

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

Dissertação de Mestrado

**“Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com
arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico”**

Autor: Amadeu Resende

Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Abril/2007

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

Amadeu Resende

MAPEAMENTO PARAMÉTRICO DA SOLDAGEM GMAW COM
ARAMES DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO E AUSTENÍTICO

Dissertação de Mestrado 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

AGRADECIMENTOS

Desejo manifestar aqui meus agradecimentos, aos que de alguma ou outra forma contribuíram na realização deste trabalho.

Ao professor Paulo Modenesi, orientador, pela paciência e dedicação mostradas ao longo do desenvolvimento do presente trabalho.

À ACESITA S.A., pela oportunidade oferecida.

À UFMG e UFU pela oportunidade e apoio oferecidos.

Ao Centro de Pesquisas, nas pessoas dos pesquisadores e técnicos e à Assistência Técnica, nas pessoas de gerentes e colegas, pelo constante apoio que me brindaram ao longo de todo o curso.

Às empresas NOVAMETAL, AGA e UGINE pelo fornecimento de materiais e insumos.

Ao graduando Halinson pela grande ajuda nos trabalhos práticos.

E, finalmente, o meu grande agradecimento à Isabel, esposa, pela compreensão e apoio constantes.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	III
LISTADE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	X
RESULMO	XII
ABSTRACT.....	XIV
CAPÍTULO 01: INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 02: OBJETIVOS	18
CAPÍTULO 03: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Aços inoxidáveis ferríticos.....	19
3.2. Aços inoxidáveis ferríticos estabilizados.....	20
3.3. Arames de aços inoxidáveis ferríticos estabilizados para soldagem MIG	21
3.4. Transferência metálica	22
3.4.1. Transferência metálica do tipo curto circuito.....	22
3.4.2. Transferência do tipo globular	26
3.4.3. Transferência do tipo aerossol (<i>spray</i>).....	27
3.4.4. Transferência por arco pulsado.....	31
3.4.5. Outros tipos de transferências	33
3.5. Estabilidade do processo	34
3.6. Fatores que determinam o modo de transferência metálica.....	36
3.7. Corrente de transição	38
3.8. Métodos para análise e identificação dos tipos de transferência metálica	39
3.8.1. Oscilogramas de tensão e corrente	41
3.8.2 Filmagem de alta velocidade e shadowgrafia laser.....	42
3.9. Mapas de transferência metálica.....	44
CAPÍTULO 04. METODOLOGIA.....	47
4.1. Materiais	47
4.2. Equipamentos.....	48
4.3. Procedimento experimental	50
4.3.1. Fluxograma de atividades	50

4.3.2. Caracterização dos arames	41
4.3.3. Testes de soldagem.....	53
4.3.4. Verificação dos resultados.....	55
CAPÍTULO 05: RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1. Caracterização dos arames de soldagem	57
5.1.1. Composição química.....	57
5.1.2. Resistividade elétrica	58
5.1.3. Propriedades mecânicas	60
5.1.4. Qualidade superficial.....	61
5.2. Condições de soldagem.....	64
5.2.1. Parâmetros na soldagem por curto circuito	66
5.2.2. Estabilidade	69
5.2.3. Mapas de parâmetros	75
5.3. Transferência de metal.....	82
5.3.1. Determinação do tipo de transferência pelos oscilogramas	82
5.3.2. Mapas de transferências.....	88
5.4. Filmagem de alta velocidade.....	89
5.4.1. Mapas de transferências.....	89
5.4.2. Outras características.....	101
CAPÍTULO 06: CONCLUSÕES.....	106
CAPÍTULO 07: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	108
CAPÍTULO 08: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE 1 - RESULTADOS COMPLETOS DOS TESTES REALIZADOS NA UFU (FILMAGEM)	115
APÊNDICE 2 - RESULTADOS COMPLETOS REFERENTES AOS TESTES COM OS ARAMES 308LSi, 430Ti E 430LNb.....	119
APÊNDICE 3 – DETALHES DE OPERAÇÃO DO PROGRAMA SINAL.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW	24
Figura 3.2 – Representação esquemática da transferência por curto circuito.....	24
Figura 3.3 - Oscilograma típico da soldagem com transferência por curto circuito. Arame AWS E308 de 1,00mm de diâmetro e gás Ar-2%O ₂	25
Figura 3.4 - Oscilograma de tensão e corrente de um processo com transferência globular em 250ms (a) e 1,5s (b). Arame ER70S6 de 1,20mm de diâmetro e gás de proteção CO ₂	27
Figura 3.5 - Oscilograma de uma transferência por aerosol. Arame ER 70S6 de 1,20mm de diâmetro e gás Ar-4%CO ₂	29
Figura 3.6 - Transferência por aerosol axial (imagem obtida por filmagem de alta velocidade).....	29
Figura 3.7 - Transferência por aerosol com alongamento (imagem obtida por filmagem de alta velocidade).....	30
Figura 3.8 - Transferência por aerosol rotacional (imagem obtida por filmagem de alta velocidade).....	31
Figura 3.9 - Princípio da transferência pulsada: I _p – corrente de pico, I _b – corrente de base, t _p – tempo de pico e t _b – tempo de base	32
Figura 3.10 - Oscilogramas típicos de uma transferência por arco pulsado	32
Figura 3.11 - Transferência globular repulsiva (esquemático).....	33
Figura 3.12 - Freqüências de curto circuito (círculo escuro) e de oscilação da poça de fusão (círculo claro). Tensão de 16V, arame aço SG de 1,00mm de diâmetro e gás Ar-15%CO ₂	35
Figura 3.13 - Oscilogramas de transferências globular, aerossol e aerossol com alongamento. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O ₂	36
Figura 3.14 - Transição globular-aerossol (esquemática), MARQUES (2002)	39
Figura 3.15 - Montagem utilizada na técnica shadowgrafia.	43
Figura 3.16 - Oscilogramas e sinais de áudio utilizados em sincronização para uma transferência globular. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm	

de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O ₂	43
Figura 3.17 - Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem em sincronismo com imagens de alta velocidade obtidos para uma transferência com arco pulsado.....	44
Figura 3.18 - Mapa de transferência metálica da soldagem de alumínio	45
Figura 3.19 - Mapa de transferência metálica de aço inoxidável austenítico	46
Figura 4.1 - Montagem básica utilizada nos testes de soldagem	48
Figura 4.2 - Exemplo de aparelhagem utilizada nos testes de soldagem na UFU.....	49
Figura 4.3 - Fluxograma geral de atividades práticas.....	50
Figura 4.4 - Esquema de montagem utilizada na determinação da resistividade a frio..	51
Figura 4.5 - Esquema de montagem utilizada na determinação da resistividade a quente.....	52
Figura 5.1 - Curvas típicas do ensaio de tração para os três arames utilizados	61
Figura 5.2 - Foto da superfície dos arames com aumento de 200X: a) 430Ti; b) 430LNb e c) 308LSi	62
Figura 5.3 - Perfil de rugosidade medido para os arames: (a) 430LNb;(b) 308LSi e (c) 430Ti. Eixo vertical: rugosidade (µm); eixo horizontal: direção (mm).....	63
Figura 5.4 – Variação da corrente de soldagem em função da tensão para as velocidades de alimentação: a) 6m/min; b)10m/min	64
Figura 5.5 - Variação prevista de temperatura ao longo do eletrodo para diferentes valores de corrente de soldagem	65
Figura 5.6 - Gráfico do fator de curto circuito e tensão média para as velocidades de alimentação: a) 6m/min; b) 10m/min.....	67
Figura 5.7 - Oscilogramas de tensão para testes com arame 430LNb, com velocidade de alimentação de 4m/min. a) tensão de 16V e b) tensão de 18V	67
Figura 5.8 – Oscilogramas de tensão para testes com arame 430Ti, com velocidade de alimentação de 4m/min. a) tensão de 16V e b) tensão de 18V	68
Figura 5.9 - Derivada da função fator de curto circuito em relação à tensão média para as velocidades de alimentação de 6m/min e 10m/min.....	69
Figura 5.10 - Variação do desvio padrão da corrente com a tensão média para as velocidades de alimentação: a) 6m/min; b) 10m/min.....	70
Figura 5.11 - Variação do desvio padrão da corrente com a tensão média para o arame 430Ti para todas as velocidades de alimentação.....	71

Figura 5.12 - Variação do desvio padrão da corrente com a tensão média para o arame 430LNb para todas as velocidades de alimentação	71
Figura 5.13 - Oscilogramas de corrente para os arames 430LNb e 430Ti com velocidade de alimentação de 4, 6, 8 e 12m/min	72
Figura 5.14 - Período de transferência metálica em relação à tensão de referência para as velocidades de 6m/min e 10m/min.desvio padrão.....	73
Figura 5.15 - Visão dos cordões de solda (vista de cima): a)308LSi; b)430LNb; c)430Ti. Velocidade de alimentação de 10m/min e tensão 32V.....	74
Figura 5.16 - Visão dos cordões de solda (vista de topo): a)308LSi; b)430LNb; c)430Ti. Velocidade de alimentação de 10m/min e tensão 32V.....	75
Figura 5.17 - Mapa do parâmetro erro padrão da corrente para o 430Ti	76
Figura 5.18 - Mapa do parâmetro erro padrão da corrente para o 430LNb.....	77
Figura 5.19 - Mapa do parâmetro frequência de transferência (Hz) por curto circuito para o arame 430LNb	78
Figura 5.20 - Mapa do parâmetro frequência de transferência (Hz) por curto circuito para o arame 430Ti	78
Figura 5.21 - Mapa do parâmetro erro padrão da corrente para o 430Ti.....	79
Figura 5.22 - Mapa do parâmetro erro padrão da corrente para o 430LNb.....	80
Figura 5.23 - Mapa do parâmetro fator de curto circuito para o 430LNb	81
Figura 5.24 - Mapa do parâmetro fator de curto circuito para o 430Ti	81
Figura 5.25 - Fluxograma do critério para estabelecimento do tipo de transferência para os arames ferríticos.....	83
Figura 5.26 - Mapa de transferência para o arame 308LSi.....	88
Figura 5.27 - Mapa de transferência para o arame 430Ti.....	89
Figura 5.28 - Mapa de transferência para o arame 430LNb	89
Figura 5.29 - Mapa de transferência para o arame 430Ti com pontos observados nos filmes.	93
Figura 5.30 - Mapa de transferência para o arame 430LNb com pontos observados nos filmes	93
Figura 5.31 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 24V (teste realizado na UFU).	94
Figura 5.32 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 6m/min	

e tensão 26V (teste realizado na UFMG).....	94
Figura 5.33 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 20V (teste realizado na UFU)	95
Figura 5.34 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 22V (teste realizado na UFMG).	95
Figura 5.35 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 8m/min e tensão 30V (teste realizado na UFU).	96
Figura 5.36 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 8m/min e tensão 32V (teste realizado na UFMG).	96
Figura 5.37 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 10m/min e tensão 22V (teste realizado na UFU).	97
Figura 5.38 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 10m/min e tensão 24V (teste realizado na UFMG).....	98
Figura 5.39 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 24V (teste realizado na UFU).	98
Figura 5.40 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 22V (teste realizado na UFMG).....	99
Figura 5.41 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 10m/min e tensão 28V (teste realizado na UFU).	100
Figura 5.42 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 10m/min e tensão 30V (teste realizado na UFMG).....	100
Figura 5.43 - Imagens sincronizadas com oscilograma de corrente para o 430Ti. Tensão de 16V e velocidade de alimentação de 6m/min.	102
Figura 5.44 - Imagens sincronizadas com oscilograma de corrente para o 430LNb. Tensão de 24V e velocidade de alimentação de 6m/min.....	103
Figura 5.45 - Imagens sincronizadas com oscilograma de corrente para o 430Ti. Tensão de 24V e velocidade de alimentação de 6m/min	104
Figura 5.46 - Imagens sincronizadas com oscilograma de corrente para o 430Ti. Tensão de 30V e velocidade de alimentação de 8m/min	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação de transferência metálica pelo IIW	23
Tabela 4.1 - Composição química do metal base	47
Tabela 5.1 - Análise química dos arames	57
Tabela 5.2 - Valores de resistividade elétrica dos arames	58
Tabela 5.3 - Propriedades mecânicas dos arames.....	60
Tabela 5.4 - Resultados dos ensaios de <i>helix e cast</i>	64
Tabela 5.5 - Resultados referentes aos testes com o arame 308LSi	84
Tabela 5.6 - Resultados referentes aos testes com o arame 430Ti	85
Tabela 5.7 - Resultados referentes aos testes com o arame 430LNb	86
Tabela 5.8 -Valores de corrente de transição encontrados na literatura	87
Tabela 5.9 - Valores encontrados para o arame 430LNb	91
Tabela 5.10 - Valores encontrados para o arame 430Ti	91
Tabela A1.1 – Resultados completos dos testes com o arame 308LSi.....	115
Tabela A1.2 – Resultados completos dos testes com o arame 430Ti.....	116
Tabela A1.3 – Resultados completos dos testes com o arame 430LNb	117
Tabela A2.1-Resultados completos dos testes realizados na UFU (filmagem) dos arames 430Ti e 430LNb	119
Tabela A2.2 – Observações referentes aos dados da tabela A2.1.....	120

LISTA SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	–Ampère
CC	–Transferência por curto circuito
Cv	–Coeficiente de variação (%)
Da	–Diâmetro do arame
DBCP	–Distância bico de contato peça
Dg	–Diâmetro da gota
DP	–Desvio padrão relativo da corrente (erro médio da corrente)
DPc	–Desvio padrão da corrente
FC	–Frequência de curto circuito (Hz)
Fcc	–Fator de curto circuito
GL	–Transferência do tipo globular
GMAW	–Processo de soldagem a arco com arame sólido e proteção gasosa (= MIG/MAG)
IIW	–International Institute of Welding
Im	–Corrente elétrica média
I_t	–Corrente de transição
LABSEND	–Laboratório de Soldagem e Ensaios Não Destrutivos da Universidade Federal de Minas Gerais
LAPROSOLDA	–Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem da Universidade Federal de Uberlândia
MAG	–Soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa ativa (= GMAW)
MIG	–Soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa inerte (= GMAW)

SINAL	–Programa construído no LABSEND com o propósito de processar sinais de corrente e tensão de soldagem
SP	–Transferência do tipo aerossol ou <i>spray</i>
TF	–Tensão regulada na fonte ou tensão de referência
TM	–Tensão média
TT	–Tipo de transferência metálica
V	–Volts
W	–Velocidade de alimentação (m/min)
ρ	–Resistividade elétrica ($\Omega.m$)
Ω	–Unidade de resistência elétrica

RESUMO

A utilização de arames de aços inoxidáveis ferríticos para soldagem MIG/MAG tem aumentado cada vez mais na indústria em substituição aos consumíveis austeníticos para a união de aços inoxidáveis ferríticos. Além do menor custo, tem-se verificado que as soldas obtidas apresentam uma qualidade tão boa, ou mesmo melhor, que aquelas obtidas com arames austeníticos. Como se trata de uma aplicação relativamente nova, um número reduzido de trabalhos sobre essa aplicação foi publicado, o que é um fator limitador de uma utilização mais intensa desses arames na indústria, particularmente em nosso país. Dentro deste escopo, o presente trabalho explora a aplicação desses arames na soldagem MIG de um arame inoxidável ferrítico estabilizado, com enfoque nas características operacionais do processo e em comparação com a soldagem com arames de aço austenítico. Dois arames de aço inoxidável ferrítico estabilizado, um ao titânio (430Ti) e outro ao nióbio (430LNb), e um austenítico (308LSi), de diâmetro nominal 1,00mm, foram utilizados em testes de soldagem em chapas de aço inoxidável ferrítico estabilizado ao titânio e nióbio (439) de 5,00mm de espessura. Primeiramente, os arames foram caracterizados em termos de qualidade superficial, composição química, propriedades mecânicas e elétricas. Nos testes de soldagem, a velocidade de alimentação foi variada de 2 a 12m/min e a tensão de soldagem entre 12 e 32V de modo a varrer todos os campos onde é possível se obter os três tipos principais de transferências (curto circuito, globular e aerossol). Utilizou-se o gás de proteção $Ar2\%O_2$ na vazão de 15l/min e distância bico de contato peça de 20mm. A corrente e a tensão foram monitoradas com sistema de aquisição e depois analisadas com a ajuda do programa SINAL, desenvolvido no LABSEND (UFMG). Os valores obtidos da corrente média de soldagem, os desvios padrão da corrente e da tensão e de parâmetros derivados dos sinais de tensão para caracterizar a transferência por curto circuito foram comparados para os três arames. Procurou-se caracterizar, assim, diferenças no processo de soldagem, inclusive a estabilidade operacional, associadas com os arames e tentou-se definir campos de predominância de cada tipo de transferência metálica em termos de tensão, velocidade de alimentação e arame usado. Os resultados foram verificados através de filmagem em alta velocidade. A soldagem com o arame 430Ti apresentou uma estabilidade inferior à soldagem com os arames 430LNb e 308LSi em todas as

formas de transferência, apresentando desvios padrão de corrente mais altos. Apesar disto, com transferência por curto circuito, este arame parece operar com valores de tensão menores que os outros. O aspecto dos cordões de solda obtidos com o arame 430Ti apresentou uma qualidade inferior, com uma maior convexidade. Uma possível explicação para o pior desempenho do arame 430Ti é sua qualidade superficial significativamente inferior com uma rugosidade muito maior, que poderia provocar agarramentos do arame no conduíte, causando problemas de alimentação.

ABSTRACT

The use of stabilized ferritic stainless steel wires for GMAW welding in the industry has been increasing in the last years, replacing austenitic stainless steel wires for the welding of stabilized ferritic stainless steel. Besides its lower costs, the ferritic stainless steel weld present a similar, or even superior quality compared to austenitic welds. Considering that this development is relatively recent, there is still a small number of publications related to it, particularly in our country, and this may be a factor hindering a broader application of this consumable in the industry. The present work intends to contribute to increase the knowledge related to the application of these wires to the welding of the stabilized ferritic stainless steels. Two stabilized ferritic stainless steel wires, one of them stabilized with Ti (430Ti) and the other with Nb (430LNb), and one austenitic (308LSi), with nominal diameter of 1,00mm, were utilized for bead-on-plate welding tests of bistabilized ferritic stainless steel (439) plates 5.0 mm thick. Firstly, the wires were characterized in terms of their chemical analysis, surface quality, mechanical properties, cast and helix and electrical resistivity. In the welding trials, the wire feed rate was varied from 2 to 12 m/min and the voltage from 12 to 32 V to obtain the three main kinds of metal transfer (short circuit, globular and spray). The shielding gas mixture was Ar2%O₂ and the flow rate 15l/min. The current and voltage were monitored by a data acquisition system. The data were analyzed by the SINAL program which was developed in the LABSEND (UFMG). Several aspects like current, current standard deviation, short circuit time, and others were compared for the three wires in order to analyze different aspects of the process, including its relative stability. Metal transfer maps were built in terms of voltage and feed rate. The results were verified through high speed filming. It was verified that welding with the 430Ti wire tends to present less stability. The weld beads obtained with this wire showed a poorer bead aspect when compared with the others. One possible reason is its significant inferior surface quality.

CAPÍTULO 01: INTRODUÇÃO

Entre as principais vantagens do processo GMAW podem-se citar a facilidade de ser mecanizado ou automatizado, o uso de altas velocidades de soldagem, altas taxas de deposição, necessidade de limpeza mínima após soldagem, possibilidade de uso em todas as posições e boa penetração. Essas características tornam o processo adequado para a soldagem de alta produção e automatizada. Entre as suas limitações destacam-se a maior complexidade do equipamento e a dificuldade para o ajuste das condições de soldagem (em comparação com a soldagem com eletrodo revestido) e a baixa eficiência de sua proteção à presença de correntes de ar.

Possivelmente, um dos principais problemas da utilização da soldagem GMAW, em comparação com outros processos de soldagem a arco, é a sua maior sensibilidade a variações de seus parâmetros operacionais, incluindo entre estes as características do arame. Esta sensibilidade se traduz, entre outros aspectos, em mudanças na transferência metálica, e essa influencia em vários outros aspectos na soldagem. Entre estes aspectos estão: quantidade de respingos e de porosidade, geração de fumos, estabilidade, características do cordão de solda e possibilidade de soldagem em variadas posições.

Por motivos óbvios, a maior parte dos trabalhos sobre este processo de soldagem tem sido realizada para aços carbono. Um menor volume de informações existe para aços inoxidáveis, particularmente para os aços inoxidáveis ferríticos.

A utilização de arame de aço inoxidável ferrítico para a união destes aços surgiu para substituir os arames austeníticos que eram basicamente os únicos usados há poucos anos atrás e vem crescendo, principalmente na indústria automobilística, onde se utilizam componentes de aços inoxidáveis ferríticos estabilizados. A boa qualidade da solda nesses componentes, particularmente nos aspectos de resistência mecânica, à corrosão e à fadiga, é fundamental para a durabilidade do componente e atendimento às exigências ambientais.

O desenvolvimento de conhecimentos que permitam uma melhor aplicação desses arames na soldagem GMAW de aços como os tipos AISI 409, 439 e 441 é importante pois sua utilização é bastante recente e ainda há poucos trabalhos relativos à utilização desses materiais.

Alguns aspectos da formação da poça de fusão e outros aspectos metalúrgicos também têm sido estudados. Por outro lado, a literatura técnica sobre as características operacionais, particularmente sobre as características de transferência de metal com estes consumíveis é basicamente inexistente.

Neste contexto, o estudo das características operacionais do processo GMAW com estes materiais e a sua comparação com arames de aços inoxidáveis austeníticos é relevante pois permite conhecer melhor o comportamento de um consumível ainda pouco utilizado em nosso país. Esta comparação com os arames de aços inoxidáveis austeníticos poderá realçar as diferenças com um consumível de uso muito mais difundido na indústria e, portanto, melhor conhecido. Assim, a influência relativa da variação de diferentes parâmetros poderá ser comparada e isto poderá ajudar a adaptação de procedimentos de soldagem desenvolvidos para arames de aços inoxidáveis austenítico para arames ferríticos. O mapeamento de uma ampla faixa de parâmetros permitirá gerar informações que auxiliem no desenvolvimento de procedimentos de soldagem para condições diversas de soldagem de sistemas de exaustão. O desenvolvimento dos aços inoxidáveis ferrítico e da aplicação do processo GMAW para estes aços deverá levar a uma ampliação da utilização destes tipos de aços em estruturas e componentes soldados. Finalmente, a comparação das condições de operação na soldagem GMAW e das condições de transferência para materiais com propriedades diversas poderá contribuir para uma melhor compreensão deste processo de soldagem.

O presente trabalho envolveu um estudo comparativo da soldagem GMAW entre dois arames de aço inoxidável ferrítico e um arame de aço inoxidável austenítico. Foram levantadas e comparadas as características físicas e tecnológicas dos arames

(resistividade elétrica, deformação residual, propriedades mecânicas e condição superficial), feito um estudo da relação entre os parâmetros operacionais na deposição de cordões sobre chapa de aço inoxidável ferrítico, levando à criação de mapas operacionais do processo e um estudo inicial dos seus modos de transferência de metal. O estudo foi desenvolvido para uma ampla faixa de condições operacionais, além daquelas usualmente utilizadas na fabricação de sistemas de exaustão automotivos, através da aquisição, com sistemas digitais, dos sinais elétricos do processo, seu processamento em programas específicos, e da observação qualitativa de suas características operacionais. O estudo de transferência foi feito através da filmagem de alta velocidade com sombreamento por laser para condições operacionais selecionadas durante a etapa anterior para a construção dos mapas.

CAPÍTULO 02: OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho foi comparar a influência de três arames de aço inoxidável (dois ferríticos e um austenítico) no desempenho operacional da soldagem GMAW de um aço inoxidável ferrítico 439 estabilizado ao titânio e nióbio.

Em termos mais específicos, procurou-se:

- Determinar e comparar algumas características físicas, químicas e mecânicas dos arames que poderiam influenciar o desempenho destes em soldagem;
- Determinar e comparar os valores e a variação de diferentes parâmetros do processo de soldagem com os arames em uma ampla faixa de condição de soldagem;
- Estudar e comparar as características de transferência de metal com os arames de aço inoxidável ferrítico em algumas condições operacionais relacionadas.

CAPÍTULO 03: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Aços inoxidáveis ferríticos

Os aços inoxidáveis vêm sendo cada vez mais utilizados devido à sua grande versatilidade e características especiais, em particular a sua resistência elevada à corrosão em diversas situações. Dentre outros, destacam-se os tipos austeníticos e ferríticos. Os primeiros apresentam estrutura austenítica à temperatura ambiente, sendo a série 3XX a mais difundida. Para essa série, o níquel é o principal elemento austenitizante (estabiliza a austenita) e contém, no mínimo, 6% de níquel (ASTM A240, 2006). Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas de ferro e cromo, com teor de cromo de 11% a 27%, e baixo conteúdo de carbono e nitrogênio (LACOMBE, 2000), sendo o tipo AISI 430 o mais utilizado. Como o níquel é um insumo caro e negociado em bolsa de valores, há uma forte tendência para o desenvolvimento e maior utilização dos aços ferríticos. Além disso os aços inoxidáveis ferríticos apresentam desempenho melhor que os austeníticos em certas aplicações. O exemplo mais conhecido é a aplicação em sistemas de exaustão onde os austeníticos vêm sendo paulatinamente substituídos pelos ferríticos estabilizados. Algumas das propriedades que possibilitam a utilização dos aços inoxidáveis ferríticos em sistemas de exaustão são sua maior condutividade térmica e seu menor coeficiente de expansão térmica, se comparados com os austeníticos (GIOSA, 2003). Essa diferença leva a uma maior resistência à fadiga térmica, aumentando a vida útil de sistemas fabricados com aços ferríticos. Além disso, a temperatura dos coletores ou *manifolds* fabricados em ferríticos se estabiliza mais rapidamente durante a passagem dos gases quentes, o que mantém esses a uma temperatura mais elevada, favorecendo as reações químicas no catalisador. Além disto, diferentemente dos austeníticos, os mesmos são praticamente imunes a problemas de corrosão sob tensão. Uma possível explicação para seu melhor desempenho frente a este tipo de corrosão é que, devido à maior facilidade que existe de deslizamentos cruzados na estrutura ferrítica, não existem lugares preferenciais para o acúmulo de deslocamentos e, portanto, de tensões elevadas (GIOSA, 2003), sem as quais não ocorre o referido tipo de corrosão. Porém, os aços inoxidáveis ferríticos apresentam soldabilidade pior que os austeníticos. Para reduzir esse aspecto negativo, entre outras razões, desenvolveram-se

os aços ferríticos estabilizados que apresentam, atualmente, uma mais larga utilização na indústria do que os não estabilizados.

3.2. Aços inoxidáveis ferríticos estabilizados

A estabilização de aços inoxidáveis é uma técnica utilizada para promover ou melhorar determinadas propriedades do aço, tais como, soldabilidade, resistência à corrosão, etc. Os principais elementos estabilizadores são o titânio e o nióbio. Segundo SILVA (2000), um aço está estabilizado quando todo o carbono e o nitrogênio encontram-se na forma de carbonitreto de nióbio ou titânio. Os aços ferríticos 409, 439, 441, e 436 são estabilizados e amplamente utilizados em sistemas de exaustão automotivos. Os elementos estabilizadores formam, em temperaturas elevadas, precipitados de carbonitreto desses elementos e se evita, assim, a formação de carbonitreto de cromo. A precipitação de carbonitreto de cromo pode reduzir o teor de cromo dos contornos de grão o que baixa a resistência à corrosão nessas regiões. Além disso, os precipitados de Ti e Nb agem como controladores de crescimento de grãos quando o aço é exposto a altas temperaturas.

Uma estimativa para teores mínimos de Ti e Nb para estabilização simples de um aço é dada pelas relações (LACOMBE, 2000):

$$\% \text{ Nb} > 8,1 \times (\% \text{ C} + \% \text{ N})$$

$$\% \text{ Ti} > 4,7 \times (\% \text{ C} + \% \text{ N})$$

Considerando as relações estequiométricas para a formação dos carbonitreto destes elementos, pode-se chegar a uma relação um pouco diferente (SATO & TANOUE, 1995):

$$\% \text{ Nb} > 7,74 \times (\% \text{ C} + \% \text{ N})$$

$$\% \text{ Ti} > 4 \times \% \text{ C} + 3,42 \times \% \text{ N}$$

Outros elementos de liga podem ser adicionados para melhorar alguma propriedade específica. Um exemplo é Mo nos aços 434 e 436, usado para melhorar a resistência à corrosão por pites.

3.3. Arames de aços inoxidáveis ferríticos estabilizados para soldagem MIG

Há até poucos anos os aços inoxidáveis ferríticos eram soldados apenas com arames austeníticos, tais como AWS ER 308LSi e 307Si, para garantir uma qualidade adequada à solda. Recentemente, iniciou-se o desenvolvimento de arames de aço inoxidável ferrítico que podem dar uma boa qualidade às soldas destes aços e apresentarem adicionalmente um custo menor que os arames austeníticos. Os exemplos são os arames do tipo 430Ti, 430LNb e 409Nb. Esses arames têm sido usados de forma crescente na indústria, principalmente na automotiva.

O desenvolvimento desses arames e o início de sua utilização no Brasil levantaram a necessidade de um maior conhecimento de sua influência nas características operacionais no processo GMAW para a soldagem de chapas de aços inoxidáveis ferríticos estabilizados.

Estudos comparativos (RENAUDOT et al, 2000) que consideraram testes de fadiga térmica e corrosão em juntas soldadas pelo processo GMAW, com o arame 430LNb, mostram que estas apresentam excelente qualidade quando comparadas com as juntas soldadas com arames de aço inoxidável austenítico AWS ER 308LSi e 307Si.

Visando também a obtenção de juntas soldadas com propriedades mecânicas adequadas, INUI et al (2003) obtiveram bons resultados, com uma técnica que promovia a formação de óxidos e nitretos em soldas para controle do tamanho de grão, utilizando arames ferríticos estabilizados. Arames com elementos estabilizadores em quantidades variadas foram testados e as soldas analisadas. Verificaram que os nitratos formados são mais eficazes para refino de grão que os óxidos formados dos mesmos metais alumínio, titânio e nióbio.

3.4. Transferência metálica

Entende-se por transferência metálica a maneira ou modo pelo qual o metal líquido se transfere da ponta do eletrodo para a poça de fusão.

Há basicamente três modos de transferência metálica que são amplamente aceitos e mais facilmente detectados. São eles: curto-circuito, globular e aerossol (também conhecido como *spray*, ou goticular). Há outros modos que podem ser considerados como uma subdivisão dos mencionados acima que são por exemplo o aerossol rotacional, aerossol axial, aerossol com alongamento ou modos obtidos por formas especiais de operação do equipamento cujo principal modo é o chamado arco pulsado.

O modo de transferência na soldagem GMAW é influenciado pelo tipo e valor da corrente de soldagem, polaridade e tensão no arco, diâmetro e composição do eletrodo e gás de proteção, entre outros.

O conhecimento das características e o bom entendimento dos modos de transferência são imprescindíveis para o melhor controle e adequação do uso da soldagem GMAW. A seguir, é feita uma breve descrição dos modos de transferência metálica mais conhecidos.

A Tabela 3.1 resume os principais modos de transferência segundo classificação do IIW e a figura 3.1 ilustra estes modos (LANCASTER, 1986).

3.4.1. Transferência de tipo curto-circuito

Esse tipo de transferência ocorre para baixos valores de corrente e tensão de soldagem e para quaisquer gases de proteção. É normalmente utilizado com eletrodos com diâmetros mais finos para soldagem fora de posição ou na soldagem de chapas finas.

Tabela 3.1 – Classificação de transferência metálica pelo IIW (LANCASTER, 1986, adaptado por MODENESI, 2004).

Tipo de Transferência	Exemplo de Processos de Soldagem
1. Vôo Livre	
1.1. Globular	
1.1.1. Globular	GMAW - baixa corrente
1.1.2. Repelida	GMAW – com proteção de CO ₂
1.2. Goticular ou Aerossol	
1.2.1. Projetado	GMAW - corrente intermediária
1.2.2. Com alongamento	GMAW – corrente média
1.2.3. Rotacional	GMAW – corrente elevada
1.3. Explosiva	SMAW
2. Por Contato	
2.1. Curto Circuito	GMAW – com curto circuito
2.2. Contínua	Soldagem com adição de metal
3. Protegida por Escória	
3.1. Guiada pela parede	SAW
3.2. Outros tipos	SMAW, FCAW, ESW, etc

A gota que se forma na ponta do eletrodo, devido à fusão do mesmo, vai aumentando de diâmetro até tocar a poça de fusão antes de se destacar do eletrodo, formando um curto-circuito. A quantidade de calor transferida à peça tende a ser menor quando comparada a outros tipos de transferências e, conseqüentemente, a penetração tende a ser menor. Esse modo de transferência é caracterizado por uma maior instabilidade no arco e possível formação de uma quantidade elevada de respingos. A formação de respingos pode ser controlada através da seleção adequada dos parâmetros de soldagem e fonte de energia, suavizando os curtos-circuitos. A figura 3.2 ilustra, esquematicamente, a transferência por curto circuito e a figura 3.3 mostra um oscilograma real de uma transferência por curto circuito.

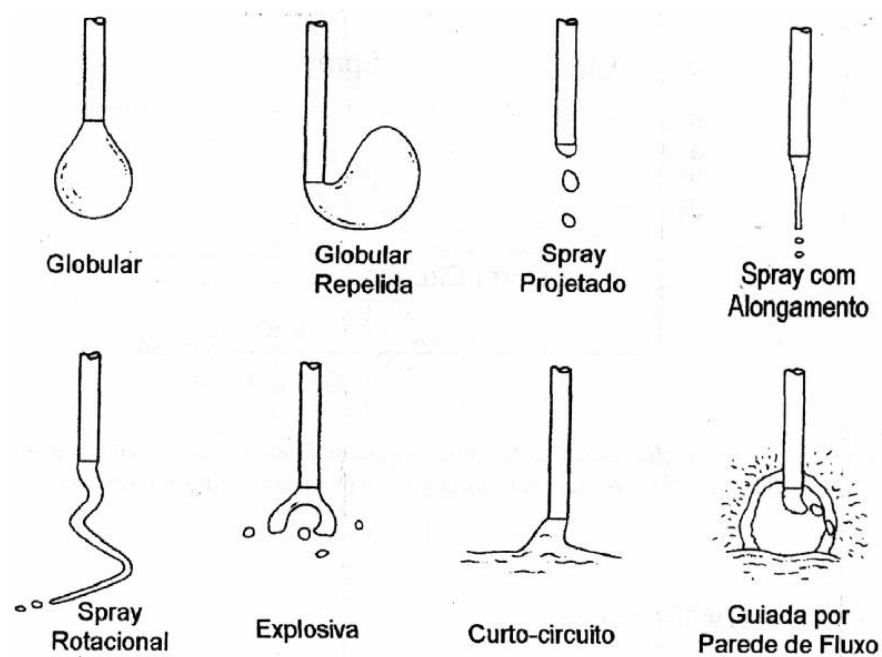


Figura 3.1- Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW (LANCASTER, 1986).

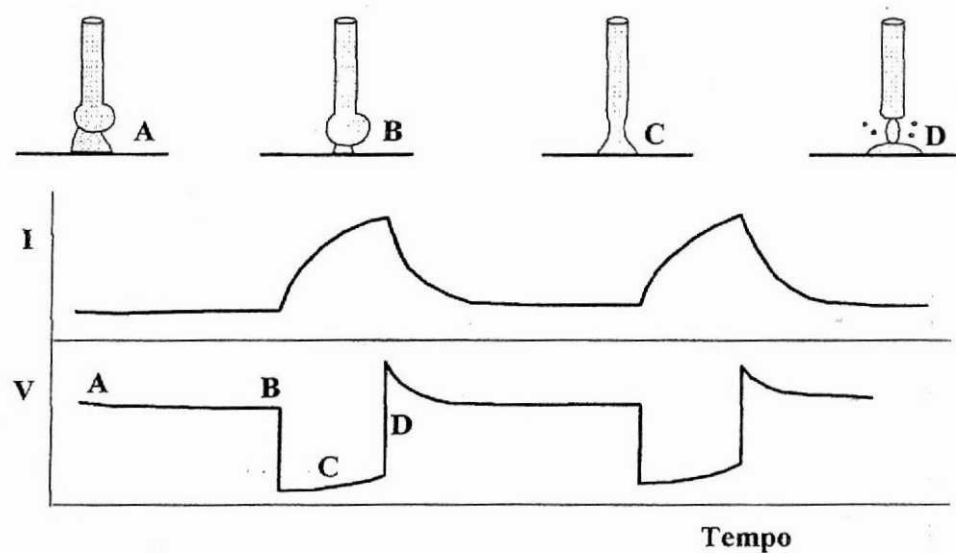


Figura 3.2 – Representação esquemática da transferência por curto circuito (MODENESI, 2004).

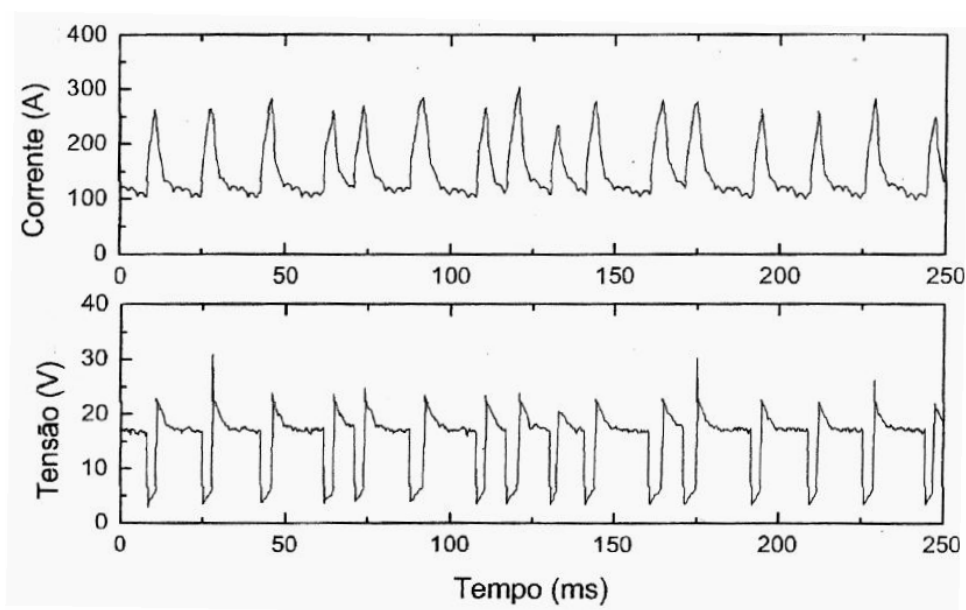


Figura 3.3 - Oscilograma típico da soldagem com transferência por curto circuito. Arame AWS ER308 de 1,0 mm de diâmetro e gás Ar-2%O₂ (MODENESI, 2004).

Como principais variáveis neste modo de transferência, pode-se citar a indutância e a tensão. A indutância regula a taxa de variação da corrente elétrica durante a soldagem. Ela permite o controle do efeito de constrição, também chamado efeito *pinch*, do eletrodo durante o aumento da corrente elétrica no instante do curto circuito. A associação entre este efeito e a da tensão superficial provoca a ruptura do filete fluido de metal formado entre o eletrodo e a poça de fusão. A gota pode ser transferida de uma forma muito brusca, caso a corrente suba a uma taxa muito alta (baixa indutância), podendo gerar excesso de respingos e instabilidade do arco. No caso de uma taxa muito baixa (alta indutância), o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da ruptura do filete líquido, causando a interrupção do processo.

As condições operacionais da soldagem com transferência por curto circuito podem ser caracterizadas através do estudo de oscilogramas de corrente e tensão do processo (figura 3.3). Alguns parâmetros derivados destes oscilogramas e que podem ser utilizados para essa finalidade são o período de transferência de metal (T), o tempo de

duração de curto circuito (t_{cc}) e o fator de curto circuito (F_{cc}). Essas variáveis estão ligadas pela seguinte expressão:

$$F_{cc} = \frac{t_{cc}}{T} 100 \quad (3.1)$$

O fator de curto circuito indica, em %, a fração do tempo durante a soldagem em que o arame está em contato com a poça de fusão, isto é, em curto circuito.

3.4.2. Transferência do tipo globular

Ocorre, em geral, para baixas densidades de corrente mas para valores intermediários de tensão de soldagem. Ocorre para qualquer tipo de gás de proteção. Para misturas ricas em CO_2 e hélio, esta forma de transferência ocorre em uma faixa mais ampla de corrente.

O diâmetro médio das gotas de metal líquido varia com a corrente e tende a diminuir com o aumento da mesma. Normalmente, o diâmetro das gotas é maior que o diâmetro do eletrodo. Como o destacamento das gotas é feito pela ação da gravidade, esse tipo de transferência não é utilizado para soldagem fora de posição. A transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado. A quantidade de calor transferida à peça a ser soldada é intermediária, comparando com os outros modos de transferência. Pode ainda gerar falta de penetração, falta de fusão ou reforço excessivo do cordão de solda. A figura 3.4 mostra oscilogramas de corrente e tensão de uma transferência globular. Observa-se neste oscilograma uma variação de tensão e corrente de soldagem típicas do destacamento de uma gota de metal.

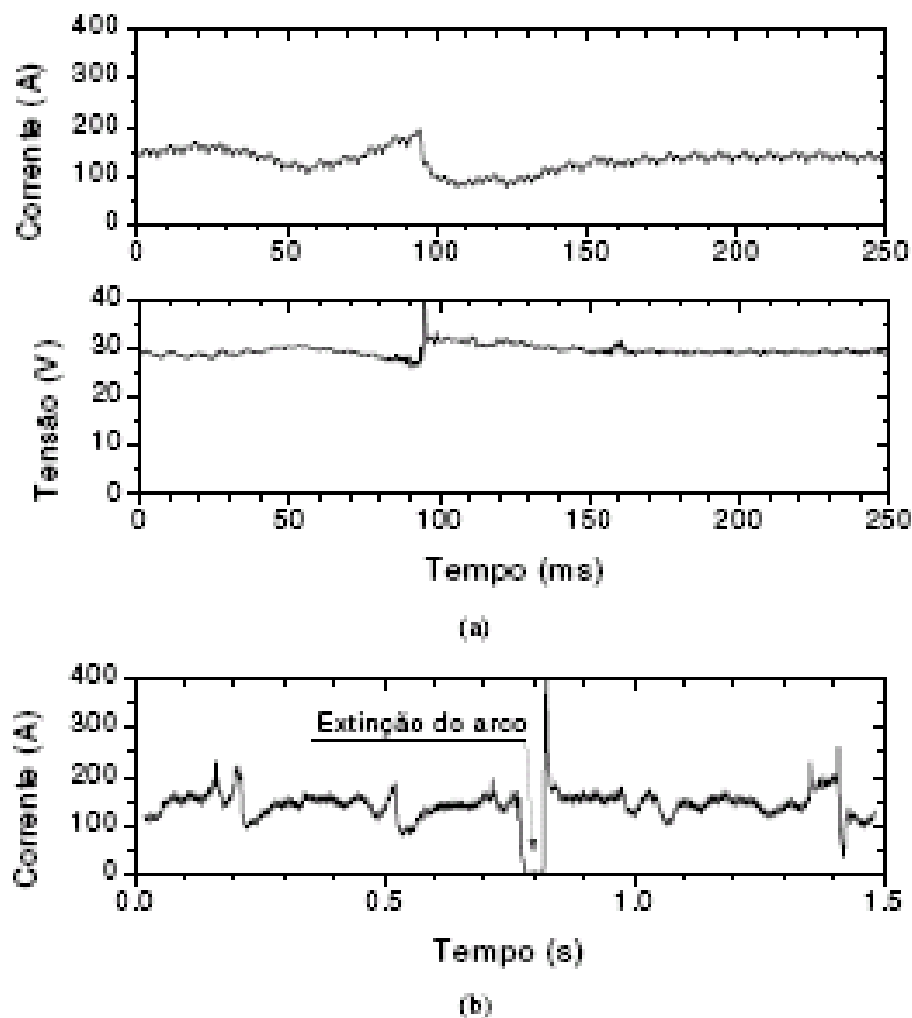


Figura 3.4 - Oscilogramas de tensão e corrente de um processo com transferência globular em 250ms (a) e 1,5s (b). Arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção CO₂ (MODENESI, 2004).

3.4.3. Transferência do tipo aerossol (*spray*)

Esse tipo de transferência ocorre para elevadas densidades de corrente e quando se usa argônio ou misturas de proteção ricas em argônio. Com estas misturas, à medida que se aumenta a corrente de soldagem, diminui o tamanho médio das gotas de metal líquido que é transferido para a peça. A partir de um certo valor de corrente, o modo de transferência passa de globular para aerossol. A esse nível de corrente dá-se o nome de corrente de transição globular/aerossol.

Nesse modo de transferência, as gotas metálicas sofrem a ação de elevadas forças de origem eletromagnética que são responsáveis pela diminuição de seu tamanho e sua aceleração. A redução do tamanho das gotas é acompanhada pelo aumento do número de gotas que se desprendem do eletrodo. A taxa de transferência das gotas pode variar de um pouco menos de 100 a centenas de gotas por segundo quando a velocidade de alimentação do eletrodo aumenta de aproximadamente 42 a 340mm/s (2,4 a 20,4m/min) (WELDING HANDBOOK, 1991).

Devido ao elevado tamanho da poça de fusão em consequência das altas correntes, esse modo de transferência não é indicado para utilização fora da posição plana. A figura 3.5 mostra oscilogramas de corrente e tensão de uma transferência tipicamente aerossol. A literatura considera três subtipos de transferência aerossol: aerossol axial, com alongamento e rotacional.

Transferência do tipo aerossol axial ou projetado

É o modo de transferência aerossol obtido para corrente próxima da de transição, sendo caracterizado por gotas com diâmetro igual ou ligeiramente inferior ao diâmetro do eletrodo. A ponta do eletrodo pode se tornar afunilada durante a formação das gotas, porém esse afunilamento é curto, menor ou igual do que o diâmetro do eletrodo (SCOTTI et al., 1998). A taxa de transferência é maior do que em curto-circuito ou globular. A figura 3.6 ilustra esse modo de transferência metálica.

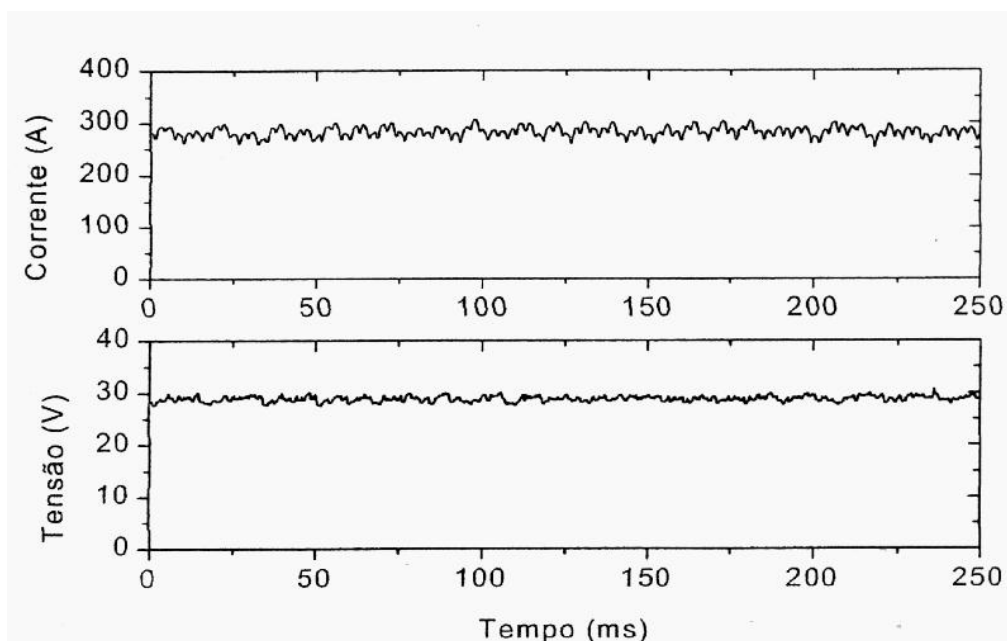


Figura 3.5 - Oscilograma de uma transferência por aerossol. Arame ER 70S6 de 1,20mm de diâmetro e gás Ar-4%CO₂ (MODENESI, 2004).



Figura 3.6 - Transferência por aerossol axial (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BALSAMO, 2000).

Transferência do tipo aerossol com alongamento

Nesse modo de transferência, que ocorre para valores de correntes mais elevados que no caso anterior, as gotas são destacadas com tamanhos menores do que no modo aerossol axial. As gotas são lançadas da extremidade de uma ponta alongada (afunilada) do eletrodo, cujo comprimento é maior do que o diâmetro do eletrodo. A figura 3.7 ilustra esse modo de transferência.



Figura 3.7 - Transferência por aerossol com alongamento (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BALSAMO, 2000).

Transferência do tipo aerossol rotacional

É o modo de transferência no qual gotas muito pequenas são lançadas da extremidade do eletrodo com ponta bastante alongada. Nesta ponta acontece um movimento rotacional em forma de espiral, que caracteriza esse modo de transferência. A figura 3.8 ilustra esse modo de transferência. Esse tipo de transferência já não ocorre com estabilidade como as transferências aerossol com alongamento e axial (KIM & EAGAR, 1993).



Figura 3.8 - Transferência por aerossol rotacional (imagem obtida por filmagem de alta velocidade) (BALSAMO, 2000).

3.4.4. Transferência por arco pulsado

Esse tipo de transferência ocorre, na realidade, como uma variante do processo GMAW onde há um controle das variáveis do processo de modo a obter uma transferência similar à por aerossol porém para valores de corrente média inferior à corrente de transição.

Nesse modo de transferência, o equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente. No primeiro, a corrente de base (I_b) é mantida baixa de modo que não há transferência, mas somente o início da fusão do arame. No segundo, a corrente de pico (I_p) é superior à corrente de transição globular/aerossol (I_t), ocasionando a transferência, em condições ótimas de operação, de uma única gota. Assim, se consegue uma transferência com características de aerossol e uniforme com corrente média menor que a de transição. Desta forma, consegue-se soldar espessuras menores do que as possíveis com transferência aerossol e em todas as posições. A figura 3.9 ilustra o princípio de funcionamento da transferência por arco pulsado.

Uma limitação desse modo de transferência é a introdução de novas variáveis no processo GMAW o que dificulta ainda mais a seleção dos parâmetros de soldagem. A figura 3.10 mostra oscilogramas de uma operação com transferência por arco pulsado.

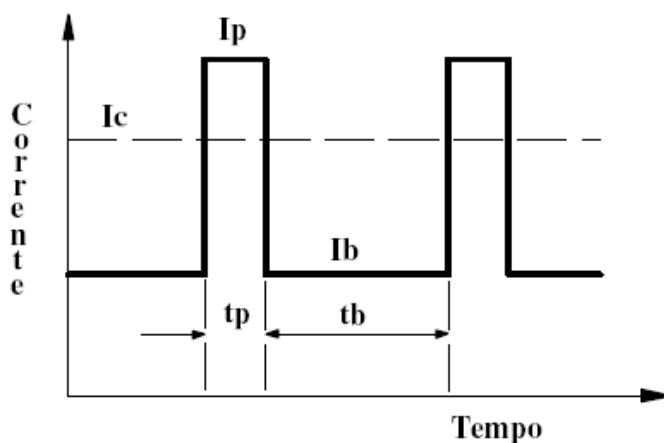


Figura 3.9 - Princípio da transferência pulsada: I_p – corrente de pico, I_b – corrente de base, t_p – tempo de pico e t_b – tempo de base (MODENESI, 2004).

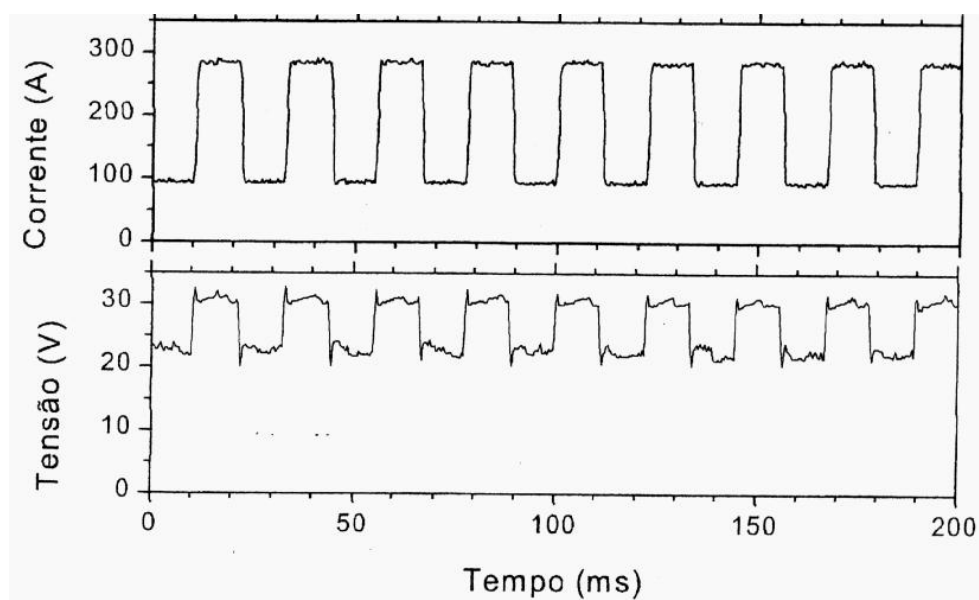


Figura 3.10 - Oscilogramas típicos de uma transferência por arco pulsado (MODENESI, 2004).

3.4.5. Outros tipos de transferências

SCOTTI et al (1998) com eletrodo de aço inoxidável austenítico, FERRARESI et al (2005) com arame tubular de aço inoxidável ferrítico e FIGUEIREDO & FERRARESI (2001) com arame de alumínio apresentam e classificam modos mistos de transferência. Entre esses, SCOTTI et al (1998) apresentam uma classificação para soldagem com arame de aço inoxidável austenítico (308L) com gases de proteção à base de argônio. Esta inclui as transferências do tipo misto globular/curto-circuito, globular/curto circuito/globular, globular/curto circuito/aerossol axial, globular/curto circuito/aerossol com alongamento, globular/aerossol axial, globular/aerossol com alongamento, curto circuito/ricocheteamento, aerossol com alongamento/curto circuito/ricocheteamento.

Transferência do tipo globular repulsiva: nesse tipo de transferência, a gota é defletida para fora do eixo do eletrodo ou repelida para longe da poça de fusão e acontece normalmente quando se usa eletrodo negativo ou proteção rica em CO₂. Imagina-se estar associada ao aparecimento de forças magnéticas ou de reações devidas à geração de vapores ou plasma na gota. A utilização desse tipo de transferência é restrita basicamente por estar associada a um arco instável e significativos volumes de respingos. A figura 3.11 ilustra esse modo de transferência.

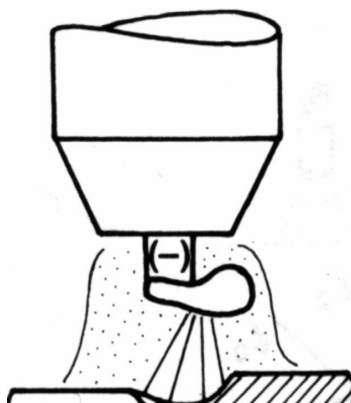


Figura 3.11 - Transferência globular repulsiva (esquemático) (MODENESI, 2004).

3.5. Estabilidade do processo

A estabilidade de um processo de soldagem a arco com eletrodo consumível, tema bastante complexo e muito estudado, ao mesmo tempo depende das condições do arco e de transferência de metal, além de vários outros fatores como as condições de alimentação do arame e as características da fonte de energia. Antes, avaliada apenas com base em características elementares do processo, tais como ruídos e respingos, hoje, a estabilidade, é avaliada fazendo-se uso de vários meios e técnicas. Devido às suas características, a transferência por curto circuito é a mais utilizada na soldagem GMAW e também muito estudada. Para se avaliar a estabilidade nesse modo de transferência, vários estudos foram feitos.

Por exemplo, MODENESI & AVELAR (1997), BAIXO (1990), BAIXO & DUTRA (1991) utilizaram o período de transferência de metal (T) para avaliar a estabilidade. Este período apresentaria um valor mínimo para determinados valores de tensão onde, o processo seria mais estável. MODENESI & AVELAR (1997) mostraram que esta condição corresponderia a de menor volume de respingos gerados com esta forma de transferência.

Segundo HERMANS & OUDEN (1999) as principais causas de instabilidade na transferência por curto circuito são: curtos circuitos instantâneos, falha na reinginição do arco e variações na velocidade de alimentação. Os mesmos utilizaram outro critério para avaliar a estabilidade. A estabilidade seria maior quando a frequência de curto circuito estivesse sincronizada com a oscilação do metal líquido na poça de fusão. A figura 3.12 mostra as frequências de curto circuito e de oscilação da poça em função da velocidade de alimentação do arame, indicando, segundo os autores que quando as frequências de transferência e do metal fundido a poça se igualam, o processo se torna estável.

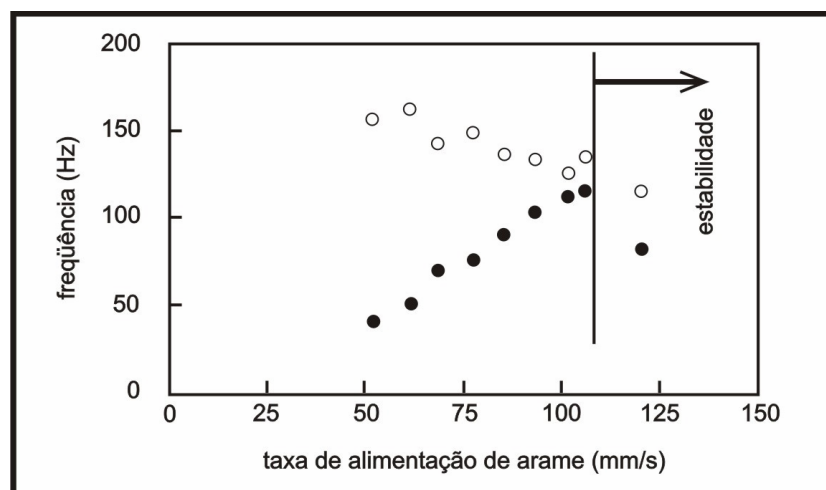


Figura 3.12 - Frequências de curto circuito (círculo escuro) e de oscilação da poça de fusão (círculo claro). Tensão de 16V, arame aço SG2 de 1,00mm de diâmetro e gás Ar-15%CO₂. (HERMANS & OUDEN, 1999).

A análise da curva do fator de curto circuito em função da tensão média pode ser uma maneira de se caracterizar a transferência por curto circuito. A curva se aproxima de uma curva sigmóide, que pode ser descrita por uma função do tipo (MODENESI & AVELAR, 1997):

$$F_{cc} = F_{MIN} + (F_{MAX} - F_{MIN}) / (1 + \exp((V - V_{50}) / \Delta V)) \quad (3.2)$$

onde F_{MAX} e F_{MIN} são valores de fator de curto máximo e mínimo estimados, V_{50} é a tensão para a qual $F_{cc} = (F_{MAX} - F_{MIN}) / 2$ e ΔV é o intervalo de variação de F_{cc} em torno de V_{50} . A redução de F_{cc} com o aumento da tensão de soldagem e a tendência deste parâmetro atingir zero para tensões suficientemente elevadas, caracteriza a transição de uma operação por curto circuito para algum outro tipo de transferência.

Nas transferências aerossol e globular, a estabilidade pode ser avaliada, por exemplo, pelo nível de respingos e pelo desvio padrão da corrente ou da tensão. No caso da transferência aerossol, o processo é, em geral, bastante estável, com geração baixa de respingos e desvio padrão de corrente ou tensão muito baixos. Já a transferência globular é mais instável do que a aerossol, com níveis de respingos e desvios padrão maiores devido ao tamanho das gotas. A figura 3.13 mostra aspectos de uma pequena

parte de um oscilograma de tensão com transferências globular, aerossol e aerossol com alongamento. Nessa figura podem-se observar as diferenças de variação da tensão para 3 tipos de transferências.

QUINN et al (1993) também associam possíveis instabilidades do processo às variações na velocidade de alimentação do arame devido ao desgaste do tubo de contato. Este tipo de problema é mais comum na soldagem com corrente elevada.

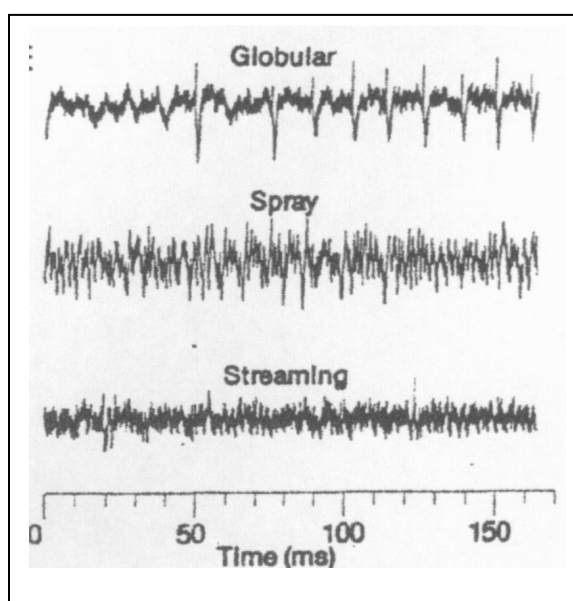


Figura 3.13 - Oscilogramas de transferências globular, aerossol e aerossol com alongamento. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O₂ (JONSON et al, 1991).

3.6. Fatores que determinam o modo de transferência metálica

Segundo BRANDI et al. (2000) e WELDING HANDBOOK (1991), os principais fatores que influenciam e podem determinar o modo de transferência metálica são: valor e polaridade da corrente de soldagem, tensão de soldagem, diâmetro e composição química do eletrodo e gás de proteção.

A corrente de soldagem influencia tanto pela sua intensidade quanto pelo seu tipo. No caso de CC+ (corrente contínua com polaridade reversa ou eletrodo positivo), tipo de corrente geralmente utilizado em GMAW, conseguem-se os três modos básicos de transferência quando a proteção é rica em argônio. No caso de CC- (corrente contínua com polaridade direta ou eletrodo negativo), há uma repulsão das gotas pelas forças dos jatos de plasma e de vapor metálico. A gota é empurrada para cima e desviada de sua trajetória normal. Assim, a transferência se torna instável (globular repulsiva), trazendo dificuldades para o processo. Neste caso o modo predominante é o globular e não se consegue variar o modo de transferência para aerossol. A corrente alternada normalmente não é utilizada comumente pois o arco é extinto a cada meio ciclo quando a corrente vai zero, trazendo instabilidade ao processo (BRACARENSE, 2003). Apesar disto, recentemente o processo de soldagem GMAW com corrente alternada tem sido aplicado para a soldagem do alumínio (FARIAS et al., 2005).

O argônio e as misturas ricas em argônio permitem obter os três tipos básicos de transferência, sendo que a transferência por aerossol só é obtida neste caso. Com misturas à base de gás carbônico, hélio ou nitrogênio normalmente é observada a transferência por curto circuito, globular e globular repulsiva (KIM & EAGAR, 1993). Adições de hélio e dióxido de carbono em misturas ricas em argônio permitem aumentar a faixa de corrente de soldagem na transferência aerossol projetado (KIM & EAGAR, 1993). Já STENBACKA & PERSSON (1987) sugerem, para aço inoxidável, as misturas $Ar+32\%He+3\%CO_2+1\%H_2$ e $Ar+30\%He+1\%O_2$ como tendo propriedades muito boas para a transferência por curto circuito e boas para aerossol. Segundo esses autores, adições de O_2 e CO_2 ao Ar ou He, na soldagem com transferência aerossol, estabilizam o arco, aumentam a penetração e reduzem a viscosidade da poça de fusão. Eles também defendem o benefício de menores adições (em torno de 40%) de He em misturas a base de Ar em transferência aerossol e arco pulsado e misturas com altos níveis de He (em torno de 85%) na transferência por curto circuito.

A tensão de soldagem está intimamente ligada ao comprimento de arco por isso ambos são utilizados com o mesmo sentido, ou seja, mantendo-se as demais variáveis do processo constantes, a tensão no arco é diretamente proporcional ao comprimento do

arco (BRACARENSE, 2003). A tensão é uma variável crítica a ser controlada pois pequenas flutuações no comprimento do arco podem desestabilizar o processo. Por exemplo, no modo de transferência spray com argônio, um arco muito curto pode provocar pequenos curtos. Em geral, a tensão é mais facilmente monitorada do que o comprimento de arco. Geralmente, na indústria, se utilizam níveis de corrente mais altos para transferência por aerossol, níveis intermediários para globular e níveis ainda mais baixos para curto circuito. A tensão também influencia na geometria do cordão: tensões muito altas podem causar porosidade, respingos e trincas enquanto tensões mais baixas podem causar cordões mais estreitos e maior penetração (BRACARENSE, 2003).

3.7. Corrente de transição

Corrente de transição é o valor de corrente que define, de forma convencional, os limites entre dois modos de transferência. Basicamente, dois tipos de corrente de transição podem ser definidos (BRANDI et al., 2000): CTGA - corrente de transição da transferência globular para aerossol axial (ou projetado) - e CTAR - corrente de transição da transferência aerossol axial para aerossol rotacional. A figura 3.14 mostra, esquematicamente, a faixa de corrente associada com a definição da CTGA. Na prática, a mudança de modo de transferência ocorre em uma faixa de corrente, o uso de um valor único de corrente é apenas uma convenção.

Segundo BRANDI et al. (2000) a CTGA tende a ser menor para metais com baixa resistividade elétrica e a CTAR é diminuída para metais de alta resistividade elétrica. Dessa forma, espera-se que a CTGA para um eletrodo de aço inoxidável ferrítico seja menor que a de um eletrodo de aço inoxidável austenítico, pois, de forma geral e em condições similares, um aço inoxidável ferrítico apresenta menor resistividade elétrica que um austenítico (METALS HANDBOOK, 1961). Espera-se também que a CTAR para um eletrodo aço inoxidável ferrítico seja maior que a de um eletrodo de aço inoxidável austenítico.

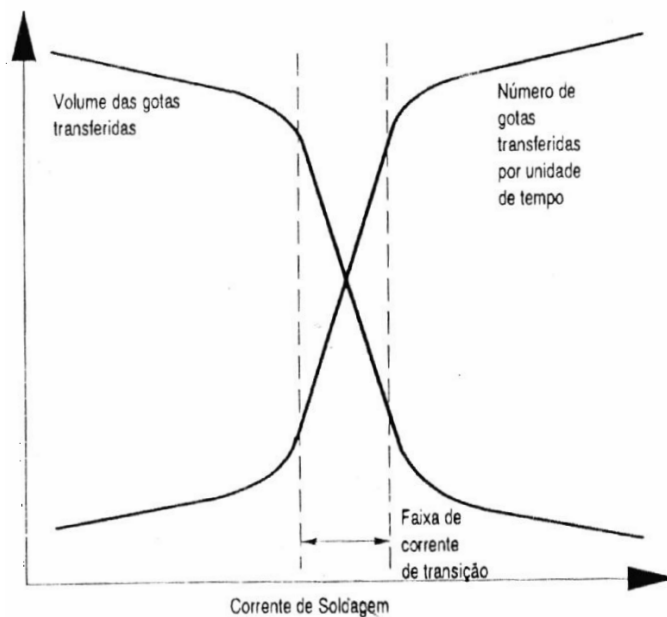


Figura 3.14 - Transição globular-aerossol (esquemática), MARQUES (2002).

A corrente de transição globular aerossol depende também da geometria do eletrodo (KIM & EAGAR, 1993; RHEE & KANNATEY, 1992). A mesma diminui com o aumento do comprimento do eletrodo ou com a redução da seção transversal do mesmo. A corrente de transição também aumenta com o aumento da pressão do gás (KIM & EAGAR, 1993).

A corrente de transição depende da composição do gás de proteção. A corrente de transição globular/aerossol reduz com o aumento de adições de oxigênio em argônio até cerca de 5%O₂. SCOTTI et al (1991) encontrou os valores de 200A para argônio industrial, 150A para Ar+1%O₂ e 140A para Ar+2%O₂, para eletrodo de aço inoxidável austenítico 308Si, com diâmetro de 0,89mm.

3.8. Métodos para análise e identificação dos tipos de transferência metálica

A identificação dos modos de transferência pode ser feita através da detecção e análise de diferentes sinais fornecidos pela região do arco. Som, luz, aparência e sinais elétricos de corrente e tensão, entre outros, podem possibilitar a detecção do modo de

transferência. Técnicas sofisticadas, por exemplo, baseadas em análise de imagens obtidas através de filmagem de alta velocidade permitem obter um maior volume de informações e determinam com maior segurança o modo de transferência de metal, mas tendem a ser caras e demoradas. Por outro lado, os modos básicos de transferência podem ser detectados inclusive sem ajuda de nenhum aparato. O ser humano treinado pode distinguir estes modos de transferência visivelmente ou auditivamente. Embora, sujeitas a diversos fatores subjetivos e, em alguns casos, de precisão duvidosa, eles são usados rotineiramente na prática industrial.

Uma das técnicas mais utilizadas para detecção e análise de alguns modos de transferência em laboratório é a análise de oscilogramas de tensão e corrente, baseados nos sinais de corrente e tensão do arco. A análise de oscilogramas pode ser feita através de programas de computador que permitem analisar com maior precisão as informações fornecidas pelos sinais. Sem a ajuda de programas específicos, a análise se tornaria muito demorada, imprecisa e, portanto, sem utilização prática. A principal vantagem dos programas é que os mesmos possibilitam a análise estatística dos sinais podendo fornecer um bom número de informações. Na tentativa de se incrementar ainda mais as análises, pesquisadores vêm utilizando outros sinais como por exemplo o sonoro, luminoso, etc., que juntamente com os sinais de corrente e tensão se permitem obter ainda mais informações. JONSON et al (1991), visando determinar a estabilidade do arco e transferências metálicas, analisou sinais sonoros juntamente com sinais elétricos de corrente e tensão, através de redes neurais.

Outra técnica usada é a filmagem de alta velocidade, particularmente com shadowgrafia por laser e em conjunto com a anterior. Outras técnicas também podem ser utilizadas tais como, nível de respingos, som ou ruídos do arco e análise visual direta. Estas últimas são normalmente utilizadas em complementação às anteriores e são ainda exploratórias. Outras técnicas, baseadas principalmente no som e luz emitidos pelo arco, têm sido tentadas mas ainda são exploratórias e não são utilizadas na prática (JONSON et al, 1991).

A utilização da filmagem em alta velocidade permite a obtenção de dados importantes na determinação da corrente de transição, tal como a frequência de destacamento das gotas (JONSON et al, 1991; FIGUEIREDO & FERRARESI , 2001; SCOTTI at al, 1998).

3.8.1. Oscilogramas de tensão e corrente

Os sinais de corrente e tensão monitorados, por exemplo, através de um osciloscópio, podem mostrar variações associadas com os fenômenos que ocorrem na região do arco. Desta maneira, algumas características dos modos básicos de transferência podem ser detectadas qualitativa e quantitativamente.

No modo de transferência por curto-circuito, a tensão permanece aproximadamente constante quando a gota está se formando e crescendo, tendendo para um valor próximo de zero quando a gota toca a poça de fusão (momento do curto). Logo após o desprendimento da gota, um pulso de tensão é gerado devido à reignição do arco.

No modo de transferência aerossol, pode-se, dependendo das características da fonte de energia utilizada, utilizar um osciloscópio com memória para fazer a leitura do sinal de tensão para detectar o momento exato em que a gota se desprende. O desprendimento tende a gerar uma perturbação em torno de 0,5V no sinal da tensão, provavelmente devido ao aumento da resistência da região de estricção da gota antes da separação, com conseqüente aumento da tensão (BALSAMO, 2000). Esta perturbação é pequena e o ruído da fonte deve ser menor. As fontes transistorizadas analógicas permitem a observação do destacamento de uma gota mesmo no modo de transferência aerossol, onde a perturbação gerada é muito pequena. No entanto, esse tipo de fonte possui baixo rendimento elétrico e não é utilizado na prática. Nos casos das transferências por curto-circuito e globular a detecção do desprendimento da gota é possível mesmo sem o uso de fontes transistorizadas analógicas. A utilização de filtros eletrônicos para reduzir o ruído proveniente do chaveamento das fontes é um artifício utilizado para a identificação do tipo de transferência e o momento de desprendimento da gota (BALSAMO, 2000).

3.8.2. Filmagem de alta velocidade e shadowgrafia laser

A utilização de filmagem para análise de transferência metálica tem sido utilizada com sucesso há vários anos. A técnica, utilizada conjuntamente com a shadowgrafia, mostrou-se eficaz em trabalhos (BALSAMO et al, 1999; FIGUEIREDO & FERRARESI, 2001; SCOTTI et al, 1998; HABERLIN, 1981) envolvendo análise de transferência metálica MIG/MAG.

Anteriormente à utilização dessa técnica, utilizaram-se apenas, para análises de transferências, imagens projetadas ou fotografias (DUTRA & BAIXO, 1990). A filmagem de alta velocidade, que permite o registro de 1000 (ou mais) quadros por segundo, permite a análise de detalhes mais precisos da transferência, tais como tipo, quantidade e geometria do material transferido. BALSAMO (2000) e SOTTI et al (1998) utilizaram uma câmera com 2000 quadros por segundo para análises da transferência. Já HABERLIN (1981) utilizou uma câmera com capacidade de 5000 quadros por segundo. A utilização dessa técnica deve ser considerada em função da real necessidade pois os custos envolvidos são elevados.

O termo shadowgrafia, também conhecido como *back-lighting*, vem sendo utilizado para se referenciar à formação de uma sombra projetada em um anteparo ou em um filme fotográfico de um objeto sobre o qual é incidido um feixe de luz. Essa técnica permite o estudo da transferência metálica através da visualização das gotas transferidas. Com uma instrumentação de apoio é possível visualizar quantidades mínimas de metal (gotas) transferindo-se a uma velocidade muito alta.

No caso da soldagem a arco, é necessário eliminar a luz do arco através de iluminação com laser e de filtragem seletiva, que deixe passar apenas a luz do laser. HABERLIN (1981) utilizou laser He-Ne com potência de 10mW. Já JOHNSON et al (1991) utilizaram laser He-Ne com potência de 25mW para reduzir a luz do arco. Com a eliminação quase total da luz do arco, as sombras passam a retratar apenas a parte interceptada do feixe de laser. As imagens podem ser reveladas por anteparos, fotos ou filmagem. A figura 3.13 ilustra uma montagem utilizada nessa técnica.

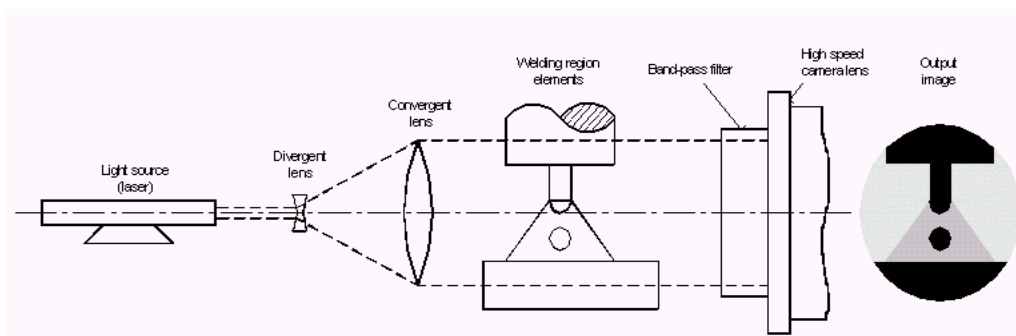


Figura 3.15 - Montagem utilizada na técnica shadowgrafia (VILARINHO, 2000).

Uma técnica complementar e poderosa que pode ser utilizada é a sincronização das imagens obtidas por filmagem com os oscilogramas de tensão e corrente. O método acopla as variações dos parâmetros de soldagem com as imagens da filmagem e possibilita correlacionar as informações das duas fontes. A Figura 3.16 mostra um exemplo desse método e a figura 3.17 mostra imagens de oscilogramas e filmagem de alta velocidade de uma transferência por arco pulsado, também com sincronização.

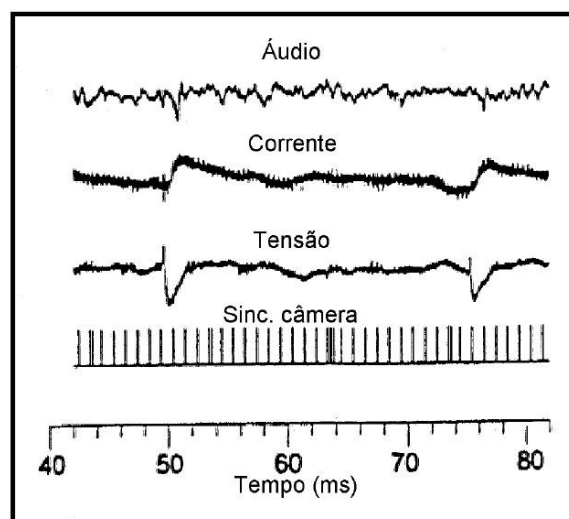


Figura 3.16 - Oscilogramas e sinais de áudio utilizados em sincronização para uma transferência globular. Eletrodo de aço carbono E70S-3 de 0,89mm de diâmetro e gás de proteção Ar+2%O₂ (JONSON et al, 1991).

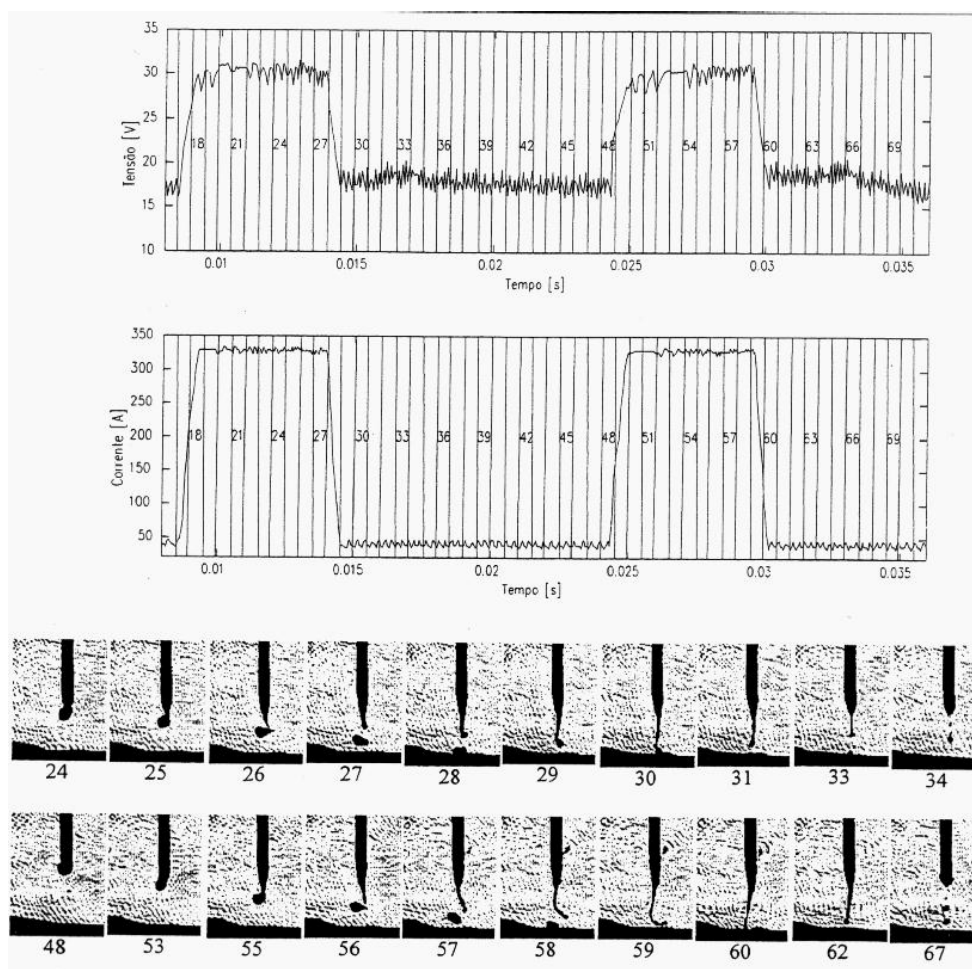


Figura 3.17 - Oscilogramas de tensão e corrente de soldagem em sincronismo com imagens de alta velocidade obtidos para uma transferência com arco pulsado (BALSAMO, 2000).

3.9. Mapas de transferência metálica

Os mapas de transferência metálica são gráficos esquemáticos que mostram regiões ou áreas onde predomina determinado tipo de transferência. Os mapas servem como ferramenta de apoio para análises do processo de soldagem e orientação para execução da operação e visam estabelecer os contornos da transferência em termos de variáveis de soldagem. Normalmente as formas construídas são em termos da tensão ou comprimento de arco versus corrente ou velocidade de alimentação. A escolha de uma forma de representação depende do objetivo. Para uma análise mais teórica é

interessante a forma comprimento de arco versus velocidade de alimentação, já para uma análise mais prática a forma tensão versus corrente ou velocidade de alimentação é mais interessante. É importante salientar que a facilidade de aquisição de dados é menor quando se quer utilizar o comprimento de arco pois sua medição pode ser mais complicada do que a determinação da tensão.

Os mapas são utilizados em processos de soldagem a arco em que se pode, ou é importante, classificar as transferências metálicas. O processo GMAW é um exemplo. A figura 3.18 mostra um mapa de transferência metálica da soldagem de alumínio com eletrodo AWS ER-4043 (1,2mm de diâmetro) e Ar comercialmente puro como gás de proteção (FIGUEIREDO & FERRARESI, 2001). A figura 3.19 mostra um mapa de transferência de um eletrodo de aço inoxidável austenítico ER 308L, de 0,89mm de diâmetro (SCOTTI et al, 1998), utilizando Ar+1%O₂ e Ar+2%O₂ (pontos circundados). Esse mapa foi construído em termos de comprimento de arco e corrente.

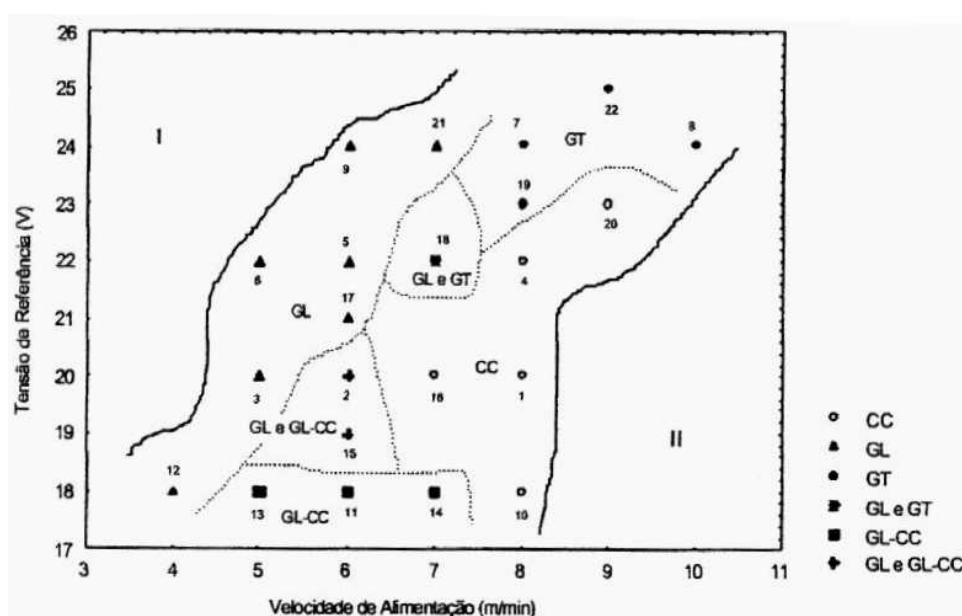


Figura 3.18 - Mapa de transferência metálica da soldagem de alumínio. (FIGUEIREDO & FERRARESI, 2001).

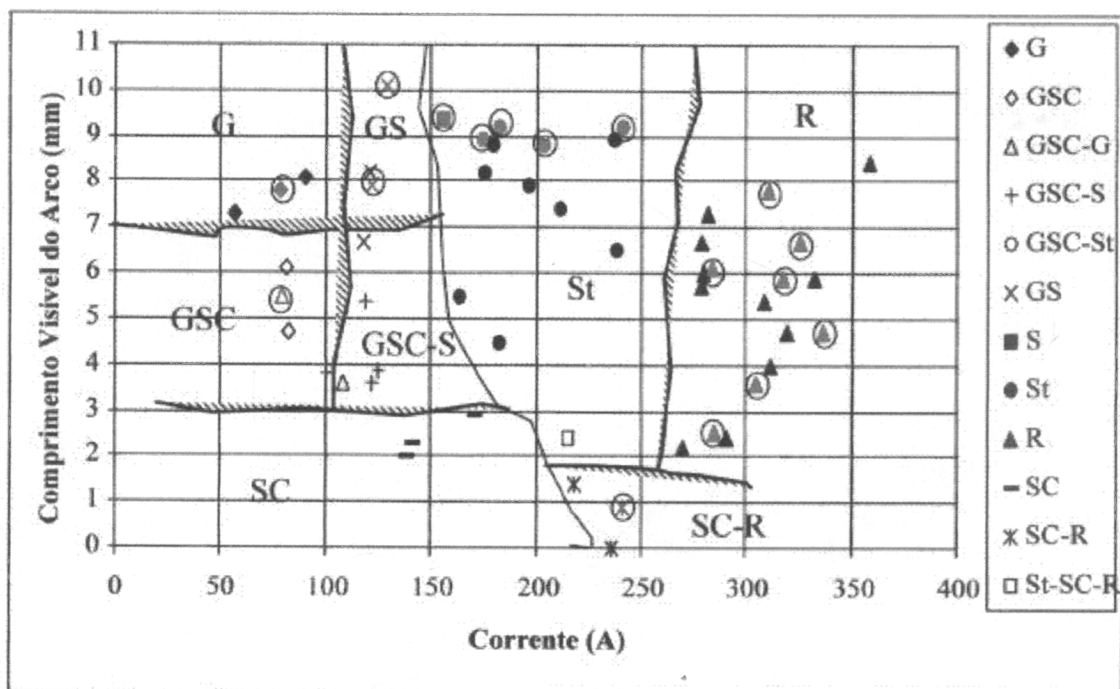


Figura 3.19 - Mapa de transferência metálica de aço inoxidável austenítico (SCOTTI et al, 1998).

CAPÍTULO 04: METODOLOGIA

4.1. Materiais

Os arames utilizados são de aço inoxidável tipo AWS ER 308LSi, 430Ti, 430LNb, todos de 1,0 mm de diâmetro nominal. A escolha do diâmetro foi devido ao fato de ser uma bitola bastante utilizada na indústria automobilística. A composição química dos arames foi determinada em laboratório de análise química da Acesita S.A.

O metal base utilizado foram chapas de aço inoxidável 439 ou UNS 43932 (ASTM A240, 2006), acabamento NR1 - laminado a quente, recozido e decapado (ASTM A480, 2006), com espessura de 5,0 mm. O aço UNS 43932 é um aço ferrítico estabilizado com titânio e nióbio. A utilização de uma chapa mais espessa do que a usada na fabricação de sistemas de exaustão tem o objetivo de reduzir uma eventual influência da espessura nos resultados. Além disto, como se pretendeu investigar uma faixa ampla de parâmetros de soldagem, o uso de um metal base mais espesso facilitou a execução dos testes. As amostras foram obtidas da linha de produção da Acesita SA, já no tamanho adequado para realização das soldas: largura aproximada de 60 mm e comprimento aproximado de 250 mm. Foram utilizados materiais de duas corridas diferentes, sem nenhuma razão especial. A composição química das chapas está descrita na tabela 4.1.

Tabela 4.1- Composição química do metal base.

Corrida	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)										
	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	N
1	0,007	0,389	0,0005	0,025	0,159	0,179	17,37	0,011	0,168	0,212	0,014
2	0,010	0,422	0,0002	0,027	0,124	0,184	17,06	0,021	0,154	0,201	0,014

O gás de proteção utilizado foi a mistura Ar-2%O₂ fornecida pela empresa AGA. A escolha desta mistura se deve ao fato desta ser amplamente utilizada para aços inoxidáveis e por permitir a obtenção dos principais modos de transferência. A vazão de

gás utilizada foi de 15l/min, que é uma vazão que garante a qualidade do processo além de ser utilizada em diversos trabalhos que envolvem estudo de transferência metálica.

4.2. Equipamentos

Foram utilizados equipamentos do LABSEND (UFMG), LAPROSOLDA (UFU) e do Centro de Pesquisas da Acesita S.A.

A figura 4.1 mostra esquematicamente a montagem básica utilizada nos testes de soldagem no LABSEND.

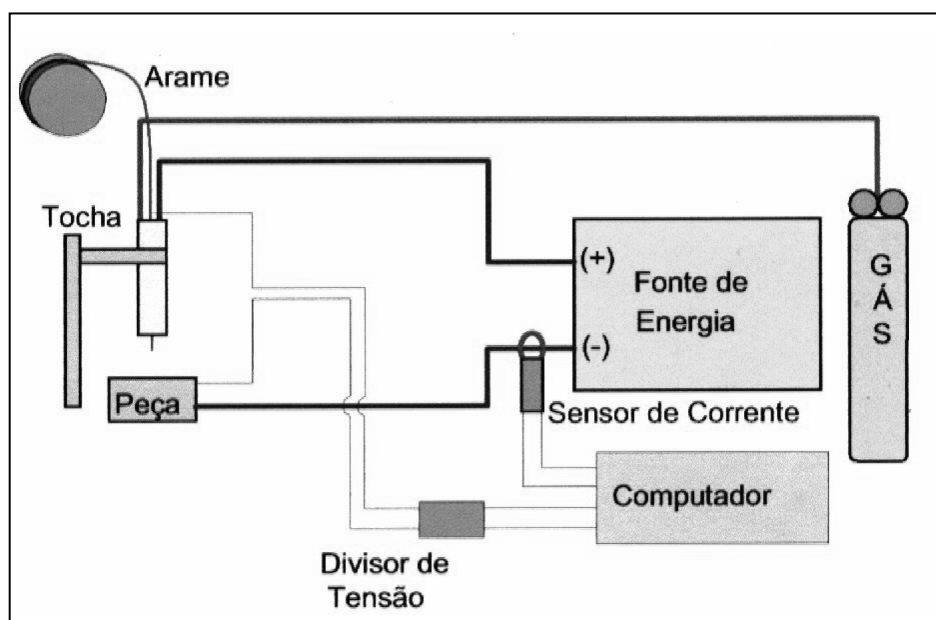


Figura 4.1 - Montagem básica utilizada nos testes de soldagem.

Nos testes de soldagem foi utilizada uma fonte eletrônica de soldagem capaz de operar em tensão constante, a DIGITEC 600. Os sinais de corrente e tensão foram armazenados em computador, usando uma placa de aquisição de dados (Advantech PCL-818H), sensores e um sistema para condicionamento dos sinais.

O sistema de análise de dados se baseia em um programa denominado SINAL, desenvolvido no LABSEND.

A figura 4.2 mostra a montagem básica utilizada na filmagem em alta velocidade, no LAPROSOLDA da UFU.

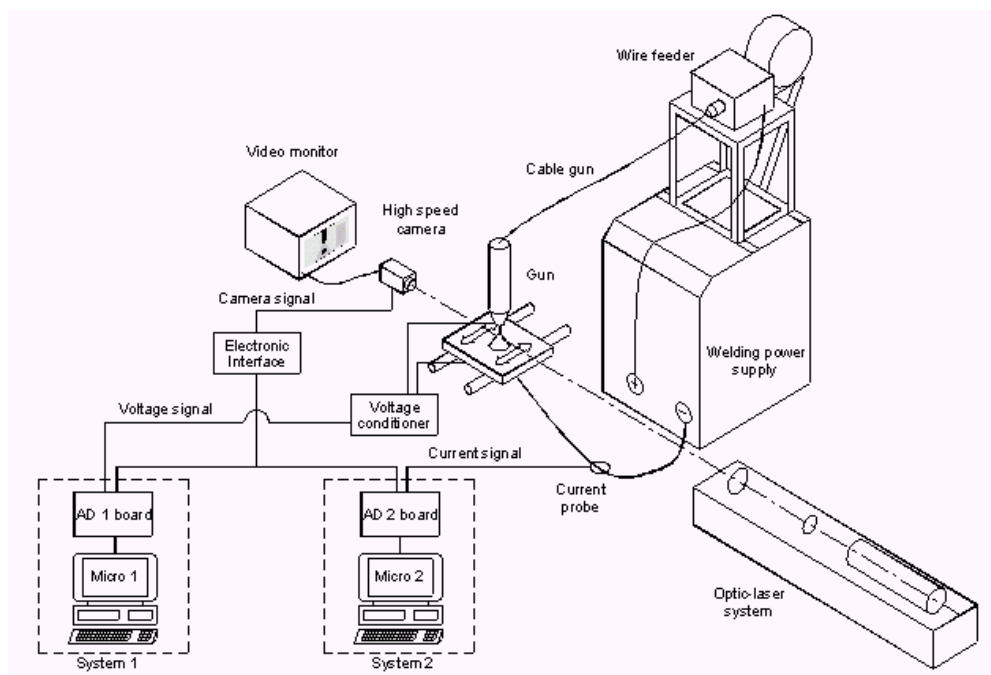


Figura 4.2 - Exemplo de aparelhagem utilizada nos testes de soldagem na UFU (BALSAMO, 2000).

A fonte eletrônica utilizada no LAPROSOLDA foi a DIGITEC 450. Foram utilizados, também, um sistema para obtenção e aquisição de imagens, sistemas computacionais para gravação das imagens, de iluminação por laser e computadores e placas de aquisição dos registros de sinais de corrente, tensão e sincronismo com as imagens da câmera de filmagem.

Para a caracterização dos arames foram utilizados um microscópio eletrônico de varredura, perfilômetro (Hommelwerke T8000), máquina de ensaio de tração universal (Instron 5583), microdurômetro, fonte de corrente (Tektronix PS282) e multímetros.

4.3. Procedimento experimental

4.3.1. Fluxograma de atividades

A figura 4.3 mostra o fluxograma que apresenta as principais etapas seguidas no desenvolvimento dos trabalhos realizados nesta dissertação.

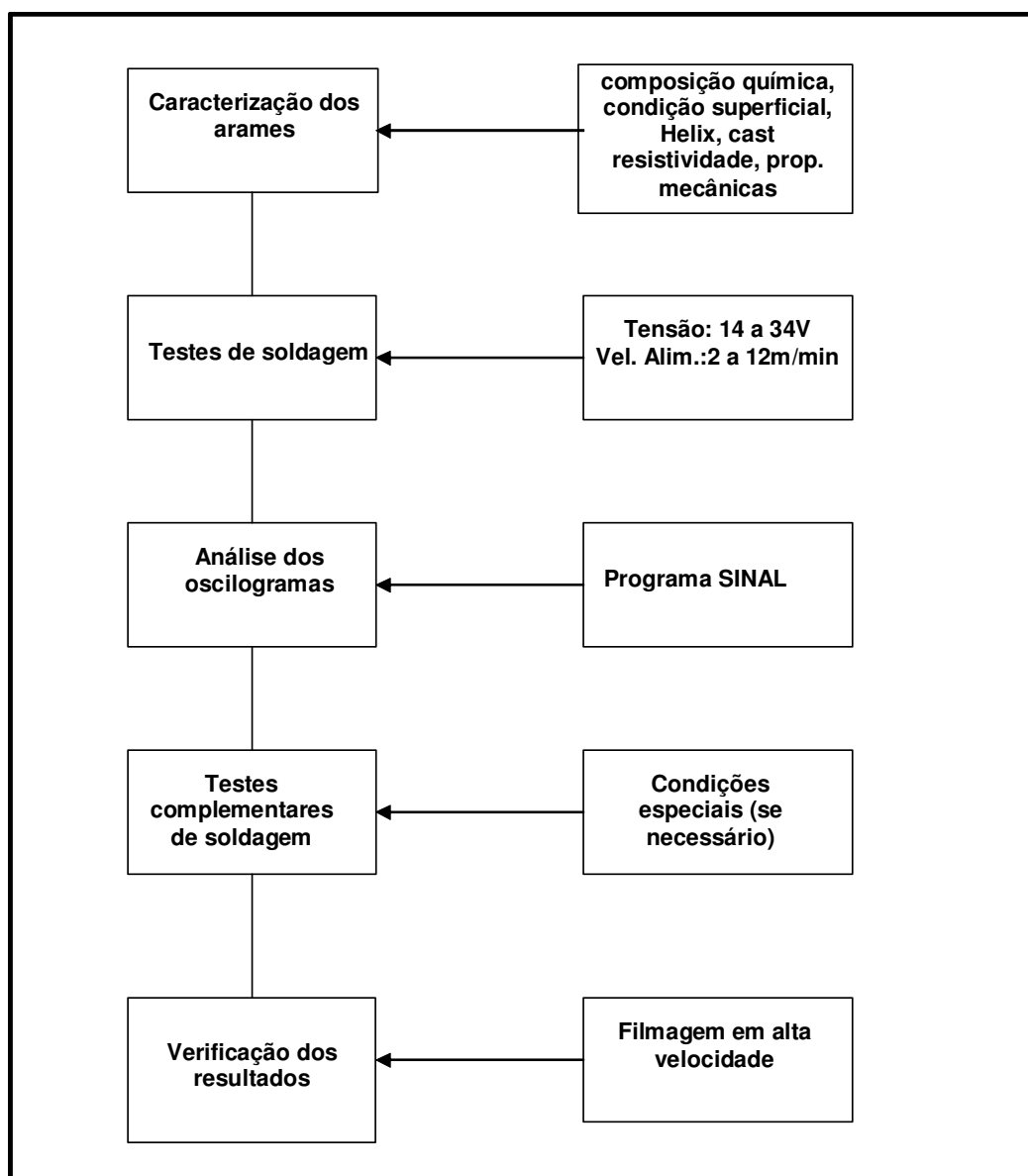


Figura 4.3 - Fluxograma geral de atividades práticas.

4.3.2. Caracterização dos arames

Os ensaios de caracterização dos arames-eletrodo foram realizados no LABSEND e no Centro de Pesquisas da Acesita SA. A caracterização dos arames visou a obtenção de informações para apoiar a avaliação dos resultados dos testes de soldagem. Foram avaliadas a resistividade elétrica, resistência mecânica, dureza, a condição superficial e deformação residual dos arames.

A resistividade foi determinada a frio (temperatura ambiente) e a quente (próximo da temperatura de fusão) através de duas técnicas desenvolvidas no LABSEND. A primeira delas, denominada neste trabalho como *método padrão*, permite a determinação da resistividade à temperatura ambiente. Para isto, determinado comprimento de arame foi ligado a uma fonte de energia (Tektronix PS282) e, através de multímetros, os valores de corrente e tensão foram medidos. Com esses valores e utilizando a relação $R = \rho(L/S)$, (sendo R, a resistência, L, o comprimento, S, a seção a área da seção transversal e ρ a resistividade) determinou-se a resistividade. Para garantir a inalteração da temperatura dos arames, um valor baixo de corrente ($<0,2A$) foi usado. Um comprimento de arame de cerca de 5m foi usado nestes testes. A figura 4.4 ilustra a montagem utilizada.

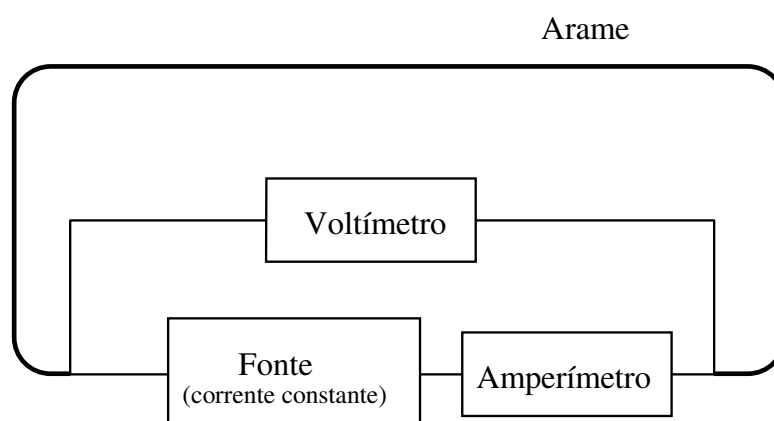


Figura 4.4 - Esquema de montagem utilizada na determinação da resistividade a frio.

A segunda técnica, denominada de *método dos contatos*, consistiu em passar uma corrente, de cerca de 30 A em um comprimento de arame de 15 cm preso entre dois blocos de cobre (Figura 4.5). Durante o ensaio, o arame se aquecia desde a temperatura ambiente até a sua ruptura a quente (após um intervalo de tempo de aproximadamente 20 s), sendo os valores da corrente e tensão monitorados com um sistema digital de aquisição de dados a uma taxa de 667Hz. Estes dados foram processados em computador, através do programa SINAL (apêndice 3) desenvolvido no LABSEND/UFMG, sendo calculada a resistência elétrica das amostras ao longo de cada ensaio. A temperatura do arame não foi monitorada durante o ensaio de forma que, das curvas da variação da resistência em função do tempo, estimou-se, apenas os valores da resistência elétrica inicial e final de cada arame. Estes foram obtidos ajustando uma reta, por regressão linear, aos primeiros (e últimos) quinhentos pontos dessas curvas. Os valores correspondentes da resistividade calculados através da equação (4.1). Assim, os valores encontrados correspondem a uma estimativa da resistividade dos arames em temperaturas próximas da temperatura ambiente e da temperatura de fusão.

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (4.1)$$

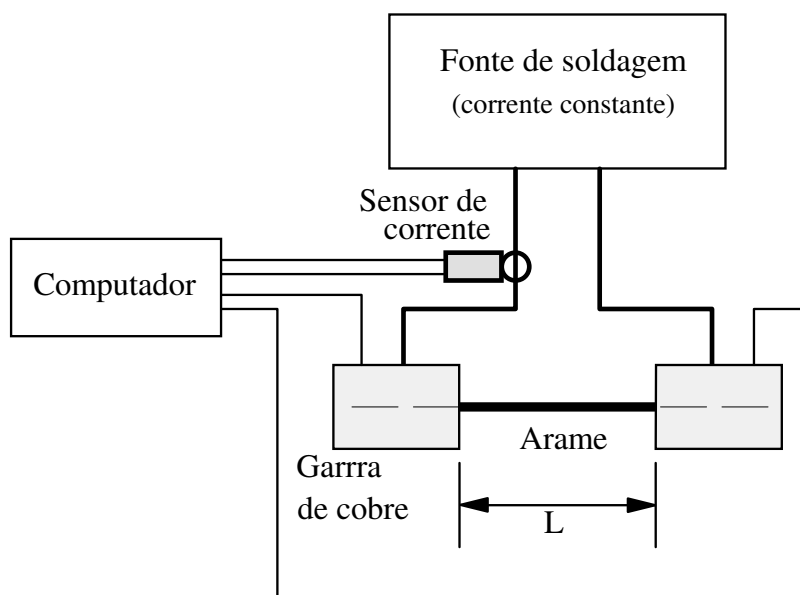


Figura 4.5 - Esquema de montagem utilizada na determinação da resistividade a quente.

O limite de resistência dos arames foi determinado através ensaio de tração de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892. Foram medidos, também, o limite de escoamento e o alongamento dos arames. A microdureza foi avaliada utilizando a média das durezas medidas diametralmente (5 medidas) no sentido transversal e longitudinal sendo, nesse último, avaliada em 5 posições diferentes ao longo do arame.

A deformação residual (*cast* e *helix*) foi determinada de acordo com a norma AWS A5.9. Basicamente, segundo essa norma, algumas espiras (em torno de 5) são retiradas do carretel e soltas em uma superfície plana. O diâmetro da maior espira formada indica o *cast* e a altura, o *helix*.

A condição superficial dos arames foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura e análise de rugosidade. Com fotos do MEV se pode ter uma idéia comparativa do estado superficial dos arames. A medição da rugosidade, através de rugosímetro, permitiu obtenção de valores reais médios de rugosidade e, portanto, a obtenção de dados mais concretos para análise da condição superficial dos arames. Os valores médios de rugosidade são medidos através do parâmetro Ra (rugosidade média ou *average roughness*) e normalmente em forma de uma curva que indica valores máximos (picos) e mínimos (vales) em torno de uma linha média, ao longo de uma determinada direção, na superfície da amostra.

4.3.3. Testes de soldagem

Os testes de soldagem foram realizados pela deposição de cordões sobre chapas na posição plana devido, basicamente, à facilidade para a sua realização. Desta maneira, não serão consideradas as influências do tipo de junta ou posição de soldagem ou requisitos como a obtenção de penetração total em uma dada junta, o que restringiria a faixa de variação das condições de soldagem e, ainda, acrescentaria uma maior complexidade a este estudo.

As principais variáveis consideradas foram:

- arames: foram utilizados três (430Ti, 430LNb e AWS ER308LSi);

- tensão de soldagem: foi variada de forma a varrer condições desde com transferência por curto circuito instável até com transferência por vôo livre (globular ou goticular);
- velocidade de alimentação: 2, 4, 6, 8 e 10m/min;

As outras condições consideradas foram:

- posição da tocha em relação à peça: 90° ;
- indutância: mantido o valor constante de 20/20 na fonte DIGITEC.
- gás de proteção: mistura Ar-2%O₂;
- vazão de gás: 15l/min;
- distância do bico de contato à peça (DBCP): foi utilizada 20mm;

Os blocos de testes foram feitos variando a velocidade de alimentação do arame e tensão, mantendo-se constantes as outras condições. Para uma dada velocidade de alimentação, foram feitos testes que permitiam condições de soldagem com operação em curto circuito instável (tensão muito baixa) até operação em arco aberto, sem curtos.. Na maioria dos casos, a tensão foi variada de 2 em 2 volts. Réplicas foram feitas para a maioria das condições de testes. A corrente e a tensão de soldagem foram medidas e armazenadas com um sistema digital de aquisição de dados a uma taxa de aquisição de 5KHz durante 3s. A aquisição dos dados foi feita após 3 a 5s do início do teste para permitir a estabilização das condições de soldagem. Os arquivos de dados foram processados com o programa SINAL para determinar os valores médios de corrente e de tensão de soldagem e os seus desvios padrões. Além disto, em condições de operação com transferência por curto circuito, foram medidos, através de uma rotina específica do programa, o período médio de transferência por curto circuito (T) e o tempo médio de curto circuito (t_c). Para desconsiderar a ocorrência de curtos circuitos rápidos, que podem não estar associados com a transferência de metal, não foram incluídos, nos cálculos, curtos com duração de apenas um ponto. Os valores de T e t_c foram usados para calcular o fator de curto circuito pela equação 4.2 aqui reproduzida:

$$F_{cc} = t_c / T \times 100 \quad (4.2)$$

O programa ainda permitiu construir oscilogramas de corrente e tensão para caracterizar as condições de soldagem.

Para os arames ferríticos, a variação de alguns parâmetros do processo foi representada em mapas. Estes foram construídos modelando-se primeiro a variação do parâmetro para uma dada velocidade de alimentação com uma equação adequada por regressão. A partir das equações foram geradas matrizes do parâmetro em questão em função da velocidade de alimentação do arame e da tensão. Estas matrizes foram usadas no programa ORIGEM™ para a construção dos mapas. Para obter cordões de geometria aproximadamente similar, a velocidade de soldagem foi variada, proporcionalmente à variação da velocidade de alimentação. Para o arame 308LSi não foram realizados testes para as velocidades de alimentação 2 e 4 m/min, visto que esse arame é bastante estudado, com muitas informações na literatura (SCOTTI et al, 1998; BALSAMO, 2000; SANTOS 1998).

A estabilidade do processo foi verificada através da análise de diversos parâmetros, entre eles: corrente, tensão do arco, desvio padrão da corrente, fator de curto circuito, frequência de curto.

4.3.4. Verificação dos resultados

Os testes complementares foram realizados no LAPROSOLDA, que conta com equipamentos para a realização de filmagem em alta velocidade sincronizada com os sinais de corrente e tensão de soldagem e sombreamento por laser (shadowgrafia). Foram feitos testes para os arames 430Ti e 430LNb, já que já se tem um bom conhecimento do comportamento do arame austenítico.

Os testes visaram complementar os resultados obtidos através de análise de sinais de corrente e tensão.

Foram escolhidas, dos testes anteriores, algumas condições representativas para serem repetidas utilizando filmagem em alta velocidade (até 2000 quadros/segundo).

Os testes realizados envolveram condições de soldagem com transferência típica por curto circuito, globular e aerossol e, também, condições de transição entre uma forma de transferência e outra.

A análise dos resultados se baseou na observação dos filmes e nas análises dos sinais adquiridos durante os testes. Foi feita a sincronização entre a filmagem e o oscilograma correspondentes e algumas situações foram escolhidas, para a comparação de desempenho em soldagem dos dois arames ferríticos. Esta observação se baseou nos valores dos diâmetros médios de gotas e do número de gotas transferidas por unidade de tempo. O número de gotas foi determinado a partir da contagem das gotas em determinados intervalos de tempo, escolhidas aleatoriamente, em partes das transferências que pareciam mais estáveis, independentemente do tipo de transferência. As transferências cujas gotas possuem diâmetro mais de 15% maior que o diâmetro do arame foram consideradas como globulares. Para gotas com diâmetro menor que 115% do diâmetro do arame considerou-se aerossol ou spray. O diâmetro das gotas e dos arames foram medidos com régua, a partir de imagens ampliadas das transferências.

Devido à complexidade da comparação de testes realizados em laboratórios diferentes, considerou-se aspectos gerais dos oscilogramas para comparações. Para a construção dos mapas de transferência metálica após a observação dos filmes, foi utilizado o valor de tensão no arco como referência. Essa abordagem foi necessária devido à falta de um parâmetro específico e adequado para essa comparação. Dessa forma, resultados com valores próximos de tensões no arco foram comparados na análise final.

CAPÍTULO 05: RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos arames de soldagem

5.1.1. Composição química

A análise química dos arames está descrita na tabela 5.1. O teor de titânio apresentado pelo 430Ti – 0,350% - está abaixo do valor mínimo necessário para estabilização estequiométrica que é de 0,477% ($\%Ti > 4 \times C\% + 3,42 \times N\%$). Além disto, considerando a norma ASTM 268 (2003) para aços inoxidáveis em forma de tubos, para o aço AISI 430Ti, por exemplo, o teor de titânio do arame é inferior ao mínimo necessário ($5 \times \%C$) exigido por essa norma. Considerando ainda essa mesma norma, o aço apresenta teor carbono acima do máximo estabelecido para esse elemento que é de 0,10%. A referência a essas normas é devido à não existência de uma norma específica para arames ferríticos, diferentemente do que acontece para os austeníticos.

O arame 430LNb apresenta estabilização acima da estequiométrica. O teor de Nb - 0,44% - está acima do mínimo necessário para esse arame que é de 0,316% ($\%Nb > 7,74 \times (\%C + \%N)$). Para esse aço não se pode utilizar a norma ASTM já que o mesmo não é considerado na mesma. Vale lembrar que a composição química da tabela 5.1 se refere aos arames e não da zona fundida.

Tabela 5.1 - Análise química dos arames.

ARAME	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)										
	C	Si	S	Cu	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	N
308LSi	0,017	0,75	0,012	0,086	1,93	10,29	19,62	0,016	0,012		0,0561
430Ti	0,107	1,04	0,0024	0,160	0,65	0,40	17,45	0,036	0,350		0,0143
430LNb	0,027	0,43	0,0035	0,190	0,42	0,21	17,66	0,034	0,004	0,44	0,0139

Apenas para comparação, pode-se relacionar o aço 430LNb com o aço UNS S43940 (ASTM A240, 2006), pois este apresenta teores de carbono e cromo muito próximos ao

do arame. Quanto à quantidade de estabilizantes, o teor de nióbio do arame está de acordo com a referida norma, que estabelece um teor mínimo de $(3 \times \%C + 0,30)$. Por outro lado, o teor de titânio do arame está abaixo do especificado por esta norma (0,10 a 0,60%).

5.1.2. Resistividade elétrica

A tabela 5.2 mostra os valores encontrados de resistividade elétrica com os seus coeficientes de variação (Desvio padrão / média x 100). Observa-se inicialmente que, à temperatura ambiente, os valores encontrados pelo método padrão chegam a ser 20% menores e apresentam uma menor dispersão que os encontrados pelo método dos contatos. Esta diferença pode ser explicada, em parte, pelas características de cada técnica. Na segunda, usa-se um comprimento de arame muito menor (o que implica em maiores erros relativos na determinação deste comprimento), o valor usado de corrente é muito maior e o ensaio é dinâmico, sendo as resistividades determinadas por extrapolação dos dados obtidos.

Tabela 5.2 – Resistividade elétrica dos arames (valor médio e coeficiente de variação).

MÉTODO	Arame	Resistividade ($\Omega \cdot \mu\text{m}$)			
		Inicial		Final	
		Média	CV (%)	Média	CV (%)
PADRÃO	308LSi	0,7730	0,065		
	430Ti	0,7740	0,103		
	430LNb	0,5470	0,110		
CONTATOS	308LSi	0,8563	3,43	1,5581	4,42
	430Ti	0,8215	2,53	1,5149	3,18
	430LNb	0,6694	0,299	1,7327	4,670

Ambas as técnicas indicam, para o arame 430LNb, uma resistividade à temperatura ambiente menor que as dos arames AWS ER308LSi e 430Ti. À alta temperatura, contudo, o método dos contatos indica que esta diferença se inverte passando, agora, a

um valor superior às resistividades do 308LSi e 430Ti. Sabe-se que tanto a composição química como a quantidade de deformação plástica podem aumentar a resistividade elétrica dos aços (HALLIDAY & RESNIK, 1975). Considerando apenas a composição química, esperava-se que os dois arames de aço ferrítico tivessem resistividades similares e menores que a do aço austenítico, o que não foi encontrado à temperatura ambiente. O que se pode observar é que, em ambos os métodos, a resistividade do 430Ti ficou bastante próxima da resistividade do 308LSi, sendo que, no método dos contatos, com valores um pouco menor. Uma possível explicação para este resultado seria um maior encruamento para o arame 430Ti. Isto, também, poderia explicar a tendência das resistividades ficarem próximas à alta temperatura devido à recristalização dos arames (FERNANDES, 1999). Os resultados dos ensaios mecânicos parecem confirmar esta hipótese (seção 5.1.3).

A velocidade de fusão do arame na soldagem MIG pode ser representada pela equação 5.1 (LESNEWICH, 1958). Nessa equação, w é a velocidade de fusão, α e β são constantes ligadas ao aquecimento do arame pelo arco elétrico e por efeito Joule respectivamente e s é o comprimento do eletrodo. O termo α , para soldagem com eletrodo positivo, depende principalmente da composição do arame e β é influenciado pela sua resistividade elétrica.

$$w = \alpha \cdot i + \beta \cdot s \cdot i^2 \quad (5.1)$$

Em soldagem, como a temperatura do eletrodo varia continuamente ao longo deste, o valor da resistividade do eletrodo deve estar entre os seus valores à temperatura ambiente e próximo da temperatura de fusão. Estudos diversos indicam que, na soldagem MIG, a variação de temperatura ao longo do eletrodo apresenta duas regiões características (FUGIMURA et al, 1988; HIRATA, 1995; MODENESI, 1997). Em uma primeira região, que compreenderia a maior parte do arame, o aquecimento seria principalmente por efeito joule e, nesta, a temperatura variaria de forma relativamente suave ao longo do eletrodo. Na segunda região, relativamente pequena e localizada junto do arco, haveria uma forte influência do aquecimento pelo arco e um forte gradiente de temperatura ocorreria. Considerando esta situação, em uma primeira

aproximação, pode-se esperar que a temperatura média do eletrodo seja mais próxima da temperatura ambiente e, assim, se esperaria uma maior importância, na fusão do eletrodo, dos valores de resistividade elétrica a temperaturas mais baixas. Assim, com base nestas considerações, pode-se esperar que o arame 430LNb necessita de correntes de soldagem maiores que os outros dois arames. Esta hipótese será avaliada na discussão dos resultados dos testes de soldagem

5.1.3. Propriedades mecânicas

Os valores de limite de resistência mecânica e a microdureza dos arames são mostrados na tabela 5.3 e curvas típicas do ensaio de tração cada arame são apresentadas na figura 5.1. Verifica-se que o arame 308LSi apresenta o maior limite de resistência, o que era esperado considerando que uma importante característica do aço austenítico é a sua elevada capacidade de encruamento. Os valores de dureza correlacionam bem com os valores de resistência mecânica encontrados. Observa-se que o arame 430Ti apresenta maiores valores de resistência mecânica e de dureza que o 430Nb além de, aparentemente, sofrer um menor alongamento até a sua ruptura. Estes resultados, embora possam ser, em parte, associados com os maiores teores de liga do primeiro arame (tabela 5.1), podem ser um indício de maior encruamento desse arame.

Tabela 5.3 - Propriedades mecânicas dos arames.

Propriedade		308LSi	430Ti	430LNb
Limite de Resistência (MPa)	Valor médio	1460	1230	1120
	Cv	1,8	0,5	0,4
Midrodureza (HV)	Valor médio	398	322	303
	Cv	14,3	11,5	14,2

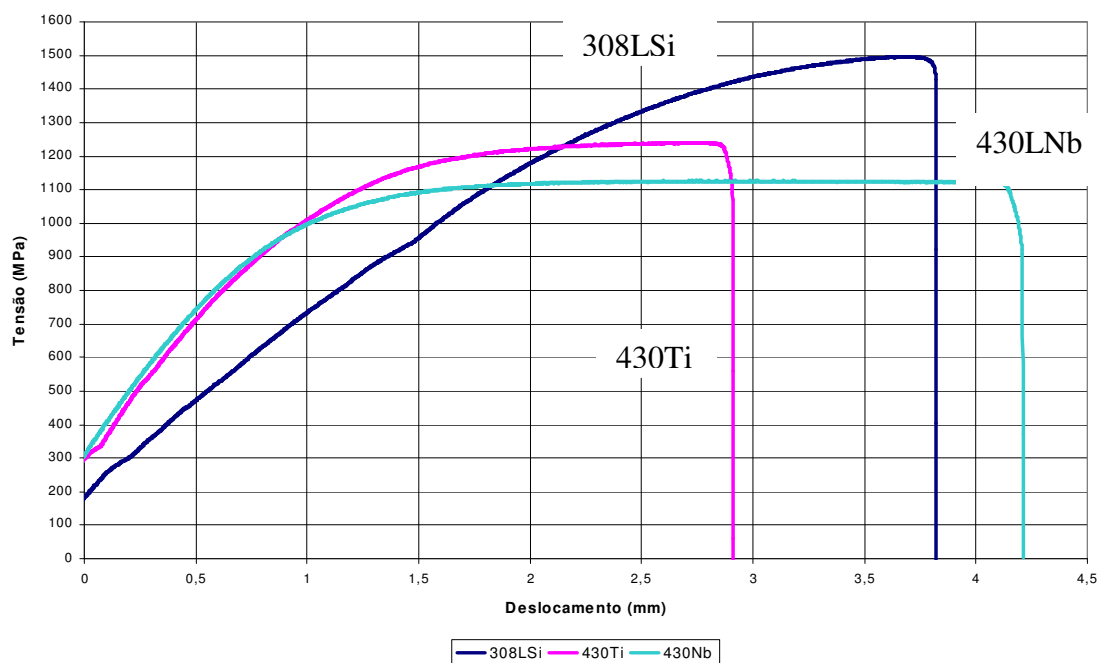
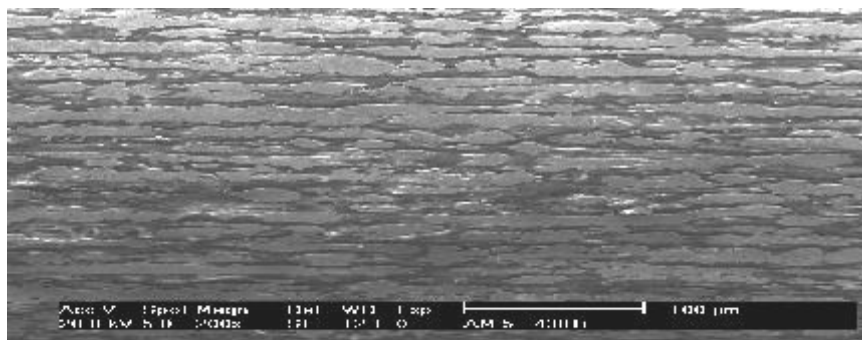


Figura 5.1 - Curvas típicas do ensaio de tração para os três arames utilizados.

5.1.4. Qualidade superficial

A figura 5.2 mostra fotos tiradas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) com aumento de 200X das superfícies dos três arames. Pode-se notar que o arame 430Ti apresenta, comparado aos outros, uma superfície muito mais irregular e que o arame 430LNb apresenta a superfície menos irregular. A figura 5.3 mostra a variação da rugosidade superficial dos 3 arames obtida com perfilômetro ao longo de uma linha paralela ao eixo dos arames. Os valores médios de Ra (rugosidade média ou *average roughness*) encontrados foram de 0,07, 0,198 e 0,630 μm para os arames 430LNb, 308LSi e 430Ti, respectivamente. As curvas mostram valores máximos (picos) e mínimos (vales) em torno de uma linha média, ao longo da direção longitudinal, na superfície da amostra. Nota-se a superfície mais acidentada do arame 430Ti, caracterizada pela presença de vales muito mais profundos do que nos outros dois arames. Essa diferença de rugosidade pode estar ligada às condições do processo de trefilação que podem ser distintos para cada arame. Os valores encontrados comprovam a grande diferença de qualidade superficial já observada nas fotos do MEV. Uma menor rugosidade superficial indica um potencial para um maior atrito entre o

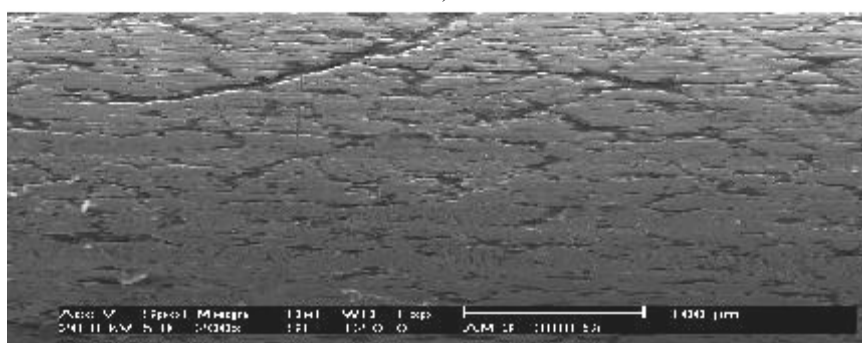
arame e o bico de contato durante a soldagem. Isto sugere que o arame 430Ti pode ter uma maior chance de apresentar problemas de alimentação em comparação com os outros dois arames.



a)



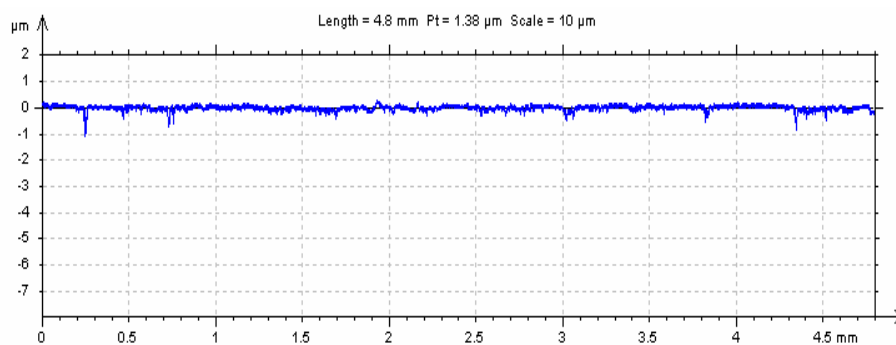
b)



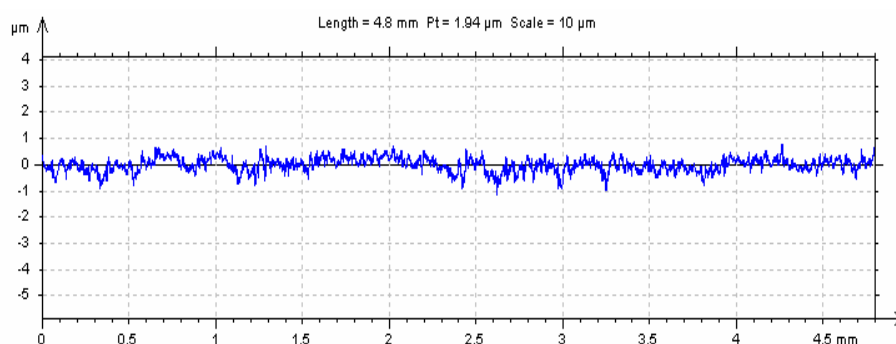
c)

Figura 5.2 - Foto da superfície dos arames com aumento de 200X: a) 430Ti; b) 430LNb e c) 308LSi.

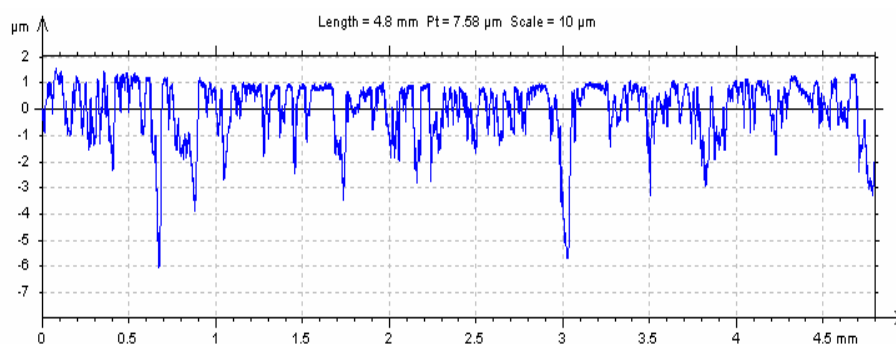
Os valores do cast e helix dos arames estão apresentados na tabela 5.4. Todos os valores encontrados estão dentro dos limites estabelecidos na norma AWS A5.9 (1993), isto é, helix de 0 a 25,4mm e cast de 200mm a 1300mm, para carretéis de 200mm de diâmetro.



a)



b)



c)

Figura 5.3 - Perfil de rugosidade medido para os arames: (a) 430LNb; (b) 308LSi e (c) 430Ti. Eixo vertical: rugosidade (μm); eixo horizontal: direção (mm).

Tabela 5.4 - Resultados dos ensaios de *helix* e *cast*.

Parâmetro (mm)	Valores de Cast e Helix		
	430Ti	430LNb	308LSi
CAST	710	750	570
HELIX	0	0	0

5.2. Condições de soldagem

A Figura 5.4 mostra a variação da corrente de soldagem em função da tensão de operação para os testes realizados com velocidades de alimentação de 6 e 10 m/min. Durante a realização dos testes observou-se que, para menores valores de tensão, em torno de 16 V para a alimentação de 6 m/min e em torno de 18-19 V, para 10 m/min, a operação foi bastante instável, com extinções periódicas do arco e curtos circuitos relativamente violentos para os três arames. Para os maiores valores de tensão, na faixa em que a corrente aumenta mais fortemente com a tensão (Figura 5.4), a soldagem ocorreu em arco aberto, sem curtos, com transferência globular para velocidades de até 8m/min e, em geral, aerossol para velocidades de alimentação a partir de 10m/min. Esta última forma de transferência foi observada mais claramente para os arames 430LNb e 308LSi. Este aspecto será melhor discutido na seção 5.2.3.

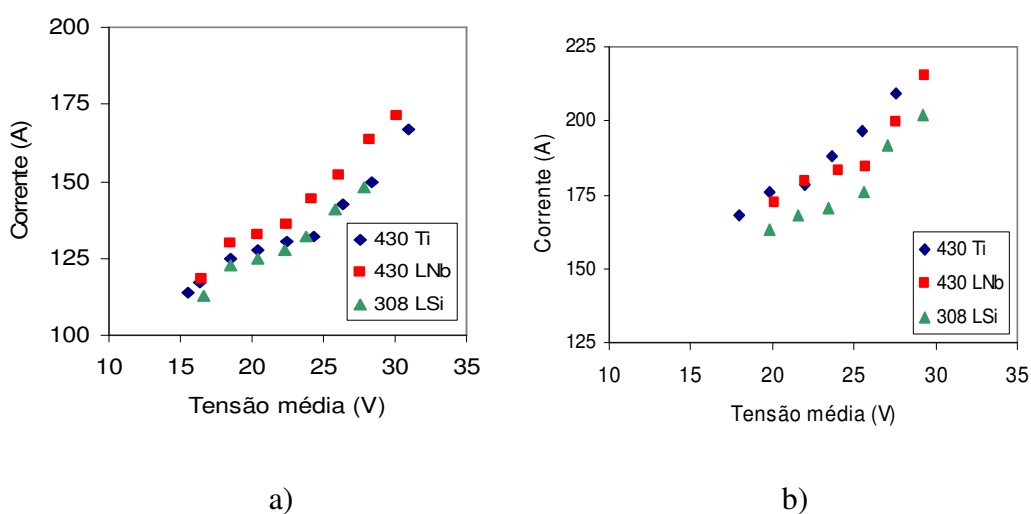


Figura 5.4 - Variação da corrente de soldagem em função da tensão para as velocidades de alimentação: a) 6m/min; b)10m/min.

Pode-se observar que parece haver uma tendência da corrente de soldagem ser maior para o 430LNb, para velocidades de alimentação mais baixas, 6m/min nesse caso. Já para velocidades mais altas, nesse caso de 10m/min, o 430Ti tende a apresentar correntes de soldagem mais altas mas bem próximas das correntes obtidas com o arame 430LNb. Uma possível explicação para este comportamento pode ser a variação da resistividade elétrica dos arames. À baixa temperatura, a resistividade do arame 430LNb é menor que a dos outros arames. Como, para baixas correntes, a temperatura média do eletrodo deve ser mais baixa (fig. 5.5), a menor resistividade elétrica deve garantir um menor coeficiente β da eq. 5.1, para o arame 430LNb. Para correntes elevadas, a maior temperatura média dos eletrodos deve reduzir esse efeito. Deve-se enfatizar que certamente outros fatores afetam este comportamento. Em particular, observou-se que o arame 430Ti passa a operar em arco aberto (isto é, sem curto circuito) para valores de tensão menores (seção 5.2.1). Assim, este arame tende a apresentar uma variação mais forte da corrente com a tensão de soldagem para valores menores de tensão.

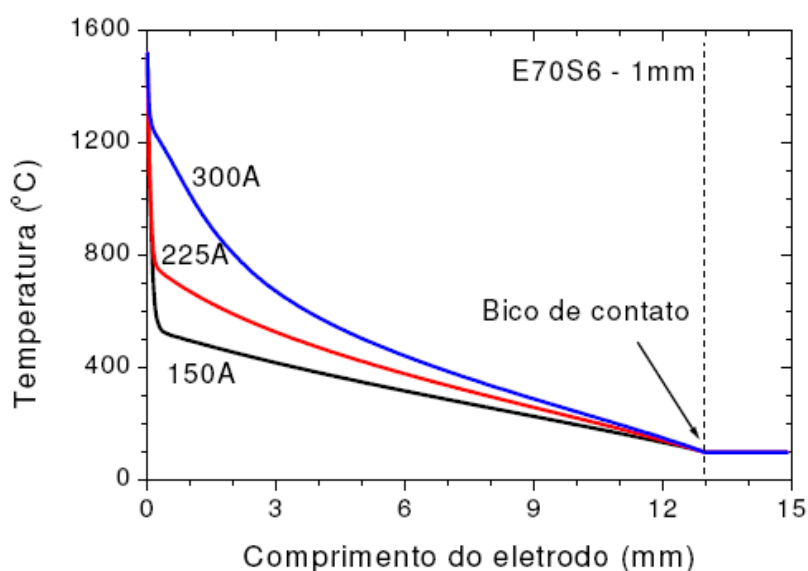


Figura 5.5 – Variação prevista de temperatura ao longo do eletrodo para diferentes valores de corrente de soldagem (MODENESI, 2004).

5.2.1. Parâmetros na soldagem por curto circuito

Observando as curvas de fator de curto circuito (razão porcentual entre a duração média de um curto circuito e o período médio de transferência para uma dada condição de soldagem) por tensão média (figura 5.6) pode-se notar uma tendência de valores deste parâmetro serem maiores para o arame 430LNb do que para os arames 430Ti e 308LSi, para tensões de até 22/24V. Isto significa que o 430LNb necessita de maiores valores de tensão para atingir um dado valor do fator de curto circuito. Pode-se perceber também que o fator de curto, em velocidades de alimentação mais baixas, tende para valores baixos a tensões menores que nas velocidades mais altas (figura 5.6). As figuras 5.7 e 5.8 mostram oscilogramas de tensão para testes com os arames 430LNb e 430Ti, com velocidade de alimentação de 4m/min e tensões de referência de 16 e 18V. Observa-se, como esperado, uma redução da quantidade de curtos circuitos com o aumento da tensão. Pode-se observar, também, que, para condições operacionais similares, os testes com o arame 430Ti tendem a apresentar uma menor quantidade de curtos circuitos como já havia sido mostrado nas curvas de fator de curto circuito (figura 5.6).

O fator de curto circuito varia com a tensão de uma forma que pode ser representada, com razoável aproximação, por uma sigmóide (curva em “S”). Uma função genérica para essa curva, vista na seção 3.5, é:

$$F_{cc} = F_{MIN} + (F_{MAX} - F_{MIN}) / (1 + \exp((V - V_{50}) / \Delta V)) \quad (5.2)$$

Os dados da figura 5.6 foram ajustados por regressão não linear, usando o programa ORIGEN™, a esta equação. Para cada condição (arame e velocidade de alimentação) esta equação foi derivada analiticamente (eq. 5.3 e figura 5.9) para as velocidades de alimentação 6 e 10m/min.

$$-dF_{cc}/dV = (F_{MAX} - F_{MIN}) \exp((V - V_{50}) / \Delta V) / (\Delta V(1 + \exp((V - V_{50}) / \Delta V))^2) \quad (5.3)$$

Estas curvas mostram a taxa de variação do fator de curto circuito com a tensão e indicam, desta forma, a sensibilidade deste fator a mudanças de tensão de soldagem, quando o processo opera com transferência por curto circuito.

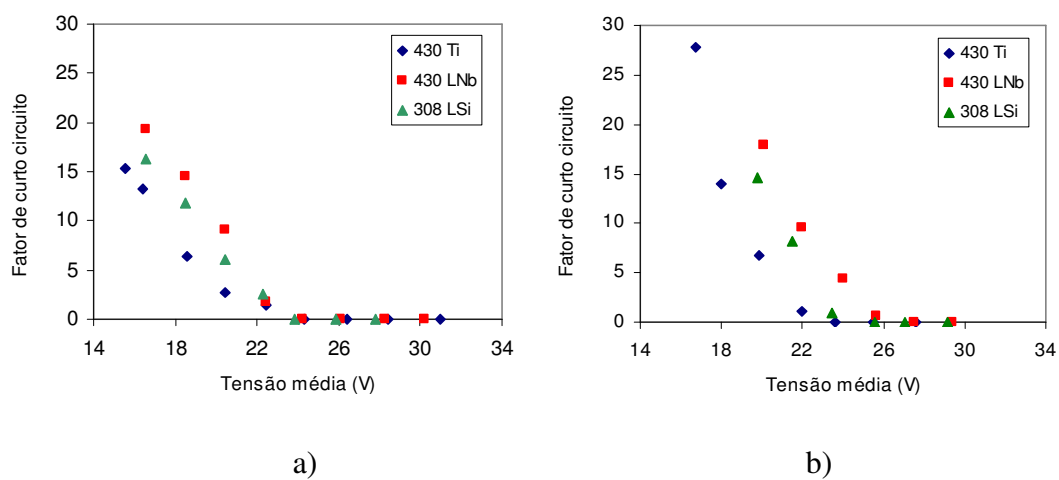


Figura 5.6 - Gráfico do fator de curto circuito e tensão média para as velocidades de alimentação: a) 6m/min; b) 10m/min.

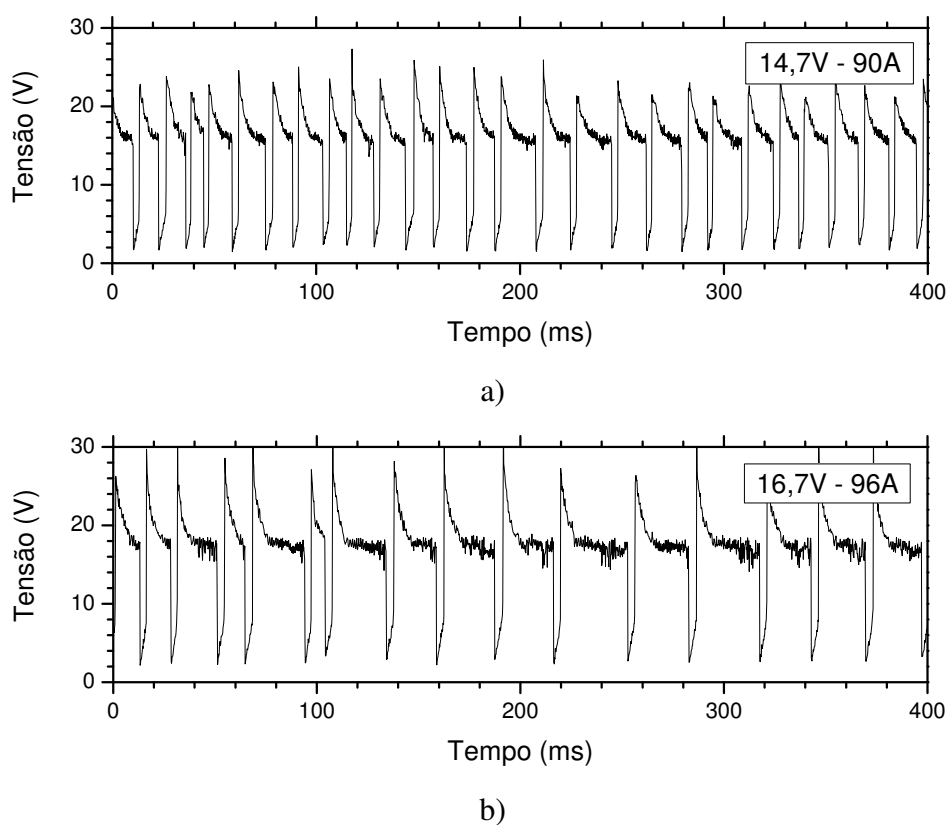


Figura 5.7 – Oscilogramas de tensão para testes com arame 430LNb para velocidade de alimentação de 4m/min. a) tensão de 16V e b) tensão de 18V.

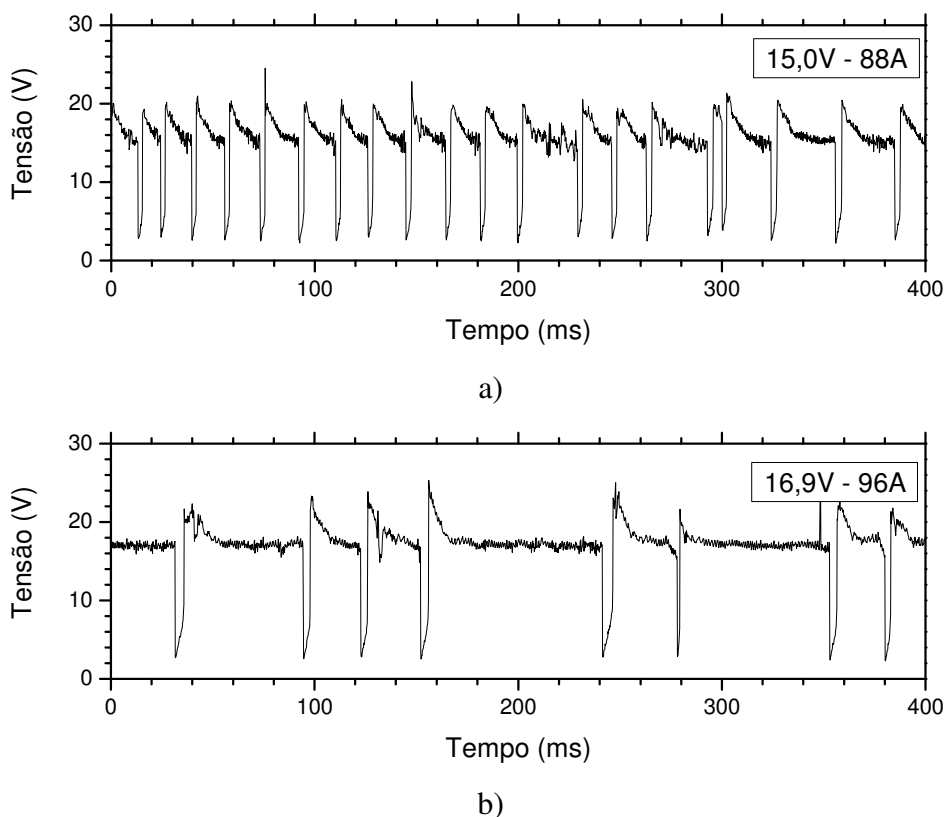


Figura 5.8 – Oscilogramas de tensão para testes com arame 430Ti para velocidade de alimentação de 4m/min. a) tensão de 16V e b) tensão de 18V.

Pode-se notar que o arame 430Ti opera em curto circuito a tensões mais baixas que os arames 308LSi e 430LNb, para velocidade de alimentação de 6m/min. Já na velocidade de alimentação de 10m/min, a primeira parte das curvas dos ferríticos praticamente se sobrepõem, enquanto a do austenítico se mantém mais à direita. Isso indica que os três arames se comportam de maneira diferente na operação em curto circuito, dependendo da velocidade de alimentação. O 430Ti opera a tensões mais baixas para velocidades de alimentação mais baixas enquanto que, para velocidades de alimentação mais altas, o 430Ti e o 430LNb operam praticamente na mesma tensão. Pode-se notar também que, para velocidade de alimentação de 6m/min, a transferência por curto circuito do 430LNb é mais sensível à variação da tensão que os arames 430Ti e 308LSi (isto é, a derivada dessa atinge um maior valor). Para velocidade de alimentação de 10m/min, o mesmo ocorre para o 308LSi. Além disto, nesta velocidade de alimentação a derivada de F_{cc} com a tensão tende a ser maior do que com a velocidade de 6m/min. Isto sugere

uma maior dificuldade de controle na soldagem com curto circuito com maior velocidade de alimentação, uma vez que mudanças na tensão de operação causam alterações muito fortes nas condições de soldagem

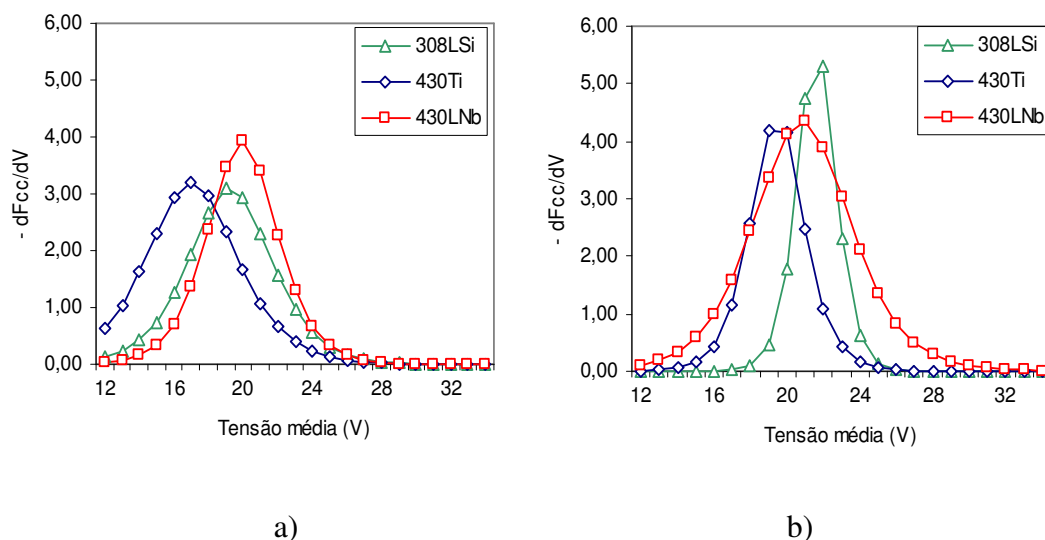


Figura 5.9 - Derivada da função fator de curto circuito em relação à tensão média para as velocidades de alimentação de 6m/min e 10m/min.

5.2.2. Estabilidade

A figura 5.10 mostra a variação do desvio padrão da corrente de soldagem observada nos testes realizados para as velocidades de alimentação 6 e 10m/min para os três arames. Já as figuras 5.11 e 5.12 mostram o mesmo resultado para todas as velocidades utilizadas para os arames 430Ti e 430LNb. Observa-se, para menores velocidades de alimentação, que este parâmetro mantém-se elevado, nos testes com o arame 430Ti, mesmo para valores altos de tensão onde a transferência é do tipo globular. Assim, por exemplo, para velocidade de alimentação de 6m/min e tensões em torno de 30V, o desvio padrão da corrente para o arame 430Ti ficou em torno de 50A e, para o 430LNb, em torno de 10A. A figura 5.13 mostra oscilogramas de corrente típicos para os arames 430LNb e 430Ti com velocidade de alimentação de 4, 6, 8 e 12m/min e operação em arco aberto (globular ou aerossol). Para as menores velocidades de alimentação, a

soldagem com o arame 430Ti apresenta picos relativamente periódicos e pronunciados de corrente associados, possivelmente, com o destacamento das gotas de metal de adição na transferência globular. Este comportamento, bastante diferente do observado para o 430LNb (picos menores e mais frequentes), explica o maior desvio padrão da corrente observado para o primeiro arame para as menores velocidades de alimentação.

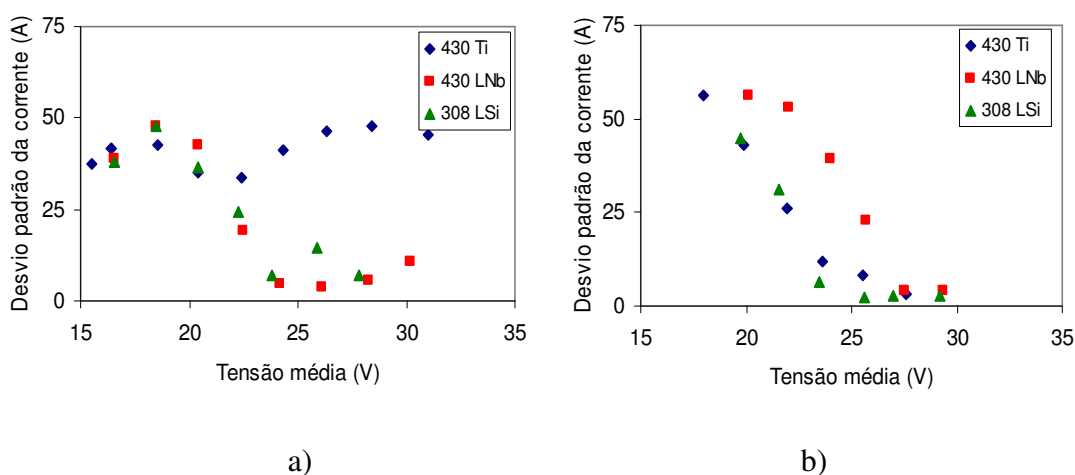


Figura 5.10 - Variação do desvio padrão da corrente com a tensão média para os arames 430Ti, 430LNb e 308LSi. a) velocidades de alimentação de 6m/min e b) velocidade de alimentação de 10m/min.

Pode-se observar ainda que, mesmo para velocidades de alimentação mais altas, o desvio padrão da corrente com o arame 430Ti apresenta valores altos, comparadamente ao arame 430LNb. Já o 430LNb apresenta valores de desvio padrão caindo gradativamente com o aumento da tensão e velocidade de alimentação. Por exemplo, na condição de alimentação de 12m/min e tensão ajustada de 34V, o desvio da corrente (erro padrão) para o 430LNb foi de 4,1A para uma corrente de 246A (1,66%) enquanto que, para o 430Ti, foi de 12,7A para uma corrente de 233A (5,46%). Essa diferença foi ainda mais crítica nas menores velocidades de alimentação (fig.5.10 a).

Para as maiores velocidades de alimentação, observa-se, nos testes com o arame 430Ti, a ocorrência esporádica de períodos com uma redução pronunciada de corrente. Uma possível explicação para esse efeito seria o agarramento do arame no sistema de

alimentação devido ao seu atrito com este. Neste caso, este efeito seria o principal responsável pelo maior desvio padrão da corrente com este arame.

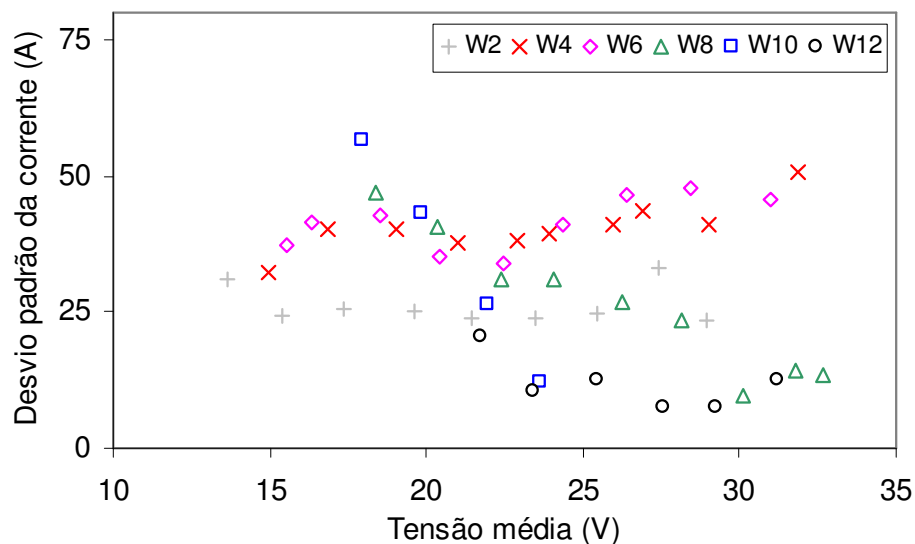


Figura 5.11 - Variação do desvio padrão da corrente com a tensão média para o arame 430Ti para todas as velocidades de alimentação.

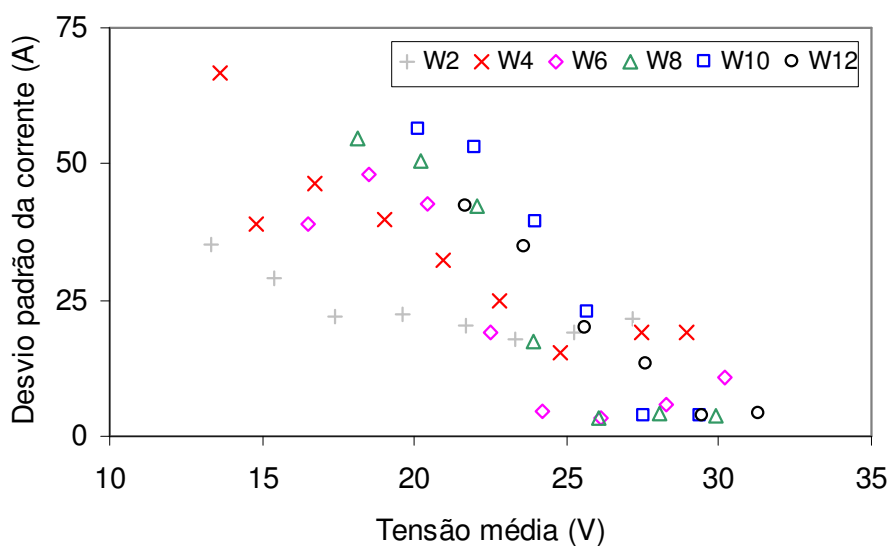


Figura 5.12 - Variação do desvio padrão da corrente com a tensão média para o arame 430LNb para todas as velocidades de alimentação.

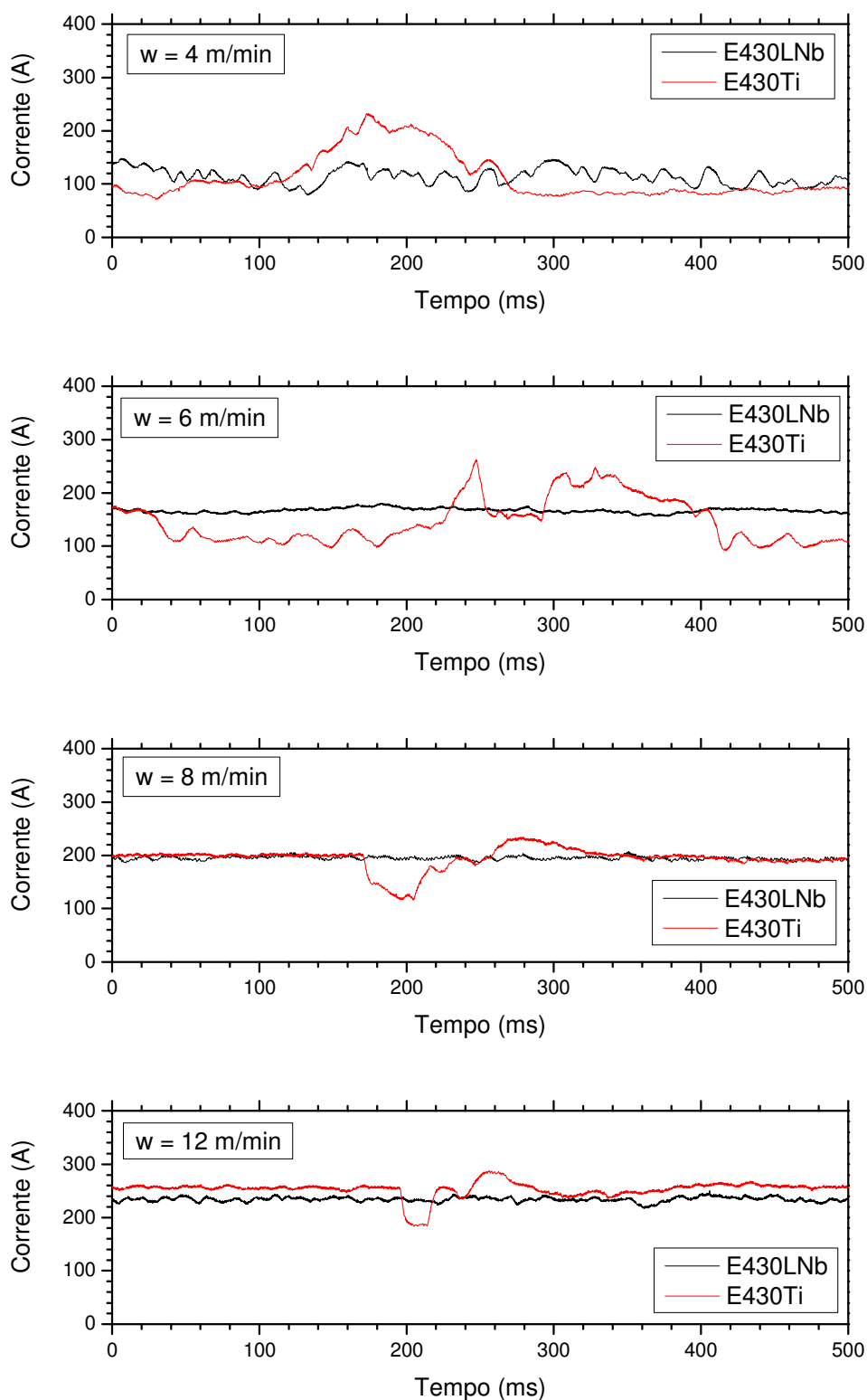


Figura 5.13 - Oscilogramas de corrente para os arames 430LNb e 430Ti com velocidade

$W = 4\text{m/min}$ e variação de 4, 6, 8 e 12m/min.

Assim, o fato do 430Ti operar em tensões de soldagem mais baixas, para velocidades menores de alimentação, não significa que o mesmo seja mais estável no processo. A figura 5.14 mostra curvas de período de transferência em função da tensão referência para as velocidades de alimentação de 6 e 10m/min. Segundo MODENESI & AVELAR (1997), BAIXO (1990), BAIXO & DUTRA (1991), o processo é mais estável, na operação em curto circuito, para tensões em que ocorrem os valores mínimos do período de transferência de metal. Na velocidade de 6m/min, o arame 430Ti apresenta um mínimo para tensões próximas de 20V enquanto o 430LNb o apresenta para tensões próximas de 22V. Já na velocidade de 10m/min, o 430Ti apresenta mínimo em tensões entre 17 e 18V, enquanto o 430LNb o apresenta para tensões um pouco mais elevadas, em torno de 19V. O fato do valor do período mínimo de transferência ocorrer a tensões mais baixas para os testes com o arame 430Ti já era esperado visto que, com este arame, pode-se soldar a tensões mais baixas do que com o arame 430LNb, conforme discutido anteriormente.

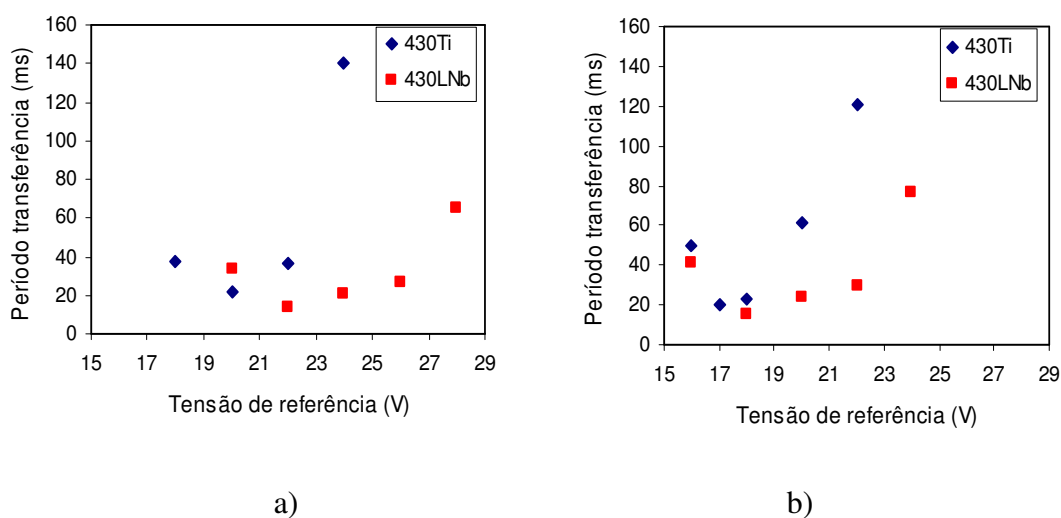


Figura 5.14 - Período de transferência metálica em relação à tensão de referência para as velocidades de (a) 6m/min e (b) 10m/min.

Considerando a aparência dos cordões formados, a tendência do arame 430Ti operar de uma forma mais instável reflete no aspecto dos cordões das fotos da figuras 5.15 e 5.16. As fotos mostram cordões de solda realizados na velocidade de alimentação 10m/min em condições de transferência aerossol. Pode-se notar que a qualidade aparente dos

cordões realizados com o 430Ti é inferior à dos arames 430LNb e 308LSi. Durante os testes de soldagem com o arame 430Ti, foi observada a formação de uma quantidade significativa respingos comparadamente com os outros arames. As figuras 5.15 (vista de cima) e 5.16 (vista de frente) mostram fotos dos cordões na velocidade de alimentação de 10m/min e tensão de 32V, condição tipicamente de transferência aerossol. Os cordões formados com o 430Ti apresentaram formatos bastante diferentes, aparentemente mais convexos. Isso pode estar ligado a uma possível diferença de molhabilidade, nesse caso menor para o 430Ti, sugerindo uma maior tensão superficial do metal líquido desse arame. Essa maior tensão superficial pode, em parte, explicar o diferente comportamento desse arame nas condições para a transferência de metal (uma maior força retendo o metal líquido na ponta do eletrodo). No entanto, análises nesse sentido não foram realizadas e não se pode concluir, com exatidão, que a tensão superficial seja a responsável por esta diferença.

A possível maior tensão superficial, a formação de óxidos devido ao grande poder de desoxidação do titânio e a pior condição superficial do arame 430Ti podem estar relacionadas com as principais instabilidades observadas: variação no comprimento do arco, velocidade irregular na alimentação, formação de respingos e formato dos cordões de maior convexidade, embora estudos nesse sentido não tenham sido aprofundados.



a)

b)

c)

Figura 5.15 - Aspecto dos cordões de solda (vista de cima): a)308LSi; b)430LNb; c)430Ti. Velocidade de alimentação de 10 m/min e tensão de 32 V.

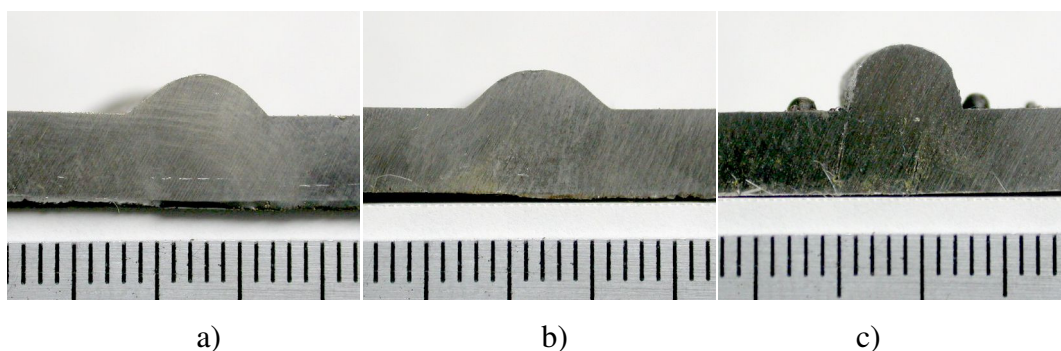


Figura 5.16 - Visão dos cordões de solda (vista de topo): a)308LSi; b)430LNb; c)430Ti. Velocidade de alimentação de 10 m/min e tensão 32 V.

5.2.3. Mapas de parâmetros

Para facilitar a comparação do desempenho dos arames ferríticos nos testes de soldagem, foram construídos mapas que mostram a variação de diferentes parâmetros de soldagem, para cada arame, em função da velocidade de alimentação e da tensão de soldagem. Eles foram construídos com o programa ORIGIN™ e são basicamente mapas de curvas de nível de um dado parâmetro.

A sua construção envolve basicamente a criação de uma matriz do parâmetro em função da velocidade de alimentação e da tensão. Para isto, para alguns parâmetros, modelou-se, primeiro, a variação do parâmetro, para cada velocidade de alimentação, em função da tensão, por regressão. Destes modelos, foram geradas tabelas do parâmetro em função da tensão, para cada velocidade de alimentação, que foram inseridas no programas ORIGIN™. Em alguns casos, não foi possível ajustar de forma adequada, qualquer modelo aos dados experimentais. Nestes casos, os próprios dados foram fornecidos ao programa que, através de rotinas de suavização (*smoothing*), reduzia a sua variabilidade antes de criar os mapas.

As figuras 5.17 e 5.18 mostram mapas do parâmetro “corrente média” em termos de tensão e velocidade de alimentação para os arames 430Ti e 430LNb, respectivamente. Estes mapas foram construídos ajustando por regressão linear, para cada valor de velocidade de alimentação, um polinômio de terceiro grau aos dados de tensão e

corrente de soldagem. A partir das equações, criou-se uma matriz de valores de corrente em função da tensão e velocidade de alimentação. Esta matriz foi usada pelo programa ORIGIN™ para gerar o mapa. Neste, as áreas brancas foram colocadas posteriormente para excluir as regiões que não foram cobertas por testes experimentais.

Os mapas de corrente dos dois arames são bastante similares. Observa-se que a corrente de soldagem, como esperado, tende a aumentar com a velocidade de alimentação do arame e com a tensão de operação. Para baixas velocidades de alimentação a corrente varia mais fracamente com a tensão. Os níveis de corrente são similares, mas os mapas sugerem que, para baixos valores de velocidade de alimentação e tensão, a corrente exigida pelo arame 430LNb seja maior e que, para altos valores desses parâmetros, a tendência se inverta.

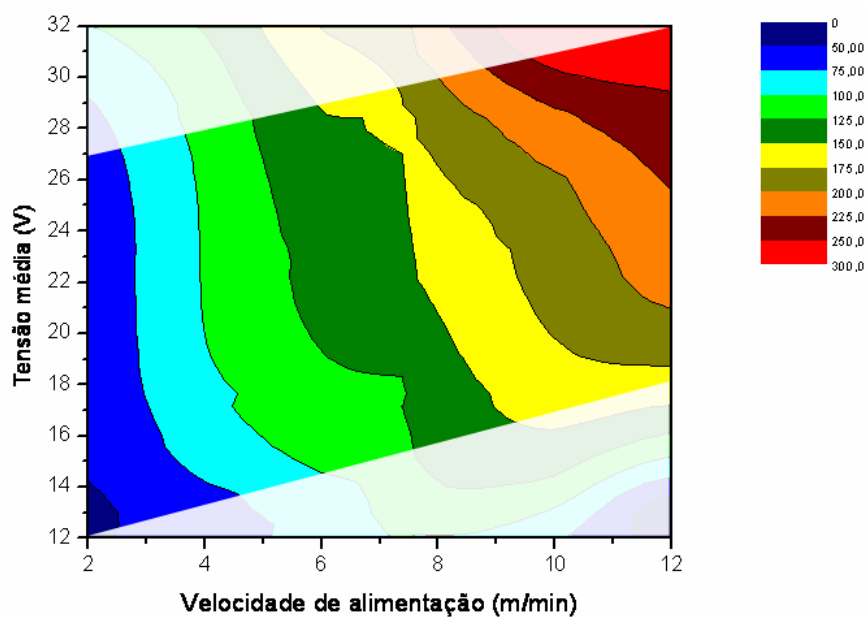


Figura 5.17 - Mapa do parâmetro corrente média para o 430Ti.

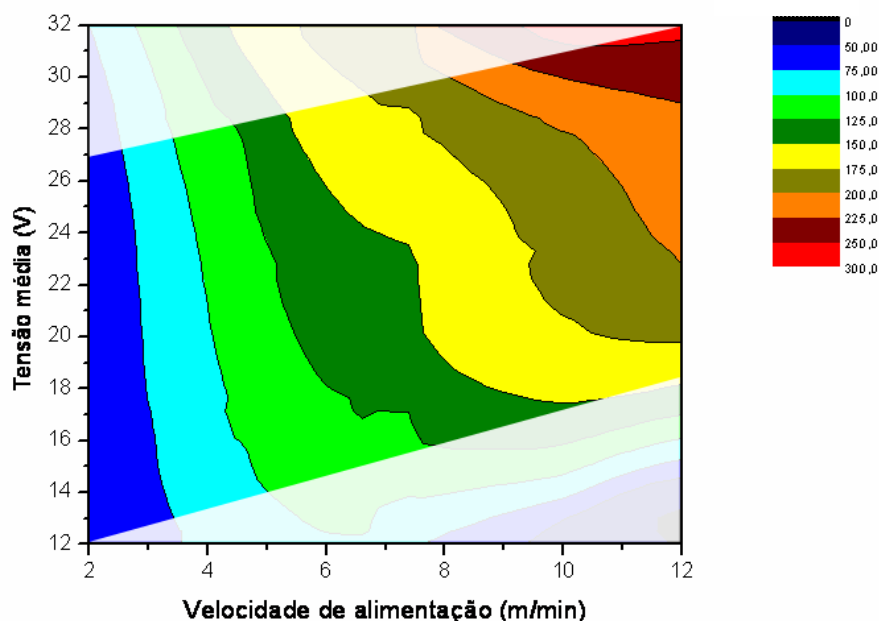


Figura 5.18 - Mapa do parâmetro corrente média para o 430LNb.

As figuras 5.19 e 5.20 mostram mapas da frequência de transferência por curto circuito, em termos de tensão e velocidade de alimentação, para os arames 430LNb e 430Ti, respectivamente. Esse tipo de mapa complementa as curvas da figura 5.14 (período de transferência por curto circuito). Pode-se notar que as frequências mais altas de transferência (períodos menores) para o 430LNb acontecem nas faixas de tensão de 16 a 22V e velocidade de alimentação de 7 a 11m/min, com valores variando de 60 a 70Hz. Por sua vez, com o arame 430Ti, a frequência de transferência atinge valores máximos em torno de 50Hz. Em ambos os casos, estes valores ocorrem para as condições operacionais com menores tensões de soldagem. Os mapas ressaltam, também, a tendência da operação de soldagem com o arame 430Ti atingir condições sem curto circuito para menores valores de tensão.

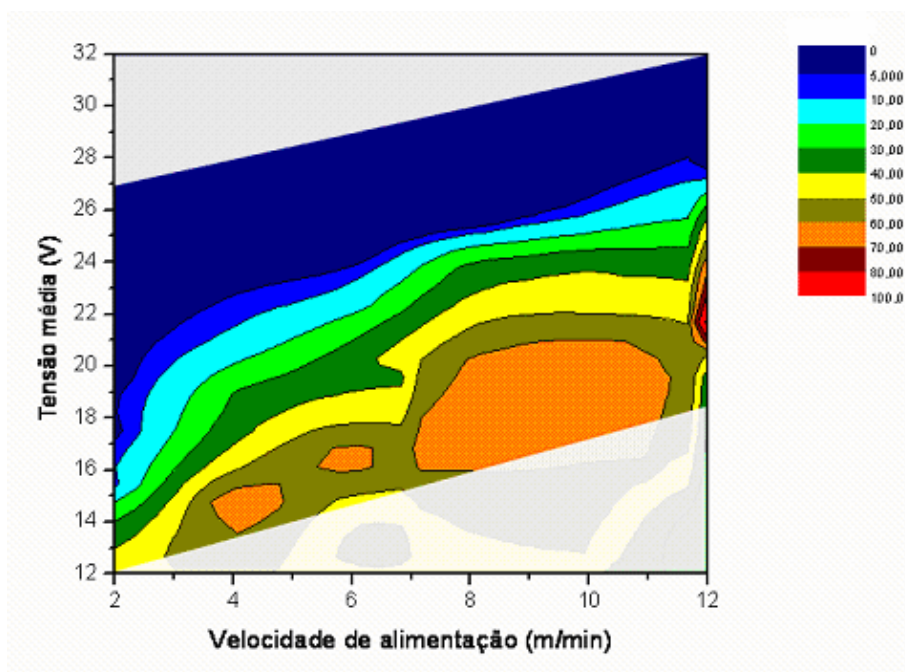


Figura 5.19 – Mapa do parâmetro frequência de transferência (Hz) por curto circuito para o arame 430LNb.

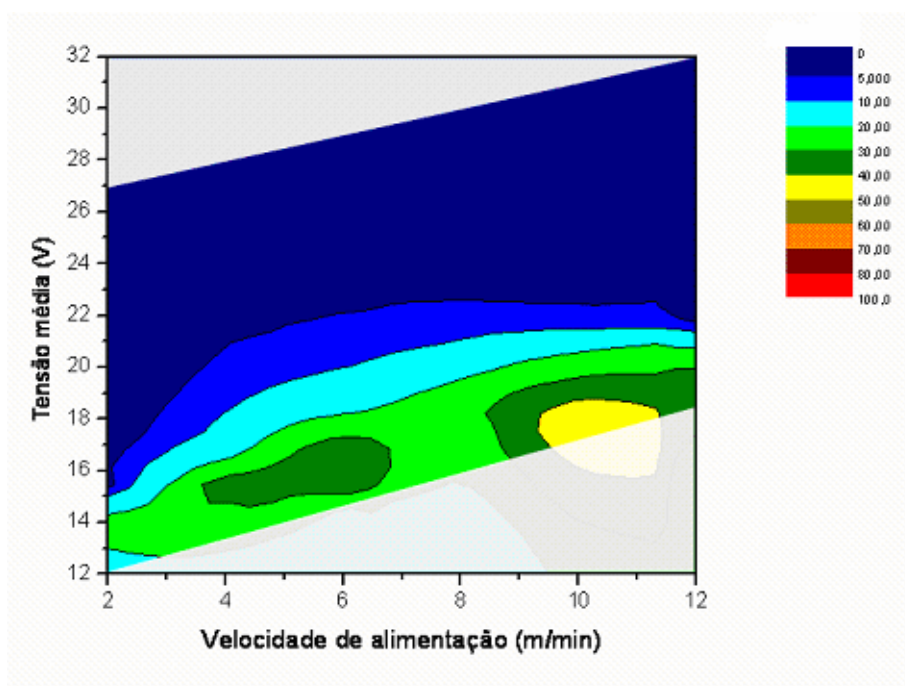


Figura 5.20 – Mapa do parâmetro frequência de transferência (Hz) por curto circuito para o arame 430Ti.

As figuras 5.21 e 5.22 mostram mapas do desvio padrão relativo da corrente ou erro padrão da corrente ou ainda coeficiente de variação (desvio/média x 100) em função da tensão e da velocidade de alimentação, para os arames 430Ti e 430LNb, respectivamente. Estes mapas foram preparados diretamente no programa ORIGIN™ dos dados experimentais sem a etapa inicial de criação de um modelo por regressão. A matriz foi criada pelo programa com a opção de suavização dos dados.

O mapa do arame 430Ti mostra que a variabilidade da corrente de soldagem se mantém relativamente elevada em altas tensões mesmo para velocidades de alimentação de 6 ou 8m/min. Para o arame 430LNb este efeito ocorre apenas para a menor velocidade de alimentação (2m/min) que apresenta, para as tensões mais altas, uma transferência globular com grandes gotas e, desta forma, grande variação de corrente.

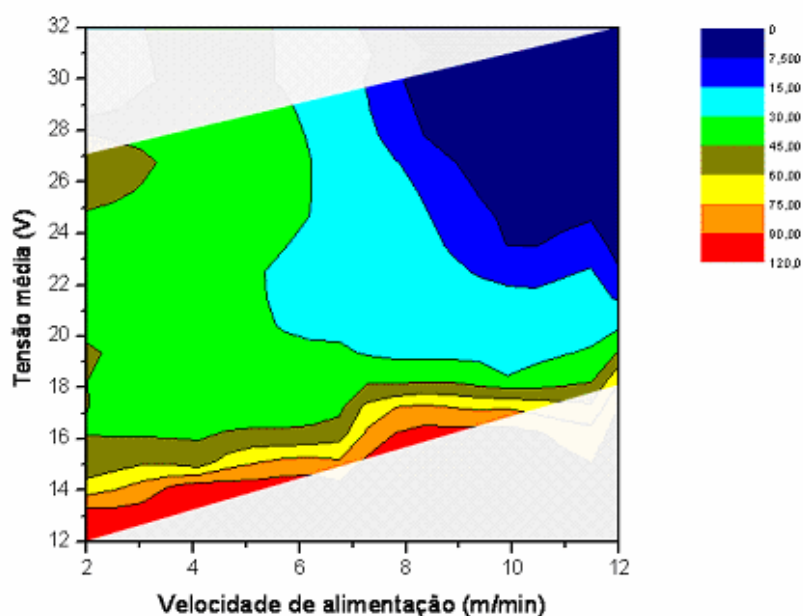


Figura 5.21 – Mapa do parâmetro erro padrão da corrente para o 430Ti.

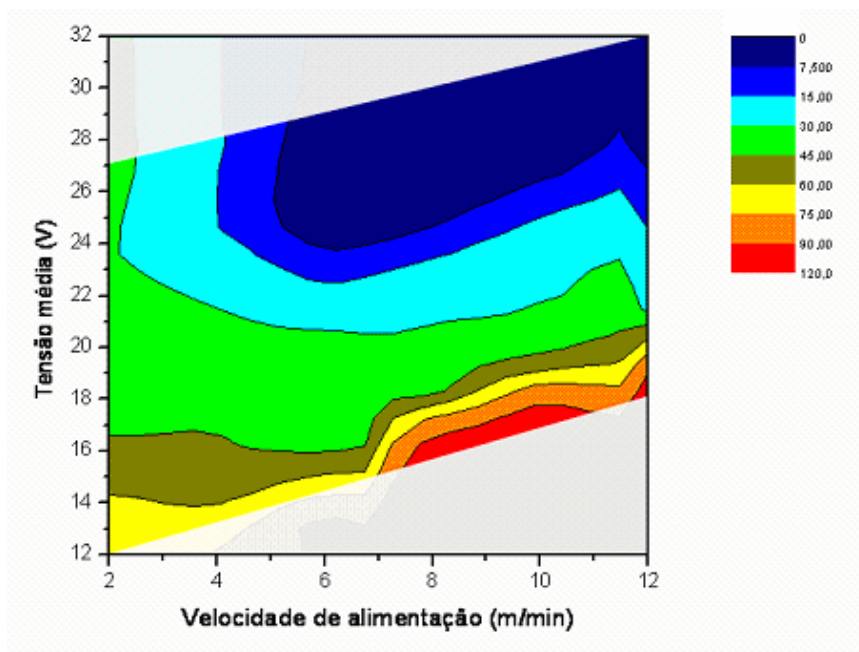


Figura 5.22 – Mapa do parâmetro erro padrão da corrente para o 430LNb.

As figuras 5.23 e 5.24 mostram mapas do fator de curto circuito em função da tensão e da velocidade de alimentação, para os arames 430LNb e 430Ti, respectivamente. Os mapas mostram, basicamente, que a área correspondente aos valores menores do fator de curto circuito (0 a 2,5%) para os testes com o arame 430Ti é mais extensa para todas as velocidades de alimentação. Por outro lado, os testes de soldagem com menores valores de tensão com este arame parecem não atingir valores tão elevados do fator de curto circuito em comparação ao arame 430LNb. Estes resultados estão de acordo com o discutido na seção 5.2.1 e indicam que o arame 430Ti opera com uma tensão menor que o 430LNb.

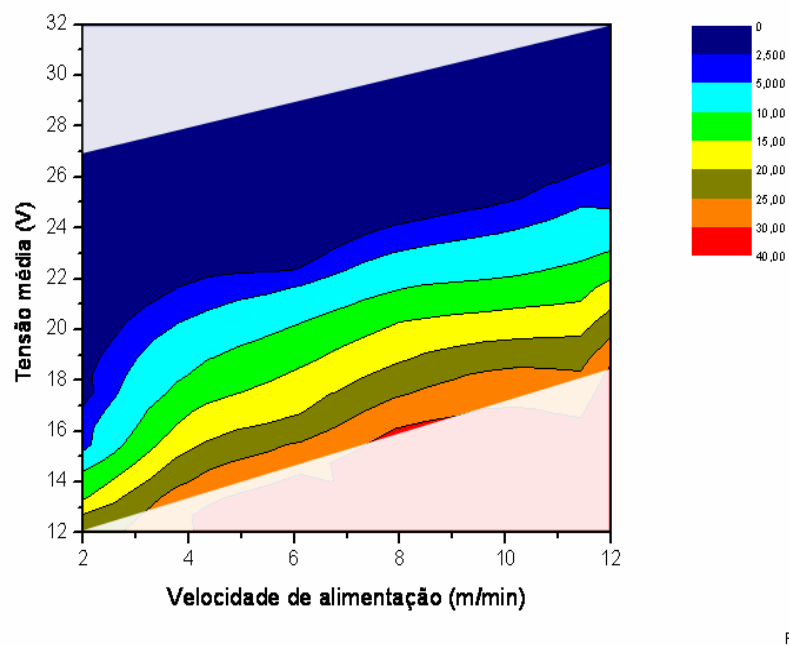


Figura 5.23 – Mapa do parâmetro fator de curto circuito para o 430LNb.

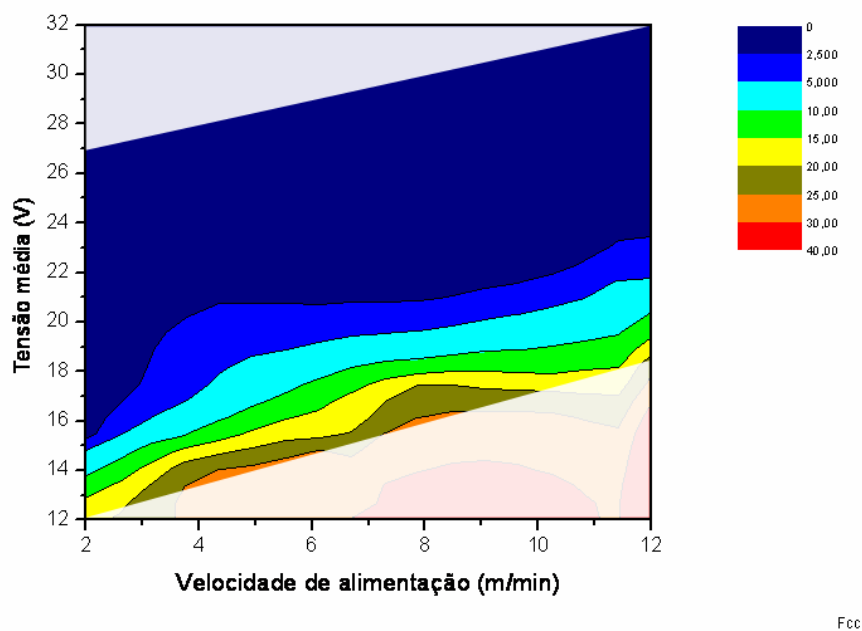


Figura 5.24 – Mapa do parâmetro fator de curto circuito para o 430Ti.

5.3. Transferência de metal

5.3.1. Determinação do tipo de transferência pelos oscilogramas

Uma tentativa de determinação do tipo de transferência metálica de maneira objetiva, através da análise de oscilogramas de tensão e corrente, foi sugerida, de acordo com os critérios abaixo descritos, baseados nos desvios padrão de corrente e fator de curto circuito. Método similar foi utilizado por HEALD et al. (1994).

As tabelas 5.5 a 5.7 apresentam os valores das variáveis utilizados, adquiridos e calculados nos testes realizados. Os resultados completos estão no apêndice 1. Esses valores são: velocidade de alimentação (W), corrente e tensão médios, desvios padrão relativos da corrente ou erro padrão (DP), fator de curto circuito (F_{cc}), frequência de curto circuito (FC), períodos de arco e de curto e o tipo de transferência suposta (TT), classificação em curto circuito (CC), globular (GB) e spray ou aerossol (SP).

Foram feitas várias tentativas para se tentar estabelecer um critério que pudesse suportar a determinação do tipo de transferência metálica (TT), basicamente um sistema de “tentativas e erros”, utilizando basicamente valores de desvio padrão e fator de curto circuito. Não foi possível estabelecer valores únicos que pudessem servir como base para essa determinação, considerando os valores de corrente média – I_m , e valores de referência de corrente de transição encontrados em literatura (tabela 5.8) e ainda observações feitas durante os testes. Dessa maneira, foram estabelecidos valores diferentes para os três arames. Uma variável X foi introduzida para receber esses valores. Já para o fator de curto circuito, um único critério foi utilizado. Os critérios utilizados foram:

1 – desvio padrão relativo de corrente ou erro padrão (DP):

- as transferências que apresentaram $DP \leq X\%$ de seus valores foram consideradas transferências por aerossol;
- as transferências que apresentaram $DP > X\%$ foram consideradas transferências globular ou curto circuito (ver critério 2).

2 – fator de curto circuito (Fcc):

- foram consideradas transferências por curto circuito, as transferências que apresentaram $DP > X\%$ e $F_{cc} > 3\%$;
- as transferências que apresentaram $DP > Y\%$ e $F_{cc} \leq 3\%$ foram consideradas globular;
- Para o 308LSi, $X = 4,00$; para 430LNb, $X = 10,00$ e para 430Ti, $X = 15,00$.

Apesar de os desvios padrão da corrente do 430Ti, em valores absolutos, não serem superiores aos do 430LNb e 308LSi (fato discutido no item 5.2.2) mas, considerando valores de corrente média, os desvios relativos foram sempre maiores. Isso justifica, em parte a utilização de uma faixa de valores maiores de DP para o 430Ti. O fluxograma da figura 5.25 mostra o critério acima descrito.

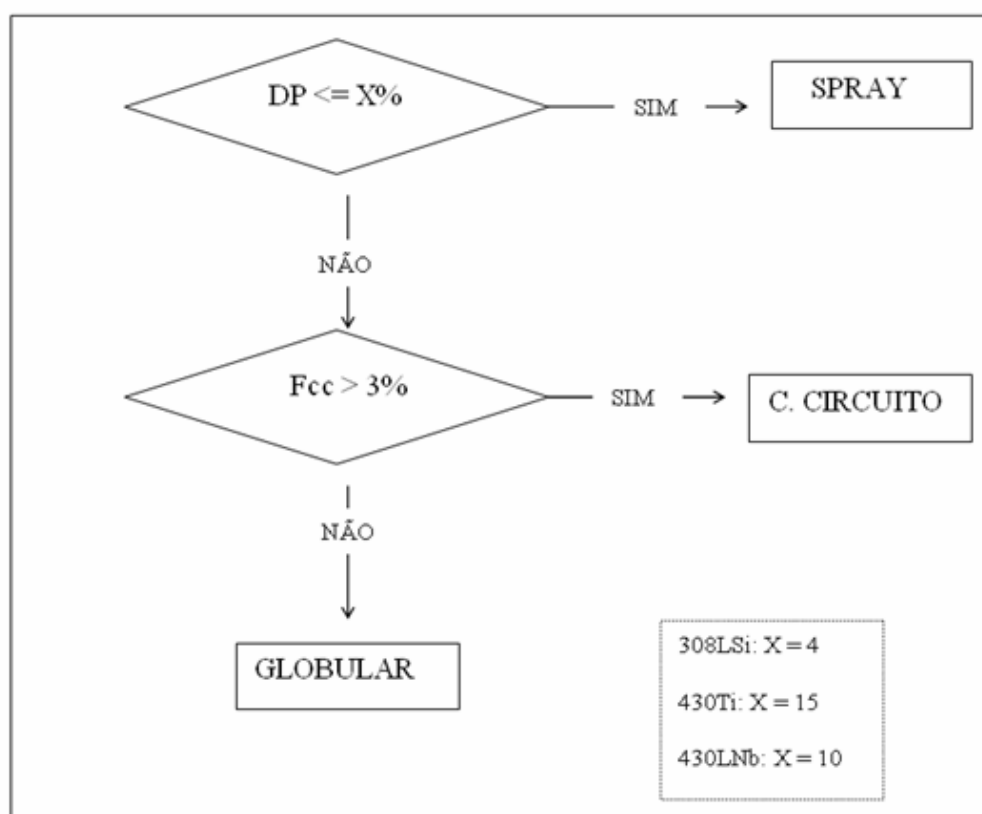


Figura 5.25 – Fluxograma do critério para estabelecimento do tipo de transferência para os arames ferríticos.

Tabela 5.5 – Resultados referentes aos testes com o arame 308LSi.

W (m/min)	Tensão Média(V)	Corrente Média(A)	Período (ms)			FC (Hz)	Fcc (%)	DP (%)	TT
			Total	Arco	Curto				
6	16,57	112,94	22,57	18,90	3,67	44,30	16,27	33,65	CC
6	18,47	122,69	39,40	34,77	4,63	25,38	11,75	39,14	CC
6	20,40	124,85	75,43	70,89	4,54	13,26	6,03	29,23	CC
6	22,26	127,82	137,73	134,25	3,48	7,26	2,59	19,07	GL
6	23,83	131,98					0,00	5,30	GL
6	25,85	141,12					0,00	10,23	GL
6	27,79	147,80					0,00	4,63	GL
8	16,90	135,29	18,51	14,65	3,85	54,04	20,81	33,56	CC
8	17,90	145,68	23,60	19,70	3,90	42,38	16,54	31,30	CC
8	19,73	149,36	28,23	24,77	3,46	35,42	12,36	31,79	CC
8	22,43	148,62	56,51	55,32	1,19	17,70	2,13	10,45	GL
8	23,55	159,36					0,00	1,70	SP
8	25,39	164,11					0,00	1,88	SP
8	27,58	174,78					0,00	1,50	SP
10	19,77	163,41	17,84	15,25	2,60	56,05	14,58	27,33	CC
10	21,54	167,88	20,08	18,44	1,64	49,81	8,15	18,53	CC
10	23,47	170,45	85,12	84,54	0,58	11,75	0,90	3,74	SP
10	25,58	175,80					0,00	1,41	SP
10	27,01	191,94					0,00	1,50	SP
10	29,18	202,22					0,00	1,38	SP
12	22,19	183,00	13,98	12,92	1,06	71,54	7,61	12,54	CC
12	24,10	190,20					0,00	1,53	SP
12	25,85	211,09					0,00	1,10	SP
12	27,93	220,32					0,00	1,16	SP
12	29,80	228,33					0,00	1,28	SP

Tabela 5.6 – Resultados referentes aos testes com o arame 430Ti.

W (m/min)	Tensão Média(V)	Corrente Média(A)	Período (ms)			FC (Hz)	Fcc (%)	DP (%)	TT
			Total	Arco	Curto				
2	13,65	45,31	32,61	29,60	3,01	30,66	9,23	68,16	CC
2	15,37	54,08	471,04	464,59	6,45	2,12	1,37	44,96	GL
2	17,33	56,00	555,70	549,74	5,97	1,80	1,07	45,26	GL
2	19,60	53,99	571,13	565,73	5,40	1,75	0,95	46,46	GL
2	21,46	59,98	1013,79	1009,05	4,73	0,99	0,47	39,69	GL
2	23,46	58,38					0,00	40,90	GL
2	25,45	61,86					0,00	39,65	GL
2	27,45	62,52					0,00	52,78	GL
2	28,98	117,40					0,00	20,04	GL
4	14,98	88,22	20,74	18,19	2,55	48,22	12,28	36,44	CC
4	16,89	94,12	68,70	64,88	3,82	14,56	5,57	42,68	CC
4	19,01	97,93	128,34	123,35	4,99	7,79	3,89	40,88	CC
4	21,00	98,92	205,90	201,00	4,90	4,86	2,38	37,92	GL
4	22,90	104,49	328,13	323,10	5,03	3,05	1,53	36,64	GL
4	23,93	103,44					0,00	38,11	GL
4	25,98	100,76					0,00	40,75	GL
4	26,91	105,53					0,00	41,32	GL
4	29,02	111,51					0,00	36,84	GL
4	31,84	125,31					0,00	40,55	GL
6	15,55	113,79	20,07	17,00	3,07	49,82	15,40	32,93	CC
6	16,38	117,09	22,65	19,65	3,00	44,16	13,29	35,54	CC
6	18,56	124,95	60,99	57,29	3,70	16,40	6,33	34,30	CC
6	20,43	127,38	120,41	117,24	3,17	8,30	2,64	27,61	GL
6	22,44	130,12	223,68	220,65	3,03	4,47	1,36	26,00	GL
6	24,34	132,24					0,00	31,09	GL
6	26,37	142,31					0,00	32,64	GL
6	28,43	149,91					0,00	31,75	GL
6	31,01	166,71					0,00	27,29	GL
8	18,38	149,18	34,50	31,33	3,17	28,99	9,28	31,46	CC
8	20,33	155,10	72,64	69,96	2,68	13,77	3,87	26,14	CC
8	22,39	150,23	164,34	162,04	2,30	6,09	1,38	20,69	GL
8	24,03	158,38	192,07	189,88	2,19	5,21	0,38	19,65	GL
8	26,22	168,19					0,00	15,90	GL
8	28,16	189,52					0,00	12,34	SP
8	30,14	199,93					0,00	4,87	SP
8	31,79	217,38					0,00	6,49	SP
8	32,67	225,04					0,00	5,88	SP
10	16,75	128,38	27,46	19,81	7,65	36,42	27,87	100,45	CC
10	17,95	167,75	22,08	19,03	3,06	45,29	14,04	33,61	CC
10	19,85	175,78	36,89	34,50	2,39	27,11	6,74	24,44	CC
10	21,96	178,07	140,48	138,11	2,38	7,12	1,13	14,74	SP
10	23,63	188,32					0,00	6,36	SP
10	25,50	196,63					0,00	4,08	SP
10	27,58	209,37					0,00	1,53	SP
12	21,71	201,39	231,95	230,46	1,50	4,31	0,94	10,20	SP
12	23,40	226,25					0,00	4,54	SP
12	25,43	222,09					0,00	5,63	SP
12	27,56	230,72					0,00	3,35	SP
12	29,27	249,61					0,00	3,07	SP
12	31,19	232,55					0,00	5,47	SP

Tabela 5.7 – Resultados referentes aos testes com o arame 430LNb.

W (m/min)	Tensão Média(V)	Corrente Média(A)	Período (ms)			FC (Hz)	Fcc (%)	DP (%)	TT
			Total	Arco	Curto				
2	13,33	50,37	28,70	24,65	4,05	34,84	30,37	69,58	CC
2	15,37	54,65	144,01	139,18	4,83	6,94	3,37	53,04	GL
2	17,40	54,93	535,80	529,36	6,44	1,87	1,21	39,67	GL
2	19,61	54,47	805,42	799,58	5,85	1,24	0,73	41,41	GL
2	21,72	56,10	2,81	2,79	0,02	355,61	0,66	35,95	GL
2	23,33	58,41					0,00	30,84	GL
2	25,22	58,29					0,00	33,05	GL
2	27,14	61,01					0,00	35,26	GL
4	13,60	80,65	26,22	19,47	6,75	38,15	27,38	82,76	CC
4	14,84	87,32	13,86	10,77	3,09	72,16	22,30	44,74	CC
4	16,71	97,14	23,73	20,02	3,71	42,14	15,65	47,75	CC
4	19,00	99,26	31,63	28,83	2,81	31,61	8,88	40,24	CC
4	20,97	98,48	82,83	79,60	3,23	12,07	3,90	32,73	CC
4	22,82	100,63	218,42	215,09	3,33	4,58	1,54	24,59	GL
4	24,81	107,49					0,00	14,32	GL
4	27,48	115,52					0,00	16,44	GL
4	28,91	120,79					0,00	15,67	GL
6	16,52	118,12	14,98	12,08	2,90	66,77	19,36	33,07	CC
6	18,51	129,83	23,49	20,09	3,40	42,57	14,49	36,87	CC
6	20,42	132,68	29,58	26,89	2,69	33,80	9,12	32,18	CC
6	22,49	135,94	76,25	74,93	1,32	13,11	1,76	14,13	GL
6	24,21	144,27					0,00	3,26	SP
6	26,11	152,15					0,00	2,31	SP
6	28,25	163,59					0,00	3,48	SP
6	30,17	171,03					0,00	6,20	SP
8	18,14	148,78	14,94	11,68	3,26	66,95	21,80	36,67	CC
8	20,21	153,33	16,20	13,74	2,46	61,72	15,21	33,05	CC
8	22,06	159,17	21,57	19,71	1,85	46,37	8,66	26,47	CC
8	23,94	159,36	26,28	25,45	0,83	38,06	3,15	10,98	CC
8	26,07	171,31					0,00	1,94	SP
8	28,07	180,08					0,00	2,27	SP
8	29,89	196,83					0,00	1,88	SP
10	20,11	172,24	14,20	11,66	2,54	70,42	17,87	32,63	CC
10	21,99	179,28	20,61	18,63	1,98	48,53	9,64	29,70	CC
10	24,00	182,92	26,51	25,35	1,16	37,72	4,40	21,47	CC
10	25,66	184,31	65,38	64,62	0,76	15,30	0,58	12,35	GL
10	27,51	199,45					0,00	1,95	SP
10	29,36	215,20					0,00	1,81	SP
12	19,94	164,06	31,51	24,04	7,47	31,73	23,71	74,93	CC
12	21,65	198,24	9,00	7,53	1,48	111,05	16,46	21,39	CC
12	23,63	204,79	14,20	13,15	1,06	70,40	7,47	16,98	CC
12	25,63	207,38	24,69	24,07	0,61	40,51	2,49	9,66	SP
12	27,60	218,81					0,00	6,07	GL
12	29,47	233,04					0,00	1,64	SP
12	31,28	245,86					0,00	1,66	SP

Corrente de transição globular/aerossol

Considerando apenas as análises dos oscilogramas de corrente e tensão e, mais precisamente, os valores de correntes médias das soldas, obtidas através dessas análises, podem-se sugerir faixas de corrente onde, supostamente, estaria a corrente de transição. A transição de globular para aerossol não acontece de maneira instantânea, por isso normalmente se considera uma faixa de valores ao invés de um valor determinado.

Para o arame 308LSi, o valor de corrente de transição sugerido situa-se entre 149 e 159A. Esses valores são a máxima corrente onde se verificou a transferência globular (149A) e a mínima onde se verificou a transferência aerossol (159A), utilizando o critério exposto na seção 5.3.1. Esses valores estão condizentes com os valores de literatura (tabela 5.8), principalmente com os de SCOTTI (1998), sinalizando que o critério utilizado para esse arame pode ter sido adequado. Para o 430Ti, a faixa sugerida é de 160 a 190A, utilizando o mesmo critério. Esses valores estão acima dos encontrados para o 308LSi, porém não há como comparar com valores de literatura já que não há informações sobre esse arame. Já para o 430LNb, não se pode sugerir uma faixa já que o maior valor de corrente onde se verificou a transferência globular foi 184A e a menor onde se verificou a spray foi inferior (144A). Isso pode significar que ou o critério não foi bem escolhido ou que alguns dos valores de corrente podem estar em fronteira e se torna difícil determinar o tipo transferência.

Tabela 5.8 - Valores de corrente de transição encontrados na literatura.

Fonte	Corrente transição (A)	Diâmetro arame (mm)	Gás de proteção
Welding Handbook (1991)	170	0,90	Ar + 2%O ₂
	225	1,10	Ar + 2%O ₂
SCOTTI (1998)	130-150	0,90	Ar + 2%O ₂
BALSAMO (2000)	172-178	1,00	Ar + 2%O ₂
SANTOS (1986)	180	1,00	Ar + 2%O ₂

5.3.2. Mapas de transferências

Com base nos critérios definidos no item anterior, foram construídos os mapas das figuras 5.26, 5.27 e 5.28 para os arames 308LSi, 430Ti e 430LNb, respectivamente. Deve-se considerar que os mapas indicam regiões aproximadas para cada tipo de transferência. Pode-se notar que o arame 430Ti apresenta, para velocidades de alimentação a partir de 10m/min, transferência em aerossol em tensões mais baixas que os arames 430LNb e 308LSi. Outro ponto a ser destacado é que o 430Ti possui uma a região de transferência globular mais extensa e a região em curto circuito menos extensa que o 430LNb. Esse fato pode ser interessante pois, na prática, a maior parte das soldas é realizada em curto circuito.

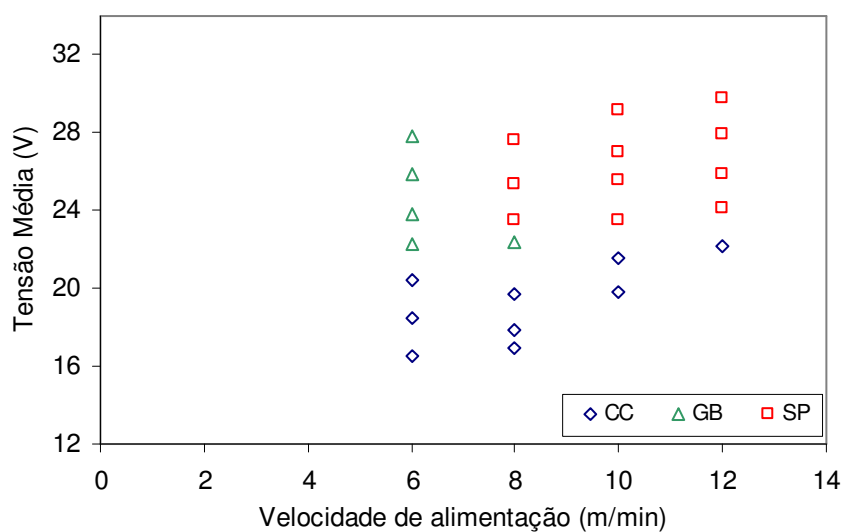


Figura 5.26 - Mapa de transferência para o arame 308LSi.

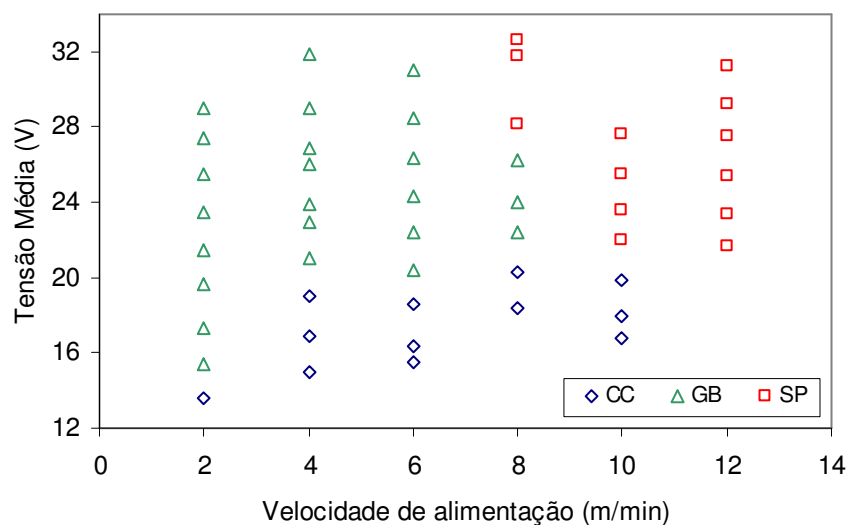


Figura 5.27- Mapa de transferência para o arame 430Ti.

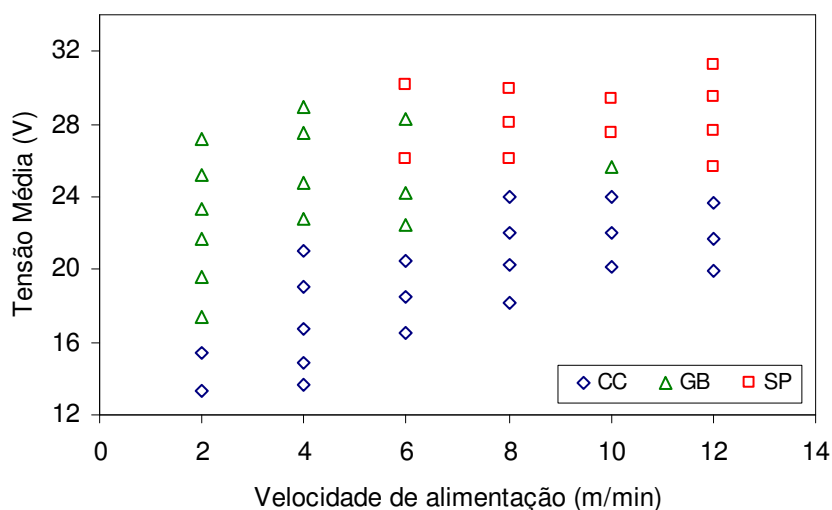


Figura 5.28- Mapa de transferência para o arame 430LNb.

5.4. Filmagem de alta velocidade

5.4.1. Mapas de transferências

A comparação entre resultados de testes de soldagem realizados em laboratórios diferentes pode ser complicada devido a diferenças entre equipamentos e os sistemas de medidas e sua calibração. Além disto, pequenas diferenças no procedimento

experimental podem ocorrer e influenciar os resultados. No presente caso, por exemplo, observou-se que o nível de ruídos dos valores de corrente e tensão em um dos laboratórios era muito maior. Assim, no presente trabalho, procurou-se não se fazer uma comparação absoluta entre os resultados, levando-se em conta, por exemplo, o ajuste dos equipamentos. Procurou-se, alternativamente, comparar resultados levando-se em conta o aspecto geral dos oscilogramas e usando-se os valores de velocidade de alimentação, corrente e tensão média apenas como uma referência.

Primeiramente, utilizou-se a tensão média como referência comparativa entre resultados dos dois laboratórios. As condições que apresentaram tensões médias semelhantes e mesma velocidade de alimentação foram consideradas que tivessem o mesmo tipo de transferência metálica. Após isso, procurou-se determinar o tipo de transferência metálica. Como critério para determinação do tipo de transferência (TT), foram utilizados o diâmetro das gotas (D_g) e o número de gotas transferidas (N_g) por intervalo de tempo. Os diâmetros das gotas e dos arames foram medidos com régua, a partir das imagens ampliadas das transferências. Apesar de ser um método simples, ele permite estimar de forma aproximada o tamanho das gotas. O número de gotas foi determinado a partir da contagem das gotas em intervalos de tempo aleatórios em que a transferência se parecia mais estável. As transferências cujas gotas possuem diâmetro mais de 15% maior que o diâmetro do arame (D_a) foram consideradas globular (GL). Para gotas com diâmetro menor que 115% do diâmetro do arame considerou-se aerossol ou spray (SP). Esse critério foi utilizado anteriormente por FIGUEIREDO & FERRARESI (2001). O número de gotas transferidas por intervalo de tempo também pode indicar o tipo de transferência. No caso de curto circuito (CC) foi utilizada observação direta dos filmes, levando em consideração também os níveis de tensões e velocidades de alimentação envolvidos. Essa abordagem, mesmo não sendo a mais indicada, conforme já discutido aqui, foi utilizada devido à falta de outro parâmetro adequado.

As tabelas 5.9 e 5.10 mostram os valores encontrados de diâmetro e número das gotas, bem como o tipo de transferência para os arames 430LNb e 430Ti. As tabelas mostram, também, a velocidade de alimentação (W), a tensão regulada na fonte (TF), a tensão média no arco (TM), a corrente média (I_m) e o desvio padrão da corrente (DPc). Estes

três últimos determinados através do programa SINAL. Os resultados completos podem ser vistos no apêndice 2.

Tabela 5.9 – Valores encontrados para o arame 430LNb.

W (m/min)	TF (V)		TM (V)		Im (A)		DPc (A)		Dg / Da	Ng (/ s)	TT
	UFMG	UFU	UFMG	UFU	UFMG	UFU	UFMG	UFU			
6	26	24	24,21	23,85	144,27	134,60	4,70	38,66	1,33	48	GL ⁽¹⁾
6	22	20	20,42	19,91	132,68	123,64	42,69	53,43	*	*	CC
6	26	26	24,21	23,94	144,27	124,14	4,70	43,31	1,58	68	GL ⁽¹⁾
8	28	26	26,07	25,05	171,31		3,33		1,00	100	SP
8	30	28	28,07	27,69	180,08		4,09		0,83	320	SP
8	24	22	22,06	21,51	159,17	145,19	42,14	61,12	*	*	CC
8	32	30	29,89	29,83	196,83	184,40	3,69	6,44	0,83	960	SP
10	30	28	27,51	27,66	199,45	183,76	3,89	33,71	0,50	340	SP
10	30	30	27,51	26,82	199,45	173,54	3,89	67,98	0,67	740	SP
10	24	22	21,99	21,82	179,28	169,86	53,24	70,02	*	*	CC
12	26	24	23,63	23,79	204,79	196,67	34,77	62,74	*	*	CC
12	32	30	29,47	29,79	233,04	208,45	3,82	23,00	0,67	820	SP

⁽¹⁾ – Resultados dos dois laboratórios não coincidem.

Tabela 5.10 – Valores encontrados para o arame 430Ti.

W (m/min)	TF (V)		TM (V)		Im (A)		DPc (A)		Dg / Da	Ng (/ s)	TT
	UFMG	UFU	UFMG	UFU	UFMG	UFU	UFMG	UFU			
6	26	24	24,34	23,84	132,24	135,95	41,11	35,65	2,00	108	GL
6	24	22	22,44	21,88	130,12	131,19	33,84	39,46	1,67	32	GL
6	20	18	18,56	17,75	124,95	120,61	42,86	42,63	*	*	CC
6	28	26	26,37	25,75	142,31	131,71	46,45	39,74	1,33	91	GL
8	20	18	18,38	17,74	149,18	145,51	46,93	57,38	*	*	CC
8	26	24	24,03	23,79	158,38	163,33	31,12	30,85	1,70	48	GL
8	32	30	30,14	29,87	198,78	183,40	18,09	33,08	1,15	154	SP
10	24	22	21,96	21,87	178,07	184,08	26,26	51,08	*	*	CC ⁽¹⁾
10	30	28	27,58	27,67	209,37	198,72	3,21	6,50	1,00	220	SP
12	26	24	23,40	23,77	226,25	208,25	10,27	42,04	*	*	SP
12	32	30	29,27	29,82	249,61	229,34	7,66	17,72	0,83	480	SP

⁽¹⁾ – Resultados dos dois laboratórios não coincidem.

Comparando os modos de transferências determinados pelos dois métodos (análise de histograma e análise de filmes) para o 430Ti, observa-se que apenas uma das onze condições escolhidas não coincidiu. Essa única condição foi considerada transferência por spray pela análise de oscilogramas (W = 10m/min; TM = 21,96V, dados da UFMG) enquanto, pela análise da filmagem, foi considerada por curto circuito. No primeiro

caso, a própria análise de oscilogramas já indicava a presença de curtos com $F_{cc} = 1,13$. Quanto ao 430LNb, apenas duas das doze condições escolhidas não coincidiram, a saber $W = 6\text{m/min}$ e $TM = 24,21\text{V}$ (dados da UFMG) e $W = 6\text{m/min}$ e $TM = 23,85$; e $W = 6\text{m/min}$; $TM = 23,94\text{V}$ (dados da UFU) (uma mesma condição da UFMG para duas condições da UFU). Ainda assim, essas condições estão na fronteira globular/spray e podem, também, apresentarem aspectos de ambas as transferências. Os casos acima, tanto para o 430Ti quanto para o 430LNb, podem ser um indicador do bom desempenho do critério utilizado, considerando os poucos pontos em que as transferências não se coincidiram.

As figuras 5.29 e 5.30 mostram os mapas, agora com os pontos determinados pela observação dos filmes, para os arames 430Ti e 430LNb, respectivamente. Observa-se que não houve mudança significativa nos mapas e os dois pontos onde não há coincidência de transferências (pontos indicados por uma seta) estão localizados nas fronteiras onde, normalmente, são regiões onde se pode ter mais de um modo de transferência. Diante disso, pode-se considerar que a análise de histogramas de tensão e corrente através do programa SINAL juntamente com o critério utilizado para determinação do modo de transferência podem ser utilizados para com razoável aproximação.

Quanto à corrente de transição, após a análise das filmagens, sugere-se a faixa de 170 a 180A para o 430Ti, utilizando o mesmo critério anterior, ou seja, máxima corrente onde se verificou a transferência globular (167A) e a mínima onde se verificou a transferência por spray (190A) (apêndice 3). Estes novos valores estão dentro da faixa de valores encontrados utilizando análise de oscilogramas e bastante próximos dos valores encontrados em literatura (tabela 5.8). Para o 430LNb, a faixa encontrada foi de 140 a 170A (apêndice 3), utilizando o mesmo critério anterior. Esses valores estão aceitáveis se comparados aos determinados anteriormente: 184 a 144A. Esses valores condizem com valores de literatura (SCOTTI, 1988) que utilizou arame de 308LSi, porém de 0,90mm de diâmetro.

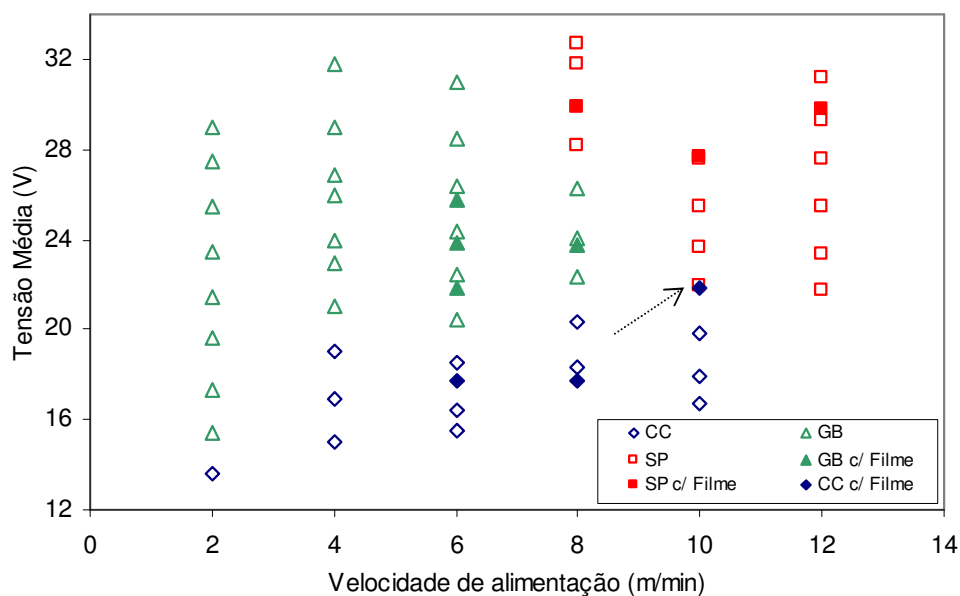


Figura 5.29- Mapa de transferência para o arame 430Ti com pontos observados nos filmes.

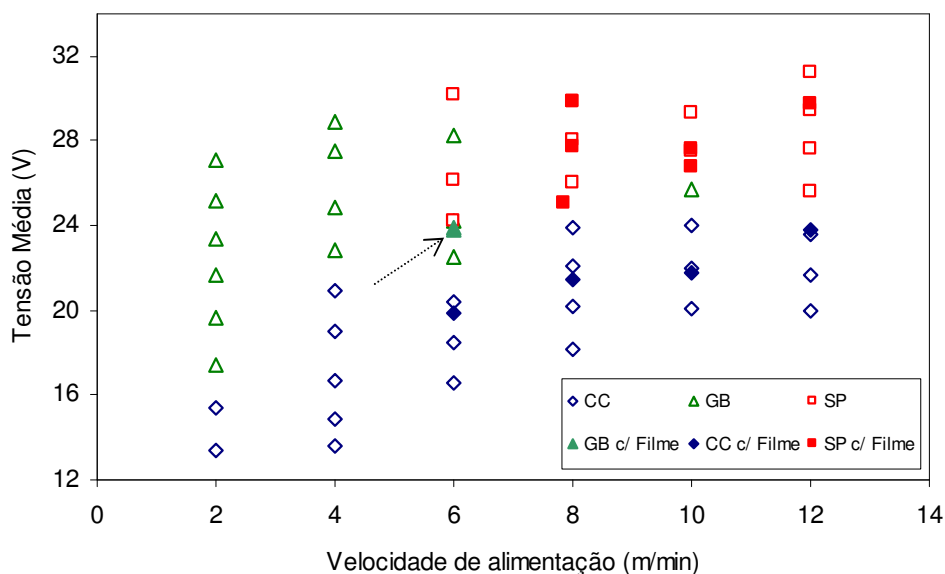


Figura 5.30 - Mapa de transferência para o arame 430LNb com pontos observados nos filmes.

Posteriormente, algumas das situações filmadas das tabelas 5.9 e 5.10 foram verificadas através do aspecto geral dos oscilogramas. Foram verificadas as condições em que não houve coincidência e mais duas condições aleatórias para os arames 430LNb e 430Ti.

Para o 430LNb

As figuras 5.31 e 5.32 mostram os oscilogramas para as condições de velocidade de alimentação 6m/min e tensões de referência de 24 e 26V para testes realizados na UFU e na UFMG, respectivamente (condições que não houve coincidências no tipo de transferências). Nota-se que são transferências aparentemente distintas.

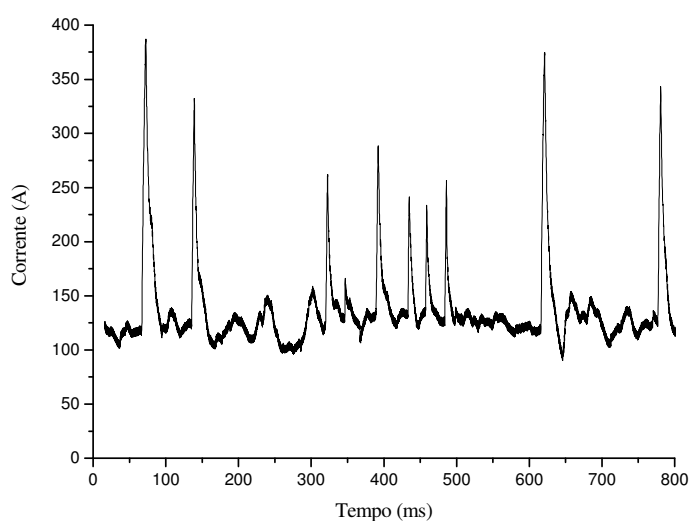


Figura 5.31 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 24V (teste realizado na UFU).

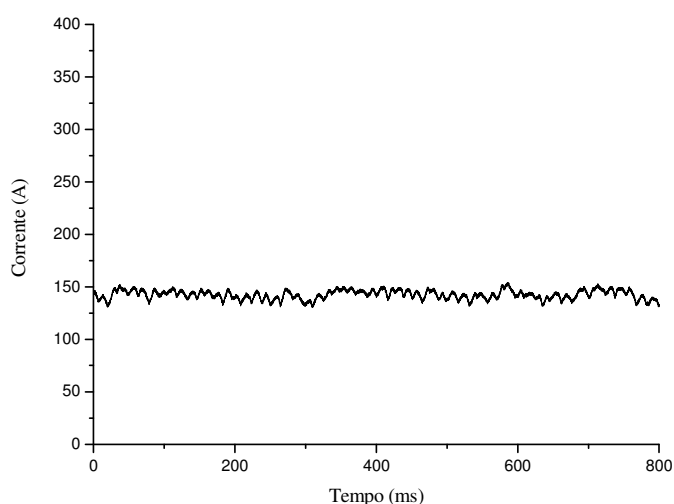


Figura 5.32 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 26V (teste realizado na UFMG).

As figuras 5.32 e 5.33 mostram oscilogramas para as condições de velocidade de alimentação de 6m/min e tensões de 22 e 20V para testes realizados na UFU e UFMG, respectivamente. Pode-se notar que ambas são transferências tipo curto circuito, com pontos máximos de corrente em torno de 300A, apesar de a transferência do teste na UFU apresentar, aparentemente, maior frequência de curto circuito.

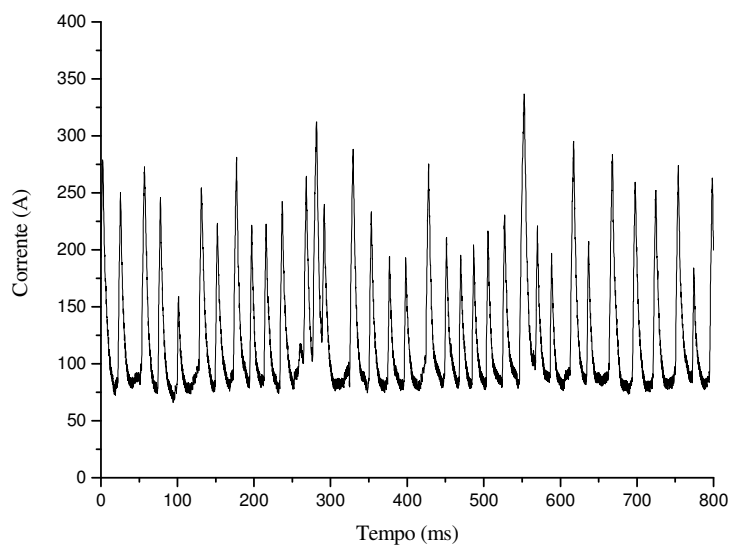


Figura 5.33 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 20V (teste realizado na UFU).

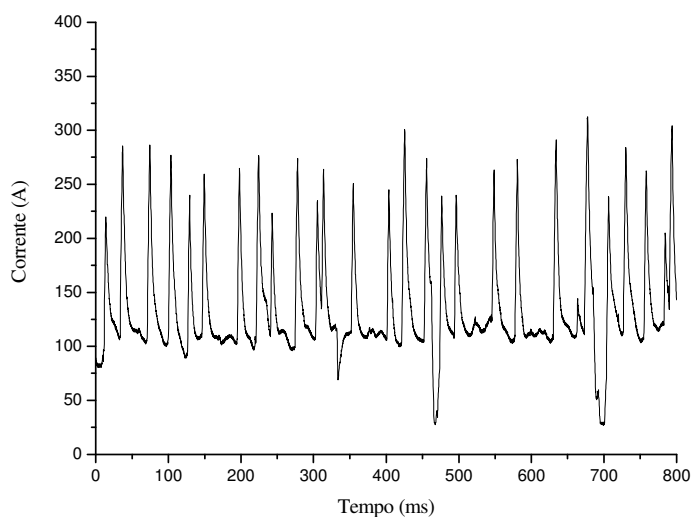


Figura 5.34 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 22V (teste realizado na UFMG).

Finalmente, as figuras 5.35 e 5.36 mostram oscilogramas para as condições de velocidade de alimentação de 8m/min e tensões de 30 e 32V para testes realizados na UFU e UFMG, respectivamente. Pode-se notar que são ambas são transferências tipo aerossol, operando com correntes médias próximas de 200A.

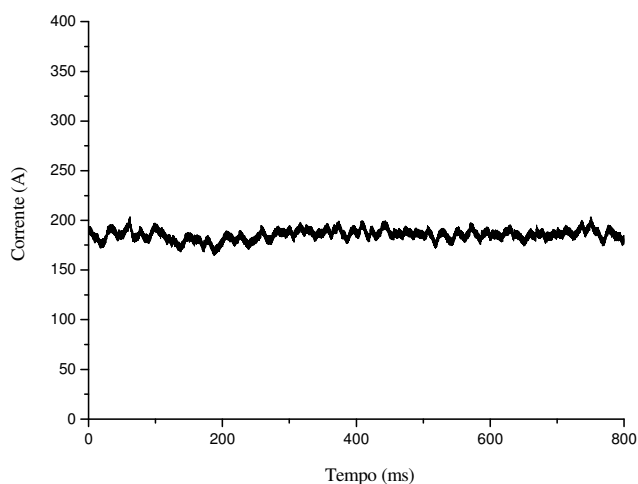


Figura 5.35 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 8m/min e tensão 30V (teste realizado na UFU).

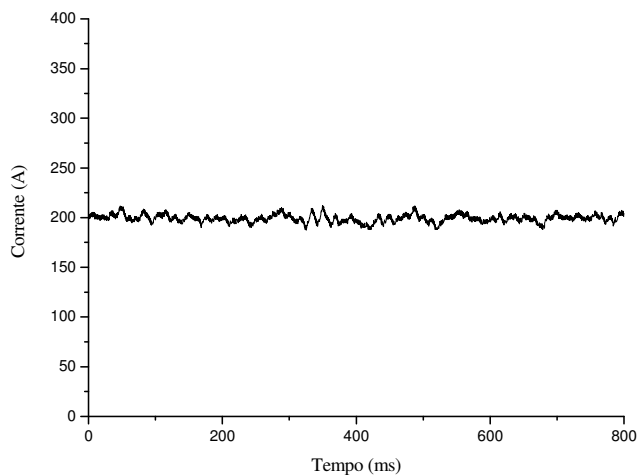


Figura 5.36 – Oscilograma do 430LNb para velocidade de alimentação 8m/min e tensão 32V (teste realizado na UFMG).

Para o 430Ti

As figuras 5.37 e 5.38 mostram os oscilogramas para as condições de velocidade de alimentação 10m/min e tensões de 22 e 24V para testes realizados na UFU e na UFMG, respectivamente (condições que não houve coincidências no tipo de transferências). Pode-se perceber que são transferências similares, ambas por curto circuito. A transferência da condição da UFMG foi considerada, inicialmente, por curto circuito (tabela 5.6) mas com valores de Fcc e DP próximos dos limites, no critério considerado.

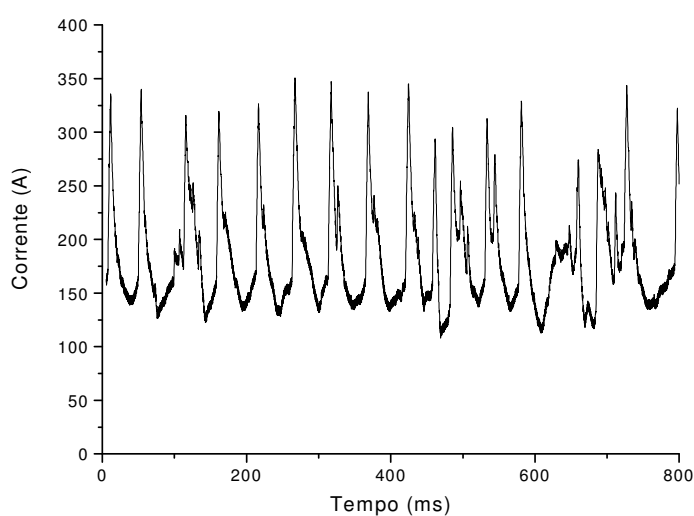


Figura 5.37 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 10m/min e tensão 22V (teste realizado na UFU).

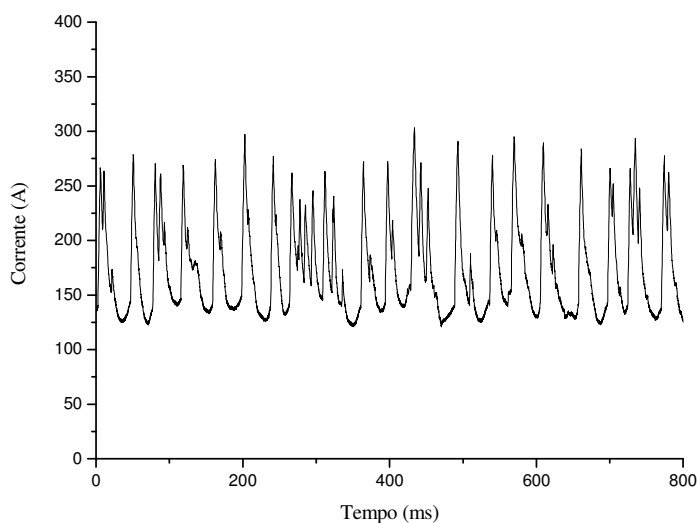


Figura 5.38 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 10m/min e tensão 24V (teste realizado na UFMG).

As figuras 5.39 e 5.40 mostram oscilogramas para as condições de velocidade de alimentação de 6m/min e tensões de 24 e 26V para testes realizados na UFU e UFMG, respectivamente. Pode-se notar que ambas são transferências tipo curto circuito, com pontos máximos de corrente em torno de 350A, apesar de apresentarem frequências de curto circuito diferentes.

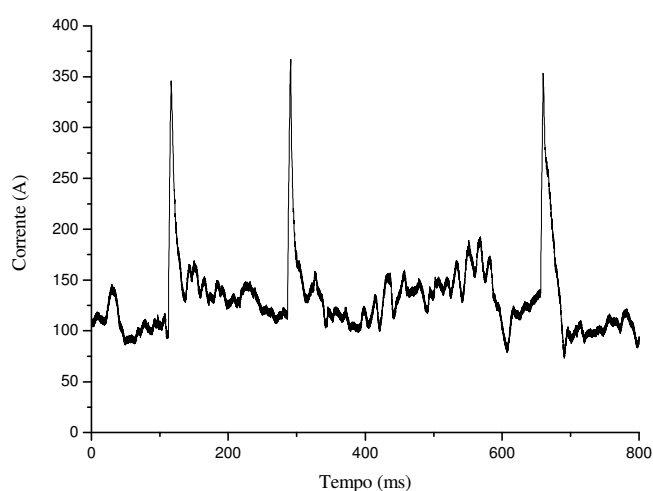


Figura 5.39 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 24V (teste realizado na UFU).

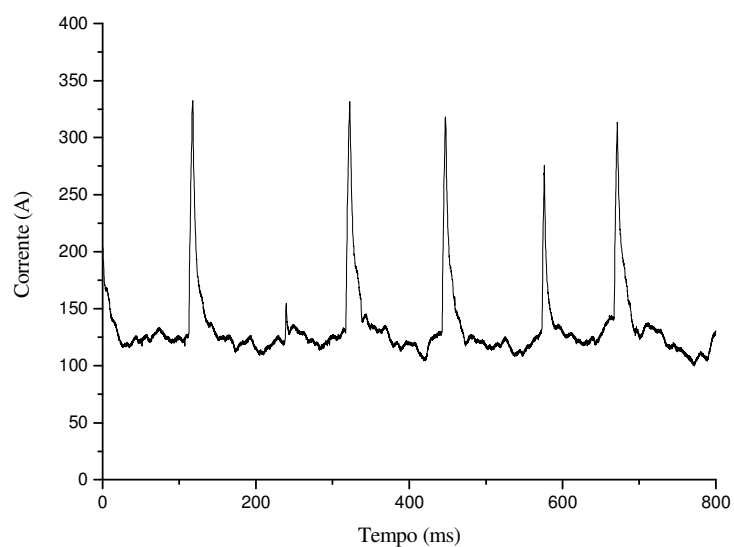


Figura 5.40 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 6m/min e tensão 22V (teste realizado na UFMG).

Finalmente, as figuras 5.41 e 5.42 mostram oscilogramas para as condições de velocidade de alimentação de 10m/min e tensões de 28 e 30V para testes realizados na UFU e UFMG, respectivamente. Pode-se notar que são ambas são transferências tipo aerossol com correntes médias em torno de 200A.

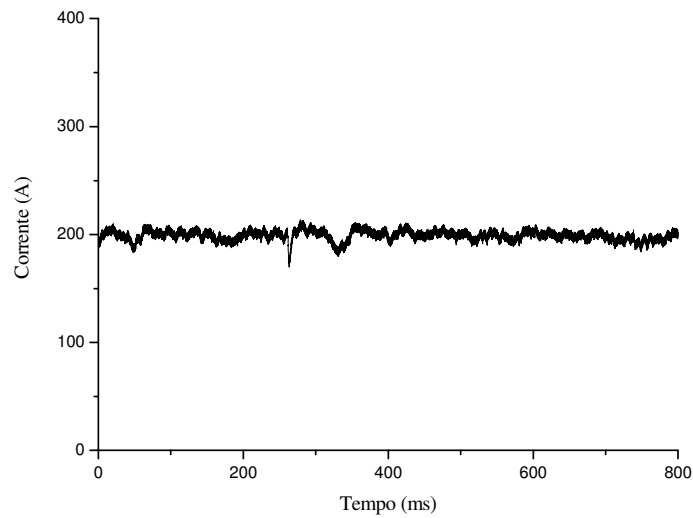


Figura 5.41 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 10m/min e tensão 28V (teste realizado na UFU).

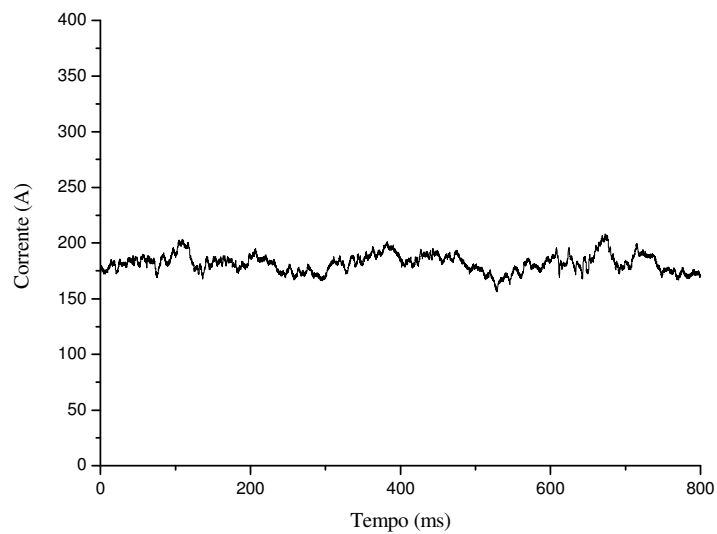


Figura 5.42 – Oscilograma do 430Ti para velocidade de alimentação 10m/min e tensão 30V (teste realizado na UFMG).

Após essa análise comparativa, pode-se notar que os critérios utilizados para comparações de resultados de testes realizados em laboratórios diferentes (tensão média e aspectos dos oscilogramas) podem ser considerados válidos, mas devem ser vistos

com ressalvas já que, como explicado anteriormente, são muitas as influências e muitas delas não podem ser medidas e comparadas.

5.4.2. Outras características

A figura 5.43 mostra alguns quadros sincronizados com o oscilograma de corrente para uma transferência tipicamente em curto circuito ($W = 6\text{m/min}$ e tensão de referência de 16V , tensões no arco de $19,89\text{V}$) para o arame 430Ti. As imagens mostram uma característica típica desse arame que é a irregularidade nas transferências por curto circuito. Basicamente ocorre um curto circuito, um aumento do comprimento de arco, crescimento do arco, crescimento exagerado de uma gota e desprendimento irregular da gota. Esse fato foi observado em várias situações para esse arame e não foi, em geral, com os arames 430LNb e 308LSi. A queda na fonte de soldagem, juntamente com o comprimento de arco, sugere uma redução momentânea na alimentação do eletrodo. Esta poderia estar ligada à condição superficial do arame 430Ti.

As figuras 5.44 e 5.45 mostram alguns quadros sincronizados com o oscilograma de corrente também para uma transferência tipicamente em curto circuito ($W = 6\text{m/min}$ e tensão de referência de 24V) para os arames 430LNb e 430Ti, respectivamente. As imagens mostram, em ambos os casos, a ocorrência de transferência mista (curto circuito/spray para o arame 430LNb e curto circuito/spray ou globular para o 430Ti). Observa-se ainda um maior tamanho das gotas e uma menor frequência de transferência no teste com o arame 430Ti. Esta última diferença já havia sido caracterizada na seção 5.2 deste trabalho.

A figura 5.46 mostra quadros sincronizados com oscilograma de corrente para uma condição de transferência aerossol para $W = 8\text{m/min}$ e tensão de referência de 30V (tensão no arco de $28,86\text{V}$), para o 430Ti. Percebe-se uma seqüência de transferência aerossol, seguida por um aumento violento do comprimento de arco e o retorno à transferência aerossol, mas novamente com um crescimento do comprimento do arco. Estes eventos, juntamente com as quedas observadas na corrente de soldagem sugerem novamente problemas de alimentação com este arame.

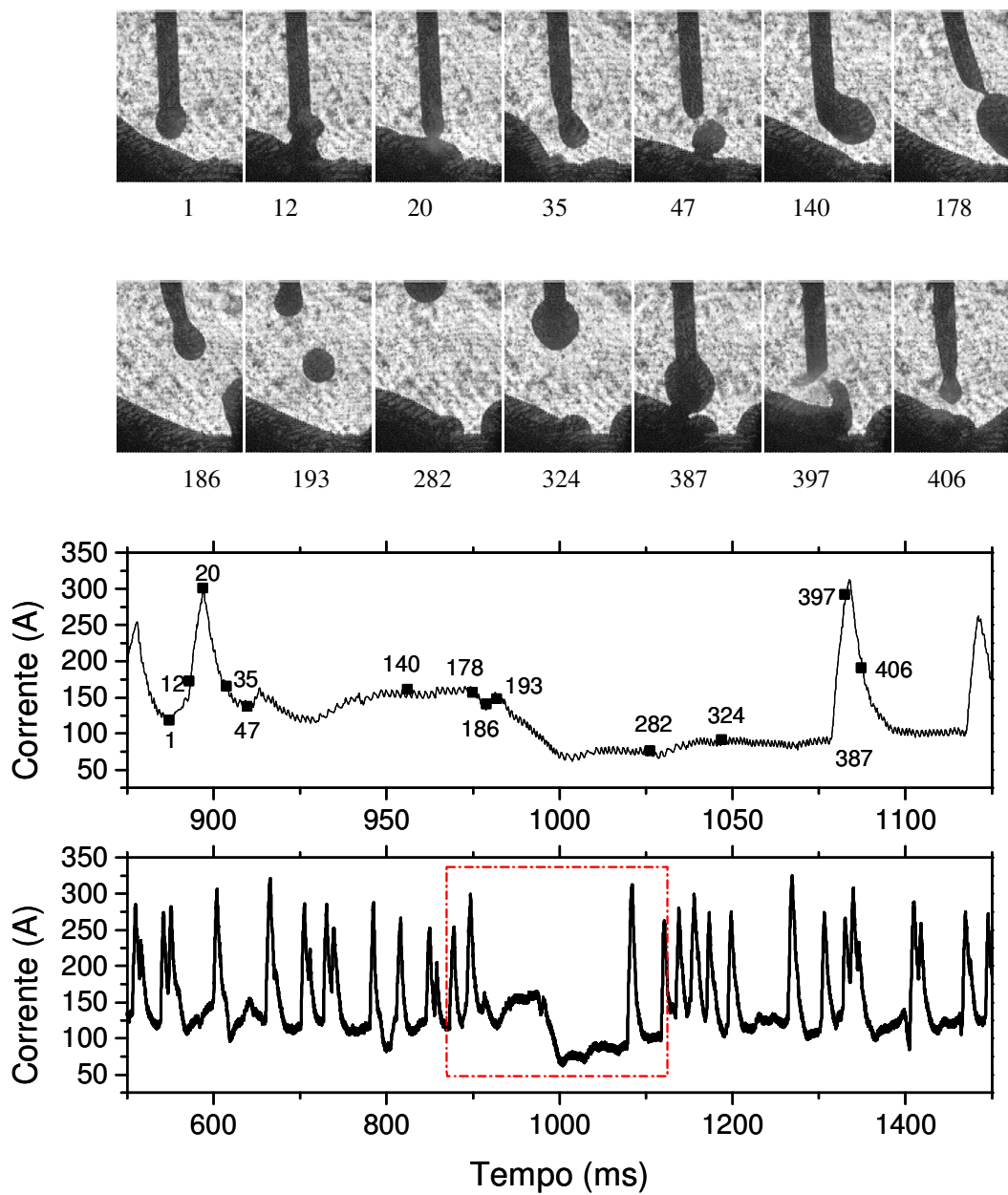


Figura 5.43 – Imagens sincronizadas com oscilograma de corrente para o 430Ti. Tensão de 16V e velocidade de alimentação de 6m/min.

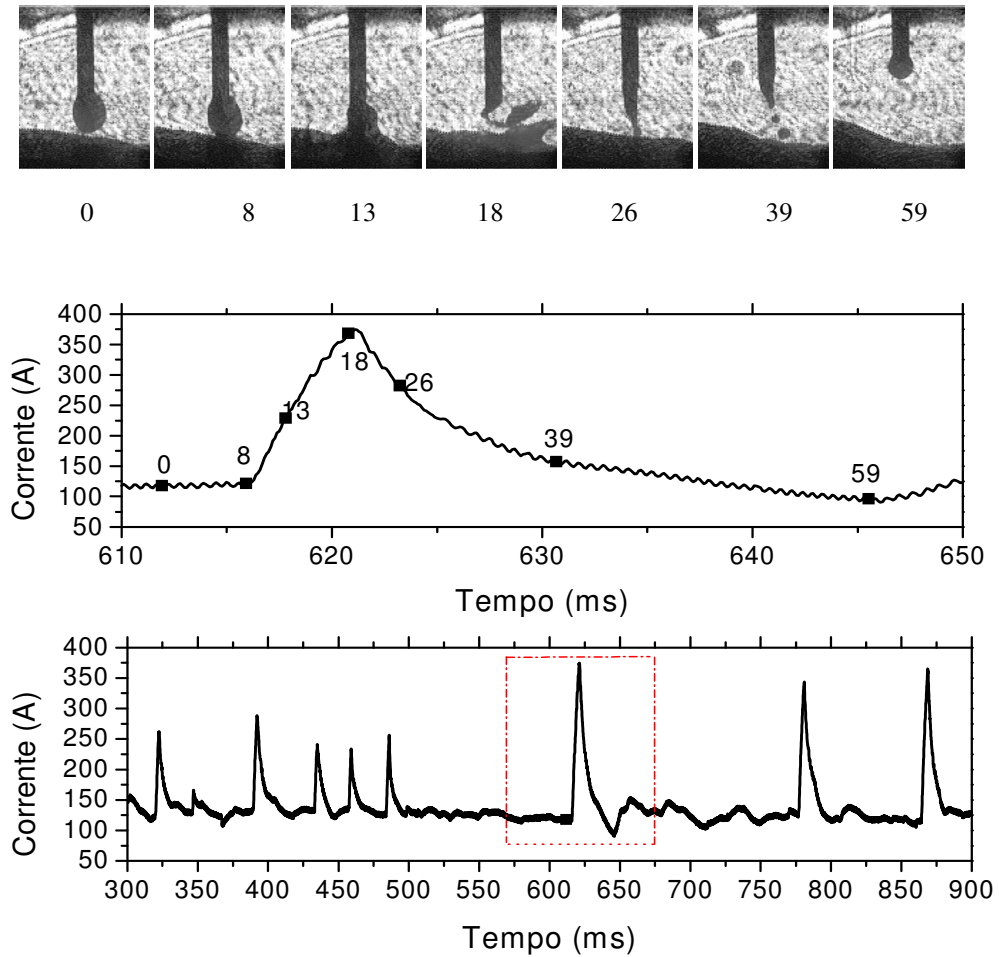


Figura 5.44 – Imagens sincronizadas com oscilograma de corrente para o 430LNb. Tensão de 24V e velocidade de alimentação de 6m/min.

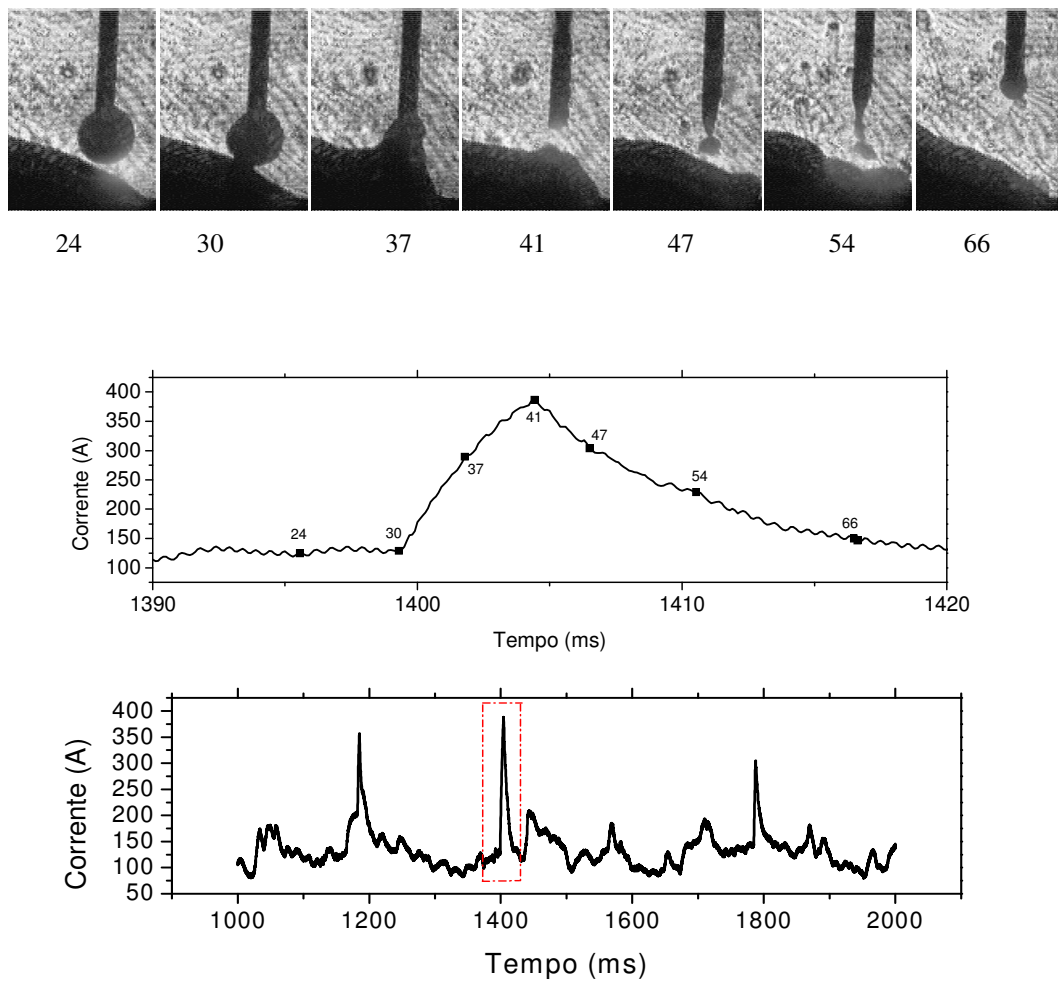


Figura 5.45 – Imagens sincronizadas com oscilograma de corrente para o 430Ti. Tensão de 24V e velocidade de alimentação de 6m/min.

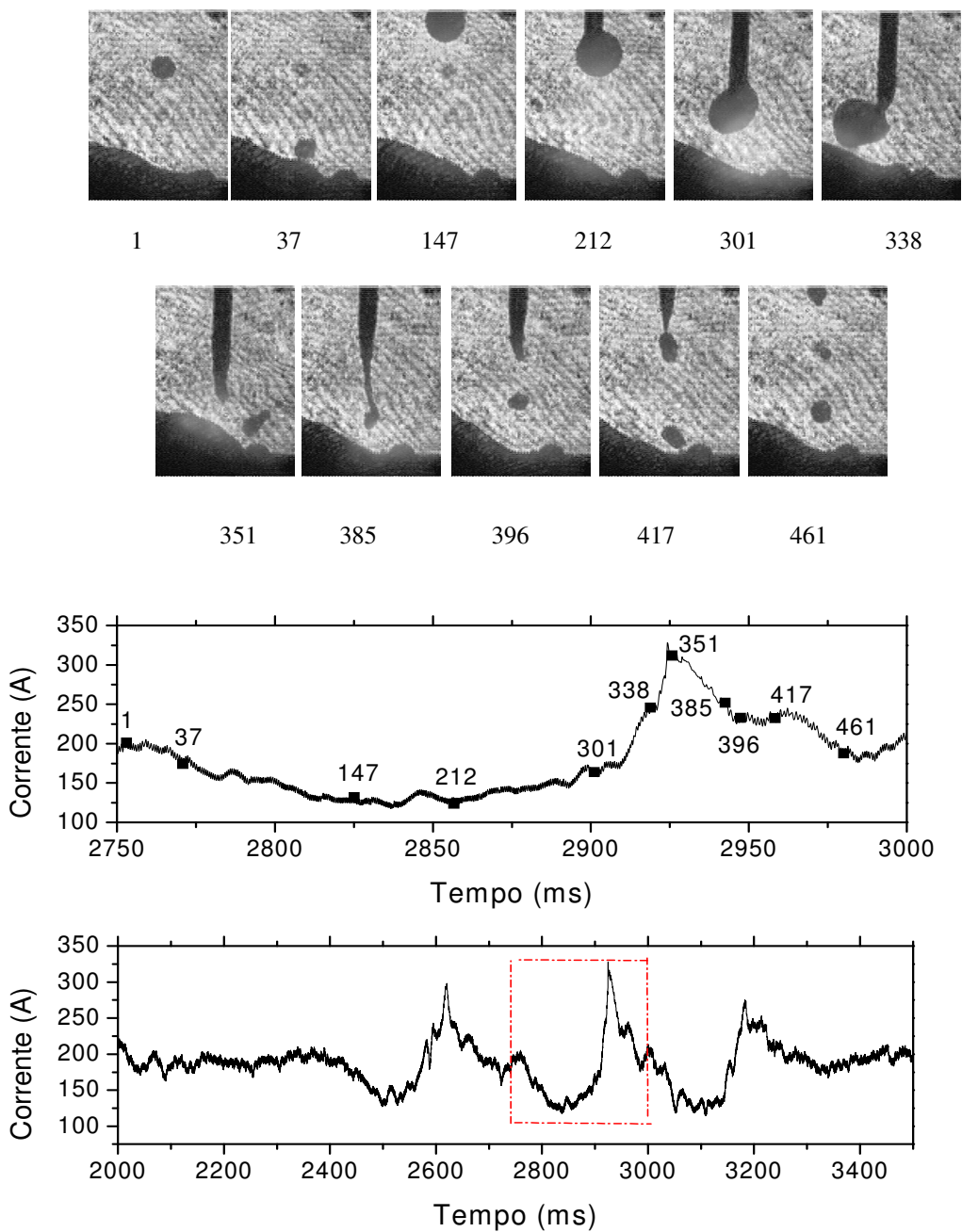


Figura 5.46 – Imagens sincronizadas com oscilograma de corrente para o 430Ti. Tensão de 30V e velocidade de alimentação de 8m/min.

CAPÍTULO 06: CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nesse trabalho, as seguintes conclusões podem ser aqui estabelecidas:

- Em linhas gerais, a variação de diferentes parâmetros usados para caracterizar o processo foi similar para os três arames em termos da velocidade de alimentação e da tensão de soldagem. Os três modos de transferência de metal (curto circuito, globular e spray) foram observados com todos os arames.
- O arame de aço inoxidável austenítico tendeu a operar, principalmente para as menores velocidades de alimentação de arame, com uma corrente menor que os ferríticos. Para os três arames e uma dada velocidade de alimentação de arame, a corrente de soldagem tendeu a aumentar com a tensão. Esta variação tendeu a apresentar três trechos característicos: para os menores valores de tensão, com transferência por curto circuito e, em geral, instável, a corrente aumentou fortemente com a tensão; para valores intermediários de tensão, ainda com transferência por curto circuito, a corrente variou fracamente com a tensão; finalmente, para os maiores valores de tensão, com transferência por queda livre, a corrente voltou a aumentar fortemente com a tensão de soldagem.
- A soldagem com o arame 430Ti apresentou uma instabilidade operacional inferior à com os outros arames. Esta menor instabilidade se manifestou por um menor valor da frequência máxima de transferência na soldagem por curto circuito e por maiores valores do desvio padrão da corrente, na soldagem com transferência por queda livre. Os resultados deste trabalho sugerem que um fator que contribuiu para o pior desempenho do arame 430Ti foi a sua pior qualidade superficial.
- Comparando os cordões de solda obtidos com os arames 430Ti e 430LNb, notou-se que a aparência do cordão de solda do 430Ti foi bastante inferior, com menor molhabilidade e qualidade superficial pior. Novamente, um fator importante parece ser inferior qualidade superficial do arame 430Ti, que resultou em problemas de alimentação irregular que influenciaram o formato final do cordão. Além disto, a

menor molhabilidade do cordão pode ter sido causada por alguma contaminação presente a superfície do arame ou por um mais forte efeito desoxidante do titânio.

- O aspecto superficial dos cordões parece estar ligado, também, às propriedades do titânio visto que o mesmo apresenta problemas de superfície durante a laminação de chapas de aço inoxidável.
- A filmagem de alta velocidade mostrou a ocorrência freqüente, na soldagem com o arame 430Ti, de oscilações fortes no comprimento do arco e no modo de transferência. Acredita-se que estas variações estão relacionadas também com problemas de alimentação de arame associados com a pior qualidade superficial deste arame.
- Os resultados deste trabalho mostram que a técnica utilizada para determinação dos mapas de transferências e de parâmetros a partir de resultados de monitoração da corrente e tensão de soldagem concordar bem com mapas de transferência obtidos com filmagem de alta velocidade. Considerando a maior simplicidade e menor custo da primeira técnica, esta pode ser utilizada com sucesso para trabalhos que exijam uma maior precisão e para testes realizados em campo.

CAPÍTULO 07: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados deste trabalho sugere-se que alguns aspectos sejam melhor explorados como uma complementação.

- ✓ Estudar mais detalhadamente a condição e a qualidade superficiais de arames que apresentem rugosidades relativamente elevadas.
- ✓ Estudar as influências metalúrgicas e mecânicas dos elementos Ti e Nb nas soldas realizadas com os arames 430Ti e 430LNb.
- ✓ Repetir o estudo realizado nesse trabalho utilizando arames com qualidades e condições superficiais similares, preferencialmente com as melhores condições superficiais.
- ✓ Explorar com maior profundidade a influência do titânio na qualidade e geometria dos cordões de solda obtidos com arame ferrítico estabilizado com esse elemento.

CAPÍTULO 08: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Material. ASTM A240/A240M. **Standards specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications.** West Conshohocken, PA. 12 pp. 2006.

American Society for Testing and Material. ASTM. A268/A268M. **Seamless and welded ferritic and martensitic stainless steel tubing for general service.** West Conshohocken, PA. 6 pp. 2003.

American Society for Testing and Material. ASTM. A480/A480M. **Standards specification for general requirements for flat-rolled stainless and heat-resistant steel plate, sheet, and strip.** West Conshohocken, PA. 23 pp. 2006.

American Welding Society. AWS. Specification A5.9. p. 164 – 165.1993.

BAIXO, C. E. I. **O estudo da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG através de projetor e de tratamentos oscilográficos de tensão e corrente.** Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis, 2990.

BAIXO, C. E. I., DUTRA, J. C. **Registro fotográfico do arco e relações paramétricas tensão/corrente em duas metodologias para o estudo da otimização da soldagem MIG/MAG.** UFSC, Santa Catarina.

BALSAMO, P. S. S. **Desenvolvimento de um sistema sinérgico não linear para soldagem MIG pulsado de aço inoxidável.** Tese de doutorado, UFU, Uberlândia, MG, 2000.

BALSAMO, P. S. S., VILARINHO, L. O., SCOTTI, A. **Determinação criteriosa dos parâmetros de pulso para soldagem MIG pulsada em alumínio e aço inoxidável.** Encontro Nacional da tecnologia da Soldagem, ABS, Belo Horizonte 1999.

BRANDI, et al. **Soldagem processos e metalurgia. 2. ed.** São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 494p. 2000.

BRACARENSE, A. Q. **Gas metal arc welding.** Departamento de Engenharia Mecânica UFMG, Belo Horizonte 2003.

DUTRA, J.C. **Análise estatística de estabilidade de arco em soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito.** Encontro Nacional de Tecnológica da Soldagem, ABS, São Paulo, SP. p. 327-347. 1989.

FARIAS, J. P. et al.. **Efeito da soldagem MIG/MAG em corrente alternada sobre a geometria da solda.** Revista Soldagem & Inspeção. Vol. 10, n. 4. out/dez 2005.

FERNANDES, M. C. **Influência dos Teores de Silício e Manganês na Estabilidade do Processo GMAW com proteção de CO₂.** 145p. Dissertação de Mestrado. 145p. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1999.

FERRARESI, V. A., LUZ, T. S., BALSAMO, P. S. S. **Análise da transferência metálica do arame tubular com proteção gasosa.** III COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, v. 1, p. 1-10. Joinvile, 2005.

FIGUEIREDO, K. M., FERRARESI, V. A., **Mapas de transferência metálica em soldagem MIG de alumínio.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 1, 2001, Curitiba.

FUJIMURA, K. et al., **Estimation of contact tip-workpiece distance in gas shielded metal arc welding,** Welding International, Cambridge, (6): p. 522-528, 1988.

GIOSA, J. A. **Influência de Diferentes Meios Oxidantes na Repassivação de um Aço Inoxidável Ferrítico Tipo AISI 430**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 158p. 2003.

HABERLIN, M. M. **Program-controlled MIG Welding of austenitic steels**. Developments in Mechanized Automated and Robotic Welding; London; England; 18-20 Nov. 1980. 19 pp. 1981.

HALLIDAY, D., RESNIK, R. **Física II**. Volume 1 LTC: Rio de Janeiro, 383p, 1975.

HERMANS, M. J. M., OUDEN, G. D. **Process Behavior and stability in short circuit gas metal arc welding**. Welding Research Supplement, p.137s-141s. April, 1999.

HEALD, P.R. *et al.* **Mapping the droplet transfer modes for an ER 100S - 1 GMAW electrode**. Welding Journal, Miami, p.38s-44s, apr.1994.

HIRATA, Y., **Physics of welding (III) - melting rate and temperature distribution of electrode wire**. Welding International, Cambridge, 9(5): p. 348-351, 1995.

INUI, K. *et al.* **Development of the Ferritic Stainless Steel Welding Wire Providing Fine Grain Microstructure Weld Metal for the Components of Automotive Exhaust System**. SAE Internatinal, 2003.

JONSON, J. A. *et al.* **Process control of GMAW: sensing of metal transfer mode**. Welding Reseach Supplement – Welding Journal, Miami, pp 91s-99s, april, 1991.

KANG, M.J., *et all.*, **Spatter rate estimation in the short-circuit transfer region of GMAW**, Welding Journal, 82 (9). p.238s-247. Sept. 2003.

KIM, Y., EAGAR, T. W. **Analysis of metal transfer in gas metal arc welding**, Welding journal, Miami, v.72, n. 6, pp 269s – 278s, Junho de 1993.

LACOMBE, P.; BAROUX, B.; BERANGER, G. **Stainless Steels**. Les editions de Physique, p. 437-462. 2000.

LANCASTER, J. F. **The physics of welding**. 2.ed. Pergamon Press, International Institute of Welding, 340p. 1986.

LESNEWICH, A. **Control of melting rate and metal transfer in gas shielding metal arc welding: part II - control of metal transfer**. Welding Journal, v.37, n.9, p.418s-425s, 1958.

MARQUES, P. V. **Tecnologia da Soldagem**. 1ª Reimpressão. ESAB, 352p. 2002.

LIU, S. SIEWERT, T. A. **Metal transfer mode in gas metal arc welding: droplet rate**, Welding Journal, February, p52s-58s, 1989.

LUZ, T. S., FERRARESI, V. A., BALSAMO, P. S. S. **Análise da transferência metálica do arame tubular com proteção gasosa**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Joinvile, SC. Março, 2005.

Metals Handbook – **Properties and Selection**. 8.ed. Miami: American Society for Metals. v. 1, 1300p. 1961.

MIRANDA, H. C., FERRARESI, A. F., FARIAS, J. P. **Estudo da indutância na soldagem MAG na posição sobrecabeça**. Encontro Nacional da Tecnologia da Soldagem, Associação Brasileira de Soldagem,ABS. Belo Horizonte, 1999.

MODENESI, P. J. **Transferência de metal na soldagem GMAW** – Manual aula prática, UFMG. Belo Horizonte, 2004.

MODENESI, P. J., AVELAR, R. C. **The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability.** Materials Processing Technology., p. 226-232. 1999

MODENESI, P.J. **Evolução da Temperatura do Bico de Contato na Soldagem MIG/MAG.** XXIII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS. São Paulo, SP, p. 215-223. 6 a 9 de maio de 1997.

MODENESI, P.J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 2004. 141p.(Apostila).

PIFFER, W.D. **Avaliação da influência da condição superficial do arame eletrodo na soldagem MAG-CO₂ com transferência por curto circuito.** Dissertação Mestrado. 123p. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1996.

QUINN, T, P., MADIGAN, R. B., SIEWERT, T.A. **An electrode extension model for gas metal arc welding.** Welding journal, Miami, v.10, n.73, out. 1994.

RENAUDOT, N., SANTACREU, P. O., MAIRON, J. L., COZAR, R., PÉDARRÉ, P., BRUYÈRE, A. **430LNb – A new ferritic wire for automotive exhaust applications.** 2000.

RHEE, S., KANNATEY-ASIBU JR. E. **Observation of metal transfer during gas metal arc welding,** Welding journal, v.71, n. 10, pp 381s – 386s, Miami, out. 1992.

SANTOS, J.O. **Controlled transfer MIG welding os stainless steel.** PhD Tesis, 169p. Cranfield Institute Tecnology, Cranfield, UK, 1986.

SATO, E., TANOUE, T. **Present and future trends of materials for automotive exhaust system.** Nippon Steel Technical Report No. 64, p. 13-19, jan. 1995.

SCOTTI, A., CLARK, D. E., KENNEY, K. **Mapeamento da transferência metálica em MIG com aço inoxidável.** ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, Associação Brasileira de Soldagem. Fortaleza, 1998.

SILVA, R. C. R. **Aços Inoxidáveis Ferríticos e Martensíticos,** 2000.

SOUZA, R. E. **Determinação da resistividade elétrica de arames para soldagem GMAW.** Relatório final de iniciação científica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1994.

STENBACKA, N., PERSSON, K. A. **Gases de proteção para soldagem MIG/MAG de aços inoxidáveis.** Rio de Janeiro: AGA, 1992.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais,** 4ª edição, Ed. Campus. P.224. Rio de Janeiro, 1984.

VILARINHO, L. O. **Desenvolvimento e avaliação de um algoritmo alternativo para soldagem MIG sinérgica de alumínio.** 2000. 111f. Dissertação de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação – Faculdade de Engenharia Mecânica, UFU, Uberlândia – MG, 2000.

WANG, Q. L., LI, P. J. **Arc light sensing of droplet transfer and its analysis in pulsed GMAW process,** Welding Journal, p458s-469s, nov. 1997.

AWS Welding Handbook - Welding Processes – Arc and gás welding and cutting, brazing and soldering. 8.ed. Miami. AWS, v. 2, 955p. 1991.

APÊNDICE 1 – RESULTADOS COMPLETOS REFERENTES AOS TESTES COM OS ARAMES 308LSi, 430Ti E 430LNb.

Tabela A1.1 – Resultados completos dos testes com o arame 308LSi.

W (m/min)	Tensão (V)			Corrente (A)		Período (ms)			FC (Hz)	Fcc (%)
	Ajustada	Média	Desvio	Média	Desvio	Total	Arco	Curto		
6	20	16,57	5,13	112,94	38,01	22,57	18,90	3,67	44,30	16,27
6	22	18,47	4,65	122,69	48,02	39,40	34,77	4,63	25,38	11,75
6	24	20,40	3,80	124,85	36,49	75,43	70,89	4,54	13,26	6,03
6	26	22,26	2,90	127,82	24,37	137,73	134,25	3,48	7,26	2,59
6	28	23,83	0,40	131,98	7,00					0,00
6	30	25,85	0,62	141,12	14,43					0,00
6	32	27,79	0,60	147,80	6,85					0,00
8	21	16,90	5,70	135,29	45,40	18,51	14,65	3,85	54,04	20,81
8	22	17,90	5,33	145,68	45,60	23,60	19,70	3,90	42,38	16,54
8	24	19,73	4,86	149,36	47,49	28,23	24,77	3,46	35,42	12,36
8	27	22,43	2,57	148,62	15,53	56,51	55,32	1,19	17,70	2,13
8	28	23,55	0,35	159,36	2,70					0,00
8	30	25,39	0,38	164,11	3,09					0,00
8	32	27,58	0,39	174,78	2,62					0,00
10	24	19,77	5,34	163,41	44,66	17,84	15,25	2,60	56,05	14,58
10	26	21,54	4,43	167,88	31,11	20,08	18,44	1,64	49,81	8,15
10	28	23,47	1,94	170,45	6,37	85,12	84,54	0,58	11,75	0,90
10	30	25,58	0,40	175,80	2,48					0,00
10	32	27,01	0,39	191,94	2,88					0,00
10	34	29,18	0,41	202,22	2,79					0,00
12	24	22,19	4,41	183,00	22,94	13,98	12,92	1,06	71,54	7,61
12	26	24,10	0,65	190,20	2,92					0,00
12	28	25,85	0,40	211,09	2,32					0,00
12	30	27,93	0,42	220,32	2,55					0,00
12	32	29,80	0,46	228,33	2,93					0,00

Tabela A1.2 – Resultados completos dos testes com o arame 430Ti.

W (m/min)	Tensão (V)			Corrente (A)		Período (ms)			FC (Hz)	Fcc (%)
	Ajustada	Média	Desvio	Média	Desvio	Total	Arco	Curto		
2	14	13,65	3,62	45,31	30,88	32,61	29,60	3,01	30,66	9,23
2	16	15,37	1,63	54,08	24,31	471,04	464,59	6,45	2,12	1,37
2	18	17,33	1,65	56,00	25,34	555,70	549,74	5,97	1,80	1,07
2	20	19,60	1,69	53,99	25,08	571,13	565,73	5,40	1,75	0,95
2	22	21,46	1,42	59,98	23,81	1013,79	1009,05	4,73	0,99	0,47
2	24	23,46	0,81	58,38	23,88					0,00
2	26	25,45	0,97	61,86	24,53					0,00
2	28	27,45	1,00	62,52	33,00					0,00
2	30	28,98	0,72	117,40	23,52					0,00
4	16	14,98	4,39	88,22	32,15	20,74	18,19	2,55	48,22	12,28
4	18	16,89	3,17	94,12	40,17	68,70	64,88	3,82	14,56	5,57
4	20	19,01	2,87	97,93	40,03	128,34	123,35	4,99	7,79	3,89
4	22	21,00	2,46	98,92	37,51	205,90	201,00	4,90	4,86	2,38
4	24	22,90	2,33	104,49	38,29	328,13	323,10	5,03	3,05	1,53
4	25	23,93	1,63	103,44	39,42					0,00
4	27	25,98	1,26	100,76	41,06					0,00
4	28	26,91	0,97	105,53	43,61					0,00
4	30	29,02	0,91	111,51	41,08					0,00
4	33	31,84	0,99	125,31	50,81					0,00
6	17	15,55	4,64	113,79	37,47	20,07	17,00	3,07	49,82	15,40
6	18	16,38	4,47	117,09	41,62	22,65	19,65	3,00	44,16	13,29
6	20	18,56	3,24	124,95	42,86	60,99	57,29	3,70	16,40	6,33
6	22	20,43	2,41	127,38	35,17	120,41	117,24	3,17	8,30	2,64
6	24	22,44	2,04	130,12	33,84	223,68	220,65	3,03	4,47	1,36
6	26	24,34	1,48	132,24	41,11					0,00
6	28	26,37	1,17	142,31	46,45					0,00
6	30	28,43	1,10	149,91	47,60					0,00
6	33	31,01	1,03	166,71	45,50					0,00
8	20	18,38	3,79	149,18	46,93	34,50	31,33	3,17	28,99	9,28
8	22	20,33	2,72	155,10	40,54	72,64	69,96	2,68	13,77	3,87
8	24	22,39	1,81	150,23	31,08	164,34	162,04	2,30	6,09	1,38
8	26	24,03	1,26	158,38	31,12	192,07	189,88	2,19	5,21	0,38
8	28	26,22	0,92	168,19	26,74					0,00
8	30	28,16	0,66	189,52	23,38					0,00
8	32	30,14	0,52	199,93	9,73					0,00
8	34	31,79	0,58	217,38	14,10					0,00
8	35	32,67	0,62	225,04	13,23					0,00
10	18	16,75	5,15	128,38	128,96	27,46	19,81	7,65	36,42	27,87
10	20	17,95	4,36	167,75	56,38	22,08	19,03	3,06	45,29	14,04
10	22	19,85	3,37	175,78	42,97	36,89	34,50	2,39	27,11	6,74
10	24	21,96	1,66	178,07	26,26	140,48	138,11	2,38	7,12	1,13
10	26	23,63	0,87	188,32	11,98					0,00
10	28	25,50	0,69	196,63	8,02					0,00
10	30	27,58	0,39	209,37	3,21					0,00
12	24	21,71	1,46	201,39	20,55	231,95	230,46	1,50	4,31	0,94

Tabela A1.2 – Resultados completos dos testes com o arame 430Ti (continuação).

W (m/min)	Tensão (V)			Corrente (A)		Período (ms)			FC (Hz)	Fcc (%)
	Ajustada	Média	Desvio	Média	Desvio	Total	Arco	Curto		
12	26	23,40	0,86	226,25	10,27					0,00
12	28	25,43	1,01	222,09	12,50					0,00
12	30	27,56	0,50	230,72	7,72					0,00
12	32	29,27	0,52	249,61	7,66					0,00
12	34	31,19	0,76	232,55	12,71					0,00

Tabela A1.3 – Resultados completos dos testes com o arame 430LNb.

W (m/min)	Tensão (V)			Corrente (A)		Período (ms)			FC (Hz)	Fcc (%)
	Ajustada	Média	Desvio	Média	Desvio	Total	Arco	Curto		
2	14	13,33	4,52	50,37	35,05	28,70	24,65	4,05	34,84	30,37
2	16	15,37	2,77	54,65	28,99	144,01	139,18	4,83	6,94	3,37
2	18	17,40	2,42	54,93	21,79	535,80	529,36	6,44	1,87	1,21
2	20	19,61	2,09	54,47	22,56	805,42	799,58	5,85	1,24	0,73
2	22	21,72	1,96	56,10	20,17	2,81	2,79	0,02	355,61	0,66
2	24	23,33	1,16	58,41	18,02					0,00
2	26	25,22	0,98	58,29	19,27					0,00
2	28	27,14	0,95	61,01	21,51					0,00
4	14	13,60	5,78	80,65	66,75	26,22	19,47	6,75	38,15	27,38
4	16	14,84	6,20	87,32	39,07	13,86	10,77	3,09	72,16	22,30
4	18	16,71	5,55	97,14	46,38	23,73	20,02	3,71	42,14	15,65
4	20	19,00	4,78	99,26	39,94	31,63	28,83	2,81	31,61	8,88
4	22	20,97	3,65	98,48	32,23	82,83	79,60	3,23	12,07	3,90
4	24	22,82	2,93	100,63	24,74	218,42	215,09	3,33	4,58	1,54
4	26	24,81	0,98	107,49	15,40					0,00
4	28	27,48	0,85	115,52	18,99					0,00
4	30	28,91	0,88	120,79	18,93					0,00
6	18	16,52	6,09	118,12	39,06	14,98	12,08	2,90	66,77	19,36
6	20	18,51	5,67	129,83	47,87	23,49	20,09	3,40	42,57	14,49
6	22	20,42	4,99	132,68	42,69	29,58	26,89	2,69	33,80	9,12
6	24	22,49	2,66	135,94	19,21	76,25	74,93	1,32	13,11	1,76
6	26	24,21	0,55	144,27	4,70					0,00
6	28	26,11	0,47	152,15	3,52					0,00
6	30	28,25	0,48	163,59	5,69					0,00
6	32	30,17	0,55	171,03	10,61					0,00
8	20	18,14	6,64	148,78	54,55	14,94	11,68	3,26	66,95	21,80
8	22	20,21	6,05	153,33	50,68	16,20	13,74	2,46	61,72	15,21
8	24	22,06	5,11	159,17	42,14	21,57	19,71	1,85	46,37	8,66
8	26	23,94	3,63	159,36	17,50	26,28	25,45	0,83	38,06	3,15
8	28	26,07	0,44	171,31	3,33					0,00
8	30	28,07	0,40	180,08	4,09					0,00
8	32	29,89	0,41	196,83	3,69					0,00
10	22	20,11	6,22	172,24	56,21	14,20	11,66	2,54	70,42	17,87

Tabela A1.3 – Resultados completos dos testes com o arame 430LNb (continuação).

W (m/min)	Tensão (V)			Corrente (A)		Período (ms)			FC (Hz)	Fcc (%)
	Ajustada	Média	Desvio	Média	Desvio	Total	Arco	Curto		
10	24	21,99	5,17	179,28	53,24	20,61	18,63	1,98	48,53	9,64
10	26	24,00	4,10	182,92	39,27	26,51	25,35	1,16	37,72	4,40
10	28	25,66	2,42	184,31	22,77	65,38	64,62	0,76	15,30	0,58
10	30	27,51	0,44	199,45	3,89					0,00
10	32	29,36	0,48	215,20	3,89					0,00
12	22	19,94	5,88	164,06	122,93	31,51	24,04	7,47	31,73	23,71
12	24	21,65	6,39	198,24	42,41	9,00	7,53	1,48	111,05	16,46
12	26	23,63	4,95	204,79	34,77	14,20	13,15	1,06	70,40	7,47
12	28	25,63	3,55	207,38	20,04	24,69	24,07	0,61	40,51	2,49
12	30	27,60	1,65	218,81	13,27					0,00
12	32	29,47	0,46	233,04	3,82					0,00
12	34	31,28	0,48	245,86	4,08					0,00

APÊNDICE 2 – RESULTADOS COMPLETOS DOS TESTES REALIZADOS NA UFU (FILMAGEM)

Tabela A2.1-Resultados completos dos testes realizados na UFU (filmagem) dos arames 430Ti e 430LNb.

Teste	TR (V)	W (m/min)	Arame	DBCP (mm)	Vel. Sold (cm/min)	Im (A)	TT	DPc (A)	TM (V)	DP
1	24	6	ER 430Nb	20	25	134,6	GL	38,66	23,85	0,00
2	20	6	ER 430Nb	20	25	123,64	CC	53,43	19,91	43,21
3	26	6	ER 430Nb	20	25	124,14	GL	43,31	23,94	34,89
4	26	8	ER 430Nb	20	25		SP		25,05	
5	28	8	ER 430Nb	20	25		SP		27,69	
6	22	8	ER 430Nb	20	25	145,19	CC	61,12	21,51	42,10
7	28	10	ER 430Nb	20	25	183,76	SP	33,71	27,66	18,34
8	30	10	ER 430Nb	20	25	173,54	SP	67,98	26,82	39,17
9	30	8	ER 430Nb	20	25	184,4	SP	6,44	29,83	3,49
10	22	10	ER 430Nb	20	25	169,86	CC	70,02	21,82	41,22
11	24	12	ER 430Nb	20	25	196,67	CC	62,74	23,79	31,90
12	30	12	ER 430Nb	20	25	208,45	SP	23,00	29,79	11,04
13	32	12	ER 430Nb	20	25	216,15	SP	48,56		22,47
14	24	8	ER 430Ti	20	25	163,33	GL	30,85	23,79	18,89
15	26	8	ER 430Ti	20	25	167,85	GL	38,73		23,08
16	20	8	ER 430Ti	20	25	169,63	GL	33,47	27,71	19,73
17	16	6	ER 430Ti	20	25	149,4	CC	52,53	19,89	35,16
18	18	6,8	ER 430Ti	20	25	133,24	CC	47,68	17,75	35,78
19	24	6	ER 430Ti	20	25	135,95	GL	35,65	23,84	26,23
20	22	6	ER 430Ti	20	25	131,19	GL/CC	39,46	21,88	30,07
21	18	6	ER 430Ti	20	25	120,61	CC	42,63	17,75	35,34
22	26	6	ER 430Ti	20	25	131,71	GL	39,74	25,75	30,17
23	18	8	ER 430Ti	20	25	145,51	CC	57,38	17,74	39,43
24	30	8	ER 430Ti	20	25	183,4	SP	33,08	29,87	18,04
25	22	10	ER 430Ti	20	25	184,08	CC	51,08	21,87	27,75
26	28	10	ER 430Ti	20	25	198,72	SP	6,50	27,67	3,27
27	24	12	ER 430Ti	20	25	208,25	SP	42,04	23,77	20,19
28	30	12	ER 430Ti	20	25	229,34	SP	17,72	29,82	7,73
29	26	12	ER 430Ti	20	25	176,99	G	36,97	25,73	20,89
30	30	8	ER 430Ti	20	25		SP		29,83	

Tabela A2.2 – Observações referentes aos dados da tabela A2.1.

Teste	Observações
1	Globular, com alguns curtos. Alimentação mais homogênea.
2	Curto circuito típico com movimentação intensa da poça de fusão.
3	Globular estável com gotas menores com pouquíssimos curtos.
4	Perdeu-se sinal corrente. Transferência predominantemente spray, com curtos.
5	Perdeu-se sinal corrente. Transferência spray.
6	Tipico curto circuito com movimentação intensa da poça de fusão.
7	Spray projetado estável.
8	Transferência spray.
9	Spray projetado padrão estável com gotas menores que o eletrodo.
10	Curto circuito típico .
11	Curto circuito típico .
12	Spray com alongamento padrão estável com gotas menores que o eletrodo.
13	Spray com alongamento padrão estável com gotas menores que o eletrodo.
14	Tipicamente gobular.
15	Perdeu-se sinal tensão. Transferência globular com momentos de agarramento do arame.
16	Transferência globula/spray com arco comprimento de arco grande e agarramento do arame.
17	Curto circuito típico .
18	Curto circuito típico .
19	Tipicamente globular, com gotas maiores.
20	Globular/curto circuito com intensa movimentação da poça.
21	Curto circuito típico .
22	Globular com gotas maiores e alguns curtos seguidos de spray.
23	Curto circuito típico .
24	Spray irregular com pontos de transferência globular.
25	Curto circuito com momentos de globular/spray.
26	Spray estável com gotas maiores.
27	Spray com momentos de curto circuito.
28	Spray projetado padrão estável com gotas menores que o eletrodo.
29	Transferência globular
30	Perdeu-se sinal de corrente. Spray irregular com pontos de transferência globular.

APÊNDICE 3 – DETALHES DE OPERAÇÃO DO PROGRAMA SINAL

Programa Sinal:

Instalação:

Para instalar o programa, basta criar um diretório (por exemplo: ...**SinalWin**) e copiar (descomprimir) os arquivos **sinal.exe**, **cp3240mp.dll** e **borlndmm.dll** para este diretório. Criar um outro diretório (por exemplo: **SinalWin\Pratica** ou **MeusDocumentos\Pratica**) e copiar (descomprimir) os arquivos de dados da prática. Para iniciar o programa, clicar duas vezes no ícone do programa.

Itens do menu:

1. Arquivo:

1.1. Abrir: Abrir arquivos com o formato *.sin (sinais).

1.2. Importar: Abrir arquivos de outros formatos.

1.2.1. Configurar: Configurar programa para importar. As seguintes informações são solicitadas: Número de canais do sinal, tempo entre medidas, unidade de tempo e, para cada canal: seu nome, unidades e fatores de calibração (inclinação e intercepto).

1.2.2. Arquivo Texto: Arquivo ASCII com os canais dispostos em colunas separadas por espaço(s) em branco e sem títulos. Se os dados já tiverem os seus valores reais, os fatores de calibração serão 1 e 0.

1.2.3. Outros formatos Em particular, para o formato DAD, temos usado os seguintes fatores de calibração:
Corrente: 0.131089 e -537.6997
Tensão: 0.013765 e -53.1825

1.3. Fechar

1.4. Salvar: Salvar dados em arquivo .sin.

1.5. Salvar como...: Salvar dados em arquivo .sin.

1.6. Salvar gráfico: Salvar gráfico de canal (processado ou não) nos formatos BITMAP, WMF ou texto.

1.7. Imprimir: Ainda não implementado.

1.6. Sair

2. Editar:

2.1. Informações: Permite alterar as informações de um sinal (mostradas na sua janela inicial).

2.2. Canal: Ainda não implementado

2.3. Preferência: Permite definir dimensões dos gráficos.

3. Processo:

3.1. Estatística: Calcula a média, desvio padrão e a média eficaz da parte do canal (ou canal processado) mostrada na janela ativa (gráfico).

3.2. Remover canal: Não implementado ainda.

3.3. Filtar canal: Permite processar o canal da janela ativa com diferentes rotinas

3.3.1. Passa baixa: remove componentes de alta frequência do canal

3.3.1.1. Triangular: Substitui cada ponto por uma média ponderada deste ponto com seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos. Os coeficientes de cada ponto na média são calculados de forma que estes diminuam de forma linear com a distância do vizinho do ponto central.

3.3.1.2. Multipasses: Similar à anterior, mas o valor dos coeficientes diminuem de forma mais rápida.

3.3.1.3. Mediana: Substitui cada ponto pela mediana entre este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

3.3.1.4. Máximo: Substitui cada ponto pelo valor máximo existente entre este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

3.3.1.5. Mínimo: Substitui cada ponto pelo valor mínimo existente entre este ponto e seus $2(Nf)$ vizinhos mais próximos.

3.3.2. Passa alta: Remove componentes de baixa frequência do sinal.

3.3.3. Frequência...: Não implementado ainda.

3.4. Espectro: Gera gráfico com o espectro de um canal. O gráfico tem uma “tool bar” com as opções: Canal (seleciona o canal para fazer o espectro), Ok (calcula

o espectro), *Análise* (determina picos na parte do espectro mostrada no gráfico – opções: Número máximo de picos, limite de corte e separação) e *Replot* (restaura limites iniciais do gráfico).

3.5. Operação:

3.5.1. Soma: Calcula e mostra o gráfico da soma de dois canais. O gráfico tem uma “tool bar” com as opções: *Canal1* e *Canal2* (seleciona canais a serem somados), *Ok* (calcula a soma), *Estatística* (calcula parâmetros estatísticos dos dados mostrados no gráfico – igual ao item 3.1), *Novo* (insere os dados como um novo canal do sinal – suas informações podem ser mudadas no item 2.1 e o sinal modificado pode ser salvo nos itens 1.4 ou 1.5) e *Replot* (restaura limites iniciais do gráfico).

3.5.2. Subtração: Igual 3.5.1

3.5.3. Multiplicação: Igual 3.5.1

3.5.4. Divisão: Igual 3.5.1. Obs.: No caso de divisão por zero, o programa coloca um valor igual a zero e informa ao usuário.

3.5.5. Distância: Igual 3.5.1. Distância: $d = (c1^2 + c2^2)^{1/2}$.

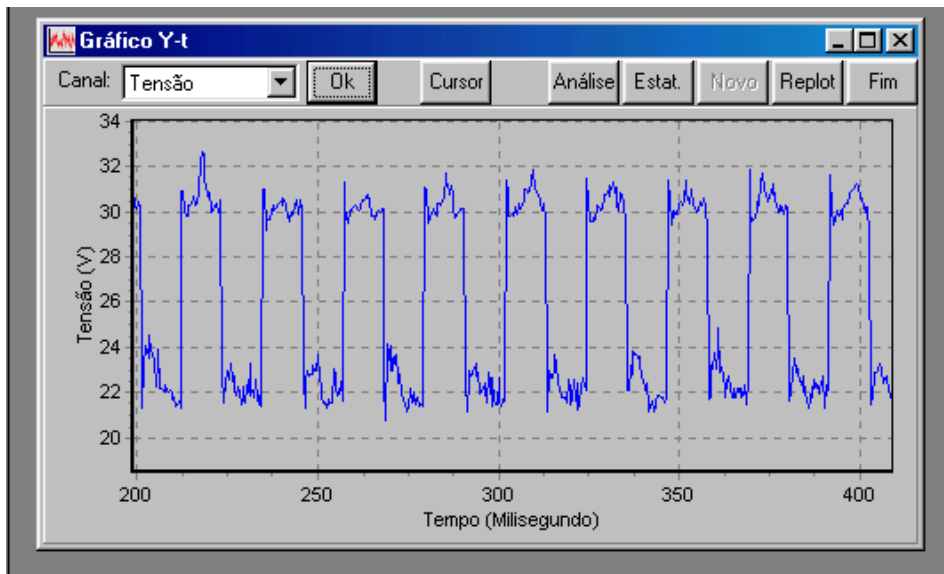
3.5.6. Retificação: Calcula $cr = |c|$. “Tool bar” é similar 3.5.1. Apresenta o item adicional, *Análise*, que calcula o número de pico e base (ou de períodos curto circuito e de arco, por exemplo) nos dados mostrados no gráfico. A caixa de diálogo deste item apresenta duas opções: *Limite de corte*: valor da variável (y) usada para definir base e pico; pode ser mudada “clizando-se”, com o “mouse” no gráfico, o nível desejado da variável e *Rejeição de base*: define o número de pontos máximo para não consideração de uma base (por exemplo, se o valor escolhido for 2, somente bases com 3 ou mais pontos serão consideradas).

3.5.7. Autocorrelação: Calcula coeficientes de autocorrelação de um sinal.

3.5.7. Derivação: Calcula a derivada de um canal. Apresenta um fator de filtro para reduzir o ruído amplificado pelo cálculo da derivada. “Tool bar” é igual a 3.5.6.

4. Gráfico:

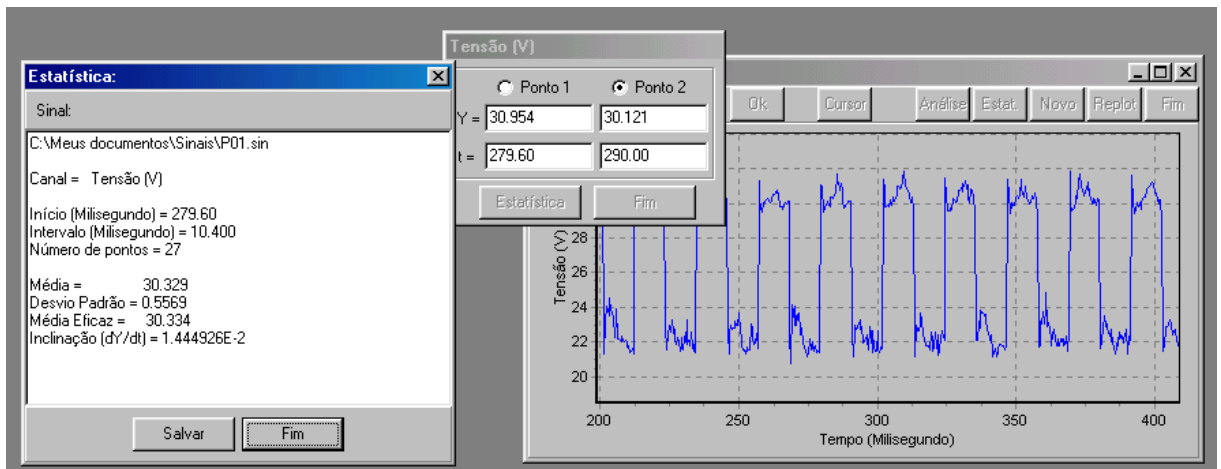
4.1. Y-t: Mostra gráfico Canal x tempo.



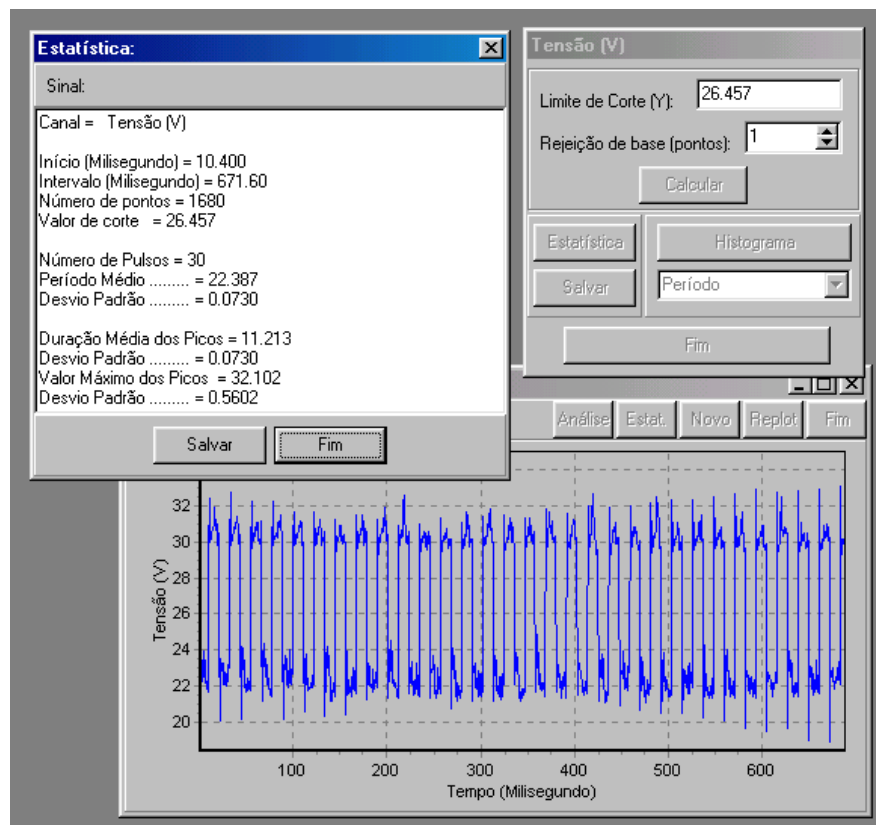
Toolbar:

Canal/Ok → Selecciona canal

Cursor → Permite obter valores de pontos e fazer cálculos estatísticos de regiões



Análise → Calcula períodos de pulsação e base (soldagem com corrente pulsada) ou de duração de períodos de arco e curto circuito (transferência por curto-circuito). É preciso, usando o mouse na superfície do gráfico, definir um “Limite de corte” para o programa poder separar entre os eventos de **pico** (ou arco) e de **base** (ou de curto circuito).



Estatística → Análise estatística do gráfico

Replot → Restaura o gráfico de todos os dados (é possível, com o cursor, seleccionar áreas restritas do gráfico para “zoom”)

4.2. Y-X: Mostra gráfico Canal1 x Canal2. Apresenta, na “tool bar”, as opções Canal1, Canal2, Ok e Replot.

4.3: Histograma: Calcula e mostra histograma do canal. Apresenta, na “tool bar”, as opções *Cursor*, *2x* (dobra o número de caixas do histograma), */2* (reduz o número de caixas pela metade) e *Replot*.

