

V00
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INFLUÊNCIA DE FATORES OPERACIONAIS NA FORMAÇÃO DE
POROSIDADE DA SOLDAGEM MIG DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

FÁBIO CAMPOS MORAIS

como parte dos requisitos para obtenção do título de

Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi – (UFU) – Orientador

Prof. Dr. Américo Scotti – (UFU)

Prof. Dr. Dr Carlos Roberto Camello Lima – (UNIMEP)

SISBI/UFU



1000202651

Uberlândia, junho de 2001



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Uberlândia - MG - 38400-902
Fone: 0XX3432394149- FAX: 0XX34372394282

MON
621.991
M8892
TES/MEM

ALUNO: FÁBIO CAMPOS MORAIS

NÚMERO DE MATRÍCULA: 5991601-7

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais e Processos de Fabricação

PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“Influência de Fatores Operacionais na Formação de Porosidade da Soldagem MIG de Alumínio”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi

A Dissertação foi APROVADA em reunião pública, realizada no Anfiteatro da Biblioteca do Campus Santa Mônica, em 01 de junho de 2001, às 14:00 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME		ASSINATURA
Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi	- UFU	
Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima	- UNIMEP-SP	
Prof. Dr. Américo Scotti	- UFU	

Uberlândia, 01 de junho de 2001.

Aos meus avós, pais, irmã, irmão e sobrinhas, parentes e amigos.

Agradecimentos

Ao professores da Universidade Federal do Ceará, Dr. Antônio Salvador da Rocha, Dr. Jesualdo Pereira Farias e ao Mestre José de Andrade Moraes pela confiança na indicação para cursar o mestrado.

Ao professor e orientador Dr. Valtair Antônio Ferraresi, pela paciência e oportunidade para realizar este trabalho.

Ao professor Dr. Américo Scotti, pelas sugestões e amizade.

Aos doutorandos e mestrandos integrantes do LAPROSOLDA: Aldemi, Admilson, Alberto, André Richett, Celina Leal Mendes da Silva, Davi Sampaio Correia, Hélio Cordeiro de Miranda, Kleber Mendes Figueiredo, Louriel Vilarinho, Moisés Luiz Lagares, Fernando Mariano, Paulo Balsamo, Warley Pereira, Vinicius Sales Rocha pelas idéias e companhias nos momentos de dificuldade e descontração no tempo de mestrado.

Aos alunos de graduação, mestrado, doutorado e professores da UFU, pela oportunidade de convívio e crescimento.

Aos membros da oficina mecânica: Eurípedes, Lázaro, Marcos, Valdico, Zé Pedro e demais técnicos administrativos.

Aos técnicos administrativos da Secretaria da Pós-Graduação, FEMEC e UFU: Baltazar, Gorete, Graça, Inês, Marta e demais, pelo pronto atendimento sempre que solicitado.

Ao apoio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU.

Aos professores, funcionários e companheiros de trabalho, que contribuíram para a realização desse trabalho.

À jovem Josiane Fernanda Covre, pela boa companhia.

Ao LAPROSOLDA, pelo suporte físico concedido.

Ao CNPq, pelo fornecimento de bolsa de mestrado.

À White Martins, pelo fornecimento de gás de proteção.

Ao programa PADCT III/CEMAT, que sob o projeto Tecnologia para processamento de Alumínio, deu o suporte financeiro para o desenvolvimento experimental.

Ao SENAI de Santa Catarina, pela oportunidade de crescimento profissional.

SUMÁRIO

Lista de Tabelas	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de abreviaturas e símbolos	xi
Resumo	xiii
Abstract	xiv
I. Introdução	1
II. Revisão Bibliográfica	3
2.1 Soldagem do alumínio	3
2.2 O processo de soldagem MIG/MAG	4
2.3 Transferência metálica	6
2.3.1 Transferência por curto circuito	6
2.3.2 Modo de transferência goticular	7
2.3.3 Modo de transferência globular	7
2.3.4 Modo de transferência controlada pulsada	9
2.4 Porosidade na soldagem de alumínio	9
2.4.1 Formação da porosidade	12
2.4.2 Teor de hidrogênio na poça de fusão	14
2.5 Fatores que influenciam no grau de porosidade dos cordões	17
2.5.1 Consumíveis de soldagem	17
2.5.2 Parâmetros de soldagem	19
2.5.3 Condições de soldagem	21
2.5.4 Condições ambientais	24
2.6 Inspeção de porosidade	25
2.6.1 Inspeção por radiografia	25
2.6.2 Inspeção por gravimetria	26
2.6.3 Comparação das técnicas de inspeção de porosidade	27
III. Procedimento Experimental	28
3.1 Equipamentos de soldagem	28
3.1.1 Fonte de soldagem	29
3.1.2 Movimentação da tocha e fixação do corpo de prova	29
3.1.3 Tocha de soldagem	30
3.1.4 Shadowgrafia	30

3.2 Materiais consumíveis	31
3.2.1 Corpos de prova	32
3.2.2 Eletrodos	32
3.2.3 Gás de proteção	32
3.3 Parâmetros de soldagem constantes	32
3.4 Variáveis de soldagem	33
3.4.1 Métodos de limpeza	33
3.4.2 Configuração da junta de topo	34
3.4.3 Modos de transferência metálica	34
3.5 Procedimento de soldagem	35
3.6 Cálculo da diluição dos cordões de solda	38
3.7 Inspeção dos corpos de prova	39
3.7.1 Inspeção por radiografia	39
3.7.2 Inspeção por gravimetria	40
IV. Testes Preliminares	42
4.1 Verificação da aplicabilidade da técnica de inspeção por gravimetria utilizando duas balanças com resoluções distintas	42
4.2 Influência do comprimento e posição relativa da amostra na quantidade de volume de vazios em cordões	45
4.2.1 No modo de transferência goticular	45
4.2.2 No modo de transferência curto circuito	47
4.3 Análise de influência de variáveis de soldagem no percentual de volume de vazios em cordões	50
4.4 Nova análise de influência de variáveis de soldagem na quantidade de volume de vazios em cordões	52
4.5 Planejamento fatorial	54
4.5.1 Planejamento fatorial 3^3 envolvendo os modos convencionais de transferência	55
4.5.2 Planejamento fatorial 3^3 envolvendo a transferência controlada a UGPP	56
V. Resultados e Discussões	58
5.1 Resultados e análise dos testes com transferências metálicas convencionais	58
5.2 Resultados e análise da inspeção por radiografia dos testes com transferências convencionais	64

5.3 Análise comparativa das duas formas de inspeção: gravimetria X radiografia	67
5.4 Determinação dos parâmetros de soldagem no processo MIG pulsado que fornecem transferência controlada a UGPP	69
5.5 Análise dos resultados da inspeção por gravimetria dos testes com transferências metálicas em vôo livre	71
5.6 Testes de confirmação dos resultados obtidos nos experimentos 01 a 36	74
5.7 Prova da necessidade de realização de algum tipo de limpeza na superfície da chapa de alumínio a ser soldada	78
VI. Conclusões	80
VII. Propostas Para Trabalhos Futuros	81
VIII. Referências Bibliográficas	82

Lista de Tabelas

Tabela	página
2.1 - Metais e respectivos gases que formam poros na solidificação	10
3.1 - Composições químicas nominais do metal de base e do arame de adição	32
3.2 - Parâmetros de soldagem constantes aplicados na pesquisa	33
3.3 - Modos de transferência metálica e parâmetros de soldagem	34
4.1 - Parâmetros de soldagem adotados nos testes com transferência no modo goticular	43
4.2 - Valores de densidade em balança com resolução de 10^{-5} g	43
4.3 - Valores de densidades em balança com resolução 10^{-2} g	44
4.4 - Resultados dos testes com transferência goticular	45
4.5 - Parâmetros de soldagem usados nos testes com transferência por curto circuito	47
4.6 - Resultados dos testes com transferência em curto circuito	48
4.7 - Parâmetros de soldagem e resultados das inspeções por gravimetria dos testes A_1 a E_1	51
4.8 - Parâmetros de soldagem e resultados das inspeções por gravimetria dos testes D_1 a L_1	53
4.9 - Planejamento fatorial 3^3 envolvendo os modos convencionais de transferência metálica	55
4.10 - Planejamento fatorial 3^3 envolvendo transferência a UGPP	57
5.1 - Resultados das inspeções gravimétrica e radiográfica.	59
5.2 - Níveis de significância para as variáveis independentes dos testes 01 a 27, com inspeção por gravimetria	62
5.3 - Níveis de α para as variáveis independentes com inspeção por radiografia	65
5.4 - Parâmetros de soldagem dos testes com transferência a UGPP	69
5.5 - Resultados da inspeção gravimétrica para testes com transferência de gota em vôo livre	72
5.6 - Nível de significância para as variáveis independentes dos testes 10 a 36	72
5.7 - Condições variáveis e resultados dos testes de confirmação 37 a 48	75
5.8 - Nível de significância para as variáveis independentes dos testes 37 a 48	75
5.9 - Comparação dos percentuais de valores médios de volumes de vazios para os modos de transferência metálica	77

5.10 - Comparação dos percentuais de valores médios de volumes de vazios para as configurações das juntas de topo	77
5.11 - Condições de soldagem e resultados dos testes de verificação da necessidade de aplicação de limpeza na superfície da chapa	79

Lista de Figuras

Figura	página
2.1 - Detalhe da soldagem MIG/MAG	4
2.2 - Esquema do processo MIG/MAG	5
2.3 - Esquema da seqüência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG	6
2.4 - Seqüência de fotos de transferência goticular	7
2.5 - Seqüência de fotos de transferência no modo globular	8
2.6 - Mapa de modos de transferências em soldagem MIG de alumínio com eletrodo ER4043 com diâmetro de 1,2 mm e gás proteção argônio puro	8
2.7 - Esquemática da transferência pulsada	9
2.8 - Solubilidade do hidrogênio no alumínio	11
2.9 - Relação entre porosidade e propriedades mecânicas de cordões de solda em alumínio	12
2.10 - Comportamento das bolhas durante a solidificação	13
2.11 - Cargas e descargas de hidrogênio na poça de fusão	15
2.12 - Influência da junta e velocidade de soldagem na porosidade	21
2.13 - Posição de soldagem e formação de porosidade	23
2.14 - Esquema de ensaio por radiografia	26
3.1 - Esquema geral da bancada de testes	28
3.2 - Esquema do suporte de fixação para testes sem gás de purga, com dimensões de 300 x 200 x 30 mm	29
3.3 - Esquemas do suporte de fixação para testes com gás de purga, em perspectiva explodida (a) e montado (b), com dimensões de 295 x 190 x 25,4 mm	30
3.4 - Esquema geral da <i>shadowgrafia</i>	31
3.5 - Superfícies limpas nos corpos de prova	34
3.6 - Esquema da bancada de testes para determinação de parâmetros com transferência a UGPP	37
3.7 - Foto editada de cordão do teste 7	38
3.8 - Foto editada de cordão do teste 14	39
3.9 - Ilustração das pesagens ao ar e em água	40
4.1 - Gráficos ilustrando os resultados da Tabela 4.4	46

4.2 - Gráficos ilustrando resultados da Tabela 4.5	49
4.3 - Percentual de volume de vazios X modo de transferência metálica	50
5.1 - Gráficos de interações entre as variáveis de entrada	61
5.2 - Gráficos de percentuais médios de volume de vazios <i>versus</i> variáveis independentes	63
5.3 - Gráficos de números médios de poros visíveis <i>versus</i> variáveis independentes dos testes com transferências metálicas convencionais	66
5.4 - Relação entre volume de vazios e número de poros visíveis nos cordões	68
5.5 - Imagens e oscilograma mostrando o destacamento de uma gota por pulso [UGPP]	70
5.6 - Gráficos de valores médios percentuais de volumes de vazios <i>versus</i> variáveis independentes, incluindo transferência a UGPP	73
5.7 - Gráficos de valores médios percentuais de volumes de vazios <i>versus</i> variáveis independentes, testes de confirmação	76

Lista de abreviaturas e símbolos

α	nível de significância
μ	micro
ρ	densidade
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ac&Es	limpeza com acetona e escova
AJ	abertura da junta em mm
A&S	limpeza com água e sabão
ASME	american society of mechanical engineering
AWS	american welding society
CC +	corrente contínua com eletrodo no positivo
CC, cc	curto-circuito
CP	corpos de prova
d	diâmetro do arame eletrodo
DBCP	distância bico de contato peça
EFE	emissão foto elétrica
<i>E</i>	empuxo
g	grama
<i>g</i>	aceleração da gravidade
Glob	globular
Gt, Got	goticular
Hz	Hertz
I	corrente [A]
I _b	corrente de base [A]
I _m	corrente média [A]
I _m	corrente média [A]
I _p	corrente de pico [A]
K	constante de potência de soldagem
l/min	litros por minuto
LQ	limpeza química
MAG	Metal Active Gás
MB	metal de base
MIG	Metal Inert Gas
ml	milisegundos

mm	milímetros
°C	grau centígrado
P_{ar}	peso da amostra ao ar
P_{ag}	peso da amostra em água
t_b	tempo de base [ms]
TIG	Tungsten Inert Gas
t_p	tempo de pico [ms]
TS	técnica de soldagem
U	tensão [V]
UGPP	uma gota por pulso
<i>umcom</i>	junta de topo com abertura de 1,0 mm e com a aplicação de argônio como gás de purga
<i>umsem</i>	junta de topo com abertura de 1,0 mm
V_{am}	volume da amostra
V_{ld}	volume de líquido deslocado
V_{alim}	velocidade de alimentação do arame [m/min]
V_s, V_{sold}	velocidade de soldagem [mm/min]
VV	volume de vazios [%]
zero	junta de topo sem abertura

Morais, F. C., 2001, "Influência de Fatores Operacionais na Formação de Porosidade da Soldagem MIG de Alumínio", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Resumo

O alumínio tem aplicação cada vez maior na indústria metalúrgica mundial. Na soldagem em ligas de alumínio da série 5000, que têm boa soldabilidade reconhecida, é comum ocorrer a formação de porosidade no cordão de solda. Estudos mostram o hidrogênio como principal causa da porosidade nas ligas de alumínio. As maiores fontes de hidrogênio na soldagem de alumínio são os hidrocarbonetos, a água e os óxidos hidratados, normalmente presentes na superfície da chapa, que ao entrarem no arco elétrico são "quebrados" e liberam hidrogênio. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da condição superficial de chapas preparadas por diferentes métodos de limpeza, dos modos de transferência metálica e de diferentes configurações de junta de topo sobre o grau de porosidade do cordão em soldagem MIG de alumínio. Na inspeção de porosidade foram utilizadas as técnicas gravimétrica e radiográfica e feita comparação dos resultados obtidos nas duas formas inspeção, obtendo-se correspondência. As relações entre grau de porosidade dos cordões *versus* as variáveis modo de transferência metálica, método de limpeza e configuração de junta foram determinadas e classificadas em significância através da análise estatística de variância. Os resultados dos testes mostraram significativas influências do modo de transferência metálica e da configuração da junta de topo e influência não significativa do método de limpeza superficial no grau de porosidade dos cordões. Os melhores resultados foram obtidos nos testes com transferência metálica pulsada controlada e junta de topo com abertura de 1,0 mm protegida com gás de purga. Finalmente, foram feitos testes com chapa "suja", sem limpeza após a usinagem do chanfro, e constatou-se a real necessidade de realização de algum tipo de limpeza na chapa de alumínio antes de ser soldada.

Palavras-chave: soldagem MIG de alumínio; porosidade; inspeção; gravimetria; radiografia.

Morais, F. C., 2001, "The Influence of Operational Factors on Porosity Formation in Aluminum MIG Welding", MSc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

The aluminum alloys have larger application in the world-wide metallurgic industry. When welding aluminum alloys of series 5000, which are recognized as of good weldability, porosity formation in the weld bead is common to occur. Studies show that porosity is caused by hydrogen. In the aluminum welding, the hydro-carbons, water and hydrated oxides present on the plate surfaces, turn to be the largest hydrogen sources after having been "broken" at the entrance in the electric arc (liberating hydrogen). The objective of this work is to evaluate the influence of the plate surface conditions, prepared using different cleaning methods, metal transfer modes and different butt-joint groove preparations on the porosity level of the aluminum MIG welded beads. The gravimetric and radiographic techniques were used on the quantitative assessment of the porosity level, getting correspondence between the inspection methods. The relationship between the level of the bead porosity and several modes of metal transfer, cleaning methods and joint configurations has been determined and classified in significance through the analysis of variance method. The results of the tests have shown significant influences of the metallic transfer mode and of joint configuration on porosity formation, yet no significant influence of the superficial cleaning method was found. The best results were obtained with pulsed controlled metal transfer in combination with a groove gap of 1.0 mm and using the back gas purging protection. Finally, tests with "dirty" as machined plate evidenced the real necessity of applying some type of cleaning on the aluminum plate before welding.

Keywords: aluminum MIG welding; porosity; gravimetric inspection; radiographic inspection

CAPÍTULO I

Introdução

A soldagem do alumínio, consolidada na década de 40 nos países desenvolvidos, esteve desconhecida por muito tempo no Brasil, tendo aqui sua prática iniciada em meados dos anos 70 (Alcan, 1983). Na virada do milênio, vários setores industriais com a aplicação da tecnologia de soldagem de alumínio apresentam crescimento significativo. Este grande potencial de crescimento da soldagem MIG (Metal Inerte Gás) de alumínio deve-se à aplicação cada vez mais difundida do metal nos diversos setores da indústria metal-mecânica brasileira. A soldagem de chapas e perfis de alumínio usados nas indústrias é feita principalmente através do processo MIG, com diversos métodos de preparação das superfícies das chapas, com parâmetros de soldagem variados e em várias configurações de juntas.

O controle da qualidade das soldas é de responsabilidade de todos os envolvidos nas operações de soldagem e abrange decisões de armazenamento, projeto e preparação das juntas, seleção dos equipamentos de soldagem e especificação dos procedimentos de soldagem, até que o produto acabado seja aceito pelo consumidor. É muito importante que a solda seja realizada com sucesso, pois a reparação de defeitos em solda é muito cara e compromete a capacidade de carga da junta soldada.

Os defeitos encontrados em soldagem de alumínio podem ocorrer por uma grande variedade de causas, associados aos métodos de preparação e limpeza do metal de base ou procedimentos e técnicas de soldagem inadequados. As principais falhas que são usualmente encontradas na soldagem de alumínio incluem trincas de cratera ou longitudinal, penetração incompleta, falta de fusão e porosidade (MacArthur, 1975).

Aprimoramentos na soldagem de alumínio vêm sendo estudados continuamente no LAPROSOLDA da UFU. Assim, a proposta deste trabalho é dar a continuidade a essa linha de pesquisa, através da investigação da influência de parâmetros de soldagem na qualidade dos cordões de solda MIG de alumínio, identificando peculiaridades do processo.

Desta forma, propõe-se como objetivo principal desta dissertação: identificar a influência de fatores operacionais na formação de porosidades da soldagem MIG de alumínio e, assim, contribuir para o entendimento e aprimoramento deste defeito tão comum e indesejável.

Em sua composição, a dissertação foi dividida em oito capítulos, iniciando com este Capítulo, que procura estabelecer a motivação, os objetivos e limites para o trabalho proposto.

O Capítulo 2 consiste da revisão bibliográfica, que fornece os fundamentos do processo MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), ampla revisão bibliográfica da formação de porosidade em soldagem de ligas de alumínio, além de apresentar técnicas de inspeção de porosidade.

No Capítulo 3 são apresentados os equipamentos, a metodologia experimental e todos os procedimentos de montagem da bancada experimental, execução das soldas e metodologias de inspeção dos cordões de solda.

O Capítulo 4 consta dos testes preliminares, realizados com os objetivos de analisar a viabilidade de uso de distintas balanças na inspeção de porosidade por gravimetria e de identificar os parâmetros investigados de forma sistemática na dissertação, apresentados na forma do planejamento experimental.

O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos, comparando-os com os de outros autores.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho.

O Capítulo 7 traz proposições de temas para trabalhos futuros que complementem as conclusões obtidas e permitam controle de formação de porosidade nos cordões de solda de ligas de alumínio.

O Capítulo 8 apresenta a lista das referências bibliográficas usadas e consultadas na pesquisa.

O Capítulo 2 consiste da revisão bibliográfica, que fornece os fundamentos do processo MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), ampla revisão bibliográfica da formação de porosidade em soldagem de ligas de alumínio, além de apresentar técnicas de inspeção de porosidade.

No Capítulo 3 são apresentados os equipamentos, a metodologia experimental e todos os procedimentos de montagem da bancada experimental, execução das soldas e metodologias de inspeção dos cordões de solda.

O Capítulo 4 consta dos testes preliminares, realizados com os objetivos de analisar a viabilidade de uso de distintas balanças na inspeção de porosidade por gravimetria e de identificar os parâmetros investigados de forma sistemática na dissertação, apresentados na forma do planejamento experimental.

O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos, comparando-os com os de outros autores.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho.

O Capítulo 7 traz proposições de temas para trabalhos futuros que complementem as conclusões obtidas e permitam controle de formação de porosidade nos cordões de solda de ligas de alumínio.

O Capítulo 8 apresenta a lista das referências bibliográficas usadas e consultadas na pesquisa.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

2.1 Soldagem do alumínio

O alumínio é um elemento metálico com grande campo de aplicação, que vai desde utensílios de cozinha até aplicações aeroespaciais. É empregado nas indústrias metal-mecânica, química e elétrica, na arquitetura, transporte e embalagens de diversos produtos. As ligas de alumínio são classificadas em sete grupos, de acordo com os elementos básicos de sua composição química: alumínio puro, alumínio-cobre (Al-Cu), alumínio-manganês (Al-Mn), alumínio-silício (Al-Si), alumínio-magnésio (Al-Mg), Al-Mg-Si e alumínio-zinco (Al-Zn). Maiores detalhes podem ser encontrados na literatura corrente, como Alcan (1993) e AWS (1996).

Com o aumento do uso do alumínio e suas ligas em diversas aplicações, há cada vez mais pesquisas nas áreas de fabricação desse material, principalmente na soldagem. Por muito tempo o alumínio foi considerado um material de difícil soldagem. Porém, o emprego de modernos processos possibilita a obtenção de grande produtividade em uniões de chapas de alumínio por soldagem.

Um aspecto peculiar na soldagem do alumínio é o fato de ocorrer, com grande facilidade, a reação do alumínio com o oxigênio (O_2), formando a alumina (Al_2O_3), óxido com dureza próxima à do diamante e com ponto de fusão elevado, de $2038^\circ C$, bem acima do alumínio, que é de $660^\circ C$. A alumina apresenta uma textura porosa com grande facilidade de retenção de umidade e sujeira, que contribuem para a contaminação do cordão de solda. Assim, torna-se importante a quebra da alumina e a sua remoção para que o material possa ser satisfatoriamente unido por processos de soldagem.

A remoção da camada de alumina pode ser feita de três formas distintas (Alcan, 1993): por ação mecânica, limpeza química e ataque catódico. A remoção por ação mecânica é a mais simples, porém pouco eficiente, sendo feita momentos antes da soldagem por meio de esmerilhamento ou escovamento. A limpeza química é feita pela aplicação de bases e/ou ácidos. A limpeza por ataque catódico é realizada diretamente no processo de soldagem com corrente contínua, com eletrodo no pólo positivo do circuito elétrico [CC^+]. Nesta situação, o arco remove a camada de óxido de alumínio e permite a coalescência das bordas da junta e do metal de enchimento (Altshuller, 1998).

Outro fator que exerce influência na soldagem do alumínio é a sua condutividade térmica, que é quase cinco vezes maior que a do aço. Isto significa que para elevar localmente a temperatura de uma mesma massa é requerido cinco vezes mais calor para o alumínio que para o aço (AWS, 1996 e Alcan, 1993), o que compensa a diferença entre as temperaturas de fusão e, por isso, o alumínio necessita tanto quanto ou mais calor que o aço para ser soldado (Alcan, 1993). Esta alta condutividade térmica, aliada ao alto coeficiente de expansão linear e à necessidade de maior aporte de calor, pode causar consideráveis distorções durante a soldagem, sendo necessária aplicação de velocidades de trabalho mais altas possíveis, quando da soldagem do alumínio com fontes de calor muito intensas (Alcan, 1993).

A maioria dos processos de soldagem pode ser utilizada na soldagem do alumínio, como por exemplo: soldagem com eletrodo revestido, MIG, TIG (Tungsten Inert Gas), plasma, etc. Cada processo apresenta vantagens e limitações, sendo selecionados de acordo com a qualidade e produtividade exigida para a junta a ser soldada.

2.2 O Processo de soldagem MIG/MAG

O processo MIG/MAG é a soldagem a arco elétrico com atmosfera gasosa, onde a união das peças metálicas ocorre pelo aquecimento destas por meio de um arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. O arco e a região da solda são protegidos contra contaminações da atmosfera por um gás ou mistura de gases inertes. No processo MIG são usados argônio (Ar) e/ou hélio (He), e no caso do processo MAG é usado um gás ativo, às vezes misturados com gases inertes. A Figura 2.1 mostra detalhes do processo MIG/MAG de soldagem.

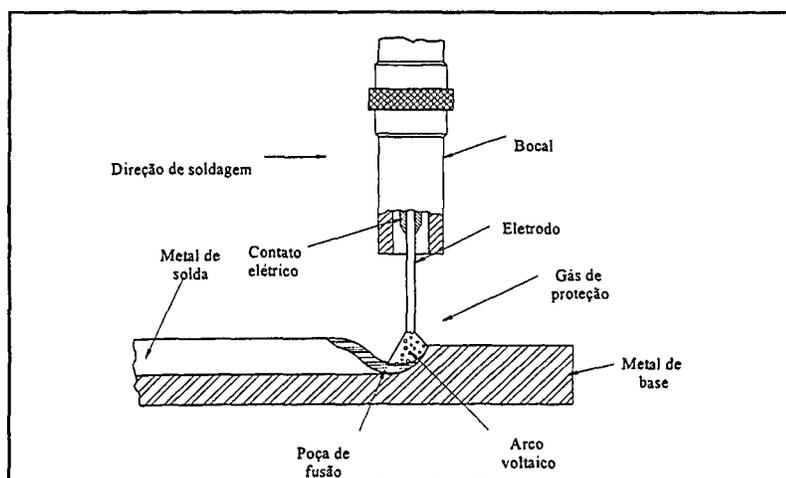


Figura 2.1 - Detalhe da soldagem MIG/MAG (Miranda, 1999).

O processo MIG, por atender às maiores necessidades das indústrias, como qualidade da solda e alta produtividade, é um dos mais empregados na soldagem do alumínio, sendo o preferido em aplicações estruturais. Pode ser mecanizado com facilidade através de sistemas semi-automático ou automático e, assim, a soldagem MIG de alumínio apresenta alta produtividade, possui elevada taxa de deposição e alto fator de trabalho do soldador. Além disso, possui as seguintes vantagens: grande versatilidade dos tipos, das espessuras e das posições das chapas soldadas e dispensa o uso de fluxos de soldagem.

O processo MIG apresenta algumas dificuldades, tais como: sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de soldagem, ou seja, ajuste rigoroso dos parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para a solda, baixa variedade de consumíveis e equipamentos e manutenção de custos elevados (Blewett, 1982 e Biloni et. al., 1981). A Figura 2.2 mostra o esquema geral do processo MIG/MAG.

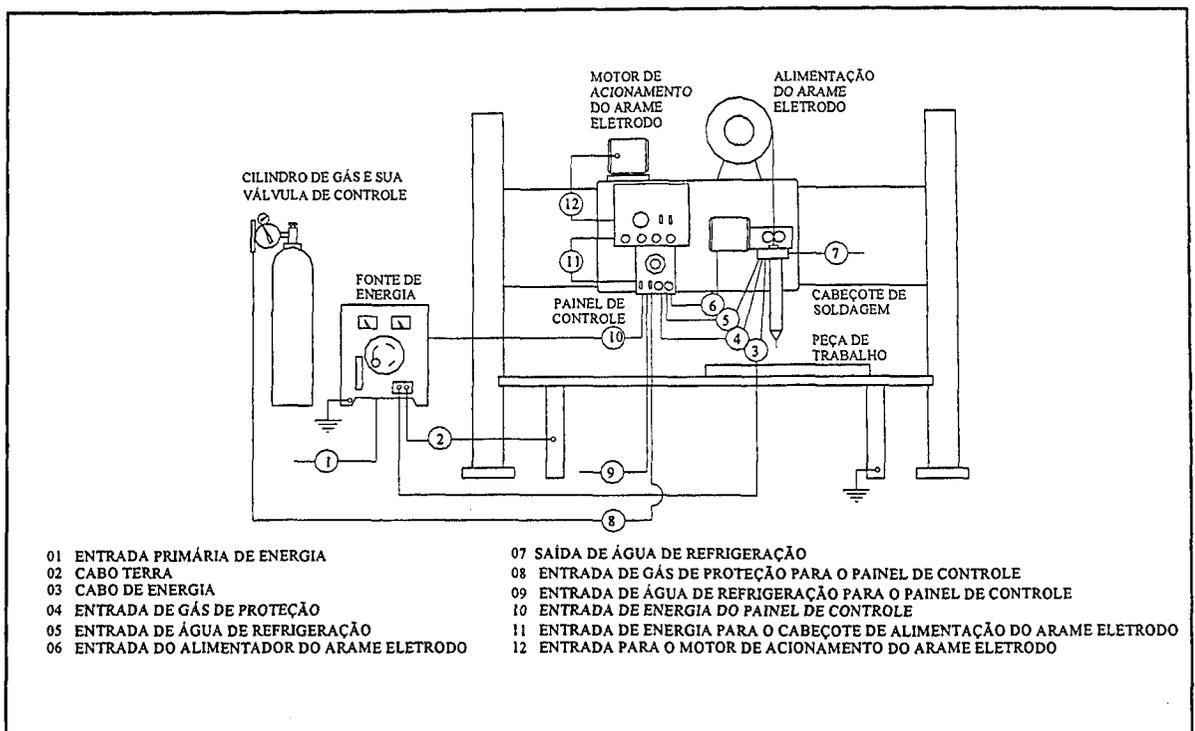


Figura 2.2 - Esquema do processo MIG/MAG (AWS, 1991)

Durante a soldagem MIG do alumínio, com o intuito de assegurar a proteção adequada do arco e da poça de solda com relação a contaminações externas, a tocha deve ser posicionada inclinada em um ângulo de 10° a 15° em relação ao eixo vertical e apontar no sentido do deslocamento (Biloni et al, 1981; AWS, 1991 e Alcan, 1993). Maiores detalhes sobre o processo de soldagem MIG/MAG pode ser encontrado com facilidade na literatura corrente, como na AWS (1996).

2.3 Transferência metálica

A forma na qual a gota é transferida do eletrodo para a poça de fusão define o modo de transferência metálica e é muito importante na soldagem MIG/MAG, pois afeta muitas características do processo e do cordão de solda produzido como, por exemplo, a quantidade de gases (principalmente hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) absorvidos pelo metal fundido, a estabilidade do arco, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e os níveis de respingos e de porosidade gerados. De uma forma simplificada, pode-se considerar que existem quatro formas básicas de transferência de metal de adição do eletrodo para a peça, sendo três modos convencionais de transferência metálica: por curto-circuito, globular e goticular (também chamada de “spray” ou aerossol) e o modo de transferência metálica controlada por corrente pulsada.

2.3.1 Transferência por curto-circuito

Conforme citado na literatura (AWS, 1991; Scotti, 1998 e Figueiredo, 2000), a transferência por curto-circuito é o modo no qual as gotas em transferência tocam a poça de fusão antes do destacamento. As gotas são, então, sugadas para a poça devido à ação da tensão superficial, formando um menisco entre a ponta sólida do eletrodo e a poça de fusão. A transferência metálica é completada após o rompimento desta conexão. Este tipo de transferência ocorre para tensão e corrente de soldagens baixas, sendo utilizada em todas as posições de soldagem, principalmente em chapas finas. A Figura 2.3 mostra, de forma esquemática, uma seqüência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto-circuito.

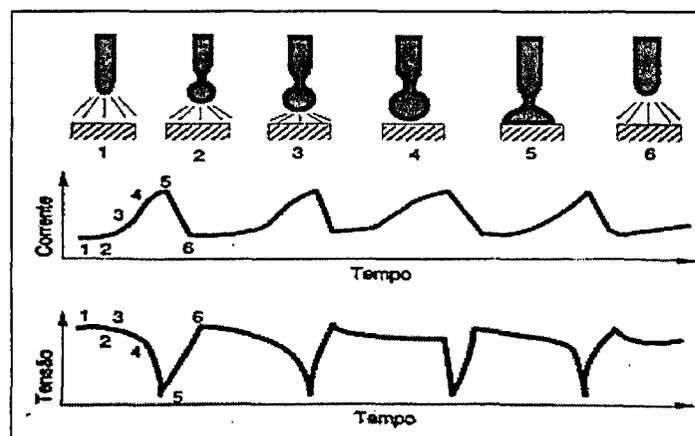


Figura 2.3 – Esquema da seqüência da variação da tensão e corrente de soldagem durante a transferência por curto-circuito no processo MIG/MAG (Marques, 1991).

2.3.2 Modo de transferência goticular

A transferência goticular ocorre quando as gotas são destacadas antes que o seu diâmetro alcance o diâmetro do eletrodo. A ponta do eletrodo pode se tornar afunilada durante a formação das gotas, mas o comprimento deste afunilamento é curto, sendo menor ou igual ao diâmetro do eletrodo (Scotti, 1998). A taxa de transferência é normalmente maior que a dos outros modos de transferência. Figueiredo (2000) considerou como transferência goticular para soldagem de alumínio as transferências de gotas com diâmetro médio até $1,15 \times d$ (sendo d o diâmetro do arame eletrodo).

O modo goticular ocorre para elevadas tensão e corrente de soldagens. Devido à elevada corrente de soldagem, este modo de transferência não é adequado para soldagem de chapas finas e a sua utilização fora da posição plana pode ser problemática (Norrish et al, 1988). A Figura 2.4 mostra uma seqüência de fotos desse modo de transferência metálica na soldagem de alumínio.

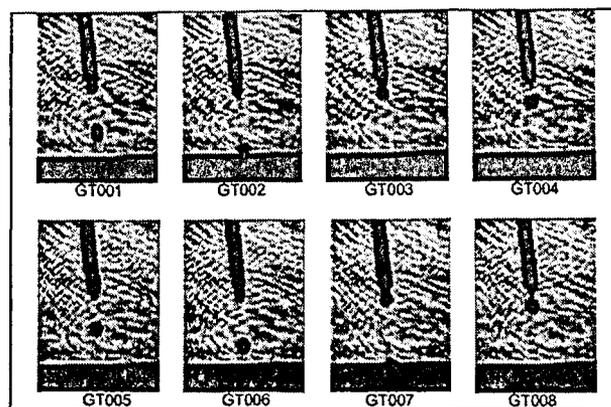


Figura 2.4 - Seqüência de fotos de transferência goticular (Figueiredo, 2000)

2.3.3 Modo de transferência globular

De um modo geral, a literatura (Norrish et al, 1988; AWS, 1991 e Scotti, 1998) define a transferência globular como o modo de transferência no qual as gotas atingem, antes dos destacamentos, diâmetros bem maiores que o diâmetro do eletrodo. A taxa de transferência é baixa e não ocorre contato entre as gotas em crescimento e a poça fundida. O comprimento do eletrodo normalmente se alonga progressivamente enquanto a gota cresce, reduzindo-se drasticamente, após cada destacamento. Este modo de transferência ocorre para valores intermediários de tensão e corrente de soldagens e caracteriza-se por produzir nível de

respingo relativamente elevado (Figueiredo, 2000). A Figura 2.5 apresenta uma seqüência de fotos mostrando uma transferência no modo globular na soldagem de alumínio.

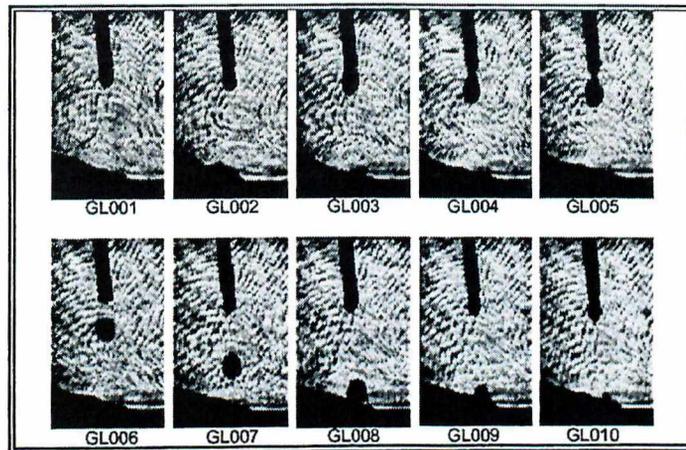


Figura 2.5 – Seqüência de fotos de transferência no modo globular (Figueiredo, 2000)

A Figura 2.6 mostra um mapa de modos de transferência metálica obtido por Figueiredo (2000) para soldagem MIG com eletrodo ER4043 de diâmetro de 1,2 milímetros [mm] e gás argônio comercialmente puro. Nesse mapa, verificam-se regiões bem definidas e de transições dos modos de transferência, conforme indicações na legenda. As regiões I e II representam parâmetros com os quais soldagens não foram possíveis serem realizadas. Com os parâmetros da região I o comprimento do arco cresce muito. Na região II ocorrem condições instáveis de soldagem, chegando inclusive a apagar o arco e enrolar o arame eletrodo na ponta do bico de contato (Figueiredo, 2000).

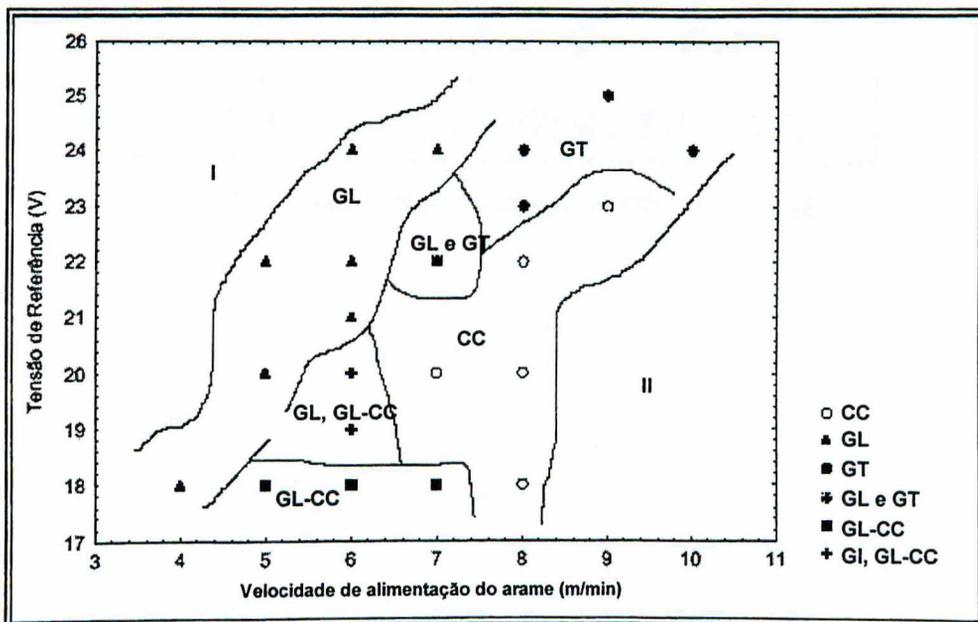


Figura 2.6 - Mapa de modos de transferências em soldagem MIG de alumínio com eletrodo ER4043 de diâmetro de 1,2 mm e gás proteção argônio puro (Figueiredo, 2000).

2.3.4 Modo de transferência controlada pulsada

Além dos modos de transferências convencionais, existe ainda a transferência metálica pulsada controlada, tipo de transferência onde se busca o modo goticular com correntes médias baixas. Essa transferência é conseguida pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares, um inferior à corrente de transição de transferência por curto-circuito para vôo livre, e outro superior a esta. A gota inicia sua formação durante o período de base, em que a intensidade de corrente é baixa e mantém o arco aceso. A gota cresce durante o período de pico, em que o valor da corrente é elevado, sendo transferida no final desse período. Este modo de transferência é considerado ideal quando se consegue Uma Gota Por Pulso [UGPP] (Vilarinho, 2000). A Figura 2.7 mostra um oscilograma de corrente mostrando os instantes de formação e destacamento da gota.

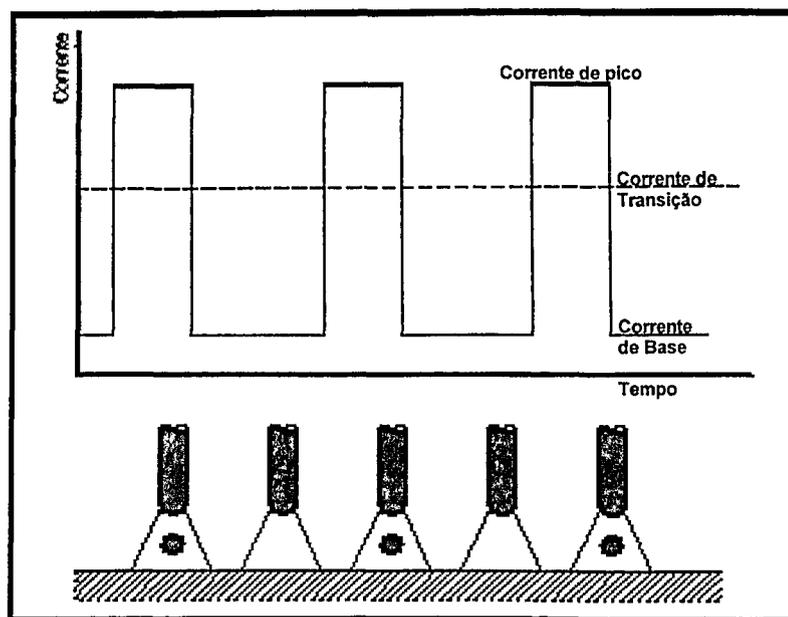


Figura 2.7 – Esquemática da transferência pulsada (Norrish et al, 1992).

2.4 Porosidade na soldagem de alumínio

Os defeitos encontrados em soldagem MIG de alumínio podem ocorrer por uma grande variedade de causas, associadas principalmente aos consumíveis, parâmetros, procedimentos, técnicas de soldagem e condições ambientais de trabalho. As principais falhas usualmente encontradas na soldagem de alumínio incluem trincas de cratera ou longitudinal, penetração incompleta, falta de fusão e porosidade (MacArthur, 1975).

Porosidade é definida como um conjunto de poros ou vazios internos ou superficiais à solda, podendo estar na forma agrupada, alinhada ou vermiforme. Os poros, ao se depositarem no interior do cordão de solda, dependendo da quantidade e concentração em determinadas regiões, tornam-se indesejáveis por acarretarem perda de resistência mecânica em peças submetidas a carregamento estático, pela diminuição da seção transversal. Em peças sob carregamento dinâmico os tornam-se pontos de concentração de tensões, acarretando diminuição de resistência à fadiga. Assim, a porosidade compromete a qualidade da junta soldada e, em alguns casos, é necessária sua remoção, elevando os custos de produção (Alcan, 1993).

Os poros se formam nos metais principalmente devido à variação de solubilidade dos gases submetidos aos efeitos do ciclo térmico, da fusão à solidificação do metal, gerando bolhas de gás em fase independente. O hidrogênio causa porosidade no alumínio e suas ligas devido à brusca queda da solubilidade com a diminuição da temperatura de fusão à ambiente (Kammer et al, 1963, Aluminum Association, 1997). Outros gases (O_2 e N_2) não sofrem queda tão brusca de solubilidade no alumínio quanto o hidrogênio (Shore, 1970). As maiores fontes de hidrogênio para a poça de fusão são os hidrocarbonetos, a água e os óxidos hidratados que, ao entrarem no arco elétrico, são “quebrados” e liberam hidrogênio. Os principais gases que contribuem na formação de porosidade em diversos materiais estão na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Metais e respectivos gases que formam poros na solidificação (Lucas, 1999).

MATERIAL	GÁS
Aço carbono-manganês	Hidrogênio, Nitrogênio e Oxigênio
Aços inoxidáveis	Hidrogênio
Alumínio e suas ligas	Hidrogênio
Cobre e suas ligas	Hidrogênio e Nitrogênio
Níquel e suas ligas	Nitrogênio

A Figura 2.8 mostra a brusca queda de solubilidade do hidrogênio no alumínio, que chega a ser 20 vezes menor em sólido que em líquido na temperatura de $660^{\circ}C$, ponto de fusão do metal. A solubilidade varia de 0,036 centímetro cúbico [cm^3] de hidrogênio para cada 100 gramas [g] de alumínio no sólido, para $0,7\text{ cm}^3/100g$ no líquido (Alcan, 1993). A solubilidade máxima do hidrogênio alcança valor máximo em, aproximadamente, 85% do ponto de ebulição do alumínio. Se a temperatura é elevada ainda mais, aproximando do ponto de ebulição, a solubilidade do hidrogênio no alumínio decresce a zero (Ishchenko et al, 1994).

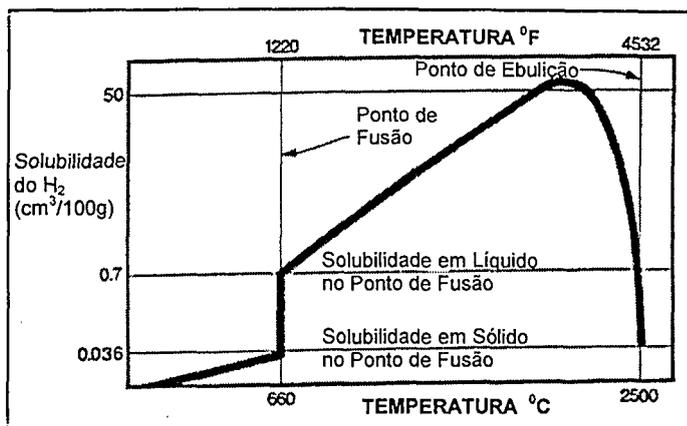


Fig. 2.8 - Solubilidade do hidrogênio no alumínio (Aluminum Association, 1997).

A solubilidade do hidrogênio no alumínio mostra-se independente do processo de soldagem utilizado, por exemplo, TIG ou MIG, e das variáveis de soldagem, apesar de se mostrar marcadamente dependente da composição da liga soldada. A maioria das ligas se mostrou hábil para fixar mais hidrogênio no sólido ou solução sólida supersaturada que o alumínio puro, porém, esses valores, que se mostraram importantes no nível final de porosidade, não puderam ser quantificados pela falta de conhecimento do teor inicial de hidrogênio nas chapas soldadas (Woods, 1974).

A qualidade da junta soldada pode ser definida pela presença de poros no cordão de solda. Uma vez identificada, a porosidade pode ser avaliada de acordo com o tamanho e distribuição. A norma que regulamenta os requerimentos mínimos quanto à porosidade para aplicações estruturais é a AWS D1.2-90.

A porosidade, quanto à sua distribuição, pode ser classificada em (Hettes et al, 1998).

1. Porosidade isolada;
2. Porosidade uniformemente distribuída;
3. Porosidade agrupada; e
4. Porosidade superficial.

As propriedades mecânicas do metal soldado podem ser adversamente afetadas pela porosidade, por causa da perda na área da seção transversal e pela concentração de tensão associadas a essa descontinuidade (Shore, 1970). A Figura 2.9 mostra a relação entre porosidade e propriedades mecânicas de ligas de alumínio soldadas (Kammer et al, 1963). Verifica-se pela figura que a resistência à tração cai bruscamente após um certo grau de porosidade no cordão de solda; já o limite de escoamento e o alongamento percentual diminuem, de forma gradativa, com o aumento de vazios no cordão.

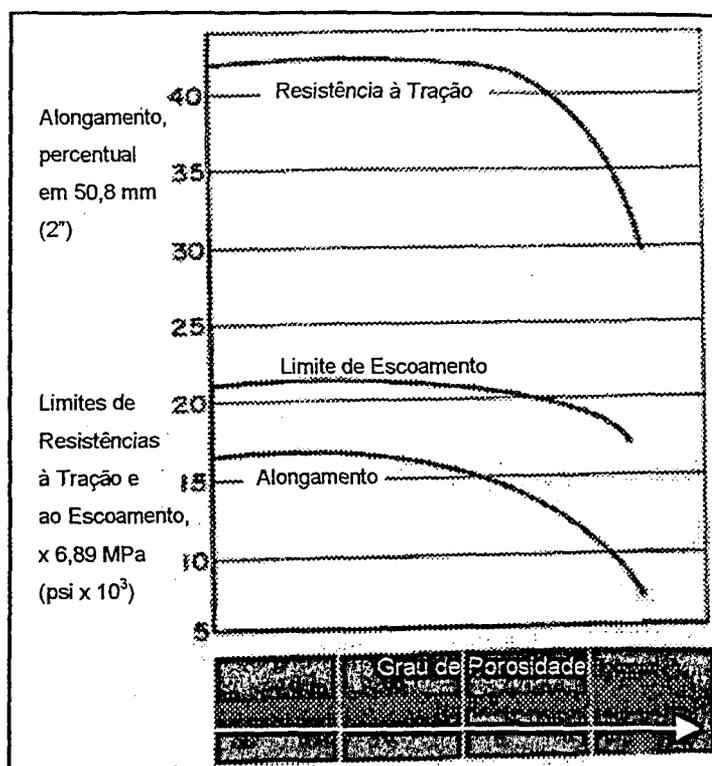


Figura 2.9 - Relação entre porosidade e propriedades mecânicas de cordões de solda em alumínio (Kammer et al, 1963).

2.4.1 Formação da porosidade

Na solidificação, um certo volume de gás é retido efetivamente em solução sólida no metal solidificado, outra parcela é retida na forma de porosidade secundária, de aproximadamente $38,1 \mu\text{m}$ ($1,5 \mu$ polegada) de diâmetro e, finalmente, outro volume de gás remanescente forma os poros interdendríticos ou grosseiros. Juntos, esses gases representam o total de volume gasoso retido pelo metal solidificado (Talbot et al, 1963 e Woods, 1974).

Na ausência de poros grosseiros, o gás retido no metal sólido fica dividido entre solução sólida e porosidade secundária, que são poros pequenos e esféricos, que prejudicam as propriedades do metal. Os poros secundários compreendem numerosas cavidades esféricas, com $25,4$ a $50,8 \mu\text{m}$ (1 a 2μ polegadas) de diâmetro, e que estão presentes mesmo que a quantidade de hidrogênio presente no processo seja baixa (Talbot et al, 1963)

O poro interdendrítico ou grosseiro só irá se formar se a quantidade de hidrogênio no metal for suficientemente alta. Esse poro tem forma irregular e freqüentemente é visível a olho nu,

quando inspecionado por macrografia (Talbot et al, 1963).

Howdem, citado por Woods (1974), relata que porosidade grosseira no metal solidificado pode resultar de duas formas. Primeiro, pela rejeição do gás pela frente de solidificação ou, segundo, no caso de contaminação muito mais alta, pela nucleação de bolhas posteriormente à frente de solidificação, com essas bolhas sendo congeladas na solda.

Slivinskii et al (1994) citam a existência de cinco estágios para a formação de poros grosseiros, que foram identificados na seguinte ordem:

1. Decomposição de compostos em moléculas gasosas através do calor gerado pelo arco;
2. Solubilização do gás pelo metal fundido;
3. Formação de núcleos de bolhas de gás estáveis pela diminuição da temperatura do metal fundido e diminuição da solubilidade do gás no metal;
4. Crescimento das bolhas no metal; e
5. Captura das bolhas pela frente de solidificação e aprisionamento na forma de poros.

No caso da rejeição do gás pela frente de solidificação em fundição, Campos Filho et al (1978) comentam que, conforme a velocidade de solidificação, as bolhas podem se comportar de quatro formas, conforme representação na Figura 2.10, sendo esse o caso da solidificação em fundição:

1. Flutuar, coletando gases no processo, e escapar do líquido para a superfície, recombinao e desaparecendo na atmosfera;
2. Mover-se com a frente de solidificação, crescendo até ficar aprisionada na superfície (Fig. a, porosidade superficial);
3. Ser incorporada na frente de solidificação, para crescer como uma bolha alongada (Fig. b, porosidade sub-superficial); e
4. Ser rapidamente ultrapassada pela frente de solidificação ficando aprisionada (Fig. c, porosidade interna).

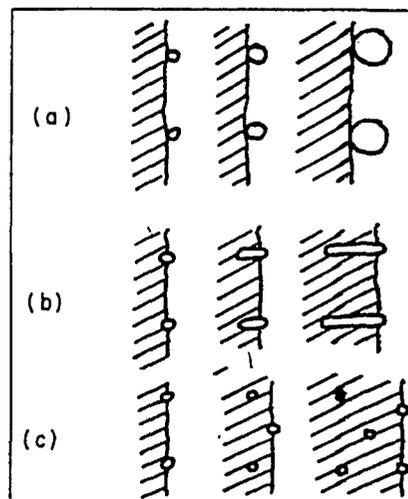


Fig. 2.10 - Comportamento das bolhas durante a solidificação (Campos Filho et al, 1978).

De acordo com o trabalho de Woods (1974), a quantidade de poros formados na solidificação do cordão de solda em alumínio depende de quatro fatores:

1. Efetiva solubilidade sólida do hidrogênio no metal soldado;
2. Teor de hidrogênio na poça de fusão;
3. Taxa de hidrogênio absorvido pelo metal; e
4. Velocidade que as bolhas podem escapar.

Considerando esses termos independentes, uma liga de alumínio que terá menor nível de porosidade será aquela que foi bem desgaseificada, que tem alta solubilidade sólida ao hidrogênio e um baixo coeficiente de absorção, e que permita maior escape das bolhas. Se um metal contém mais gás que o limite de solubilidade sólida de hidrogênio poderia solidificar, porosidade grosseira irá se formar (Woods, 1974).

2.4.2 Teor de hidrogênio na poça de fusão

As maiores fontes de hidrogênio na soldagem de alumínio são os hidrocarbonetos, a água e os óxidos hidratados presentes nas superfícies da chapa e do arame de adição que, ao entrarem no arco elétrico, são quebrados e liberam hidrogênio (Woods, 1974; Kuriyama et al, 1975 e Devletian et al, 1983).

Já Hooijmans et al (1996) preferem classificar as fontes de hidrogênio como resultantes dos consumíveis, fatores internos, e dos gases introduzidos durante a soldagem, fatores externos:

1. Fatores internos: gases dissolvidos no metal de base ou no arame de adição, filmes de óxido ou contaminações da superfície do metal de base ou do arame de adição;
2. Fatores externos: contaminação dos equipamentos de soldagem (hidrogênio no gás de proteção, roletes e tocha), procedimentos de soldagem (condições de soldagem, posição de soldagem e formato da junta) e a ação da atmosfera (umidade atmosférica ou vento, que podem provocar falhas na proteção gasosa).

Quanto maior a presença de hidrogênio provindo de fatores internos, menor a tolerância por hidrogênio advindo dos fatores externos.

O teor de hidrogênio na poça de fusão, em função do tempo, é resultado de processos mutuamente independentes: cargas e descargas de hidrogênio (Hooijmans et al, 1997). A Figura 2.11 mostra esquema representativo das cargas e descargas de hidrogênio na poça de fusão em soldagem TIG. Para o processo MIG, nas cargas, acrescenta-se o hidrogênio que acompanha a gota transferida.

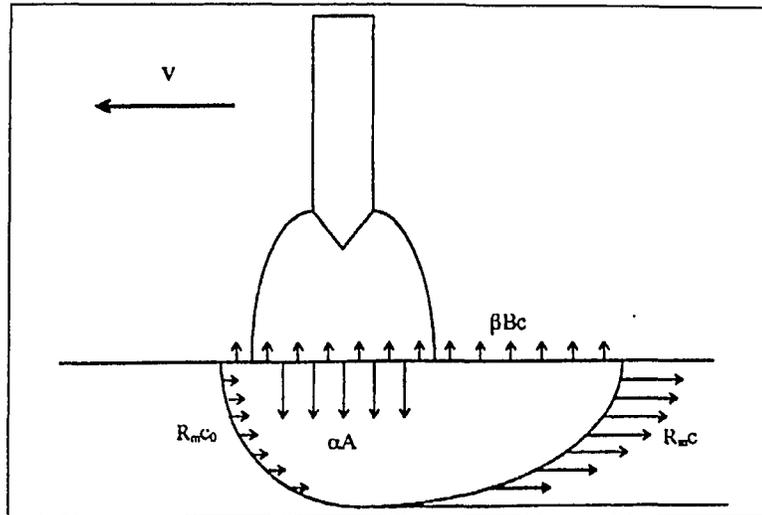


Fig. 2.11 - Cargas e descargas de hidrogênio na poça de fusão (Hooijmans et al, 1997)

De acordo com o esquema da Figura 2.11, o teor de hidrogênio presente na poça de fusão é função de:

O hidrogênio que entra na poça de fusão, que pode ser dividido em três partes:

1. Hidrogênio absorvido sob o arco ($\alpha.A$);
2. Hidrogênio que entra na poça devido à fusão do material ($R_m c_0$); e
3. Hidrogênio que acompanha a gota transferida (caso do processo MIG).

O hidrogênio que sai da poça de fusão, que pode ser dividido em duas partes:

1. Hidrogênio que deixa o material através da superfície superior da poça de fusão ($\beta B c$) e
2. Hidrogênio que deixa a poça por difusão através do contorno da poça para material de base sólido ($R_m c$), termo desprezível comparativamente ao termo 1.

Conforme Hooijmans et al, as grandezas físicas variáveis que estão envolvidas nas cargas e descargas de hidrogênio da poça de fusão são:

- t – tempo [s];
- W – peso do metal líquido na poça de fusão [g];
- c – concentração de hidrogênio no metal líquido [% W];
- α - coeficiente de absorção [$g.m^{-2}.s^{-1}$];
- A – área da interface entre o metal líquido e o arco [m^2];
- β - coeficiente de desabsorção, fator de proporcionalidade dependente da temperatura do metal líquido;
- B – área da interface entre o metal líquido e o gás atmosférico;
- R_m – taxa de fusão [$g.s^{-1}$], que é igual à taxa de solidificação;
- c_0 – concentração de hidrogênio inicial no material [% W]; e
- η - constante representando a fração de hidrogênio resfriada durante a solidificação.

A partir dessas considerações, Hooijmans et al (1997) desenvolveram um modelo matemático para estimar a quantidade de hidrogênio presente na poça de fusão, dada por c_e :

$$c_e = \frac{\alpha A + R_m C_o}{\beta B + \eta R_m} \quad (2.1)$$

Com a ajuda da Equação 2.1 é possível prever qual a concentração de hidrogênio no metal líquido para uma dada situação. No seu trabalho Hooijmans et al (1997) chegam às seguintes conclusões:

1. Durante a soldagem TIG, grandes quantidades de hidrogênio podem ser absorvidas pela poça de fusão;
2. Grande parte do hidrogênio absorvido pela poça de fusão durante a soldagem deixa a solda imediatamente após a extinção do arco elétrico;
3. O modelo de absorção desenvolvido é válido em uma grande faixa de parâmetros de soldagem e pode ser usado para estimar o nível de hidrogênio em cordões produzidos sob condições reais de soldagem.

Vale lembrar que para soldagem MIG, entre as fontes de hidrogênio para a poça de fusão, está presente o gás dissolvido no arame de adição, e que não está presente como fonte de contaminação na soldagem TIG.

Woods (1974) aponta outra razão para que a absorção de hidrogênio se mostre mais rápida na soldagem MIG que na TIG. Isso se deve parcialmente aos parâmetros e diferenças físicas entre os dois sistemas de soldagem e parcialmente à contribuição extra do gás pela reação entre a gota fundida e o hidrogênio presente no gás de proteção.

Woods (1974) também revela que grandes volumes de gás podem ser absorvidos pela poça de fusão a partir do arco de soldagem e que o processo de absorção é governado principalmente pelo complexo gradiente térmico que existe através da superfície da poça de fusão. Logo abaixo do arco de soldagem, na poça de fusão, existe uma zona central muito quente. Essa zona está em temperatura muito acima da média da poça de fusão, e é onde acontece a rápida absorção de grande quantidade de gás. Em cordões de solda, a absorção gasosa pode ser diminuída reduzindo-se a quantidade de gás contaminante na poça de fusão.

A apreensão do gás pode ser evitada fornecendo tempo suficiente para as bolhas gasosas se formarem e fluírem para fora da poça (Woods, 1974). No processo MIG, os principais parâmetros associados ao tempo de escape das bolhas da poça de fusão são: posição, velocidade e corrente de soldagens, velocidade de alimentação do arame e pré e pós-aquecimento. As influências de cada um dos parâmetros citados no tempo de escape das bolhas são analisadas a seguir.

2.5 Fatores que influenciam no grau de porosidade dos cordões

2.5.1 Consumíveis de soldagem

Entende-se por consumível de soldagem os produtos que são gastos durante o processo de soldagem. A seguir, serão vistos os fatores associados aos consumíveis de soldagem, metal de base, arame de adição e gás de proteção, que afetam diretamente o nível de porosidade em cordões de solda em chapas de alumínio.

Corrida de consumível

O grau de porosidade do cordão de solda pode variar com a qualidade de fabricação da chapa ou do arame de adição, que pode ser observada na troca do consumível de uma corrida para outra, no caso de consumível de uma das corridas ser mais bem desgaseificado, ou seja, possuir menos hidrogênio dissolvido (Woods, 1974).

Armazenamento da chapa

O tempo de armazenamento da chapa, depois da limpeza e antes da soldagem ser realizada, tem grande influência sobre o grau de porosidade do cordão de solda. Isso ocorre porque maior tempo de armazenamento permite o aumento considerável da espessura da superfície de óxido que se forma sobre a chapa de alumínio, colaborando no fornecimento de hidrogênio para a poça de fusão.

Concentração de elementos de liga

Pelos estudos mostrados em diversas literaturas, é evidente que certos elementos de liga alteram o grau de formação de porosidade (Koziarski, 1953; Collins, 1958; Woods, 1974 e Andrew et al, 1975) por alterar a solubilidade do hidrogênio no alumínio e o modo de solidificação da poça de fusão, que podem influir no grau de porosidade (Shore et al, 1970).

Woods (1974) estudou a influência da adição de elementos de liga no grau de porosidade de soldas em alumínio. Foram determinadas as características de formação de porosidade de várias ligas de alumínio e comparadas com a liga 1100 (alumínio comercialmente puro). Considerando outros sistemas arame/metal de base, todos mostraram menores níveis de porosidade que sistemas 1100/1100.

Koziarski (1953), em artigo de revisão bibliográfica, citou trabalhos que concluíam que o aumento da concentração de magnésio resulta em aumento de porosidade. Acreditava-se que isso se deveria ao fato dos íons de magnésio migrar para a superfície, reagirem com o oxigênio atmosférico e produzirem hidrogênio atômico que, então, é absorvido pela poça de fusão.

Porém, outros trabalhos (Woods, 1974, Shore et al, 1970, Collins, 1958) mostram, de forma convincente, que ligas de alumínio com maior concentração de magnésio apresentam menos porosidade quando soldadas.

Experiência realizada por Binger et al (1975), citados por Devletian et al (1983), com adição de cobalto no arame, mostrou redução no tamanho dos poros presentes na soldagem de alumínio. O arame de adição, denominado X5087, foi especialmente desenvolvido para soldagens em condições atmosféricas adversas. Níveis de contaminação até cinco vezes maiores são tolerados em se comparando às soldagens realizadas com arames de adição da série 5000. É importante notar que parece não haver redução na quantidade de hidrogênio, nem no total de poros presentes no cordão de solda, havendo indicação de mudança de distribuição de macro para microporosidades. Não se sabe ainda o mecanismo pelo qual o cobalto altera o tamanho dos poros distribuídos na soldagem de alumínio, mas acredita-se haver grande aumento da quantidade de núcleos de poros na poça de fusão.

Condições superficiais da chapa

A restrição da presença de contaminantes na poça de fusão é de grande valia no controle de porosidade dos cordões. Para isso, a limpeza da junta antes da soldagem é indispensável. A acetona, que é volátil, é muito usada. Solventes à base de petróleo requerem limpeza posterior, com sabão e água, para remoção de hidrocarbonetos, seguindo-se de uma secagem a ar. O escovamento manual ou mecânico, adequado às condições fabris, muitas vezes é realizado imediatamente antes de se efetuar a soldagem. A limpeza química também pode ser adotada, desde que seja com produto indicado para o metal.

A influência do grau de limpeza da superfície da chapa, pelo uso de diferentes ferramentas, na formação de porosidade em cordões de solda foi avaliada em pesquisa (Hettes et al, 1998). Por Emissão Foto Elétrica - EFE, foi feita avaliação do grau de limpeza das superfícies. A EFE não detecta quais substâncias, nem determina o grau de contaminação de hidrogênio na superfície, fazendo somente uma comparação relativa entre graus de limpeza. O estudo mostra classificação do nível de limpeza da superfície preparada por diferentes ferramentas. As superfícies foram usinadas, limpas com escovas de aço inoxidável e com discos abrasivos. Os resultados indicaram que a contaminação da superfície é menor para a usinagem a seco, seguida dos escovamentos e, por último, do método abrasivo.

Hettes et al (1998) tentaram prever o grau de porosidade fazendo relação entre o grau de limpeza da superfície, estabelecido pelo método EFE, e resultados de inspeções radiográficas, sem obterem sucesso. As quantidades e tamanhos de porosidade foram determinados e relacionados às ferramentas utilizadas na limpeza. Hettes et al concluíram que a quantidade de

poros está mais associada à composição/construção do disco abrasivo que à granulometria do disco, e que o maior diâmetro do arame das cerdas favorece mais à qualidade do cordão que a constituição das cerdas, se torcidas ou dobradas.

Os testes foram feitos com discos e escovas novos, não sendo feitas conclusões a respeito da influência do uso prolongado das ferramentas de limpeza no grau de porosidade.

Arame de adição

Na soldagem com proteção gasosa e adição de metal (MIG) é bem conhecido que a contaminação da superfície do arame eletrodo pode contribuir significativamente no teor de hidrogênio do cordão de solda. Medições mostraram que o eletrodo contribui com aproximadamente 50% do peso final do cordão de solda (Saperstein et al, 1964). Assim, a grande razão área superficial/volume de alumínio do arame eletrodo imprime elevado grau de porosidade nos cordões, se o eletrodo estiver com sua superfície contaminada (Kammer et al, 1963).

Gás de proteção

Tanto a vazão, quanto a composição do gás de proteção usados podem influenciar no grau de porosidade do cordão de solda. Woods (1974) verificou a diminuição no nível de porosidade das soldas com aumento do fluxo do gás de proteção. Isso se deve à diminuição da taxa de absorção de gás, possivelmente ocasionada pelo efeito do gás no resfriamento do arco e da superfície da poça de fusão.

Adições de “freon” ou cloro são feitas aos gases inertes usados como proteção em soldagens a arco elétrico. A adição de cloro foi usada em indústria de fundição, mas não é utilizada comercialmente, apesar de registros de redução substancial da porosidade. O “freon” é menos tóxico que o cloro e tem-se mostrado eficiente no aumento da qualidade de soldas em alumínio (Devletian et al, 1983).

2.5.2 Parâmetros de soldagem

Processo de soldagem

Na comparação entre os processos de soldagem MIG e TIG, é de se esperar maior grau de porosidade nas soldagens com eletrodo consumível, por dois motivos. O primeiro é que, na soldagem MIG a grande área superficial associada ao pequeno diâmetro do eletrodo favorece a contaminação por umidade, lubrificantes e outros hidrocarbonetos. O segundo motivo é que a

maior temperatura da gota transferida aumenta a quantidade de hidrogênio absorvido durante a transferência metálica através do arco (Martukanitz citado por Devletian et al, 1983).

Comprimento do arco

Woods (1974) mostra que, na soldagem TIG, a quantidade de hidrogênio na poça de fusão aumenta com o comprimento do arco. Essa tendência provavelmente se deve ao fato de que um maior comprimento do arco expõe uma maior área de superfície da poça de fusão e gera uma maior zona de absorção anelar. Em geral, é de se esperar que maiores comprimentos de arco ocasionem cordões com maiores níveis de porosidade que arcos mais curtos. Na soldagem MIG são esperados os mesmos efeitos da tensão sobre a formação de porosidade que na soldagem TIG.

Corrente de soldagem

Devletian et al (1983) dizem que o aumento da corrente afeta o grau de porosidade em ligas de alumínio por que tanto o volume de metal fundido quanto a taxa de absorção de hidrogênio de fontes externas aumentam.

Woods (1974) afirma que o aumento da corrente, além de causar o aumento do volume da poça de fusão e da absorção de hidrogênio, causa o aumento da temperatura da poça de fusão. Entretanto, entre os efeitos do aumento da corrente há a diminuição da taxa de solidificação (maior volume da poça), que favorece o escape de hidrogênio para a atmosfera. Verifica-se, então, a existência de uma relação entre a corrente de soldagem e a taxa de solidificação da poça de fusão. Assim o aumento de corrente, por um lado facilita a absorção, por outro lado, facilita o escape dos gases (Woods, 1974). Saperstein et al (1964) mostraram que na soldagem MIG com altas taxas de resfriamento, em correntes baixas, produz-se cordões com muitos poros de pequenos volumes, enquanto soldas resfriadas lentamente contêm poucos poros, porém grandes, visíveis a olho nu. Em cordões de solda com nível moderado de resfriamento do calor imposto, se produz o máximo de volume de porosidade, tendo um tamanho médio de poro.

Velocidade de soldagem

É prática comum em soldagem na posição horizontal a redução da velocidade de soldagem para minimizar o nível de porosidade do cordão. Menor velocidade de soldagem, como no caso de maior corrente, causa diminuição da taxa de solidificação, favorecendo o escape das bolhas gasosas. Entretanto, menor velocidade de soldagem causa efeitos semelhantes ao aumento de corrente. Com a diminuição da velocidade de soldagem, ocorrem aumento da temperatura da poça de fusão, elevação da solubilidade de hidrogênio no alumínio

e alargamento da área da zona anelar quente, afunilando o hidrogênio para o interior da poça de fusão. Se o aumento de absorção gasosa, causada pela diminuição da velocidade de soldagem, for insuficiente para compensar o aumento de volume da poça de fusão, então isso resultará numa média mais baixa de concentração de hidrogênio dissolvido, que leva à formação de bolhas menores. Essa redução de números, juntamente com a maior oportunidade das bolhas crescerem e escaparem, pode levar à redução no nível de porosidade na soldas (Woods, 1974).

Kuriyama et al (1975), em estudo sobre porosidade em cordões de solda realizados pelo processo MIG na posição plana, mostram resultados em que soldas realizadas com velocidades de soldagem menores apresentaram menos poros, como pode ser visto na Figura 2.12.

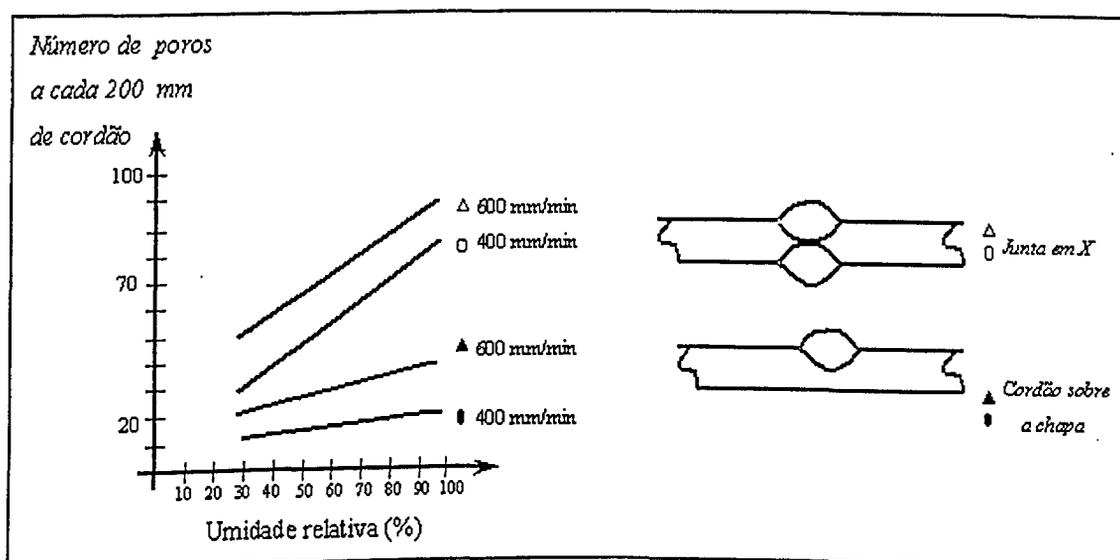


Figura 2.12 - Influência da junta e velocidade de soldagem na porosidade (Kuriyama et al, 1975).

Modos de transferência metálica

Os modos de transferência são dependentes dos valores de tensão e corrente de soldagem; desta forma, é de se esperar que diferentes modos de transferência acarretem diferentes graus de porosidade nos cordões, investigação a ser feita nesse trabalho.

2.5.3 Condições de soldagem

Configuração da junta

A junta é uma variável com grande influência no grau de porosidade resultante na

soldagem de alumínio. A soldagem sobre chapa, sem chanfro, tem grande vantagem sobre soldagens em juntas chanfradas. Juntas estreitas e profundas tendem a reter o gás antes desse percorrer o longo caminho até a atmosfera.

Para soldagem TIG em junta de topo em "Y" com baixo valor de abertura de raiz, Kuriyama et al (1975) observaram elevado grau de porosidade, e explicaram que pode ser pelo fato de haver estreitamento da abertura inicial devido à contração do chanfro, provocada pelo calor de soldagem, resultando quase no mesmo grau de porosidade com abertura de raiz igual a zero. Na soldagem TIG, a porosidade pode ser diminuída pelo leve aumento da abertura de raiz até um limite, sob o risco de se elevar a quantidade de porosidade (Kuriyama et al, 1975).

Kuriyama et al (1975) estudaram a relação entre o tipo de junta e o grau de porosidade em cordões de solda realizados pelo processo MIG, na posição plana, como função da umidade atmosférica controlada por câmara, com inspeções feitas através de raios-X. Verificaram conforme representado no gráfico da Figura 2.12, que soldas realizadas em juntas com perfil de chanfro em "X" apresentaram mais porosidade que soldas realizadas diretamente sobre a chapa.

Comparando soldas MIG sobre chapa e em junta de topo em "Y" sem abertura de raiz, para valores iguais de umidade atmosférica, foi observada porosidade dez vezes maior na solda sobre chapas com junta de topo em "Y", atribuída à diferença física pela existência da face de raiz (Kuriyama et al, 1975).

Em soldas MIG na posição horizontal com junta de topo em "Y", foi feita uma comparação entre aberturas de raiz de 1,2 mm e zero, com respeito à umidade atmosférica. Na região de baixa umidade, a porosidade da junta de topo em "Y" com abertura de raiz 1,2 mm é tão baixa que se aproxima do valor de porosidade da solda realizada diretamente sobre a chapa. Observa-se que a porosidade existente devido à existência da face de raiz pode ser reduzida pela produção de uma razoável abertura da raiz entre as arestas adjacentes (Kuriyama et al, 1975).

Em soldagens TIG e MIG, a produção de apropriada abertura na raiz da junta de topo pode marcadamente reduzir os níveis de porosidade a valores aproximados aos de soldagens diretamente sobre a chapa (Kuriyama et al, 1975).

Posição e sentido de soldagem

A posição e o sentido de soldagem têm influências significativas no grau porosidade do cordão de solda em chapas de alumínio. A direção de flutuação da bolha gasosa sempre é para cima. Logo, se a emersão da bolha é impedida, ou se o percurso para a bolha emergir é mais longo, haverá mais possibilidades das bolhas de gás serem apreendidas e fixadas dentro da solda. Assim, soldas realizadas na posição "sobrecabeça" são as que fornecem maiores

dificuldades para o escape da poça de fusão do gás dissolvido, sendo as que geram maior grau de porosidade.

Em soldagens inclinadas a 30°, Wroth (1972), citado por Devletian et al (1983), verificou que cordões realizados com a tocha “subindo” caracterizam-se por fornecer um curto caminho vertical de escape a ser percorrido pelo gás dissolvido, antes da poça de fusão se solidificar. Soldagens “descendo” apresentam um trajeto mais longo a ser percorrido pelo gás dissolvido no metal fundido antes da solidificação da poça de fusão. Como resultado, tem-se maior porosidade, superficial ou interna, em soldagens realizadas com a tocha se movendo para baixo. A Figura 2.13 ilustra o caminho a ser percorrido pela bolha gasosa antes de escapar para a superfície em soldagens nas posições inclinadas (a) e (b) e sobrecabeça (c).

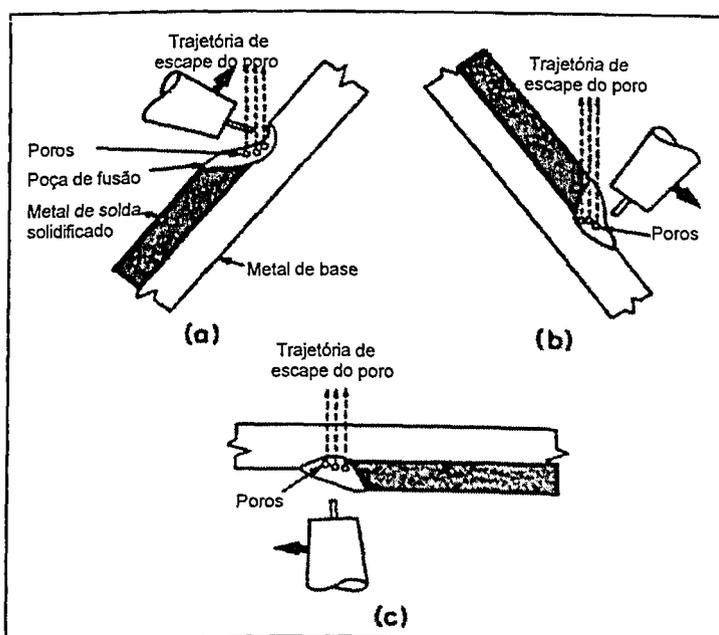


Figura 2.13 – Posição de soldagem e formação de porosidade (Wroth, 1972, citado por Devletian et al, 1983)

Como regra geral, soldagens realizadas na posição plana apresentam maior segurança contra a formação de porosidade que em outras posições (Wroth, 1972, citado por Devletian et al, 1983).

Número de passes

Na soldagem TIG, Kuriyama et al (1975) observaram que, em soldas multipasses, passes subseqüentes podem ser afetados pela existência de porosidade em passes precedentes. Um corpo de prova com alto grau de porosidade teve o número de vazios reduzido pela metade com a aplicação de um segundo passe, mas observou-se que os diâmetros dos poros

criaram de 0,5 mm no passe inicial para 1,0 mm no segundo passe. Conseqüentemente, a diminuição no volume de porosidade é insignificante. Em um outro corpo de prova, sem presença de porosidade em seu passe inicial, não houve presença de porosidade após o segundo passe. Assume-se que a porosidade remanescente do passe inicial será fundida ou flutuará e novamente será apreendida pela frente de solidificação do segundo passe.

O pré-aquecimento da chapa

Quanto mais tempo a poça permanecer líquida, maior será a oportunidade do hidrogênio escapar. O uso do pré-aquecimento tem, como principal objetivo, ajudar na remoção de hidrogênio da poça de fusão.

Segundo Irving (1992), Robert D. Stout, professor da Lehigh University, em seu clássico livro *Weldability of Steels*, forneceu razões porque o pré-aquecimento é usado em processos de soldagem, entre elas destaca-se:

1. O uso de pré-aquecimento diminui a taxa de resfriamento do metal soldado;
2. Menores taxas de resfriamento permitem o hidrogênio difundir para fora do cordão;
3. Pré-aquecimento reduz contrações; e
4. O pré-aquecimento eleva a temperatura do metal acima daquelas em que podem ocorrer fraturas frágeis durante a soldagem.

O pré-aquecimento abaixa a taxa de resfriamento da solda suficientemente para permitir que o hidrogênio possa difundir para fora do cordão de solda. Estudos mediram o valor da concentração de hidrogênio, em amostras de aço, como função do tempo de resfriamento da poça de fusão. Acredita-se que o fenômeno da diminuição da concentração de hidrogênio com aumento do tempo de resfriamento repita-se no alumínio, e que soldagens realizadas em chapas pré-aquecidas, em que a poça de fusão demora mais a resfriar, tendem a formar menos poros.

O uso de pós-aquecimento, tratamento térmico dado à solda após a soldagem, uma extensão do pré-aquecimento e tem a intenção de posterior remoção do hidrogênio. Se ainda há hidrogênio retido na solda, o pós-aquecimento usualmente é efetivo em sua remoção. O tratamento térmico de pós-aquecimento é geralmente especificado para materiais espessos, usados em vasos de pressão, e é aplicado principalmente com o propósito de aliviar tensões, sendo feito, normalmente, em componente estruturais.

2.5.4 Condições ambientais

Umidade relativa do ar

Estudo realizado por Kuriyama et al (1975) mostra que o nível de porosidade do cordão de solda produzido pelo processo MIG cresce ligeiramente com o aumento da umidade relativa do ar até a faixa de 80%. Quando a umidade atmosférica, controlada em câmara, excede a 85%, então o grau de porosidade cresce abruptamente, independente de outros parâmetros, tais como configuração da junta e velocidade de soldagem.

Pressão atmosférica

Foi verificado por Baker (1954) que a pressão atmosférica afeta muito na quantidade de porosidade do cordão em soldagem MIG de alumínio. O aumento da pressão causa diminuição do grau de porosidade. Isso se deve ao aumento da pressão requerida para a nucleação e crescimento das bolhas gasosas.

2.6 Inspeção de porosidade

Porosidade pode ser inspecionada através de ensaios destrutivos e não destrutivos. Como destaques das inspeções não destrutivas de porosidade tem-se a radiografia, forma mais utilizada e segura para se determinar o nível de formação de porosidade, e o ultra-som, técnica que exige extrema habilidade do inspetor.

As principais técnicas destrutivas de inspeção são a micrografia ou macrografia, que podem ser realizadas pela aplicação de cortes transversal ou longitudinal no cordão de solda, e a gravimetria, em que o grau de porosidade é estimado pela medida da densidade do cordão de solda. Na gravimetria, a variável dependente associada à porosidade do cordão é o volume de vazios do cordão, quantificando inclusive microporos (Talbot et al, 1963).

Devido a serem adotadas no trabalho as inspeções radiográfica e gravimétrica, na revisão bibliográfica somente será dado enfoque a essas duas formas de inspeção.

2.6.1 Inspeção por radiografia

Na radiografia industrial é utilizado o mesmo princípio da radiografia clínica. Coloca-se o material a ser ensaiado entre uma fonte emissora de radiação e um filme. Uma parte dos raios emitidos é absorvida pelo material e a outra parte irá atravessá-lo, sensibilizando o filme e produzindo nele uma imagem do material ensaiado. Após a revelação, tem-se uma chapa radiográfica para ser analisada e interpretada por um técnico especializado.

Para estruturas fabricadas, em que as uniões são realizadas por processos de soldagem, a inspeção por radiografia exerce o principal papel quando se requer qualidade. Um dos principais problemas na radiografia é a perda de uma dimensão, ou seja, um objeto tridimensional, o cordão de solda, é transferido para um filme bidimensional (Weber, 1995). A Figura 2.15 mostra o esquema de ensaio de radiografia.

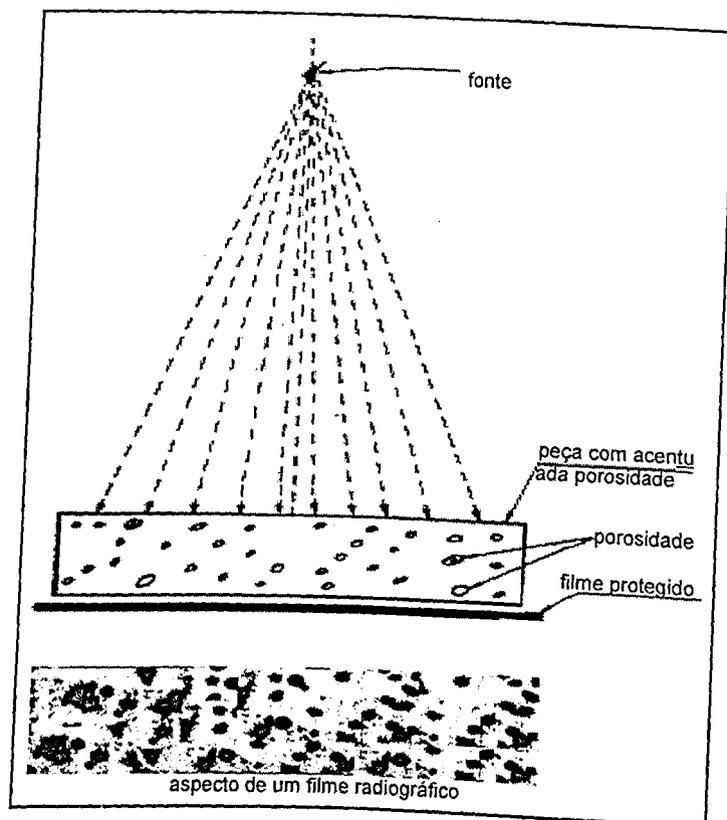


Figura 2.14 - Esquema de ensaio por radiografia.

2.6.2 Inspeção por gravimetria

A inspeção por gravimetria é um método experimental desenvolvido para estimar o volume de vazios em amostras de um sólido qualquer. O volume de vazios é calculado pela comparação de valor de densidade, medido pela técnica, com um valor estimado de densidade teórica de referência. No método gravimétrico, pela aplicação do princípio de empuxo de Arquimedes, faz-se o cálculo de volume de vazios de materiais sólidos e determina-se a densidade real de cada corpo (Rodrigues Filho, 1997).

Na gravimetria aplicada à soldagem é necessária a separação do cordão de solda do metal de base, que pode ser feita através de duas técnicas que levam aos mesmos resultados, conforme literatura. A primeira técnica é pela remoção do cordão de solda da amostra.

Conforme Woods (1974), inicialmente faz-se pesagens ao ar e em água da amostra completa do cordão de solda e do metal de base que o cerca. Em seguida, remove-se o cordão de solda da amostra, usando pequena ferramenta elétrica de corte, com o cuidado de distinguir cordão de solda e metal de base através de leves ataques químicos durante a remoção do cordão, retirando-se o mínimo de metal de base da amostra. Quando todos os traços de cordão de solda tiverem sido removidos da amostra, o material remanescente é pesado novamente ao ar e em água. Com os valores de medidas das massas, ao ar e em água, e cálculos dos volumes das amostras, com e sem a presença de cordão de solda, a densidade do material removido pode ser calculada. A aplicação dessa técnica requer ferramentas sensíveis e elevada habilidade do operador.

Na segunda técnica é realizada a remoção do metal de base. Saperstein et al (1964), que usaram essa técnica, fizeram a remoção do metal de base da amostra, remanescendo somente cordão de solda. A seqüência tem os seguintes passos:

- Preparação da amostra, ataque químico e revelação dos perfis do cordão de solda nas seções transversais;
- Usinagem longitudinal da amostra, seguindo-se com a ferramenta de corte, de uma seção à outra, os perfis revelados pelo ataque químico. Na usinagem deve-se ter cuidado para se remover o mínimo de metal de cordão, porém com maior cautela para não deixar resquícios de metal de base na amostra;
- Novos ataques às superfícies usinadas do cordão de solda, garantindo-se a ausência de metal de base na amostra.

Segundo Saperstein et al (1964), a aproximação dos vazios medidos pelo método chega a $\pm 0,3\%$ do valor verdadeiro de vazios na amostra. O método de gravimetria apresenta limitações por não detectar a distribuição dos poros e por assumir que os vazios, preenchidos com hidrogênio, têm massa nula. Ishchenko et al (1995) também usam essa técnica e a denomina "método de pesagem hidrostático de amostras", pela qual determina o volume de vazios percentual das amostras. Talbot et al (1963) fazem a medida de densidade para estudar a incidência de porosidade em metal fundido.

2.6.3 Comparação das técnicas de inspeção de porosidade

Estudo realizado por Kuriyama et al (1975) mostrou equivalência nos resultados de porosidade em cordões obtidos pelos métodos de radiografia e micrografia. Saperstein et al (1964) encontraram correlação entre medidas de porosidade obtidas pelas técnicas radiográfica e gravimétrica.

CAPÍTULO III

Procedimento Experimental

Neste capítulo são mostrados, em detalhes, as técnicas empregadas, os equipamentos e materiais usados, as seqüências de operações dos ensaios de soldagem e de inspeção dos corpos de prova. O detalhamento tem como objetivo a padronização dos testes e garantir a validade dos resultados obtidos, bem como fornecer informações para a perfeita compreensão dos ensaios e permitir a reprodução dos mesmos, caso seja necessário.

3.1 Equipamentos de soldagem

Os equipamentos e dispositivos empregados na realização dos ensaios e esquema geral da bancada experimental de soldagem são mostrados na Figura 3.1.

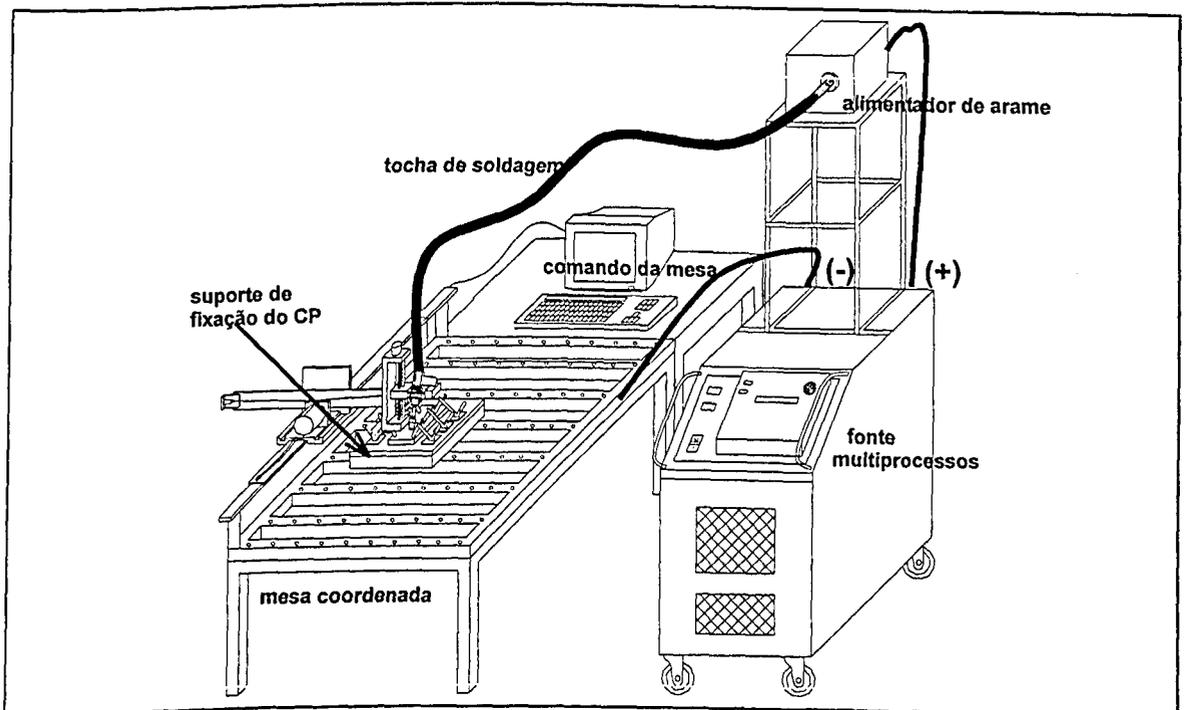


Figura 3.1 - Esquema geral da bancada de testes.

A seguir, é feita explanação uma detalhada de cada um dos equipamentos empregados no desenvolvimento dos testes.

3.1.1 Fonte de soldagem

Para a realização dos testes, foi utilizada uma fonte eletrônica multiprocessos, esquematizada na Figura 3.1, selecionada para operar no processo MIG (convencional e pulsado) no modo tensão constante, cujas principais características são:

- corrente contínua ou alternada (convencional ou pulsada);
- corrente nominal de 300 A para fator de serviço de 100 %;
- corrente máxima de 450 A;
- tensão em vazio de 56 V;

3.1.2 Movimentação da tocha e fixação do corpo de prova

As soldagens foram realizadas de modo automatizado, com a tocha posicionada inclinada de um ângulo de 10° em relação ao eixo vertical e apontada no sentido do deslocamento (Alcan, 1993 e AWS, 1991), sendo movimentada linear e uniformemente por motores de passo, comandados por um microcomputador (Figura 3.1). Este movimento é conseguido com o uso de uma mesa de coordenadas desenvolvida no LAPROSOLDA.

O desenho esquemático do suporte de fixação dos corpos de prova à mesa coordenada dos testes em que não foi aplicado gás de purga nos ensaios é mostrado na Figura 3.2.

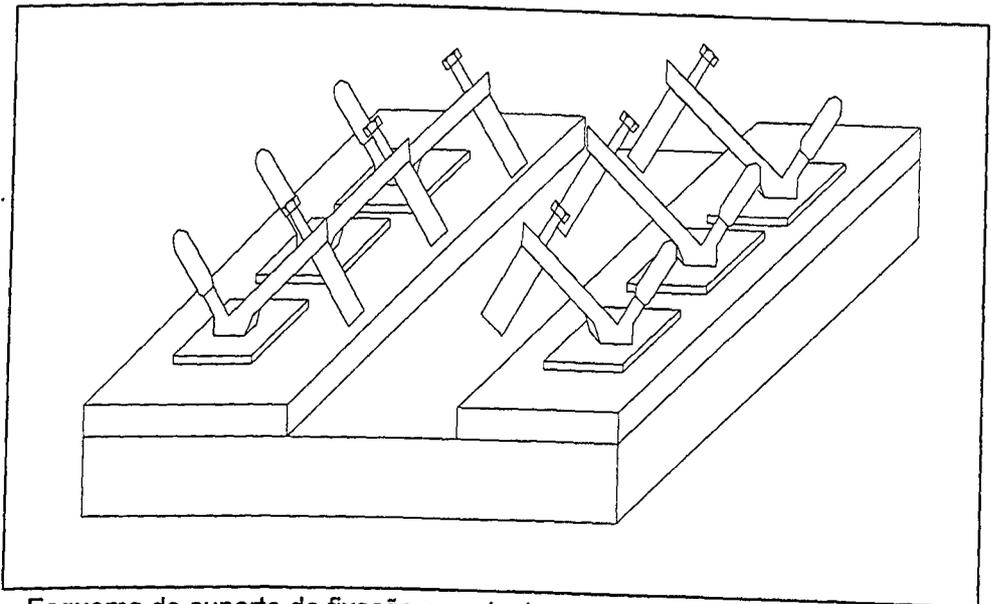


Figura 3.2 – Esquema do suporte de fixação para testes sem gás de purga, com dimensões de 300 x 200 x 30 mm

O desenho esquemático do suporte de fixação dos corpos de prova à mesa coordenada dos testes em que foi aplicado gás de purga nos ensaios é mostrado na Figura 3.3.

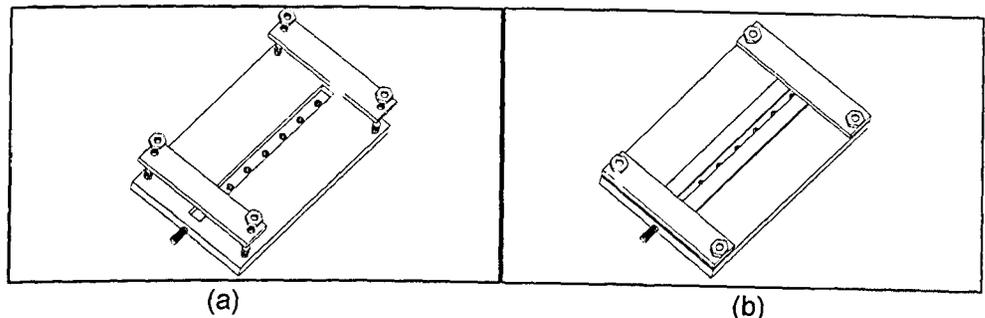


Figura 3.3 – Esquemas do suporte de fixação para testes com gás de purga em perspectiva explodida (a) e montado (b), com dimensões de 295 x 190 x 25,4 mm

3.1.3 Tocha de soldagem

A tocha de soldagem utilizada é refrigerada a ar, equipada com conduíte de teflon, próprio para eletrodos de alumínio. Na montagem da tocha, procurou-se mantê-la esticada, de forma que as curvas permanecessem bem abertas, a fim de não interferir na alimentação do arame eletrodo, ponto crítico na soldagem do alumínio.

3.1.4 Shadowgrafia

No modo corrente pulsada, para a obtenção dos parâmetros que fornecem Uma Gota Por Pulso [UGPP], foi usada a técnica de *shadowgrafia*, em que um sistema óptico é utilizado na obtenção da sombra da imagem, que é gravada em uma câmera, com capacidade de filmagem de 2.000 quadros por segundo (0,5 milissegundos [ms] entre cada quadro), indispensável para definir claramente o instante de destacamento da gota metálica, se no pulso ou na base. O sistema consiste de um cabeçote laser, conjunto de lentes e câmera de filmagem e pode ser visto com detalhes no trabalho de Vilarinho (2000). Para se estudar a transferência metálica controlada em UGPP, é utilizada instrumentação que permita visualizar as gotas metálicas viajando a uma velocidade muito alta, o que é conseguido com uma filmagem ou fotografia a alta velocidade (1000 quadros por segundo ou mais). As imagens das transferências metálicas obtidas por *shadowgrafia* são sincronizadas com os oscilogramas de corrente, determinando-se os momentos de destacamento das gotas.

Como não havia necessidade de aquisição de dados de tensão, já que a *shadowgrafia* foi aplicada exclusivamente para se determinar os parâmetros de pulso que fornecessem UGPP (I_p , t_p , I_b , t_b), foi utilizado um só sistema de aquisição ajustado, para uma taxa de aquisição de 17.200 hertz [Hz] por canal em 8 bits. A partir de um pulso elétrico que a câmera fornece quando inicia a gravação de um quadro, é possível efetuar, via programação, a sincronização dos sinais de imagem e do sinal de corrente elétrica do arco. A sobreposição do sinal de corrente elétrica do arco com os sinais da câmera permite identificar o nível do sinal elétrico durante a existência de cada quadro. Assim, o sinal de corrente adquirido pelo sistema é capturado por meio de um sensor de Efeito Hall e levado diretamente à placa de aquisição do sistema, que já está previamente calibrada para o sensor. Simultaneamente, também é levado o sinal da câmera. Posteriormente, via programação, o sistema de aquisição é sincronizado no tempo, já que no sistema há um sinal conhecido e simultâneo. O esquema geral da *shadowgrafia* e elementos óticos do sistema são mostrados na Figura 3.4.

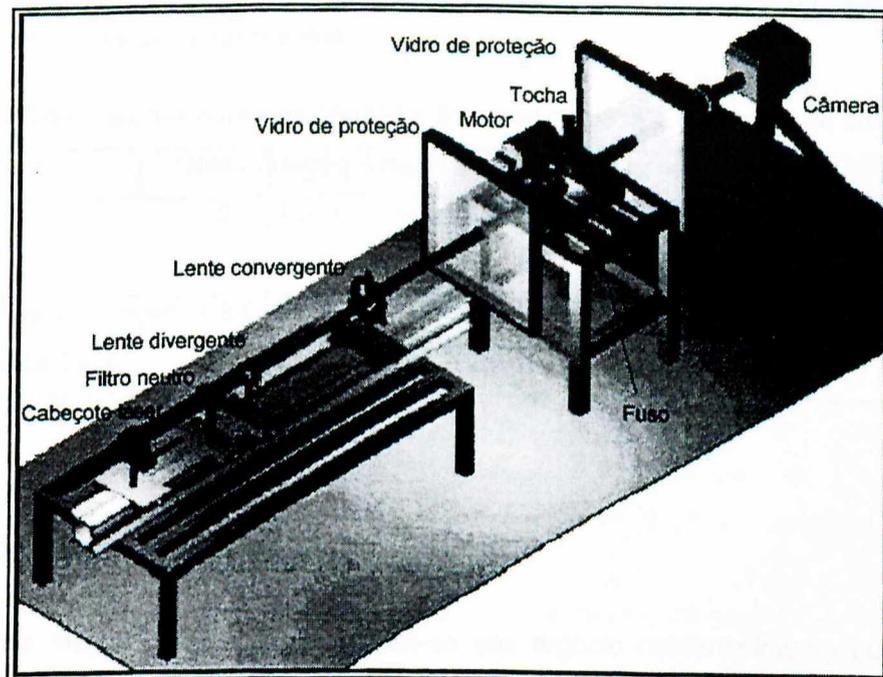


Figura 3.4 - Esquema geral da *shadowgrafia* (Vilarinho, 2000).

3.2 Materiais consumíveis

Os materiais consumíveis utilizados na realização dos testes são descritos a seguir.

3.2.1 Corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados em guilhotina, nas dimensões de 200 x 40 mm a partir de chapa de alumínio laminada da liga ABNT 5052 (liga Al-Mg), de espessura de $\frac{1}{4}$ de polegada (6,35mm). Em seguida, os corpos de prova foram usinados nas faces laterais para produção de chanfros retos. As dimensões dos corpos de prova foram estabelecidas visando facilitar análises das amostras pelas técnicas de inspeção radiográfica e gravimétrica.

3.2.2 Eletrodos

Foram utilizados arames eletrodo com diâmetros de 1,2 mm, com especificação AWS ER-4043. A escolha do arame foi baseada em especificação da Alcan (1993) e levando em consideração que é um eletrodo muito usado em fabricação com a chapa selecionada. Na Tabela 3.1 podem ser vistas as composições químicas nominais do metal de base e do arame de adição, fornecidas pelos fabricantes.

Tabela 3.1 - Composições químicas nominais do metal de base e do arame de adição

Classificação American Welding Society										
Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Outros elementos *		Alumínio
								Cada	Total	
ER4043-Metal de Adição	4,5-6	0,8	0,3	0,05	0,05	0,1	0,2	0,05	0,15	Restante
5052-Metal de Base	-	-	-	-	2,5	-	-	-	-	Restante

* O teor de berílio não deve exceder a 0,08%.

3.2.3 Gás de proteção

Todos os testes foram feitos utilizando-se gás argônio comercialmente puro, tanto na proteção gasosa, através da tocha de soldagem, quanto como gás de purga. As vazões de gás empregadas, calibradas, foram de 15 litros por minuto [l/min] para proteção da poça de fusão e de 8 l/min, quando aplicado como gás de purga na raiz da junta de topo.

3.3 Parâmetros de soldagem constantes

Na Tabela 3.2 são mostrados os dados experimentais e parâmetros de soldagem, mantidos constantes nos ensaios.

Tabela 3.2 – Parâmetros de soldagem constantes aplicados na pesquisa

Item	Descrição	Especificação	Observação
01	Gás de proteção	Argônio Puro	Vazão = 15 l/min
02	Gás de purga	Argônio Puro	Vazão = 8 l/min
03	Arame eletrodo	ER4043	d = 1,2 mm
04	Distância Bico de Contato Peça [mm]	15	DBCP vertical
05	Ângulo de Inclinação da tocha [graus]	10°	
06	Liga de alumínio da chapa	5052	6,5 x 200 x 40 mm
07	Temperatura da chapa	Ambiente	
08	Tipo de junta	Topo	Configuração variável
09	Técnica de soldagem	Empurrando	

3.4 Variáveis de soldagem

As variáveis de soldagem adotadas na pesquisa foram método de limpeza da superfície da chapa, configuração da junta de topo e o modo de transferência metálica, descritos a seguir.

3.4.1 Métodos de limpeza

Na limpeza superficial das chapas foram adotados três métodos. Inicialmente, todos os corpos de prova foram lavados com água e sabão para remoção do excesso de óleo lubrificante, remanescente do processo de usinagem dos chanfros retos. Após a lavagem, os corpos foram secados com ar comprimido. Os métodos de limpeza superficial das chapas propriamente ditos são assim descritos:

1. Condição superficial em que a chapa somente passou pela lavagem com água, sabão e esponja, denominado A&S;
2. Chapa limpa com pano (sem deixar fiapo) embebido em acetona, escovada com escova nova de cerdas em aço inoxidável e novamente limpa com o pano embebido em acetona, denominado Ac&Es;
3. Limpeza com pano embebido em produto químico, denominada LQ (produto *OX-OUT #536 Scale and Oxide Remover for Stainless Steel and Aluminum*, da Chemclean Corporation).

A Figura 3.5 mostra esquematicamente as superfícies que foram limpas conforme o método de preparação da superfície do corpo de prova.

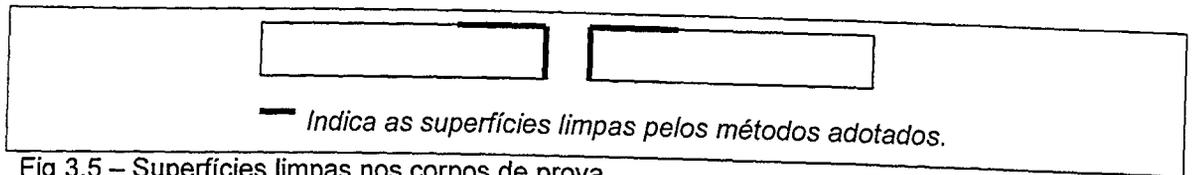


Fig 3.5 – Superfícies limpas nos corpos de prova.

Todas as soldagens foram feitas até duas horas após a limpeza das superfícies, em passe simples, na posição horizontal.

3.4.2 Configuração da junta de topo

As soldagens foram realizadas automaticamente em juntas de topo com configuração variável, conforme as classificações: *zero* - junta de topo sem abertura; *umsem* - junta de topo com abertura de 1,0 mm e *umcom* - junta de topo com abertura de 1,0 mm e com a aplicação de argônio como gás de purga na raiz.

3.4.3 Modos de transferência metálica

Além das variações do método de limpeza superficial e da configuração da junta de topo, a terceira variável adotada foi o modo de transferência metálica, obtido pelas variações da tensão e da corrente de soldagens. Na obtenção de diferentes modos de transferência metálica foram utilizados os dados obtidos no trabalho de Figueiredo (2000).

A Tabela 3.3 mostra os parâmetros de soldagem para cada um dos modos de transferência utilizados nos testes.

Tabela 3.3 – Modos de transferência metálica e parâmetros de soldagem.

Modo de Transferência Metálica	Parâmetros de Soldagem			
	Tensão de referência [V]	Velocidade de alimentação [m/min]	Velocidade de soldagem [mm/min]	Corrente Média Monitorada [A]
Curto-circuito [CC]	20	8,0	750	175,0
Goticular [Got]	24	8,0	750	178,0
Globular [Glob]	24	6,0	560	135,0
UGPP	-	6,7	500	98,5

Na Tabela 3.3, os valores de corrente de soldagem foram adquiridos por computador. A tensão de soldagem foi ajustada na fonte de soldagem e a velocidade de soldagem no alimentador. A velocidade de soldagem foi calibrada ao comando da mesa de coordenadas.

Além dos modos de transferências convencionais, tem-se ainda a transferência metálica pulsada (controlada), um tipo de transferência onde se busca o modo goticular ou *spray* com correntes médias baixas. Essa transferência é conseguida pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares. A gota inicia sua formação durante o período de base, em que a intensidade de corrente é baixa e mantém o arco aceso. A gota cresce durante o período de pico, em que o valor da corrente é elevado, sendo transferida no final desse período. Este modo de transferência é considerado ideal quando se consegue Uma Gota Por Pulso [UGPP] (Vilarinho, 2000).

A revisão bibliográfica evidencia que velocidades de soldagem com valores elevados favorecem a formação de poros. Na pesquisa foram adotados valores altos de velocidade de soldagem para que fosse possível verificar a influência dos parâmetros variados na formação de vazios. Entretanto, a corrente de soldagem também influi na formação de vazios. É esperado que os efeitos da velocidade e da corrente de soldagens estejam mais associados ao volume da poça de fusão e, conseqüentemente, à taxa de absorção, ao modo de solidificação e à eliminação de hidrogênio, que aos efeitos isolados da velocidade e da corrente de soldagens na taxa de resfriamento. Por essa razão, nos três modos de transferência convencionais, foi adotada a constante $K = V_{\text{sold}}/V_{\text{alim}}$, pois assim, ao garantir a mesma quantidade de material depositado por unidade de comprimento, aproxima-se a uma mesma geometria da poça de fusão, permitindo avaliar mais seguramente a influência dos parâmetros variados.

Assim, em transferência no modo curto-circuito e goticular, tem-se que $V_{\text{sold}} = 750$ mm/min e $V_{\text{alim}} = 8$ m/min, então $K = 750/8 = 93,75$. Na transferência metálica goticular, conforme Figueiredo (2000), é necessária velocidade de alimentação do arame de 6 m/min, logo, para transferência globular, tem-se $V_{\text{sol}} = K \cdot V_{\text{alim}} = 93,75 \cdot 6 = 560$, sendo essa velocidade de soldagem fixada na transferência globular, em mm/min. Na transferência controlada a UGPP a velocidade de soldagem foi fixada em 500 mm/min, não sendo possível manter a constante associada à quantidade de material depositado por unidade de comprimento de cordão.

3.5 Procedimento de soldagem

O procedimento de soldagem dos corpos de prova teve a seqüência descrita abaixo.

- Preparação da chapa, fazendo os riscos com caneta tinteiro para o corte dos corpos de prova com medidas de 200 x 40 mm;
- Realização do corte da chapa em guilhotina;
- Usinagem das faces laterais dos corpos de prova utilizando plaina;
- Montagem da bancada de teste consistindo nas seguintes etapas:
 1. Verificação do bico de contato da tocha e do condute e, caso necessário, realização da troca destes acessórios;
 2. Montagem da tocha no sistema computadorizado de movimentação na mesa coordenada e verificação da velocidade de soldagem;
 3. Montagem do sistema de fixação do corpo de prova com preparação da alimentação do gás de purga, quando aplicado;
 4. Posicionamento da máquina de soldagem;
 5. Colocação do rolo de arame eletrodo;
 6. Verificação dos roletes de tração;
 7. Montagem do arame eletrodo, passando manualmente pelo condute até sair pelo bico de contato, procedendo então o travamento dos roletes de tração;
 8. Montagem do sistema de gases, conferindo a vazão de trabalho;
 9. Averiguação dos equipamentos de controle e medição, tais como: velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame eletrodo;
- Limpeza das superfícies das chapas conforme metodologia descrita;
- Fixação dos corpos de prova no conjunto de fixação da placa de teste, obedecendo à configuração da junta para cada experimento;
- Ajuste da tocha de soldagem com distância bico de contato peça [DBCP] igual a 15 mm e inclinação de 10° no sentido empurrando;
- Regulagem da velocidade de alimentação do arame eletrodo e da tensão de referência;
- Calibração e ajuste da vazão de gás de proteção da tocha em 15 l/min, e em 8 l/min no gás de purga, quando aplicado;
- Realização de pré-testes para ajuste do sistema;
- Início da soldagem, deixando um intervalo de tempo para que a soldagem entrasse em regime, realizando-se cordões de solda com 170 mm na maior dimensão do corpo de prova;
- Identificação do corpo de prova, através de conformação numérica sobre o cordão de solda;

Os testes no modo de transferência controlada através do processo MIG pulsado, planejados para determinar os parâmetros de soldagem que fornecessem transferência a

UGPP, foram realizados em bancada experimental especialmente montada para esse fim, mostrada na Figura 3.6. Antes de se iniciar a soldagem foi necessário ainda:

1. Montagem do sistema de laser;
2. Montagem da câmara de filmagem;
3. Ajuste do foco do sistema de *shadowgrafia*;
4. Aquisição de dados de corrente e da filmagem e gravação do filme em fita de vídeo super VHS.

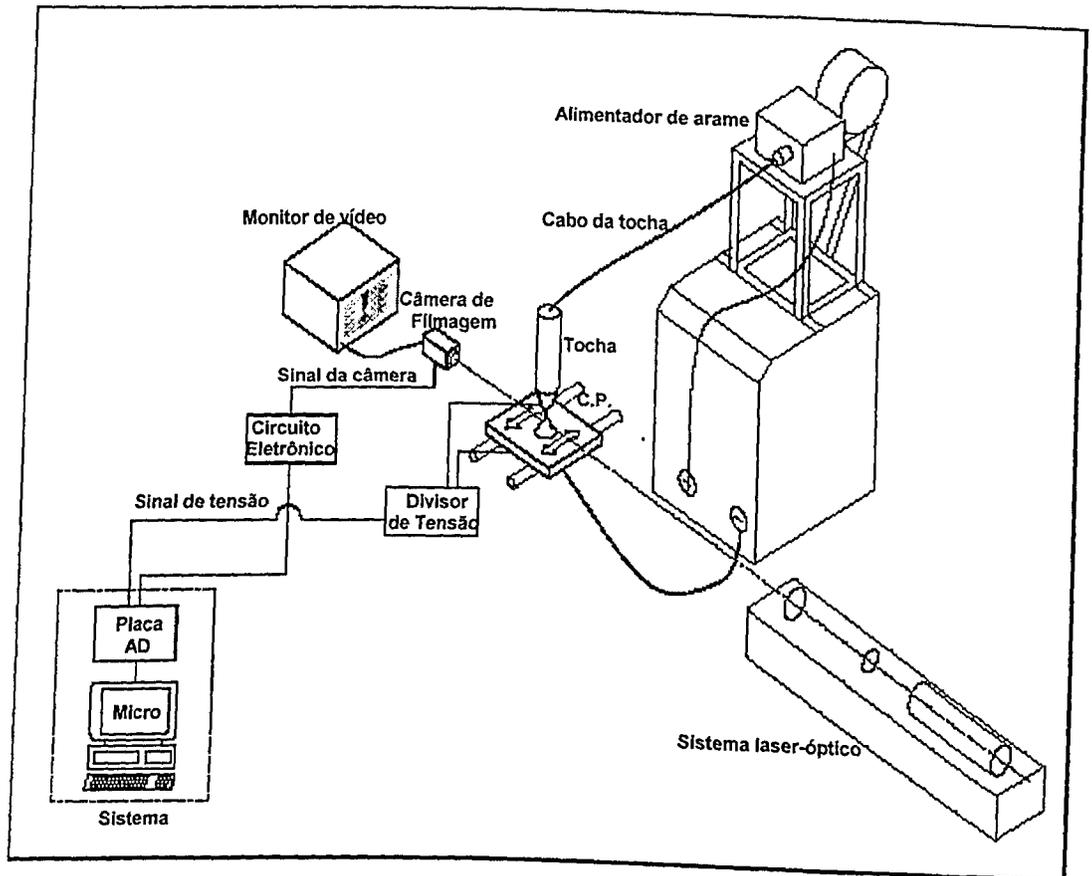


Figura 3.6 – Esquema da bancada de testes para determinação de parâmetros com transferência a UGPP (Vilarinho,2000).

O corpo de prova foi fixado em um suporte (mostrado na Figura 3.3) montado em um fuso acionado por um conjunto moto-redutor que pode ser visto na Figura 3.4. Este conjunto é controlado por um dispositivo eletrônico que permite o controle do sentido do movimento e da velocidade do fuso, ou seja, da velocidade de soldagem.

3.6 Cálculo da diluição dos cordões de solda

Na aplicação do método de inspeção por gravimetria, para calcular a densidade de referência do cordão de solda, é estimado o percentual de arame de adição no metal fundido, ou seja, a diluição do cordão de solda.

No cálculo da diluição despreza-se a variação de volume ocasionado pelos distintos processos de fabricação e de solidificação do metal de base (laminado), do arame (trefilado) e do cordão de solda, que tem aspecto de metal fundido.

Para realizar a medida de diluição de cada cordão de solda, foi utilizado programa computacional de tratamento de imagens, em que fotografias tiradas de todos os perfis dos cordões de solda foram tratadas e analisadas pelo programa para determinação da parcela fracional de arame no metal fundido.

Na Figura 3.7 pode ser visto que no cordão do teste número sete, apesar da imposição da abertura na junta de topo antes da soldagem, devido às distorções provocadas pelo calor de soldagem, após a realização do cordão, as chapas se aproximaram não permanecendo mais abertura entre elas.

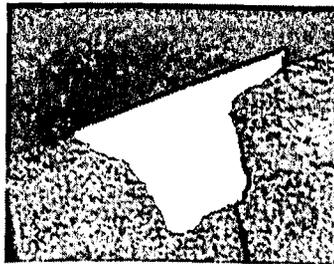


Figura 3.7 - Foto editada de cordão do teste 7.

Assim, nos cordões em que não havia abertura na junta após a realização da soldagem, como o exemplo da Figura 3.7, fazendo uma aproximação, assume-se que na formação do cordão de solda a parcela de contribuição de metal de base equivale ao material localizado abaixo do prolongamento das superfícies da chapa, evidenciado pela cor branca. A parcela de contribuição do arame de adição é atribuída à área equivalente ao reforço do cordão, mostrado em preto.

Analisando as fotografias nas soldagens realizadas com abertura na junta topo, aquelas que mantinham a abertura após o cordão de solda ser realizado, o volume de arame de adição foi atribuído ao espaço da junta preenchido pelo cordão de solda, além da altura do reforço. A Figura 3.8 mostra um exemplo desse tipo, em que a cor preta representa a contribuição de arame de adição e a cor branca a contribuição de metal de base para o cordão de solda.

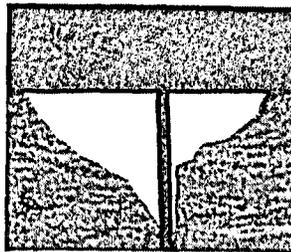


Figura 3.8 - Foto editada de cordão do teste 14

Com as proporções de metal de base e de arame de adição em cada cordão, multiplica-se cada fator de proporção pelo valor de densidade de cada consumível, 2689 quilograma por metro cúbico [kg/m^3], fornecido pelo fabricante para o metal de base (ALCAN, 1983) e 2649 kg/m^3 , valor determinado por gravimetria, para o arame de adição, calculando-se a densidade teórica de referência de cada cordão.

Pode ser observadas nos resultados de testes, mostrados na Tabela 5.1, que as variações de diluição de arame de adição no cordão de solda, com valores mínimo e máximo de 0,37 e 0,60, provocam baixas variações nos valores mínimo e máximo das densidades de referências dos cordões, de 2663 e 2673 kg/m^3 , respectivamente

Ainda analisando a diluição do cordão, vale ser comentado que o valor de 50% de metal de base e 50% de metal de adição pode ser adotado no cálculo da densidade de qualquer cordão de solda desta pesquisa, sendo esse valor adotado por Saperstein et al (1964). O valor da densidade de referência para diluição de 50% de arame de adição no cordão de solda é de 2669 kg/m^3 .

3.7 Inspeção dos corpos de prova

Os métodos de inspeção usados para avaliar a formação de porosidade foram a radiografia e a gravimetria

3.7.1 Inspeção por radiografia

Os cordões de solda produzidos nessa pesquisa foram radiografados no laboratório de soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina, LAPROSOLDA/UFSC. Para visualização dos poros nas chapas radiográficas, realizadas pelos autores da pesquisa, foi

utilizada a luminosidade produzida por negatoscópio e com o auxílio de lupa com capacidade de aumento de 2,5 vezes quantificou-se, de cada corpo de prova, os poros visíveis.

3.7.2 Inspeção por gravimetria

Na inspeção da porosidade dos cordões de solda, foi adotado o método destrutivo gravimétrico, em que o grau de porosidade é estimado pela medida da densidade do cordão de solda. A variável dependente associada à porosidade do cordão é o percentual de volume de vazios do cordão, determinada pela variação da densidade (Saperstein et al, 1964).

Na realização do ensaio destrutivo por gravimetria têm-se os seguintes passos:

1. Uma amostra representativa de cordão de solda (zona fundida), com comprimento de aproximadamente 70 mm, é separada do corpo de prova soldado, pela remoção cuidadosa do metal de base;
2. A amostra, composta somente da zona fundida do cordão de solda é pesada, primeiro ao ar [P_{ar}] e, em seguida, em água destilada [P_{ag}], como ilustra a Figura 3.9;

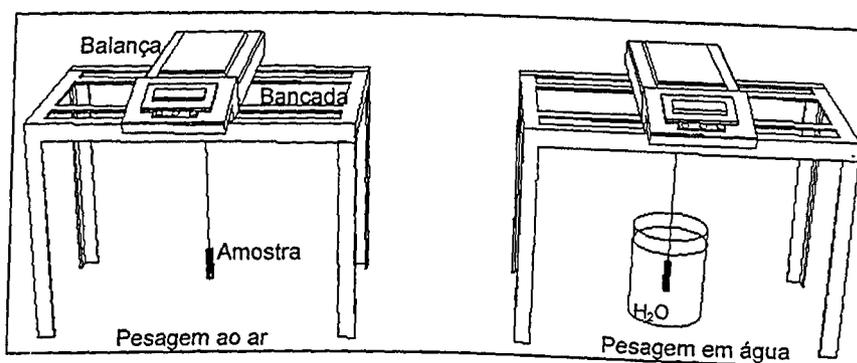


Figura 3.9 – Ilustração das pesagens ao ar e em água

3. Calcula-se o Empuxo [E], que é responsável pela diferença entre os pesos da amostra ao ar [P_{ar}] e em água [P_{ag}], dado por $E = P_{ar} - P_{ag}$;
4. Com o valor de E calcula-se o volume de líquido deslocado pela amostra [V_{ld}] que equivale ao próprio volume da amostra [V_{am}], dado por:

$$V_{ld} = V_{am} = \frac{E}{\rho_{H_2O} \cdot g}; \quad (3.1)$$

onde ρ_{H_2O} é a densidade da água, igual a 1 Kg/dm³, e g é a aceleração da gravidade, 9,8 m/s².

5. Com o volume da amostra [V_{am}] e o peso da amostra ao ar [P_{ar}] determina-se a densidade real da amostra [ρ_{am}], em [kg/m³]:

$$\rho_{am} = \frac{P_{ar}}{V_{am}} ; \quad (3.2)$$

6. Para determinação do volume de vazios da amostra, adota-se um valor de densidade de referência, equivalente à gravidade específica de uma amostra considerada perfeita [ρ_{amperf}] ou sem poros, com percentual de diluição de arame de solda em metal de base calculado conforme descrito no item 3.6.
7. Finalmente, com os valores das densidades de referência [ρ_{amperf}] e real [ρ_{am}] da amostra, determina-se o percentual de volume de vazio, dado por:

$$V_V = \frac{\rho_{amperf} - \rho_{am}}{\rho_{amperf}} \times 100 \quad (3.3)$$

O método gravimétrico, citado acima, estima o volume de vazios através da medida de densidade da amostra, não determinando a localização, distribuição e tamanhos desses vazios.

Saperstein et al (1964) citam que a sensibilidade desse método, medida em laboratório, é de aproximadamente $\pm 0,3\%$. Para verificação da sensibilidade do método gravimétrico usando balança de resolução de 0,01 grama, foram feitas duas análises, que seguem:

1. Sensibilidade pelo volume mínimo: sabendo que a densidade do alumínio é de $\rho = 2687 \text{ kg/m}^3$ ou $\rho = 0,002687 \text{ g/mm}^3$, e que a menor massa medida pela balança é de 0,01 grama, calcula-se que o menor volume de alumínio que pode ser medido pela balança é de $3,72 \text{ mm}^3$. Nesse trabalho, a massa média das amostras de cordão de solda em alumínio é de 5,6 gramas com volume médio de $2,14 \text{ cm}^3$. Assim, o menor volume medido pela balança, ou seja, $3,72 \text{ mm}^3$ representam $0,17\%$ do volume médio das amostras, sendo essa a sensibilidade do método gravimétrico a partir dos valores de volume do experimento.

2. Sensibilidade pela massa média: verifica-se que, em amostras com 5,6 gramas, a resolução da balança em 0,01 grama representa $0,6\%$ do peso da amostra, sendo essa a sensibilidade assumida no método de inspeção de porosidade por gravimetria, próxima ao valor assumido por Saperstein et al (1964).

CAPÍTULO IV

Testes Preliminares

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes preliminares realizados com o objetivo de verificar a aplicabilidade da técnica gravimétrica como forma de inspeção de porosidade em cordões de solda. Também é analisado o grau de influência de parâmetros de soldagem na formação de porosidade, até então experimentalmente incertos.

4.1 Verificação da aplicabilidade da técnica de inspeção por gravimetria utilizando duas balanças com resoluções distintas

O primeiro teste teve como objetivo principal verificar a coerência entre o valor de densidade fornecido pelo fabricante de metal de base [$\rho_{\text{fabricante}}$] e valor de densidade [ρ_{medida}] obtido pela inspeção por gravimetria, técnica descrita no item 3.8.2, no capítulo de metodologia experimental. Para fazer as medidas foram utilizadas duas balanças: uma com resolução de 10^{-5} g, que suporta cargas de até 1 g, e outra com resolução de 10^{-2} g, que suporta carga máxima de 2000 g. Em seguida, foi feita uma análise comparativa dos resultados obtidos nas duas balanças.

Com a primeira análise foram verificados os valores de densidades de amostras de metal de base da liga de alumínio ABNT 5052 e de cordão de solda, com uso de balança com resolução de 10^{-5} g. Em seguida, com a balança de resolução de 10^{-2} g, foram realizadas medidas de densidade de amostras de metal de base e de cordão de solda, além de amostra do arame de adição ER4043, utilizado nas soldagens.

Fazendo uma análise teórica, na balança com resolução de 10^{-2} g, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A variação de 0,01 grama na medida de massa de 4 g acarreta uma variação na densidade de cerca de 14 kg/m^3 (incerteza de 0,52%);
- Para massas com valores de 11 gramas, a variação de 0,01 grama proporciona mudança na densidade da ordem de 5 kg/m^3 (incerteza de 0,18%).
- Para massa da ordem de 60 gramas, a variação de 0,01 g acarreta mudança na densidade da ordem de 1 kg/m^3 (incerteza de 0,03%).

Desta forma, ficam demonstradas que, independentemente da resolução da balança, amostras de maiores massas geram menores incertezas no peso.

As pesagens nas duas balanças foram realizadas em ambiente refrigerado, com temperatura aproximadamente de 21 a 25° C.

A Tabela 4.1 mostra os parâmetros de soldagem adotados nos testes com cordões realizados diretamente sobre a chapa. Conforme Figueiredo (2000), com os parâmetros da Tabela 4.1 obtém-se transferência metálica no modo goticular.

Tabela 4.1 - Parâmetros de soldagem adotados nos testes com transferência no modo goticular

Item	Descrição	Módulo e Grandeza
01	Tensão média	24 V
02	Velocidade de alimentação do arame	8 m/min
03	Velocidade de soldagem	600 mm/min
04	Gás Argônio puro	15 l/min
05	Eletrodo ER4043	1,2 mm
06	Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	15 mm
07	Ângulo de Inclinação da tocha	10°
08	Chapa ABNT 5052	6 x 300 x 40 mm
10	Temperatura da chapa	Ambiente
11	Técnica de soldagem empurrando	

Na Tabela 4.2 são mostrados os valores de densidades do fabricante [$\rho_{fabricante}$] e medidas [ρ_{medida}] utilizando balança com resolução de 10⁻⁵g, determinados seguindo procedimento descrito no item 3.7.2 do Capítulo 3.

Tabela 4.2 - Valores de densidade em balança com resolução de 10⁻⁵g

AMOSTRA	ρ_{medida} [kg/m ³]	$\rho_{fabricante}$ [kg/m ³]	VV [%]	diferença % entre ρ_m e ρ_f
Metal de Base 5052	2.665	2.687	-	0,82
Cordão de solda	2.604	-	3,55	-

Na Tabela 4.3 são mostrados os valores de densidades fornecidas [$\rho_{fabricante}$] e medida [ρ_{medida}] por gravimetria, utilizando-se balança com resolução de 10⁻²g, seguindo o mesmo procedimento.

Tabela 4.3 - Valores de densidade em balança com resolução 10^{-2} g

AMOSTRA	ρ_{medida} [kg/m ³]	VV [%]	$\rho_{fabricante}$ [kg/m ³]	\neq % entre ρ_m e ρ_f
Metal de Base 5052	2.689	-	2.687	0,07
Arame de Adição ER4043	2.645	-	-	-
Cordão de solda	2.607	3,22	-	-

Pelos valores das Tabelas 4.2 e 4.3 verificam-se, respectivamente, diferenças de 0,82% e 0,07% entre os valores de densidades do fabricante e medidas, considerados baixos, levando-se em consideração que o erro de medição admitido na inspeção por gravimetria é de 0,6%, conforme demonstrado no item 3.7.2.

Quanto aos valores de densidade do cordão de solda realizado no modo goticular, mostrados nas Tabelas 4.2 e 4.3, destacam-se:

1. Considerando que o cordão de solda tem composição química composta de materiais provenientes do arame de adição e do metal de base, para uma condição de soldagem ideal era de se esperar densidade do cordão de solda com valor intermediário às densidades do arame e do metal de base, fato não ocorrido. Menores densidades do cordão de solda, obtidas nas medições realizadas nas duas balanças, atribui-se à presença de vazios.
2. Na balança de resolução de 10^{-5} g obteve-se valor de densidade do cordão de 2604 kg/m³. Comparando-se esse valor com a densidade do metal de base, calcula-se o volume de vazios $[VV] = (2665-2604) \times 100 / 2665 = 2,28$ %. Sendo esse valor considerado baixo, comprovado pela boa qualidade aparente do cordão analisado, demonstra a alta sensibilidade do método na quantificação de volume de vazios em cordões de solda.
3. Comparando os resultados de densidades dos cordões de solda nas duas balanças, observa-se que a balança com resolução de 10^{-2} g forneceu densidade do cordão de 2607 kg/m³. Comparando esse valor com a densidade do metal de base, de 2689 kg/m³, calcula-se o volume de vazios $VV = (2689-2607) \times 100 / 2689 = 3,05\%$, valor aproximado ao encontrado na balança de alta resolução.
4. Os resultados obtidos nas pesagens nas duas balanças mostram que a utilização da balança com 10^{-2} g de resolução não interfere nos resultados de forma significativa. Além disso, essa balança é mais prática e permite análise de amostras maiores.

4.2 Influência do comprimento e posição relativa da amostra na quantidade de volume de vazios em cordões

4.2.1 No modo de transferência goticular

Foram planejados e realizados testes com o objetivo de determinar qual o comprimento de cordão seria mais adequado para análise pela gravimetria. Também procurou-se determinar qual porção do cordão, se o início, o meio ou o fim, é a mais representativa do cordão de solda inteiro, para análise da variável dependente volume de vazios.

Os parâmetros de soldagem, todos mantidos constantes, estão na Tabela 4.1, considerando transferência no modo goticular. As chapas dos corpos de prova foram limpas com água e sabão e, em seguida, secadas com ar comprimido. Foram realizados três testes na mesma condição de soldagem, com cordões diretamente sobre a chapa, sem chanfro. Após a realização das soldagens os corpos de prova de 300 mm foram cortados em 3 partes de comprimentos aproximadamente iguais.

Tabela 4.4 - Resultados dos testes com transferência goticular

Cordão de Solda	Diluição do cordão Fração de arame de adição	Densidade de Referência [kg/m ³]	P _{ar}	P _{ag}	Densidade Medida [kg/m ³]	Volume de Vazios [%]
			[g]	[g]		
A _i	0,31	2677	6,72	4,17	2635	1,56
A _m			6,43	4,01	2657	0,74
A _f			8,17	5,09	2653	0,90
B _i	0,35	2675	6,13	3,81	2642	1,22
B _m			5,81	3,59	2617	2,16
B _f			7,01	4,35	2635	1,48
C _i	0,35	2675	7,40	4,59	2633	1,55
C _m			6,63	4,13	2652	0,86
C _f			5,93	3,70	2659	0,59
Gt _i		2675			2637	1,44
Gt _m		2675			2642	1,25
Gt _f		2675			2649	0,99
Gt		2675			2643	1,23

A Tabela 4.4 mostra os resultados referentes ao 3 cordões de solda referenciados como A, B e C. Os índices *i*, *m* e *f* representam amostras de início, meio e fim de cordão, com comprimento de 100 mm cada. Para calcular a densidade de referência dos corpos de prova, inicialmente os valores do percentual de diluição dos cordões de solda foram determinados, conforme descrito no item 3.7.2 do Capítulo 3. Os valores médios de densidades das porções inicial, média e final dos cordões estão associados a G_{t_i} , G_{t_m} e G_{t_f} , respectivamente. Assim, G_{t_i} é o valor médio de densidade de A_i , B_i e C_i , da mesma forma para G_{t_m} e G_{t_f} . Já na linha de G_t , têm-se os valores médios de densidades dos cordões inteiros.

Para facilitar o entendimento dos resultados apresentados na Tabela 4.4, foram confeccionados os gráficos da Figura 4.1. Em cada gráfico (a, b e c) são mostrados os valores de percentual de volumes de vazios de cada porção dos corpos de prova (início, meio e fim). No Gráfico d são mostrados os valores médios de volumes de vazios das porções de início, meio e fim de cordão.

Analisando os gráficos da Figura 4.1, observa-se que o Gráfico a mostra pouca variação dos valores observados de volumes de vazios, de 1,56% em A_i e C_i e de 1,22 % em B_i . No Gráfico b pode ser observada maior variação entre os valores de volumes de vazios nas porções do meio dos cordões, sendo o maior volume de vazios de 2,16% para o cordão B_m e o menor de 0,74% para o cordão A_m . Já no Gráfico c observa-se variação intermediária nos volumes de vazios das amostras de fim de cordão, sendo 1,48% para a amostra B_f e 0,59% para a amostra C_f .

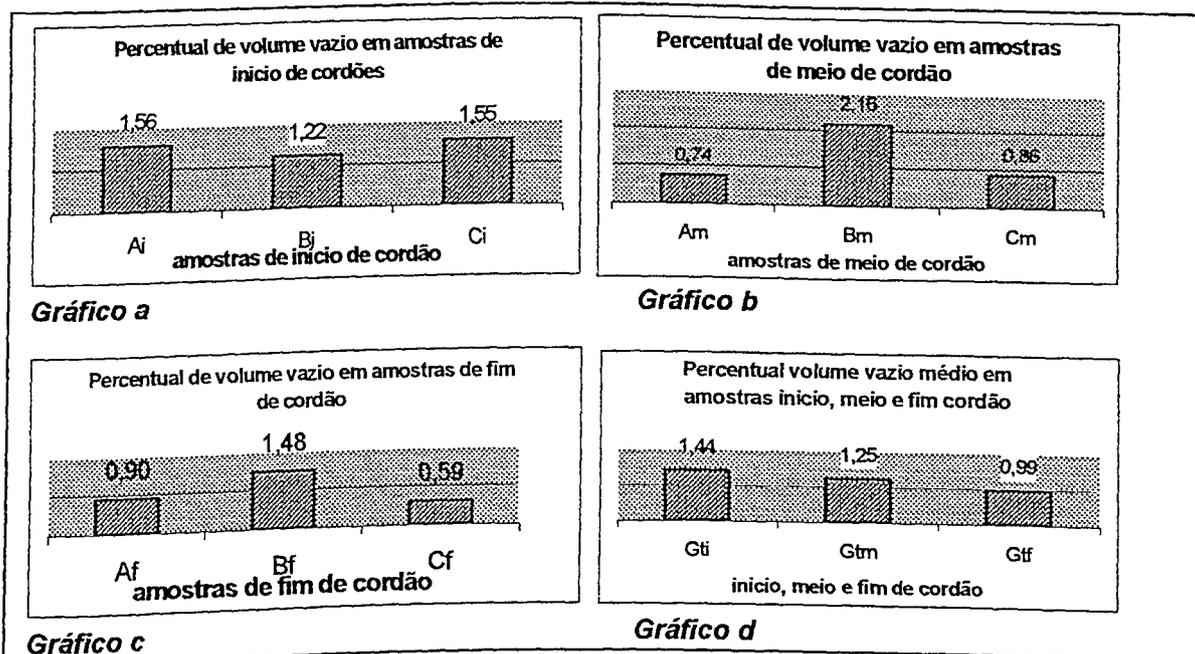


Figura 4.1 - Gráficos ilustrando os resultados da Tabela 4.4.

No Gráfico *d*, que tem valores médios de volumes de vazios das amostras de início, meio e fim dos cordões, observa-se maior volume de vazios no início dos cordões, reduzindo-se gradativamente ao longo do cordão. Esse resultado demonstra que a porção final do corpo de prova, previamente aquecida pelo calor do arco de soldagem, possibilita o maior escape das bolhas gasosas da poça de fusão, formando menos poros no cordão de solda.

4.2.2 No modo de transferência curto-circuito

Como é esperado que no modo de transferência por curto-circuito haja formação de mais poros, foram realizados testes nesse modo de transferência para verificar a técnica de inspeção por gravimetria. Essa etapa também procura confirmar, na transferência por curto-circuito, a importância da posição relativa do cordão no volume de vazios de cordões de solda, fato observado nos testes no modo de transferência goticular. Na Tabela 4.5 são mostrados os parâmetros de soldagem usados, que resultam em transferência no modo curto-circuito (Figueiredo, 2000).

Da mesma forma que no item anterior, antes da soldagem as chapas dos corpos de prova foram limpas com água e sabão e, em seguida, secadas com ar comprimido. Foram realizados três testes nas mesmas condições de soldagem com cordões diretamente sobre a chapa, sem chanfro. Após a realização da soldagem os corpos de prova foram cortados em 3 partes de comprimentos aproximadamente iguais.

Tabela 4.5 - Parâmetros de soldagem usados nos testes com transferência por curto-circuito.

Item	Descrição	Módulo e Grandeza
01	Tensão média	20 V
02	Velocidade de alimentação do arame	8 m/min
03	Velocidade de soldagem	600 mm/min
04	Gás argônio puro	15 l/min
05	Eletrodo ER4043	1,2 mm
06	Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	15 mm
07	Ângulo de inclinação da tocha	10 °
08	Chapa ABNT 5052	6 x 300 x 40 mm
10	Temperatura da chapa	Ambiente
11	Técnica de soldagem empurrando	

A Tabela 4.6 mostra os resultados referentes aos três cordões de solda, denominados *D*, *E* e *F*. Os índices *i*, *m* e *f* representam amostras de início, meio e fim de cordão, com comprimento de 100 mm cada. Para calcular a densidade de referência dos corpos de prova,

inicialmente os valores do percentual de diluição de metal de base e arame de adição foram determinados, conforme descrito no item 3.7.2. Os valores médios de densidades e das porções inicial, média e final dos cordões estão associados a CC_i , CC_m e CC_f , respectivamente. Assim, CC_i é o valor médio de densidade de D_i , E_i e F_i , da mesma forma para CC_m e CC_f . Já na linha de CC , têm-se os valores médios de densidade dos cordões inteiros.

Tabela 4.6 - Resultados dos testes com transferência em curto-circuito

Cordão de Solda	Diluição do cordão		Densidade de Referência [kg/m ³]	P _{ar} [g]	P _{ag} [g]	Densidade Medida [kg/m ³]	Volume de vazios [%]	
	Fração de arame de adição							
D_i	0,36		2675	7,15	4,37	2572	3,85	
D_m				5,97	3,67	2596	2,96	
D_f				4,59	2,82	2593	3,06	
E_i	0,39		2673	5,32	3,26	2583	3,48	
E_m				6,39	3,90	2566	4,01	
E_f				4,30	2,65	2606	2,52	
F_i	0,35		2675	5,29	3,23	2568	3,99	
F_m				6,53	4,00	2581	3,51	
F_f				5,17	3,16	2572	3,84	
CC_i			2675			2574	3,77	
CC_m			2675			2581	3,51	
CC_f			2675			2590	3,16	
CC							2582	3,48

Observa-se pouca variação da diluição arame de adição no metal de base, com valores mínimo e máximo de 0,35 e 0,39, pouco influenciando nos valores de densidade de referência.

Para facilitar o entendimento dos resultados apresentados na Tabela 4.6 foram confeccionados os gráficos da Figura 4.2. Nos Gráficos *e*, *f* e *g* são mostrados os valores de percentual de volumes de vazios de cada porção dos corpos de prova (início, meio e fim). No Gráfico *h* são mostrados os valores médios de volumes de vazios das porções de início, meio e fim de cordão.

Analisando os gráficos da Figura 4.2, observa-se que no Gráfico *e* há pouca variação nos valores de volumes de vazios, 3,85% em D_i , 3,40% em E_i e 3,99% em F_i . No gráfico *f* pode ser observada variação intermediária nos valores de volumes de vazios nas porções do meio dos cordões, sendo o maior volume de vazios 2,96% para o cordão D_m e o menor 4,01% para o cordão E_m . Já no Gráfico *g* é observada maior variação nos volumes de vazios das amostras de fim de cordão, sendo 3,84% para a amostra F_f e 2,52% para a amostra E_f .

No Gráfico *h*, que tem valores médios de volumes de vazios das amostras de início, meio e fim dos cordões, é observado maior volume de vazios no início dos cordões, sendo os vazios reduzidos ao longo do cordão. Esse resultado demonstra novamente que o aquecimento

gradativo do corpo de prova, promovido pelo do arco de soldagem, facilita o escape das bolhas gasosas na porção final da solda, formando menos poros no final do cordão.

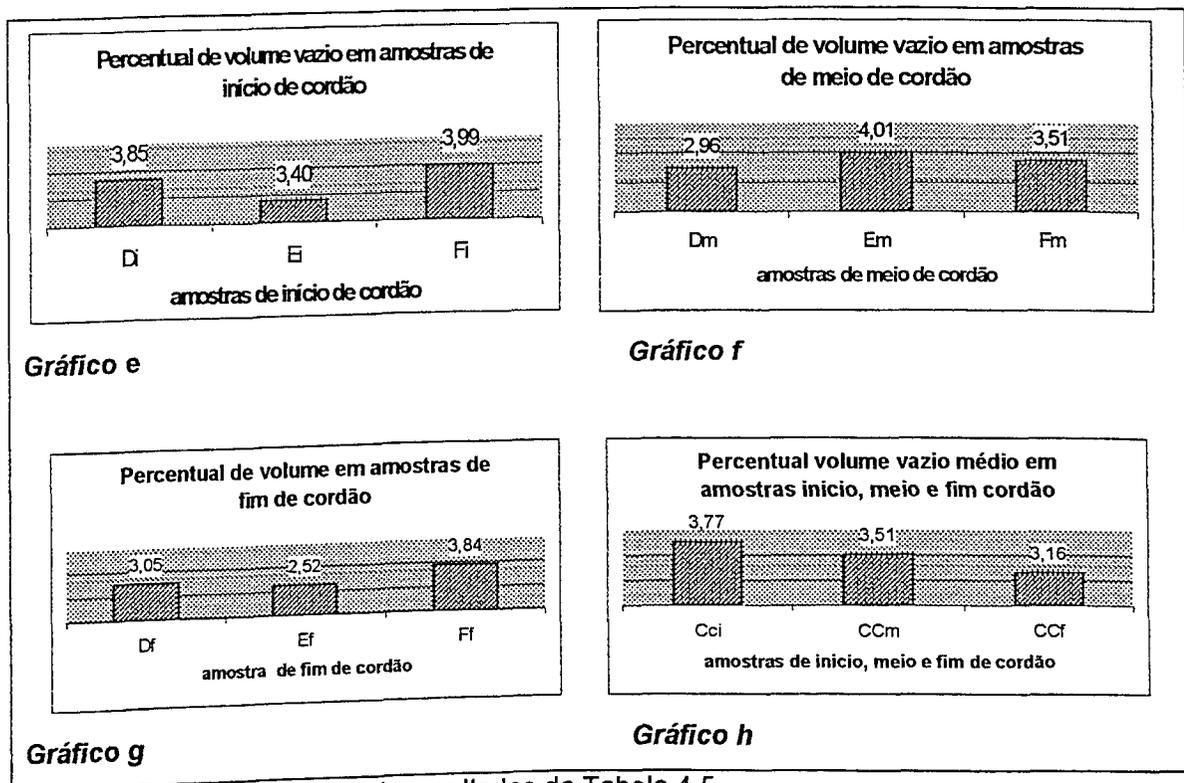


Figura 4.2 - Gráficos ilustrando resultados da Tabela 4.5

Comparando o valor médio de volume de vazios das amostras de meio de cordão para a soldagem no modo globular, de 1,25%, representadas por Gt_m no Gráfico 4.4 da Figura 4.1, com o valor médio de volume de vazios do cordão de solda inteiro, 1,23%, para o mesmo modo de transferência, mostrado na Figura 4.3, percebe-se que o percentual de volume de vazios de amostras intermediárias do cordão de solda se aproxima muito da quantidade de volume de vazios do cordão inteiro.

O mesmo fenômeno pode ser relatado para a soldagem com transferência por curto-circuito. O valor médio de volume de vazios das amostras de meio de cordão, de 3,51%, representadas por CC_m no Gráfico 4.8 da Figura 4.2, e o valor médio de volume de vazios do cordão de solda inteiro, 3,48%, mostrado na Figura 4.3, têm valores muito próximos. Assim, foi definido que as amostras de cordão a serem analisadas sistematicamente deveriam ser retiradas a partir de 25 mm do início da soldagem, com comprimento total de 100 mm, por ser considerado um valor mais seguro para a seqüência da análise.

Comparando agora os dois modos de transferência, a Figura 4.3 mostra os valores médios de volumes de vazios nos cordões soldados nos modos goticular e curto-circuito.

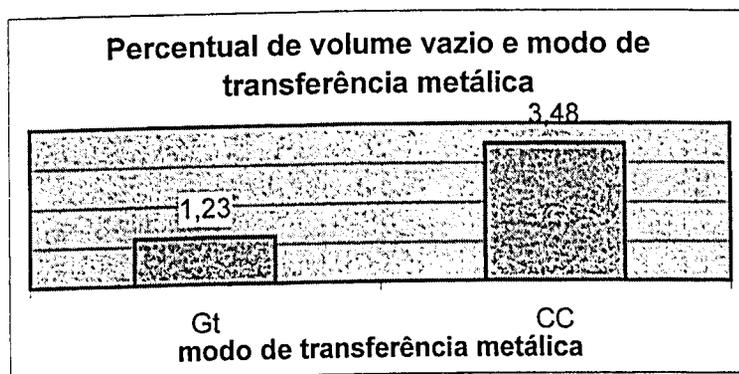


Figura 4.3 - Percentual de volume de vazios X modo de transferência metálica

Os cordões de solda realizados com transferência goticular apresentam baixo volume de vazios, 1,23 %, sendo considerados de boa qualidade por estar abaixo do nível de aceitação da norma ASME, que é de 1,6%, segundo Saperstein et al (1964). Já os cordões de solda realizados com transferência por curto-circuito apresentaram elevados volumes de vazios, 3,48%, sendo reprovados pelo limite de tolerância apresentado por Saperstein et al.

4.3 Análise de influência de variáveis de soldagem no percentual de volume de vazios em cordões

Com o objetivo de se verificar as influências da configuração da junta de topo, da técnica e velocidade de soldagem e, novamente, da tensão de soldagem no volume de vazios dos cordões, foram planejados e realizados cinco testes, variando-se os parâmetros de soldagem acima descritos. Os parâmetros de soldagem constantes foram os mesmos já adotados e que demonstram fornecer transferências no modo goticular e curto-circuito, mostrados na Tabela 4.1 e 4.5, respectivamente.

Os cinco corpos de prova foram identificados com as letras de A_1 a E_1 . Foram adotadas juntas de topo sem abertura, denominada zero, aplicadas nos CP's A_1 , B_1 e E_1 , e junta com abertura de 1,2 mm para os CP's C_1 e D_1 . A técnica empurrando a tocha [E], mais usual, foi aplicada em todos os CP's, exceto no CP B_1 , em que foi aplicada a técnica puxando [P]. No CP D_1 foi aplicada velocidade de soldagem de 800 mm/min e no CP E_1 tensão de soldagem de 20 volts. Todos os parâmetros de soldagem variados nessa bateria de pré-testes e os resultados da inspeção por gravimetria dos cordões são mostrados na Tabela 4.7, cuja legenda segue no rodapé. Os CP's foram limpos com água e sabão e secados em ar comprimido, até duas horas antes da soldagem.

Tabela 4.7 - Parâmetros de soldagem e resultados das inspeções por gravimetria dos testes A_1 a E_1

Amostra	PARÂMETROS					RESULTADOS			
	AJ	TS	Vs	U	Modo de Transferência	P_{ar}	P_{ag}	Densidade Medida [kg/m^3]	VV [%]
A_1	zero	E	60	24	Goticular	13,28	8,28	2656	0,49
B_1	zero	P	60	24	Goticular	13,64	8,50	2653	0,60
C_1	1,2	E	60	24	Goticular	12,16	7,60	2667	0,07
D_1	1,2	E	80	24	Goticular	4,65	2,90	2657	0,45
E_1	zero	E	60	20	Curto-circuito	7,37	4,58	2641	1,05

Onde: AJ é a abertura da junta em mm; TS é a técnica de soldagem [E ou P]; U é a tensão de soldagem [V]; Vs é a velocidade de soldagem [mm/min]; P_{ar} é o peso da amostra no ar [g]; P_{ag} é o peso da amostra em água [g]; e VV é o volume de vazios da amostra [%].

No cálculo do volume de vazios dos cordões foi adotado o valor de 2669 kg/m^3 como densidade de referência, que equivale à diluição de 50% de arame de adição no cordão de solda, valor de densidade representativa, conforme discutido no item 3.6.

Os resultados da inspeção por gravimetria nos cordões dessa bateria de testes, mostrados na Tabela 4.7 e indicam que:

1. Comparando os percentuais de volumes de vazios dos cordões A_1 , de 0,49% e B_1 , de 0,60%, verifica-se a tendência de maior formação de poros com a aplicação da técnica de soldagem puxando. Destaca-se que com a técnica empurrando obteve-se ainda um cordão de melhor aparência;
2. Comparando os valores de volumes de vazios dos cordões A_1 , de 0,49%, e C_1 , de 0,07%, verifica-se a tendência de menor formação de poros com a aplicação de configuração de junta com abertura de 1,2 mm;
3. Comparando os valores de volumes de vazios dos cordões C_1 , de 0,07% e D_1 , de 0,45% verifica-se a tendência de maior formação de poros com o aumento de velocidade de soldagem de 600 para 800 mm/min; e
4. Conforme já fora observado em outros testes, no corpo de prova E_1 com transferência por curto-circuito há maior formação de volumes de vazios no cordão de solda.

Os resultados dessa bateria de testes, mais uma vez, mostram coerência na inspeção gravimétrica. A técnica empurrando, que apresenta melhores resultados que a técnica puxando a tocha, é recomendada pela ALCAN (1983), e é utilizada em aplicações práticas. A imposição de uma pequena abertura de junta é recomendada por Kuriyama et al (1975), conferindo com

os resultados encontrados nos testes desenvolvidos. O efeito da velocidade de soldagem sobre a formação de poros é conhecido, resultado observado nos testes dessa bateria. E, mais uma vez, fica evidente, que a soldagem realizada com transferência por curto-circuito produz cordões com elevado volume de vazios.

4.4 Nova análise de influência de variáveis de soldagem na quantidade de volume de vazios em cordões

Com o objetivo de se verificar a influência de nova configuração de junta de topo e de outros parâmetros de soldagem, foram planejados e realizados novos testes, com a adoção de juntas de topo com aberturas de 1,0 mm e 1,2 mm, entre outras variáveis, todas mostradas na Tabela 4.8, que também apresenta os resultados da inspeção por gravimetria dos cordões. Os parâmetros de soldagem constantes adotados, mostrados na Tabela 4.1, fornecem transferência no modo goticular. O argônio comercialmente puro foi aplicado como gás de proteção em todos os testes. Destaca-se que a velocidade de soldagem nessa bateria de testes, fixada em 800 mm/min, é diferente da velocidade dos demais testes, visando aumentar a sensibilidade dos resultados.

Os sete cordões realizados nessa bateria e listados na Tabela 4.8, cuja legenda segue no rodapé, foram identificados com as letras de D_1 a J_1 . As chapas foram limpas com água e sabão e secadas em ar comprimido até duas horas antes dos ensaios. Foram adotadas juntas de topo com abertura de 1,2 mm para os corpos de prova D_1 e E_1 e junta com abertura de 1,0 mm foi aplicada nos CP's F_1 , G_1 , H_1 , I_1 , e J_1 . A técnica empurrando, mais usual, foi aplicada em todos os CP's, exceto no CP F_1 . No CP E_1 a variação ocorreu na velocidade de soldagem, fixada em 750 mm/min e no CP de prova H_1 foi adotada tensão de soldagem de 26 volts. No ensaio I_1 , após serem lavadas com água e sabão, as chapas foram imersas em água por vinte e quatro horas, removidas e secas com ar comprimido momentos antes da realização do teste. No CP J_1 foi aplicada velocidade de alimentação do arame de 11 m/min, aumentando-se conseqüentemente a corrente e o volume da poça de fusão.

Aqui também, no cálculo do volume de vazios dos cordões, foi usado o valor de 2669 kg/m³ como densidade de referência, equivalente à diluição de 50% de arame de adição no cordão de solda, valor de densidade considerada representativa.

Tabela 4.8 - Parâmetros de soldagem e resultados das inspeções por gravimetria dos testes D_1 a L_1

Amostra	PARÂMETROS							RESULTADOS			
	AJ	TS	Vs	Vg	U	Chapa	Valim	P_{ar}	P_{ag}	Densidade Medida [kg/m ³]	VV [%]
D_1	1,2	E	800	15	24	Seca	8	4,65	2,90	2657	0,45
E_1	1,2	E	750	15	24	Seca	8	8,78	5,44	2629	1,50
F_1	1,0	P	800	15	24	Seca	8	7,84	4,86	2631	1,49
G_1	1,0	E	800	10	24	Seca	8	7,01	4,35	2635	1,27
H_1	1,0	E	800	15	26	Seca	8	9,07	5,65	2652	0,64
I_1	1,0	E	800	15	24	24 horas n'água	8	9,85	6,15	2662	0,26
J_1	1,0	E	800	15	24	Seca	11	12,13	7,52	2631	1,42

Onde: AJ é a abertura da junta em mm; TS é a técnica de soldagem [Empurrando ou Puxando a tocha]; Vs é a velocidade de soldagem [mm/min]; Vg é a vazão do gás de proteção [l/min]; U é a tensão de soldagem [V]; Valim é a velocidade de alimentação do arame [m/min]; P_{ar} é o peso da amostra no ar [g]; P_{ag} é o peso da amostra em água [g]; e VV é o volume de vazios da amostra [%].

O volume de vazios do cordão D_1 , de 0,45%, serve como base de comparação para os demais cordões. Os percentuais de volumes de vazios dos testes D_1 a L_1 , mostrados na Tabela 4.8, indicam:

1. O valor de volume de vazios do cordão E_1 , de 1,50%, mostra tendência a maior formação de poros com a diminuição da velocidade de soldagem de 800 para 750 mm/min;
2. O percentual de volume de vazios do cordão F_1 , de 1,49%, mostra que a técnica puxando favorece a formação de poros, além de produzir cordão de solda de aparência indesejável;
3. O resultado do corpo de prova G_1 , com 1,27% de volume de vazios, mostra que a aplicação de baixa vazão do gás de proteção pode favorecer à maior formação de poros;
4. O valor de volume de vazios do cordão H_1 , de 0,64%, mostra pouca variação relativa aos vazios do cordão D_1 ao aumentar da tensão de soldagem de 24 para 26 volts;
5. Pelo percentual de volume de vazios do cordão I_1 , de 0,26%, observa-se que a permanência da chapa submersa em água não favoreceu na formação de poros; e

6. No resultado do corpo de prova J_1 , cujo volume de vazios é 1,42%, vê-se que o aumento da velocidade de alimentação do arame eletrodo de 8 para 11 m/min favorece a maior formação de poros.

Analisando os resultados de todos os testes preliminares, apesar de ter sido realizado somente um teste para cada condição, verifica-se que a inspeção gravimétrica, de acordo com os parâmetros variados, traz resultados de porosidade coerentes com a literatura, sendo sua aplicação viável, havendo dúvida para caso do item 1 acima, em que foi variada a velocidade de soldagem, provavelmente devido a fatores não controlados do processo.

Entre os parâmetros de soldagem investigados, o modo de transferência metálica mostra ser de grande influência no volume de vazios dos cordões de solda em chapas de alumínio da liga ABNT 5052. Destaca-se, também, a configuração da junta de topo, parâmetro de fácil variação e que trouxe relevantes alterações no volume de vazios dos cordões de solda investigados. Outro parâmetro de soldagem ainda não investigado nesse trabalho, mas que é bastante discutido em pesquisas de porosidade na soldagem de alumínio, é a técnica de limpeza superficial da chapa.

Desta forma, foram eleitos os modos de transferência metálica, configuração da junta de topo e método de limpeza superficial da chapa como parâmetros a serem investigados de forma sistemática no complemento da pesquisa.

4.5 Planejamento fatorial

Como forma de investigação sistemática da influência dos parâmetros eleitos para investigação sistemática, ou sejam, modos de transferência metálica, configurações de juntas e métodos de limpeza superficial das chapas na formação de porosidade em cordões de solda, realizados em chapas de alumínio ABNT 5052, foram montados dois conjuntos de planejamentos fatoriais 3^3 (três fatores e três níveis). O primeiro planejamento fatorial, englobando os testes de 01 a 27, foi montado para investigação dos modos convencionais de transferência metálica (níveis curto-circuito, goticular e globular), e as configurações de juntas (níveis zero, *umsem* e *umcom*) e métodos de limpezas (níveis A&S, Ac&Esc e LQ). O segundo planejamento, englobando os testes de 10 a 36, investiga os modos de transferência por vôo livre (níveis goticular, globular e transferência metálica controlada a UGPP), além dos três níveis de configurações de juntas e métodos de limpezas superficiais especificados. Destaca-se que por otimização do número de experimentos, os dois conjuntos de planejamentos experimentais puderam ser sobrepostos, totalizando apenas 36 ensaios.

4.5.1 Planejamento fatorial 3³ envolvendo os modos convencionais de transferência

A Tabela 4.9 mostra o planejamento fatorial, com os testes 01 a 27, montado para investigar os modos convencionais de transferência metálica por curto-circuito [CC], goticular [Got] e globular [Glob].

Tabela 4.9 - Planejamento fatorial 3³ envolvendo os modos convencionais de transferência metálica

Cordão de Solda	Modo de Transferência	Configuração da junta	Tipo de Limpeza
01	CC	zero	A&S
02	CC	zero	Ac&Es
03	CC	zero	LQ
04	CC	umsem	A&S
05	CC	umsem	Ac&Es
06	CC	umsem	LQ
07	CC	umcom	A&S
08	CC	umcom	Ac&Es
09	CC	umcom	LQ
10	Got	zero	A&S
11	Got	zero	Ac&Es
12	Got	zero	LQ
13	Got	umsem	A&S
14	Got	umsem	Ac&Es
15	Got	umsem	LQ
16	Got	umcom	A&S
17	Got	umcom	Ac&Es
18	Got	umcom	LQ
19	Glob	zero	A&S
20	Glob	zero	Ac&Es
21	Glob	zero	LQ
22	Glob	umsem	A&S
23	Glob	umsem	Ac&Es
24	Glob	umsem	LQ
25	Glob	umcom	A&S
26	Glob	umcom	Ac&Es
27	Glob	umcom	LQ

Os parâmetros de tensão e corrente necessários para obtenção dos modos de transferências convencionais foram determinados por Figueiredo (2000), mostrados na Tabela 3.3 do Capítulo 3; as configurações de juntas de topo, zero - junta de topo sem abertura;

umsem - junta de topo com abertura de 1,0 mm e *umcom* - junta de topo com abertura de 1,0 mm e com a aplicação de argônio como gás de purga; e métodos de limpeza superficial da chapa: lavagem com água e sabão [A&S], acetona e escovamento [Ac&Es] e limpeza química [LQ]. Os parâmetros de soldagem constantes usados nos testes 01 a 27 estão na Tabela 3.2.

Como forma de verificar a existência de coerência nos resultados fornecidos pela inspeção por gravimetria, foi realizada inspeção de porosidade por radiografia nos cordões de solda 01 a 27 e, em seguida, feita comparação dos resultados das duas formas de inspeção.

4.5.2 Planejamento fatorial 3³ envolvendo a transferência controlada a UGPP

A Tabela 4.10 mostra o planejamento fatorial, com os testes 10 a 36, montado para investigar os modos convencionais de transferência goticular [Got] e globular [Glob] e a transferência metálica pulsada controlada a UGPP, além das configurações de juntas e métodos de limpeza superficiais já descritas. Os parâmetros de tensão e corrente necessários para obtenção dos modos de transferências metálica goticular [Got] e globular [Glob] estão na Tabela 3.3. Os ensaios e a técnica de determinação dos parâmetros de soldagem que fornecem UGPP são mostrados no item 5.4 do capítulo de resultados e discussões e os parâmetros de soldagem constantes usados nos testes 10 a 36 estão na Tabela 3.2.

Na inspeção dos corpos de prova dos testes com transferência por vôo livre foi utilizada a inspeção por gravimetria.

Tabela 4.10 - Planejamento fatorial 3^3 envolvendo transferência a UGPP

Cordão de Solda	Modo de Transferência	Configuração da junta	Tipo de Limpeza
10	Got	zero	A&S
11	Got	zero	Ac&Es
12	Got	zero	LQ
13	Got	umsem	A&S
14	Got	umsem	Ac&Es
15	Got	umsem	LQ
16	Got	umcom	A&S
17	Got	umcom	Ac&Es
18	Got	umcom	LQ
19	Glob	zero	A&S
20	Glob	zero	Ac&Es
21	Glob	zero	LQ
22	Glob	umsem	A&S
23	Glob	umsem	Ac&Es
24	Glob	umsem	LQ
25	Glob	umcom	A&S
26	Glob	umcom	Ac&Es
27	Glob	umcom	LQ
28	UGPP	zero	A&S
29	UGPG	zero	Ac&Es
30	UGPP	zero	LQ
31	UGPP	umsem	A&S
32	UGPP	umsem	Ac&Es
33	UGPP	umsem	LQ
34	UGPP	umcom	A&S
35	UGPP	umcom	Ac&Es
36	UGPP	umcom	LQ

CAPÍTULO V

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes de investigação sistemática dos fatores selecionados.

5.1 Resultados e análise dos testes com transferências metálicas convencionais

Neste item são apresentados e discutidos os resultados dos testes para a verificação da influência de parâmetros de soldagem (modos de transferências metálicas convencionais - curto-circuito [CC], goticular [Got] e globular [Glob]), configurações de junta de topo e métodos de limpeza superficial da chapa no grau de formação de porosidade na soldagem MIG de alumínio da liga ABNT 5052.

Neste trabalho os modos de transferência metálica, as configurações das juntas de topo e os métodos de limpeza superficial são chamados variáveis independentes. O volume de vazios e o número de poros visíveis são denominados variáveis dependentes ou, simplesmente, respostas.

Os parâmetros de soldagem constantes usados nos testes 01 a 27 estão na Tabela 3.2 do Capítulo 3. Os parâmetros de tensão e corrente de soldagem necessários para obtenção dos modos de transferência metálica por curto-circuito [CC], goticular [Got] e globular [Glob] estão na Tabela 3.3 do Capítulo 3. A Tabela 4.9 do Capítulo 4 mostra o planejamento fatorial 3^3 , mostrando as 27 combinações de variações dos testes de soldagem.

Relembrando, as configurações das juntas de topo com chanfro reto são: junta de topo sem abertura [zero], junta de topo com abertura de 1,0 mm [umsem] e junta de topo com abertura de 1,0 mm e com aplicação de gás de purga sob a raiz [umcom]. Os métodos de limpeza superficial das chapas são limpeza com água e sabão [A&S], limpeza com acetona e escova [Ac&Es] e limpeza química [LQ].

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos testes dessa fase, em percentuais de volumes de vazios [VV] dos cordões obtidos pela inspeção por gravimetria, e os números de poros visíveis nas radiografias dos cordões de solda, com resultados a serem discutidos no próximo item. Ainda nessa tabela, são mostrados, para cada cordão de solda, os percentuais de diluição de

metal de base e arame de adição, as densidades de referências calculadas a partir das diluições, os pesos ao ar e em água e as densidades reais das amostras calculadas a partir das pesagens. Os procedimentos para obtenção desses dados são mostrados no Capítulo 3, no item 3.7.2.

Tabela 5.1 - Resultados das inspeções gravimétrica e radiográfica.

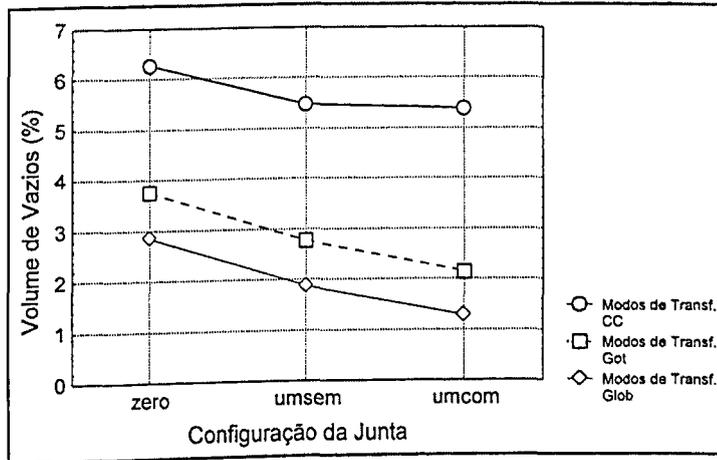
Cordão de Solda	Diluição do cordão	Densidade de Referência [kg/m ³]	P _{ar} [g]	P _{ag} [g]	Densidade Medida [kg/m ³]	Gravimetria	Radiografia
	Fração de arame de adição					Volume de Vazios [%]	Números de Poros Visíveis
1	0,43	2672	6,03	3,63	2513	5,96	13
2	0,51	2669	5,42	3,22	2464	7,68	14
3	0,46	2671	5,42	3,28	2533	5,16	15
4	0,51	2669	6,15	3,73	2541	4,77	10
5	0,58	2666	4,80	2,87	2487	6,71	17
6	0,55	2667	5,25	3,18	2536	4,90	8
7	0,64	2663	6,84	4,10	2496	6,27	21
8	0,63	2664	6,69	4,05	2534	4,87	13
9	0,63	2664	5,67	3,43	2531	4,98	6
10	0,41	2673	6,06	3,70	2568	3,92	2
11	0,42	2672	6,67	4,08	2575	3,63	2
12	0,45	2671	7,46	4,56	2572	3,69	1
13	0,32	2676	7,12	4,36	2580	3,61	4
14	0,45	2671	7,00	4,30	2593	2,94	3
15	0,42	2672	6,38	3,95	2626	1,75	0
16	0,50	2669	8,33	5,16	2628	1,55	5
17	0,33	2676	6,28	3,86	2595	3,02	4
18	0,44	2671	8,94	5,53	2622	1,86	1
19	0,54	2667	4,50	2,77	2601	2,48	1
20	0,57	2666	4,10	2,52	2595	2,67	2
21	0,43	2672	5,73	3,51	2581	3,40	4
22	0,57	2666	4,54	2,80	2609	2,14	1
23	0,56	2667	6,76	4,16	2600	2,50	4
24	0,47	2670	6,61	4,11	2644	0,98	3
25	0,55	2667	5,75	3,56	2626	1,55	0
26	0,46	2671	5,66	3,52	2645	0,96	1
27	0,40	2673	6,67	4,14	2636	1,37	0

Para avaliar os resultados de uma maneira mais consistente, as respostas foram submetidas a análise estatística de variância. Para isso considerou-se, como critério de análise, que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma determinada resposta quando o nível de significância (α) obtido foi inferior a 5%, ou seja, uma confiabilidade estatística de 95%.

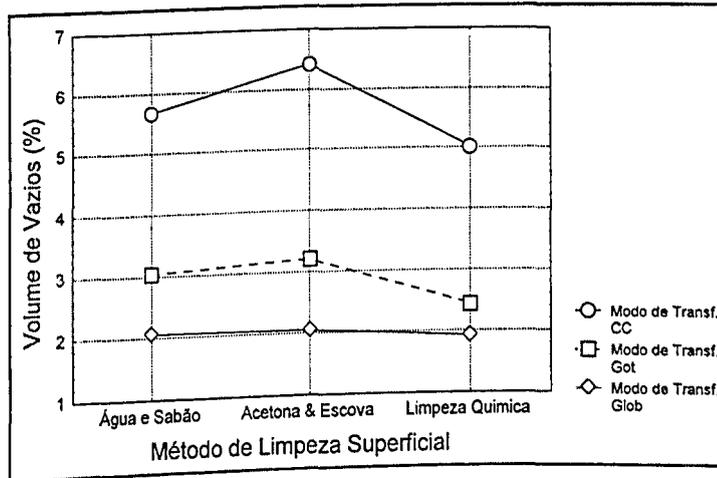
Como os ensaios foram realizados sem repetição, na análise estatística foi considerado não haver interações significativas entre as variáveis de entrada como, por exemplo, as interações entre Modo de Transferência X Configuração da Junta, Modo de Transferência X Método de Limpeza e Configuração da Junta X Método de Limpeza que foram consideradas nulas. Este artifício utilizado para obtenção dos valores de nível de significância (α) é denominado de "pooling". Para maiores detalhes sobre este artifício, ver literatura especializada sobre análise de variância (Costa Neto, 1997; Phadke, 1989). Para os testes em análise da Tabela 5.1, um exemplo de falta de interação entre as variáveis de entrada é observado na Figura 5.1 (a), onde pode ser visto que o comportamento do volume de vazios em função da configuração da junta não é alterado pelo modo de transferência metálica. Da mesma forma ocorre para as outras interações, ver Figura 5.1 (b) e (c). Por definição, a interação entre dois fatores ocorre quando produz efeito diferente da soma de seus efeitos individuais (Miranda, 1999).

A Tabela 5.2 mostra os valores dos níveis de significância α , ou seja, o resultado do teste de análise estatística de variância na resposta, denominada volume de vazios dos cordões. Os números em negrito nesta tabela indicam que se pode afirmar que os valores médios nas respostas foram estatisticamente afetados pelas variáveis independentes, com 95% de confiabilidade. Pode ser visto na Tabela 5.2, por exemplo, que a configuração da junta apresentou valor de significância de 0,001737 no volume de vazios, o que significa, estatisticamente falando, que a configuração da junta influenciou no volume de vazios dos cordões. Quando se observa o efeito do tipo de limpeza superficial, verifica-se que o valor de significância correspondente foi de 0,086705, ou seja, estatisticamente falando, pode-se afirmar que o tipo de limpeza *não* influenciou no volume de vazio dos cordões, com 95% de confiabilidade. Pelos valores da Tabela 5.2, também pode se afirmar que a variável modo de transferência metálica afetou no volume de vazios dos cordões, com 95% de confiabilidade.

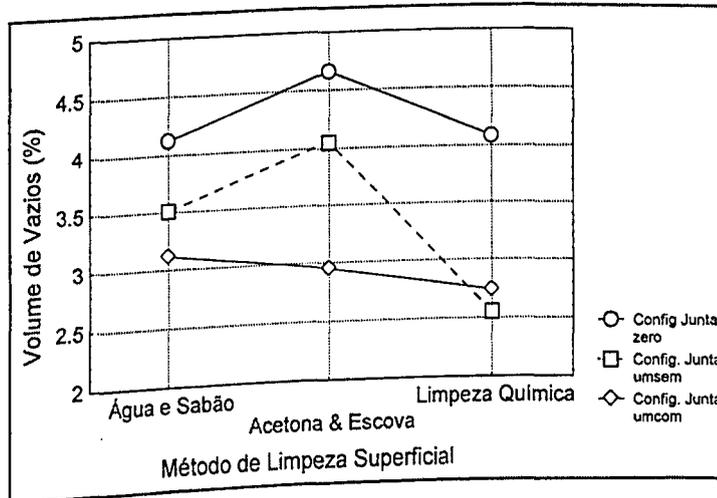
A Figura 5.2 mostra os gráficos dos resultados em termos de valores médios de volume de vazios.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.1 – Gráficos de interações entre as variáveis de entrada.

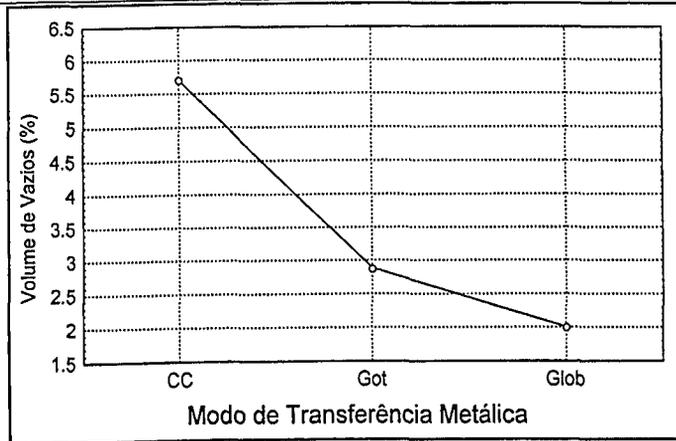
Tabela 5.2 - Níveis de significância para as variáveis independentes dos testes 01 a 27, com inspeção por gravimetria.

Nível de significância obtido em função do volume de vazios (α)			
	Nível de significância (α)		
	Modo de Transferência	Configuração da Junta de Topo	Método de Limpeza
Volume de Vazios	0,000000	0,001737	0,086705

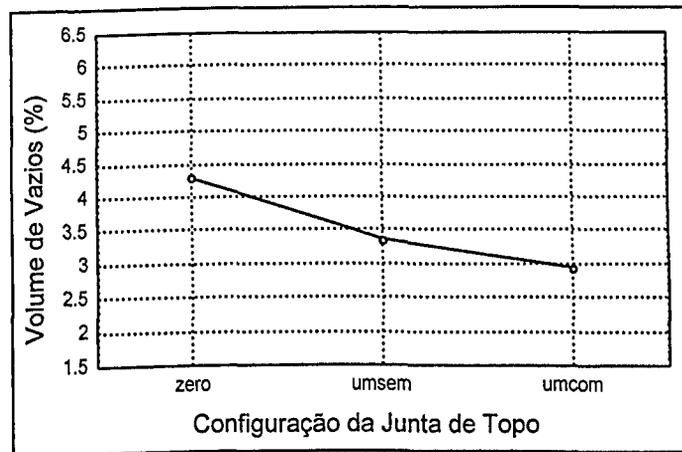
Na Figura 5.2 (a) vê-se que soldagens realizadas no modo de transferência metálica por curto-circuito [CC] resultaram em cordões com os maiores valores médios de volume de vazios, 5,7%. Entre os três modos convencionais de transferência metálica, o modo globular [Glob] apresentou melhores resultados, fornecendo valores médios de volume de vazios de 2,0%. O modo goticular [Got] também forneceu valores de volume de vazios considerados baixos, de 2,8%, aproximando-se dos valores obtidos por Saperstein et al (1964) em soldagens realizadas sob condições semelhantes.

Pelos resultados obtidos, a transferência metálica no modo curto-circuito foi, entre todas as variáveis avaliadas, a variável de maior influência na formação de vazios nos cordões de solda. Figueiredo (2000) mostra que esse modo de transferência é altamente instável, gerando uma grande quantidade de respingo, devido, principalmente, aos curtos-circuitos repulsivos que ocorrem no momento da transferência metálica. Esta alta instabilidade na transferência, também observada nesse trabalho, resulta na apreensão de grandes quantidades de hidrogênio pelo cordão de solda, considerado pela literatura como o maior causador de porosidade na soldagem de ligas de alumínio (Lucas, 1999).

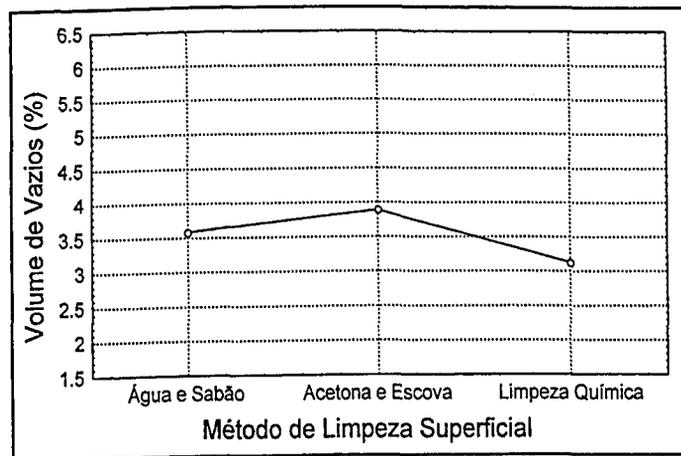
Analisando os outros dois modos de transferência, o globular promove menores volumes de vazios nos cordões que o goticular devido a ser realizado em corrente de soldagem mais baixa, para uma mesma faixa de tensão de soldagem, que produz poça de fusão com menor volume da poça e, possivelmente, com temperatura mais baixa, dissolvendo menos hidrogênio. Também foi verificado que a transferência goticular produz cordões com maior penetração na chapa que a transferência globular, impondo uma maior trajetória a ser percorrida pela bolha gasosa antes de escapar para a atmosfera. Em contra partida, a menor temperatura na transferência globular promove resfriamentos mais rápidos da poça de fusão, o que facilita a apreensão de gases no cordão de solda. Portanto, na combinação de fatores, na formação de poros prevaleceu a maior solubilização de hidrogênio e o maior caminho a ser percorrido pela bolha gasosa antes de escapar para a superfície sobre a menor taxa de resfriamento, sendo essa a provável razão pela qual o modo goticular produz cordões com maiores volumes de vazios que o modo globular.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.2 - Gráficos de percentuais médios de volume de vazios versus variáveis independentes.

A Figura 5.2 (b), que considera os valores médios de volume de vazios associados à variável configuração da junta de topo, mostra que a realização de cordões em junta de topo sem abertura, configuração zero, promove cordões com valor médio de 4,3% de volume de vazios, sendo a pior condição. A adoção de abertura de 1,0 mm na raiz da junta de topo, tipo *umsem*, gera cordões com volume médio de vazios de 3,3%. É observado também que, aplicando gás de purga sob a raiz à junta de topo com abertura de 1,0mm, configuração *umcom*, o volume médio de vazios nos cordões cai para 2,9%. Na junta de topo sem abertura na raiz, zero, acredita-se que o vapor d'água presente no ar entre os chanfros não é removido pelo gás de proteção, sendo "aprisionado" pela própria junta, contribuindo para a formação de vazios no cordão de solda. Verifica-se que na junta do tipo *umsem* a abertura de 1,0 mm permite ação mais eficiente do gás de proteção. Fica evidente, também, que a aplicação de gás de purga sob a abertura da junta, configuração *umcom*, aumenta a ação dos gases de proteção, por expulsar o ar atmosférico presente, diminuindo, ainda mais, o volume de vazios dos cordões. Conforme Kuriyama et al (1975) destacou, observa-se que a porosidade existente devido à existência da face de raiz pode ser reduzida pela produção de uma razoável abertura da raiz entre as arestas adjacentes.

Os resultados da Figura 5.2 (c) mostram grande proximidade nos valores de volumes de vazios dos cordões associados aos métodos de limpeza superficial das chapas, oscilando de 3,2 a 3,9%. Esse fato indica não ser possível afirmar haver diferença no volume de vazios dos cordões devido à mudança no método de limpeza da chapa de alumínio. Isso pode ser explicado porque na soldagem MIG de alumínio em corrente contínua positiva (CC⁺) espera-se, assim como no processo TIG, ocorrer permanente limpeza catódica, na qual a camada de óxidos da superfície exposta do metal é removida pela ação do arco elétrico na superfície do metal (Vieira Jr, 1999). A remoção dos óxidos da superfície da chapa soldada pode tornar reduzidas as fontes de hidrogênio provenientes da chapa de alumínio. Na remoção de óxidos pelas limpezas com água e sabão [A&S], acetona e escova [Ac&Es] e limpeza química [LQ], pelos resultados do volume de vazios dos cordões, verifica-se leve tendência a melhor desempenho da limpeza química, possivelmente por este método de limpeza remover maior quantidade de óxidos da superfície da chapa.

5.2 Resultados e análise da inspeção por radiografia dos testes com transferências convencionais

Para identificar quais variáveis independentes são mais influentes nas respostas obtidas na inspeção por radiografia dos testes da Tabela 5.1, mais uma vez foi aplicada a análise de

variância, adotando confiabilidade estatística de 95%.

Como os ensaios foram realizados sem repetição, da mesma forma que no caso anterior, na análise estatística foi considerado não haver interações significativas entre as variáveis de entrada. Com isso, novamente, foi possível utilizar o artifício chamado de “pooling” para obtenção dos valores de α .

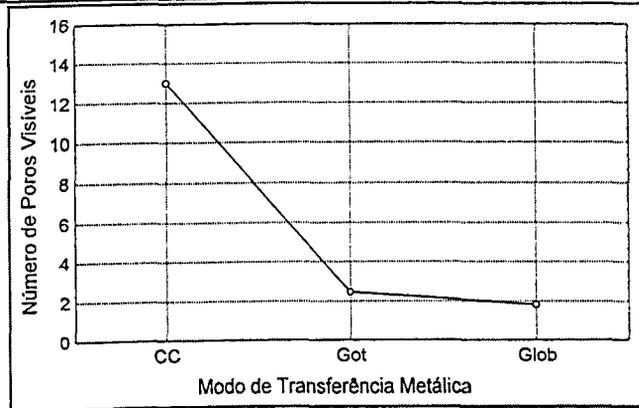
A Tabela 5.3 mostra os valores dos níveis de significância α das variáveis independentes na resposta número de poros visíveis nos cordões. Pode ser visto que a configuração da junta apresentou valor de significância de 0,933655 no volume de vazios, o que significa, estatisticamente falando, que a configuração da junta *não* influenciou no volume de vazios, com 95% de confiabilidade. Quando se observa o efeito do método de limpeza superficial, verifica-se que o valor de significância correspondente foi de 0,165188, ou seja, estatisticamente falando, pode-se afirmar que o tipo de limpeza também *não* influenciou no volume de vazio dos cordões, com 95% de confiabilidade. Pelo valor do nível de significância $\alpha = 0,000027$, com destaque em negrito na Tabela 5.4, pode ser visto que a variável modo de transferência metálica afetou no número de poros visíveis nos cordões, com 95% de confiabilidade, sendo a única variável estudada a interferir de forma significativa na resposta, segundo a inspeção por radiografia.

Tabela 5.3 - Níveis de α para as variáveis independentes com inspeção por radiografia.

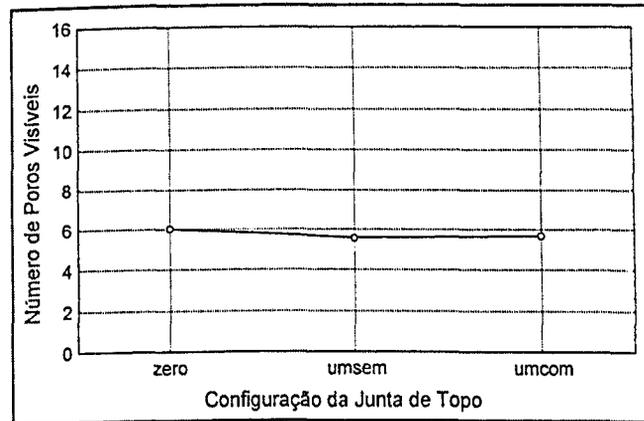
Nível de significância obtido em função do número de poros visíveis (α)			
	Nível de significância (α)		
	Modo de Transferência Metálica	Configuração da Junta de Topo	Método de Limpeza
Número de Poros Visíveis	0,000027	0,933655	0,165188

A Figura 5.3 mostra os resultados em termos de números médios de poros visíveis nos cordões 01 a 27 associados às variáveis independentes. Na Figura 5.3 (a) vê-se que soldagens realizadas no modo de transferência metálica por curto-circuito resultaram em cordões com maior número médio de poros visíveis, 13 em 100 mm de cordão, sendo o modo de transferência com pior desempenho. Entre os três modos convencionais de transferência metálica o modo globular foi que produziu cordões com menor número médio de poros visíveis, de 1,8 em 100 mm de cordão. Os cordões realizados no modo goticular apresentaram o número médio de poros visíveis próximo ao globular, de 2,4 em 100 mm de cordão. Aqui, e em todos os casos, os números com valores decimais foram vistos nos gráficos em escalas maiores.

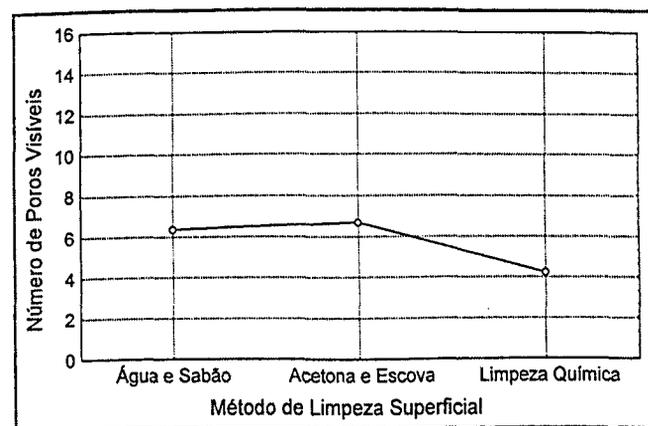
A Figura 5.3 (b) mostra que a realização de cordões em junta de topo sem abertura, configuração zero, promove cordões com número médio de poros visíveis de 6 em 100 mm de cordão, sendo a pior configuração de junta.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.3 - Gráficos de números médios de poros visíveis versus variáveis independentes dos testes com transferências metálicas convencionais.

A adoção de abertura de 1,0 mm na raiz da junta de topo (configuração *umsem*) gera cordões com número médio poros visíveis de 5,6 em 100 mm de cordão. É observado que, associando gás de purga sob a raiz à junta de topo com abertura de 1,0 mm (configuração *umcom*) o número médio poros visíveis também foi de 5,6 em 100 mm de cordão. Apesar dessa pequena variação em termos de valores médios de números de poros visíveis, a análise estatística mostrou que a configuração da junta de topo não influenciou significativamente na resposta, ou seja, na quantidade de poros visíveis no filmes radiográficos.

A Figura 5.3 (c) mostra que o método de limpeza superficial, assim como a configuração da junta de topo, não influenciou de forma significativa no número médio de poros visíveis nos cordões. Os números médios de poros são 6,3 para limpeza com água e sabão, 6,7 para limpeza com acetona e escovamento e 4,2 para limpeza química, todos em 100 mm de cordão.

5.3 Análise comparativa das duas formas de inspeção: gravimetria X radiografia

Observando os valores médios de volume de vazios e número de poros visíveis nos cordões, mostrados nos gráficos das Figuras 5.2 e 5.3, verifica-se boa concordância nos resultados obtidos nas inspeções por gravimetria e radiografia.

Comparando os resultados da variável método de limpeza superficial, que pelas análises estatísticas das duas técnicas de inspeção não mostrou ser significativamente influente na formação de poros, pode ser relatado que, conforme mostram as Figuras 5.2 (c) e 5.3 (c), a limpeza química tende a formar cordões de melhor qualidade. Em seguida à limpeza química, a limpeza com água e sabão, segundo ambas as técnicas de inspeção, promoveu a formação de cordões menos porosos que a limpeza com acetona e escova, porém, conforme já relatado, com valores estatisticamente não significativos.

Analisando a variável modo de transferência metálica através da comparação das Figuras 5.2 (a) e 5.3 (a) observa-se, por ambos os métodos de inspeção, que soldagens realizadas no modo curto-circuito promovem a formação de cordões de solda com grandes quantidades de poros. Ainda observando os modos de transferência, verifica-se, pelos dois métodos de inspeção, que o modo de transferência globular apresenta melhores resultados que a transferência goticular.

A despeito do fato de que na inspeção por radiografia, segundo a análise estatística, a variável configuração de junta ter mostrado *não* ser significativamente influente na resposta, fica claro que os resultados qualitativos obtidos pelas duas formas de inspeção para essa variável são semelhantes. Tal fato é evidenciado ao comparar-se as Figuras 5.2 (b) e 5.3 (b), nas quais pode ser observado que os melhores cordões foram realizados com as juntas

umcom e *umsem*, que apresentaram valores aproximados, seguidos pelos cordões realizados nas juntas do tipo zero.

Apesar das duas técnicas de inspeção, gravimétrica e radiográfica, apresentarem diferentes níveis estatísticos de significâncias de influência da variável configuração de junta na resposta, verificam-se resultados equivalentes.

Acredita-se que essa diferença se deva ao fato da gravimetria apresentar maior riqueza de detalhes, quantificando tridimensionalmente todos os vazios do cordão. Também, na radiografia, as microporosidades presentes nos cordões de solda não são detectadas, além dessa forma de inspeção transferir um objeto tridimensional, o cordão de solda, para um filme bidimensional, perdendo detalhes.

A Figura 5.4 mostra correlação entre as técnicas de inspeção gravimétrica e radiográfica, obtida pela comparação entre o número de poros visíveis obtido pela radiografia e o volume de vazios obtido pela gravimetria.

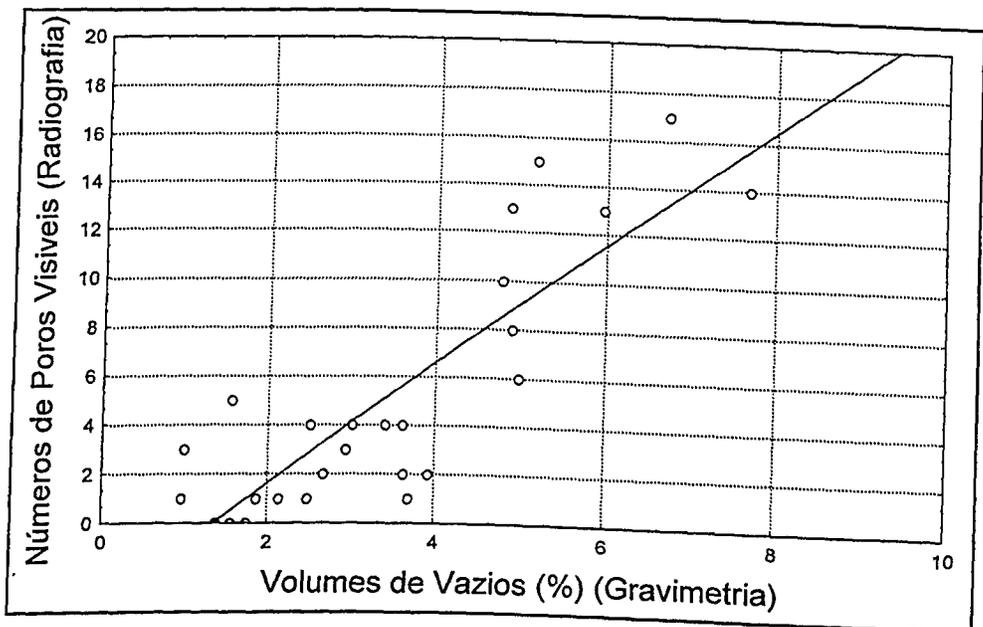


Figura 5.4 - Relação entre volume de vazios e número de poros visíveis nos cordões.

Na Figura 5.4 verifica-se que o número de poros visíveis e o volume de vazios dos cordões se relacionam proporcionalmente, isto é, na maioria dos cordões, quanto maior o número de poros visualizados nos filmes radiográficos, maior o volume de vazios medidos pela técnica gravimétrica. Como era de se esperar, essa relação é não linear, pois, na técnica gravimétrica são consideradas, além dos poros visualizados na radiografia, as microporosidades, que não são visíveis nos filmes radiográficos. Ainda há a influência da redução dimensional, inerente à inspeção radiográfica, que desproporciona a relação entre as formas de inspeção.

5.4 Determinação dos parâmetros de soldagem no processo MIG pulsado que fornecem transferência controlada a UGPP

A transferência metálica pulsada controlada é um tipo de transferência em que se buscam características da transferência goticular (“*spray*”) com correntes médias baixas. Essa transferência é conseguida pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares, um inferior à corrente de transição e outro superior a esta, de modo que, durante o período de tempo em que a corrente é alta, uma gota se forma e em seguida é destacada. Na fase de pulso de baixa corrente, o arco voltaico é mantido aceso. Este modo de transferência é considerado ideal quando se consegue Uma Gota Por Pulso [UGPP], com destacamento no pico de corrente (Vilarinho, 2000).

Na obtenção dos parâmetros de pulso que fornecem UGPP foi utilizada a técnica de *shadowgrafia*, em que um sistema óptico é usado para obter a imagem a ser gravada em uma câmara de filmagem, na qual é projetada a sombra. Vilarinho (2000) detalha o procedimento da técnica de *shadowgrafia*, em que a sincronização dos sinais de corrente do arco e das imagens gravadas na câmara de vídeo, coletados via microcomputador, permite verificar quando os parâmetros de pulso ajustados na fonte de soldagem promovem a transferência metálica a UGPP. A Figura 5.5 mostra o resultado das imagens e oscilograma do destacamento de uma gota por pulso [UGPP] na soldagem MIG de alumínio com arame de adição ER-4043 com 1,2 mm de diâmetro.

Tabela 5.4 - Parâmetros de soldagem dos testes com transferência a UGPP.

Descrição	Módulo e Grandeza
Velocidade de soldagem	600 mm/min
Gás argônio puro	15 l/min
Eletrodo ER4043	1,2 mm
Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	15 mm
Ângulo de inclinação da tocha	10 °
Chapa ABNT 5052	6 x 300 x 40 mm
Tempo de pico	3,06 ms
Corrente de pico	250,9 A
Tempo de base	5,97 ms
Corrente de base	17,8 A
Corrente Média	95,8 A
Temperatura da chapa	Ambiente
Técnica de soldagem empurrando	

Na Figura 5.5, o oscilograma mostra que os picos de corrente ocorrem nos quadros 00 e 01; 15 a 19; e 33 a 37.

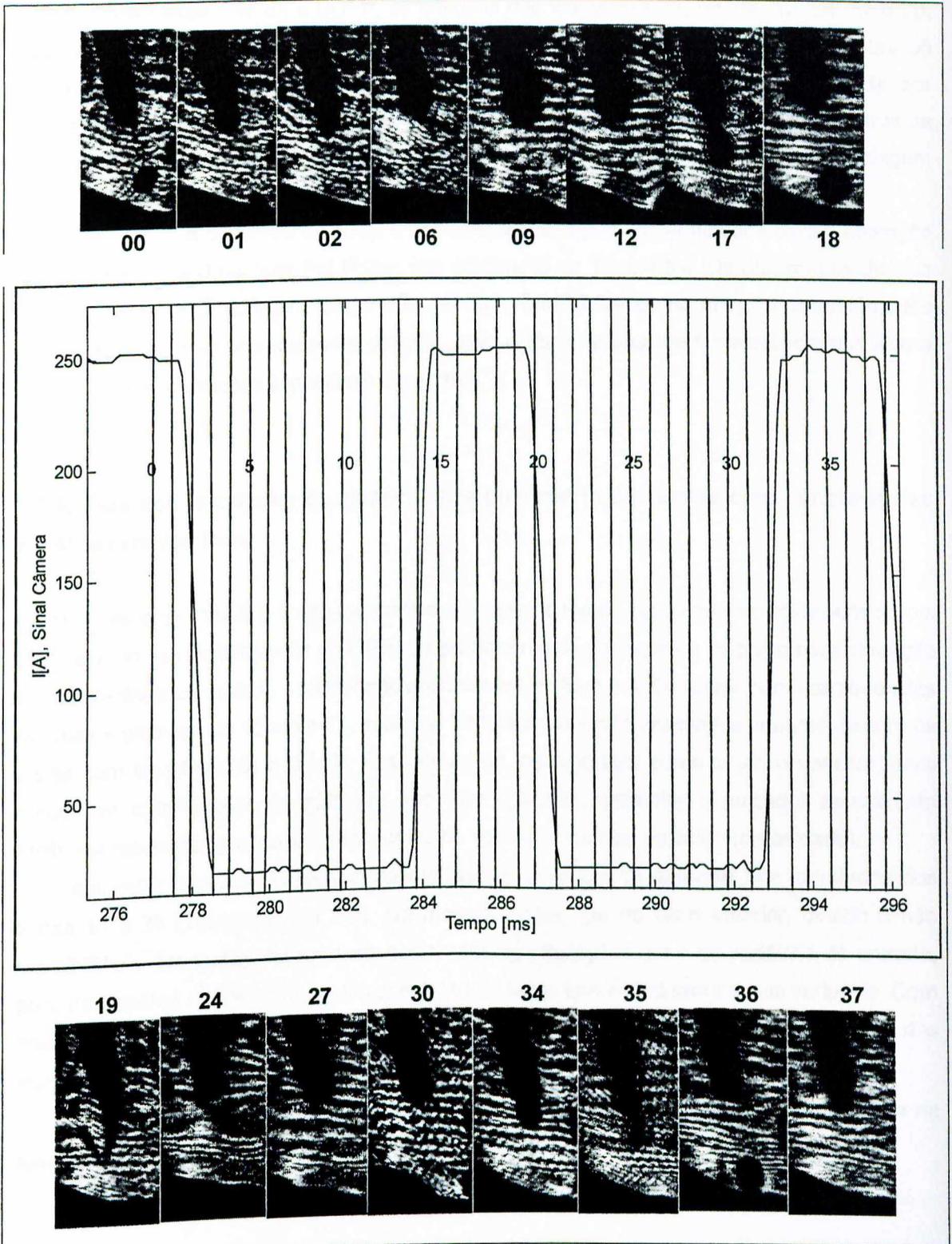


Figura 5.5 - Imagens e oscilograma mostrando o destacamento de uma gota por pulso [UGPP].

As imagens das fotografias da Figura 5.5 mostram os destacamentos das gotas ocorrendo nos quadros 00, 17/18 e 35/36, exatamente nos picos de corrente. Para comprovar que a transferência metálica se dá a UGPP, as imagens das fotografias 02, 06, 09, 12, 24, 27 e 30, que não evidenciam nenhum destacamento, mostram que as transferências de gotas só ocorrem nos picos de correntes. Essa regularidade na transferência metálica pôde ser observada em todos os ensaios com transferência pulsada, sendo, portanto, os parâmetros de pulso citados adequados para controlar a transferência a UGPP nas condições de soldagem descritas.

Os parâmetros de tempo de pulso e corrente de soldagens, determinados para a obtenção de transferência a Uma Gota Por Pulso, são mostrados na Tabela 5.4. Os parâmetros de pico (tempo e corrente) e de base (tempo e corrente), foram ajustados na máquina e confirmados pela técnica de *shadowgrafia* como próprios para o fornecimento de transferência metálica a UGPP, para as condições específicas dos testes.

5.5 Análise dos resultados da inspeção por gravimetria dos testes com transferências metálicas em vôo livre.

Nos testes da Tabela 5.5 são mostrados somente os testes que envolvem soldagens com a variável modo de transferência a UGPP. Os parâmetros de soldagem e de pulso para obtenção da transferência controlada a UGPP são encontrados no item 5.4. Os testes com transferências goticular e globular, do 10 até o 27, estão na Tabela 5.1 e serão analisados juntamente com os testes com transferência a UGPP. Essa etapa do trabalho tem como objetivo verificar quais modos de transferência da gota em vôo livre (globular, goticular e pulsado) apresentam melhores resultados em termos de volumes de vazios do cordão de solda (porosidade).

Aqui, mais uma vez, a técnica de análise de variância foi aplicada nos resultados dos testes 10 a 36 (Tabelas 5.1 e 5.5). Da mesma forma que no caso anterior, devido a não repetibilidade dos testes, foram desconsideradas as interações entre as variáveis de entrada, pois, pela análise de variância, foram constatadas fracas interações entre essas variáveis. Com isso, novamente, foi possível utilizar o artifício chamado de "pooling" para obtenção dos valores de α .

A Tabela 5.6 mostra os valores dos níveis de significância (α) das variáveis estudadas na resposta, o volume de vazios dos cordões.

Tabela 5.5 - Resultados da inspeção gravimétrica para testes com transferência de gota em voo livre.

Amostra	Diluição do cordão	Densidade de Referência [kg/m ³]	P _{ar} [g]	P _{ag} [g]	Densidade Medida [kg/m ³]	Gravimetria
	Fração de arame de adição					Volume de Vazios [%]
28	0,57	2666	5,27	3,28	2648	0,67
29	0,61	2665	3,94	2,46	2662	0,09
30	0,61	2665	4,05	2,53	2664	0,00
31	0,47	2670	4,95	3,07	2633	1,39
32	0,54	2667	4,25	2,65	2656	0,42
33	0,39	2673	5,02	3,14	2670	0,12
34	0,53	2668	4,27	2,66	2652	0,59
35	0,62	2664	4,41	2,75	2657	0,28
36	0,48	2670	4,79	2,99	2661	0,33

Na Tabela 5.6, pode ser visto que tanto o modo de transferência quanto a configuração da junta, estatisticamente falando, apresentaram influências significativas no volume de vazios dos cordões, com 95% de confiabilidade. Quando se observa o efeito do tipo de limpeza superficial, verifica-se que o valor de significância correspondente foi de 0,354332, ou seja, o tipo de limpeza *não* influenciou no volume de vazio dos cordões, com 95% de confiabilidade estatística.

Tabela 5.6 - Nível de significância para as variáveis independentes dos testes 10 a 36.

Nível de significância obtido em função do volume de vazios (α)			
	Nível de significância (α)		
	Modo de Transferência Metálica	Configuração da Junta de Topo	Método de Limpeza
Volume de Vazios	0,000000	0,008758	0,354332

A Figura 5.6 mostra os resultados em termos de valores médios de volume de vazios dos testes 10 a 36. Na Figura 5.6 (a) vê-se que soldagens realizadas no modo de transferência metálica controlada a UGPP resultaram em cordões com menores valores médios de volume de vazios, de aproximadamente 0,4%. Observando os dois modos convencionais de transferência metálica, o modo globular apresentou 2% e o modo goticular 2,8%, conforme já apresentado. O melhor desempenho do modo de transferência metálica controlada a UGPP provavelmente esteja relacionado à maior estabilidade desse modo de transferência.

A Figura 5.6 (b) mostra tendência a melhoria de desempenho com as configurações de junta zero, *umsem* e *umcom*, respectivamente. Os resultados destes testes confirmam a tendência de que a adoção de adequada abertura na junta de topo e a aplicação de gás de purga na raiz tendem a minimizar o volume de vazios dos cordões na soldagem de alumínio pela melhor proteção do arco de soldagem da contaminação atmosférica.

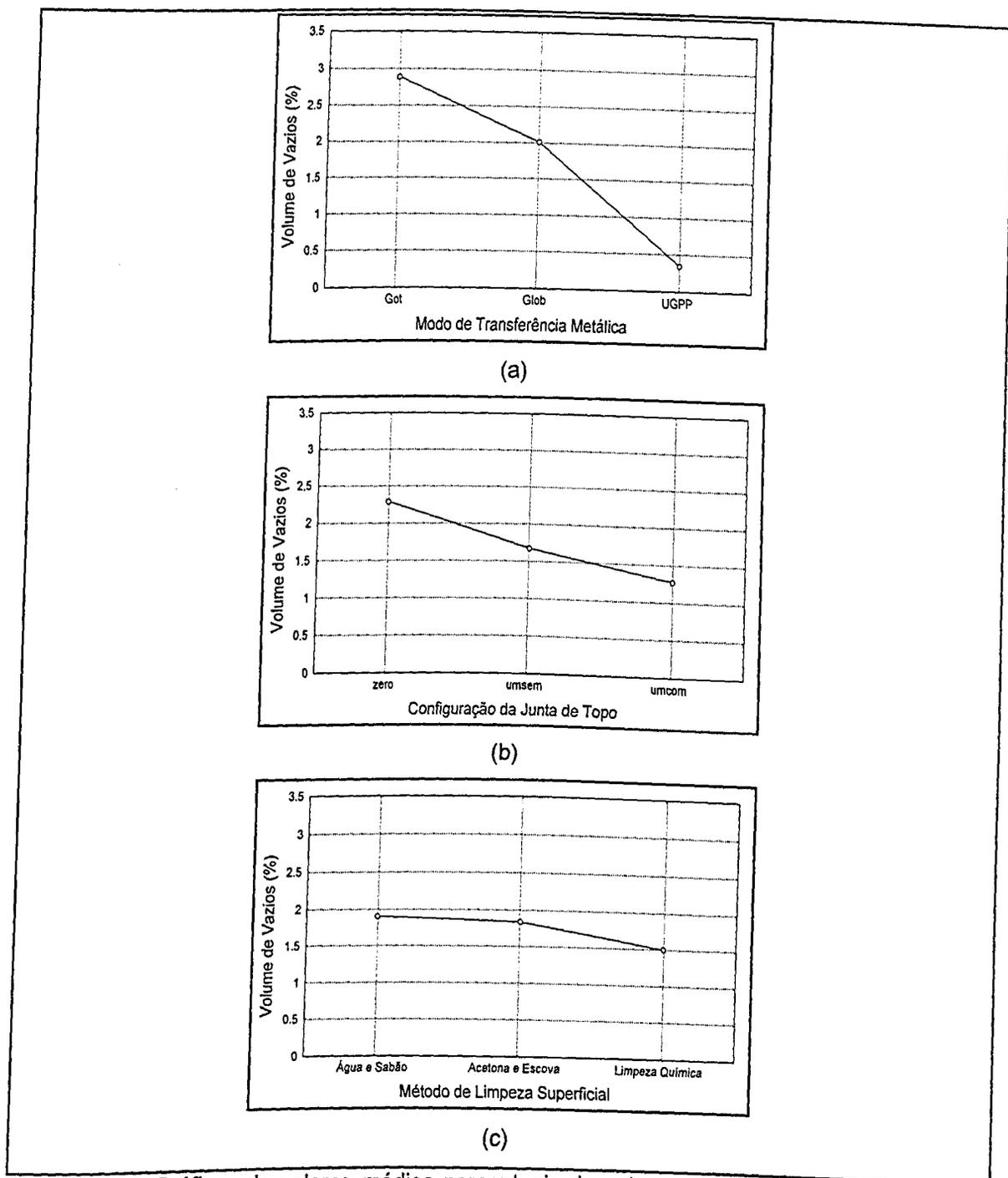


Figura 5.6 - Gráficos de valores médios percentuais de volumes de vazios versus variáveis independentes, incluindo transferência a UGPP.

A Figura 5.6 (c) mostra, novamente, que o método de limpeza superficial pouco influencia no volume de vazios dos cordões. Observa-se, mais uma vez, que cordões realizados em chapas que sofreram limpeza química tendem a ser de melhor qualidade, ou seja, apresentar menores volumes de vazios ou poros, ainda que, estatisticamente falando, nada poder ser afirmado.

Apesar de não ser foco de análise dessa pesquisa, vale destacar que as penetrações dos cordões de solda nos diversos modos de transferência metálica apresentaram variações consideráveis, sendo os cordões do modo goticular com maiores penetrações, seguidos pelos cordões do modo globular e, por último, os cordões realizados por transferência a UGPP. Quanto às aparências, os cordões realizados nos modos de transferência UGPP, globular e goticular, podem ser considerados equivalentes, havendo leve destaque à excelente aparência do cordão realizado com transferência a UGPP.

5.6 Testes de confirmação dos resultados obtidos nos experimentos 01 a 36

Com o objetivo de confirmar os resultados obtidos nos ensaios 01 a 36, foram realizados alguns testes em condições repetidas. Como a variável método de limpeza superficial da chapa não foi considerada significativa em nenhuma das análises estatísticas realizadas, nos testes de confirmação 37 a 48, com planejamento mostrado na Tabela 5.7, um só método de limpeza superficial [A&S] foi aplicado, sendo reavaliadas as variáveis modo de transferência e configuração da junta de topo.

Os parâmetros de soldagem constantes, usados nos testes de confirmação, estão na Tabela 3.2 e os parâmetros de tensão e corrente necessários para obtenção dos modos de transferência metálica curto-circuito [CC], goticular [Glob] e globular [Glob] encontram-se na Tabela 3.3. Os parâmetros de soldagem e de pulso para obtenção da transferência controlada a UGPP são mostrados no item 5.4.

Conforme mostrado na Tabela 5.7, foram realizados testes com quatro modos de transferências metálicas associados às três configurações de juntas, totalizando 12 ensaios, com todas as chapas limpas somente pelo método água e sabão [A&S].

A técnica de análise de variância foi aplicada nos resultados dos testes 37 a 48 (Tabela 5.7). Da mesma forma que nos casos anteriores, devido a não repetibilidade dos testes, foram desconsideradas as interações entre as variáveis de entrada, pois foram constatadas, pela análise de variância, fracas interações entre essas variáveis. Com isso, mais uma vez, foi possível utilizar o artifício chamado de "pooling" para obtenção dos valores de α .

Tabela 5.7 – Condições variáveis e resultados dos testes de confirmação 37 a 48.

Cordão de solda	Modo de Transferência	Configuração da junta	Volume de Vazios [%]
37	CC	zero	5,96
38	CC	umsem	4,77
39	CC	umcom	4,67
40	Got	zero	3,92
41	Got	umsem	3,61
42	Got	umcom	1,55
43	Glob	zero	3,40
44	Glob	umsem	2,14
45	Glob	umcom	1,55
46	UGPP	zero	0,67
47	UGPP	umsem	0,60
48	UGPP	umcom	0,59

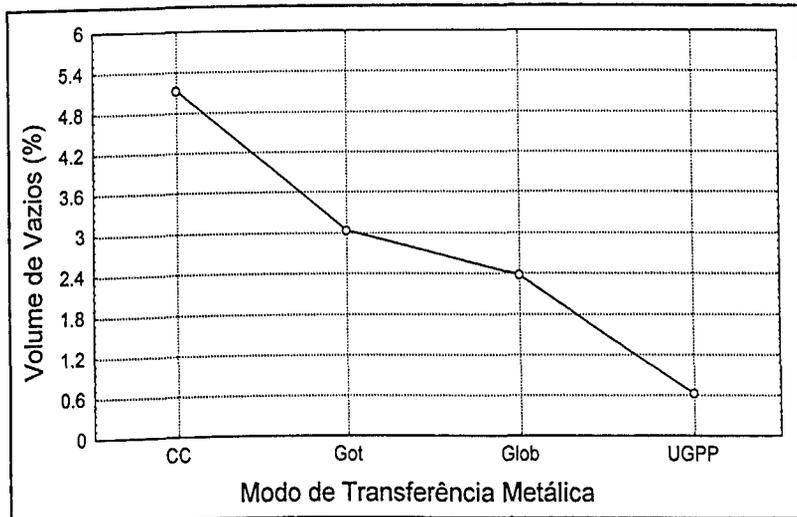
A Tabela 5.8 mostra, para os testes 37 a 48, os valores dos níveis de significância α das variáveis independentes na resposta volume de vazios dos cordões. Pode ser visto que o modo de transferência metálica apresentou valor de significância de 0,000628 no volume de vazios, o que significa, estatisticamente falando, que pode ser afirmado com 95% de confiabilidade que o modo de transferência influenciou no volume de vazios. Da mesma forma, pode-se afirmar, com 95% de confiabilidade, que a configuração da junta afetou o volume de porosidade dos cordões de solda.

Tabela 5.8 - Nível de significância para as variáveis independentes dos testes 37 a 48.

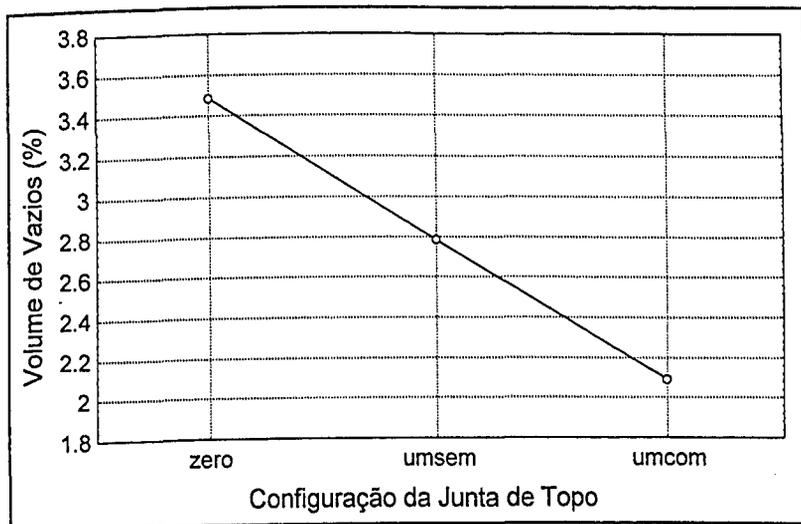
Nível de significância obtido em função do volume de vazios (α)		
	Nível de significância (α)	
	Modo de Transferência Metálica	Configuração da Junta de Topo
Volume de Vazios	0,000628	0,048103

A Figura 5.7 mostra os resultados dos testes 37 a 48, em termos de valores médios de volume de vazios dos cordões. Nos resultados obtidos verificam-se as mesmas tendências observadas nos testes anteriores, ou seja, para a variável transferência metálica, mostrada na Figura 5.7 (a), os cordões soldados no modo curto-circuito apresentam maiores volumes de

vazios, seguidos pelos cordões dos modos goticular, globular e a transferência pulsada [UGPP]. Da mesma forma, de acordo com os resultados associados à variável configuração da junta de topo, mostrados na Figura 5.7 (b), os cordões realizados com junta de topo sem abertura na raiz, configuração *zero*, apresentaram maiores volumes de vazios, seguidos pelos cordões da junta de topo com 1,0 mm de abertura entre chapas, configuração *umsem*. O melhor resultado associado à configuração de junta foi conseguido nos cordões com junta de 1,0 mm de abertura com gás de proteção na raiz, configuração *umcom*.



(a)



(b)

Figura 5.7 – Gráficos de valores médios percentuais de volumes de vazios versus variáveis independentes, testes de confirmação.

Na comparação dos resultados associados à variável modo de transferência metálica dos testes de confirmação 37 a 48, mostrados na Figura 5.7 (a), com os resultados dos testes experimentais 01 a 36, mostrados nas Figuras 5.2 (a) e 5.3 (a), foi montada a Tabela 5.9, sendo obtidos valores médios muito próximos em porcentagem de volume de vazios. Comparando esses valores, verifica-se que a maior diferença ficou com o modo de transferência por curto-circuito, de 0,6%. Com isso, pode-se afirmar, mais uma vez, que a técnica de inspeção por gravimetria fornece resultados confiáveis na análise do volume de vazios em cordões de solda, tornando relevantes os resultados apresentados nessa pesquisa.

Tabela 5.9 - Comparação dos percentuais de valores médios de volumes de vazios para os modos de transferência metálica.

	Modo de Transferência Metálica			
	CC	Got	Glob	UGPP
Médias de vazios dos cordões dos testes 01 a 36	5,7%	2,8%	2,0%	0,4%
Médias de vazios dos cordões dos testes de confirmação 37 a 48	5,1%	3,0%	2,4%	0,6%

Na análise dos resultados de volume de vazios dos cordões de solda associados às configurações de juntas de topo, realizada no item 5.1, somente foram considerados cordões soldados com transferências metálicas convencionais. Portanto, na obtenção dos valores médios de volumes de vazios dos testes de confirmação com enfoque nas configurações das juntas de topo, também somente foram considerados os cordões realizados nos modos de transferências convencionais - curto-circuito, globular e goticular. A Tabela 5.10 mostra a síntese da análise comparativa dos valores médios de volume de vazios dos cordões 01 a 27 com os valores dos testes de confirmação 37 a 48 para a variável configuração da junta de topo.

Tabela 5.10 - Comparação dos percentuais de valores médios de volumes de vazios para as configurações das juntas de topo.

	Configurações das Juntas de Topo		
	zero	umsem	umcom
Médias de vazios dos cordões dos testes 01 a 27	4,3%	3,3%	2,9%
Média de vazios dos cordões dos testes de confirmação 37 a 48	3,5%	2,8%	2,1%

Comparando as médias de volume de vazios dos cordões dos testes experimentais 01 a 27 com as médias de vazios dos cordões dos testes de confirmação 37 a 48, mostrados na Tabela 5.10, observa-se concordância nos resultados associados às configurações das juntas de topo. Tanto nos testes experimentais quanto nos testes de confirmação, os melhores resultados foram obtidos com a junta de topo com abertura de 1,0 mm e protegida com gás de purga na raiz, *umcom*, seguida pelas juntas com simples abertura de 1,0 mm, *umsem*, e da junta de topo sem abertura e sem proteção gasosa na raiz, *zero*. Tais resultados vêm, mais uma vez, mostrar que a técnica de inspeção por gravimetria apresenta repetibilidade nos resultados fornecidos, elevando o crédito dos resultados alcançados na pesquisa como um todo.

5.7 Prova da necessidade de realização de algum tipo de limpeza na superfície da chapa de alumínio a ser soldada

De acordo com as análises estatísticas aplicadas nos testes dessa pesquisa, o método de limpeza superficial da chapa de alumínio ABNT 5052 mostrou não ser significativamente influente na formação de volume de vazios dos cordões de solda produzidos na soldagem MIG com arame de adição ER4043 com diâmetro de 1,2 mm.

Como forma de ratificar o que já fora observado nos estudos teóricos e práticos, foi elaborada uma nova bateria de testes visando verificar se a condição de limpeza, ou seja, se a condição suja ou limpa da chapa irá influenciar na formação de poros nos cordões de solda. Portanto, com esse objetivo, essa fase de testes pretende provar a necessidade de realização de algum tipo de limpeza superficial da chapa de alumínio a ser soldada.

Na confecção dos chanfros retos de todas as chapas de testes experimentais foi aplicado o processo de usinagem com plaina, sendo usado óleo lubrificante/refrigerante, necessário nesse tipo de operação. Diferentemente dos testes experimentais, nessa fase de testes não foi realizada remoção do óleo remanescente ao processo de usinagem, caracterizando a condição de chapa com superfície *suja*.

Os parâmetros de soldagem dessa bateria de testes encontram-se na Tabela 4.1. Foram selecionadas as soldagens no modo de transferência goticular [Got] por ser condição usual nas indústrias e a configuração de junta do tipo *umcom*, ou seja, junta com abertura de 1,0 mm e com aplicação de gás de purga na raiz, por ter sido a configuração de junta que melhores resultados apresentou nos testes experimentais. O planejamento dos experimentos é mostrado na Tabela 5.11.

A Tabela 5.11 também mostra os resultados de volumes de vazios dos cordões 49, 50 e 51. Observa-se haver uma variação grande nos resultados de vazios dos cordões creditado ao fato

que as chapas não foram limpas e as condições de sujeira variavam consideravelmente de uma chapa para outra.

Tabela 5.11 – Condições de soldagem e resultados dos testes de verificação da necessidade de aplicação de limpeza.

Cordão de solda	Modo de Transferência	Configuração da junta	Tipo de Limpeza	Volume de Vazios [%]
49	Got	umcom	suja	3,16
50	Got	umcom	suja	2,00
51	Got	umcom	suja	7,63

O valor médio de volume de vazios dos cordões soldados nos testes experimentais no modo de transferência goticular e com a junta do tipo *umcom*, cordões 16, 17 e 18, é de 2,1%. Já a média de volume de vazios dos cordões dos testes de prova da necessidade de limpeza, cordões 49, 50 e 51, é de 4,3%. Fazendo comparação direta do valor médio de volume de vazios dos cordões dos testes experimentais, 2,1%, com o valor médio de vazios dos cordões dos testes de prova da necessidade de limpeza, 4,3%, concluí-se que a limpeza da superfície da chapa a ser soldada é indispensável, independente do método de limpeza a ser aplicada. A diferença nos valores de volumes de vazios nos testes 49, 50 e 51 provavelmente está associada a uma maior sujeira remanescente em uma chapa que em outras.

Assim, considera-se que a limpeza ser adotada no processo de soldagem fica a critério da equipe de soldagem, podendo ser adotado o método de limpeza que melhor convier ao processo.

CAPÍTULO VI

Conclusões

No estudo da influência de parâmetros de soldagem na formação de porosidade na soldagem MIG da liga de alumínio ABNT 5052, com o arame ER-4043 de diâmetro de 1,2mm, conforme a metodologia aplicada, conclui-se que:

1. Entre as variáveis de soldagem estudadas, o modo de transferência metálica e as configurações de junta apresentam influência significativa no volume de vazios (porosidade) dos cordões de soldagem.
2. O método de limpeza superficial da chapa de alumínio empregado não influenciou, de forma significativa, no volume de vazios dos cordões. Entretanto, os resultados mostraram a necessidade de se ter algum tipo de limpeza antes da soldagem para minimizar o grau de porosidade no cordão de solda.
3. Os melhores resultados foram obtidos nos testes com as transferências metálicas no modo pulsado, em UGPP, com configuração de junta com abertura de 1,0 mm, protegida com gás de purga.
4. Os piores resultados foram obtidos com os testes com transferência metálica no modo curto-circuito e com junta sem abertura na raiz; e
5. A técnica de inspeção por gravimetria, apesar de mais trabalhosa, apresenta resultados mais precisos quando comparados aos da inspeção por radiografia.

CAPÍTULO VII

Propostas Para Trabalhos Futuros

A seguir, são apresentadas algumas sugestões de temas para trabalhos futuros que podem aprimorar, complementar e avançar nos resultados alcançados nesse trabalho.

- Determinar a influência de vários tipos de juntas (topo e em ângulo) com e sem abertura no grau de porosidade da soldagem MIG de alumínio.
- Investigar a influência da posição da junta no espaço (plana, horizontal, vertical e sobre cabeça) no grau de porosidade da soldagem MIG de alumínio.
- Investigar com mais detalhes, entre os modos de transferência goticular, globular e UGPP, quais os parâmetros de soldagem ótimos que produzem cordões com menores níveis de porosidade.
- Determinar a influência da temperatura de pré-aquecimento no grau de porosidade na soldagem MIG alumínio.

CAPÍTULO VIII

Referências Bibliográficas

- Alcan, 1993, Manual de Soldagem, Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1ª Edição.
- Aluminum Association, 1997, "Welding Aluminum: Theory and Practice", 3ª Ed.
- Altshuller, B., 1998, "A Guide to GMA Welding of Aluminum", Welding Journal, June, pp 49-55.
- Andrew, R. C. & Chadwick, G. A., 1975, "Sources of Hydrogen Porosity in Aluminum Alloy Welds – a Literature Survey", AWRA Report P3-5-74, Australian Welding Research, December.
- AWS, 1991, Welding Handbook, Vol 2, Welding Processes, American Welding Society, 8ª Ed, USA.
- AWS, 1996, Welding Handbook, Vol 3, Materials and Applications – Part 1, American Welding Society, 8ª Ed, USA.
- Biloni, H., Pérez, T.E., Saggese, M.E. & Solari, M.J.A., 1981, "Manual de Soldadura de Aluminio", Proyecto Especial de Aluminio OEA – CNEA, Gerencia de Investigacion y Desarrollo, Aluar Aluminio Argentino, Buenos Aires, Argentina.
- Blewett, R.V., 1982, "Técnicas Modernas para Soldagem do Alumínio", ALCAN, Rio de Janeiro, Brasil.
- Budnik, V. P., 1994, "Effect of Type of Inert gas on Pool Temperature and Fracture of the Oxide Film in Welding Aluminium", The Patom Welding Journal, Vol 6, N 12, pp 491-493, Ukraine.
- Campos Filho, M. P. e Davies, G. J., 1978, "Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas", Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo.
- Collins, F. R., 1958, Porosity in Aluminum Alloy Welds". Welding Journal, June, pp 589-593.

Devletian, J. H., & Wood, W. E., 1983, "Factors Affecting Porosity in Aluminum Welds – a Review", Welding Research Council Bulletin 290, December.

Dickerson, P. B., 1998, "Weld Discontinuities – Causes and Cures", Welding Journal, June, pp 37-42.

Dickerson, P. B., Irving, B, 1992, "Welding Aluminum: It's Not as Difficult as It Sounds", Welding Journal, June, pp 45-50.

Dovbischenko, I. V., Ishchenko, A. Ya., Mashin, V. S., 1997, "Using Helium in TIG Welding Aluminium Alloys (Review)", The Patom Welding Journal, Vol 9, N 2, pp 79-83, Ukraine.

Mecânica - Telecurso 2000 Profissionalizante - Ensaios de Materiais, 1997, Editora Globo, São Paulo.

Figueiredo, K. M., 2000, "Mapeamento dos Modos de Transferência Metálica na Soldagem MIG de alumínio", Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, (Dissertação, Mestrado).

Hellier, Y. C. J., 1993, "What's New in Nondestructive Testing of Welds and Heat-Affected Zones?", Welding Journal, March, pp 39-44.

Hettes, F. J. & Ketron, D.L., 1998, "Evaluation of Surface Preparation Methods on Porosity Formation in Aluminum GMAW", Trends in Welding Research, June, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia.

Hooijmans, J. W., & Ouden, G. D., 1996, "Hydrogen Absorption During Arc Melting", Material Science and Technology, January, Vol 12, pp 81-85.

Hooijmans, J. W., & Ouden, G. D., 1997, "A Model of Hydrogen Absorption During GTA Welding", Welding Journal Research Supplement, July, pp 264s-268s.

Irving, B., 1992, "Preheat: The Main Defense Against Hydrogen Cracking", Welding Journal, July, pp 25-31.

Irving, B., 1997, "Why Aren't Airplanes Welded", Welding Journal, January, pp 31-45.

- Ishchenko, A. Ya., Mashin, V. S., Dovbischenko, I. V., Dukhno, V. M., Getmanets, S. M., 1994, "Mean Temperature of Weld Pool Metal in Arc Welding Aluminium Alloys in Inert Gas", The Patom Welding Journal, Vol 6, N 11, pp 436-442, Ukraine.
- Ishchenko, A. Ya., Mashin, V. S., Budnik, V. P., 1995, "Weld Porosity in Consumable-Electrode Inert Gas Welding of Aluminium Alloys", The Patom Welding Journal, Vol 7, N 1, pp 18-21, Ukraine.
- Kammer, P. A., Randall, M. D., Monroe, R. E. and Groth, W.G., 1963, "The Relation of Filler Wire Hydrogen to Aluminum-weld Porosity". Welding Journal Research Supplement. October, pp 1s-9s.
- Koziarski, J., 1953, "Some Considerations on Weldability of Aluminum Alloys", Welding Journal, October, pp 970-986.
- Kuriyama, Y., Minoda, K., Nagaoka, H., 1975, Ishikawa, K., 1975, "Prevention of Porosity in Aluminum Alloy Weldments: Effect of Atmospheric Humidity and Groove Shape on Porosity in Aluminum Alloy Weldments", Ihi-Eng.-Rev, Sept, Vol 8, N 3, pp 1-12.
- Lucas, Bill, 1999, "Defeitos - Descontinuidades em Solda – Porosidade", Soldagem e Inspeção, Ano 5, N 6.
- Mac Arthur, I., 1975, "Quality Control in Aluminum Welding: Weld Defects, Their Cause and Correction", Welding Journal, July, pp 514-16.
- Maia Neto, F., 2000, "Roteiro Prático de Avaliações e Perícias Judiciais", 5ª Ed, Del Rey, Belo Horizonte, Brasil.
- Marques, P.V., 1991, "Tecnologia da Soldagem", Editora "O Lutador", Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Meyer, J. C., 1995, "Problematic Weld Discontinuities and Their Prevention", Welding Journal, June, pp 45-47.

- Miranda, H.C., 1999, "Influência da Indutância na Soldagem MIG/MAG", Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, (Dissertação, Mestrado).
- Norrish, J. & Richardson, I. F., 1988, "Metal Transfer Mechanisms", *Welding & Metal Fabrication*, pp 17-22.
- Norrish, J., 1992, "Advanced Welding Process", Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia and New York, pp 131-173.
- Opie, W. R., Grant, N. J., 1950, "Hydrogen Solubility in Aluminum and Some Aluminum Alloys", *Transaction AIME, Journal of Metals*, Vol 188, October.
- Ovchinnikov, V. V., Ryazanstev, V. I. & Grinin, V. V., 1990, "Reasons for the Formation of Pores in Arc Welding Deformable Aluminium Alloys", *Welding International*, Vol 4, N 12, pp 990-992.
- Pattee, H. E., Anno, J. N., Randall, M. D., 1968, "Theoretical and Experimental Study of Cathodic Cleaning with the Plasma Arc", *Welding Journal Research Supplement*, April, pp 1s-12s.
- Pokhodynya, I. K., 1997, "Control of Hydrogen in Welded Joints", *The Patom Welding Journal*, Vol. 9, N 8, pp 439-443, Ukraine.
- Póvoa, A.A., 1988, "Seminário Técnico de Soldagem do Alumínio e suas Ligas", Associação Brasileira do Alumínio, 26/10 a 17/11.
- Rodrigues Filho, Guimes, 1997, "Estudo da Morfologia de Filmes Poliméricos. O Caso do Diacetato de Celulose", Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos, São Paulo.
- Ronnhult, T. & Rilby, U. & Olefjrd, I., 1980, "The Surface State and Weldability of Aluminum Alloy", *Materials Science and Engineering*, 42, pp 329-336.
- Saperstein, Z. P. & Prescott, G. R. & Monroe, E. W., 1964, "Porosity in Aluminum Welds". *Welding Journal Research Supplement*, October, pp 443s-453s.

- Scotti, A., 1998, "A Review on Special Metal Transfer Modes in GMAW", RBCM – J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, Vol XX, N 3 September, pp 465-478.
- Slivinskii, V. A. and Zamkov, V. N., 1994, "Role of Hydrides in Formation in Welding Titanium", The Patom Welding Journal, 6 (5-6), pp 265-269, Ukraine.
- Shore, R. J., McCauley, R. B., 1970, "Effects of Porosity on High Strength Aluminum 7039" Welding Journal Research Supplement, July, pp 311s-321s.
- Talbot, D. E. J., Granger, D. A., 1963, "Secondary Hydrogen Porosity in Aluminium", Journal of Institute of Metals, Vol 92, pp 290-297.
- Taylor, J. L., 1996, "Dicionário Metalúrgico: Inglês – Português, Português – Inglês", São Paulo, ABM.
- Uda, M., Ohno, S., 1974, "Porosity Formation in Weld Metal – I. Effect of Hydrogen on Porosity Formation in Pure Aluminum at Non-Arc Melting", Transaction of National Research Institute for Metals, Vol 16, N 2, pp 29-36.
- Vieira Jr., A. B., 1999, "Influência das Condições Superficiais do Alumínio na Estabilidade do Arco em Soldagem TIG", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- Vilarinho, L.O., 2000, "Desenvolvimento e Avaliação de um Algoritmo Alternativo para Soldagem Sinérgica de Alumínio", Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, (Dissertação, Mestrado).
- Waring, J., Crooks, A. G., 1977, "The Effect of Dendrite Arm Spaces on Al-Zn-Mg Weld Metal Properties, AWRA Report P3-13-76, Australian Welding Research, December.
- Weber, T. V., "Penetrating the Intricacies of Weld Radiograph Interpretation", Welding Journal, May, pp 33-39.
- Woods, R.A., 1974, "Hydrogen Absorption and Porosity Formation During Aluminum Welding", in Hydrogen in Metals, ASM, pp 713-726.

Woods, R.A., 1974, "Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds", *Welding Journal Research Supplement*, March, pp 97s-108s.

FU-00012630-1