				0,005% máx		
Fluoreto de Sódio	NaF		0,003% máx				0,03% máx		
Fluoreto de Alumínio	AlF ₃						0,5 máx		0,04 máx
Fluoreto de Cálcio	CaF ₂		0,01% máx		0,0005%		0,005% máx		
Cloreto de Potássio	KCl		0,0005% máx.			0,001% máx.	0,001% máx.	0,003% máx.	0,0005% máx.
Cloreto de sódio	NaCl	0,5 ppm máx.	0,0005% máx.		0,00004% máx.	0,0005% máx.	0,001% máx.	0,0015% máx.	0,0005% máx.
Cloreto de Alumínio	AlCl ₃		0,005% máx.				0,05% máx.		
Cloreto de Cálcio	CaCl ₂						1% máx.		
Cloreto de bário	BaCl ₂		5 ppm máx.	0,1% máx.				0,005% máx	
Cloreto de zinco	ZnCl ₂		0,005% máx.			0,002% máx.	0,01% máx.	0,003% máx.	
Sílica	SiO ₂						1,5% máx.		
Pentóxido de vanádio	V ₂ O ₅		0,02% máx.				0,05% máx.		
Óxido de cálcio	CaO		0,005% máx.				0,5% máx.		
Alumina	Al ₂ O ₃								

Nome do componente	Fórmula molecular	Cloretos	Brometos	Iodetos	Sulfito (SO ₃)	Hexacianoferrato [Fe(CN) ₆]	Fluorsilicatos	Materiais insolúveis
Fluoreto de Potássio	KF	0,005% máx					0,1% máx	
Fluoreto de Sódio	NaF	0,005% máx			0,005% máx		0,1% máx	0,02% máx
Fluoreto de Alumínio	AlF ₃							0,28 máx
Fluoreto de Cálcio	CaF ₂	0,1% máx						
Cloreto de Potássio	KCl			0,002% máx.				
Cloreto de Sódio	NaCl		0,005% máx.	0,001% máx.		0,0001% máx.		0,005% máx
Cloreto de Alumínio	AlCl ₃							
Cloreto de Cálcio	CaCl ₂							
Cloreto de Bário	BaCl ₂							0,005% máx.
Cloreto de Zinco	ZnCl ₂							0,005% máx.
Sílica	SiO ₂							0,1 máx.
Pentóxido de vanádio	V ₂ O ₅	0,02% máx.						
Óxido de cálcio	CaO	0,05% máx.						0,5% máx
Alumina	Al ₂ O ₃							0,1 máx.

APÊNDICE B - Características físico-químicas dos componentes usados na elaboração dos fluxos

Nome do componente	Fórmula molecular	Peso molecular g/mol	Densidade g/cm ³	Ponto de fusão (°C)	Ponto de ebulição (°C)
Fluoreto de potássio	KF	58,10	2,48	846	1505
Fluoreto de Sódio	NaF	41,99	2,56	993	1700
Fluoreto de alumínio	AlF ₃	83,98	2,91	1290	1400
Fluoreto de Cálcio	CaF ₂	78,07	3,18	1402	2500
Cloreto de potássio	KCl	74,56	1,99	776	1500
Cloreto de Sódio	NaCl	58,44	2,16	801	1465
Cloreto de alumínio	AlCl ₃	133,34	2,44	178	190
Cloreto de Cálcio	CaCl ₂	110,99	2,15	772	1600
Cloreto de Bário	BaCl ₂	208,23	3,86	962	1560
Cloreto de Zinco	ZnCl ₂	136,29	2,91	275	756
Sílica	SiO ₂	60,08	2,60	1650	2230
Pentóxido de vanádio	V ₂ O ₅	181,88	3,36	690	1750
Óxido de Cálcio	CaO	56,08	3,35	2.572	2850
Alumina	Al ₂ O ₃	101,96	3,97	2054	3000

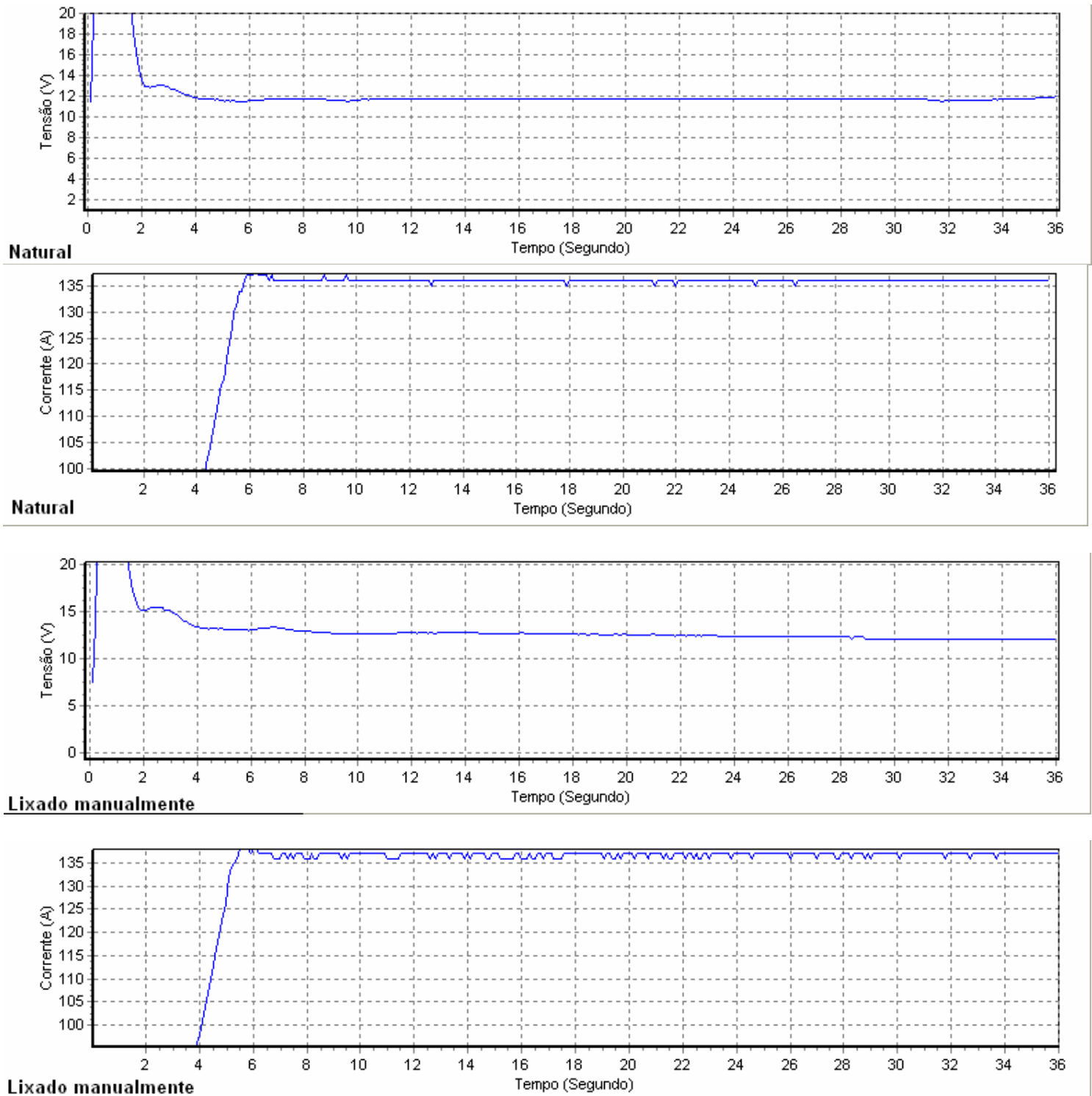
APÊNDICE C – Difratoograma de raios-X do cloreto de zinco

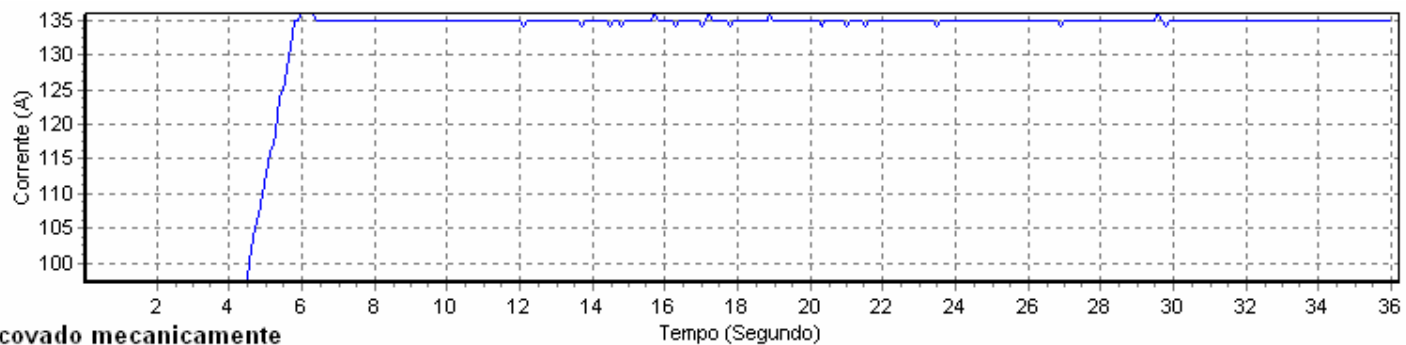
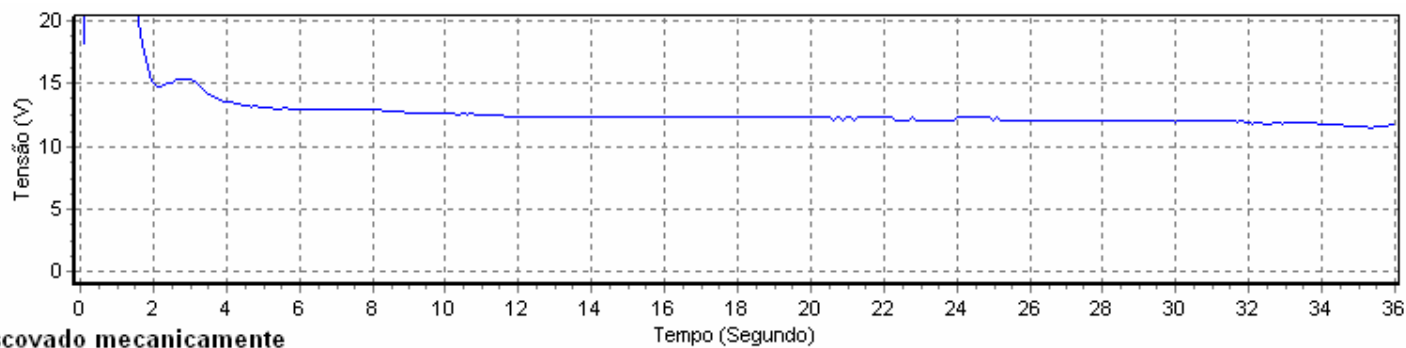
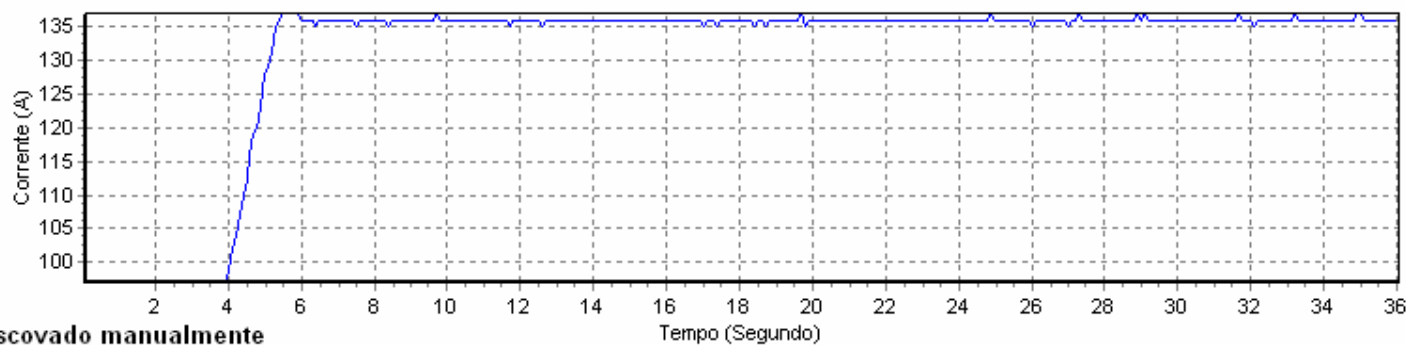
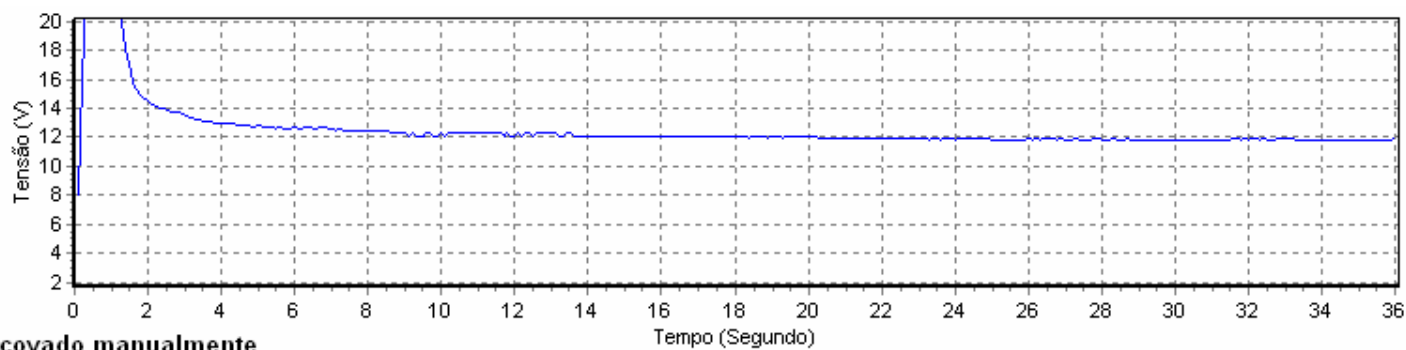


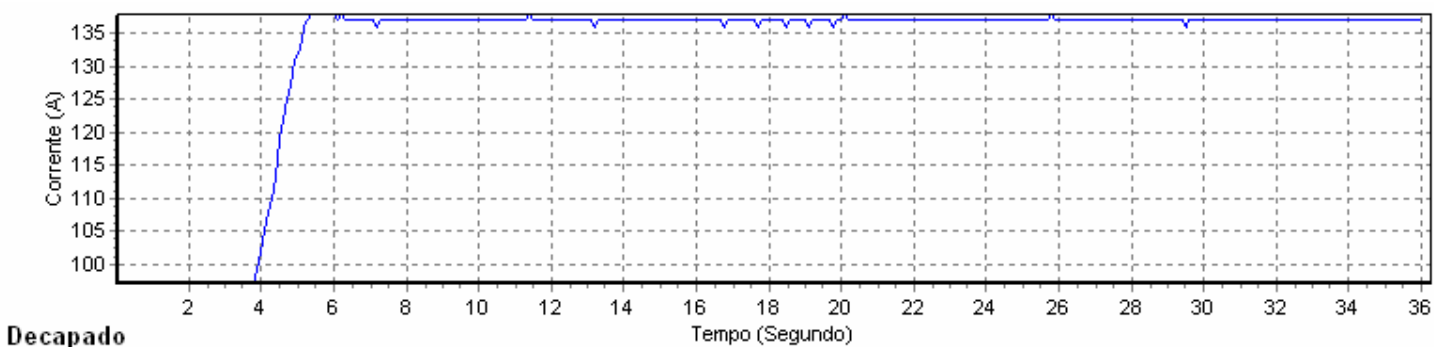
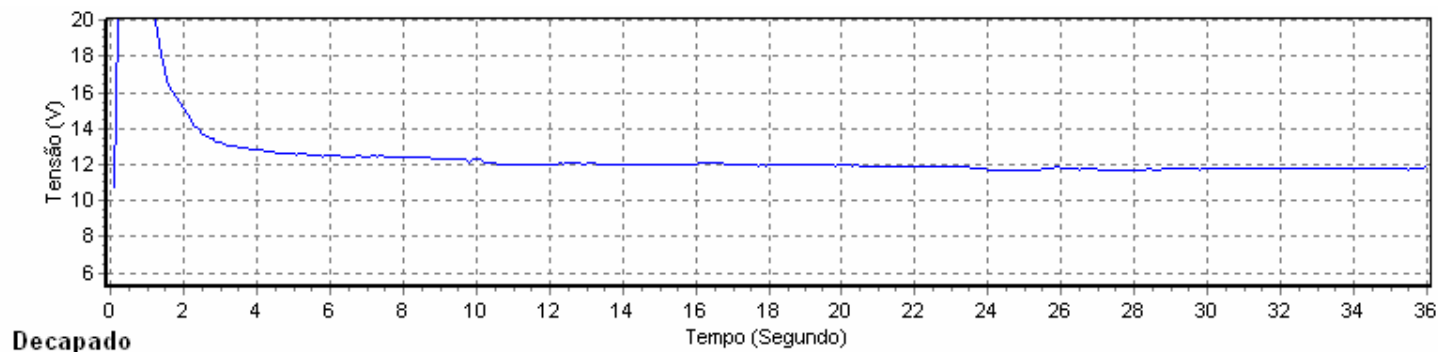
2θ (°)	Intensidade (cps)	h	k	l	2θ (°)	Intensidade (cps)	h	k	l
18,5	775	1	0	1	65,6		1	0	7
29,1	999	1	1	2	68,3	21	3	2	3
30,8	185	1	0	3	69,2	11	3	0	5
33,2	2	2	0	0	69,6	41	4	0	0
34,7	1	0	0	4	72,8	16	4	1	1
38,3	188	2	1	1	73,3	17	0	0	8
45,9	101	2	1	3	75,5	14	2	1	7
47,1	48	1	0	5	77,2	28	3	3	2
47,6	185	2	2	0	78,1	13	4	1	3
48,8	332	2	0	4	79,0	62	3	2	5
51,5	33	3	0	1	79,0		3	1	6
56,8	186	3	1	2	80,2	1	4	0	4
57,8	22	3	0	3	81,9	1	4	2	2
58,8	119	2	1	5	82,8	1	2	0	8
58,8		1	1	6	85,0	4	3	0	7
60,3	1	2	2	4	86,7	4	1	0	9
62,7	31	3	2	1	88,4	8	4	1	5
65,6	13	3	1	4	89,6	65	4	2	4

APÊNDICE D – Oscilogramas de tensão e corrente

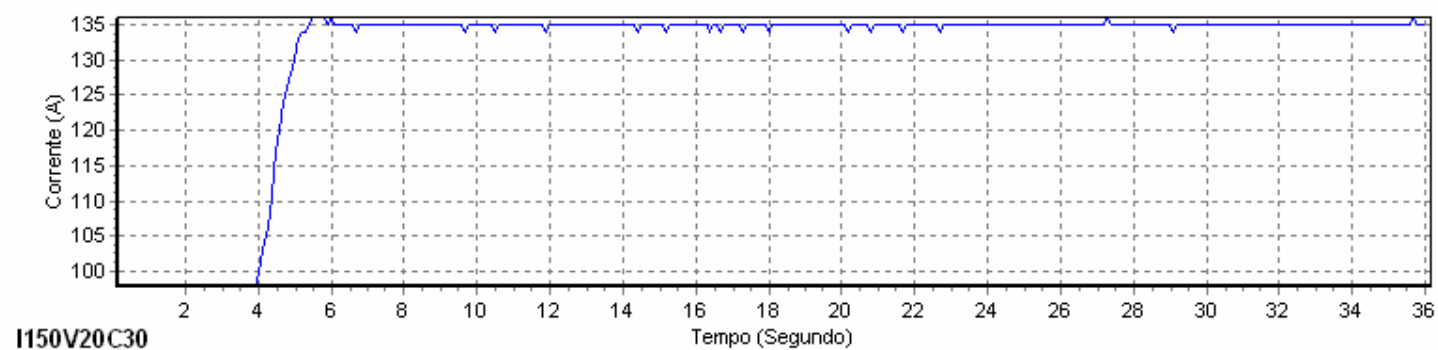
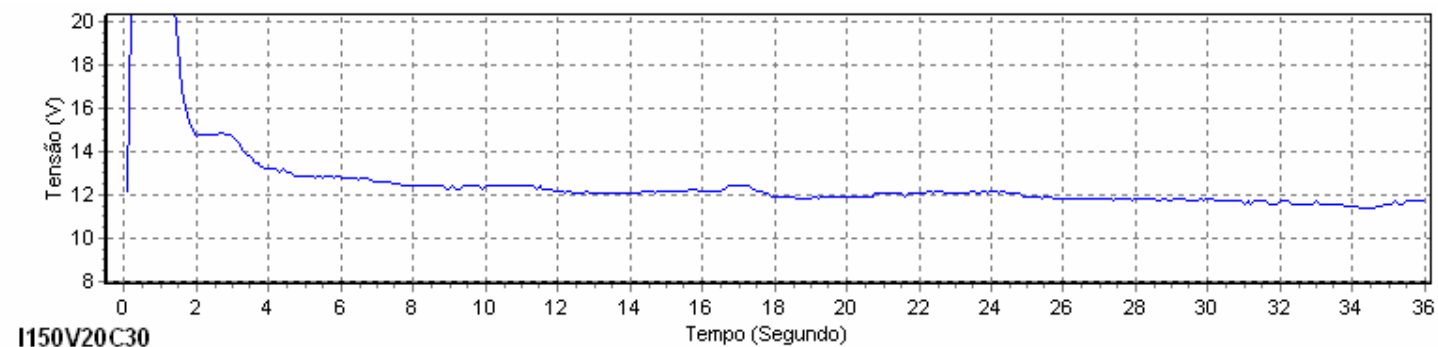
a) Influência do acabamento superficial na soldagem ATIG-CC

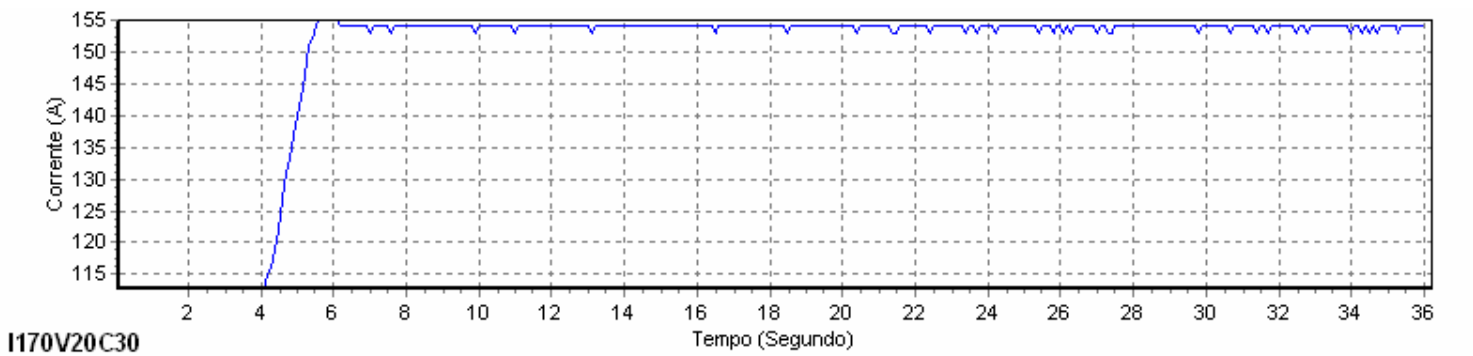
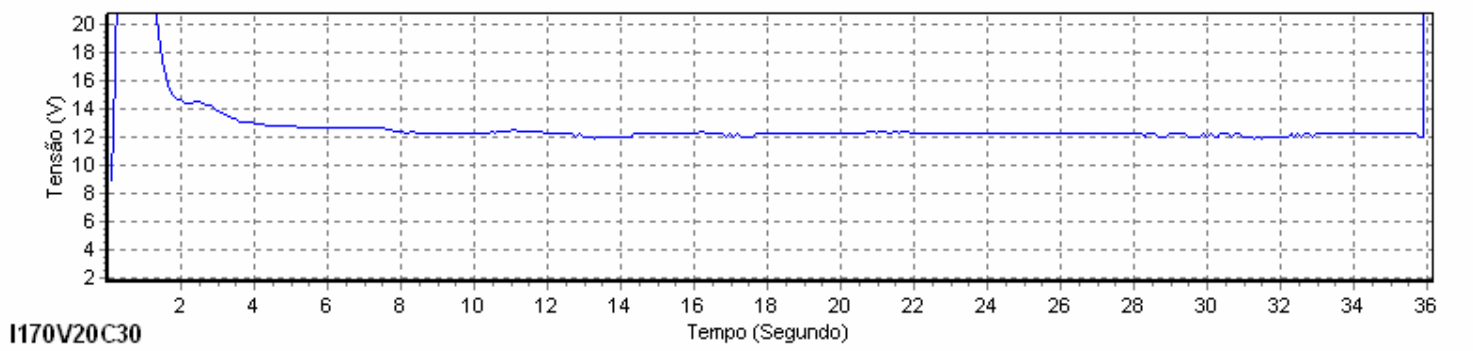
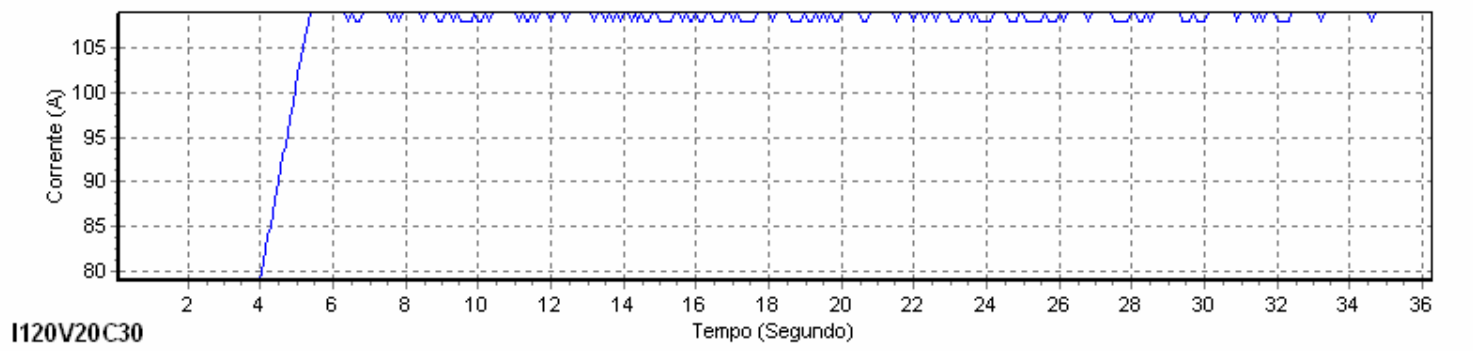
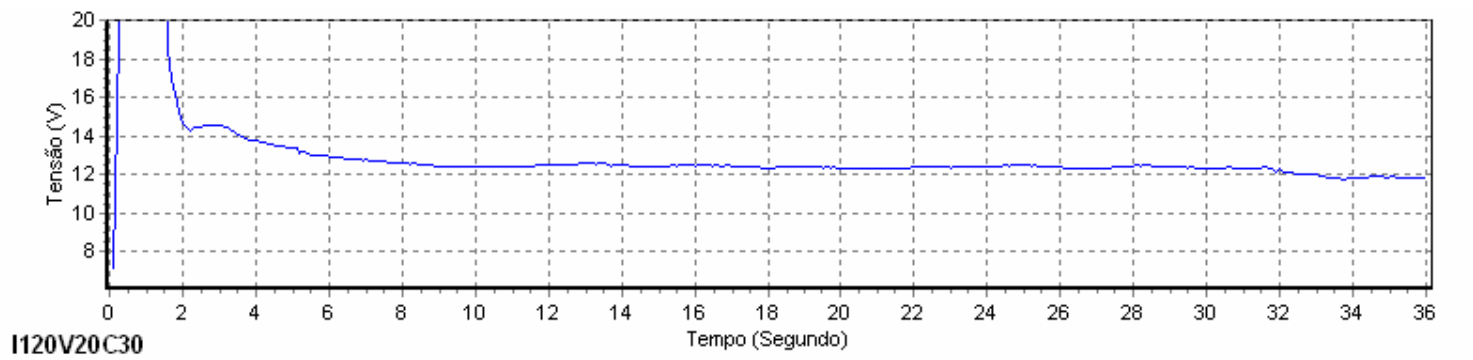


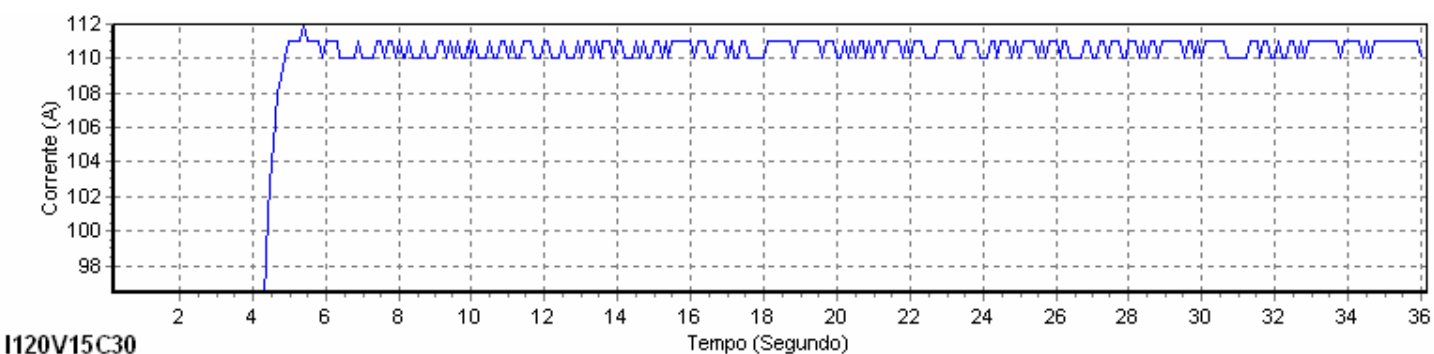
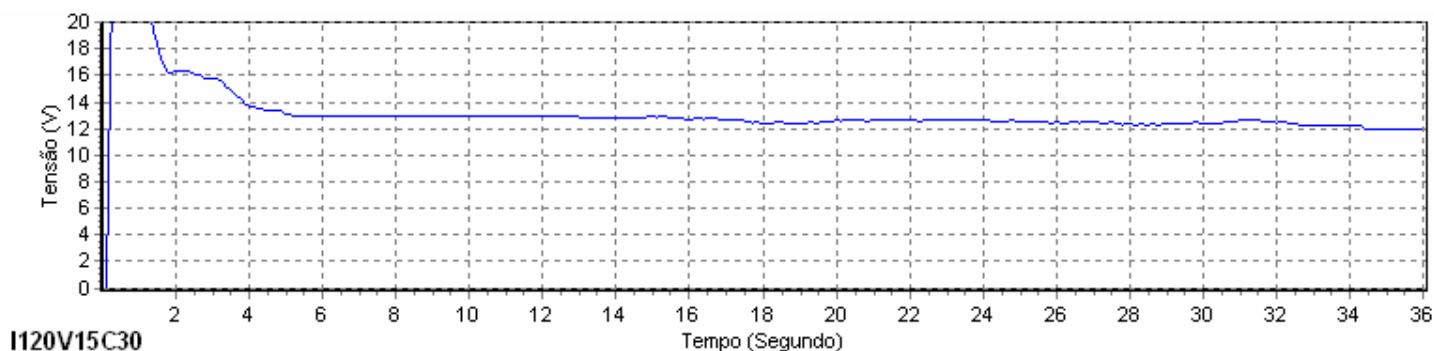
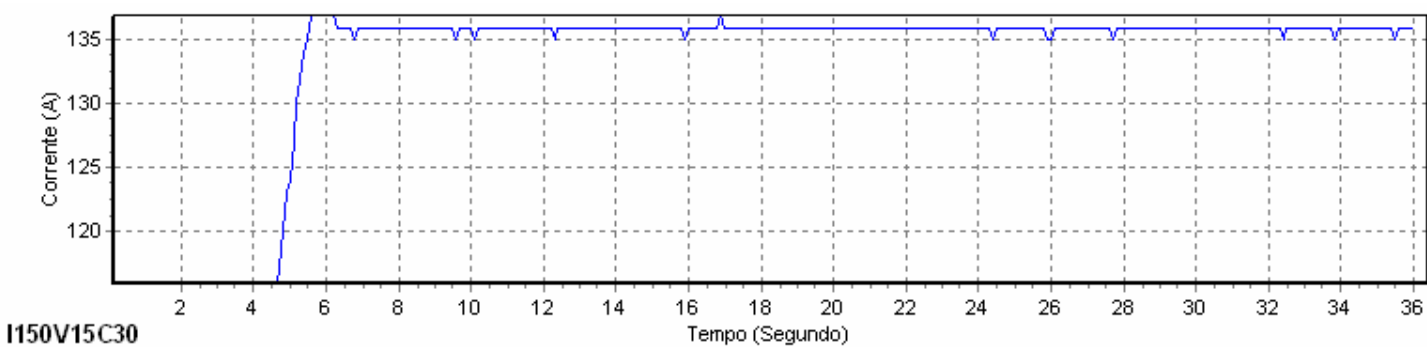
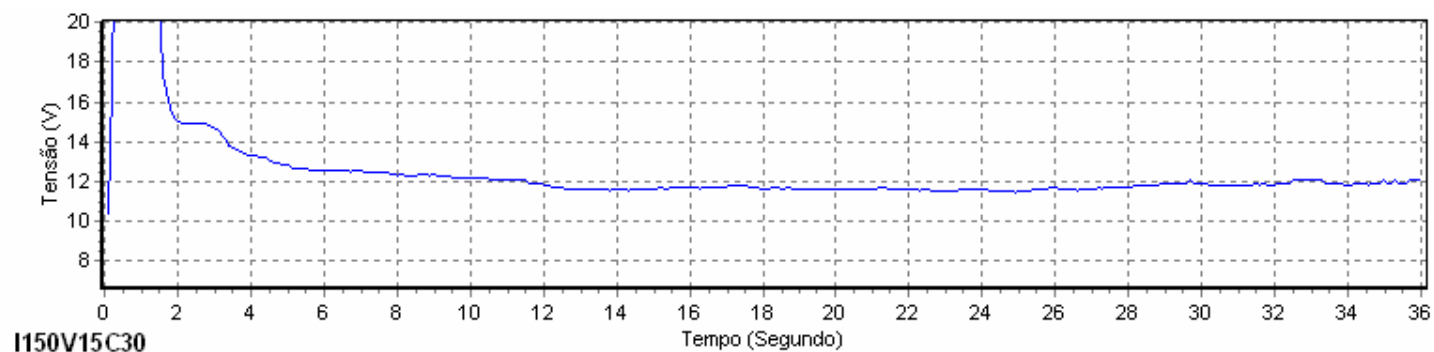


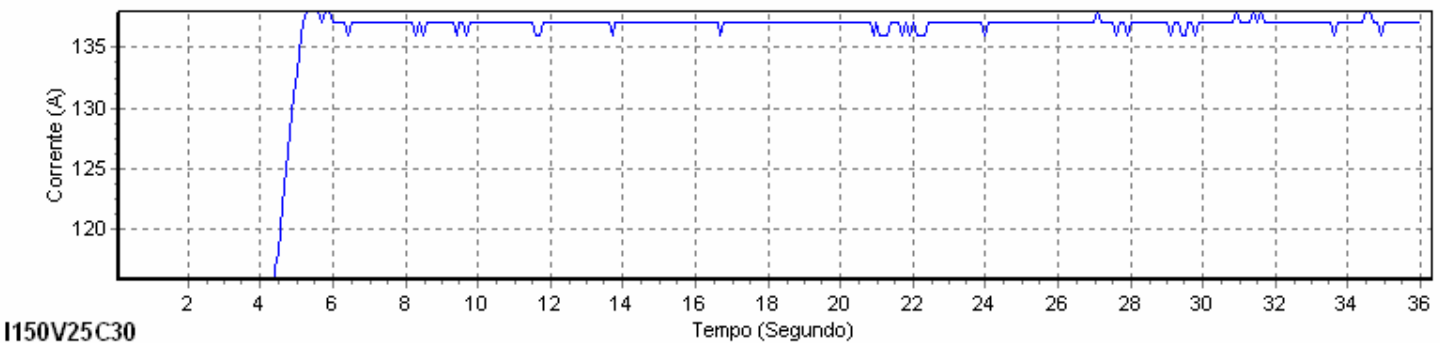
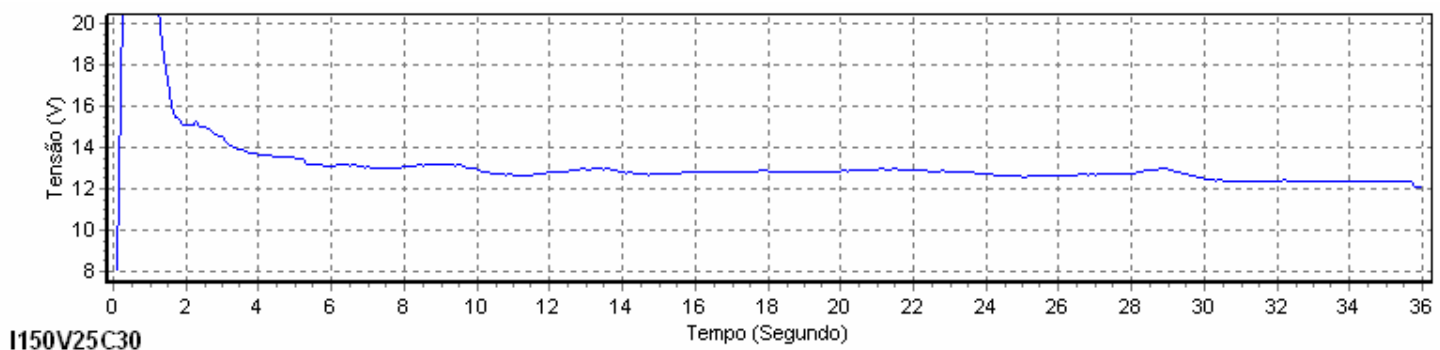
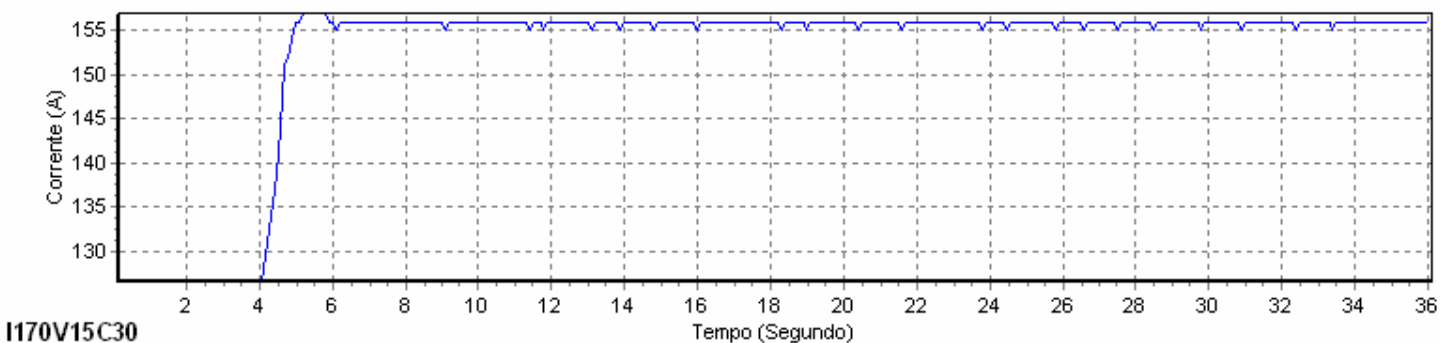
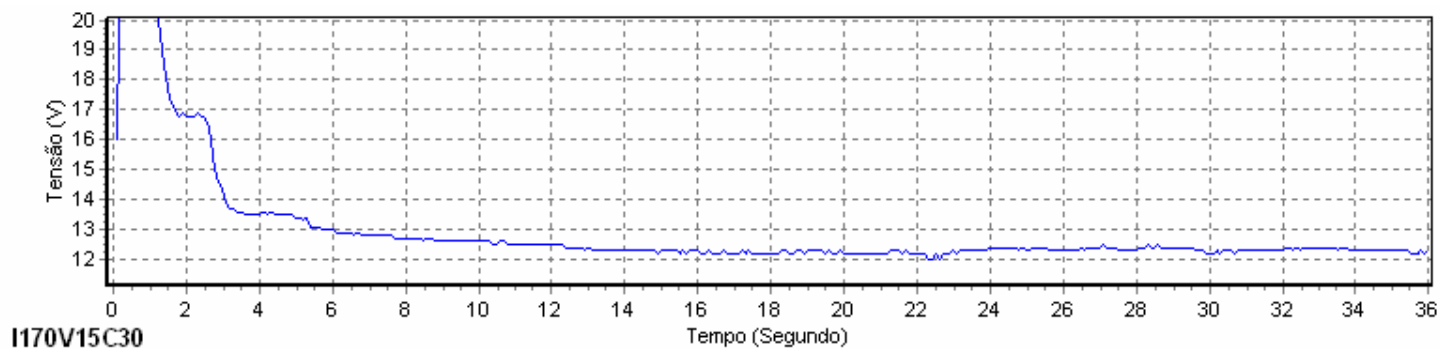


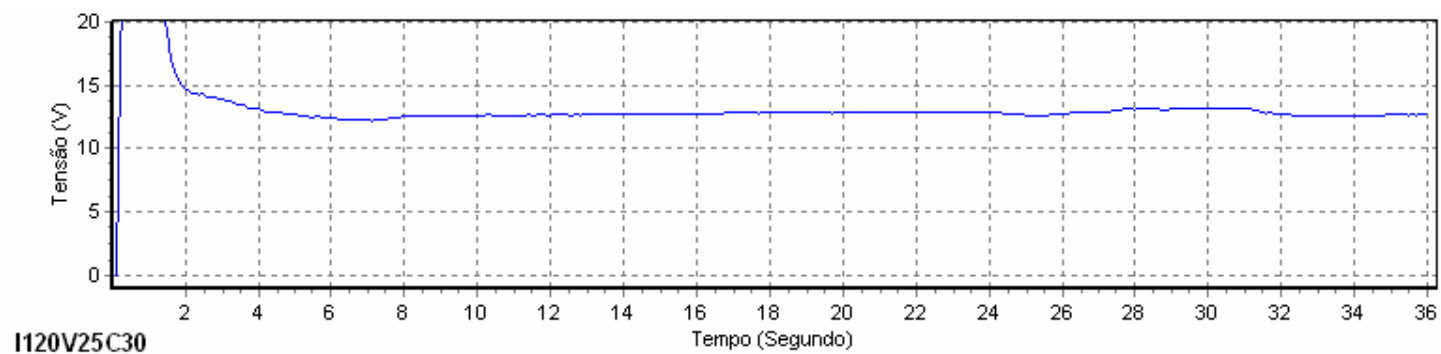
b) Influência dos parâmetros de soldagem ATIG-CC



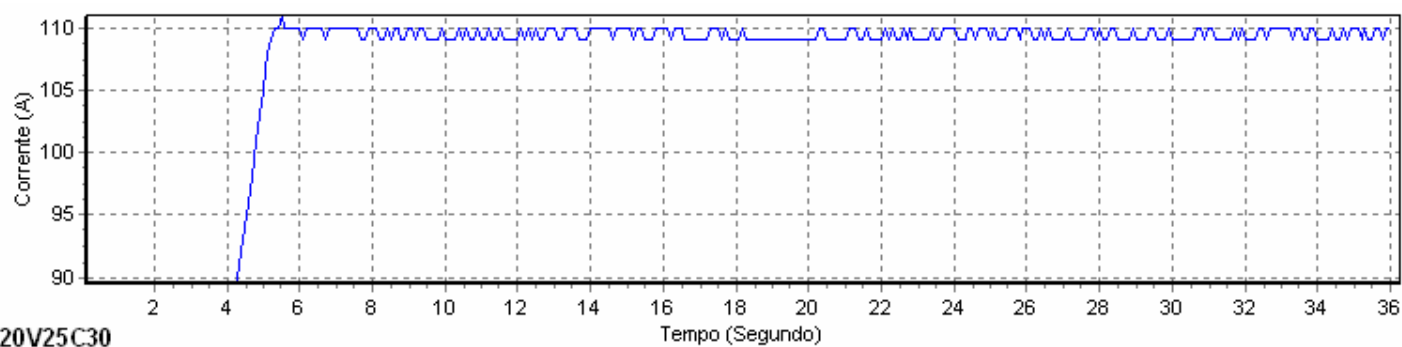




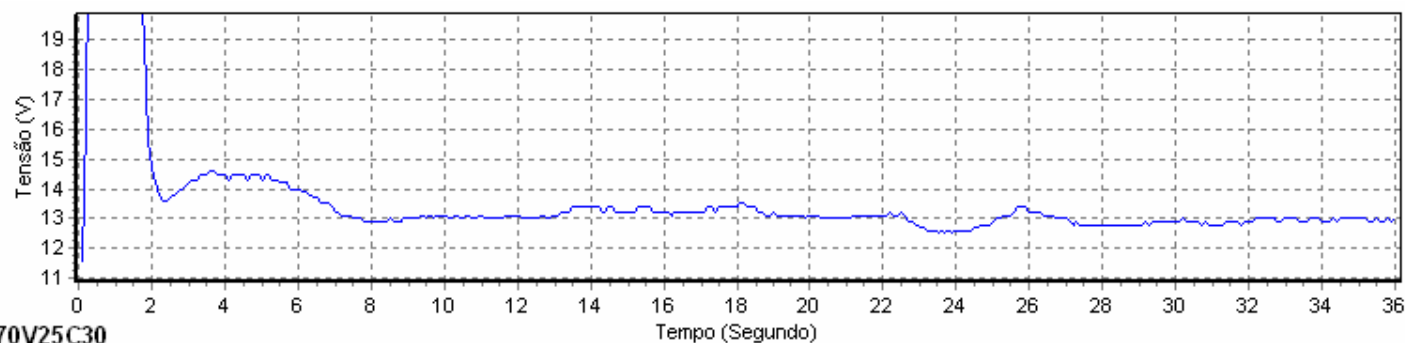




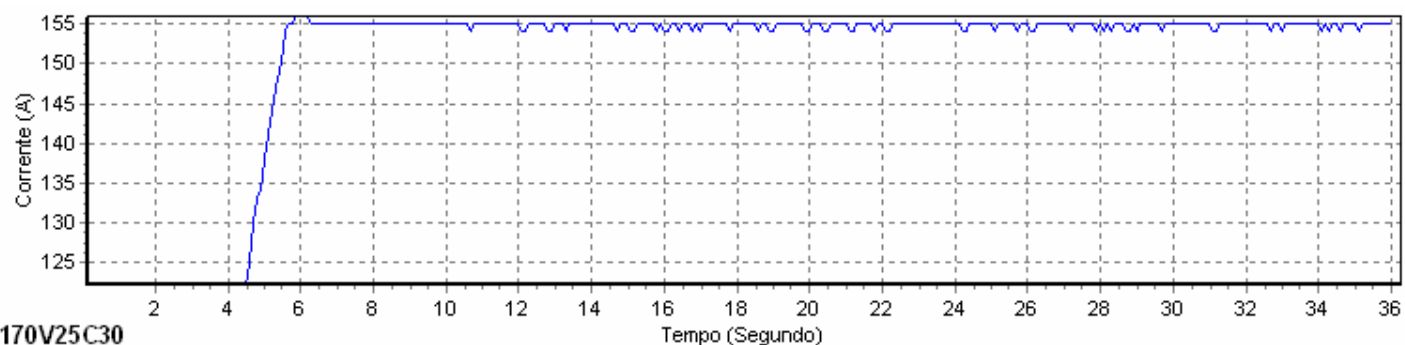
I120V25C30



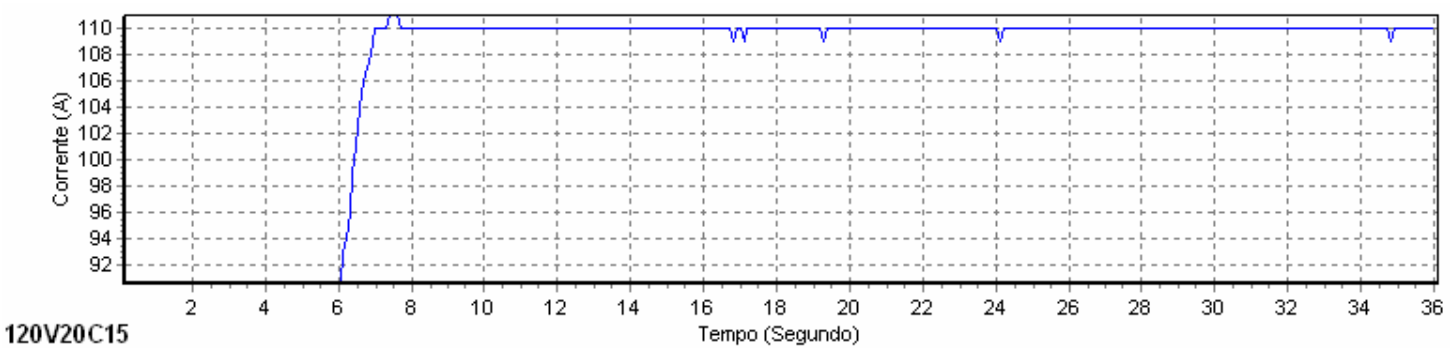
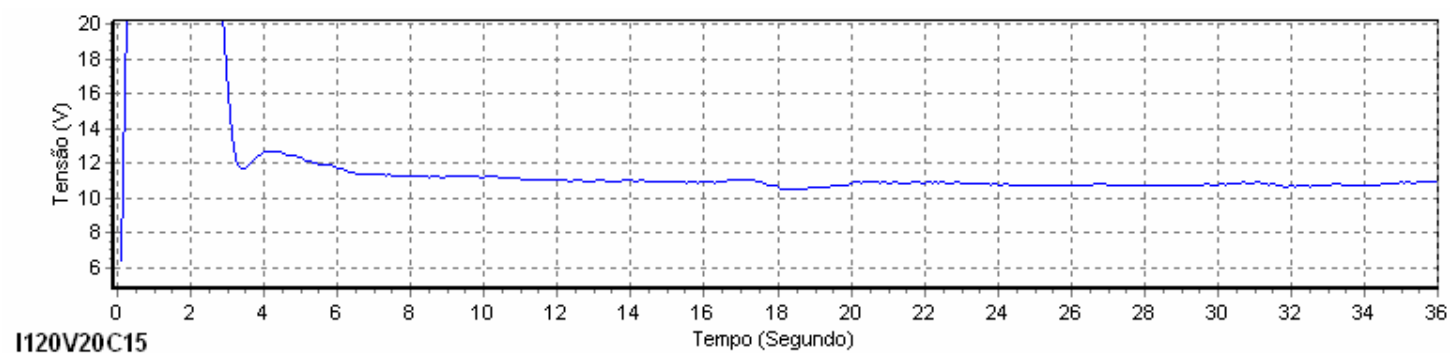
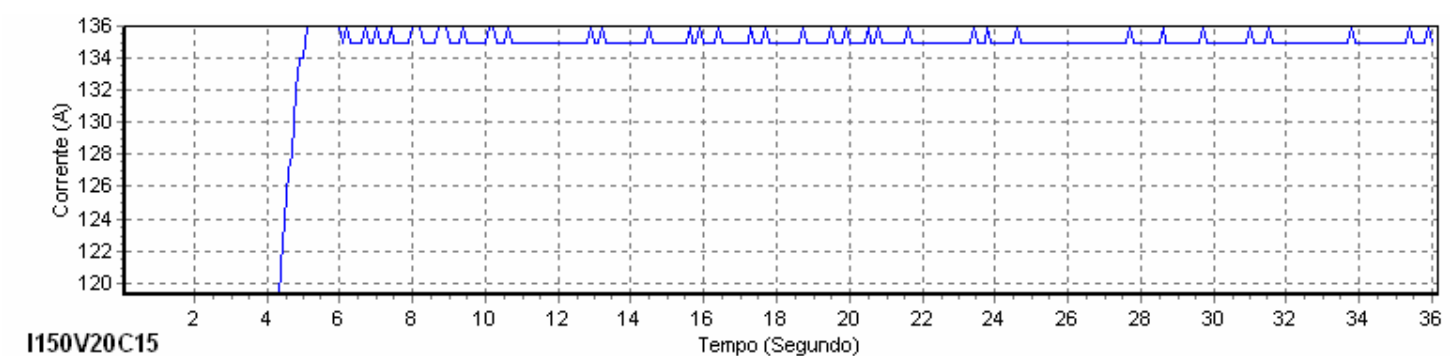
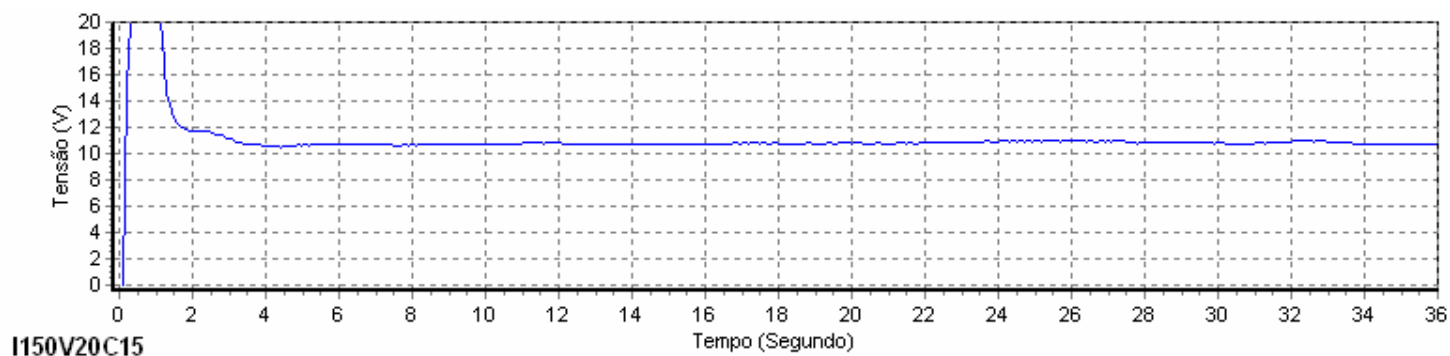
I120V25C30

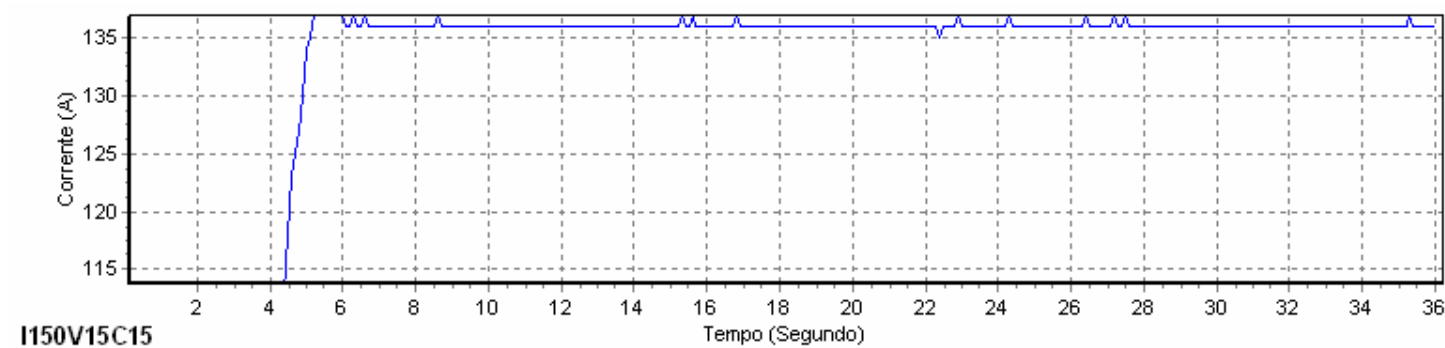
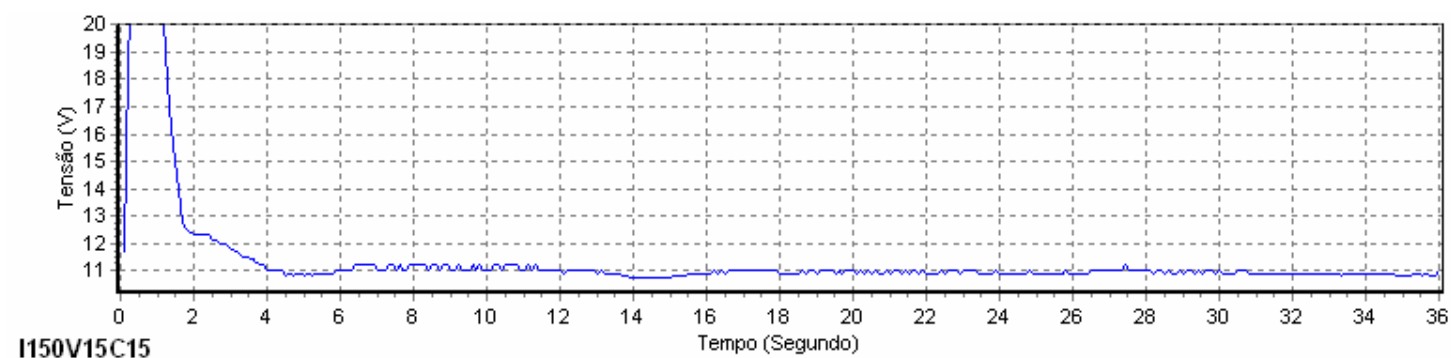
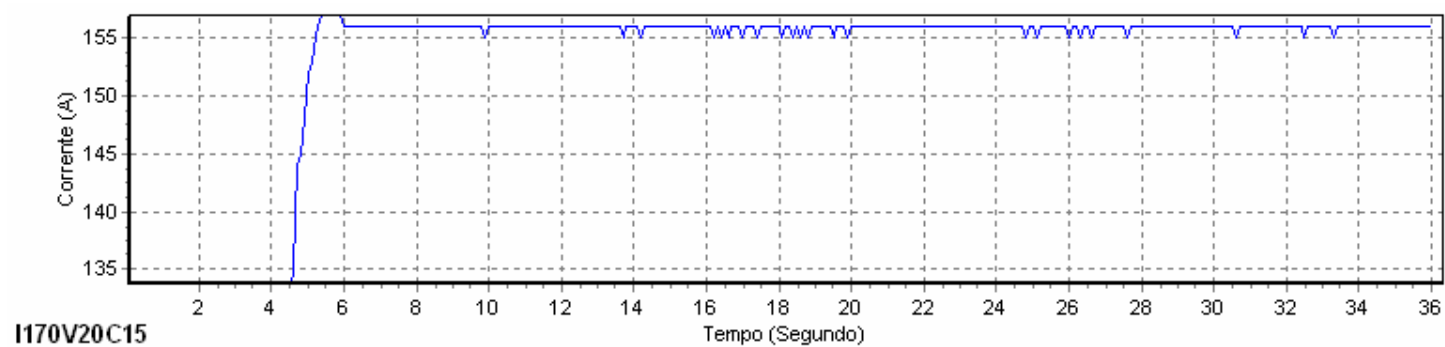
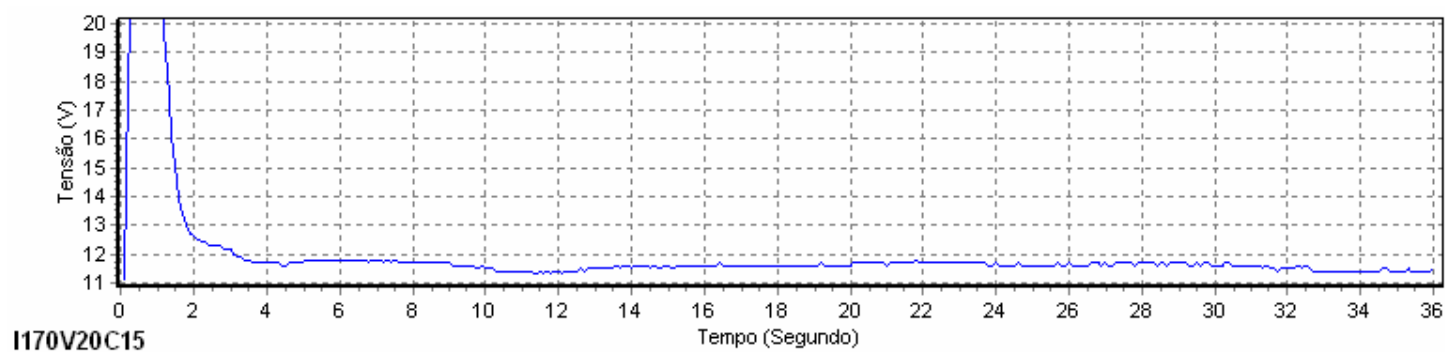


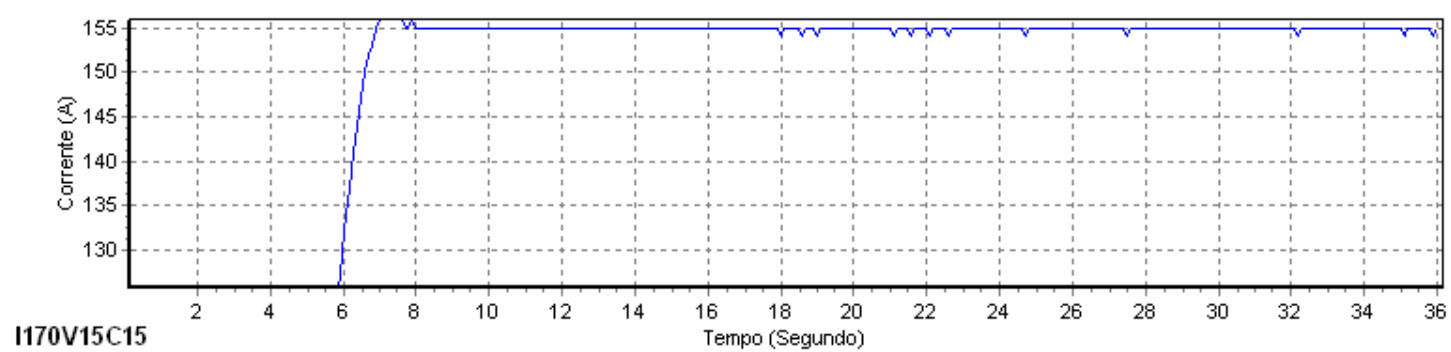
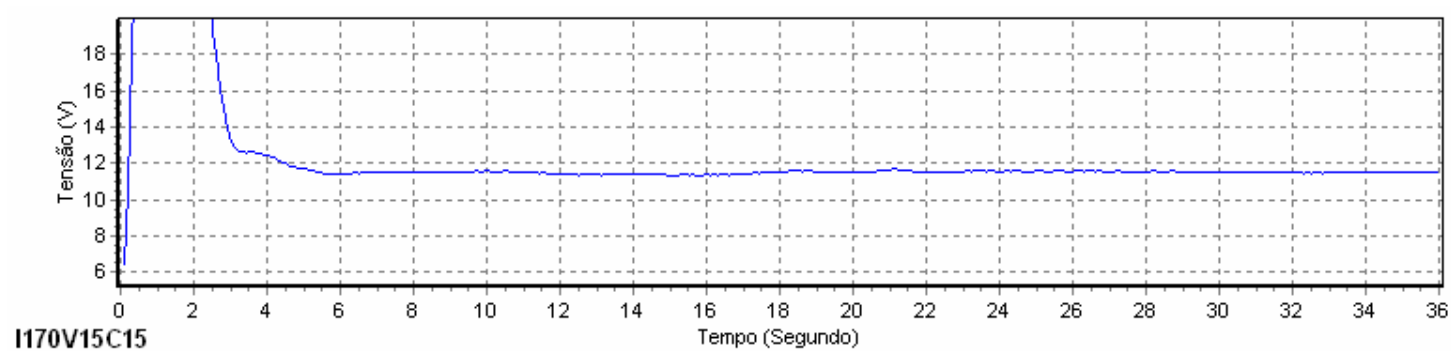
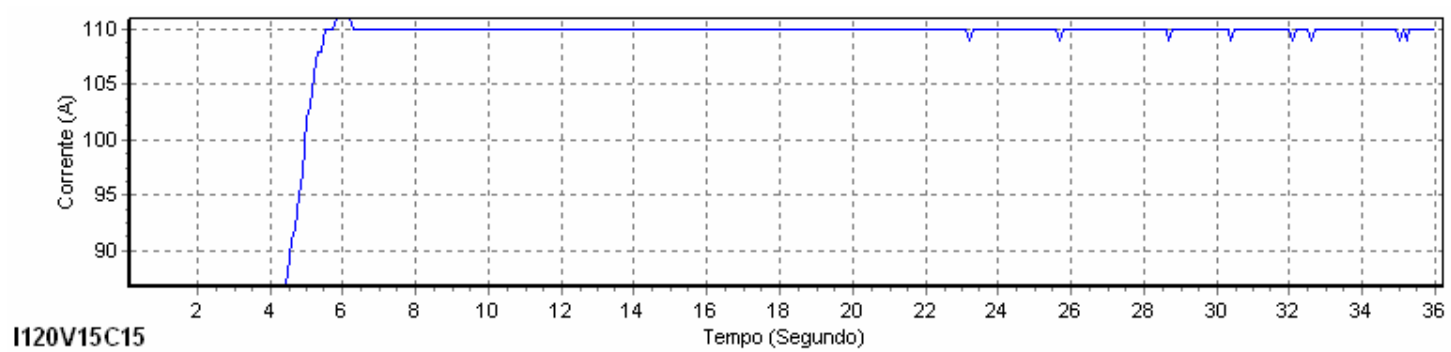
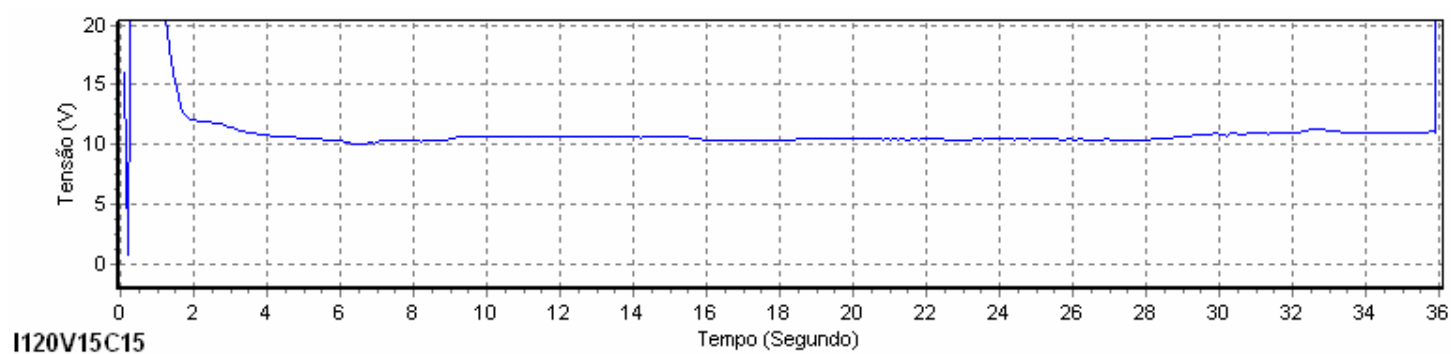
I170V25C30

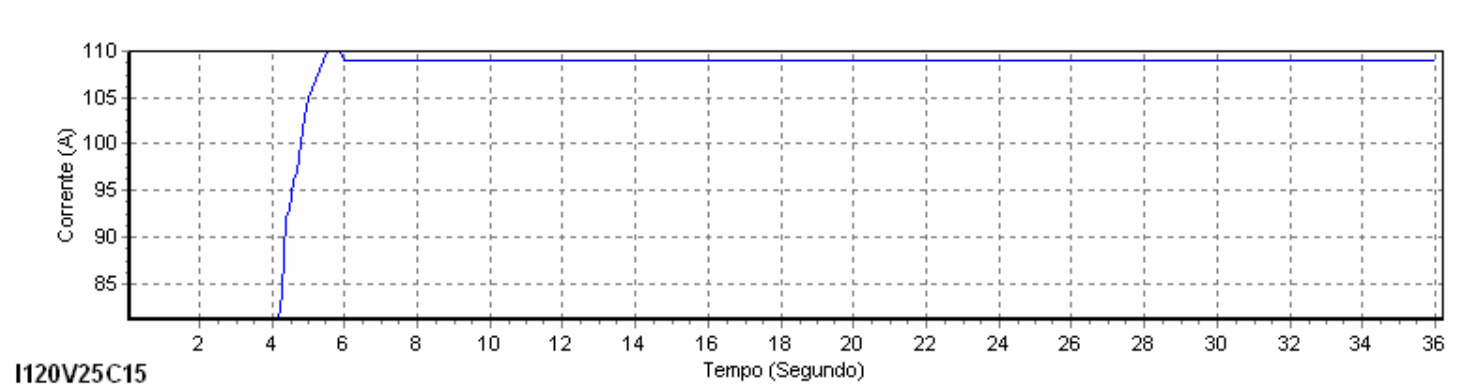
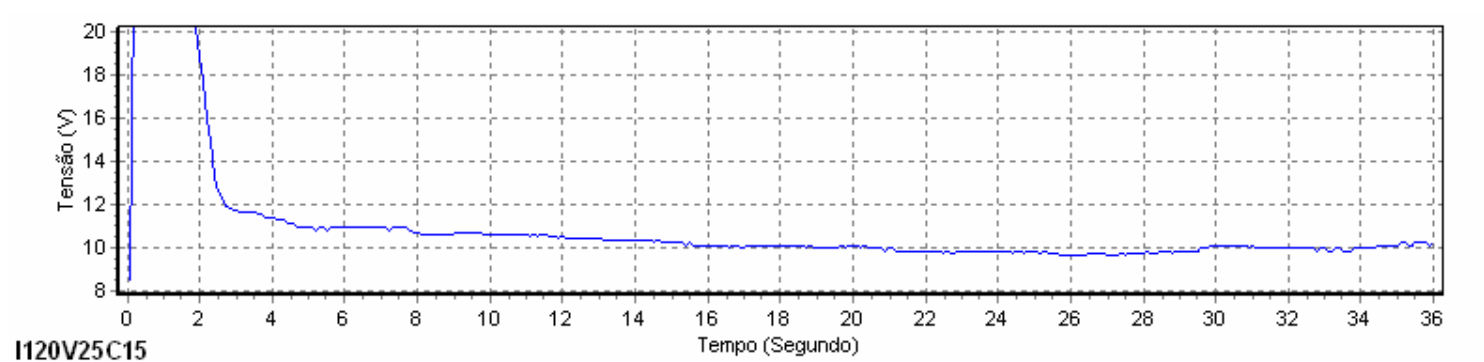
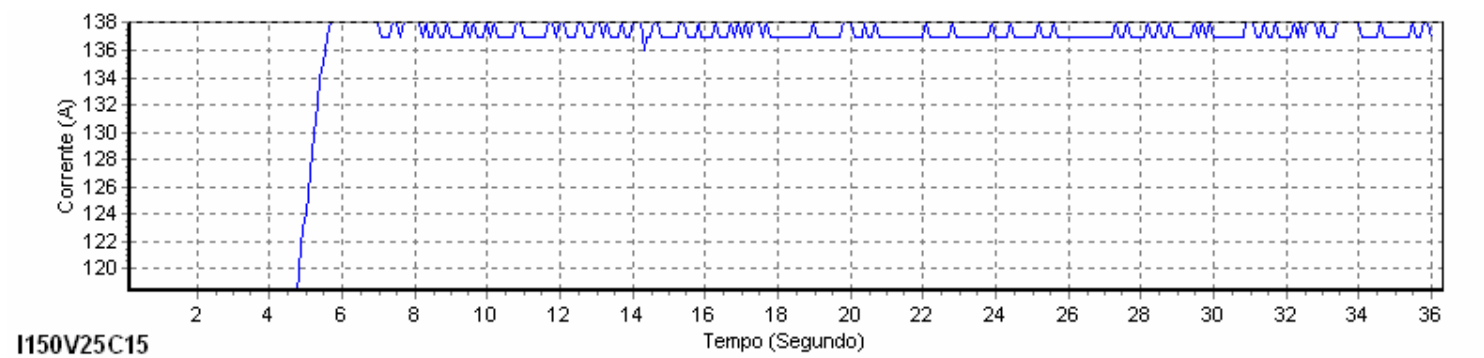
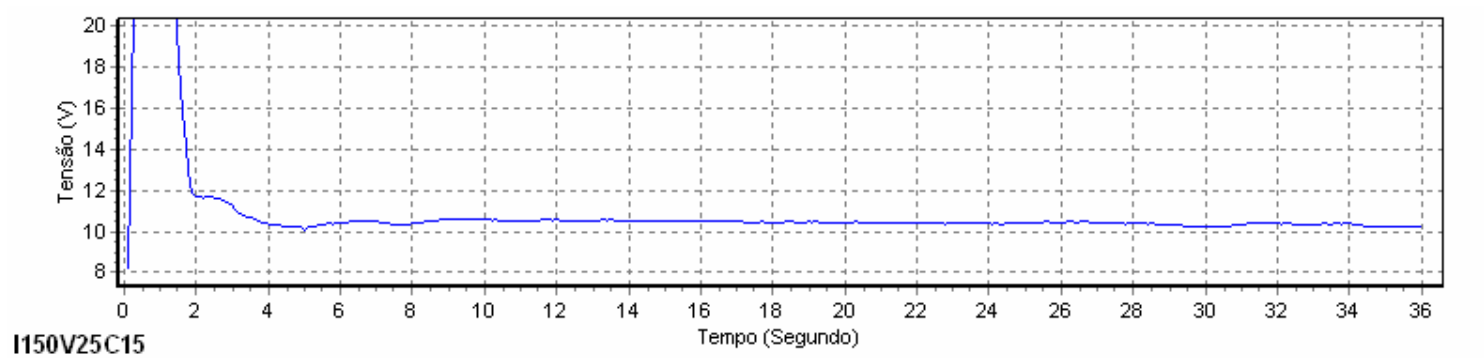


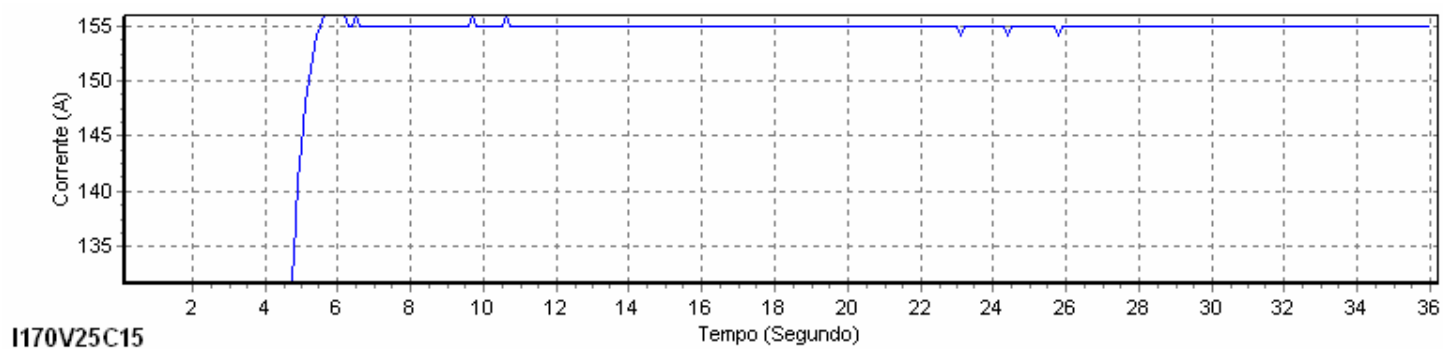
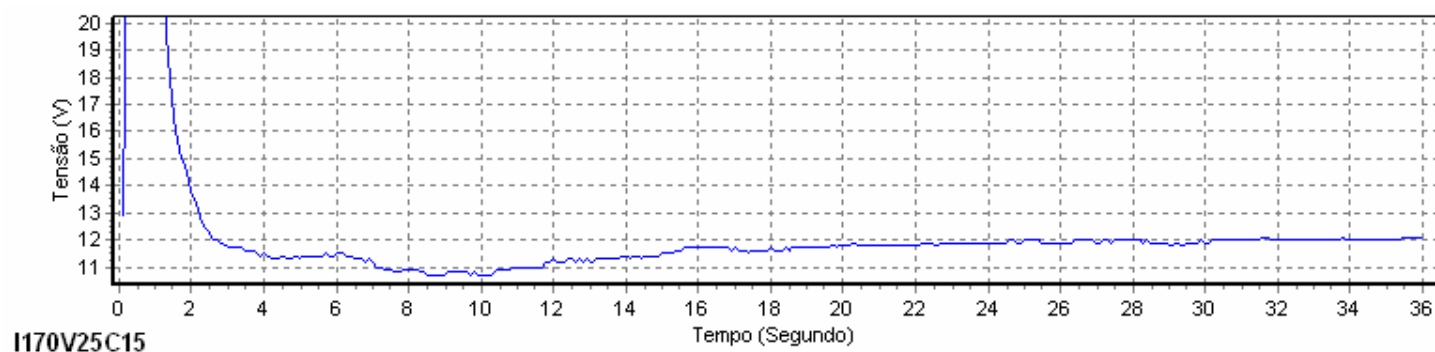
I170V25C30



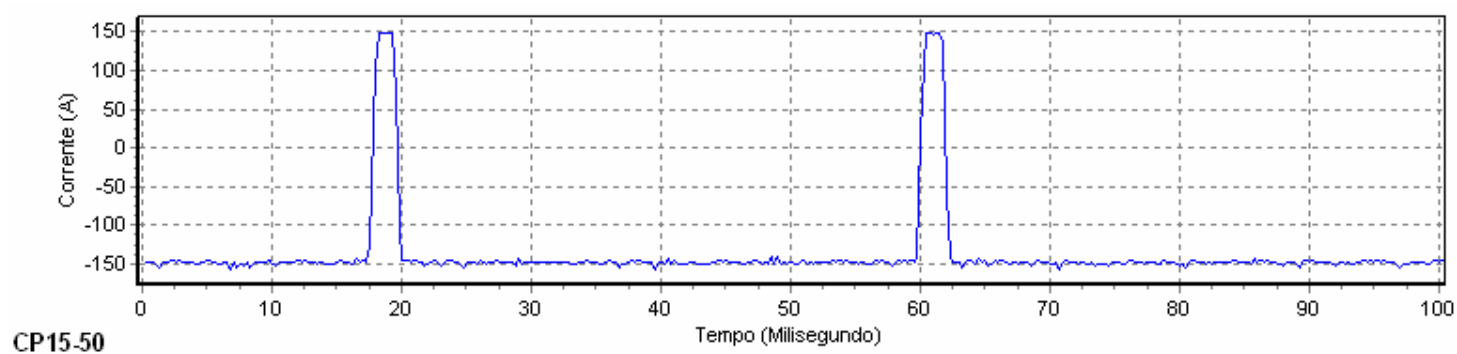
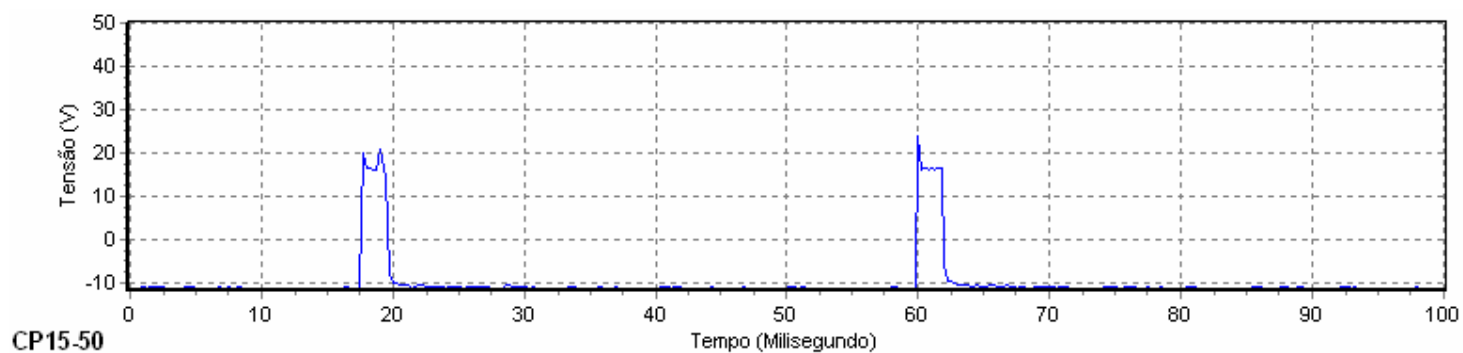


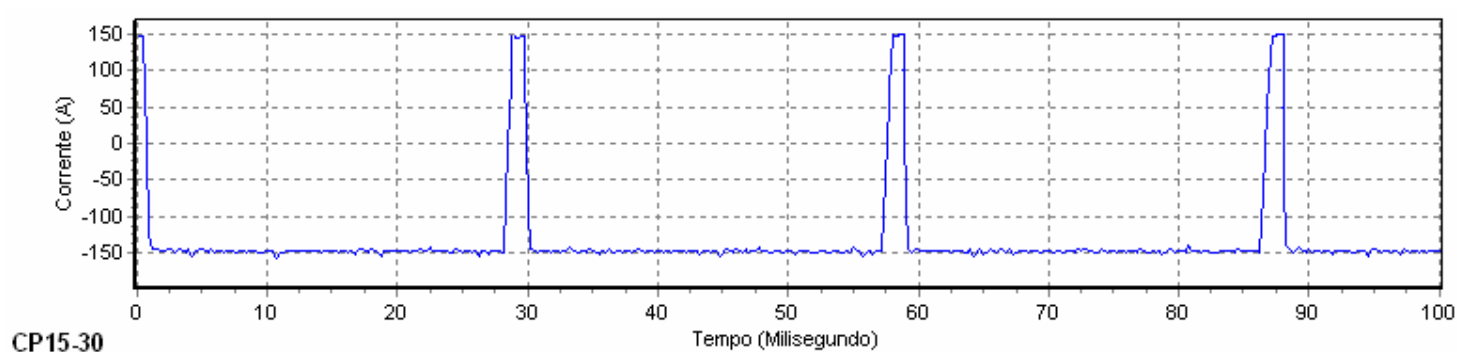
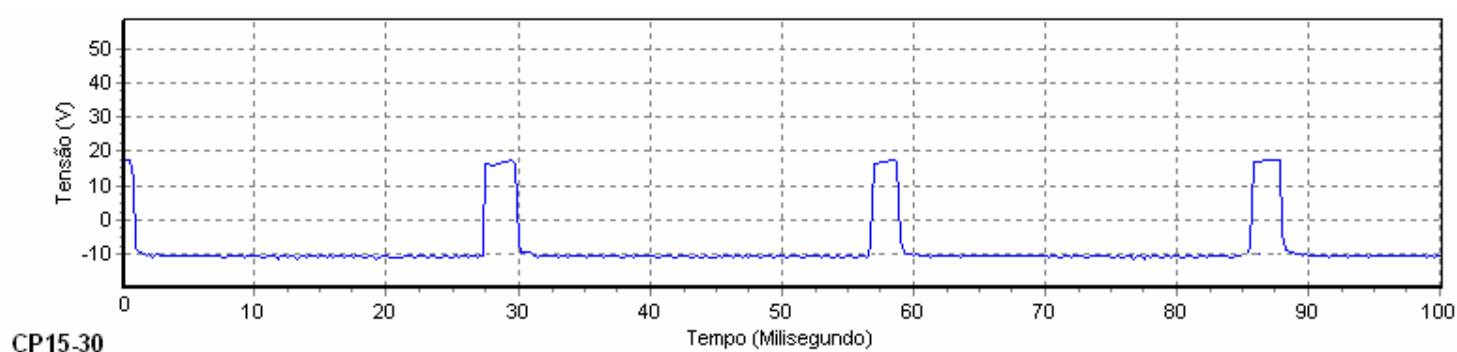
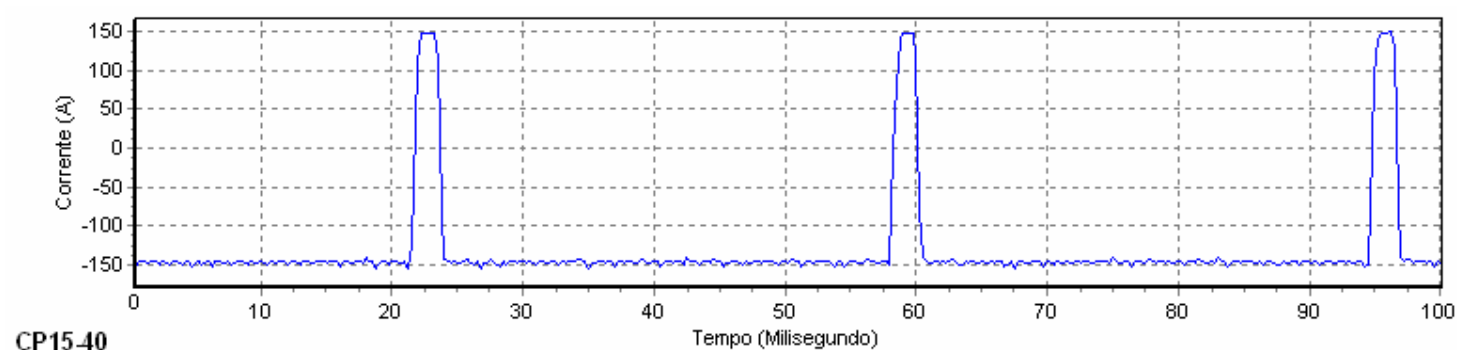
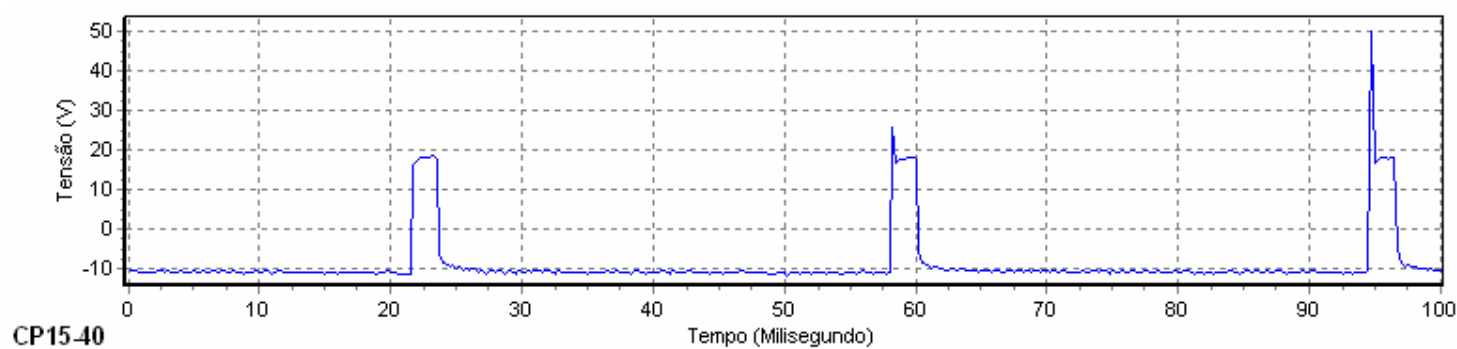


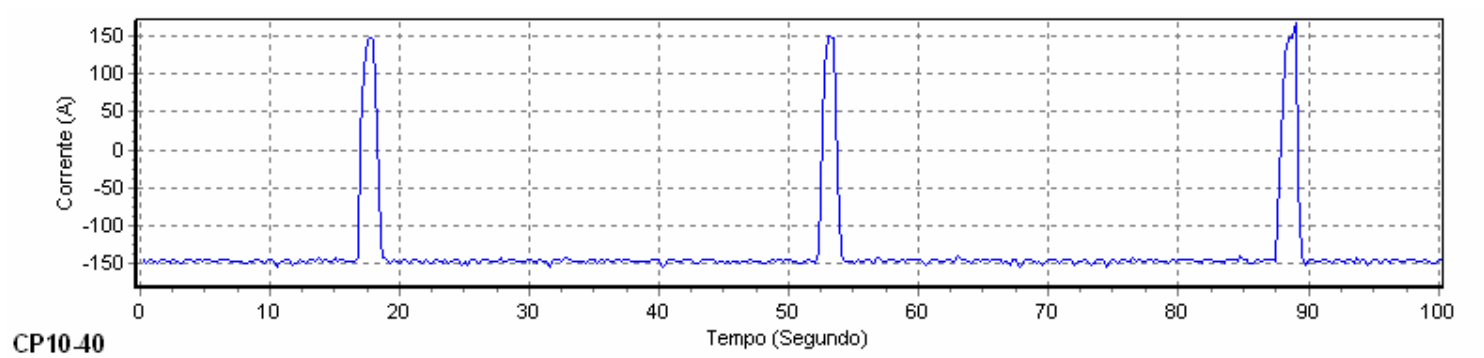
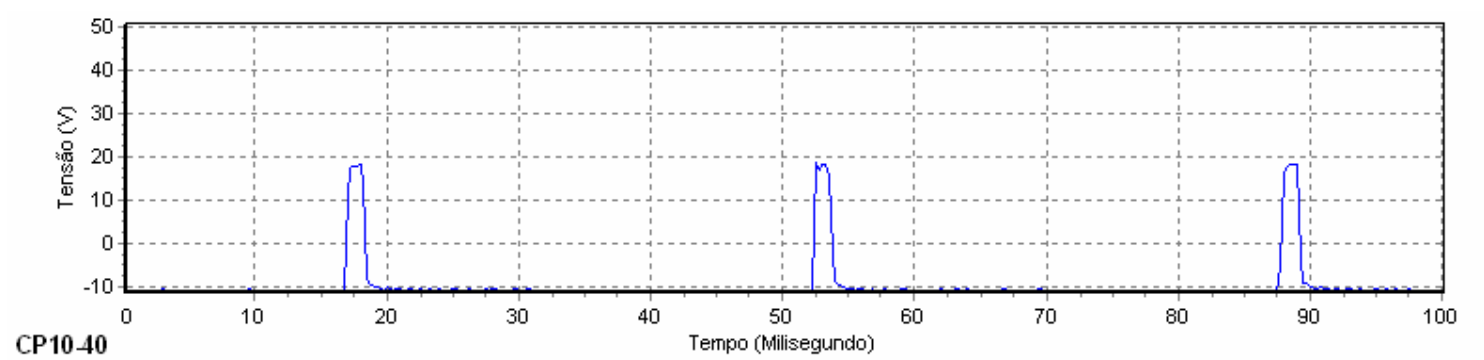
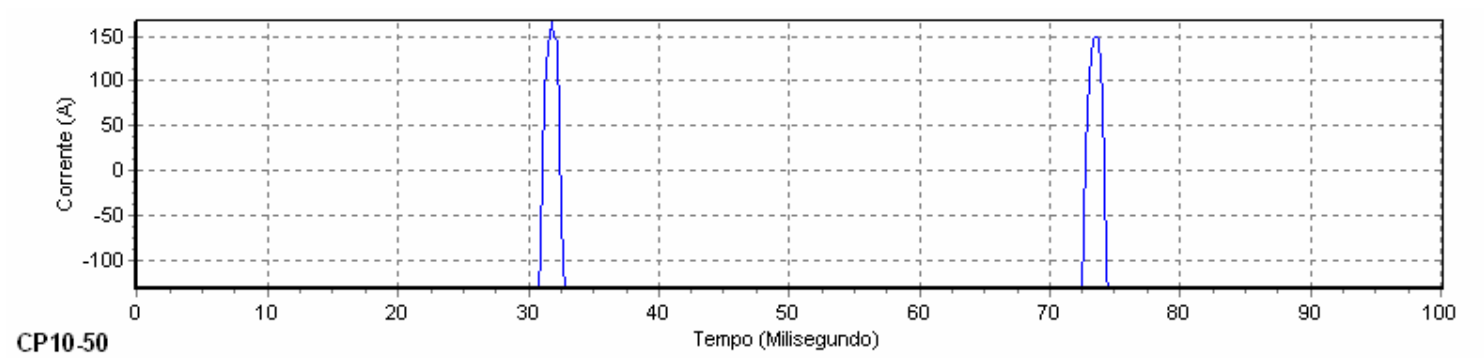
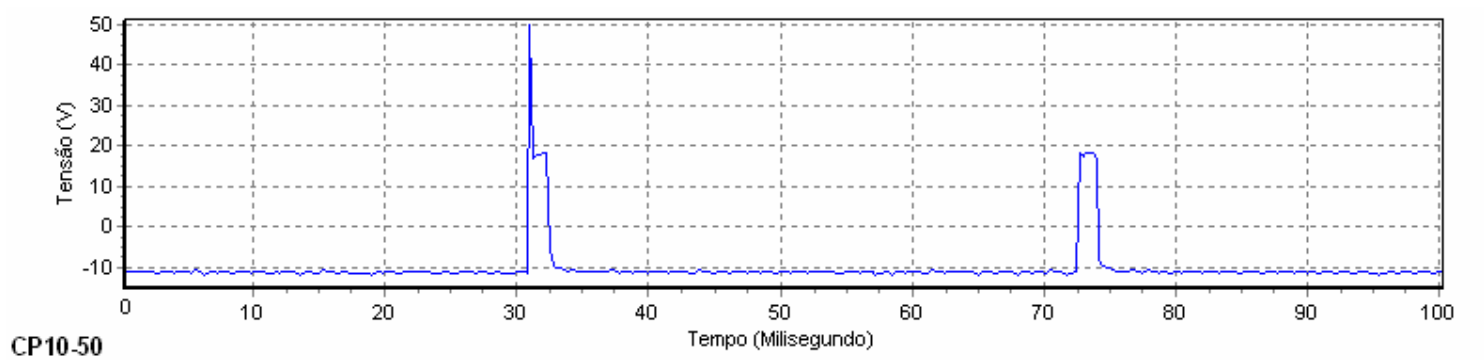


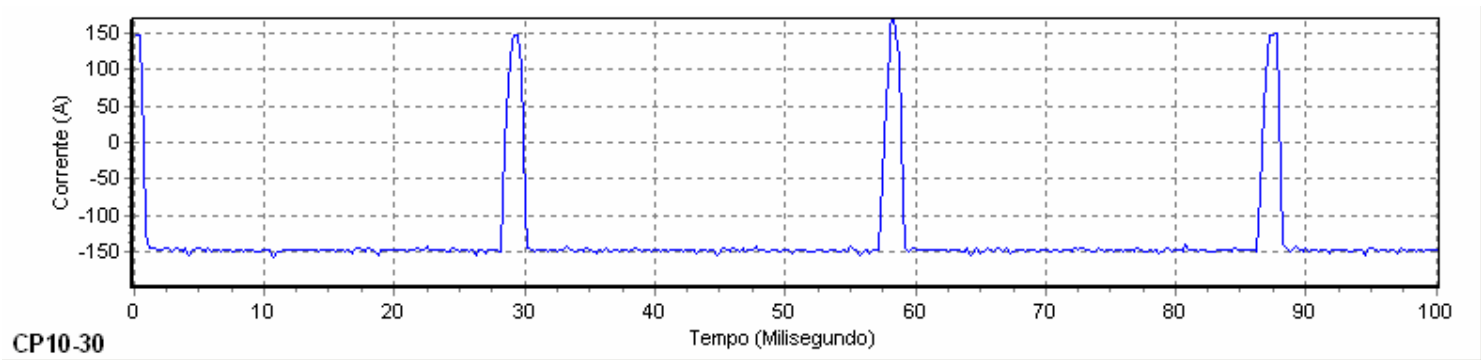
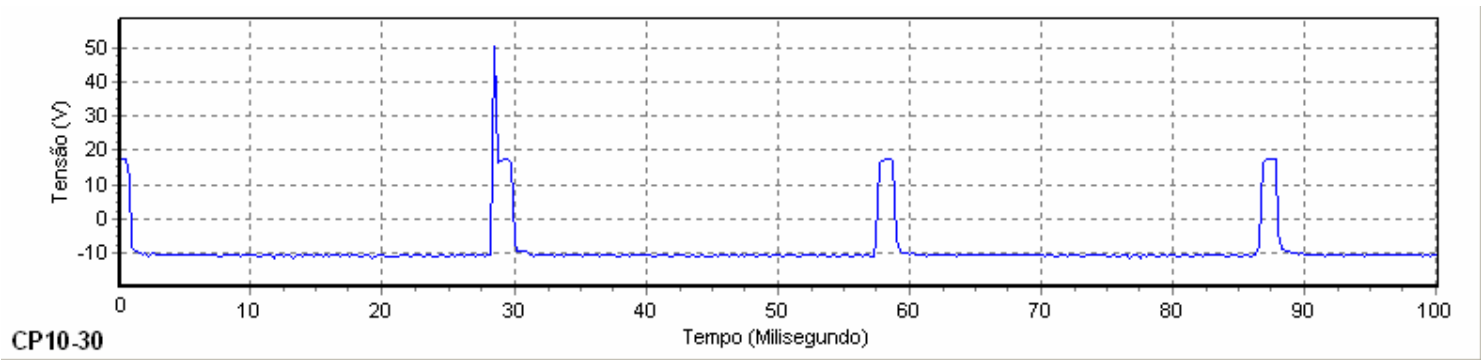


c) Influência dos parâmetros de soldagem ATIG-CA









ANEXO A - Instrumentos de monitoramento da soldagem com polaridade variável e onda retangular

O instrumento de medição modelo TC-1 foi fabricado pelo Instituto de Soldagem e Mecatrônica – LABSOLDA/UFSC. Trata-se de um instrumento desenvolvido especificamente para aplicação em medição de tensão e corrente de soldagem. Estas grandezas são mostradas em valor médio ou eficaz em dois “displays” de sete segmentos, tendo também saída de valores instantâneos, médios e eficazes disponíveis para leitura por microcomputador dotado de placa com conversor analógico digital. As saídas são totalmente isoladas da parte de potência, o que confere total segurança para utilização com equipamentos aterrados, como é o caso de microcomputadores. Suas características operacionais são apresentadas a seguir:

- Faixa de indicação para a corrente de 5 a 500 A (valores médios e eficazes)
- Faixa de indicação para a tensão de 3 a 60 V (valores médios e eficazes)
- Resolução de 1 A para a corrente e de 0,1 V para a tensão
- Incerteza máxima para a corrente 1% do valor lido
- Incerteza máxima para a tensão 0,6% do valor lido



A entrada de medição de corrente do instrumento TC-1 é feita por um transdutor de efeito Hall. Este dispositivo comporta-se como um transformador de corrente com relações do tipo 1:2000, 1:1000, dependendo do modelo e da corrente. Neste trabalho foi utilizado o transdutor de corrente da marca LEM modelo HT 500-SBD.

Ele mede a corrente independente da forma de onda, seja contínua, alternada, pulsada, tendo excelente resposta dinâmica o que garante a reprodução perfeita da forma de ondas de corrente medidas. As características operacionais são as seguintes:

- Corrente nominal: 500 A
- Incerteza máxima: 1% da corrente nominal a 23 °C
- Faixa de frequência: 0 a 25 kHz



ANEXO B - Programa SINAL

Programa Sinal

O programa Sinal foi desenvolvido no Laboratório de Soldagem e Ensaios Não Destrutivos pelo Prof. Paulo J. Modenesi. Este programa foi projetado para analisar e tratar dados obtidos por sistemas digitais de aquisição de dados, particularmente em testes de soldagem.

A presente versão do programa foi desenvolvida através de um projeto de pesquisa financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Instalação

Para instalar o programa, basta criar um novo diretório através do Windows Explorer (por exemplo: ...**SinalWin**) e copiar (e, se for o caso, descomprimir) os arquivos **sinal.exe**, **cp3240mp.dll** e **borIndmm.dll** para este diretório. Pode-se, também, criar um outro diretório (por exemplo:**SinalWin\Sinais** ou **MeusDocumentos\MeusSinais**) para se armazenar os arquivos de sinais (*.sin). Sugere-se, também, criar um atalho para o programa na área de trabalho do Windows. Para iniciar o programa, clicar duas vezes no seu ícone.

Menu

O menu do programa Sinal apresenta as seguintes opções:

Arquivo:

- Abrir
- Importar
- Fechar
- Salvar
- Salvar como

Salvar gráfico

Imprimir

Sair

Editar:

Informações

Canal

Preferências

Processo:

Estatística

Filtrar canal

Espectro

Operação

Gráfico:

Y-t

Y-X

Histograma

Janela

Ajuda

Abrir:

(Arquivo → Abrir)

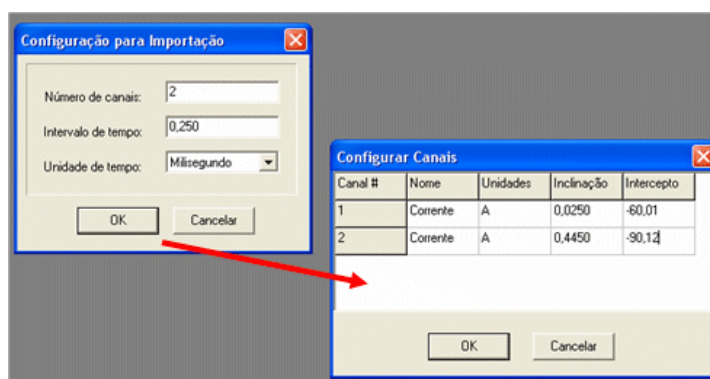
Permite abrir e trabalhar com os arquivos no formato *.sin (sinais). Se o processo for bem sucedido, uma janela com informações gerais sobre o sinal aparecerá no canto superior esquerdo da área de trabalho do programa. Algumas destas informações poderão ser modificadas através da opção Editar→Informações.

Importar:

Permite abrir arquivos de outros formatos e criar sinais a partir destes.

Importar →Configurar:

Permite configurar programa para importar um dado arquivo de dados. As seguintes informações são solicitadas: Número de canais do sinal, tempo entre medidas, unidade de tempo e, para cada canal, o seu nome e as suas unidades e, se for o caso, fatores de conversão dos dados. Assume-se, assim, uma relação linear entre os dados de interesse e os dados importados (isto é, o programa solicita a inclinação e o intercepto desta relação).



Importar → Arquivo Texto:

Arquivos de texto (formato ASCII) podem ser lidos com os canais dispostos em colunas separadas por espaços em branco ou tabulações e sem títulos. Os arquivos devem terminar exatamente na última linha de dados, isto é, linhas adicionais, mesmo vazias, devem ser evitadas. Se os dados já estiverem em seus valores reais, os fatores de calibração serão 1,0 e 0,0.

Importar → Outros formatos:

O programa sinal permite a leitura de arquivos binários de dados gerados por algumas placas AD. Atualmente, estão implantadas rotinas para a leitura de arquivos gerados por placas da STD (Sistemas Técnicos Digitais), STW (Strawberry, Inc), PCL818H (Advantech) e Sisdata DAD (IMC). Em particular, para o formato DAD, os seguintes fatores de calibração tem sido usados:

Corrente: 0.131089 e -537.6997 ; Tensão: 0.013765 e -53.1825

Fechar:

Permite fechar o sinal em uso.

Salvar/Salvar Como:

Salvar dados em um arquivo de sinal (.sin). Isto é importante para salvar, por exemplo, os dados recém-importados de um arquivo de outro formato qualquer.

Salvar gráfico:

Permite salvar um gráfico Y-t, Y-X, histograma ou resultante do processamento de um sinal nos formatos BITMAP, WMF ou texto (para ser exportado para outro programa).

Imprimir:

Ainda não implementado.

Sair:

Termina a execução do programa.

Editar:**Informações:**

Permite alterar as informações e dados de configuração de um sinal que estão mostrados na sua janela inicial de informações. Se as alterações forem salvas pelo usuário, o sinal fica alterado na memória do programa. Estas alterações poderão ser salvas permanentemente no sinal original ou em um novo sinal através dos comandos **Salvar** ou **Salvar como** do menu Arquivo.

Preferências:

Permite definir dimensões dos gráficos mostrados pelo programa. Ajustar de acordo com a resolução da tela do computador.

Sinal: P01.sin

C:\Meus documentos\Sinais\P01.sin

Número de Canais: 3

Pontos/Canal: 4000

Tempo: 0.4000

Unidade: Milisegundo

Canal #	Nome	Unidades
1	Corrente	A
2	Tensão	V

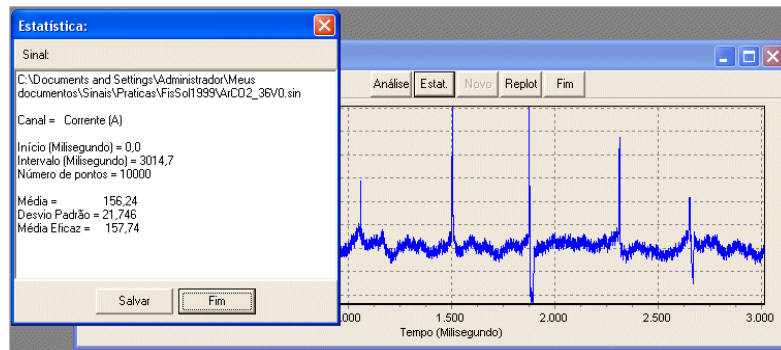
Comentários:
Prof. José Eduardo - PUC - Metal
Base: Aço SAR80

Salvar Cancelar

Estatística:

(Processo → Estatística)

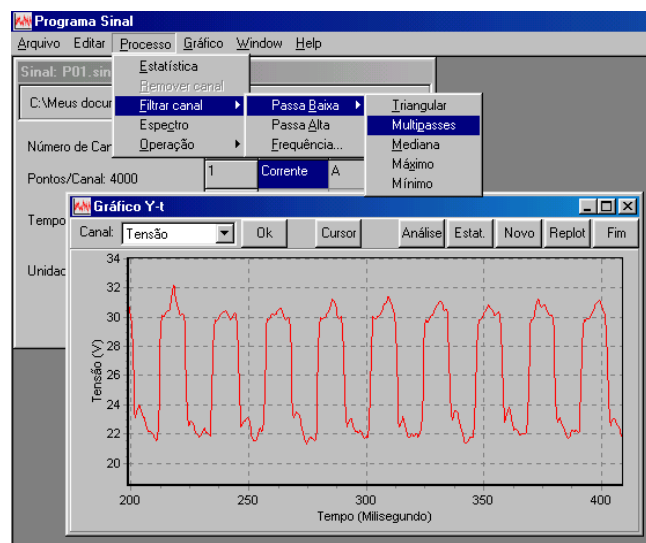
Calcula a média, o desvio padrão e a média eficaz da parte do canal, ou do resultado de algum processamento de um ou mais canais, que é mostrada em um gráfico da janela ativa. Este mesmo resultado pode ser obtido através do botão "**Estatística**" da barra de ferramentas da janela ativa.



Filtrar canal:

(Processo → Filtrar)

Permite processar o canal da janela ativa com diferentes rotinas de filtragem. Após a filtragem, o canal alterado muda de cor (de azul para vermelho) e pode ser salvo como um novo canal no sinal através do botão "**Novo canal**" da barra de ferramentas da janela do gráfico. Existem duas opções de filtragem: **Passa baixa** e **passa alta**.



Filtro passa baixa:

(Processo → Filtrar → Passa Baixa)

Engloba um número de opções para remover componentes de alta frequência do canal sendo analisado:

Triangular:

Substitui cada ponto do canal por uma média ponderada deste ponto com seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos. O valor de Nf (entre 0 e 100) é escolhido pelo usuário. Os coeficientes de cada ponto na média são calculados de forma que estes diminuam de forma linear com a distância (i) do vizinho do ponto central segundo a equação:

$$\text{Coeficiente}(i) = (1 + Nf - i) / ((1 + Nf) * (1 + Nf))$$

Multipasses:

Rotina baseada na anterior, isto é, um filtro triangular com 1 vizinho de cada lado do ponto sendo filtrado é aplicado Nf vezes ao sinal. Este filtro apresenta um corte mais suave dos componentes de maior frequência do canal, mas apresenta menores repiques da intensidade de corte destes componentes.

Média:

Rotina similar às anteriores em que cada ponto do sinal é substituído pela média simples deste e de $2(Nf)$ de seus vizinhos.

Mediana:

Substitui cada ponto por aquele ponto que é a mediana do conjunto de valores formado por este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

Máximo:

Substitui cada ponto por aquele ponto que é o de maior valor do conjunto de valores formado por este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

Mínimo:

Substitui cada ponto por aquele ponto que é o de menor valor do conjunto de valores formado por este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

Filtro passa alta:

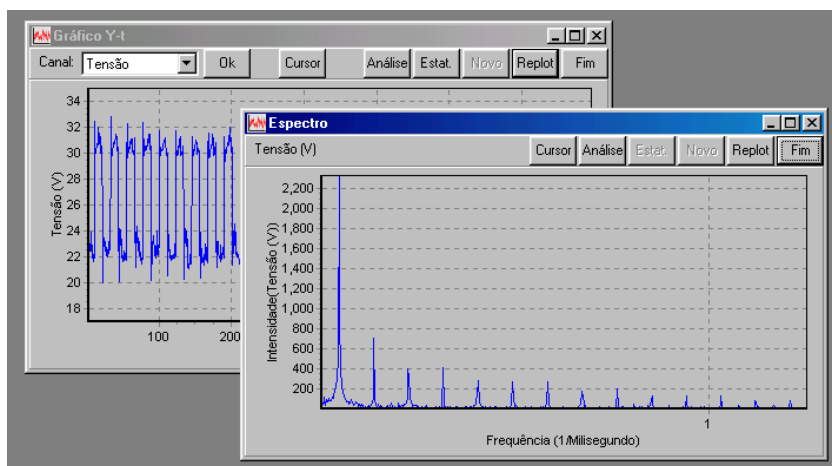
(Processo → Filtrar → Passa Alta)

Remove componentes de baixa frequência do sinal. Para fazer isto, esta rotina subtrai do canal original o mesmo filtrado com a rotina triangular, previamente subtraído de seu valor médio.

Espectro:

(Processo → Espectro)

Gera um gráfico de intensidade das componentes do sinal em função da frequência (espectro). A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado.



O gráfico tem uma barra de ferramentas com as **opções**:

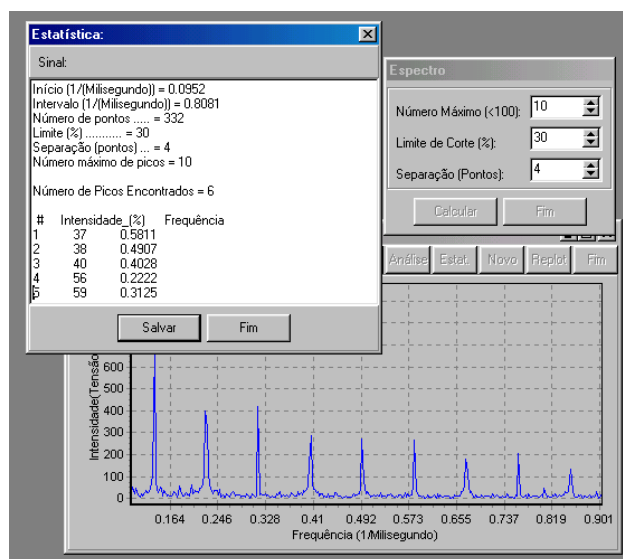
Canal: Seleciona o canal para gerar o espectro.

Ok: Calcula o espectro.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor.

Análise: Permite encontrar a intensidade relativa e a frequência de picos na parte do espectro que está sendo mostrada no gráfico. Este opção é controlada por uma caixa de diálogo que possui as opções: **Número máximo** de picos que serão considerados (máximo = 100), **limite de corte**, em porcentagem do maior pico (pico de intensidade menor serão desconsiderados) e **separação** (distância mínima, em números de pontos, para que dois picos sejam considerados como picos distintos) .

Replot: Restaura os limites iniciais do gráfico.



Operação:

Permite a realização de diferentes operações (soma, subtração, ...) entre canais de um sinal. As operações possíveis são:

Soma:

(Processo → Operação → Soma)

Calcula e mostra o gráfico da soma de dois canais. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e Canal2: Seleciona canais que serão somados.

Ok: Calcula a soma dos canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (soma) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas

automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**. *Replot*: Restaura limites iniciais do gráfico.

Subtração:

(Processo → Operação → Subtração)

Calcula e mostra o gráfico da diferença de um canal por outro. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e *Canal2*: Seleciona canais que serão subtraídos.

Ok: Calcula a diferença dos canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (subtração) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

Multiplicação:

(Processo → Operação → Multiplicação)

Calcula e mostra o gráfico da multiplicação de dois canais. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma

barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e *Canal2*: Seleciona canais que serão multiplicados.

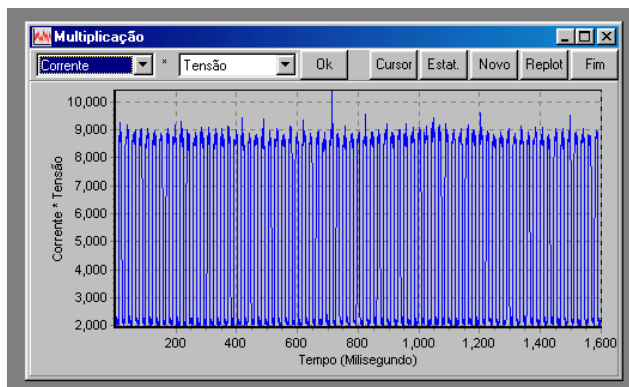
Ok: Calcula a multiplicação dos canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (multiplicação) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.



Divisão:

(Processo → Operação → Divisão)

Calcula e mostra o gráfico da divisão de um canal por outro. No caso de divisão de um valor por zero, o programa considera o resultado como igual a zero e informa ao usuário. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e *Canal2*: Seleciona canais que serão divididos.

Ok: Calcula a divisão entre os canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular

dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (divisão) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**. *Replot:* Restaura limites iniciais do gráfico.

Distância:

(Processo → Operação → Distância)

Calcula e mostra o gráfico da distância entre os pontos ($d = (P1^2 + P2^2)^{1/2}$) de dois canais. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal1 e Canal2: Seleciona canais que serão usados para o cálculo.

Ok: Calcula a distância entre os pontos dos canais e mostra no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (distância) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

Retificação:

(Processo → Operação → Retificação)

Retifica um canal (isto é, calcula o valor absoluto de seus pontos) e mostra o gráfico do resultado da operação. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal: Seleciona o canal que será retificado.

Ok: Retifica o canal e mostra o resultado no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (canal retificado) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

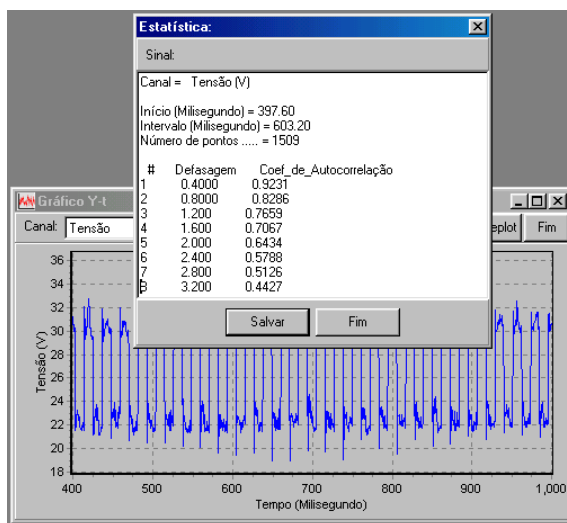
Análise: Calcula o número de picos e bases (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo mostrada neste item apresenta duas opções: *Limite de corte:* Valor da variável (y - o sinal retificado) que é usado para separar as bases e picos. Este valor pode ser alterado “clitando-se” com o “mouse” no gráfico no nível desejado da variável. *Rejeição de base:* Define o número máximo de pontos de uma base para a sua rejeição (por exemplo, se o valor 2 for escolhido, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas nos cálculos).

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

Autocorrelação:

(Processo → Operação → Autocorrelação)

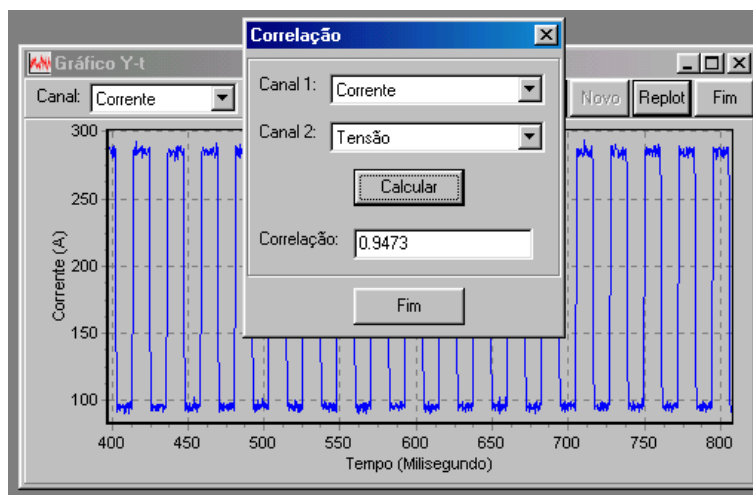
Calcula valores dos coeficientes de autocorrelação em um canal (ou no resultado de operação entre canais) para diferentes valores de defasagem.



Correlação:

(Processo → Operação → Correlação)

Calcula os coeficiente de correlação entre dois canais, podendo-se impor um atraso (defasagem) entre os canais. Esta função não atua em canais processados.



Derivação:

(Processo → Operação → Derivação)

Calcula a derivada de um canal ou do resultado de uma operação entre canais e a mostra em um gráfico. Esta operação é baseada no cálculo do coeficiente angular de uma reta que passa pelo ponto considerado e por 2Nf de seus vizinhos mais próximos. O valor de Nf pode ser escolhido pelo usuário. Quanto maior for este valor, menor será o nível de ruídos da derivada obtida, mas, também, menor será a sensibilidade desta para mudanças no canal original. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal: Seleciona o canal que será usado para o cálculo.

Ok: Calcula a derivada e mostra no gráfico.

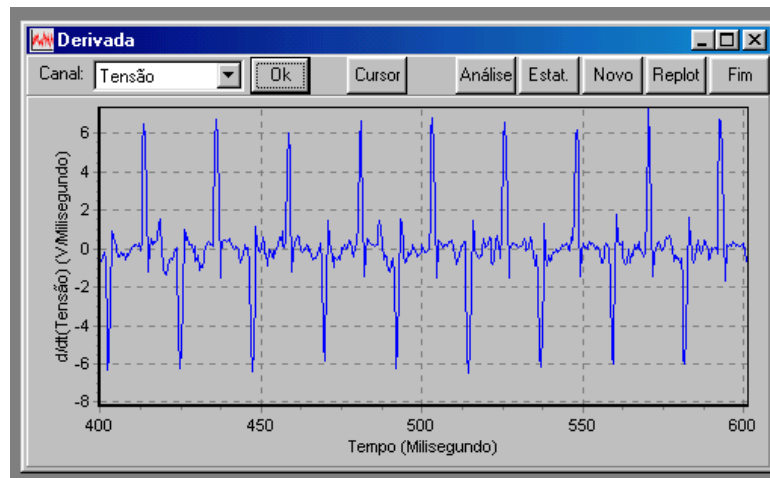
Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (derivada) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Análise: Calcula o número de picos e bases (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo mostrada neste item apresenta duas opções: *Limite de corte:* Valor da variável (y - o sinal retificado) que é usado para separar as bases e picos. Este valor pode ser alterado "clicando-se" com o "mouse" no gráfico no nível desejado da variável. *Rejeição de base:* Define o número máximo de pontos de uma base para a sua rejeição (por exemplo, se o valor 2 for escolhido, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas nos cálculos).

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.



Integração:

(Processo → Operação → Integração)

Calcula a integral de um canal desde o seu início e mostra o resultado em um gráfico. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. Este cálculo é baseado na aplicação da regra de Simpsom. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal: Seleciona o canal que será usado para o cálculo.

Ok: Calcula a integral desde o início até o final do canal e mostra o resultado no gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados (integral) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela

de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Análise: Calcula o número de picos e bases (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo mostrada neste item apresenta duas opções: *Limite de corte:* Valor da variável (y - o sinal integrado) que é usado para separar as bases e picos. Este valor pode ser alterado “clitando-se” com o “mouse” no gráfico no nível desejado da variável. *Rejeição de base:* Define o número máximo de pontos de uma base para a sua rejeição (por exemplo, se o valor 2 for escolhido, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas nos cálculos).

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

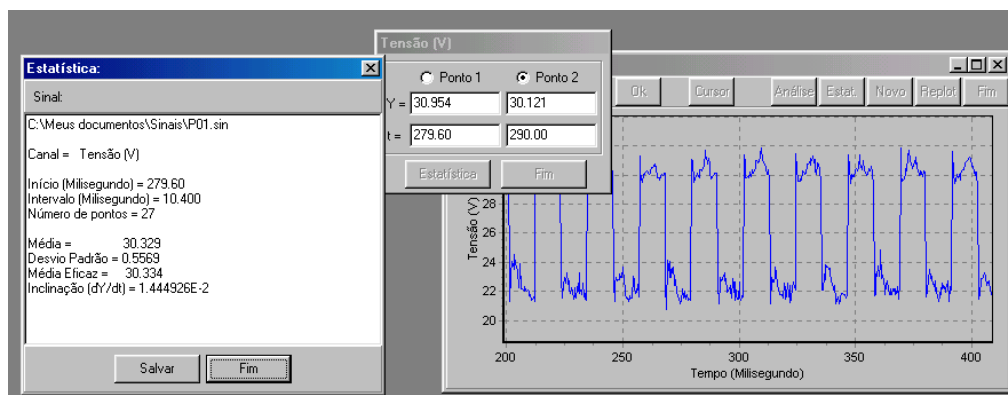
Gráfico Y-t:

(Gráfico → Y-t)

Mostra um gráfico Canal x Tempo. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida movendo-se o mouse e mantendo-se o seu botão direito apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Canal: Seleciona o canal que será mostrado.

Ok: Mostra o gráfico.



Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico com o cursor e calcular

dados estatísticos dos valores dos pontos entre dois limites estabelecidos pelo usuário.

Estatística: Calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico.

Novo: Insere os dados eventualmente alterados (por um filtro, por exemplo) como um novo canal do sinal. Na versão atual do programa, as informações do novo canal não atualizadas automaticamente nas janelas de gráficos já abertas (as janelas devem ser fechadas e abertas novamente), mas apenas na janela de informações do sinal. Estas informações podem se alteradas através do menu **Editar → Informações**.

Análise: Calcula o número de picos e bases (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo mostrada neste item apresenta duas opções: *Limite de corte:* Valor da variável (y) que é usado para separar as bases e picos. Este valor pode ser alterado "clitando-se" com o "mouse" no gráfico no nível desejado da variável. *Rejeição de base:* Define o número máximo de pontos de uma base para a sua rejeição (por exemplo, se o valor 2 for escolhido, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas nos cálculos).

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

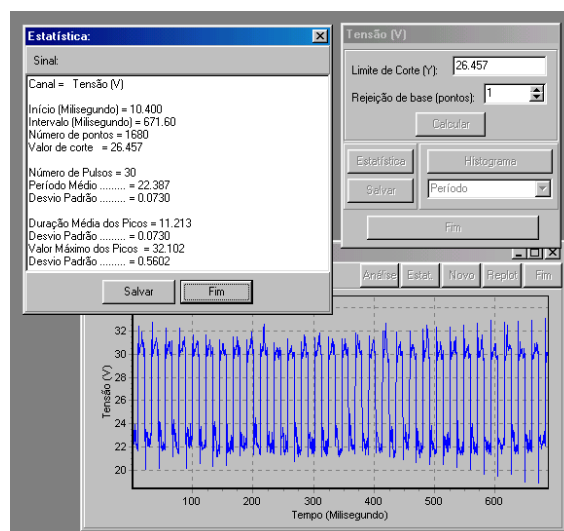


Gráfico Y-X:

(Gráfico → Y-X)

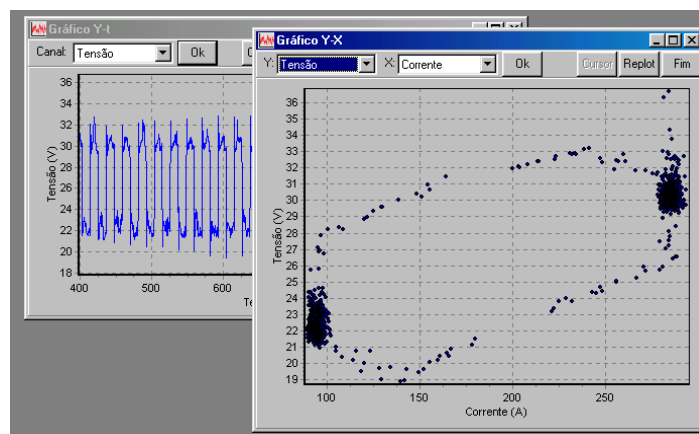
Mostra gráfico de um canal (Y) em função de outro (X). A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Y e X: Seleciona canais que serão usados no gráfico.

Ok: Mostra o gráfico.

Cursor: Permite obter valores de pontos no gráfico.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.



Histograma:

(Gráfico → Histograma)

Calcula e mostra histograma dos dados mostrados no gráfico ativo. A área mostrada pelo gráfico pode ser alterada desenhando-se um retângulo com o mouse enquanto o botão esquerdo deste é mantido apertado. Esta área pode ser movida mantendo-se o botão direito do mouse apertado. O gráfico tem uma barra de ferramentas com as opções:

Cursor: Mostra os valores de pontos no gráfico apontados com o cursor.

2X: Recalcula e mostra o histograma com um número duas vezes maior de divisões.

/2: Recalcula e mostra o histograma com um número duas vezes menor de divisões.

Replot: Restaura limites iniciais do gráfico.

