UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
«JÚLIO DE MESQUITA FILHO»
Faculdade de Engenharia
Câmpus de Bauru

ESTUDO DA SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS DE ALUMÍNIO, PELOS PROCESSOS MIG PULSADO, MIG CONVENCIONAL E TIG, ANALISANDO ACABAMENTO SUPERFICIAL, CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO DE SOLDA E DISTORÇÕES.

CELSO MASSAHIRO NAGADO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Câmpus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU - SP
JULHO - 2001

Capes 3.03.03.05-2 - Soldagem

Número de chamada
Clas. T/UNESP
PHA N138e
Tombo n.º 993

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

ESTUDO DA SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS DE ALUMÍNIO, PELOS PROCESSOS MIG PULSADO, MIG CONVENCIONAL E TIG, ANALISANDO ACABAMENTO SUPERFICIAL, CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO DE SOLDA E DISTORÇÕES.

BIBLIOTECA UNESP CAMPUS BAURU

CELSO MASSAHIRO NAGADO

Orientador: Prof. Dr. Yukio Kobayashi

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

BAURU - SP

Julho –2001

Ficha catalográfica elaborada por
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - Bauru

Nagado, Celso Massahiro
Estudo da soldagem de chapas finas de alumínio, pelos processos MIG pulsado, MIG convencional e TIG, analisando acabamento superficial, características geométricas do cordão de solda e distorções / Celso Massahiro Nagado. - - Bauru : [s.n.], 2001.
104 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Yukio Kobayashi

1. MIG pulsado. 2. MIG convencional 3. Soldagem - processos. I – Título. II – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.

PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA INDUSTRIAL

ATA Nº 014/2001.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE *CELSO MASSAHIRO NAGADO*, ALUNO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNESP – CAMPUS DE BAURU.

No dia cinco de julho de dois mil e um, às quatorze horas, no anfiteatro do prédio da pós-graduação da Faculdade de Engenharia da UNESP, Câmpus de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos Professores Doutores: Yukio Kobayashi do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia - UNESP – Câmpus de Bauru, Presidente da Banca, Roseana da Exaltação Trevisan do Departamento de Engenharia de Fabricação da Universidade de Campinas – UNICAMP – Campinas e Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia – UNESP – Câmpus de Bauru, a fim de proceder a argüição pública da Dissertação de Mestrado do candidato ***Celso Massahiro Nagado***, intitulada "ESTUDO DA SOLDAGEM DE CHAPAS FINAS DE ALUMÍNIO, PELOS PROCESSOS MIG PULSADO, MIG CONVENCIONAL E TIG, ANALISANDO ACABAMENTO SUPERFICIAL, CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO DE SOLDA E DISTORÇÕES". O Professor Doutor Yukio Kobayashi, Presidente da Banca, apresentou o candidato, que dissertou sobre seu trabalho, em trinta minutos, após, o candidato foi argüido oralmente pelos membros componentes da Comissão Examinadora no tempo regulamentar exigido. Logo após, reuniu-se a Comissão Examinadora, tendo apresentado o conceito final: **APROVADO.** Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após, lida e aprovada, será assinada pelos Senhores Membros da Comissão Examinadora. Bauru, cinco de julho de dois mil e um. / .

Prof. Dr. Yukio Kobayashi - Presidente _____

Prof. Dr. Roseana da Exaltação Trevisan - Membro _____

Prof. Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves - Membro _____

unesp
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia - Bauru
Av.Engº Luiz Edmundo Carrijo Coube s/nº • Caixa Postal 473 • CEP 17 033-360 • Bauru • SP • Fone: 14 221 6000 e 14 221 6108 • Fax: 14 221 6104
E-mail: spg-fe@bauru.unesp.br • home page: www.bauru.unesp.br/pos/fe.htm

Aos meus pais,
que sempre lutaram
para que eu pudesse
chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração direta ou indireta de várias pessoas. Manifesto minha gratidão a todas elas e de forma particular:

Aos meus pais e irmãos que sempre me incentivaram e apoiaram.

A todos os colegas do Departamento de Engenharia Mecânica, em especial, ao Professor Dr. Yukio Kobayashi, pela orientação e participação nesse trabalho e ao Professor Dr. Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves, que me incentivou e indicou o curso de pós-graduação da UNESP-Bauru.

Aos funcionários da Biblioteca do Campus de Bauru, que sempre atenderam prontamente.

Aos colegas de pós-graduação Paulo Cezar Moselli e Marcos Shoiti Saito, pela ajuda prestada sempre que foi necessário.

Ao físico e técnico de laboratório Hamilton José de Mello, pela cooperação na utilização do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – Bauru.

A professora Suzana de A P. Pohl Sanzovo, pela revisão dos textos em inglês.

A empresa White Martins S.A. pela doação de gás para realização do trabalho.

A maior parte das idéias fundamentais da ciência é essencialmente simples e pode, por via de regra, ser expressa numa linguagem compreensível para todos.

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS..... viii
LISTA DE TABELAS..... xi
LISTA DE ABREVIATURAS..... xii
RESUMO..... xiii
ABSTRACTS..... xiv
Capítulo I - INTRODUÇÃO..... 1
Capítulo II - REVISÃO DA LITERATURA..... 4
2.1. Alumínio..... 4
2.2. Processo de soldagem TIG..... 11
2.3. Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa..... 13
2.4. Tensões e deformações decorrentes de operações de soldagem..... 27
2.5. Geometria e acabamento superficial..... 33
III - MATERIAL E MÉTODO..... 36
3.1. Materiais..... 36
3.2. Equipamentos..... 36
3.3. Método..... 40
3.3.1. Preparação dos corpos de prova..... 40
3.3.2. Processo TIG..... 41
3.3.3. Processo MIG convencional..... 42
3.3.4. Processo MIG pulsado..... 44
3.3.5. Geometria do cordão de solda..... 47
3.3.6. Medição e análise da deformação..... 48
Capítulo IV – RESULTADOS..... 50
4.1. Processo TIG..... 50
4.2. Processo MIG convencional..... 52
4.3. Processo MIG pulsado..... 59
Capítulo V – DISCUSSÃO..... 68
5.1. Soldagem com o processo TIG..... 68
5.2. Soldagem com processo MIG convencional..... 69
5.3. Soldagem com processo MIG pulsado..... 76

5.4. Características geométricas..... 82
5.4.1. MIG convencional..... 82
5.4.2. MIG pulsado..... 83
5.5. Deformação das chapas soldadas com MIG convencional..... 85
5.6. Deformação das chapas soldadas com MIG pulsado..... 87
Capítulo VI – CONCLUSÕES..... 94
Capítulo VII – PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS..... 96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 97
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR..... 102

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. – Gráfico esquemático da corrente pulsada em função do tempo..... 13
FIGURA 2.2. – Princípio básico de funcionamento do processo GMAW..... 15
FIGURA 2.3. – Equipamento básico para o processo GMAW..... 15
FIGURA 2.4. – Campo isotérmico de temperatura ao redor da fonte de calor de soldagem..... 28
FIGURA 2.5. – Tipos de distorção da solda..... 30
FIGURA 2.6. – Espessura crítica para empenamento de soldas de topo..... 32
FIGURA 3.1. – Conjunto utilizado na soldagem TIG convencional..... 37
FIGURA 3.2. – Conjunto utilizado na soldagem MIG convencional e pulsado (fonte, alimentador de arame, cilindro de gás e tocha tipo "push-pull")..... 38
FIGURA 3.3. – Carro portátil para corte com suporte e sistema de travamento das peças a serem soldadas..... 38
FIGURA 3.4. – Esquema representativo dos equipamentos de soldagem TIG..... 39
FIGURA 3.5. – Esquema representativo dos equipamentos de soldagem MIG e aquisição de dados..... 39
FIGURA 3.6. – Projetor de perfil Nikon 6C..... 40
FIGURA 3.7. – Esquema do suporte e da forma que as peças foram posicionadas para soldagem..... 46
FIGURA 3.8. – Esquema do posicionamento da tocha – vista frontal..... 47
FIGURA 3.9 – Esquema do posicionamento da tocha – vista lateral..... 47
FIGURA 3.10 – Características geométricas do cordão de solda..... 48
FIGURA 3.11 – Esquema do posicionamento dos pontos onde foram realizadas as medições da deformação..... 49
FIGURA 3.12 – Dispositivo utilizado para medição de deformação..... 49
FIGURA 4.1. – Cordão de solda TIG convencional..... 50
FIGURA 4.2. – Cordão de solda com controle manual de corrente..... 51
FIGURA 4.3. – Oscilogramas de corrente de um trecho da solda MC-1..... 52
FIGURA 4.4. – Oscilogramas da tensão de um trecho da solda MC-1..... 53
FIGURA 4.5. – Aspecto da solda MC-1 – MIG convencional..... 53
FIGURA 4.6. – Aspecto da solda MC-3 - MIG convencional..... 54
FIGURA 4.7. – Aspecto do cordão de solda MC-1 com depósito não muito uniforme – MIG convencional..... 54

FIGURA 4.8. – Aspecto do cordão de solda MC-3 com depósito uniforme – MIG convencional..... 55
FIGURA 4.9. – Foto da macrografia da solda MC-1 – MIG convencional..... 56
FIGURA 4.10 – Foto da macrografia da solda realizada com os mesmos parâmetros da solda MC-1 – MIG convencional..... 56
FIGURA 4.11 – Aspecto da deformação do lado A da chapa – Solda MC-1..... 57
FIGURA 4.12 – Aspecto da deformação do lado B da chapa – Solda MC-1..... 57
FUGIRA 4.13 – Oscilogramas de corrente da solda Vs-2 – MIG pulsado..... 61
FIGURA 4.14 – Oscilogramas da tensão da solda Vs-2 – MIG pulsado..... 62
FIGURA 4.15 – Aspecto do cordão de solda Vs-2 – MIG pulsado..... 62
FIGURA 4.16 – Detalhe do aspecto do cordão de solda VS-2 – MIG pulsado..... 63
FIGURA 4.17 – Foto da macrografia da solda Vs-1 – MIG pulsado..... 65
FIGURA 4.18 – Foto da macrografia da solda Vs-2 – MIG pulsado..... 65
FIGURA 4.19 – Foto da macrografia da solda Vs-3 – MIG pulsado..... 66
FIGURA 4.20 – Aspecto da deformação do lado A da chapa da solda VS-2..... 66
FIGURA 4.21 – Aspecto da deformação do lado B da chapa da solda VS-2..... 66
FIGURA 5.1 – Fotos de detalhe de cordão de solda realizados com processo TIG..... 68
FIGURA 5.2. – Foto do cordão de solda realizado com TIG convencional..... 69
FIGURA 5.3. – Detalhe do aspecto dos cordões das soldas (a) MC-7 e (b) MC-2 respectivamente..... 70
FIGURA 5.4. – Oscilogramas de corrente dos trechos de solda (a) MC-7 e (b) MC-2 respectivamente..... 71
FIGURA 5.5. – Variação da freqüência dos picos de corrente entre as soldas (a) MC-2 e (b) MC-8..... 72
FIGURA 5.6. – Detalhe do aspecto do trecho de solda MC-2 e gráfico de corrente e tensão do respectivo trecho..... 73
FIGURA 5.7. – Detalhe ampliado de um pico de corrente e a tensão correspondente ao mesmo trecho da solda MC-2 (a e c) e MC-7 (b e d)..... 75
FIGURA 5.8. – Aspecto da solda Vs-1 realizado com a tocha a 90 graus..... 76
FIGURA 5.9. – Aspecto da solda Vs-1 realizado com inclinação de 7° sentido empurrado (a) e 5° sentido puxado (b)..... 77
FIGURA 5.10. – Aspecto geral das soldas realizadas com velocidade de 900 mm/min (a), 950 mm/min (b) e 1000 mm/min (c)..... 79
FIGURA 5.11. – Aspecto da solda Vs-2 e gráfico de corrente e tensão do respectivo trecho..... 80

FIGURA 5.12. – Aspecto do trecho ampliado dos oscilogramas de corrente e tensão mostrando as características dos picos de corrente e o intervalo de tempo entre eles..... 81
FIGURA 5.13. – Características geométricas das soldas variando a velocidade de alimentação do arame, mantendo a distância do bocal em 8 mm (a) e a 12 mm (b)..... 82
FIGURA 5.14. – Características geométricas das soldas realizadas com variação da velocidade de soldagem..... 83
FIGURA 5.15. – Características geométricas das soldas realizadas com variação da corrente de pico (a) e corrente de base (b)..... 84
FIGURA 5.16. – Características geométricas das soldas realizadas com variação do número de pulsos..... 85
FIGURA 5.17. – Características geométricas das soldas realizadas com variação da distância do bocal em relação à peça..... 85
FIGURA 5.18. – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b), variando alimentação do arame com altura do bocal de 8 mm..... 86
FIGURA 5.19. – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b), variando alimentação do arame com altura do bocal de 12 mm..... 87
FIGURA 5.20. – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b), variando a velocidade de soldagem..... 88
FIGURA 5.21. – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b), variando a corrente de pico..... 89
FIGURA 5.22. – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b), variando a corrente de base..... 90
FIGURA 5.23. – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b), variando o número de pulsos..... 91
FIGURA 5.24. – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b), variando a altura do bocal..... 92

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Designação das Ligas Trabalháveis por Grupos..... 06
TABELA 2.2 – Composição química e aplicações das ligas de alumínio trabalháveis - não tratáveis termicamente..... 07
TABELA 2.3 – Soldabilidade de ligas de alumínio trabalháveis – não tratáveis termicamente..... 10
TABELA 4.1. – Corrente e tensão média, medidas durante a soldagem e a energia calculada..... 52
TABELA 4.2. – Características geométricas dos cordões de solda utilizados com o processo MIG convencional..... 56
TABELA 4.3 – Variação da deformação ao longo do comprimento das chapas..... 58
TABELA 4.4 – Faixa de operação dos parâmetros que foram variados..... 59
TABELA 4.5. – Resultados da combinação das variações dos parâmetros utilizados.... 60
TABELA 4.6. – Resultados medidos durante a soldagem..... 61
TABELA 4.7. – Características geométricas dos cordões de solda realizados com o processo MIG pulsado..... 64
TABELA 4.8. – Tabela comparativa das características geométricas das soldas realizado com os processos MIG convencional e pulsado..... 64
TABELA 4.9. – Variação da deformação ao longo do comprimento da chapa, conforme os parâmetros de soldagem utilizados..... 67

LISTA DE ABREVIATURAS

Ip = Corrente de pico

Ib = Corrente de base

Tp = Tempo de pico ou largura do pulso

Tb = Tempo de base

V = Tensão de soldagem

I = Corrente de soldagem

Vs = Velocidade de soldagem

E = Energia de soldagem

Im = Corrente média

Vm = Tensão média

Va = Velocidade de alimentação do arame

Db = Distância do bocal a peça

L = Largura do cordão

R = Reforço do cordão

P = Penetração da solda

Np = Número de pulsos

Vp = Pico de tensão

Nagado C. M. Estudo da soldagem de chapas finas de alumínio, pelos processos MIG pulsado, MIG convencional e TIG, analisando acabamento superficial, características geométricas do cordão de solda e distorções. Bauru, 2001. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho".

RESUMO

O estudo da soldagem de chapas de alumínio com espessura muito fina utilizando-se de equipamentos comumente usados na industria, buscou determinar os parâmetros de soldagem para se obter o melhor desempenho possível no que se refere à produtividade, qualidade na soldagem e controle de tensão e deformação. Os processos utilizados foram MIG convencional, TIG convencional e MIG pulsado. Em cada processo procurou-se obter os parâmetros de soldagem que forneciam as melhores características de cordão de solda e menor tensão e deformação da peça. As características analisadas no cordão de solda foram o acabamento superficial, geometria do cordão e penetração. Em relação à produtividade, foram analisados os preparos da junta a ser soldada e a velocidade de soldagem. O material de base utilizado foi alumínio da série 1100 de espessura 1,2 mm. O arame consumível da MIG foi o ER-4043 de diâmetro 1,2 mm. O gás de proteção utilizado foi o argônio e a junta utilizada foi à sobreposta. O processo MIG pulsado apresentou resultados muito satisfatórios, atendendo a todos os itens pré-estabelecidos. As deformações apresentaram sempre o mesmo comportamento em todos os processos. Conclui-se que o Processo de soldagem de chapas de alumínio extremamente finas com o MIG pulsado é plenamente viável e de fácil aplicação para a indústria, não sendo necessário grandes investimentos e nem desenvolvimento de avançadas tecnologias.

Palavras chave:.
Alumínio, MIG-Pulsado, MIG convencional, acabamento superficial

Nagado C. M. Study of the welding of aluminum foils fine thickness. The processes used were conventional GMAW, conventional GTAW and Pulsed GMAW, analyzing superficial finish, geometry of the weld bead and distortion. Bauru, 2001. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho".

ABSTRACT

The study of welding aluminum foils of very fine thickness using equipments commonly employed in the industry aimed to determine the welding parameters in order to obtain the best possible performance productivity, quality of welding and control of stresses and distortion. The processes used were conventional GMAW, conventional GTAW and Pulsed GMAW. In each process this study has tried to obtain the welding parameters, which provided the best characteristics of weld bead and the least possible stress and distortions of the work peace. The characteristics analyzed in the weld bead were the superficial finish, geometry of the weld bead and penetration. In relation to the productivity, the preparation of the joint to be welded and the welding speed were analyzed. The base metal used was AA 1100 of 1.2 mm (0.047 in.) thickness. The filler metal of GMAW used was ER-4043 wire of 1,2 mm (0.047 in.) diameter. The shielding gas used was argon and the joint used was lap joint. The pulsed GMAW process presented very satisfactory results, in regard to all the pre-established items. The distortions presented always the same behavior in all the processes. It is concluded that the Process of welding of extremely fine aluminum foils with pulsed GMAW is fully feasible and of easy application for the industry, neither requiring great investments nor development of high technologies.

Keywords:
Aluminum, GMAW-P, GMAW, Superficial finish.

CAPÍTULO I

I NTRODUÇÃO

O objetivo desta pesquisa é estudar a possibilidade de soldar chapas de alumínio com espessura fina, utilizando-se de equipamentos comumente usados na indústria, buscando determinar os parâmetros de soldagem para se obter o melhor desempenho possível no que se refere à produtividade, à qualidade na soldagem e ao controle de tensão e deformação.

O alumínio e suas ligas são amplamente utilizados em determinados meios de transporte, são de baixo peso, resistente a corrosão e alta resistência à fadiga que são propriedades desejadas. Desde então construções soldadas com baixo peso são preferidas por todos os projetistas. A seleção da liga certa depende principalmente da resistência, trabalhabilidade, soldabilidade e resistência à corrosão.[1]

Em geral, a soldagem do alumínio e suas ligas são difíceis por causa da tendência de formar uma película estável e refratária de óxido de alumínio e requer uma grande energia por causa da sua alta condutibilidade térmica.[2]

Na indústria em geral o processo Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), ou mais comumente designado TIG ("Tungsten Inert Gas"), era o processo mais aplicado na soldagem do alumínio e ligas de alumínio. Ele foi desenvolvido antes do processo Gas Metal Arc Welding (GMAW), ou MIG (Metal Inert Gas) como é mais conhecido, bem como, foi o primeiro processo de soldagem com proteção de gás inerte adequado para soldar alumínio. Durante muito tempo, era usado para soldar uma vasta variedade de produtos e estruturas nas mais diversas espessuras, mas, com a subseqüente viabilidade do processo MIG com suas altas velocidades, arco com mais penetração e outras vantagens, o TIG passou a ser aplicado principalmente em espessuras finas, em juntas complexas e em brasagens. Ainda continua a ser aplicado nesses casos, embora a

soldagem MIG com corrente pulsante tem se mostrado superior para muitas aplicações.[3]

O processo de Soldagem a Arco Metálico Pulsado com Proteção Gasosa (GMAW-P) é uma variação do processo GMAW convencional, produz um ciclo de corrente alternando períodos de alto e baixo arco de corrente, com controle do destacamento das gotas. Isto resulta em uma transferência do tipo "spray" com gotas de tamanhos mais uniformes e baixos valores da corrente média (na GMAW a transferência por "spray" requer uma corrente alta). Este processo proporciona uma poça de fusão pequena e controlável, o qual permite um depósito de material fino e uniforme em todas as posições com menor distorção.

As distorções são inevitáveis em estruturas leves onde a solda por fusão é aplicada. Do ponto de vista da integridade do projeto estrutural, racionalidade da tecnologia de fabricação e confiabilidade do serviço, os problemas de tensão residual da solda e distorções em estruturas leves, são problemas dos quais muitas vezes afetam a qualidade dos produtos e causa um custo adicional de operação para remover distorções ou para aliviar as tensões residuais.

Na união de chapas finas ou na fabricação de estruturas leves de alumínio, os processos utilizados em outros materiais em muitos casos não funcionam adequadamente.

A soldagem por resistência, que é uma característica da soldagem de chapas finas na indústria automobilística, tem soldabilidade não muito boa no alumínio e suas ligas, porque possuem resistência elétrica pequena e não possuem resistência mecânica elevada a altas temperaturas[3].

Em muitos casos utilizam-se de sistemas inadequados como o rebite, como forma de união de chapas finas, pode-se observar que na montagem de pequenas embarcações; a grande maioria é feita de alumínio e são rebitados, trazendo em pouco tempo problemas de estanqueidade.

Alguns projetistas usam de meios não muito econômicos para fugir dos problemas de processamento de chapas finas ou de montagem de

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

estruturas leves, superdimensionando as estruturas e/ou aumentando a espessura de chapas, e um dos fatores dessa prática é a não existência de parâmetros de soldagem com adição de metal para chapa de alumínio com espessura menor que 3,175 mm

Conhecendo-se a capacidade de cada processo de soldagem comumente utilizado na soldagem do alumínio, e aplicá-lo na soldagem de chapas finas, pode-se determinar o melhor processo, e os parâmetros mais adequados para obtenção de uma soldagem de qualidade, com a menor distorção possível. Esse conhecimento possibilitará o desenvolvimento de estruturas leves mais precisas e de melhor qualidade.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

CAPÍTULO I I

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 – Alumínio

Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais versáteis materiais utilizados na engenharia e em construções.

Leveza é uma das principais características do alumínio. O seu peso específico é de cerca de 2,7 gf/cm^3 . Sua massa é aproximadamente 35% da do aço e 30% da do cobre.

O alumínio comercialmente puro tem uma resistência a tração de aproximadamente 90 MPa. Por meio de deformação/transformação do metal, por exemplo laminação a frio, sua resistência pode ser praticamente dobrada. Aumentos maiores de resistência podem ser obtidos com pequenas adições de outros metais como elementos de liga, tais como: manganês, silício, cobre, magnésio, zinco, etc. Como o alumínio puro, as ligas podem também ter sua resistência aumentada pelo trabalho a frio. Algumas ligas podem ainda apresentar aumento de resistência através de tratamento térmico, tanto que hoje algumas ligas de alumínio podem ter resistência a tração de aproximadamente 700 MPa.[4]

O alumínio e suas ligas perdem parte de sua resistência a elevadas temperaturas, embora algumas ligas conservem boa resistência em temperaturas entre 200 e 260 ° C. Em temperaturas abaixo de zero, entretanto, sua resistência aumenta sem perder a ductilidade, tanto que o alumínio é um metal particularmente utilizado em aplicações a baixas temperaturas.

Quando o alumínio é exposto à atmosfera, forma-se imediatamente uma fina e invisível camada de óxido, a qual protege o metal de oxidações posteriores. Essas características de autoproteção dão ao alumínio uma elevada resistência à corrosão.

Estas são as características que dão ao alumínio sua extrema versatilidade. Na maioria das aplicações, duas ou mais destas características

entram em jogo, como por exemplo, baixo peso combinado com resistência em aeronaves, vagões ferroviários, caminhões e outros equipamentos de transporte. A alta resistência à corrosão e a elevada condutibilidade térmica são importantes em equipamentos para a indústria química e petrolífera; essas propriedades combinam com a atoxidade em equipamentos de produção alimentícia. Sua aparência atraente aliada a altas resistências às intempéries e baixa requisitos de manutenção proporcionam uma vasta utilização em todos os tipos de construção.

A alta refletividade, a excelente resistência às intempéries e seu baixo peso são muito importantes em materiais de cobertura. Seu baixo peso contribui facilitando o manuseio e os custos de transporte.

Muitas aplicações requerem extrema versatilidade que somente o alumínio possui. Diariamente, as combinações de suas propriedades estão sendo trabalhadas de novas formas.

Em face da infinidade de ligas de alumínio que existem e suas têmperas, uma classificação dessas ligas foi desenvolvida pela "Aluminum Association" (AA), que, atualmente, é seguida por toda a América do Norte e por muitos outros paises do mundo, inclusive o Brasil.

A norma brasileira que classifica as ligas de alumínio é a "NBR 6834", que é compatível com a publicada pela "Aluminum Association".

Dependendo de como essas ligas são produzidas, as ligas de alumínio são divididas em dois grandes grupos: ligas fundidas e ligas trabalháveis.

As ligas fundidas, são aquelas cujos produtos são obtidos por meio de vazamento de metal líquido em um molde para adquirir a forma desejada. As ligas trabalháveis são aquelas em que, a forma final do produto é conseguida através de transformações de um semimanufaturado. Podem ser em forma de Lâminas, chapas, folhas, perfis, vergalhões e forjados, obtido por transformação mecânica a frio ou a quente de um tarugo ou placa produzida pela solidificação do metal líquido.

Para identificar as ligas de alumínio trabalháveis utiliza-se um sistema de números de quatro dígitos. O primeiro número serve para indicar o



grupo da liga de acordo com o elemento químico que comparece em maior teor na composição da liga, conforme tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Designação das Ligas Trabalháveis por Grupos (ALCAN [3]).

LIGA ABNT (NBR 6834)	PRINCIPAL ELEMENTO QUÍMICO DA LIGA.
1XXX	Alumínio não ligado de no mínimo 99% de pureza
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Os últimos dígitos identificam a liga de alumínio ou indicam a pureza do alumínio. O segundo dígito indica modificações na liga original ou nos limites de impurezas.

Na Tabela 2.2, pode-se verificar a composição química e aplicações das ligas de alumínio trabalháveis não tratáveis termicamente.

A condutividade térmica exerce uma grande influência na soldabilidade, pois ela é quase cinco vezes maior no alumínio do que no aço. Isto significa que o alumínio necessita de um fornecimento de calor cerca de cinco vezes maior do que o requerido para o aço, para uma mesma massa elevar sua temperatura localmente. Na prática, isto significa o uso de uma fonte de calor com maior intensidade para que a soldagem seja bem sucedida.

Praticamente todo o método de união pode ser aplicado ao alumínio – rebitagem, soldagem, brazagem e colagem – uma grande variedade de junções mecânicas do alumínio simplifica a montagem de muitos produtos. Adesivos para colar peças de alumínio são largamente empregados, particularmente em uniões de componentes aeronáuticos [3].

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Tabela 2.2 – Composição química e aplicações das ligas de alumínio trabalháveis não tratáveis termicamente (ALCAN[3]).

LIGA	COMPOSIÇÃO NOMINAL Elementos de Liga - % em Peso				APLICAÇÕES TÍPICAS
	Cu	Mn	Mg	Cr	
1085	Alumínio extrapuro 99,85% de pureza				Equipamentos para indústria química e alimentícia, peças para repuxo profundo, frisos decorativos e refletores
1050	Alumínio comercialmente puro 99,50% de pureza				Tanques e cubas não estruturais para indústria química e alimentícia, impactados: tubos tipo bisnaga e aerosol, chapas litográficas e tubulação
1100 1200	Alumínio comercialmente puro 99,00% de pureza				Tubulações, peças estampadas, painéis decorativos, recipientes, utensílios domésticos e Aletas.
1350	Alumínio 99,50% de pureza com controle de elementos metálicos que afetam a condutibilidade elétrica.				Barramentos elétricos, fio condutor, peças ou equipamentos onde se requer alta condutibilidade elétrica.
3003	0,12	1,2	-	-	Tanques e tambores para indústria química e petroquímica, equipamentos para processamento e manuseio de alimentos, botes para navegação, silos, carrocerias de ônibus e furgões e utensílios domésticos.
3004	-	1,2	1,0	-	Vasos de pressão, tubulação para irrigação, recipientes, extintores, base de lâmpadas, coberturas e fachadas para construção civil, fornos e calhas e latas para bebidas.
5005	-	-	0,8	-	Condutor elétrico, caixilharia, carrocerias de ônibus e furgões e utensílios domésticos.
5050	-	-	1,4	-	Similar a 3003 e 5005, porém mais resistente. Apresenta excelente qualidade de acabamento. Utilizado também em forros.

Tabela 2.2 - (continuação) – Composição química e aplicações das ligas de alumínio trabalháveis não tratáveis termicamente (ALCAN[3]).

LIGA	COMPOSIÇÃO NOMINAL Elementos de Liga - % em Peso				APLICAÇÕES TÍPICAS
	Cu	Mn	Mg	Cr	
5052 5652	-	-	2,5	-	Utilizadas onde se requer resistência mecânica, tanques de armazenamento, barcos, uso geral em estamparia, carrocerias de ônibus e furgões, persianas. A liga 5652 é uma variante da liga 5052 com pureza elevada, própria para peróxido.
5083	-	0,7	0,8	0,15	Estruturas, tanques e reservatórios industriais, vasos de pressão não sujeitos a chama, vasos criogênicos, silos, vagões ferroviários, tanques rodoviários e veículos militares.
5086	-	0,45	4,0	0,15	Embarcações, componentes para embarcações, tanques de navios petroleiros, botijões de gás, vagões e silos.
5154 5254	-	-	3,5	0,25	Vasos de pressão não sujeitos a chama, tanques de navios petroleiros. A liga 5254 é uma variante da liga 5154 com pureza elevada própria para peróxido.
5182	-	0,35	4,5	-	Carrocerias de automóveis, componentes para bicicletas, tampas para latas de bebidas e persianas.
5454	-	0,8	2,7	0,12	Estruturas, tanques onde a temperatura de serviço exceda 65° C.
5456	-	0,8	5,1	0,12	Estruturas, tanques e reservatórios industriais, componentes para embarcações e vasos de pressão não sujeitos a chama.
5252	-	-	2,5	-	Peças para alto brilho, frisos para automóveis e aparelhos onde se requer resistência mecânica superior a 5657.
5657	-	-	1,0	-	Peças com alto brilho e frisos para automóveis e aparelhos.



Em uma primeira análise, devido a ponto de fusão do alumínio ser menor do que a do aço, pode parecer que o calor requerido para soldar alumínio e menor do que o requerido para soldar o aço. Entretanto, a alta condutividade térmica do alumínio compensa esta diferença entre as temperaturas de fusão; e, de fato, o alumínio necessita de pelo menos tanto quanto ou provavelmente mais calor do que o aço para ser soldado.

A alta condutividade térmica, o alto coeficiente de expansão linear e a necessidade de maior aporte de calor poderão causar consideráveis distorções durante a soldagem, se não forem utilizadas as velocidades de trabalhos mais altas possíveis quando da soldagem do alumínio com fontes de calor mais intensas [3].

Uma vantagem da alta condutividade térmica do alumínio, sob o ponto de vista do soldador é que ela proporciona uma rápida solidificação da poça de solda, tornando a soldagem do alumínio mais rápida do que a do aço.

Pode-se notar na Tabela 2.3, os processos de soldagem que se pode utilizar para cada liga de alumínio trabalhável - não tratável termicamente.

A limpeza da junta a ser soldada é um pré-requisito para se obter solda isenta de defeitos, independentemente do processo de soldagem ou brazagem empregada. Para se evitar a ocorrência de defeitos na solda principalmente porosidade, tais fatores como resíduos de óleo, graxa, pintura e umidade na peça a ser soldada, devem ser removidas antes da operação de soldagem.

O escovamento, como forma de limpeza, nunca deve ser feito sob uma superfície oleosa ou gordurosa, porque ele tende a besuntar a gordura na superfície e, além do mais, a escova fica completamente contaminada e logo passa a não ser mais eficiente para a finalidade pretendida. Por isso, a regra fundamental e desengraxar primeiro e em seguida escovar.

O escovamento da junta e das áreas ao seu redor com uma escova manual ou elétrica é a última operação a ser feita antes da soldagem. A função dessa operação é remover o filme de óxido que, embora volte a se formar instantaneamente, é agora muito mais fino e não tem tempo de absorver algum

tipo de sujeira, umidade ou substancias oleosas. As escovas devem ter cerdas de aço inoxidável, que devem ser mantidas limpas.

Tabela 2.3 – Soldabilidade de ligas de alumínio trabalháveis – não tratáveis termicamente (ALCAN[3]).

	PROCESSOS			
LIGA	SAEG / SAENC	SPR / SCR	B	SB
1060	A	B	A	A
1100	A	A	A	A
1350	A	B	A	A
3003	A	A	A	A
3004	A	A	B	B
3105	A	A	B	B
5005	A	A	B	B
5050	A	A	B	B
5052	A	A	C	C
5652	A	A	C	C
5083	A	A	X	X
5086	A	A	X	X
5154	A	A	X	X
5254	A	A	X	X
5182	A	B	X	X
5252	A	A	C	C
5454	A	A	X	X
5456	A	A	X	X
5457	A	A	B	B
5557	A	A	A	A
5657	A	A	B	B

Tabela 2.3 – (continuação) Soldabilidade de ligas de alumínio trabalháveis – não tratáveis termicamente (ALCAN[3]).

SAEG : Soldagem a arco elétrico com atmosfera gasosa SAENC: Soldagem a arco elétrico com eletrodo não consumível SCR : Soldagem a ponto por resistência B : Brazagem SB : Solda Branda com fluxo Classificação baseada na facilidade de união A: A união pelo processo é fácil. B: A união pelo processo é possível para a maioria das aplicações, podendo requerer técnicas especiais ou testes preliminares para estabelecer o procedimento e/ou desempenho. C: A união pelo processo é difícil. X: A união pelo processo não é recomendada. A união de todas as ligas pode ser feita através de: soldagem ultra-sônica, colagem com adesivos ou fixada mecanicamente.

2.2 – Processo de soldagem TIG

A soldagem a arco elétrico com a atmosfera gasosa e eletrodo não consumível, ou mais comumente designada como soldagem TIG ("Tungsten Inert Gas"), é um processo de soldagem em que o arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo não consumível e a peça, numa atmosfera de gás inerte.

No processo TIG o arco elétrico pode ser obtido por meio, de corrente alternada (CA), corrente contínua e eletrodo positivo (CC+) ou corrente contínua e eletrodo negativo (CC-). Entretanto, na indústria em geral o processo TIG (CA) é o mais aplicado na soldagem das ligas de alumínio.

Ele foi desenvolvido antes do processo MIG, bem como, foi o primeiro processo de soldagem com proteção de gás inerte adequado para soldar o alumínio.

Para a soldagem TIG (CA) do alumínio, o argônio puro é o gás de proteção mais utilizado. O argônio não só fornece uma abertura de arco estável como propicia melhor ação de limpeza do que o gás hélio ou a mistura dos dois gases.

A escolha de uma classificação do tipo e da bitola de um eletrodo, para suportar uma corrente de soldagem, é influenciada pela espessura e pelo tipo de liga do metal base. A capacidade dos eletrodos de tungstênio à passagem da corrente é dependente de inúmeros outros fatores, tais como: tipo e polaridade da corrente, gás de proteção empregado, tipo de equipamento utilizado (com resfriamento a ar ou água), da extensão do eletrodo além do anel suporte (fixação do eletrodo com luva ou tubo) e a posição da soldagem

A soldagem TIG (CA) em alumínio pode ser feita com ou sem metal de adição. A soldagem sem metal de adição, denominada de autógena, é limitada, principalmente a materiais de espessura muito fina e ligas que não sejam propensas as trincas a quente. O metal de adição ajuda a minimizar a fissuração, compensa variações na montagem da junta e participa na elaboração de soldas de filete e outras soldas, onde a deposição é necessária para realizar a solda.

O comprimento do arco varia, dependendo do tipo e localização da junta. Arcos mais curtos ajudam a obter maior penetração, evitam mordeduras e propiciam um controle melhor da largura e do perfil do cordão. Como regra prática, o comprimento do arco deve ser aproximadamente igual ao diâmetro do eletrodo de tungstênio.

O processo TIG pulsado é uma das variações do TIG convencional. Para caracterizar a corrente pulsada podem ser utilizados diversos parâmetros de pulso; entre eles: corrente de pico (Ip), corrente de base (Ib), tempo de pico (tp), tempo de base (tb), Figura 2.1.

unesp

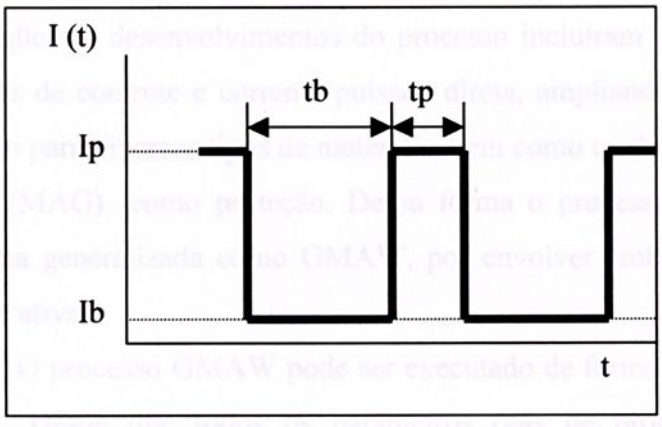


Figura 2.1: Gráfico esquemático da corrente pulsada em função do tempo[5].

O processo de soldagem TIG pulsado apresenta melhor controle da poça de fusão e da penetração em relação ao TIG convencional[5], devido a estas características é correntemente relacionado à soldagem de chapas finas[6]. Parte dos estudos que relacionam parâmetros de pulso à geometria do cordão levam em consideração, entre outros aspectos geométricos, a penetração[6].

2.3. - Soldagem a Arco Elétrico com Proteção Gasosa

Basicamente a soldagem a arco metálico (*Gas Metal Arc Welding-GMAW*) é definida como um processo que envolve uma fonte de energia aliada a um sistema de alimentação contínua do eletrodo (arame de solda consumível), estabelecendo um arco elétrico entre a ponta do eletrodo e o material de base, além de utilizar um sistema de proteção gasosa na região de soldagem, podendo ser à base de gás inerte - MIG (*Metal Inert Gas*) ou gás ativo - MAG (*Metal Active Gas*).

Segundo o American Welding Society[7] o conceito básico para GMAW foi introduzido na década de 1920, mas apenas em 1948 o processo tornou-se comercialmente viável. Primeiramente foi considerado para aliar principalmente, altas densidades de corrente de soldagem, diâmetro reduzido do eletrodo, eletrodo nu (sem revestimento de proteção) e gás inerte (MIG) como

proteção do arco elétrico. Sua primeira aplicação destinou-se à soldagem do alumínio. Subseqüentes desenvolvimentos do processo incluíram operações com baixas densidades de corrente e corrente pulsada direta, ampliando largamente a faixa de aplicação para diversos tipos de materiais, bem como o advento do uso do gás ativo CO_2 (MAG) como proteção. Dessa forma o processo passou a ser definido de forma generalizada como GMAW, por envolver ambos os tipos de proteção, inerte e ativa.

O processo GMAW pode ser executado de forma automática ou semi-automática. Desde que todos os parâmetros (gás de proteção, tipo de eletrodo e variáveis de soldagem) sejam escolhidos de forma apropriada, podem ser soldados todos os tipos de metais de importância comercial. A Figura 2.2 mostra um desenho esquemático do princípio básico do processo GMAW.

O processo GMAW incorpora a alimentação automática e contínua de um eletrodo consumível que é protegido por um suprimento externo de gás. Após o estabelecimento dos parâmetros iniciais, o equipamento, proporciona auto-regulagem das características elétricas do arco, requerendo do soldador, em processos semi-automáticos, apenas o controle da velocidade, direcionamento e posição da tocha de soldagem. Considerando o tipo de equipamento e os parâmetros, o comprimento do arco e a corrente (velocidade do eletrodo) são mantidos automaticamente.

Os equipamentos requeridos para o processo GMAW são ilustrados na Figura 2.3. Basicamente se compõem de: tocha de soldagem, unidade de alimentação do eletrodo, fonte de potência e sistema de suprimento de gás de proteção.

De acordo com o Instituto Internacional de Soldagem (I.I.W.)[8], os principais modos de transferência metálica na soldagem a arco metálico com atmosfera gasosa são por vôo livre e por contato. Esses modos podem ser subdivididos em curto-circuito, globular (gotas e repulsão), pulverização (axial e rotacional) e explosão.

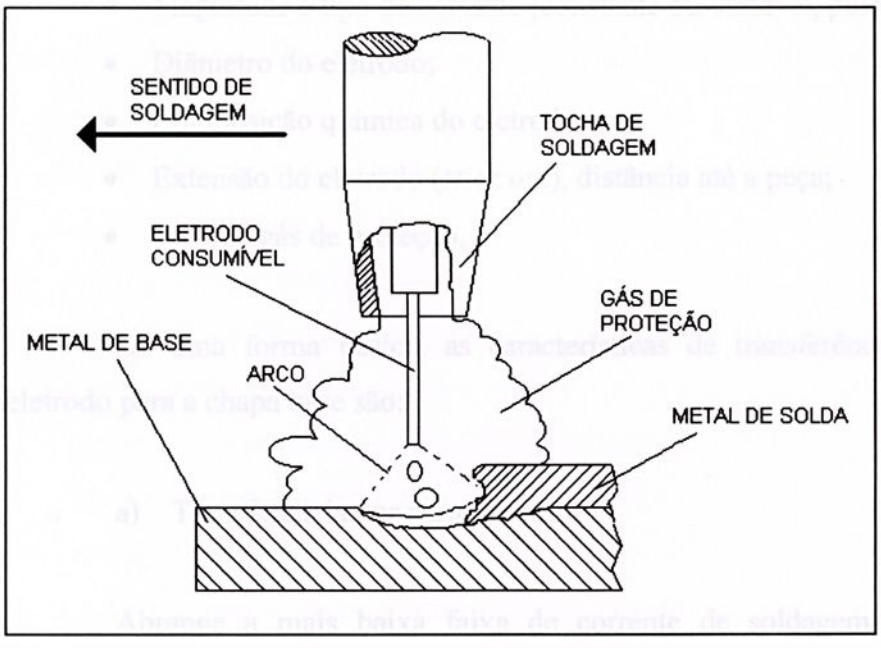


Figura 2.2 - Princípio de básico funcionamento do processo GMAW.

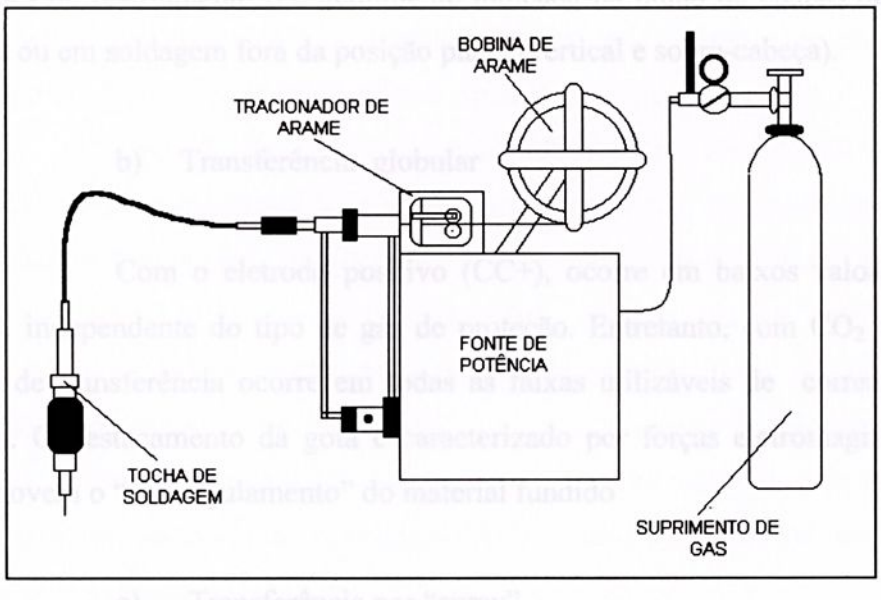


Figura 2.3 - Equipamento básico para o processo GMAW.

O tipo de transferência metálica é determinado por vários fatores, os mais significativos serão listados a seguir:

- Magnitude e tipo de corrente (constante ou variável, pulsada);
- Diâmetro do eletrodo;
- Composição química do eletrodo;
- Extensão do eletrodo (*stick out*), distância até a peça;
- Tipo de gás de proteção.

De uma forma básica, as características de transferência do metal do eletrodo para a chapa base são:

a) Transferência por curto-circuito

Abrange a mais baixa faixa de corrente de soldagem e os menores diâmetros de eletrodo associados ao processo GMAW. Este tipo de transferência produz poças de fusão de dimensões reduzidas com altas velocidades de resfriamento e é geralmente indicada na união de chapas de fina espessura ou em soldagem fora da posição plana (vertical e sobre-cabeça).

b) Transferência globular

Com o eletrodo positivo (CC+), ocorre em baixos valores de corrente , independente do tipo de gás de proteção. Entretanto, com CO_2 e He, este tipo de transferência ocorre em todas as faixas utilizáveis de corrente de soldagem. O destacamento da gota é caracterizado por forças eletromagnéticas que promovem o "estrangulamento" do material fundido

c) Transferência por "spray"

Ocorre com proteções ricas em argônio. É um tipo de transferência altamente estável, livre de salpicos. Requer o uso de eletrodo positivo (CC+) e níveis de corrente acima de um valor crítico, comumente definido como *corrente de transição "globular-spray"*.

As variáveis listadas a seguir são as principais responsáveis pela penetração, fusão, geometria dos cordões e em geral a qualidade da junta soldada:

(a) Corrente de soldagem
(b) Polaridade
(c) Tensão de soldagem
(d) Velocidade de soldagem
(e) Extensão do eletrodo
(f) Orientação do eletrodo
(g) Posição de Soldagem
(h) Diâmetro do eletrodo
(i) Composição do gás de proteção e vazão

O conhecimento e domínio dessas variáveis são essenciais na obtenção de soldas com qualidade e custos satisfatórios. Esses parâmetros não são completamente independentes e a mudança de um deles geralmente requer a alteração de um ou mais outros fatores para obter os resultados desejados.

Segundo Stol[9], a atual popularidade do processo GMAW está baseada na sua alta produtividade, custo relativamente baixo dos equipamentos, confiabilidade e simplicidade de operação. Porém, em muitas aplicações, quando é desejável alterar determinados parâmetros surgem alguns problemas operacionais, pois qualquer combinação de tipo de eletrodo, fonte de potência, corrente de soldagem, extensão do eletrodo, a taxa de deposição não pode ser variada independentemente sem afetar outras variáveis. Entretanto, o avanço nessa área tem proporcionado grande operacionalidade e funcionalidade aos processos de soldagem em especial o GMAW.

A vazão do gás deve ser ajustada corretamente para garantir proteção eficiente e qualidade da junta soldada. Baixas vazões provocam porosidades, oxidação, impurezas, instabilidade do arco e salpicos. Altas vazões dão origem a turbulências e mistura com o ar da vizinhança, prejudicando a proteção adequada da junta.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

A pesquisa realizada por Stenbacka[10] avalia os efeitos dos gases de proteção com o uso de arame tubular. Concluiu-se que o uso de gases de proteção com um reduzido teor de CO_2 reduz a incidência de salpicos, em detrimento, porém, da diminuição da penetração. O potencial de oxidação dos gases de proteção influência tanto nas propriedades mecânicas quanto na composição química do metal de solda, pois reduzindo o potencial de oxidação, reduz-se também o teor de oxigênio do metal de solda, aumentando dessa forma a recomposição da maioria dos elementos de liga, melhorando dessa maneira a sua temperabilidade. Por final, com a redução do potencial de oxidação aumenta-se o limite de escoamento do metal de solda bem como a sua resistência à fluência.

Os consumíveis do processo GMAW são os eletrodos e os gases de proteção. A composição química do eletrodo, do metal de base e do gás de proteção determina as propriedades e composição da junta soldada. Uma escolha adequada dos consumíveis é determinada pelos seguintes fatores:

- Tipo de metal de base;
- Propriedades físico-químicas e mecânicas requeridas para a junta soldada;
- Condições de conservação, tratamento superficial e limpeza do metal de base;
- Posição de soldagem;
- Modo de transferência metálica desejada.

Os eletrodos para GMAW são especificados segundo a AWS (*American Welding Society*), cobrindo, a grande maioria das especificações para metais de preenchimento em processos de soldagem. Outras instituições de normalização também estabelecem classificações de eletrodos para diversos fins específicos como a indústria aeroespacial. Entretanto, a AWS publica o catálogo Filler Metal Comparison Charts[7] com o objetivo de servir de guia de comparação entre as diversas especificações encontradas no mercado.

A função primordial dos gases de proteção é oferecer uma atmosfera controlada para se efetuar a solda em condições de mínima qualidade. Isso se faz necessário pois, a maioria dos metais quando aquecidos a temperaturas próximas a ponto de fusão apresentam uma forte tendência à oxidação e/ou formação de inclusões de impurezas e escórias. O oxigênio reage também com o carbono do aço resultando em CO_2 , que provoca a formação de escória, defeitos na solda, porosidade e fragilidade do material. A proteção gasosa também previne as contaminações por nitrogênio e hidrogênio, grandes causadores de trincas pós-soldagem.

Além de promover um ambiente de proteção para a realização da solda, os gases de proteção e sua vazão exercem significativa influência nos seguintes parâmetros:

- Características do arco elétrico;
- Modo de transferência metálica;
- Penetração e formas do cordão de solda;
- Velocidade de soldagem;
- Necessidade de limpeza e usinagem pós-soldagem;
- Propriedades mecânicas da junta soldada.

Os principais gases de proteção utilizados em GMAW são o CO_2, argônio, hélio e misturas entre os mesmos. O uso de nitrogênio é uma exceção, aplicada principalmente na soldagem do cobre.

Conforme Norrish[11], o processo de seleção dos gases de proteção deve ser baseado no conhecimento prévio das características de desempenho das misturas gasosas, o que deve incluir as considerações sobre os efeitos do gás ou da mistura sobre a eficiência de proteção, estabilidade do arco, geometria da junta soldada e as propriedades mecânicas do metal de solda. Ressalta ainda que, a escolha da proteção mais apropriada é mais bem alcançada pela execução monitorada de testes comparativos, que permitem o conhecimento de fatores como eficiência de proteção e seu custo-benefício.

O trabalho de Rhee et al.,[12] avalia o efeito de diversos gases de proteção em processo GMAW. Foi observado que o aumento do percentual de CO_2 presente no argônio geralmente eleva o valor da corrente de transição "globular-spray". A mistura que forneceu a menor corrente de transição é Ar-95% / CO_2-5%. Isso pode ser atribuído à redução da tensão superficial com o aumento de CO_2. Já para o uso de CO_2 puro e hélio, a freqüência de formação de gotas aumenta vagarosamente com o aumento da corrente, não ocorrendo corrente de transição. Foi constatado também que, em misturas de gases contendo alta porcentagem de CO_2 ocorreu aumento de salpicos. Segundo a pesquisa realizada por Jönson et al.,[13] pode-se confirmar o fato de que o tipo de gás influencia sobremaneira o comportamento do arco elétrico, principalmente propriedades como potencial de ionização e condutividades elétrica e térmica. Constatou-se que em presença de hélio, a fusão do metal ocorre mais rapidamente do que com argônio, devido ao seu alto potencial de ionização e alta condutividade térmica, porém, a estabilidade do arco só é mantida devido à formação de vapor de ferro que aumenta significativamente a condutividade elétrica.

A Soldagem com arco pulsado ou *Gas metal arc welding with pulsed current* (GMAW-P) é uma variação do GMAW convencional, na qual a transferência metálica ocorre periodicamente controlada pela pulsação da corrente de soldagem. Uma corrente de menor valor (corrente de base) é utilizada para manter o arco a fim de fundir o eletrodo e promover a limpeza catódica do metal de base. Posteriormente, pulsos de alta corrente são sobrepostos para permitir a transferência do metal. O resultado dessa técnica é um processo no qual a transferência ocorre pela técnica em "*spray*", porém, com correntes de soldagem média enormemente reduzida (normalmente inferior à corrente mínima para que ocorra a transferência em "*spray*" para um dado diâmetro de eletrodo em soldagem convencional).

Segundo Needaham & Carter,[14] a principal característica da técnica com corrente pulsada é que os níveis de corrente usados para se obter às mesmas taxas de deposição do material do eletrodo obtidas em corrente contínua são bem menores, o que permite menores aportes térmicos, melhor qualidade

microestrutural (menor incidência de defeitos metalúrgicos, trincas, etc.) e menor consumo energético, em termos relativos a outros processos.

As vantagens desse método são listadas a seguir:

- Condições de arco mais estáveis;
- Transferência por "*spray*" em níveis de corrente média que é normalmente associados à transferência globular, conseqüentemente menor aporte térmico;
- Controle sobre a poça de fusão;
- Em conseqüência dos itens anteriores, o processo aplica-se a soldagem de chapas finas e juntas fora da posição plana com excelentes resultados;
- Redução do nível de porosidade devido ao fluxo de metal líquido da poça de fusão e de sua movimentação;
- Melhor aparência do cordão de solda;
- Baixo nível de distorções – custo final da operação mais baixo.

Segundo o trabalho realizado por Castner[15], a geração de fumos tóxicos é menor para o uso de corrente pulsada do que com corrente contínua. Percebeu-se também que existe uma faixa determinada de tensão para cada velocidade de alimentação do eletrodo (ou corrente) que minimiza a emissão de fumos tóxicos. Pode-se concluir que o simples uso da corrente pulsada não é suficiente para reduzir a emissão de fumos, porém a otimização dos parâmetros de pulso é capaz de reduzir esses valores significativamente. É importante salientar que os parâmetros que permitem a minimizar a emissão de fumos também produzem soldas de boa qualidade.

Um estudo realizado por Castner & Singh[16] mostrou que os níveis de ruído dependem do tipo de transferência metálica, tipo de onda e intensidade de corrente e tensão de soldagem. Foi constatado que os ruídos

produzidos em processos GMAW e GMAW-P possuem intensidades próximas para transferência globular ou *"spray"*, porém a qualidade dos ruídos obtida para GMAW-P encontrou-se dentro de limites menos nocivos ao ouvido humano. A otimização dos parâmetros de pulso tende a melhorar a qualidade sonora durante a soldagem.

Norrish[11] afirma que o sistema a arco pulsado oferece claras vantagens, incluindo estabilidade em baixos valores médios de corrente, particularmente na soldagem de alumínio e aço inoxidável devido à maior possibilidade de controle do aporte térmico, além da aplicabilidade em chapas finas nas diversas posições.

Para se ter uma soldagem estável, é essencial manter o comprimento de arco constante, o qual é conseguido igualando-se a taxa de alimentação do arame com a taxa de fusão. Uma outra condição é que a transferência do metal para a poça de solda seja do tipo "*spray*" e que o diâmetro das gotas seja aproximadamente igual ao do arame.

Com a operação em corrente contínua, a primeira condição pode ser executada em toda a faixa de velocidade de alimentação (ou corrente), enquanto que a transferência por "*spray*" só pode ser alcançada com níveis de corrente acima de um valor crítico. Para uma faixa de corrente menor, ocorre à transferência globular (inadequada), e portanto restringe a aplicação de baixas correntes, as quais são necessárias para se soldar materiais delgados, juntas na posição vertical ou sobre-cabeça, e as ligas sensíveis ao aporte térmico elevado, inerente à soldagem com transferência por "*spray*".

O processo GMAW-P põe fim às limitações impostas pela transferência globular. Nesta técnica, uma determinada corrente que normalmente proporciona a transferência globular é modulada a fim de gerar um formato de onda de corrente onde a mesma é comutada de um nível alto (corrente de pico) para um nível mais baixo (corrente de base), ver Figura 2.1. A corrente de base serve principalmente para manter o arco aberto, mas é insuficiente para fazer com que ocorra a transferência do metal. Já a corrente de pico é estabelecida a fim de

excede o valor crítico, e assim promover a transferência do metal em gotas muito pequenas.

Além disso, seu valor e seu tempo de duração é tal que a cada pulso ocorre o destacamento de uma discreta gotícula de diâmetro igual ou menor do que o do eletrodo. Então, a técnica utilizando a corrente pulsada produz uma série de gotículas que resulta numa transferência metálica do tipo "*spray*", a qual se dá por uma corrente média que normalmente produziria transferência globular.

Segundo Wang et al.[17], o processo GMAW-P está se tornando aplicável nos sistemas de fabricação e soldagem devido ao seu ótimo desempenho e boa adaptabilidade. Acredita-se que o fator predominante para esse sucesso é determinado pelo modo de transferência em que é formada apenas uma gota de metal fundido em cada pulso, sendo o mais favorável a boas condições de soldagem. Este tipo de transferência é determinado principalmente pelos parâmetros de pulso, quando os consumíveis são devidamente selecionados.

O trabalho realizado por Boughton et. al.[18], vem a comprovar que o controle do modo de transferência, que é permitido com a soldagem com arco pulsado, fornece inúmero atrativo, os quais: soldagem livre de salpicos, penetração constante, redução da formação de "cratera" no final do cordão de solda, possibilidade de soldagem em todas as posições, entre outras qualidades.

Allum[19] afirma que os sistemas modernos a arco pulsado podem ser utilizados em uma grande variedade de aplicações em juntas de espessuras maiores que 50mm. Tanto materiais ferrosos e não-ferrosos podem ser unidos por esse processo, abrangendo uma vasta gama de materiais, incluindo alumínio e muitas outras ligas, aços ao carbono-manganês e inoxidáveis.

De forma geral, a variação independente de cada parâmetro de pulso provoca alterações com relação aos efeitos sobre a soldagem, podendo ser resumidos da seguinte maneira:

(a) Aumento da corrente de pico

- Aumenta a taxa de deposição do material do eletrodo, afetando diretamente o comprimento do arco;
- Aumenta levemente a corrente média;
- Aumenta levemente o aporte de calor.

(b) Aumentando a corrente de base

- Aumenta o comprimento do arco;
- Aumenta a corrente média;
- Aumenta o aporte de calor e a penetração;
- Aumenta a fluidez da poça de fusão.

(c) Aumentando o tempo (largura) do pulso

- Aumenta o comprimento do arco;
- Aumenta o aporte de calor e a penetração;
- Aumenta a largura do arco (cone de tocha);
- Aumenta a corrente média.

(d) Aumentando a freqüência de pulso

- Aumenta o comprimento do arco;
- Aumenta a corrente média;
- Aumenta o aporte de calor na peça e a penetração.

Segundo Norrish[11], o termo "MIG sinérgico" foi primeiramente utilizado pelo *The Welding Institute*, em meados da década de 1970, para descrever um método específico de controle para o processo MIG pulsado. Após este fato, muitos fabricantes de equipamentos de soldagem produziram sistemas Sinérgicos e então o termo alcançou caráter mais amplo.

De forma geral, segundo Wainer et al.[20], o controle sinérgico visa facilitar o ajuste dos múltiplos parâmetros de pulso, de forma a otimizar as condições de soldagem, minimizando o número de controles (botões) na máquina de soldagem. Através de um único controle, todos os parâmetros de pulso estariam regulados.

Atualmente, devido aos benefícios alcançados com essa técnica, existe uma tendência de se utilizar esse tipo de controle em outros processos que não o GMAW-P.

O controle sinérgico pode ser feito basicamente por duas maneiras:

- Controle sinérgico propriamente dita: a alimentação do eletrodo controla a corrente média;
- Controle auto-regulado: a tensão de soldagem controla a corrente média.

Norrish[11] ressalta que o controle sinérgico, em especial MIG sinérgico, é primariamente um método para simplificar a operação com corrente pulsada. O seu uso acarreta em benefícios econômicos, permitindo uma melhor aplicabilidade da soldagem com arco pulsado. O sucesso do seu uso está relacionado com a perfeita escolha dos modos de operação, dos equipamentos disponíveis e do treinamento adequado dos operadores.

Allum[19] acrescenta que o MIG sinérgico tem sido pesquisado por uma vasta faixa de indústrias como (nuclear, soldagem de tubos, reparos e manutenção em sistemas hiperbáricos, etc.) e exemplos de uso nas linhas de produção já existem em larga escala.

A taxa de deposição, em qualquer processo, é a massa do material depositada por unidade de tempo. A taxa de deposição depende dos parâmetros de soldagem como diâmetro, composição, extensão e corrente de soldagem.

unesp

A eficiência de deposição é a razão entre a massa do material depositada na peça e a quantidade de eletrodo consumida.

O artigo de Widgery[21] que trata das eficiências e taxas de deposição em procedimentos de soldagem propõe um método de cálculo baseado nas proposições acima.

O trabalho de Chandel[22], mostra a variação do efeito do processo com a corrente, voltagem, comprimento do eletrodo e diâmetro do eletrodo. Pode-se perceber que há um aumento da eficiência de deposição com o aumento da extensão do eletrodo e da corrente e com o decréscimo da voltagem e diâmetro do eletrodo. Para um mesmo parâmetro, a eficiência de deposição é alta quando a polaridade do eletrodo é negativa. Uma relação similar pode ser observada para o GMAW.

Os resultados dessa pesquisa também indicaram que a proteção do gás na GMAW também tem um efeito na eficiência de deposição. A eficiência do GMAW cresce com o aumento da corrente de soldagem, voltagem e diâmetro do eletrodo, e decresce com o aumento da extensão do eletrodo.

Segundo Norrish[23], é bastante complexa a tarefa para a seleção de parâmetros que possam ser adequados às necessidades de estabilidade de arco, vantagens econômicas, qualidade e propriedades mecânicas da solda.

Segundo Brandi, et. al.[24], devido à introdução de parâmetros operacionais adicionais no processo de soldagem com MIG pulsado, o método de tentativa e erro ainda vem sendo bastante utilizado para se conseguir um ajuste para a ocorrência de transferência de uma gota por pulso de corrente.

Pereira[25] verificou que um dos principais parâmetros, testado no processo de soldagem MIG pulsada automatizada, que apresentou influência na minimização da instabilidade do cordão foi o comprimento do arco.

Em pesquisas realizadas por Amin[26] e Street[27], para que o processo de transferência seja estável, apenas uma gota deverá ser transferida a cada pulso de corrente, ou seja, para cada material haverá uma relação entre velocidade de alimentação do arame, intensidade de corrente e tempo de pulso.

Segundo Chan[28], apesar das inúmeras vantagens, do ponto de vista térmico e metalúrgico, do uso do arco pulsado é importante salientar que o GMAW-P introduz mais variáveis que influem diretamente no controle e conseqüências do processo. Tal complexidade operacional exige o uso de modelos matemático-computacionais capazes de processar em tempo hábil e de forma eficiente todas as condições de contorno envolvidas.

Essa tendência do uso de sistemas mecatrônicos e informatizados é uma conseqüência tecnológica natural e pode ser evidenciado por um sem-número de trabalhos na área, principalmente em ramos como redes neurais e modelagem por elementos finitos. Pesquisas como as de Chan[28], White et. al.[29], Vishnu et al.[30], Pardo & Weckman[31], Chen et al.[32], Wang & Li[33], entre outros confirmam essa tendência.

2.4 - Tensões e Deformações Decorrentes de Operações de Soldagem

Em cada operação de soldagem, o arco elétrico pode ser considerado como uma fonte de calor pontual, que se desloca ao longo da junta a soldar. Essa fonte de calor fornece à peça uma quantidade de energia ou calor que se espalha pelo material com uma velocidade que depende da condutibilidade térmica do mesmo, criando na peça, campos isotérmicos. No local, onde se encontra o arco elétrico, a temperatura se eleva o suficiente para fundir o material, e essa área é a poça fundida, que se desloca acompanhando a velocidade de soldagem ao longo da linha de solda.

Os metais se dilatam com o aumento da temperatura e se contraem com sua diminuição, portanto, as deformações e as tensões são conseqüências do ciclo térmico da soldagem.

As características físicas do metal em questão são fundamental no processo de dilatação, contração, velocidade de deslocamento das isotermas, etc. Na Figura 2.4, pode-se ver o campo isotérmico de temperatura ao redor da fonte de calor de soldagem. Todo esse processo dinâmico, só termina quando a temperatura da peça se estabiliza, ou seja quando atinge a temperatura ambiente.

Após isso, nós podemos encontrar os efeitos causados por essa atividade, que podem ser as deformações, as tensões residuais e às vezes trincas.

Durante a solidificação da poça fundida que avança pela junta, tensões de contração, devida a essa solidificação, começam a agir sobre a parte já soldada da junta. Enquanto o material depositado está ainda líquido e vai diminuindo a sua temperatura, as tensões de contração são inexistentes no local, mas à medida que se solidifica e vai resfriando ainda mais, começa a exercer tensões de contração cada vez maiores e que são acompanhadas, em parte, por deformações plásticas da própria solda e deformações elásticas crescentes, que dão origem às tensões residuais que passam a agir sobre o metal de base adjacente e sobre a própria solda solidificada. Essas tensões, se não forem acompanhadas de deformações geométricas da junta soldada, podem atingir e ultrapassar o limite de escoamento do material de base da solda, fissurando-o.

A distorção que uma peça soldada apresenta no final, quando fria, é resultante de contrações longitudinais, contrações transversais e contrações angulares. Como em geral, uma peça soldada pode ter sido composta por soldas de topo e soldas de filetes, com direções, comprimentos e volumes diversos, a resultante final da distorção é complexa de se determinar.

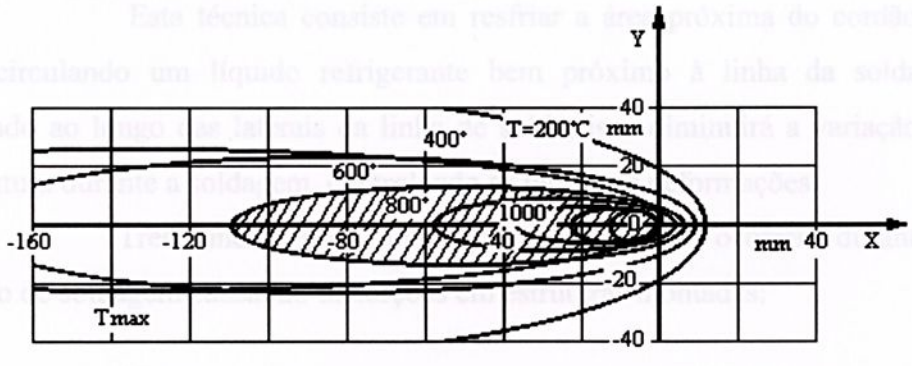


Figura 2.4 – Campo isotérmico de temperatura ao redor da fonte de calor de soldagem (Radaj)[34].

Existem variadas maneiras de se controlar as distorções, diminuindo o seu efeito. Podemos agir antes , durante e depois da soldagem ou mesmo nas três etapas mencionadas de uma mesma peça.

Há a ação antes, quando se projeta a peça a ser soldada, procurando localizar os cordões de solda de uma forma simétrica, que se auto-equilibrem após soldado, escolhendo os chanfros mais convenientes, que diminuam as deformações inevitáveis, escolhendo processos de solda mais convenientes, que possam causar a menor deformação para o caso específico a soldar; ou ainda projetando pré-deformação que se corrigem ao serem deformadas pela operação de soldagem.

Há a ação durante a soldagem, quando se adota uma seqüência de soldagem mais conveniente para procurar o equilíbrio de tensões, escolhendo os diâmetros de eletrodos em função de sua maior ou menor tendência a contrações longitudinais ou transversais, fazendo o martelamento entre passes de solda, ou travamento a peça para impossibilitar sua deformação durante a soldagem.

E após a soldagem completa, quando se calibra mecanicamente através de distensões ou de encolhimentos localizados, criteriosamente escolhidos de maneira a recuperar a forma ideal projetada.

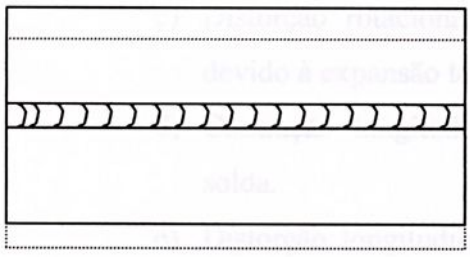
Guan, et. al.[2] desenvolveram uma técnica de controle da tensão e deformação durante a soldagem, denominada Low stress non-distortion (LSND).

Esta técnica consiste em resfriar a área próxima do cordão de solda, circulando um líquido refrigerante bem próximo à linha da solda, e aquecendo ao longo das laterais da linha de solda, isso diminuirá a variação da temperatura durante a soldagem, controlando as tensões e deformações.

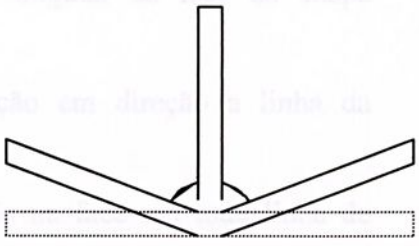
Três fundamentais mudanças de dimensões ocorrem durante o processo de soldagem causando distorções em estruturas montadas:

1. Contração transversal, perpendicular à linha de solda;
2. Contração longitudinal, paralelo à linha de solda;
3. Distorção angular (rotação em volta a linha de solda).

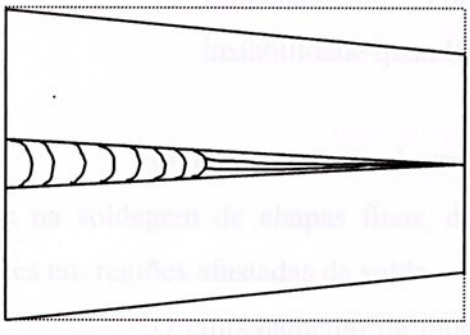
Estas mudanças de dimensões são mostradas na Figura 2.5, e são classificadas por seu surgimento:



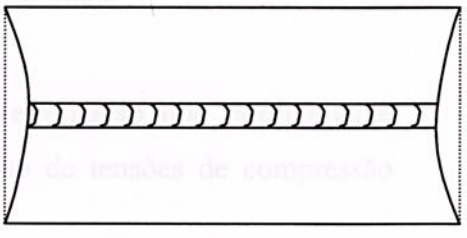
a) Contração transversal



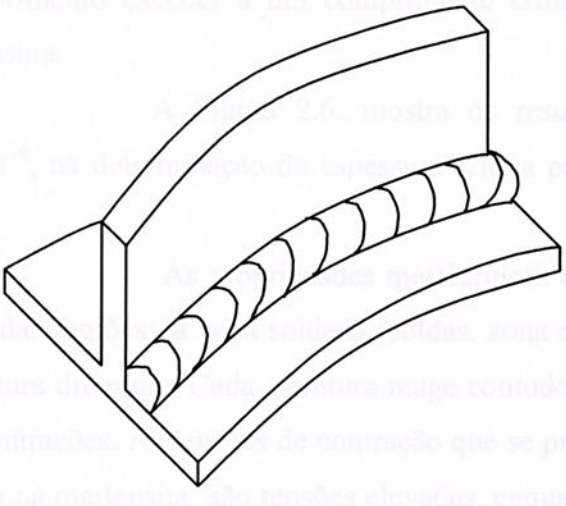
b) Mudança angular



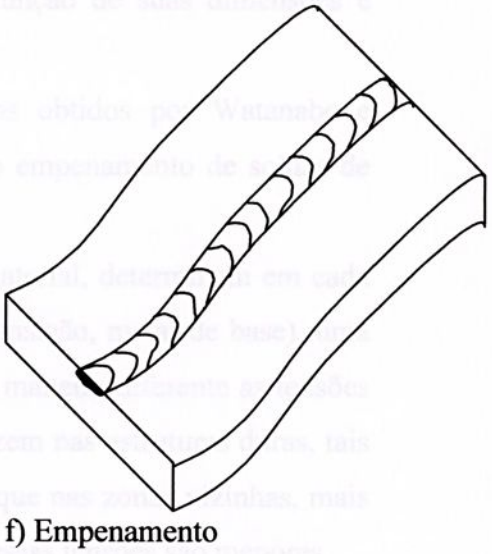
c) Distorção rotacional



d) Contração Longitudinal



e) Distorção longitudinal



f) Empenamento

Figura: 2.5 - Tipos de distorção da solda (Masubushi)[35].

a) Contração transversal. Contração perpendicular à linha de solda.

b) Mudança angular (distorção transversal). A distribuição térmica não uniforme na direção da espessura causa distorções da junta (mudança angular) na linha de solda.

c) Distorção rotacional. Distorção angular da face da chapa devido à expansão térmica.
d) Contração longitudinal. Contração em direção a linha da solda.
e) Distorção longitudinal. Distorção na face em toda linha de solda e perpendicular a chapa.
f) Empenamento. Forças de compressão térmica causam instabilidade quando as chapas são finas.

O empenamento é um tipo de deformação que normalmente ocorre na soldagem de chapas finas, devido à ação de tensões de compressão atuantes em regiões afastadas da solda.

O empenamento de uma peça soldada só ocorrerá quando o seu comprimento exceder a um comprimento crítico, função de suas dimensões e espessura.

A Figura 2.6, mostra os resultados obtidos por Watanabe e Satoh[36], na determinação da espessura crítica para o empenamento de soldas de topo.

As propriedades metalúrgicas de material, determinam em cada uma das regiões da peça soldada (soldas, zona de transição, metal de base), uma estrutura diferente. Cada estrutura reage contudo, de maneira diferente as tensões de contrações. As tensões de contração que se produzem nas estruturas duras, tais como na martensita são tensões elevadas, enquanto que nas zonas vizinhas, mais aptas a deformações plásticas, por exemplo a ferrita, essas tensões são menores.

Dentre as propriedades mecânicas do material, são principalmente o limite elástico no modo de elasticidade que tem um peso preponderante no que diz respeito à influência do calor em soldagem.

O aquecimento da peça depende, estreitamente do processo de soldagem. Por exemplo, a soldagem com o maçarico oxiacetileno exige uma quantidade de calor que é o dobro da exigida para soldagem ao arco elétrico.

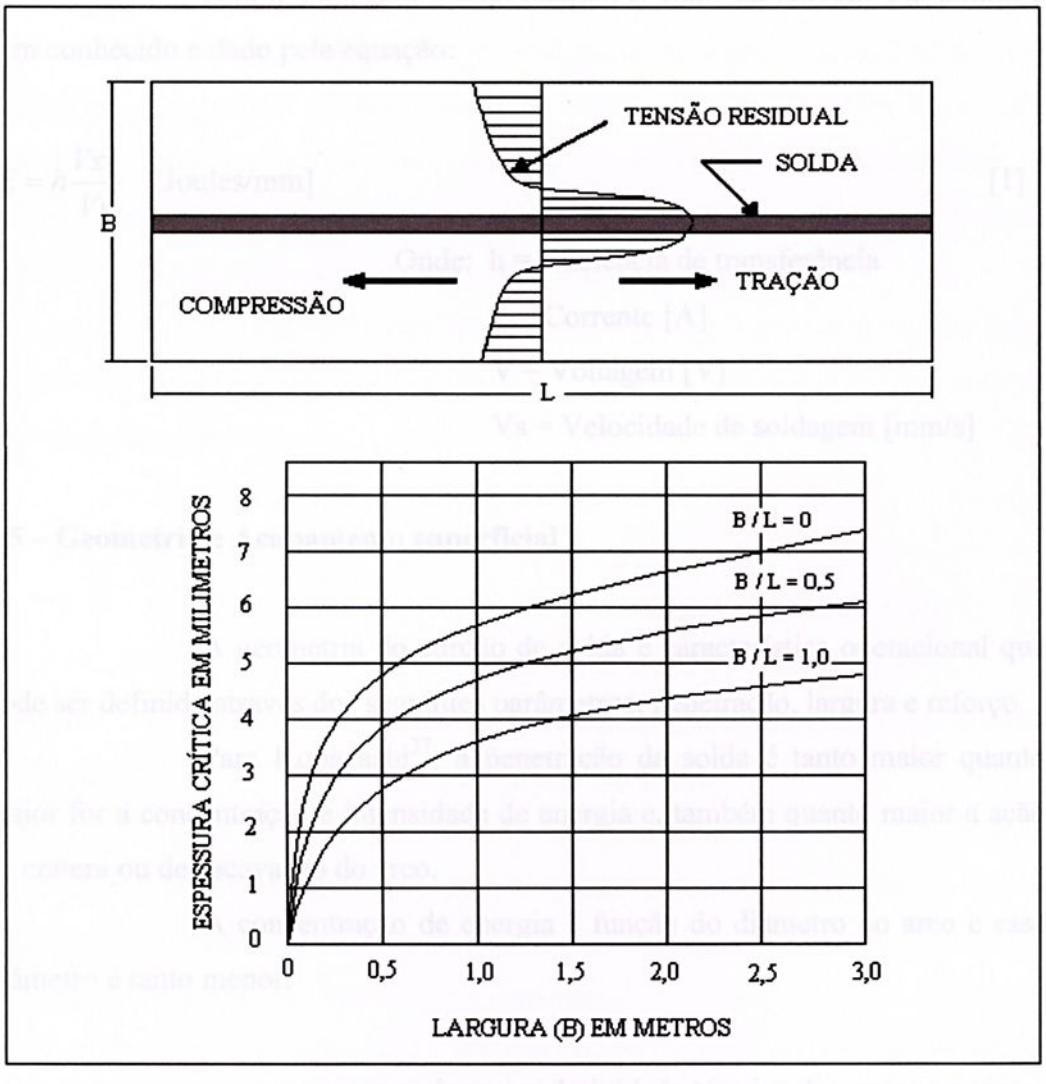


Figura 2.6: Espessura crítica para empenamento de soldas de topo. (Watanabe e Satoh)[36].

Existe igualmente uma relação entre velocidade de soldagem e o aquecimento da peça. Para uma mesma potencia de arco, o aporte de calor para a peça será tanto menor quanto maior for a velocidade de soldagem, o que se traduz por tensões e contrações menores.

A quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear, é o que se chama energia de soldagem, aporte de calor, ou mesmo "heat input".

Para a soldagem a arco elétrico o valor da energia, em J/mm, é bem conhecido e dado pela equação:

$$E = h\frac{VxI}{Vs} \quad \text{[Joules/mm]} \qquad [1]$$

Onde: h = Eficiência de transferência

I = Corrente [A]

V = Voltagem [V]

Vs = Velocidade de soldagem [mm/s]

2.5 – Geometria e Acabamento superficial

A geometria do cordão de solda é característica operacional que pode ser definida através dos seguintes parâmetros: penetração, largura e reforço.

Para Kobayashi[37], a penetração da solda é tanto maior quanto maior for a concentração e intensidade de energia e, também quanto maior a ação de cratera ou de escavação do arco.

A concentração de energia é função do diâmetro do arco e esse diâmetro é tanto menor:

- quanto maior a condutividade térmica dos gases presentes no arco;
- quanto menor o comprimento do arco;
- quanto menor o diâmetro do eletrodo.

Já a intensidade de energia aumenta à medida que:

- aumenta a corrente de soldagem;
- diminui a velocidade de soldagem;
- aumenta a temperatura da gota.

De acordo com Lancaster[38], é freqüentemente assumido que a penetração na soldagem resulta da pressão exercida sobre a poça fundida, que comprime a superfície líquida para uma penetração profunda; portanto essa característica é provocada pela força do arco. Essa força pode ser devida à inércia de um fluxo de gotas metálicas ou a um jato de gás colidindo com a superfície da poça de solda, ou, ainda, à combinação dos dois mecanismos.

A largura do cordão de solda é tanto maior quanto maior for o diâmetro do arco elétrico, e de acordo com Lancaster[38], na soldagem, a forma do reforço é determinada:

- pela largura da poça de solda;
- pelo volume de metal adicionado na poça de solda;
- pela pressão hidrostática sobre o cordão fundido;
- em altas temperaturas, pela velocidade com a qual o metal flui na direção da poça de solda.

O reforço do cordão de solda é aumentado à medida que o diâmetro do arco diminui, a área adicionada da solda aumenta, e as propriedades, como tensão superficial e viscosidade, aumentam.

As características do acabamento superficial são determinadas pela quantidade de salpicos e pela aparência do cordão de solda.

De acordo com Jackson[39] , existem quatro fontes de salpicagem na soldagem com eletrodos consumíveis e gás inerte:

- evolução de gases na gota, causando a explosão da gota, ou da poça de solda, resultando a ejeção da mesma;
- efeito de contato ou de fusível, devido ao curto-circuito ou desintegração explosiva da conexão fina entre eletrodo-gota;
- instabilidade globular, devido ao tamanho excessivo, resultando a desintegração da gota;

unesp

- efeito pendular causado pelo movimento oscilatório dos pontos catódicos e anódicos, produzindo uma transferência errática ou de multi-partículas.

Para Zaruba[40], as causas mais importantes dos salpicos são o superaquecimento do metal líquido pela alta corrente de curto-circuito e a explosão da fina conexão entre eletrodo e gota líquida. Esse mesmo autor propõe que a mesma pode ser reduzida pela soldagem sem curto-circuito, conseguida pela seleção apropriada das condições de soldagem. Outra proposição feita por esse pesquisador é que os salpicos podem ser quase inteiramente eliminados, se somente parte da corrente ou nenhuma flua através da conexão eletrodo-gota e se o calor necessário para fusão da conexão for fornecido pelo arco. Neste caso, não existe a possibilidade de explosão elétrica da conexão, ou sua energia é sensivelmente reduzida. Mas, se os pontos ativos (catódicos e anódicos) são bem definidos e concentrados sobre a gota, não existirão desvios, e a corrente romperá a conexão eletrodo-gota. Outra possibilidade é ajustar a indutância da fonte de modo que a taxa de crescimento da corrente no momento do curto-circuito seja tal que não haja o crescimento violento da temperatura.

Segundo Kobayashi[37], com relação à aparência do cordão de solda, ela pode ser influenciada por muitos fatores e, entre eles, pode-se citar:

- tensão superficial do metal de solda: quanto mais alta , pode causar mordeduras;
- pontos ativos excessivamente móveis; pode ocasionar um arco errático e uma transferência de metal da mesma forma;
- variação do comprimento do arco.



CAPITULO III

MATERIAL E MÉTODO

3.1 – Materiais

A chapa utilizada foi o alumínio de classificação 1100, comercialmente puro, com 99% de pureza, selecionada por ser facilmente encontrado no mercado e ter as mesmas características de soldabilidade do alumínio de classificação 3003, que tem em sua composição cobre e manganês.

Esses materiais são amplamente aplicados em utensílios domésticos, tubulações, painéis decorativos, tanques e tambores para indústria química e petroquímica, equipamentos para processamento e manuseio de alimentos, botes para navegação, silos, carrocerias de ônibus e furgões, que na maioria dos casos, a aplicação é na forma de chapas finas.

Adotou-se para os corpos de prova, chapas com a espessura de 1,2 mm, após verificação de qual espessura era mais utilizado nos casos citados.

No processo de soldagem TIG, foi utilizado um eletrodo de tungstênio com 2% de Tório, diâmetro de 1,6 mm.

O arame utilizado para soldagem com o processo MIG foi o ER-4043, por ser o mais usual para este material, e o diâmetro de 1,2 mm, que é acima do recomendado, foi escolhido por apresentar menor dificuldade em percorrer o cabo de oito metros da tocha de soldagem.

O gás de proteção nos dois processos foi o argônio.

3.2 – Equipamentos

O equipamento utilizado na soldagem TIG foi uma fonte Square Wave TIG 175 da Lincoln Eletric, que também pode ser utilizado na soldagem com eletrodo revestido, com corrente contínua ou alternada, com capacidade de

90 A para 100% de fator de serviço, podendo chegar a 150 A à 36%. Foi utilizada uma tocha simples, sem refrigeração, conforme a Figura 3.1.

Os equipamentos do processo MIG utilizados para a execução das soldagens dos corpos de provas foram, uma fonte de soldagem da marca Maxtron – 450 da MILLER Electric Mfg. Co., com um rendimento de 100% a 450 A, e o alimentador de arame da marca S-64M de 24 volts AC, 10 A, equipamentos, conforme a Figura 3.2.

A tocha de soldagem MIG é do tipo Push-Pull PP-24D da Binzel com motor de 24 V e cabo de 8 metros de comprimento.

A velocidade de avanço de soldagem e à altura do arco foi mantida constante por meio de um carro portátil para corte, popularmente conhecido como "tartaruga", da marca White Martins, modelo MC 46, com faixa de velocidade de 100 – 1000 mm/min e freqüência de 60 Hz, conforme a Figura 3.3.

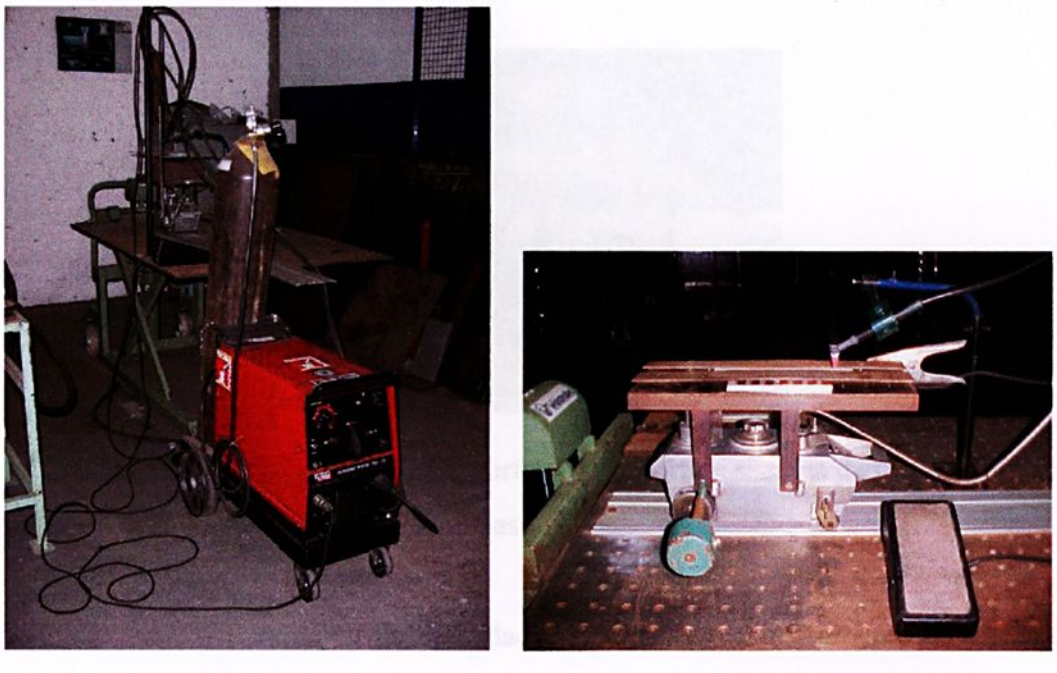


Figura 3.1: Conjunto utilizado na soldagem TIG convencional



Figura 3.2: Conjunto utilizado na soldagem MIG convencional e pulsado (fonte, alimentador de arame, cilindro de gás e tocha tipo "push-pull").

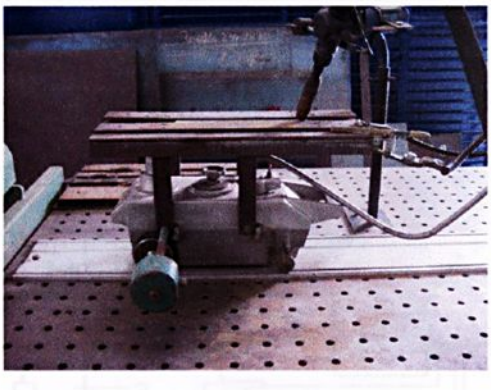


Figura 3.3: Carro portátil para corte com suporte e sistema de travamento das peças a serem soldadas.

Para a aquisição de dados foi utilizado o instrumento de medição de tensão e corrente TC-1, com uma faixa de medição padrão de aproximadamente 75 V e 900 A de pico e 500 A nominais e uma placa de aquisição de dados e comando de equipamentos INTERDATA 3, compatível com

o barramento de 16 bit da linha de microcomputadores IBM-PC, com uma freqüência de aquisição de 1000 pontos por segundo.

A Figura 3.4 mostra a disposição dos equipamentos de soldagem TIG e a Figura 3.5 da soldagem MIG com o equipamento de aquisição de dados.

Para medir a penetração, largura e reforço do cordão, foi utilizado o projetor de perfil da marca Nikon 6C, conforme a Figura 3.6.

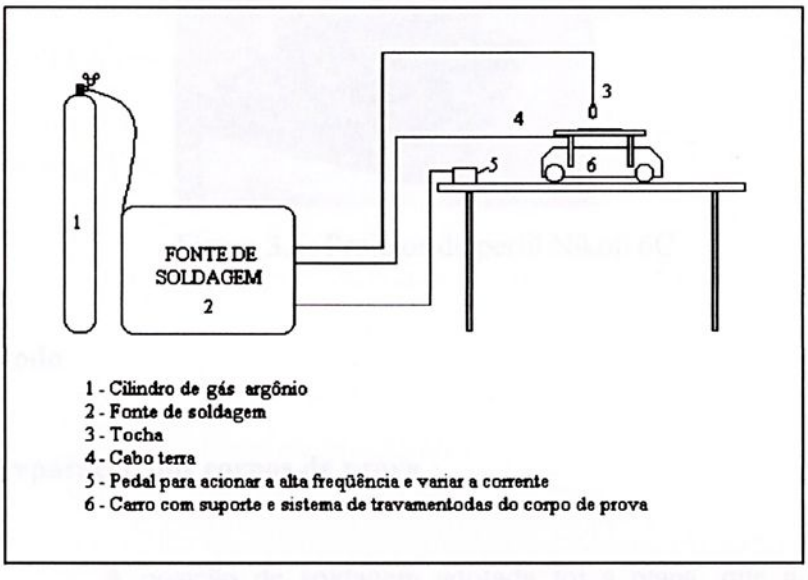


Figura 3.4 - Esquema representativo dos equipamentos de soldagem TIG.

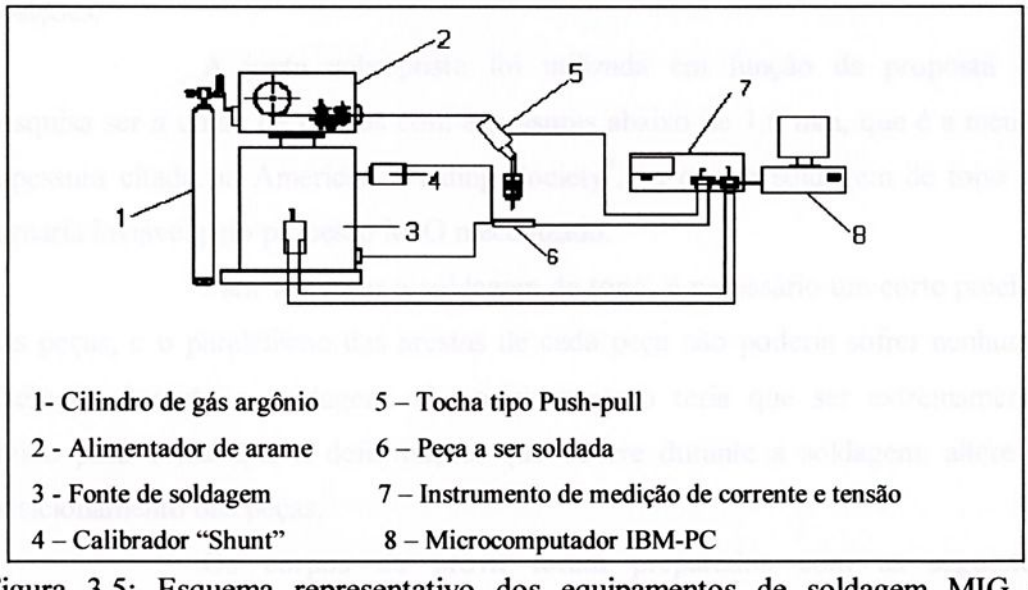


Figura 3.5: Esquema representativo dos equipamentos de soldagem MIG e aquisição de dados.



Figura 3.6: Projetor de perfil Nikon 6C

3.3 – Método

3.3.1 – Preparação dos corpos de prova

A posição de soldagem adotada foi à plana, que no futuro, a partir dos parâmetros encontrados, servirá como base para a soldagem em outras posições.

A junta sobreposta foi utilizada em função da proposta da pesquisa ser a união de chapas com espessuras abaixo de 1,6 mm, que é a menor espessura citada na American Welding Society[7], na qual a soldagem de topo se tornaria inviável pelo processo MIG mecanizado.

Para viabilizar a soldagem de topo, é necessário um corte preciso das peças, e o paralelismo das arestas de cada peça não poderia sofrer nenhuma alteração durante a soldagem. O posicionamento teria que ser extremamente rígido para evitar que a deformação, que ocorre durante a soldagem, altere o posicionamento das peças.

Os corpos de prova foram preparados com as seguintes dimensões, 250 mm x 60 mm, sendo realizada a primeira limpeza com um banho de uma solução de ácido nítrico a 10% e detergente industrial e no momento da

soldagem foi realizado na área de soldagem uma nova limpeza mecânica com uma escova de aço inoxidável.

Para a soldagem com o processo TIG, os corpos de prova tiveram suas dimensões diminuídas para 150 mm x 50 mm, devido à dificuldade de execução da soldagem sem um controle preciso da corrente. A chapa era perfurada antes do término da soldagem.

Uma das chapas foi sobreposta a uma distância de 20 mm da aresta da outra, formando a junta proposta na pesquisa.

3.3.2 - Processo TIG

Os parâmetros utilizados na soldagem com o processo TIG foram:

- Velocidade de soldagem: 300 mm/min.
- Fluxo de gás: 16 l/min
- Diâmetro do eletrodo: 1,6 mm
- Ângulo da tocha: - 15° com o eixo vertical e 75° com o eixo horizontal
- Ângulo da ponta do eletrodo: 60°
- Diâmetro do bocal: 9,5 mm (3/8 pol.)
- Distância eletrodo-peça: 2,0 mm
- Tipo de corrente: Corrente Alternada (CA)
- Corrente máxima: 60 A

Não foi realizado à aquisição de dados, em decorrência da utilização de alta freqüência durante a soldagem.

A variação da corrente foi executada através de um pedal, que é um acessório do equipamento, partindo da corrente máxima regulada na máquina e reduzindo gradativamente, conforme o avanço da soldagem.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Após os testes preliminares, definidos os parâmetros, realizou-se cinco repetições para cada condição. Procedimento adotado também para os outros processos.

3.3.3 - Processo MIG convencional

Inicialmente as soldas foram realizadas tomando como base, os parâmetros indicados pela American Welding Society[7], para soldagem de chapas de alumínio com 1,6 mm de espessura, que apresentavam as seguintes características:

- Tensão de soldagem: 19,5 V
- Velocidade de alimentação do arame: 5,1 m/min.

Durante os testes iniciais da soldagem MIG convencional, verificou-se o tipo de transferência metálica que estava ocorrendo a cada ajuste, já que a transferência globular não é utilizada na soldagem de alumínio e é pequeno o emprego da transferência por curto-circuito, sendo o mais indicado à transferência por "spray"[3].

Mas para se obter a transferência por "spray" é necessários níveis de corrente acima de um valor crítico, comumente definido como corrente de transição globular-spray, abaixo desse valor o modo de transferência é globular que não é utilizado na soldagem de alumínio.

Os níveis de corrente para a soldagem MIG em "spray" variam de cerca de 70 a 400 amperes, conforme o diâmetro do eletrodo[3].

Como a chapa adotada é de 1,2 mm, necessitando a utilização de correntes médias abaixo do valor crítico para se obter a transferência por "spray", a opção foi utilizar a transferência por curto-circuito, apesar de não ser muito utilizada na soldagem de alumínio.

Para se obter um arco estável, com uma transferência por curto-circuito, foi necessário um posicionamento da tocha na qual a alimentação do

arame permanecesse na posição desejada e em linha reta ao longo da linha de solda.

Tarefa de difícil execução, uma vez que o arame é fornecido em bobina e ao chegar no bico de contato possui uma certa curvatura, oscilando a sua saída e provocando uma variação na direção do cordão de solda. Até mesmo o desgaste no bico de contato provocou oscilação na saída do arame.

Para contornar essas dificuldades, a tocha foi reposicionada conforme a saída do arame, de forma que o arame variasse somente ao longo da linha da solda e não transversalmente, diminuiu-se também à distância do bocal da peça, procurou-se não alterar a posição do bico de contato, para que o desgaste ficasse somente em uma posição.

Os dispositivos de fixação (Figura 3.3), foram desenvolvidos de forma a garantir o posicionamento das peças, mesmo depois de aquecida pelo calor proveniente do arco.

Na tentativa de minimizar a necessidade de tamanha precisão no preparo da junta, executou-se a soldagem arrastando a tocha ("backhand angle"), aumentando a largura do cordão e facilitando o recobrimento da junta sobreposta.

Procedimento que não é recomendado para a soldagem MIG do alumínio pelo motivo de poder mover o gás de proteção da frente do arco, permitindo que o ar entre e contamine o mesmo[3].

Com o posicionamento da tocha bem próxima da peça, esse problema não ocorreu, mas provocou um fluxo de gás mais forte sobre a gota, e no momento da transferência a gota era deslocada de sua direção, causando um depósito irregular.

Invertendo o posicionamento, agora apontando o bocal no sentido da solda ("forehand angle"), com um ângulo de 7 graus em relação a vertical, menor que o recomendado pela ALCAN[3] que é de 10 a 15 graus, conforme ilustrado na Figura 3.9, apresentou melhores resultados, compensando a alta velocidade de soldagem, mantendo o gás no seu fluxo natural e protegendo por completo o arco.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Esse conjunto de medidas, possibilitou realizar a soldagem, mas notou-se uma grande sensibilidade na alteração dos parâmetros de soldagem. A irregularidade no reforço do cordão de solda, a pequena penetração, são algumas conseqüências dessas pequenas variações dos parâmetros de soldagem.

3.3.4 - Processo MIG pulsado:

As soldas com o processo MIG pulsado também foram realizados, tomando como base à pré-programação da máquina, que determina as seguintes características:

- Vazão do gás de proteção de 19 l/min;
- Alimentação de arame de 2,5 m/min;
- Corrente de pico de 205 A;
- Corrente de base de 32 A;
- Número de pulsos igual a 80 ppm;
- Tempo de duração do pulso de 2,2 ms.

A partir dos dados obtidos com a soldagem MIG convencional, foram sendo fixados alguns parâmetros como o posicionamento da tocha de soldagem, a tensão, a velocidade de soldagem.

A velocidade do arame foi mantida a mesma da programação inicial do equipamento, assim como a corrente de base e a amplitude do pulso. Essas escolhas foram feitas com o seguinte critério:

- Entre a corrente de pico e de base, decidiu-se manter a corrente de base, pois abaixo desse valor o arco se extinguia. E variando a corrente de pico, podemos variar também a corrente média.



- A velocidade do arame foi fixada, uma vez que mantido a corrente de base não é possível uma alteração na velocidade alimentação.
- Em relação à transferência do metal, optou-se pela fixação da amplitude do pulso, variando o número de pulso. Decisão tomada a partir dos resultados dos testes, que apresentou uma influência mais clara do número de pulso.

A grande variação entre o comprimento do arco recomendado na pré-programação e o utilizado, se deve principalmente pelo tipo de junta adotada, que exige uma regularidade no depósito.

Para se conseguir essa regularidade, foi necessário adotar todas as medidas que foram tomadas quando se realizou a soldagem com MIG convencional, principalmente no que se refere à oscilação na saída do arame e comprimento do arco.

Quanto a corrente de pico, velocidade de soldagem, número de pulsos, as faixas encontradas são muito pequenas, e foram obtidos os limites máximos e mínimos em que se pode realizar a soldagem. E a influência entre um parâmetro e outro é pequena, em função da faixa de trabalho ser também pequena.

O posicionamento das chapas para soldagem foi realizado com uma trava ao longo das peças e parafusada em um suporte preso ao carro portátil, conforme Figura 3.7.

A tocha foi posicionada transversalmente em relação à junta, com uma angulação de 70 graus, fazendo com que o arame depositasse na aresta da chapa sobreposta e a chapa de base ao mesmo tempo, conforme Figura 3.8.

A princípio, a tocha foi inclinada a sete graus em relação à linha da solda, no sentido empurrado, e posteriormente foi alterado para cinco graus no sentido puxado e a distância da peça ao bocal foi de 8,0 mm, conforme Figura 3.9.

Utilizando como base à pré-programação do equipamento foram realizados os ajustes necessários visando o melhor resultado possível.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

O "stick-out" foi fixado em 11 mm, o "trim" que é um controle que existe no equipamento utilizado, que ajusta o comprimento do arco no pulso de soldagem e representa a voltagem no processo MIG convencional ficou fixado em 27, o que propiciou uma faixa de tensão de 19,2 a 20,9 V. A corrente de base foi fixada em 32 A, o tempo (largura) do pulso em 2,2 milisegundos

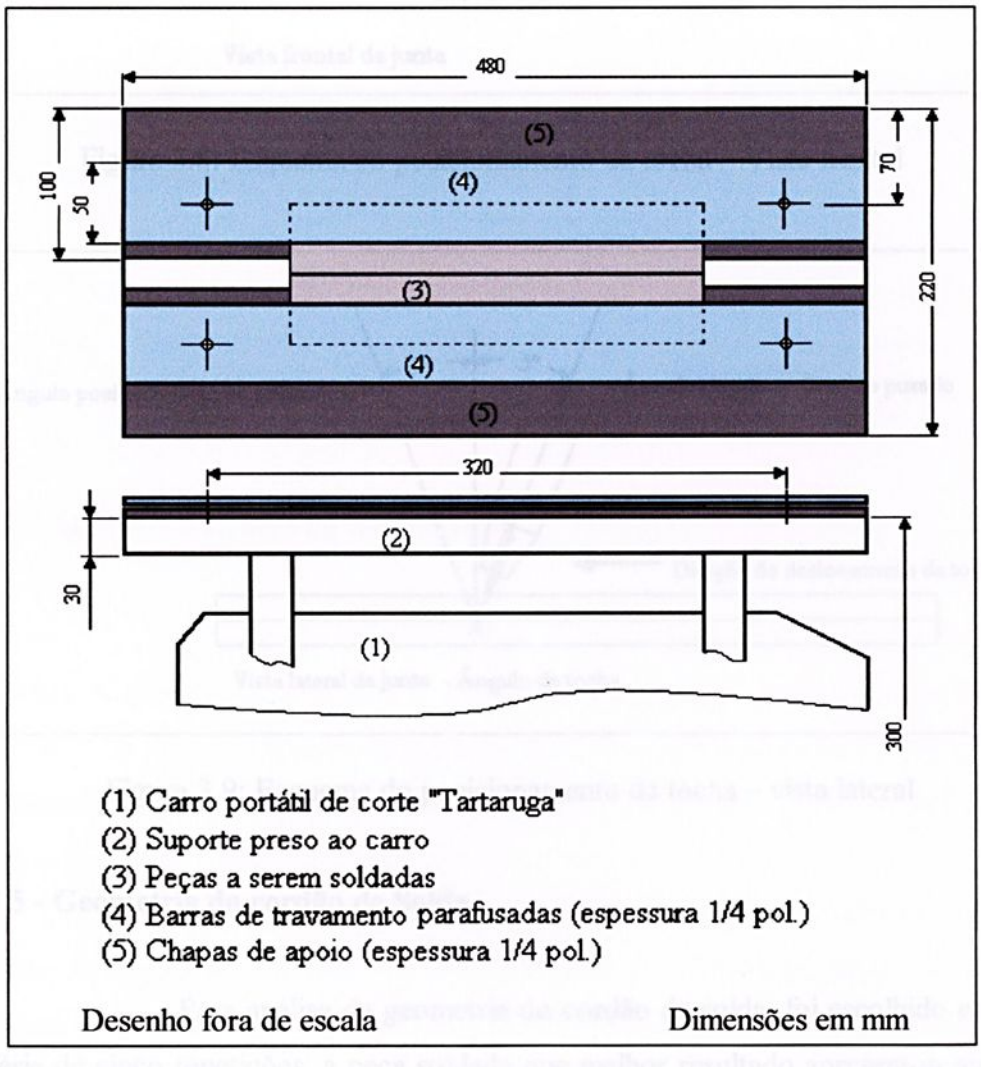


Figura 3.7: Esquema do suporte e da maneira em que as peças foram posicionadas para a soldagem.

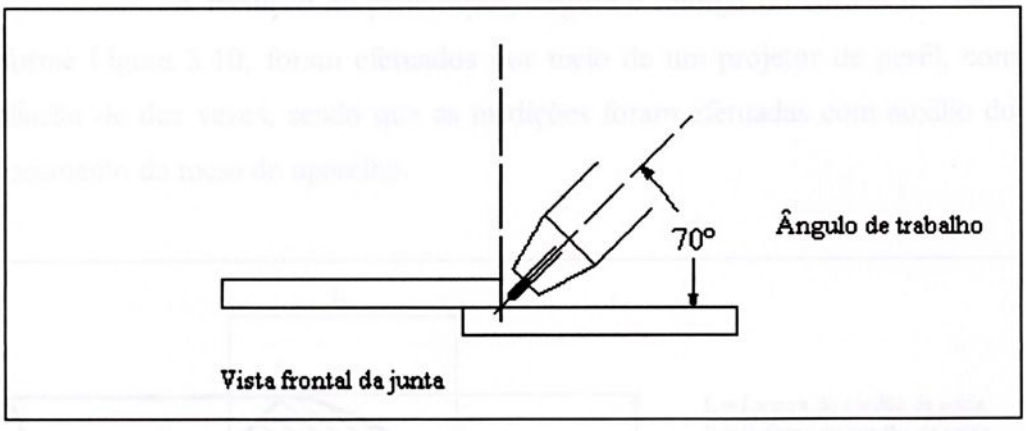


Figura 3.8: Esquema do posicionamento da tocha – Vista frontal

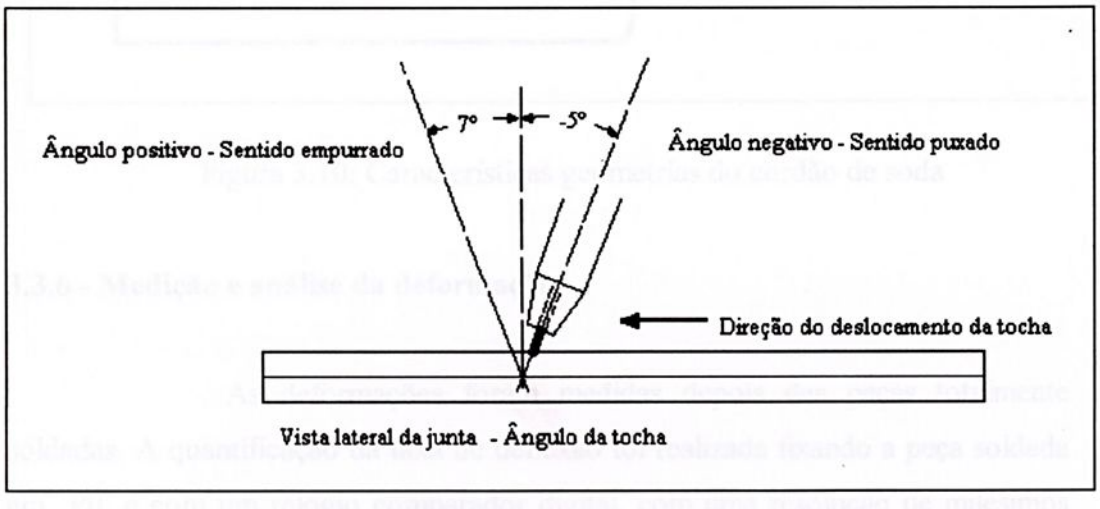


Figura 3.9: Esquema do posicionamento da tocha – vista lateral

3.3.5 - Geometria do cordão de Solda

Para análise da geometria do cordão de solda, foi escolhido entre a série de cinco repetições, a peça soldada que melhor resultado apresentou numa inspeção visual realizada previamente. Foram retiradas três amostras de cada peça selecionada, sendo os cortes efetuados a cada 50 mm a partir do início do cordão.

As amostras cortadas foram lixadas e polidas e para o ataque foi utilizado um reagente com (20 ml de HCl concentrado, 20 ml HNO_3 concentrado, 5 ml de HF a 48% e 20 ml de H_2O), com um tempo de ataque de 15 segundos.

A medição da penetração, largura e reforço do cordão de solda, conforme Figura 3.10, foram efetuados por meio de um projetor de perfil, com ampliação de dez vezes, sendo que as medições foram efetuadas com auxílio do deslocamento da mesa do aparelho.

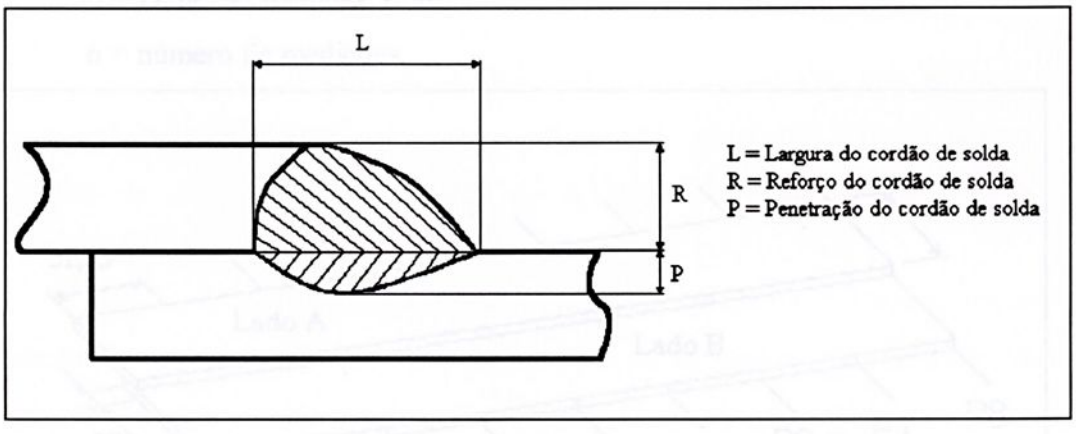


Figura 3.10: Características geometrias do cordão de soda

3.3.6 - Medição e análise da deformação

As deformações foram medidas depois das peças totalmente soldadas. A quantificação da taxa de deflexão foi realizada fixando a peça soldada em P0, e com um relógio comparador digital, com uma resolução de milésimos de milímetros, foram realizadas as medições em pontos eqüidistantes do lado A e do lado B, conforme Figura 3.11.

Na Figura 3.12, pode-se ver o dispositivo desenvolvido para realizar as medições, baseado na forma em que o pesquisador Guan, et. al[2] , realizou as medições em sua pesquisa. A equação [2], também foi utilizada por este pesquisador, para calcular os valores médios de deformação, medidos em cada ponto determinado. Foram efetuadas as medições em toda a série de cinco repetições realizadas para cada condição.

Os valores médios foram obtidos a partir da equação:

$$P = \left(\sum_{1}^{n} P_i \right) / n \qquad [2]$$

Sendo: P = Deflexão Média [mm]

Pi = Deflexão medidas [mm]

n = número de medições.

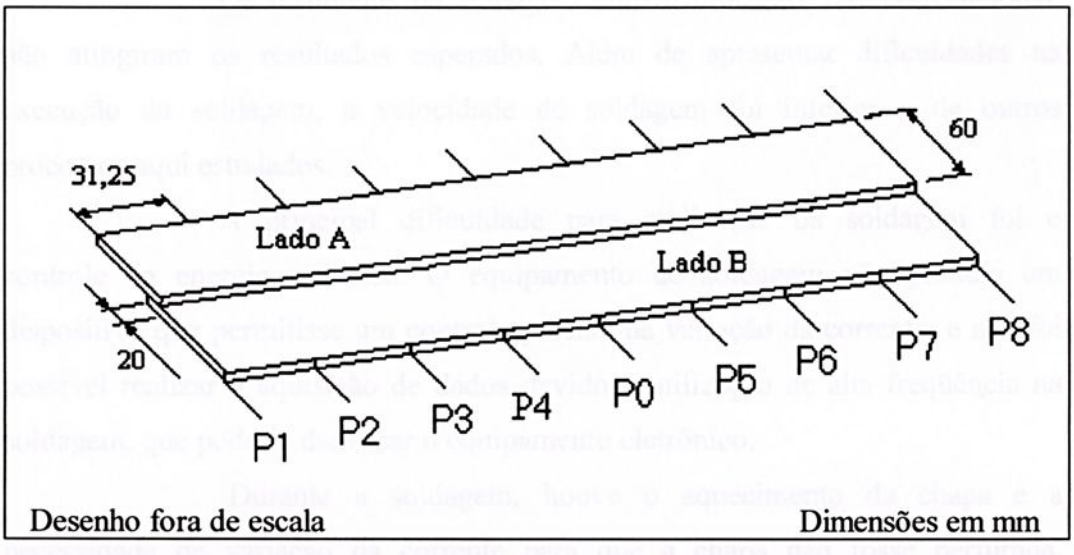


Figura 3.11: Esquema do posicionamento dos pontos onde foram realizadas as medições da deformação.

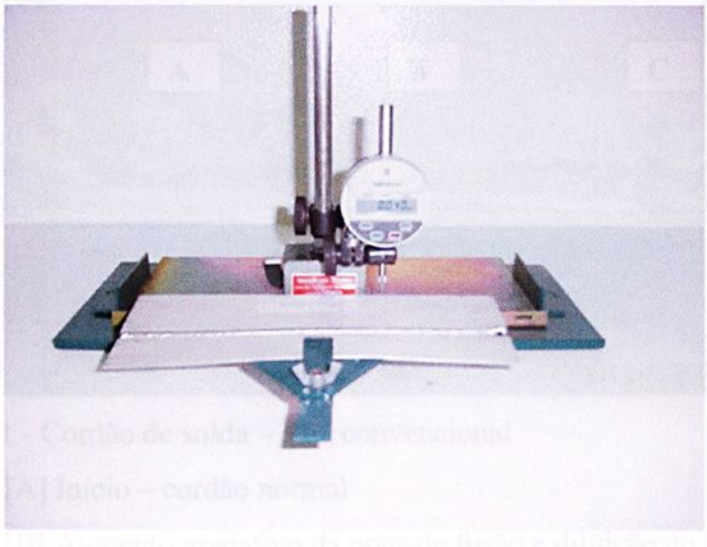


Figura 3.12: Dispositivo utilizado para a medição de deformação

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 - Processo TIG

Os resultados da soldagem com o processo TIG convencional, não atingiram os resultados esperados. Além de apresentar dificuldades na execução da soldagem, a velocidade de soldagem foi inferior a de outros processos aqui estudados.

A principal dificuldade para realização da soldagem foi o controle da energia utilizada. O equipamento de soldagem não possuía um dispositivo que permitisse um controle preciso na variação da corrente, e não foi possível realizar a aquisição de dados devido à utilização de alta freqüência na soldagem, que poderia danificar o equipamento eletrônico.

T.993

Durante a soldagem, houve o aquecimento da chapa e a necessidade de variação da corrente para que a chapa não fosse perfurada, conforme se pode observar na Figura 4.1.

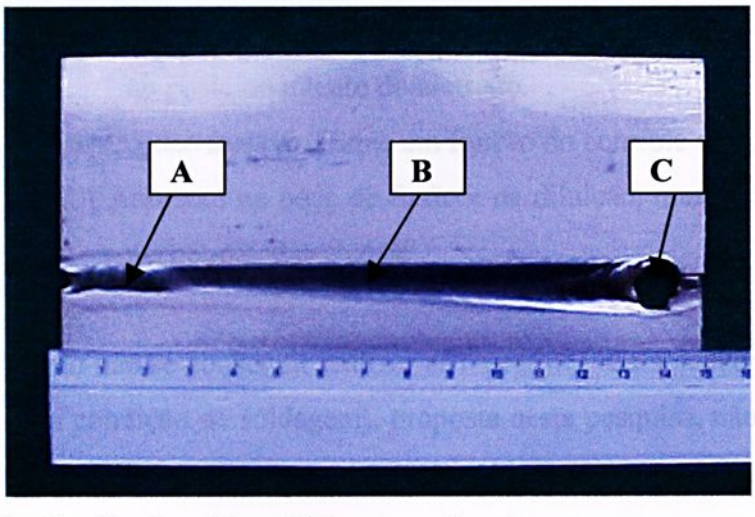


Figura 4.1 - Cordão de solda – TIG convencional

[A] Início – cordão normal

[B] Aumento gradativo da poça de fusão e diluição do material

[C] Perfuração das chapas

Outro problema encontrado foi manter constante o arco no local determinado, durante a soldagem. A menor variação no posicionamento das chapas a serem soldadas e no eletrodo, fez com que o arco adquirisse movimentos que o desviavam da direção determinada, dificultando a soldagem e alterando a geometria e a qualidade da solda, como se pode observar na Figura 4.2.

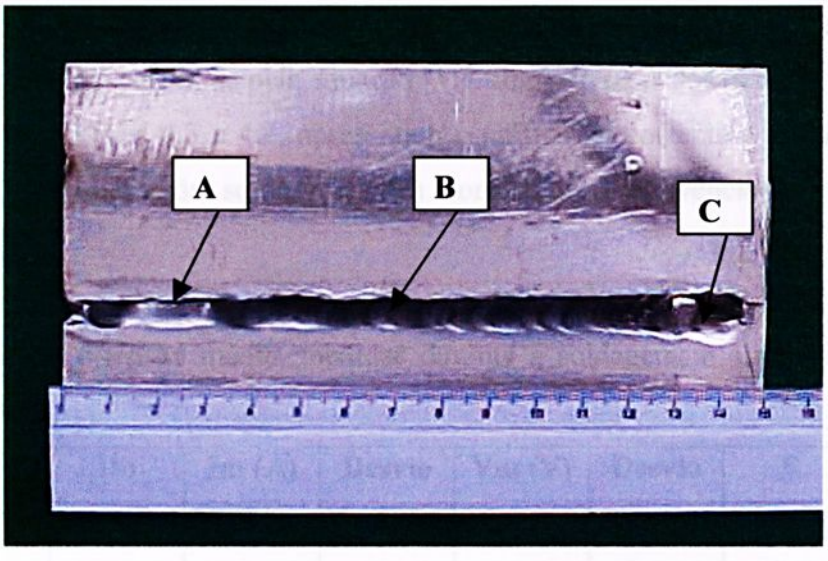


Figura 4.2 – Cordão de solda com controle manual de corrente.

[A] Falta de fusão da aresta da chapa sobreposta – variação no posicionamento do eletrodo.

[B] Cordão mais uniforme em função do controle de corrente.

[C] Aumento na poça de fusão e na diluição, mas não houve perfuração das chapas

Como não se conseguir realizar as repetições das soldagens (pelo menos três para cada condição de soldagem), proposta nesta pesquisa, não se deu prosseguimento nos trabalhos com esse processo de soldagem.

4.2 - Processo MIG convencional

Com o processo MIG convencional, a soldagem foi realizada com menor dificuldade em relação ao processo TIG.

A Tabela 4.1 apresenta a corrente média (Im), a tensão média (Vm), que foram medidos durante as soldagens variando a velocidade de alimentação do arame (Va) e a distância do bocal (Db), nas 6 condições estabelecidas, e a energia calculada pela equação [1] utilizando os dados obtidos.

As Figuras 4.3 e 4.4, apresentam o gráfico de corrente e tensão respectivamente, do trecho da solda realizada com a MIG convencional na condição 1 (MC-1).

Tabela 4.1: Corrente e tensão média, medidas durante a soldagem, e a energia calculada.

Solda	Va (m/min)	Db (mm)	Im (A) Média	Desvio Padrão (Im)	Vm (V) Média	Desvio Padrão (Vm)	E (J/mm) Média
MC-1	4,0	8,0	58,60	0,60	16,20	0,10	67,01
MC-2	4,0	12,0	59,65	0,35	16,05	0,15	67,58
MC-3	4,2	8,0	58,80	0,30	15,80	0,10	65,58
MC-4	4,2	12,0	58,95	0,25	16,00	0,20	65,75
MC-5	4,5	8,0	59,00	0,20	15,95	0,15	66,43
MC-6	4,0	8,0	59,45	0,65	16,10	0,10	67,56

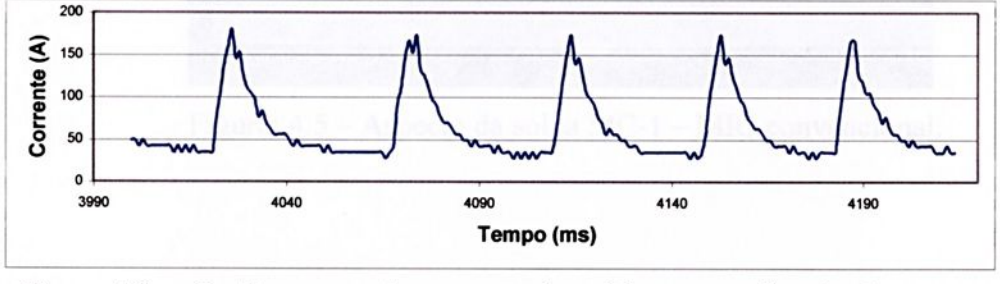


Figura 4.3 – Oscilogramas de corrente de soldagem em função do tempo em um trecho da solda MC-1.

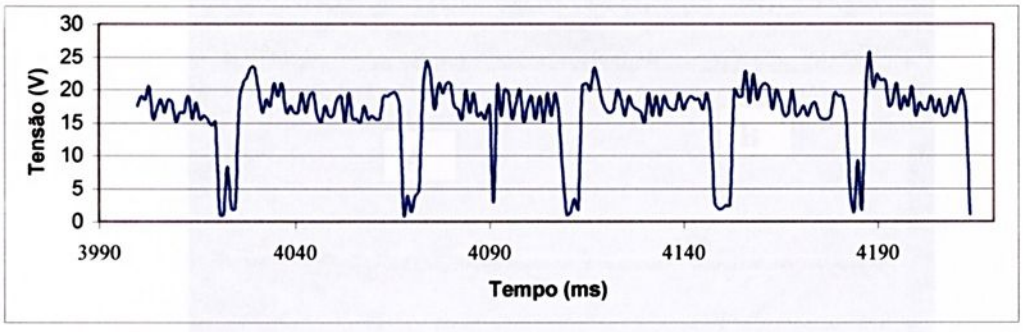


Figura 4.4 – Oscilogramas da tensão de soldagem em função do tempo em um trecho da solda MC-1.

De uma forma geral, o acabamento do cordão de solda se apresentou melhor na solda MC-1, apesar de não apresentar boa uniformidade no depósito, quase não houve respingos, conforme se pode observar na Figura 4.5.

Na solda MC-3, foi utilizado os mesmos parâmetros da solda MC-1, alterando somente à distância entre o bocal e a junta a ser soldada, e pode-se observar na figura 4.6, trechos com boa uniformidade de depósito e acabamento, e trechos com imperfeições, que ocorreu devido à desestabilização do arco.

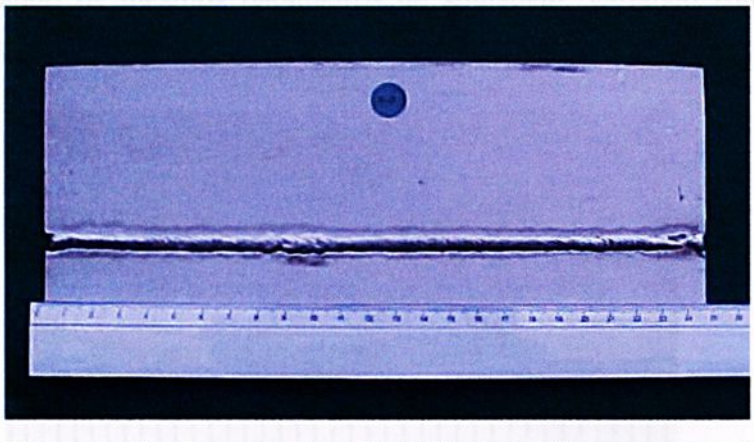


Figura: 4.5 – Aspecto da solda MC-1 – MIG convencional.

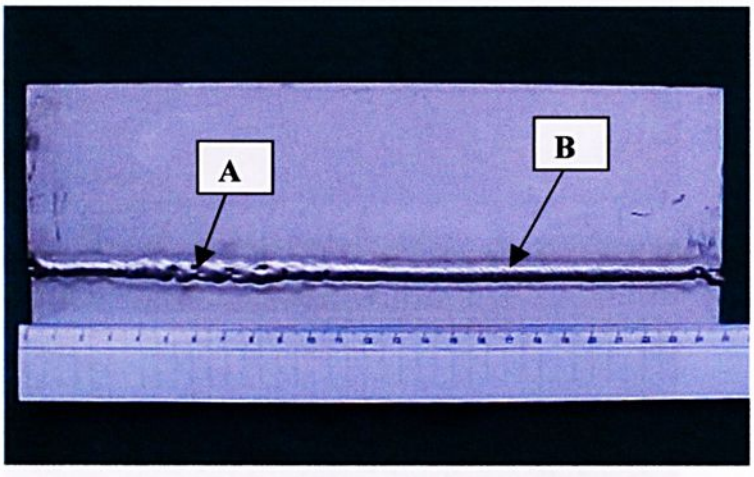


Figura: 4.6 – Aspecto da solda MC-3 – MIG convencional.
[A] Depósito irregular devido à desestabilização do arco.
[B] Depósito uniforme

Quanto ao acabamento superficial do cordão de solda, um depósito uniforme depende de um arco sem movimentos de oscilação, que se torna difícil de se manter à medida que se trabalha com uma maior distância do bocal da peça.

Pode-se notar na Figura 4.7 que não ocorreu um depósito uniforme na solda MC-1 como o da solda MC-3 da Figura 4.8, e ambas foram realizadas utilizando os mesmos parâmetros de soldagem, variando somente a velocidade de alimentação do arame de 4,0 para 4,2 m/min..

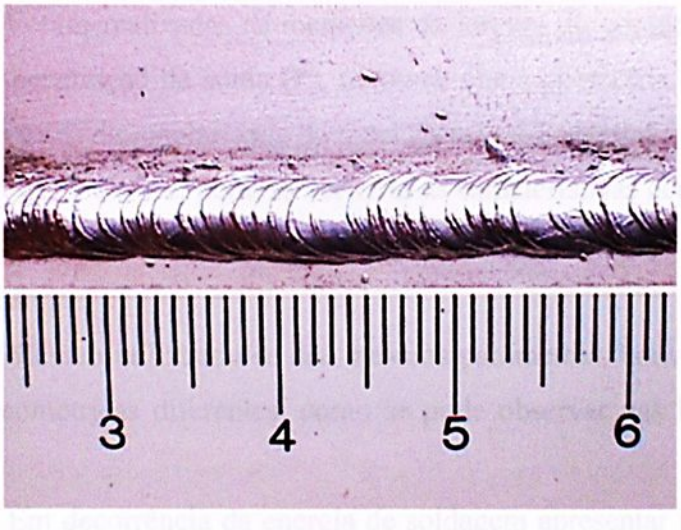


Figura: 4.7 – Aspecto do cordão de solda MC-1 com depósito não muito uniforme – MIG convencional

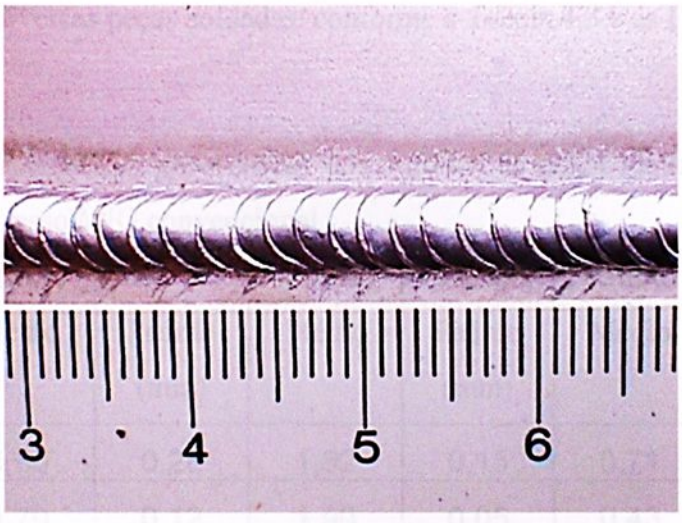


Figura: 4.8 – Aspecto do cordão de solda MC-3 com depósito uniforme – MIG convencional

Mesmo utilizando os mesmos parâmetros, nem sempre foi possível se obter uniformidade nos resultados, principalmente devido a oscilações do arco, em decorrência do mínimo desvio do eletrodo da posição estabelecida e da dificuldade de repetir um posicionamento de bocal perfeitamente igual ao outro.

Nota-se também, que as variações na velocidade do arame e de soldagem não apresentaram uma alteração significativa na execução da soldagem, devido à faixa de variação ser muito pequena.

Foram realizadas as medições da largura do cordão (L), reforço do cordão (R) e penetração da solda (P), notou-se que a geometria do cordão de solda também depende da regularidade da transferência do material depositado.

Na tabela 4.2, pode-se verificar as características geométricas das soldas que foram realizadas, variando a velocidade de alimentação do arame e a distância do bocal.

Mesmo utilizando-se dos mesmos parâmetros, houve soldas com características geométricas diferentes, como se pode observar nas Figuras 4.9 e 4.10.

Em decorrência da energia de soldagem apresentar uma variação não superior a 3%, verificou-se que a deformação teve um comportamento

semelhante nas diversas peças soldadas, conforme a Tabela 4.3 e as Figuras 4.11 e 4.12.

Tabela 4.2: Características geométricas dos cordões de solda realizados com o processo MIG convencional.

Solda	L (mm) Médio	Desv. Padrão (mm)	R (mm) Médio	Desv. Padrão (mm)	P (mm) Médio	Desv. Padrão (mm)
MC-1	4,38	0,28	1,82	0,15	0,71	0,02
MC-2	4,70	0,12	1,90	0,05	0,43	0,01
MC-3	4,59	0,15	1,86	0,13	0,60	0,07
MC-4	4,69	0,14	1,70	0,14	0,34	0,07
MC-5	4,86	0,25	1,84	0,05	0,35	0,02
MC-6	4,61	0,22	1,52	0,15	0,34	0,03

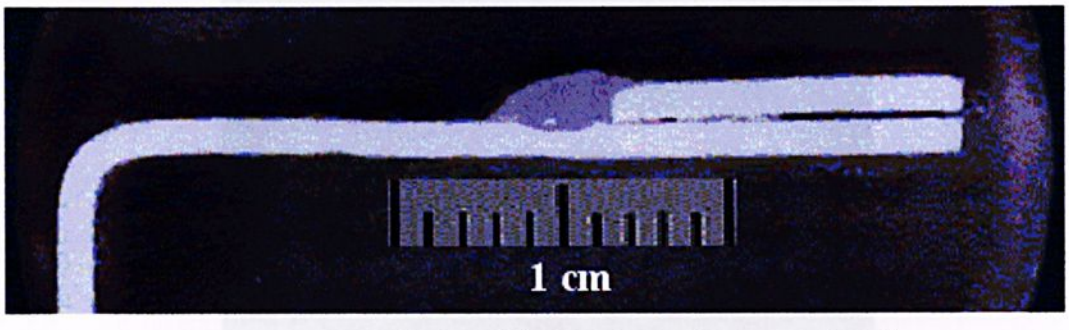


Figura 4.9 – Macrografia da solda MC-1 – MIG convencional

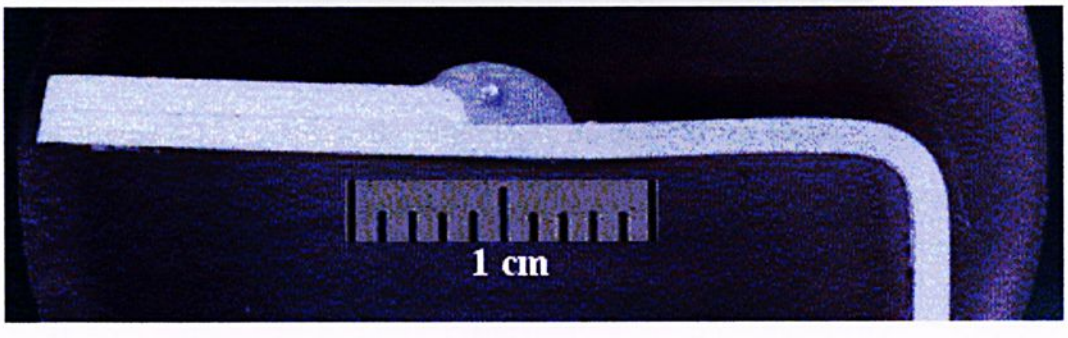


Figura 4.10 – Macrografia da solda MC-7 realizada com os mesmos parâmetros da solda MC-1 - MIG convencional

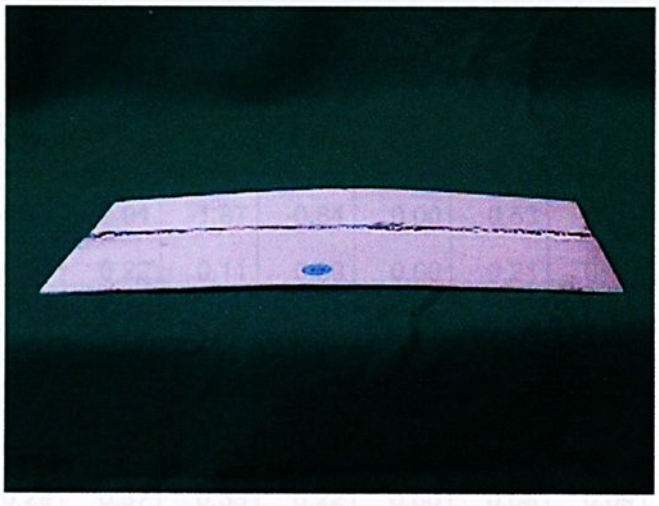


Figura: 4.11 – Aspecto da deformação do lado "A" da chapa – Solda MC-1.

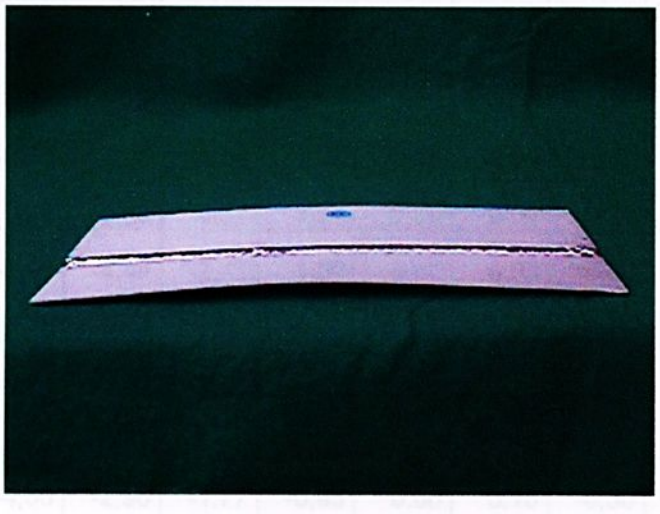


Figura 4.12 – Aspecto da deformação do lado "B" da chapa - Solda MC-1.

Tabela 4.3 – Variação da deformação ao longo do comprimento da chapas.

TABELA DE DEFORMAÇÕES									
Solda	Deformação ao longo do comprimento (mm)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
MC1-A	-4,14	-2,91	-1,87	-0,84	0,00	0,53	0,22	-0,30	-0,85
Desv. Padr.	0,54	0,22	0,11	0,09	0,00	0,21	0,20	0,17	0,14
MC1-B	-9,56	-6,78	-4,18	-1,42	0,00	-0,15	-1,35	-2,98	-4,26
Desv. Padr.	0,15	0,36	0,31	0,27	0,00	0,06	0,23	0,23	0,37
MC2-A	-6,50	-4,61	-2,60	-0,91	0,00	-0,13	-1,06	-2,16	-3,31
Desv. Padr.	0,29	0,37	0,33	0,22	0,00	0,08	0,09	0,31	0,35
MC2-B	-9,03	-6,22	-3,38	-1,21	0,00	-0,20	-2,05	-4,07	-5,60
Desv. Padr.	0,18	0,20	0,43	0,23	0,00	0,06	0,07	0,19	0,71
MC3-A	-5,45	-4,26	-2,74	-0,96	0,00	0,35	0,22	0,07	-0,28
Desv. Padr.	0,47	0,12	0,44	0,16	0,00	0,06	0,10	0,04	0,04
MC3-B	-9,67	-7,25	-4,54	-1,79	0,00	-0,11	-1,49	-3,08	-4,69
Desv. Padr.	0,35	0,40	0,22	0,07	0,00	0,06	0,21	0,60	0,56
MC4-A	-6,02	-4,44	-2,71	-1,08	0,00	0,08	-0,55	-1,53	-2,44
Desv. Padr.	0,15	0,38	0,53	0,34	0,00	0,03	0,12	0,36	0,31
MC4-B	-6,24	-4,42	-2,08	-0,25	0,00	-1,28	-3,13	-5,27	-6,52
Desv. Padr.	0,30	0,22	0,10	0,04	0,00	0,14	0,55	0,29	0,395
MC5-A	-4,30	-2,96	-1,77	-0,93	0,00	0,10	-0,30	-0,90	-1,62
Desv. Padr.	0,75	0,49	0,35	0,17	0,00	0,01	0,09	0,03	0,20
MC5-B	-6,89	-4,50	-2,05	-0,17	0,00	-1,30	-2,94	-4,66	-5,86
Desv. Padr.	0,14	0,02	0,16	0,06	0,00	0,09	0,49	0,53	0,64
MC6-A	-4,14	-2,64	0,36	-0,39	0,00	-0,08	-0,39	-0,79	-1,07
Desv. Padr.	0,31	0,24	0,20	0,06	0,00	0,04	0,08	0,07	0,08
MC6-B	-8,31	-6,12	-3,77	-1,31	0,00	-0,18	-1,58	-3,22	-5,08
Desv. Padr.	0,07	0,17	0,20	0,04	0,00	0,00	0,09	0,26	0,21



4.3 - Processo MIG Pulsado

A soldagem realizada com o processo MIG pulsado apresentou uma maior facilidade de operação e melhor aspecto e características do cordão em relação aos outros processos testados.

Os experimentos iniciais tomaram como base à pré-programação existente no equipamento, ajustando os parâmetros que efetivamente influenciariam na execução da soldagem de chapas finas. Após estes ensaios, foram determinadas as faixas de operação de cada parâmetro, conforme a Tabela 4.4.

Para cada faixa de operação, foram realizadas soldagens em três condições, o mínimo valor, o máximo, e o valor médio, conforme a Tabela 4.5.

Tabela 4.4 – Faixa de operação dos parâmetros que foram variados

PARÂMETRO	FAIXA DE OPERAÇÃO
Velocidade de soldagem (Vs)	900 – 1000 mm/min
Corrente de pico (Ip)	190 – 200 A
Corrente de base (Ib)	30 – 34 A
Número de pulso (Np)	85 a 95 pulsos/seg.
Distância do bocal (Db)	8 – 12 mm

A nomenclatura da solda apresentada na Tabela 4.5 é composta pelas iniciais do parâmetro variado, seguido por um número que indica a condição estabelecida.

Durante a soldagem, foi realizada a medição de corrente média e de pico e tensão média e de pico, e os resultados se pode ver na Tabela 4.6.

Na Figura 4.13, pode-se observar o oscilograma que aponta a quantidade de picos de corrente em um determinado tempo e o intervalo de tempo em que ocorrem cada pico. E na Figura 4.14, observar-se o comportamento da tensão no mesmo trecho.

unesp

Tabela 4.5 – Resultados da combinação das variações dos parâmetros utilizados.

Solda	Va m/min	Tp ms	Ip A	Ib A	Np p/seg	Vs mm/min	Db mm	Características do cordão e operação de soldagem
Vs-1	2,5	2,2	195	32	90	900	8	Bom acabamento, sem respingos; Arco estável.
Vs-2	2,5	2,2	195	32	90	950	8	Semelhante a solda Vs-1; O cordão ficou mais baixo que a solda VS-1.
Vs-3	2,5	2,2	195	32	90	1000	8	Semelhante a solda Vs-1; Cordão mais estreito que o Vs-2; Maior sensibilidade às oscilações do arco.
Ip-1	2,5	2,2	190	32	90	950	8	Semelhante a solda Vs-1; Apresentou respingos.
Ip-2	2,5	2,2	200	32	90	950	8	Semelhante a solda Vs-1; Cordão mais largo que Ip-1.
Ib-1	2,5	2,2	195	30	90	950	8	Depósito de material levemente irregular; Leve instabilidade do arco.
Ib-2	2,5	2,2	195	34	90	950	8	Semelhante a solda Vs-1; Cordão com respingos
Np-1	2,5	2,2	195	32	85	950	8	Leve instabilidade do arco em decorrência do preparo da junta.
Np-2	2,5	2,2	195	32	95	950	8	Depósito de material levemente irregular; Leve instabilidade do arco.
Db-1	2,5	2,2	195	32	95	950	10	Leve Instabilidade do arco; Pequenas variações na direção da solda.
Db-2	2,5	2,2	195	32	95	950	12	Leve Instabilidade do arco; Pequenas variações na direção da solda.



Tabela 4.6 – Resultados medidos durante a soldagem.

Solda	Im (A)	Desvio Padrão (Im)	Ip (A)	Desvio Padrão (Ip)	Vm (V)	Desvio Padrão (Vm)	Vp (V)	Desvio Padrão (Vp)	E (J/mm)
Vs-1	53,50	0,50	235,90	0,40	18,46	1,25	30,75	3,05	70,9
Vs-2	50,50	0,50	238,30	3,03	19,34	0,07	33,86	0,16	60,6
Vs-3	50,00	0,00	230,95	7,75	19,46	0,04	33,15	0,85	58,2
Ip-1	51,00	0,00	229,40	2,00	19,54	0,06	33,50	0,20	60,6
Ip-2	50,50	0,50	238,30	3,03	19,34	0,07	33,86	0,16	60,6
Ip-3	51,00	0,00	252,95	2,15	19,92	0,06	36,50	0,40	63,7
Ib-1	55,50	2,50	239,45	3,05	20,87	0,00	36,50	0,65	60,6
Ib-2	50,50	0,50	238,30	3,03	19,34	0,07	33,86	0,16	60,6
Ib-3	49,00	3,00	234,85	0,45	18,71	1,48	32,15	2,85	69,6
Np-1	55,50	3,50	244,35	14,75	19,03	0,83	32,45	0,35	59,7
Np-2	50,50	0,50	238,30	3,03	19,34	0,07	33,86	0,16	60,6
Np-3	53,50	1,50	233,00	2,00	20,26	0,02	35,10	0,30	66,3
Db-1	50,50	0,50	238,30	3,03	19,34	0,07	33,86	0,16	60,6
Db-2	53,50	0,50	241,10	6,60	20,63	0,35	34,85	0,15	71,2
Db-3	53,50	1,50	244,20	2,80	18,37	1,64	33,20	4,30	69,6

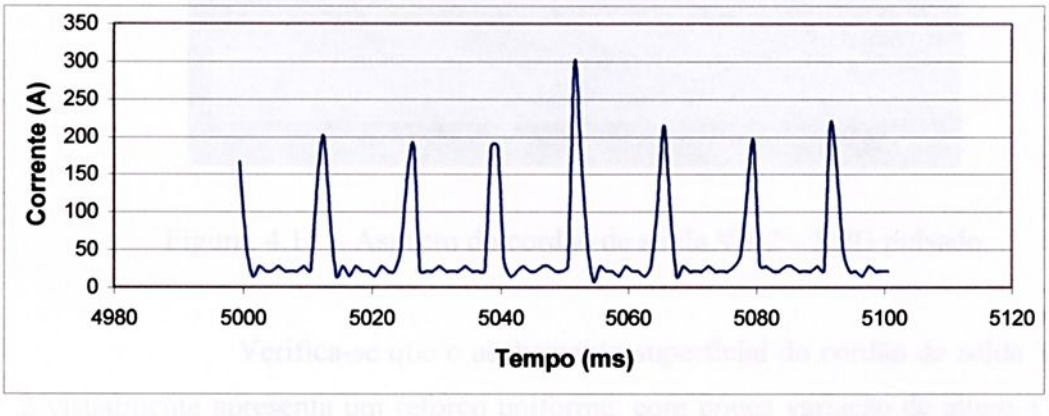


Figura 4.13 – Oscilogramas de corrente da solda Vs-2 – MIG pulsado.

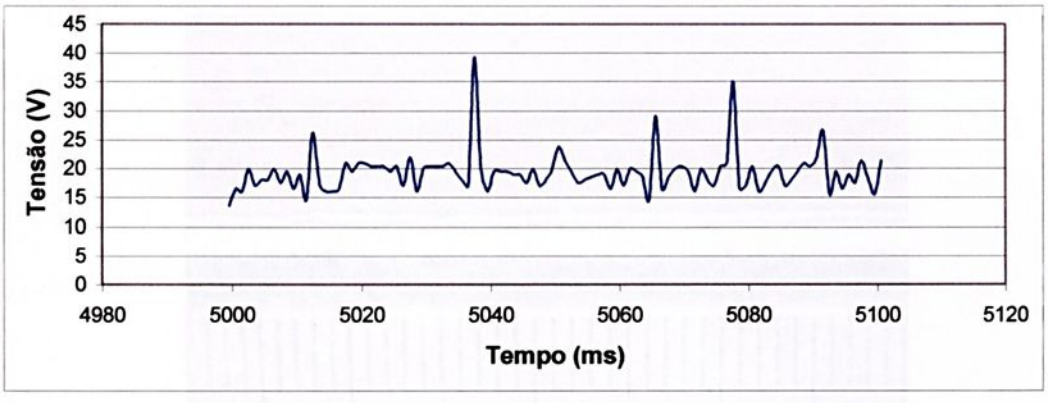


Figura 4.14 – Oscilogramas da tensão da solda Vs-2 – MIG pulsado.

Dentro das faixas em que foram variados os parâmetros, os que apresentaram maior sensibilidade a essa variação, foram a corrente de base, o número de pulso e a altura do bocal.

O cordão de solda Vs-2 apresentou bom acabamento, aparentemente isento de respingos, como se pode ver nas Figuras 4.15 e 4.16.

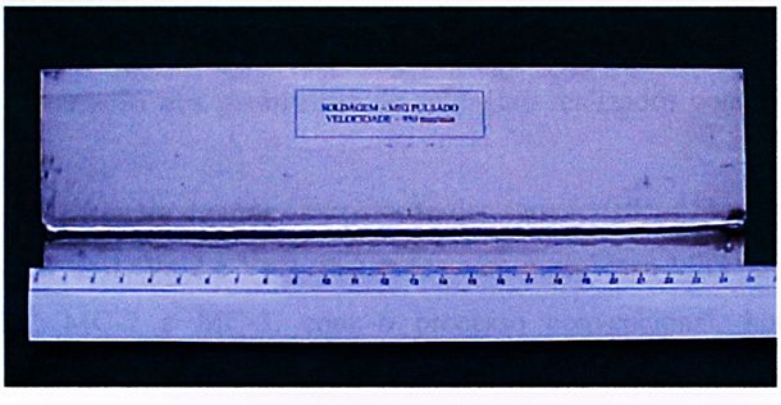


Figura: 4.15 – Aspecto do cordão de solda VS-2 – MIG pulsado

Verifica-se que o acabamento superficial do cordão de solda Vs-2 visualmente apresenta um reforço uniforme, com pouca variação de altura e de largura do cordão de solda e sendo quase imperceptíveis os desenhos das escamas no cordão.

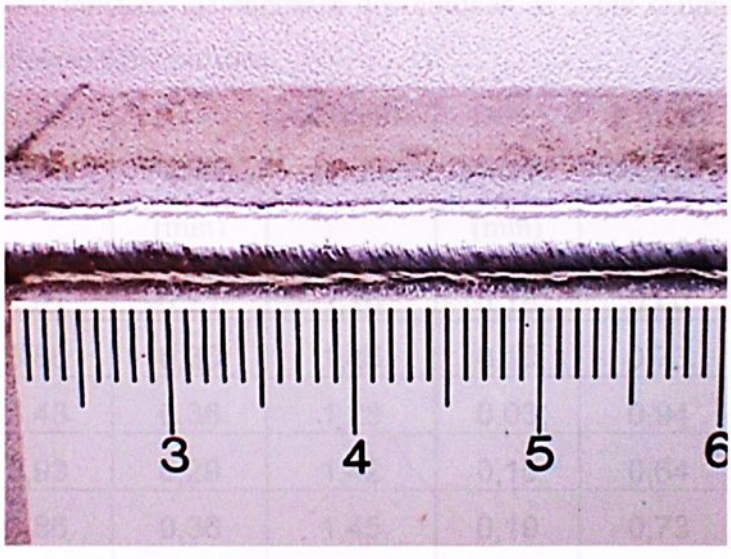


Figura: 4.16 – Detalhe do aspecto do cordão de solda Vs-2 – MIG pulsado

A variação dos parâmetros não provocou uma alteração significativa da geometria do cordão de solda, devido à faixa de variação dos mesmos ser muito pequena, mas o posicionamento do bocal em relação à junta teve grande influência.

Na Tabela 4.7 pode-se verificar as alterações na geometria do cordão, com a variação dos parâmetros de soldagem realizados com o processo MIG pulsado.

Por meio de uma comparação das características geométricas dos cordões de solda Vs-1, Vs-2 e Vs-3, realizados com o processo MIG pulsado e os cordões MC-1, MC-2 e MC-3, com o processo convencional, houve uma penetração média de 33% maior. Os cordões das soldas realizadas com a MIG convencional, apresentaram a média da largura superior em 17,50% e a média do reforço em 27%, conforme pode-se observar na Tabela 4.8.

Tabela 4.7 - Características geométricas dos cordões de solda realizados com o processo MIG pulsado.

Solda	L (mm) Médio	Desv. Padrão (mm)	R (mm) Médio	Desv. Padrão (mm)	P (mm) Médio	Desv. Padrão (mm)
Vs-1	4,07	0,21	1,26	0,18	0,80	0,09
Vs-2	3,86	0,36	1,45	0,19	0,73	0,12
Vs-3	3,48	0,36	1,28	0,03	0,94	0,12
Ip-1	3,93	0,29	1,42	0,15	0,64	0,09
Ip-2	3,86	0,36	1,45	0,19	0,73	0,12
Ip-3	3,99	0,19	1,73	0,10	0,47	0,05
Ib-1	3,60	0,15	1,35	0,09	0,41	0,14
Ib-2	3,86	0,36	1,45	0,19	0,73	0,12
Ib-3	3,75	0,49	1,38	0,19	0,43	0,17
Np-1	3,48	0,10	1,29	0,10	0,80	0,30
Np-2	3,86	0,36	1,45	0,19	0,73	0,12
Np-3	3,70	0,10	1,58	0,16	0,36	0,08
Db-1	3,86	0,36	1,45	0,19	0,73	0,12
Db-2	3,58	0,46	1,64	0,26	0,72	0,20
Db-3	3,76	0,05	1,64	0,25	0,83	0,36

Tabela 4.8 – Tabela comparativa das características geométricas das soldas realizado com os processos MIG convencional e pulsado.

Solda	**Processo**	**Im (A)**	**Vm (V)**	**L (mm)**	**R (mm)**	**P (mm)**
MC-1	Convencional	58,0	16,3	4.38	1,82	0,71
Vs-1	Pulsado	54,0	19,7	4,07	1,26	0,80
MC-3	Convencional	58,5	15,9	4,59	1,86	0,60
Vs-2	Pulsado	50,0	19,2	3,86	1,45	0,73
MC-5	Convencional	59,2	16,1	4,86	1,84	0,35
Vs-3	Pulsado	50,0	19,4	3,48	1,28	0,94

unesp

Nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 pode-se verificar o perfil dos cordões realizados com as variações de velocidades.

O posicionamento da tocha apresentou uma influência significativa na aparência e na geometria do cordão. Se a tocha for posicionada, de forma que o arame seja direcionado na parte superior da espessura da chapa que é posicionada sobre a outra, o cordão tende a ficar mais estreito, com um reforço mais alto e com menor penetração.

Direcionando o arame no vértice do ângulo formado entre a espessura da chapa que sobrepõe e a superfície da chapa sobreposta, o cordão tende a ficar mais largo, o reforço mais baixo e a penetração maior.

A geometria e a aparência não se alteram significativamente, se a solda for realizada com a tocha inclinada na direção de avanço de soldagem (empurrando) ou na direção contrária (puxando). Entretanto, observou-se que o cordão realizado puxando apresenta melhor direcionamento devido a menor influência da oscilação do arco durante a soldagem, em relação à solda realizada empurrando o cordão e quando a tocha estiver a 90 graus.

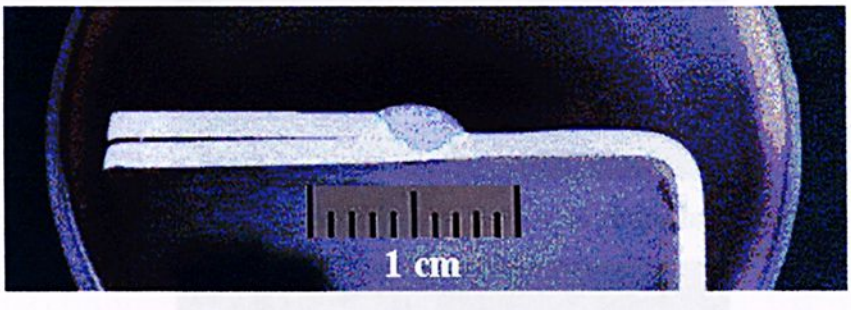


Figura: 4.17 – Macrografia da solda Vs-1 – MIG pulsado

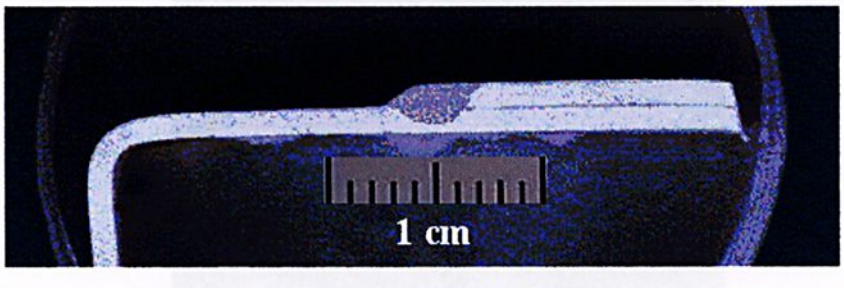


Figura: 4.18 – Macrografia da solda Vs-2 – MIG pulsado

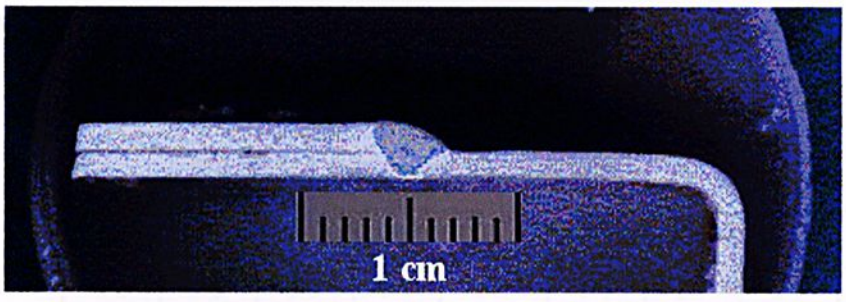


Figura 4.19 – Macrografia da solda VS-3 – MIG pulsado

As variações nos parâmetros de soldagem, também não alteraram o comportamento da deformação, como se pode notar na Tabela 4.9.

A deformação foi semelhante às peças soldadas com a MIG convencional, não havendo alteração significativa no comportamento entre os dois processos, conforme Figuras 4.20 e 4.21.



Figura: 4.20 – Aspecto da deformação do lado A da chapa base da solda Vs-2.



Figura: 4.21 – Aspecto da deformação do lado B da chapa da solda Vs-2.

Tabela 4.9 – Variação da deformação ao longo do comprimento da chapa, conforme os parâmetros de soldagem utilizados.

TABELA DE DEFORMAÇÕES									
Solda	Deformação ao longo do comprimento (mm)								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Vs-90-A	-7,72	-5,58	-3,45	-1,53	0,00	0,72	0,77	0,11	-0,54
Desv. Padr.	0,38	0,32	0,18	0,14	0,00	0,15	0,40	0,29	0,22
Vs-90-B	-9,83	-7,10	-4,24	-1,61	0,00	0,09	-0,94	-2,17	-3,36
Desv. Padr.	0,04	0,02	0,11	0,06	0,00	0,09	0,15	0,19	0,41
Vs-95-A	-7,15	-5,23	-3,32	-1,47	0,00	0,68	0,43	-0,32	-1,05
Desv. Padr.	0,74	0,68	0,53	0,32	0,00	0,21	0,26	0,22	0,17
Vs-95-B	-9,69	-7,08	-4,19	-1,61	0,00	-0,19	-0,91	-2,31	-3,66
Desv. Padr.	0,67	0,41	0,31	0,22	0,00	0,11	0,33	0,41	0,47
Vs-100-A	-7,10	-5,11	-3,00	-1,30	0,00	0,47	0,19	-0,42	-1,12
Desv. Padr.	0,09	0,03	0,11	0,07	0,00	0,03	0,04	0,00	0,07
Vs-100-B	-9,20	-6,66	-3,91	-1,43	0,00	-0,07	-1,72	-3,06	-4,55
Desv. Padr.	0,16	0,13	0,02	0,01	0,00	0,08	0,01	0,42	0,44
Ip-200-A	-6,60	-4,92	-3,14	-1,39	0,00	0,71	0,61	0,12	-0,38
Desv. Padr.	0,34	0,04	0,10	0,14	0,00	0,20	0,46	0,61	0,66
Ip-200-B	-10,01	-7,11	-4,27	-1,63	0,00	0,13	-0,95	-2,24	-3,65
Desv. Padr.	1,44	0,86	0,60	0,23	0,00	0,08	0,06	0,08	0,09
Ip-195-A	-7,02	-5,07	-3,55	-1,31	0,00	0,50	0,12	-0,58	-1,21
Desv. Padr.	1,00	0,69	0,89	0,20	0,00	0,19	0,32	0,41	0,41
Ip-195-B	-9,23	-6,69	-3,93	-1,39	0,00	0,35	-1,39	-2,96	-4,21
Desv. Padr.	0,12	0,22	0,14	0,19	0,00	0,13	0,61	0,63	0,66
Np-95-A	-7,45	-5,30	-3,34	-1,43	0,00	0,65	0,51	-0,03	-0,57
Desv. Padr.	1,19	0,75	0,28	0,08	0,00	0,31	0,74	1,12	1,42
Np-95-B	-9,14	-6,51	-3,82	-1,46	0,00	0,23	-0,70	-1,90	-3,32
Desv. Padr.	0,85	0,61	0,24	0,02	0,00	0,21	0,61	0,94	1,38
Np-85-A	-6,86	-5,09	-3,19	-1,43	0,00	0,74	0,68	0,16	-0,36
Desv. Padr.	1,52	1,11	0,88	0,16	0,00	0,09	0,95	1,10	1,78
Np-85-B	-9,61	-7,00	-4,14	-1,59	0,00	0,03	-1,11	-2,63	-4,02
Desv. Padr.	1,38	0,96	0,47	0,08	0,00	0,36	0,90	1,40	1,83
Ib-34-A	-6,93	-5,06	-3,17	-1,38	0,00	0,47	0,21	-0,17	-0,68
Desv. Padr.	1,12	1,21	0,85	0,18	0,00	0,13	0,62	0,98	0,14
Ib-34-B	-9,41	-7,21	-4,45	-1,59	0,00	0,17	-0,89	-2,25	-3,55
Desv. Padr.	1,24	1,08	0,64	0,10	0,00	0,15	0,55	1,04	1,44
Ib-36-A	-6,08	-4,38	-2,61	-1,05	0,00	0,38	-0,02	-0,69	-1,39
Desv. Padr.	1,20	0,85	0,51	0,26	0,00	0,25	0,54	0,78	1,04
Ib-36-B	-9,64	-7,00	-4,04	-1,39	0,00	-0,18	-1,43	-2,91	-4,21
Desv. Padr.	0,17	0,20	0,19	0,16	0,00	0,38	0,68	0,81	0,41
Db-10-A	-6,02	-4,40	-2,73	-1,18	0,00	0,52	0,24	-0,39	-1,09
Desv. Padr.	0,80	0,61	0,41	0,21	0,00	0,06	0,10	0,01	0,26
Db-10-B	-7,83	-6,67	-3,85	-1,38	0,00	-0,21	-1,48	-2,97	-4,46
Desv. Padr.	2,29	0,52	0,35	0,12	0,00	0,17	0,25	0,23	0,20
Db-12-A	-7,18	-5,09	-2,98	-1,28	0,00	0,44	0,20	-0,37	-1,05
Desv. Padr.	0,78	0,52	0,43	0,12	0,00	0,17	0,41	0,77	0,89
Db-12-B	-9,14	-6,62	-3,86	-1,45	0,00	0,3	-0,45	-1,65	-2,97
Desv. Padr.	0,98	0,77	0,44	0,09	0,00	0,07	0,33	0,64	0,96



CAPÍTULO V

DISCUSSÃO

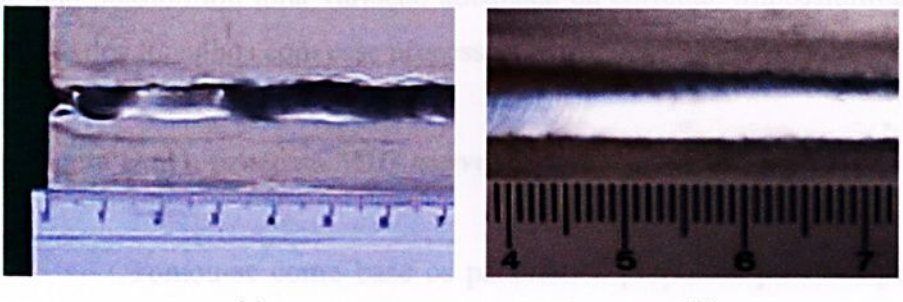
5.1 - Soldagem com o processo TIG

Uma das dificuldades encontradas para a execução da soldagem com o processo TIG, nas condições estabelecidas neste trabalho, foi à junta sobreposta adotada para este estudo.

A execução da soldagem utilizando este tipo de junta, só foi possível a partir do momento em que se conseguiu um arco bem direcionado, sem grandes desvios e que propiciasse uma largura de cordão que abrangesse a junta de forma uniforme.

Essa combinação de um arco bem direcionado propiciando uma largura de cordão uniforme, implicou em um posicionamento preciso de tocha, para que o arco ficasse curto e se mantivesse constante, e para isso a distância do eletrodo em relação à peça não pode ser superior a 1,8 mm.

Na Figura 5.1 (a), pode-se observar que o posicionamento inadequado da tocha ou um arco com desvios, pode provocar a fusão de apenas umas das chapas, na Figura 5.1 (b), mantidas as condições adequadas nota-se a fusão uniforme das duas chapas.



(a) (b)

Figura 5.1 – Fotos de detalhe de cordão de solda realizados com o processo TIG.

Outro fator que se mostrou ser de significância foi o controle da energia de soldagem introduzida na junta soldada.

A utilização de uma corrente de 60 A foi para que a energia de soldagem obtida, produzisse uma região fundida que abrangesse as duas chapas ao mesmo tempo. Para início da soldagem essa corrente foi adequada, mas à medida que a solda avançou, a região fundida aumentou gradativamente, por haver uma concentração de calor na junta, em decorrência da chapa ser fina.

Na Figura 5.2 pode se observar que nos primeiros 25 mm o cordão de solda se apresenta uniforme, e gradativamente há um aumento na largura de região fundida até a perfuração da chapa.

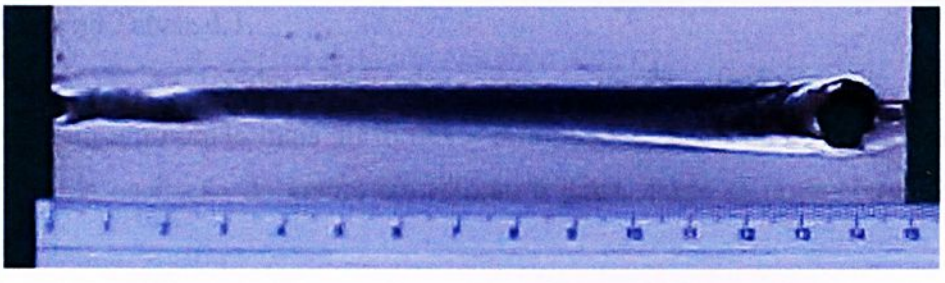


Figura 5.2 – Foto do cordão de solda realizado com TIG convencional

Segundo Sammons[41], esse problema pode ser contornado se houver a variação de energia fornecida a junta soldada, variando a corrente durante a soldagem e um controle no aquecimento da peça.

O sistema de controle de corrente (pedal) do equipamento utilizado não possibilitou uma variação adequada da corrente, impossibilitando a continuidade dos trabalhos com esse processo.

5.2 - Soldagem com o processo MIG convencional

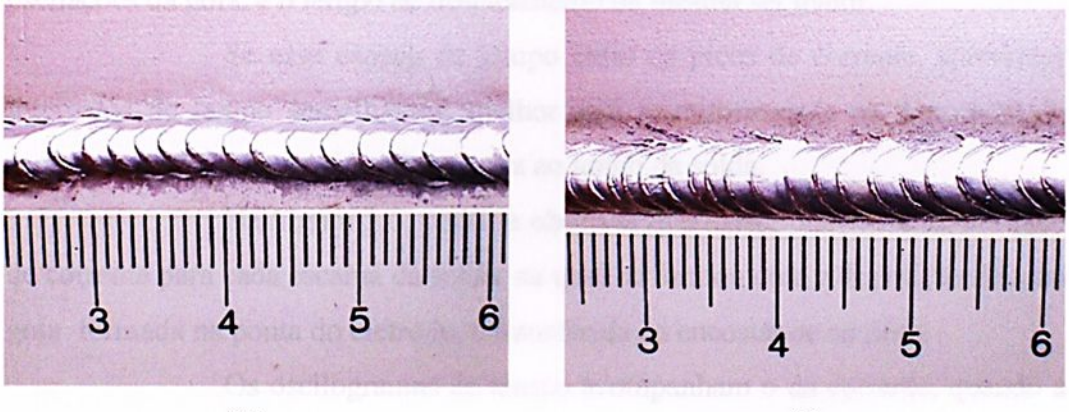
Tomou-se como base os parâmetros propostos para a espessura de 1,6 mm, pela American Welding Society [7] e depois ajustados para 1,2 mm, em face de dificuldade de se encontrar informações a respeito de soldagem de alumínio dessa espessura, com o processo MIG convencional. .

A utilização de um arame com diâmetro superior ao que comumente é utilizado para a espessura de chapa de 1,2 mm, e uma corrente baixa restringiu a velocidade de soldagem para no máximo 850 mm/min.

Observou-se que durante a soldagem o arame não permaneceu na posição definida no ajuste das chapas com relação ao eletrodo, de tal forma que o mesmo não tinha uma posição fixa, devido à sua curvatura, provocando depósitos irregulares de material. A curvatura encontrada no arame, é em decorrência da forma com que ela é fornecida, em carretéis, e do sistema de alimentação do arame não ser muito adequado para endireitar completamente o mesmo. Para minimizar esses problemas, diminuiu-se à distância do bocal da peça. Esse procedimento não alterou significativamente a corrente e a tensão, conforme se pode notar na Tabela 4.1.

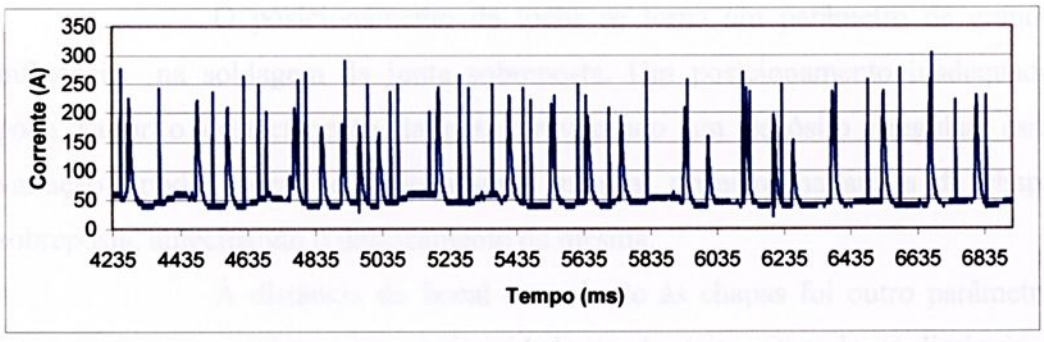
As soldas realizadas com menor distância do bocal, apresentaram um cordão mais uniforme, e isso pode ter ocorrido devido a menor influência da oscilação do arame em relação à junta, como se pode observar na Figura 5.3

Observa-se no oscilograma da Figura 5.4, que existe um número maior de picos de corrente na solda MC-7, que pode ter sido ocasionado pelo movimento pendular da gota provocando a aproximação e o afastamento da mesma em relação à junta, antes do destacamento.

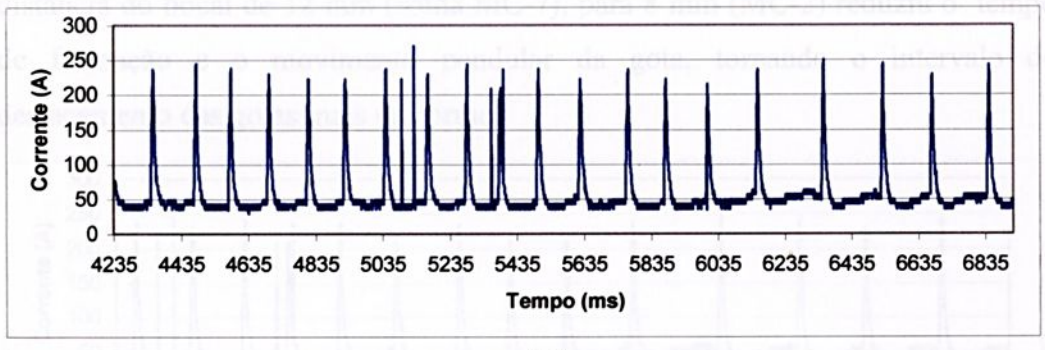


(a) (b)

Figura 5.3– Detalhe do aspecto dos cordões das soldas (a) MC-7 e (b) MC-2 respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.4 – Oscilogramas de corrente dos trechos de solda (a) MC-7 e (b) MC-2 respectivamente.

Na Figura 5.5, pode-se notar que o oscilograma da solda MC-8 apresenta menos picos de corrente em um mesmo espaço de tempo e intervalos de picos maiores em relação à solda MC-2. Esse fato indica que pode ter havido oscilações da gota, e o tempo de destacamento da mesma ser maior.

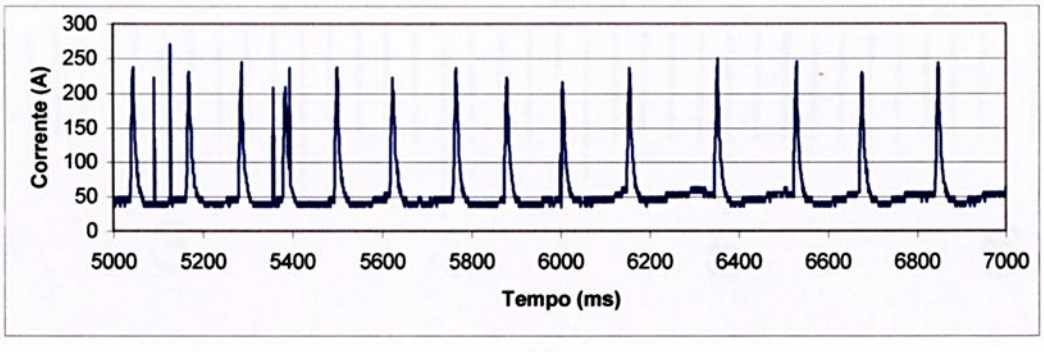
Se esse espaço de tempo entre os picos de corrente, apresentar intervalos de tempo semelhantes, melhor será a uniformidade na deposição de cada gota e na formação de cada escama ao longo da solda.

Na Figura 5.6, pode-se observar que existe praticamente um pico de corrente para cada escama da solda, na qual se formou com a deposição de uma gota formada na ponta do eletrodo, e transferida ao encostar-se na peça.

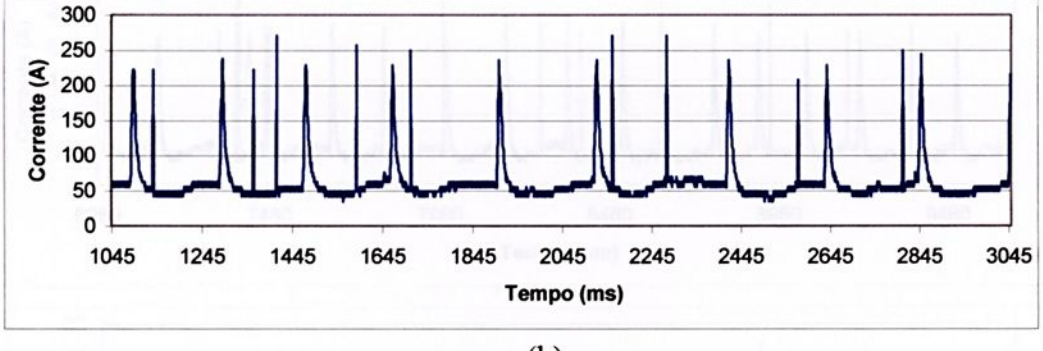
Os oscilogramas de tensão acompanham o da corrente, quando a gota se encosta à peça ocorre o curto circuito e a tensão cai, e se aproxima de zero, pelo motivo da diferença de potencial entre o eletrodo e a peça, também, se aproximar de zero.

O posicionamento da tocha se torna um parâmetro de grande influência na soldagem da junta sobreposta. Um posicionamento inadequado pode variar o destacamento da gota provocando um depósito irregular, essa variação pode ocorrer quando a gota encostar primeiro na aresta da chapa sobreposta, antecipando o destacamento da mesma.

À distância do bocal em relação às chapas foi outro parâmetro importante para se obter uma uniformidade no depósito. Quando se diminuiu à distância do bocal de 12 mm (solda MC-7), para 8 mm (MC-2) reduziu o tempo de formação e o movimento pendular da gota, tornando o intervalo de destacamento das gotas mais uniforme.



(a)



(b)

Figura 5.5 – Variação da freqüência dos picos de corrente entre as soldas (a) MC-2 e (b) MC-8.

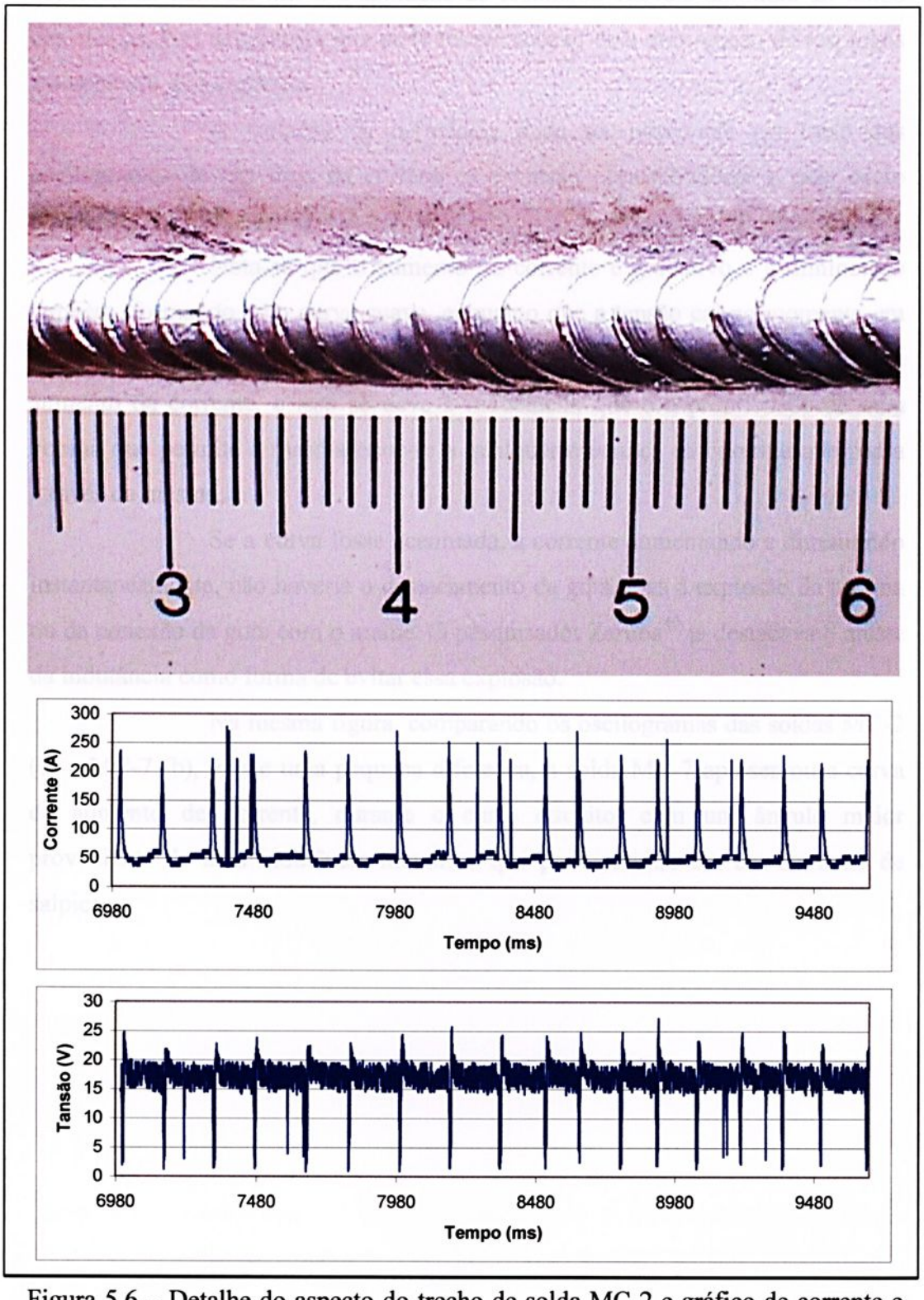


Figura 5.6 – Detalhe do aspecto do trecho de solda MC-2 e gráfico de corrente e tensão do respectivo trecho.

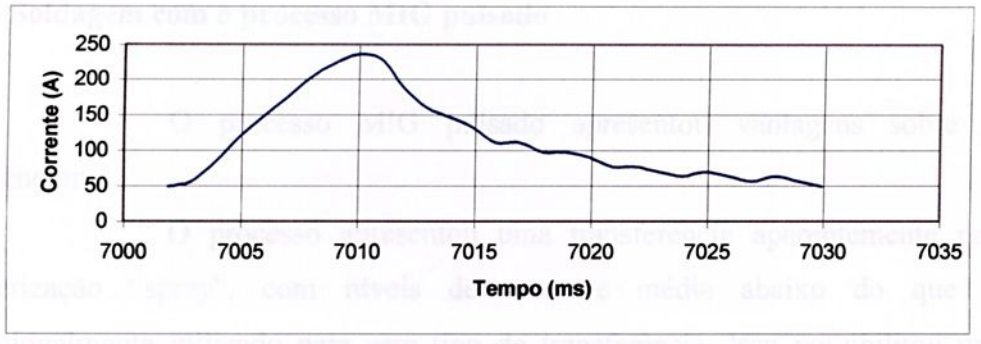
Com a diminuição da distância do bocal de 12 para 8 mm, observou-se também que a quantidade de respingos visíveis diminuiu ao longo das chapas. Um dos fatores que pode ter provocado essa diminuição de respingos é o aumento da indutância.

A variação da indutância pode ser observada por meio dos oscilogramas de um pico de corrente e a tensão correspondente a esse exato momento, conforme as Figuras 5.7.

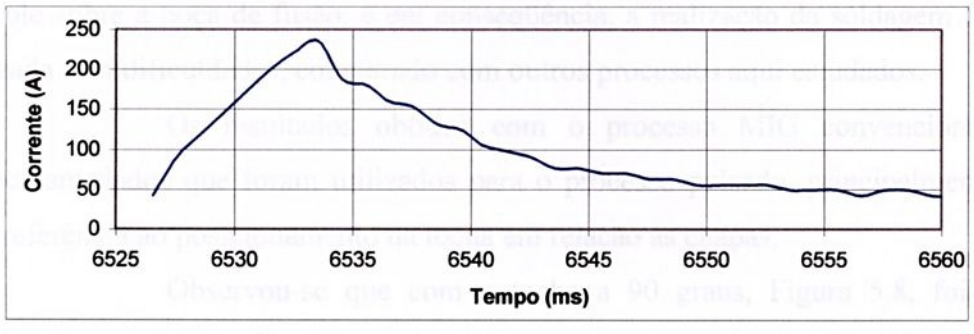
Nota-se que o aumento da corrente é gradativo e a diminuição também, formando uma curva suave, enquanto que a tensão cai no momento em que a corrente começa aumentar e permanece próximo de zero até o reinicio do aumento da corrente, e isso se deve à indutância, que é a propriedade de uma bobina que permite à mesma opor-se a qualquer mudança da corrente que passa através da mesma.

Se a curva fosse acentuada, a corrente aumentando e diminuindo instantaneamente, não haveria o destacamento da gota, mas à explosão da mesma ou da conexão da gota com o arame. O pesquisador Zaruba[40] já destacava o ajuste da indutância como forma de evitar essa explosão.

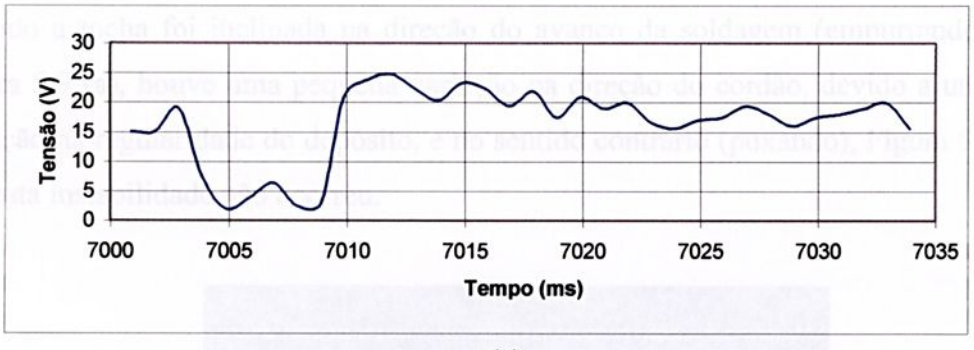
Na mesma figura, comparando os oscilogramas das soldas MC-2 (a) e MC-7 (b), existe uma pequena diferença, a solda MC-7 apresentou a curva de aumento de corrente, durante o curto circuito, com um ângulo maior proveniente de uma indutância menor, o que pode resultar em um aumento de salpicos.



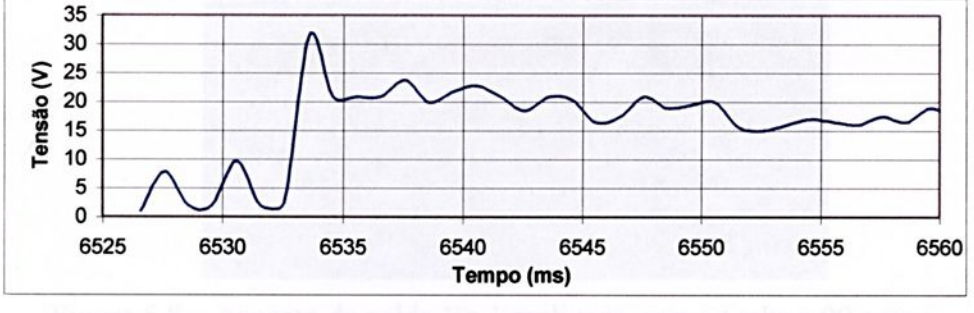
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.7 – Detalhe ampliado de um pico de corrente e a tensão correspondente ao mesmo trecho da solda MC-2 (a e c) e MC7 (b e d).

5.3 - Soldagem com o processo MIG pulsado

O processo MIG pulsado apresentou vantagens sobre o convencional.

O processo apresentou uma transferência aparentemente por pulverização "spray", com níveis de corrente média abaixo do que é tradicionalmente utilizado para este tipo de transferência. Isso possibilitou um controle sobre a poça de fusão, e em conseqüência, a realização da soldagem foi realizada sem dificuldades, comparado com outros processos aqui estudados.

Os resultados obtidos com o processo MIG convencional, forneceram dados que foram utilizados para o processo pulsado, principalmente com referência ao posicionamento da tocha em relação às chapas.

Observou-se que com a tocha a 90 graus, Figura 5.8, foi à condição em que o cordão não se apresentou retilíneo, variando a sua direção. Quando a tocha foi inclinada na direção do avanço da soldagem (empurrando), Figura 5.9 (a), houve uma pequena variação na direção do cordão, devido a uma variação na regularidade do depósito, e no sentido contrário (puxando), Figura 5.9 (b), esta instabilidade não ocorreu.

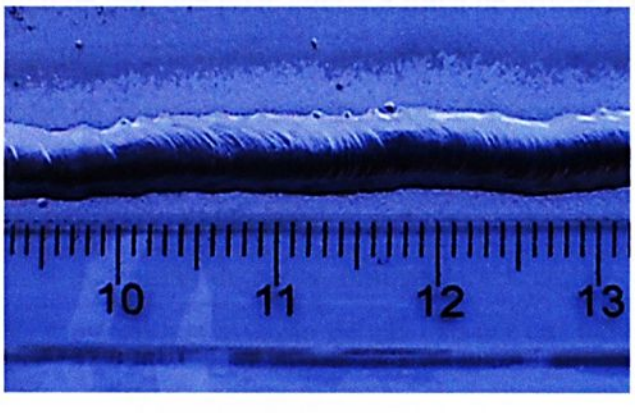
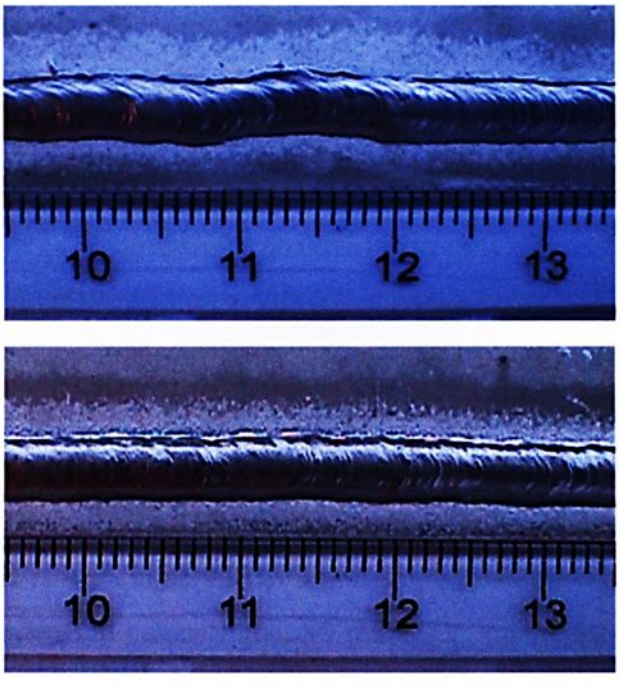


Figura 5.8 – Aspecto da solda Vs-1 realizado com a tocha a 90 graus.



(a)

(b)

Figura 5.9 – Aspecto da solda Vs-1 realizado com inclinação de 7º sentido empurrando (a) e 5º sentido puxando (b).

Essas variações podem ser devido à pequena alteração no comprimento do eletrodo para cada inclinação da tocha, pelo comportamento do arco para cada inclinação, portanto um aquecimento diferente na junta e o direcionamento do fluxo de gás, que pode alterar a força de arraste e estar fazendo com que as gotas sejam depositadas de forma irregular.

Apesar do fluxo de gás poder estar influenciando na forma de depósito das gotas, não foi realizado um estudo variando a vazão de gás, mas um estudo realizado por Pereira[42] verificando a influência da vazão de gás na instabilidade geométrica do cordão de solda, utilizando aço carbono como metal base e chanfros em V, mostrou que a vazão de gás não era um fator causador de instabilidade.

A diferença entre esse estudo, e o realizado por Pereira[42] são os materiais base utilizados, aço carbono e alumínio, que possuem densidades diferentes e em conseqüência disso a força de arraste terá uma ação diferente, e a preparação da junta, chanfro em V e junta sobreposta que alteram o fluxo do gás,

dessa forma os estudos podem apresentar resultados diferentes quanto à influência da vazão de gás.

Com relação aos parâmetros que foram variados, cada parâmetro apresentou um valor mínimo e um máximo em que foi possível realizar a soldagem e essa faixa ficou estreita não causando uma diferença quando a solda foi realizada com o valor mínimo, médio e o máximo.

Observa-se na Figura 5.10 que não há alteração aparente quanto a acabamento superficial e na Tabela 4.8 nota-se também que não há muita diferença nas características geométricas, apenas a solda VS-2 apresentou facilidade de repetir a soldagem, mantendo os mesmos resultados, utilizando-se de uma velocidade de soldagem de 950 mm/min, corrente de pico igual a 190 A e de base a 32 A e número de pulsos igual 90 pulso/seg, mantendo-se à distância do bocal em 8 mm.

Por meio da Tabela 4.4, pode-se verificar que o valor da velocidade de soldagem utilizada na solda Vs-2 é a média de 900 mm/min e 1000 mm/min, que são a mínima e máxima velocidade respectivamente, em que foi possível realizar a soldagem. Isso ocorre também para os outros parâmetros utilizados na solda Vs-2.

A facilidade de repetir a soldagem, sem modificações das características da solda se deve ao motivo da transferência ocorrer de forma aparentemente "spray".

Na Figura 5.11, nota-se que as escamas estão bem próximas uma das outras, que caracteriza um depósito de muitas gotas em um certo espaço de tempo, indicando uma transferência aparentemente por "spray". E o oscilograma de corrente apresenta um número de pulsos que acompanha de uma forma aproximada o número de escamas.

Pode-se notar na Figura 5.12, pelo oscilograma de corrente, que existem entre o intervalo de tempo de 4560 ms a 4730 ms aproximadamente 14 picos de corrente descontados aqueles estão juntos ou muito próximos. Isso indica que em um segundo teríamos aproximadamente 83 picos, ficando bem próximo aos 90 picos/seg regulado no equipamento. Essa diferença pode ficar

unesp

nula se a contagem for realizada no período de um segundo, demonstrando a precisão do equipamento.

Nota-se também, que em alguns momentos existem vários picos de corrente em pequenos intervalos de tempo, indicando que pode estar ocorrendo o destacamento de mais de uma gota por pulso nesse momento. Mas isso ocorre em média, uma vez a cada cinco pulsos, o que não mostrou uma influência significativa na execução da soldagem.

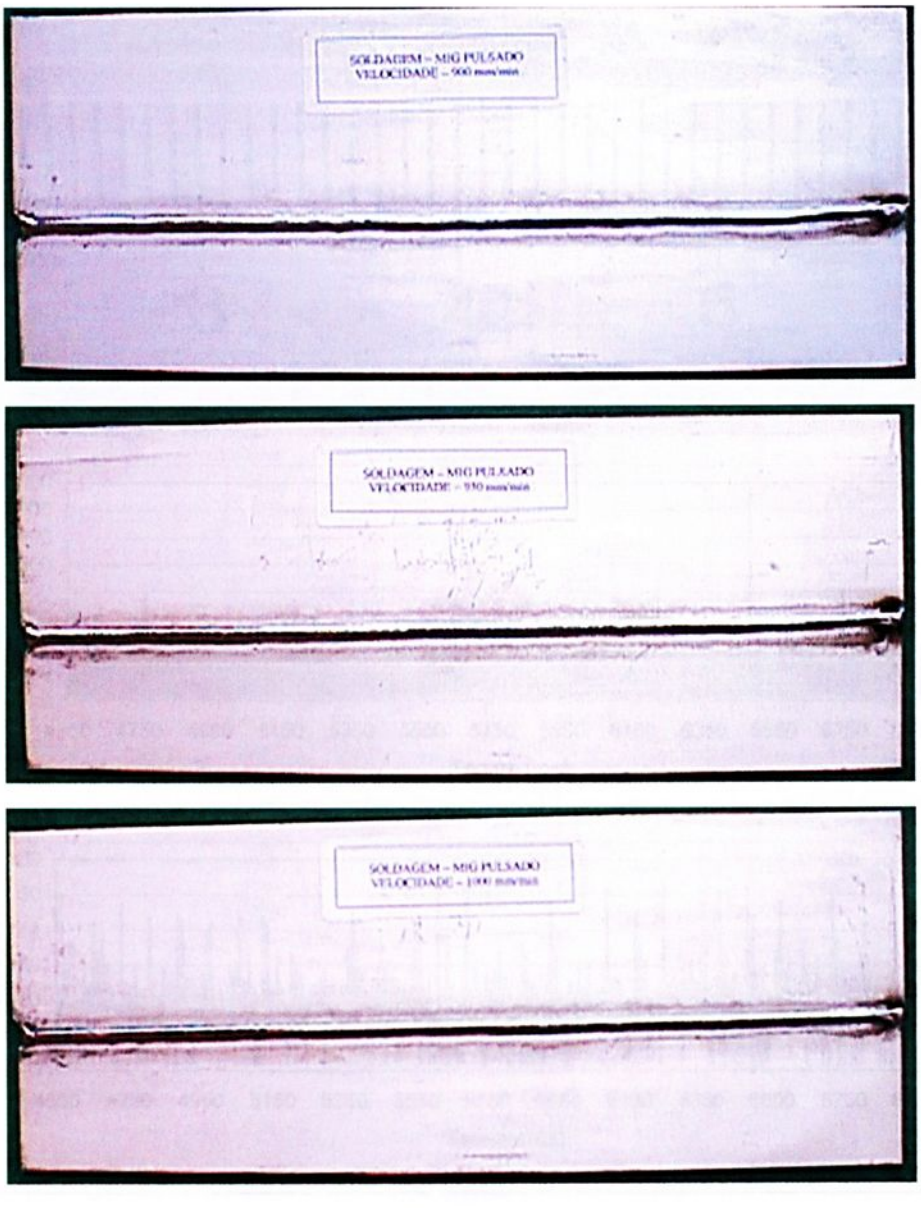


Figura 5.10 – Aspecto geral das soldas realizadas com velocidade de 900 mm/min (a), 950 mm/min (b) e 1000 mm/min (c).

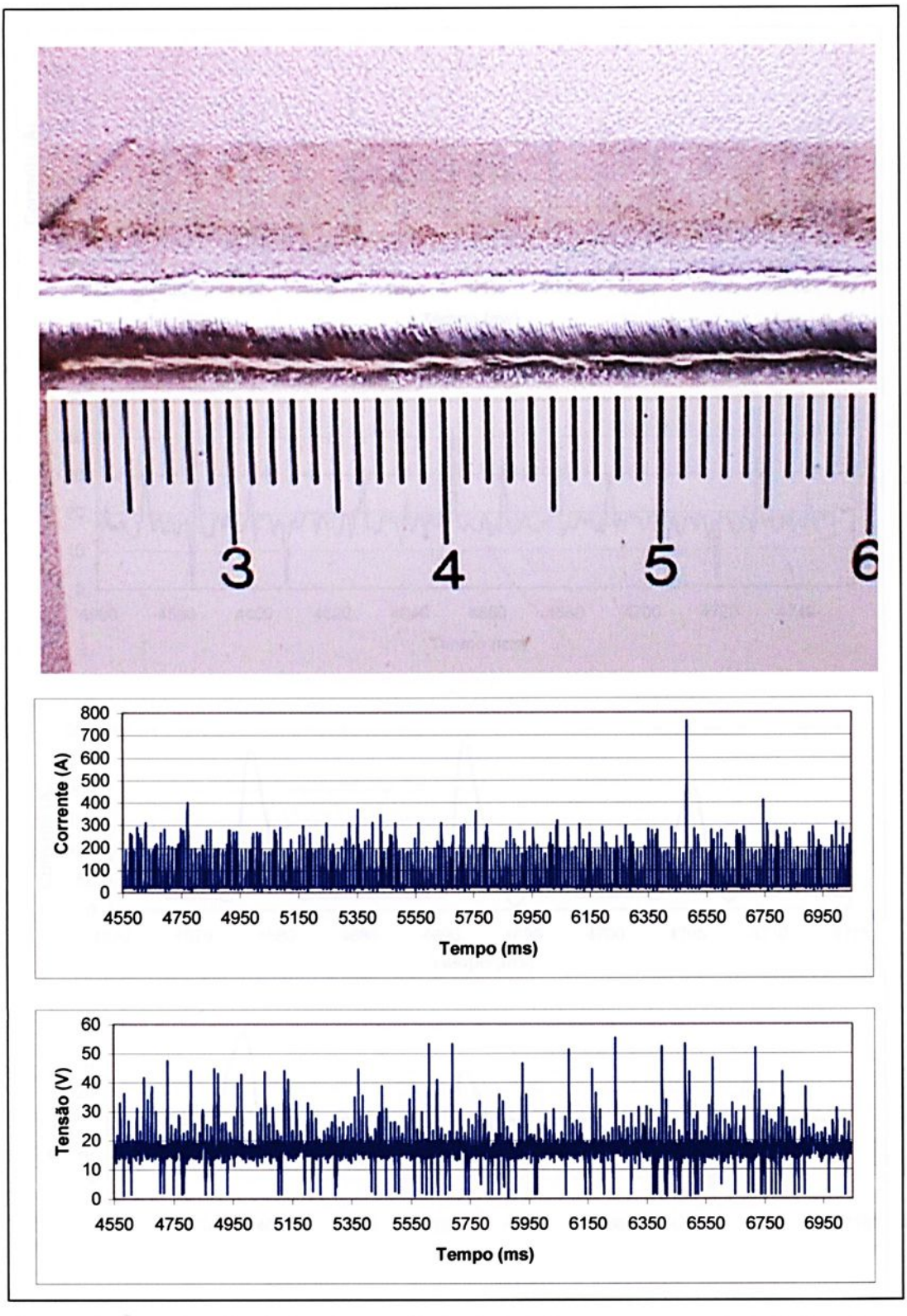


Figura 5.11 – Aspecto da solda Vs-2 e gráfico de corrente e tensão do respectivo trecho.

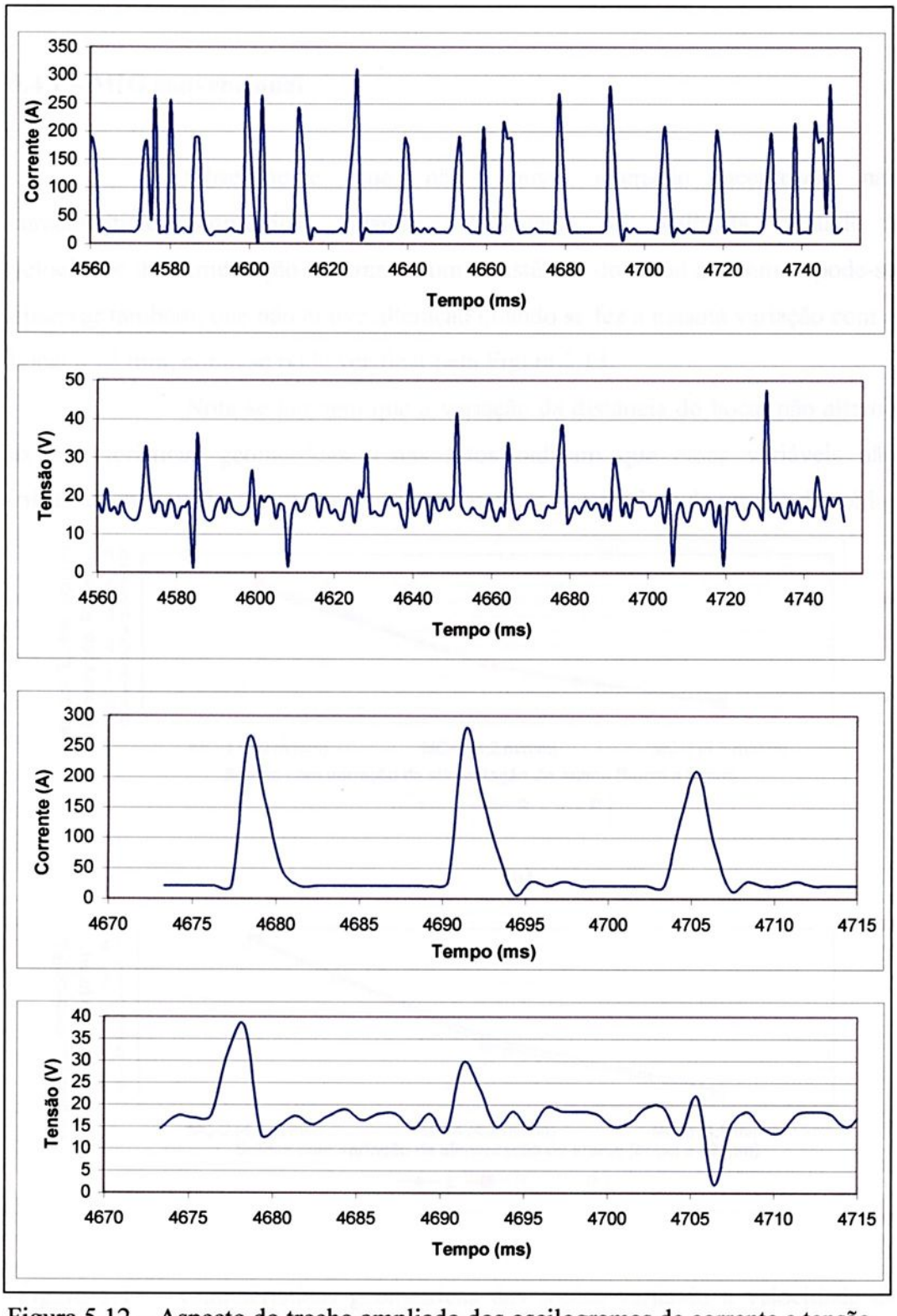


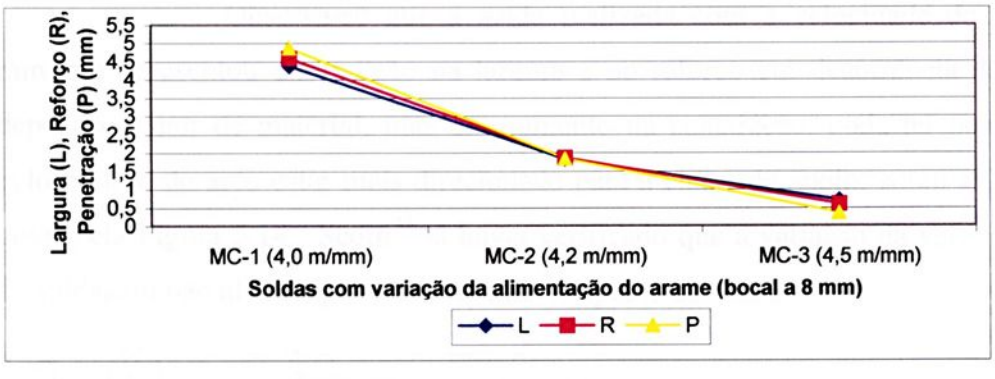
Figura 5.12 – Aspecto do trecho ampliado dos oscilogramas de corrente e tensão mostrando as características dos picos de corrente e o intervalo de tempo entre eles.

5.4 – Características Geométricas

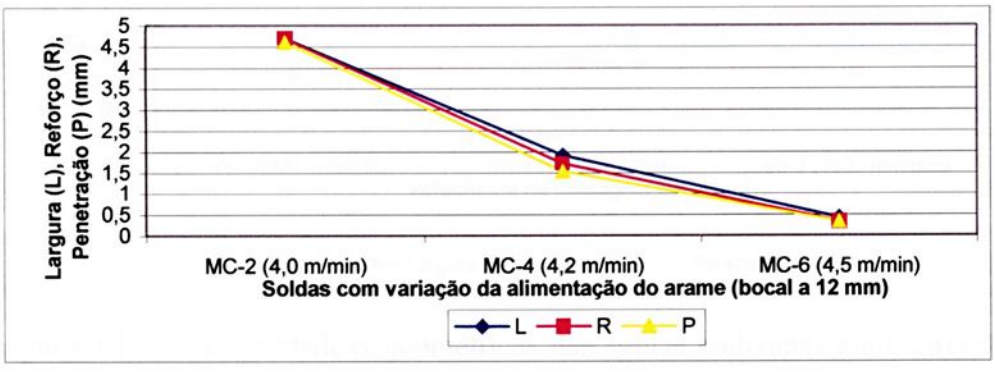
5.4 1 – MIG convencional

Observou-se que não houve alteração acentuada nas características geométricas, quando a soldagem foi realizada variando a velocidade de alimentação do arame com a distância do bocal a 8 mm, e pode-se observar também, que não houve alteração quando se fez a mesma variação com o bocal a 12 mm, como se pode verificar pela Figura 5.13.

Nota-se também que a variação da distância do bocal não alterou as características geométricas. Estes fatos indicam que essas variáveis não influenciam significativamente nas características geométricas do cordão de solda.



(a)



(b)

Figura 5.13 - Características geométricas das soldas variando a velocidade de alimentação do arame mantendo a distância do bocal em 8 mm (a) e a 12 mm (b).

Observou-se que em algumas soldas realizadas com os mesmos parâmetros apresentaram uma variação acentuada nas características geométricas. Isso pode ocorrer devido um depósito maior na aresta da chapa sobreposta, que exerce uma maior atração do arco, apresentando um cordão mais estreito e alto, com menor penetração da chapa de apoio. Se depósito ocorrer em maior quantidade na face da chapa de apoio, o cordão será mais largo e baixo, com uma penetração maior na chapa de apoio, devido à atuação do arco elétrico ser maior na chapa de apoio, conforme se observa nas Figuras 4.9 e 4.10.

.

5.4.2 – MIG pulsado

Observa-se que a solda realizada com a velocidade de 1000 mm/min apresentou diminuição na largura e no reforço em decorrência de um depósito menor de material, mas um aumento na penetração, pode ter ocorrido pelo motivo do arco estar mais direcionado para a chapa de apoio, como se pode notar pela Figura 5.14. Scotti[43] já havia verificado que a variação da velocidade de soldagem não altera significativamente o aspecto do cordão.

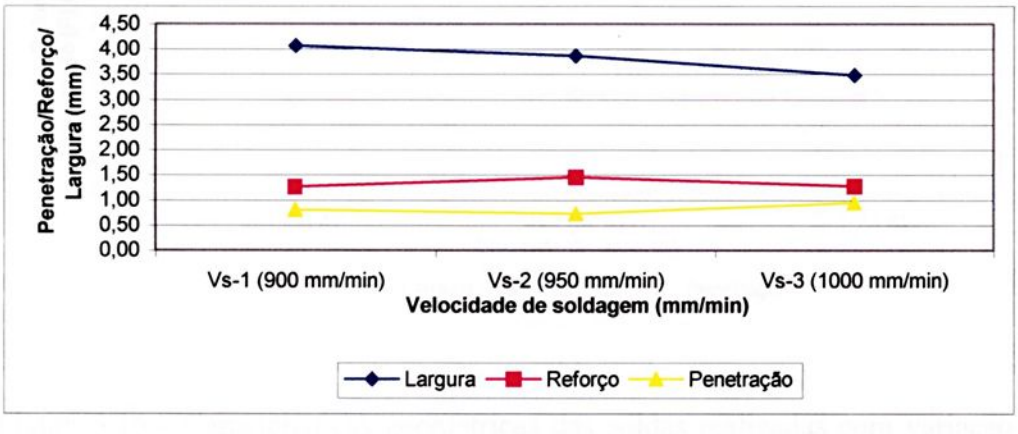
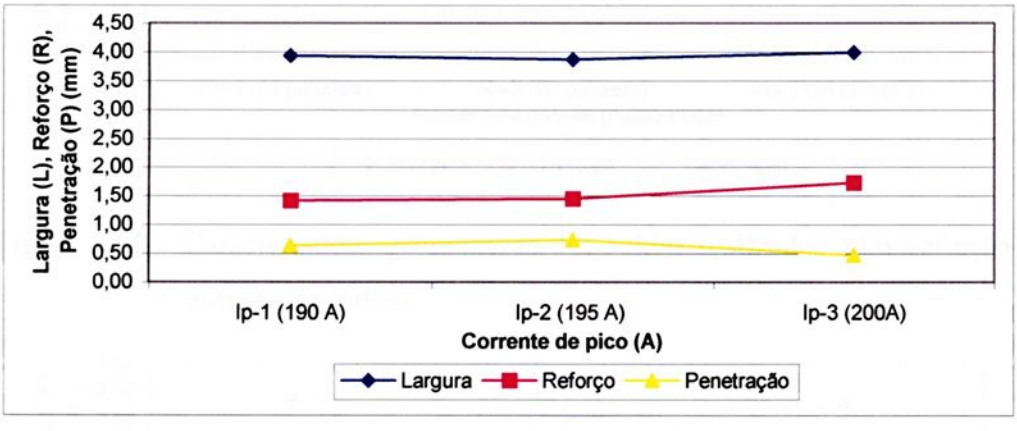


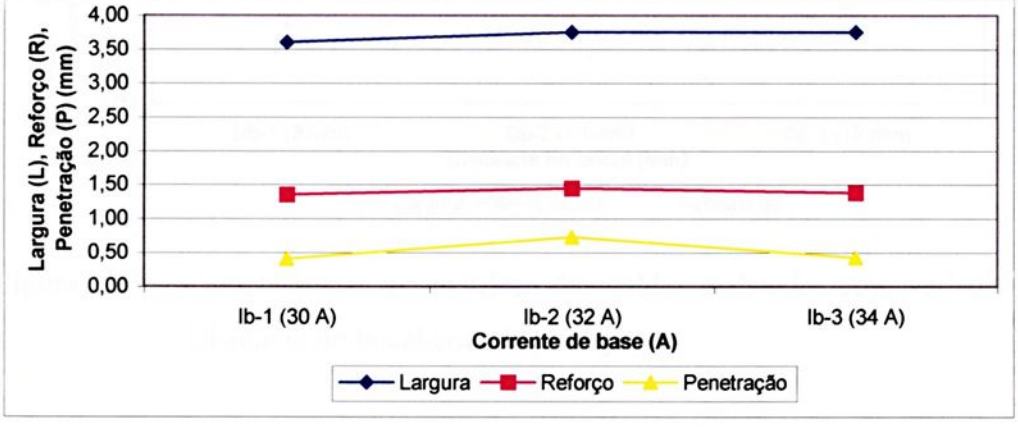
Figura 5.14 - Características geométricas das soldas realizadas com variação da velocidade de soldagem

As soldas realizadas variando a corrente de pico e corrente de base, não apresentaram variações significativas nas características geométricas do cordão de solda, como pode-se observar na Figura 5.15 (a) e Figura 5.15 (b).

Também não ocorreu alteração quando nas características geométricas quando se variou o número de pulsos, conforme se pode verificar na Figura 5.16.



(a)



(b)

Figura 5.15 - Características geométricas das soldas realizadas com variação da corrente de pico (a) e corrente de base (b).

Na Figura 5.17 pode-se observar que, assim como as soldas realizadas com o processo MIG convencional, não houve uma variação

significativa quando se variou à distância do bocal, mostrando que esse parâmetro não possui influência nas características geométricas.

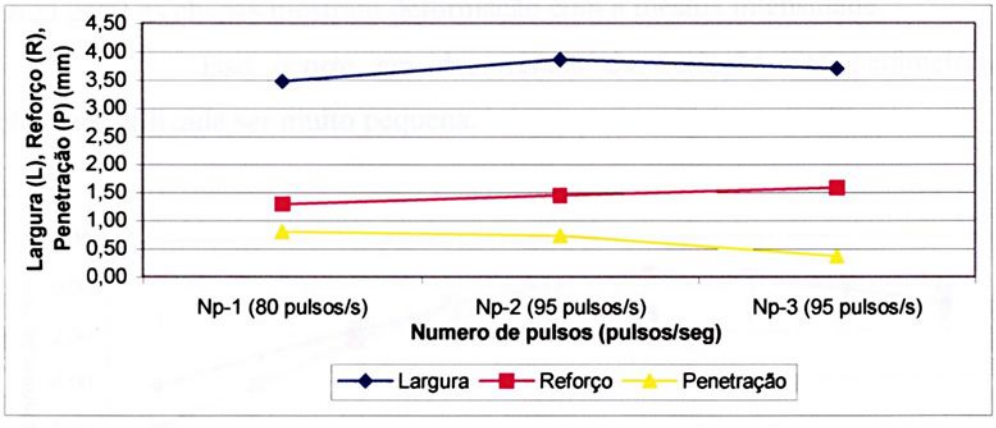


Figura 5.16 - Características geométricas das soldas realizadas com variação do número de pulsos.

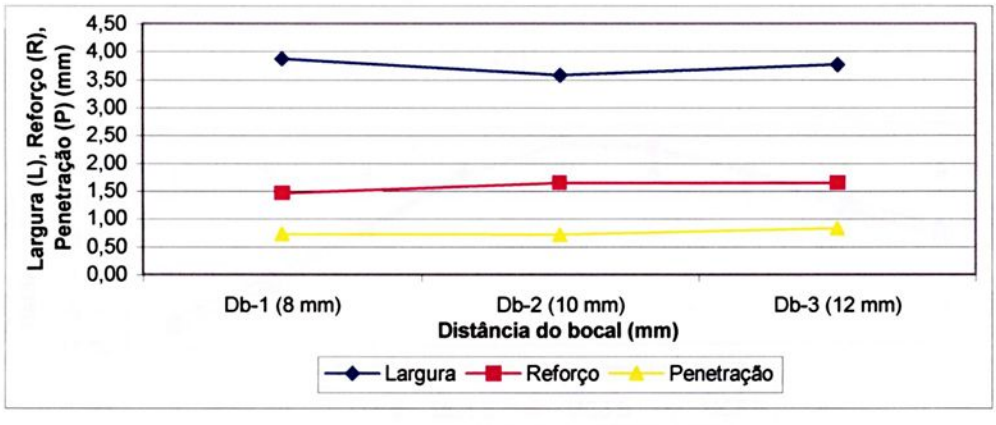


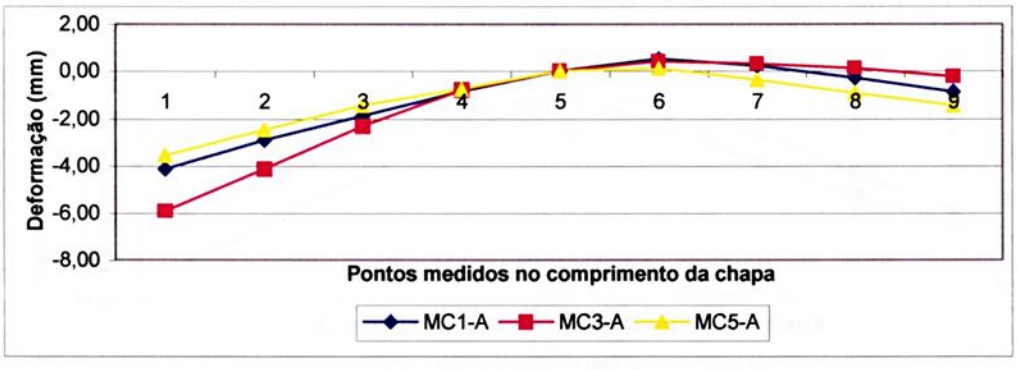
Figura 5.17 - Características geométricas das soldas realizadas com variação da Distância do bocal em relação à peça.

5.5 – Deformação das chapas soldadas com MIG convencional

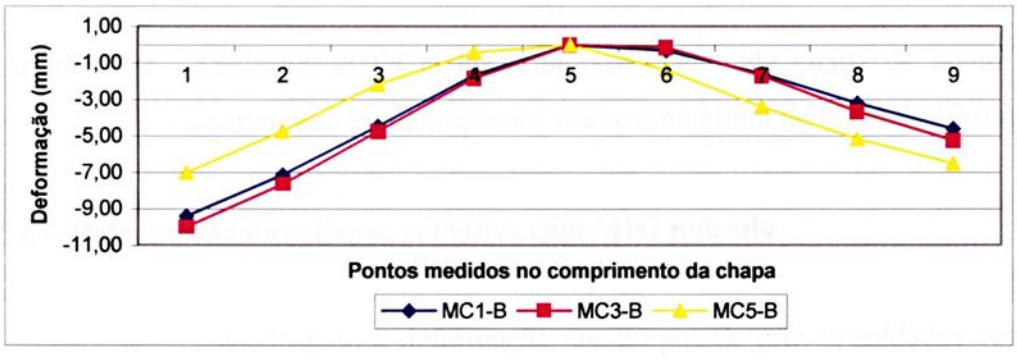
Para a soldagem de alumínio com espessuras finas, a deformação é inevitável, se tornando mais intensa quando a soldagem é realizada de forma contínua, de acordo com que Watanabe e Satoh[36] já haviam verificado com chapas finas de aço.

Observa-se que pelas Figuras 5.18 e 5.19, a deformação ocorrem de forma semelhante, havendo variações nos valores nos pontos medidos, mas de forma geral as chapas mostram deformação com a mesma intensidade.

Isso ocorre em decorrência da variação dos parâmetros de soldagem utilizada ser muito pequena.

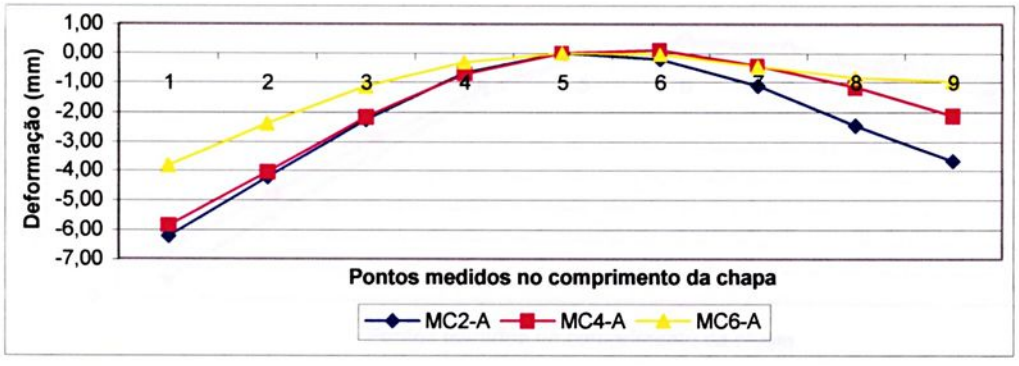


(a)

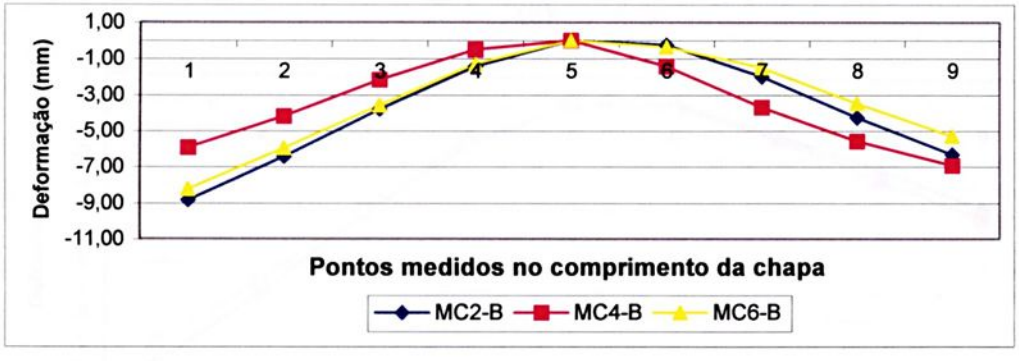


(b)

Figura 5.18 - Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b) variando a alimentação do arame com altura do bocal de 8 mm.



(a)

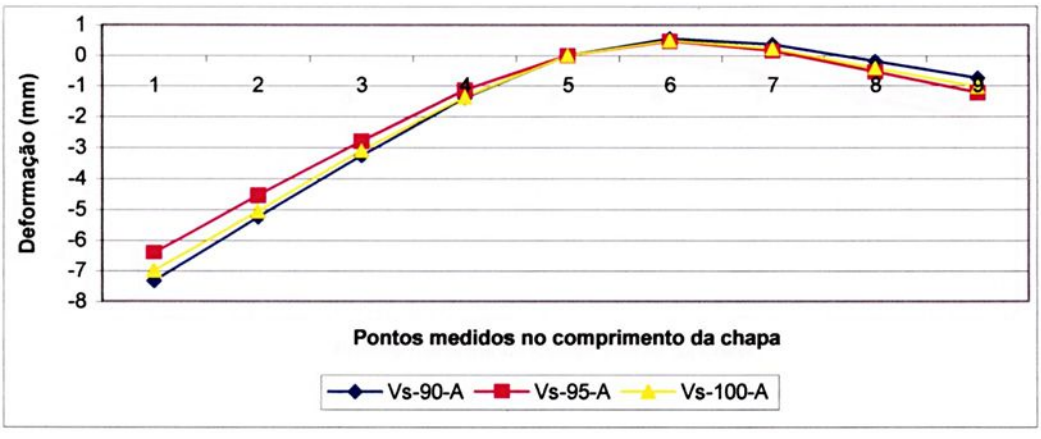


(b)

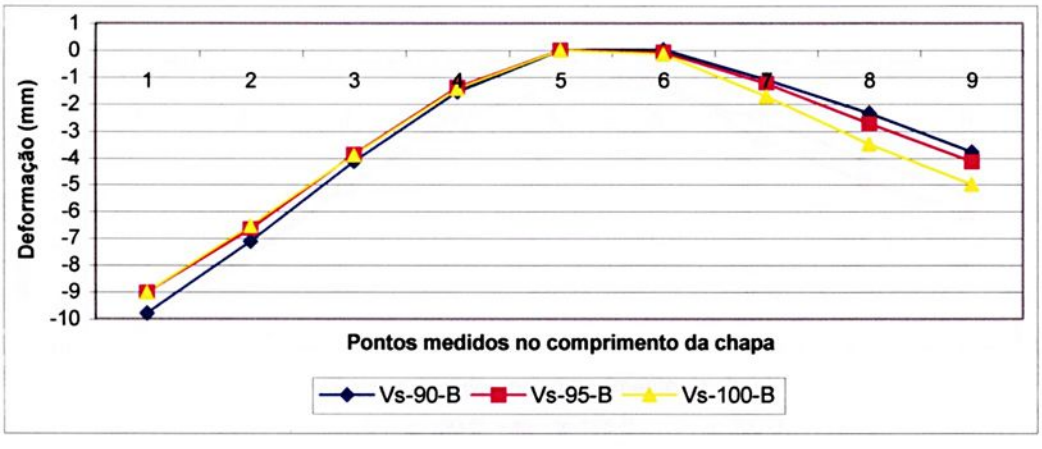
Figura 5.19 - Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b) variando a alimentação do arame com altura de bocal de 12 mm.

5.6 – Deformação das chapas soldadas com MIG pulsado

Analisando a deformação dos corpos de provas soldados com o processo MIG pulsado, observa-se na figura 5.20, que as soldas Vs-1, Vs-2 e Vs-3, soldadas com a variação da velocidade em 850, 900 e 1000 mm/min, não alterou significativamente a deformação, mesmo sendo um fator que influência na determinação da energia de soldagem.



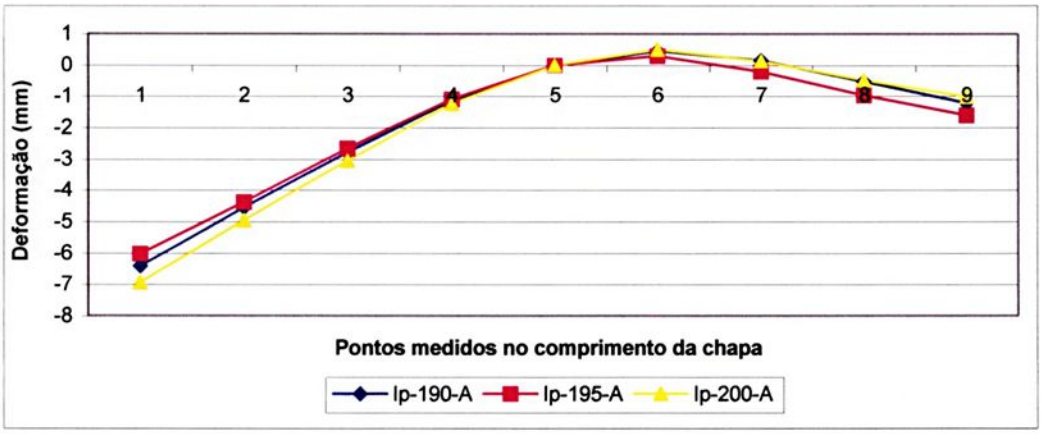
(a)



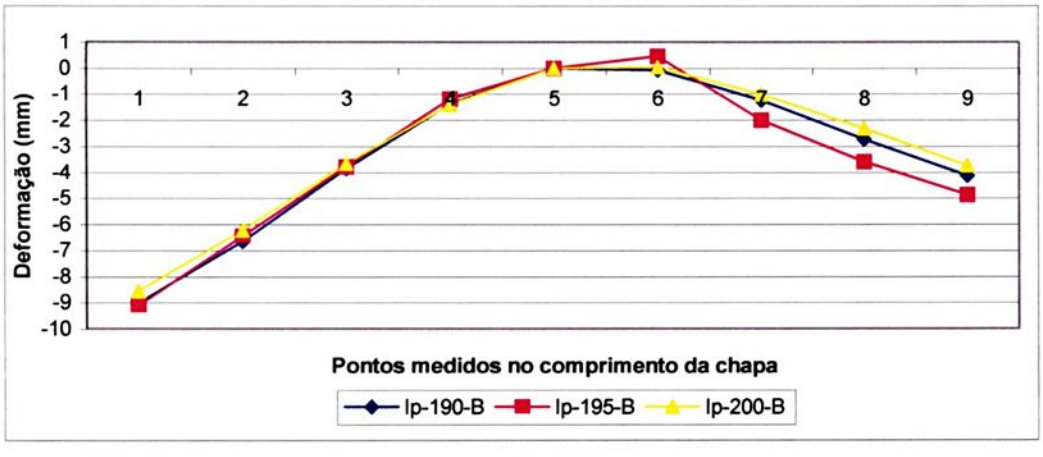
(b)

Figura 5.20 – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b) variando a velocidade de soldagem.

A variação da corrente de pico em 190, 195 e 200 A e de base em 30, 32 e 34 A, não alteraram de forma significativa a corrente média, não provocando grandes mudanças na energia de soldagem, conforme se pode notar na Tabela 4.9, e conseqüentemente a diferença entre as deformações dos corpos de prova permaneceram pequenas, conforme as Figuras 5.21 e 5.22.

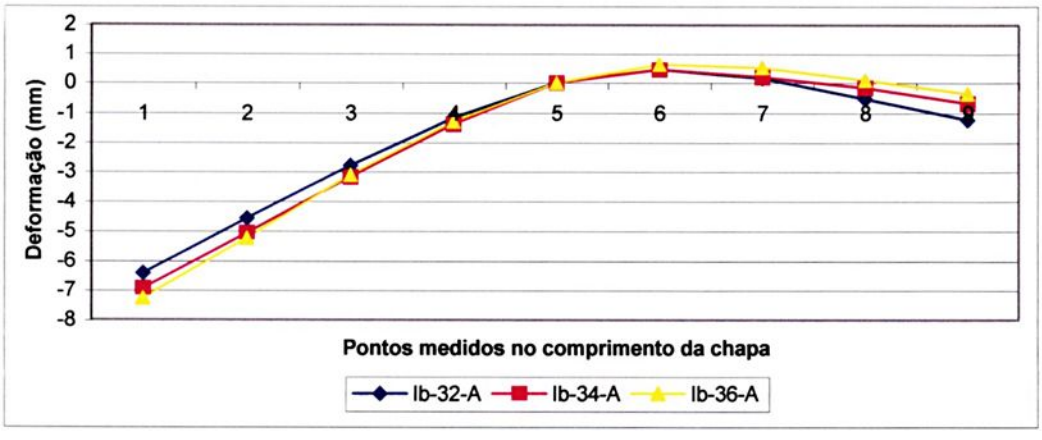


(a)

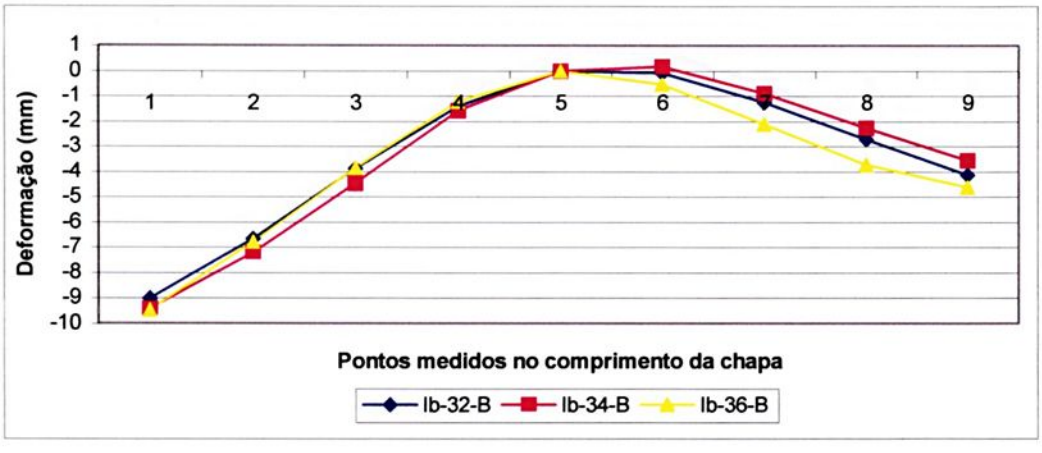


(b)

Figura 5.21 – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b) variando a corrente de pico.



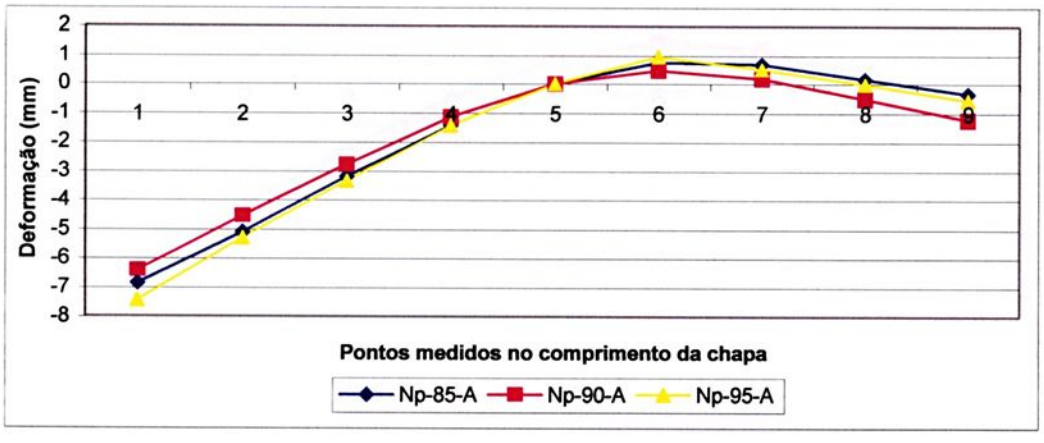
(a)



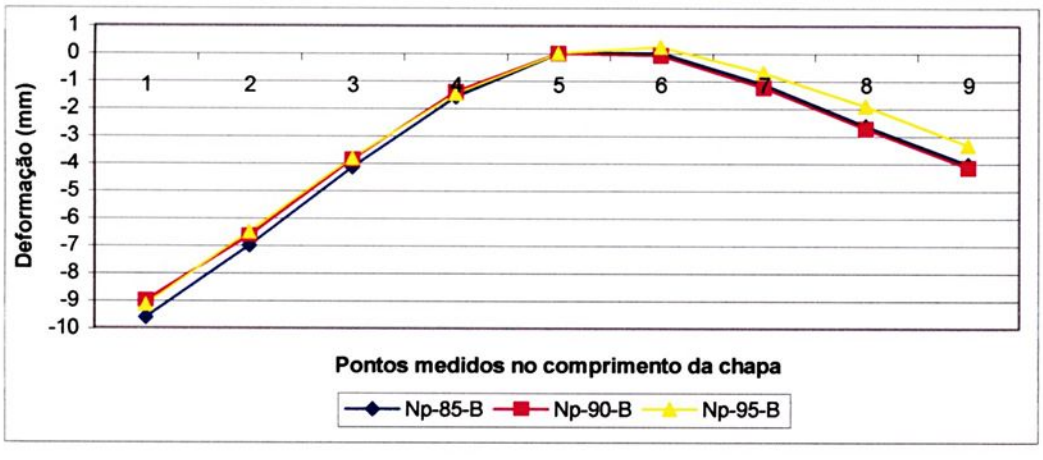
(b)

Figura 5.22 – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b) variando a corrente de base.

A deformação também não sofreu alteração significativa com as variações do número de pulsos em 90, 95, 100 pulsos/s e pela distância do bocal em relação à peça de 8, 10 e 12 mm, conforme as Figuras 5.23 e 5.24, permanecendo próximos os valores calculados da energia de soldagem, como se pode notar na Tabela 4.9.

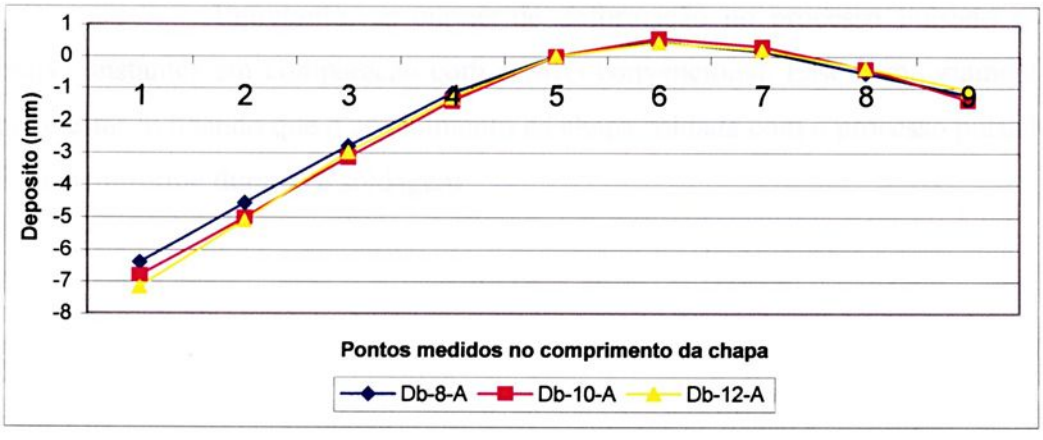


(a)

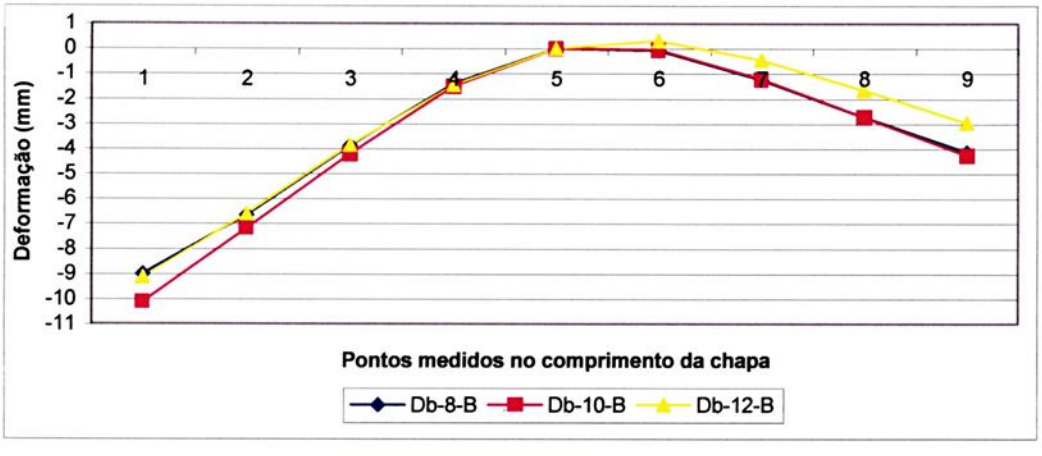


(b)

Figura 5.23 – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b) variando o número de pulsos.



(a)



(b)

Figura 5.24 – Deformação da chapa sobreposta (a) e da chapa de apoio (b) variando a altura do bocal.

Nos dois processos utilizados, a deformação mais intensa foi da chapa de apoio (lado B), e isso se deve ao fato do cordão de solda se localizar mais ao centro da chapa, aumentando as tensões de compressão e tração, enquanto que na chapa sobreposta (lado A), o cordão se localiza na aresta da mesma, minimizando essas tensões.

A pequena diferença entre as energias de soldagem calculadas para os dois processos, demonstrados nas Tabelas 4.1 e 4.9, acarretaram em uma deformação semelhante sempre que as soldagens foram realizadas nas condições impostas neste trabalho.

Entretanto, as curvas de deformação no processo pulsado são mais constantes em comparação com o MIG convencional. Esse comportamento pode estar indicando que o aquecimento da chapa soldada com o processo pulsado é mais uniforme durante a soldagem.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Nas condições estabelecidas neste trabalho, e nos resultados obtidos, podemos concluir que:

1. O processo MIG pulsado mecanizado apresentou o melhor resultado para soldagem de chapas finas de alumínio.

2. O processo MIG pulsado apresentou maior tolerância quanto à preparação da junta, oscilações do arame e no posicionamento da tocha, em relação aos outros processos utilizados neste trabalho.

3. As características geométricas do cordão de solda realizado com o processo pulsado apresentaram maior uniformidade do que o cordão de solda realizada com a MIG convencional.

4. Quanto ao acabamento superficial, a forma de transferência se mostrou o fator de maior influência, na qual, a MIG pulsada apresentou os melhores resultados.

5. Apesar de ser utilizada na soldagem de chapas de alumínio com espessuras maiores, o processo MIG convencional mostrou maior sensibilidade a variações das oscilações do arame e no posicionamento da tocha durante a soldagem.

6. O processo TIG convencional autógeno mecanizado, para as condições determinadas pela pesquisa, se mostrou inadequado.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

7. A deformação teve um comportamento semelhante em todas as peças soldadas, tanto com o processo MIG convencional como também o MIG pulsado. Esse comportamento pode facilitar o controle da deformação.

CAPÍTULO VII

PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS

O grande crescimento do uso do alumínio, e o surgimento de uma variedades de novas ligas, fazem com que seja necessário aumentar os estudos da soldagem desse material.

Ainda há muito a ser estudado em relação à soldagem de alumínio, principalmente chapas com espessuras abaixo de 1/8 pol. Neste trabalho, acreditamos ter contribuído para agregar conhecimento a este campo de pesquisa. Além disso, foi possível visualizarem-se novos trabalhos, que enumeramos a seguir:

- Refazer os estudos para outras posições de soldagem e/ou outros tipos de juntas.
- Refazer os estudos para outras ligas de alumínio e/ou outros tipos de consumíveis.
- Estudar o controle de deformações, durante a soldagem.
- Estudos visando a completa automação do processo de soldagem.



REFRÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RAJASEKARAN, S., Weld Bead Characteristics in Pulsed GMA Welding of Al-Mg-Alloys. Welding Research Supplement, p.397-s – 407-s, December 1999.

2. GUAN, Q., GUO, D.L., LI, C. Q., LEGGATT, R. H., Low stress non-distortion (LSND) welding – a new technique for thin materials. Welding in the World / Le Soudage dans le Monde. Vol. 33, nº 3, p. 160-167, 1994.

3. ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S.A. Manual de Soldagem, 1.ª edição, 1993.

4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – Laminação (Guia Técnico do Alumínio, vol. 2), 1ª ED., São Paulo, 1994

5. JORGE, J. C. F., MOSCIARO, H. B., COSTA, J. F. M., JUNIOR, V. P. C., Estudo da variação dos parâmetros de soldagem do processo TIG pulsado nas características do cordão de solda, Anais do XIII Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, p. 45-55, Guarujá-SP, Out. 1987.

6. LUCAS, W., TIG and Plasma welding in the 80s – Plasma and Pulsed Current Aplications – Part 4, Metal Construction 14(12), p. 659-667, 1982.

7. AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Processes. in: Welding Handbook, 8ht Edition, vol. 2, 1991.

8. I.I.W. – Instituto Internacional de Soldagem, Documento n. XII-537-77, Classification dês diver modes de transfer du metal em soudage a lárc., Soudage et Techiniques Connexes, v. 31, n. 9-10, 1977.

unesp

9. STOL, I. Development of na advanced Gas Metal Arc Welding process. Welding Journal, august, 1989.

10. STENBACKA, N. The influence of shielding gas on cored wires. Welding Journal, november, 1990.

11. NORRISH, J. et al. A history of pulsed MIG welding. Joining & Materials, june, 1989.

12. RHEE, S. et al. Observation of metal transfer during Gas Metal Arc Welding. Welding Journal, october, 1992.

13. JÖNSSON, P. G. et al. Heat and metal transfer in Gas Metal Arc Welding using argon and helium. Metallurgical an Materials Transaction B. v. 26B, april, 1995.

14. NEEDAHAM, J. C. & CARTER, A. W. Material transfer characteristics with pulsed current. British Welding Journal, may, 1965.

15. CASTNER, H. R. Gas Metal Arc Welding fume generation using pulsed current. Welding Journal, february, 1995.

16. CASTNER, H. R. & SINGH, R. Pulsed vs. steady current gamaw: Which Louder. Welding Journal, november, 1997.

17. WANG, Q. L. et al. A new close-loop droplet transfer control system in the pulsed GMAW. Welding in the world, v. 34, 1994.

18. BOUGHTON, P. et al. The use of pulsed wending to control metal transfer in welding. British Welding Journal, april, 1965.

unesp

19. ALLUM, C. J. Welding Technology Data: Pulsed MIG Welding. Welding and Metal Fabrication, jan/february, 1985.

20. WAINER, E., BRANDI, S. D. et al. Soldagem - Processos e Metalurgia. Editora Edgard Blücher Ltda., 1992.

21. WIDGERY, David. Welding – the key to better productivity. Esaba Group (UK), march, 1986.

22. CHANDEL, R. S. Electrode melting and plate melting efficiencies of submerged arc welding and gas metal welding. Materials Science and Technology. august, 1990.

23. NORRISH, J. Advanced Welding Process. IOP Publishing Ltd, 1992. Cap. 7, Gas Metal arc welding. P. 131-173.

24. BRANDI, S. D., NETO, M. C. 1998, Modelamento da Freqüência de Destacamento de Gotas de Soldagem de Ligas de Alumínio com o Processo SAMGp, ABS - Suplemento Técnico - Soldagem & Inspeção – ano 4 – nº 3- p. 5-11.

25. PEREIRA, W. A., Comparação de características operacionais entre os processos MIG pulsado e MAG curto-circuito. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, abril, 1995.

26. AMIM, M., 1983, "Prediction of pulse parameters for MIG welding", Welding Research Bulletin, v. 24, feb, pp. 48-54.

27. STRET, J. A. Pulsed Arc Welding. Cambridge, Columbus, 1990. 57p.

28. CHAN, Y. W. Computer simulation of heat flow in pulsed current arc welding. Journal of Material Processing Technology, february, 1993.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

29. WHITE, D. et al. Process modeling with neural networks for pulsed GMAW braze welds. Journal of Manufacturing. September, l997.

30. VISHNU, R., LI, W. B., EASTERLING, K. E. Heat flow model for pulsed welding. Materials science and technology, july, 1991.

31. PARDO, E. & WEKMAN, D. C. Prediction of weld pool and reinforcement dimensions of GMAW welds using finite-element model. Metallurgical Transactions B, v. 20B, december, l989.

32. CHEN, S. B. et al. Self-learning fuzzy neural networks and computer vision for control of pulsed GTAW. Welding Journal, may, l997.

33. WANG, Q. L. et al. Arc light sensing of droplet transfer and its analysis in pulsed GMAW process. Welding Journal, november, l997.

34. RADAJ, D., Heat Effects of Welding – Temperature Field, Residual Stress, Distortion, Spreinger-verlag, 1992.

35. MASUBUCHI, K, Analysis of Welded Structures – Residual Stresses, Distortion, and their consequences, The Pergamon International Library, 1980.

36. WATANABE, M., SATOH, K., Effect of welding conditions on the shrinkage and distortion in welded structures, Welding Journal, 40(8), Research Supplement, p. 377s-384s, 1961.

37. KOBAYASHI, Y., Influencia da composição do revestimento de eletrodos básicos sobre as características econômicas e operacionais, Florianópolis, 1987, 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal de Santa Catarina.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

38. LANCASTER, j. f., The physics of welding, International Institute of Welding, England, Pergamon Press, 1984, 297p.

39. JACKSON, c. e., The science of arc welding, Welding Journal, 39 (4): 129s-140s, 39 (5): 177s-190s, 39 (6): 225s-230s, 1960.

40. ZARUBA, I. I., Mechanism of metal spatter during arc welding, Automatic Welding, (11): 10-14, 1970.

41. SAMMONS, M., How AC balance control enhances TIG welding on thin aluminum, artigo técnico da MILLER Electric Mfg. Co. www.millerwelds.com, 2001.

42. PEREIRA, W. A. et. al. 2000, Estudo dos Parâmetros que influenciam a Instabilidade do Cordão em Soldagem MIG Pulsada Automatizada. ABS - Suplemento Técnico – Soldagem & Inspeção – ano 6 – nº 8. p.8-16

43. SCOTTI, A. et al., Bead instability of mechanized P_MIG welding in vertical-up position, The International Journal for the Joining of Materials, vol. 3(1), 1991.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

1. AMATA, M. & FIORI, S. R. Choosing the proper self-shielded FCAW wire. Welding Journal, june, 1996.

2. BENNET, B. Effects of shielding gas in pulsed MIG welding. Joining & Materials, june, 1989.

3. BOSWORTH, M. R. Effective heat input in pulsed current Gas Metal Arc Welding with solid wire electrodes. Supplement to the journal, may, 1991.

4. BOSWORTH, M. R., FRENCH, I. E. A comparison of pulsed and conventional welding with basic flux cored and metal-cored wires. Welding Journal, june, 1995.

5. FERREIRA, W. G. et al. Avaliação das eficiências térmicas e de deposição em procedimento de soldagem MAG com arame tubular. Projeto de iniciação científica – CNPq/PIBIC, Universidade Estadual Paulista, Bauru-SP, agosto, 1998.

6. GUAN, Q., A survey of development in welding stress and distortion controlling in aerospace manufacturing engineering in China. Welding in the World. Vol. 43, nº 1, p.64-74, 1999

7. JOCOBSEN, N. Monopulse investigation of drop detachment in pulsed Gas Metal Arc Welding. Journal of Physics, v. 25, 1992.

8. JÖNSSON, P. G. et al. Power characteristics in GMAW: Experimental and numerical investigation. Welding Journal, march, 1995.

9. KIM, J. W., NA, S. J., A study on the effect of contact tube-to-workpiece distance on weld pool shape in gas metal arc welding, Welding Journal, p. 141-s – 152-s, may 1995.

10. MARQUES, P. V. Tecnologia de soldagem. Belo Horizonte - Editora "O Lutador", 1991.

11. MARTINS, F. Minimização de trincas de solidificação em liga de alumínio soldada (GTAW) com corrente alternada pulsada, Campinas, 2000, 127p, Tese (Doutorado na Área de Engenharia) – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade de Campinas.

12. NEEDAHAM, J. C. Pulse controlled consumable electrode welding arcs. General principles and operating characteristics. British Welding Journal 12(4): p. 191-197, 1965.

13. NORRISH, J. & HILTON, D. E. Shielding gases for arc welding. Welding & Metal Fabrication, may/june, 1988.

14. PIXLEY, M. et al. Power sources for pulsed MIG welding. Joining & Materials, june, 1989.

15. QUINN, T. P. et al. An electrode extension model for Gas Metal Arc Welding. Welding Journal, October, 1994.

16. QUITES, A. M., DUTRA, J. C. Tecnologia de soldagem a arco voltaico. Florianópolis, Edeme, 1979.

17. RANDHAWA, H. S. et al. Geometrical characteristics of pulsed current positional gma weld. ISIJ International, v. 38, 1998.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

18. SUGA, T. Recent progress of MAG welding material for automation. Welding in the world, v. 34, 1994.

19. WU, C. S. et al. Rule-based control for weld bead width in pulsed gas tungsten arc welding (GTAW). Journal of Engineering manufacture, 1996.

20. WATANABE, M. SATOH, K. Fundamental Studies on Buckling of Thin Steel Plate Due and Bead – Welding. Jnl. Jap. Weld, Soc., 27 (6), 1958, p. 313-320.

21. ORROK, N. K. Aluminum welding today. Metal Progress 89(5): p. 91-96, 1996.

0810000993