



Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI DR BA
Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec
Curso Superior de Tecnologia em Inspeção de Equipamentos e de Soldagem

HYLYNTHON LUIS ALVES PEREIRA FILHO

INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO E DO GÁS DE
PROTEÇÃO NA POROSIDADE EM JUNTAS SOLDADAS DA
LIGA DE ALUMÍNIO-MANGANÊS AA 3003

Salvador
2010

HYLYNTHON LUIS ALVES PEREIRA FILHO

INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO E DO GÁS DE
PROTEÇÃO NA POROSIDADE EM JUNTAS SOLDADAS DA
LIGA DE ALUMÍNIO-MANGANÊS AA 3003

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, como
exigência à obtenção do título de Tecnólogo em
Inspeção de Equipamentos e Soldagem.

Orientadora: Profª Tiara Pimentel de Oliveira,
M.Sc.

Salvador
2010

P125i

Pereira Filho, Hylynthon Luis Alves

Influência do pré-aquecimento e do gás de proteção na porosidade em juntas soldadas da liga de alumínio-manganês aa 3003/ Hylynthon Luis Alves Pereira Filho. 2010.

52f.; il; color.

Orientador: Msc. Tiara Pimentel de Oliveira
Monografia (Graduação) – Faculdade de Tecnologia Senai
Cimatec., 2010

1. Soldagem de Alumínio. 2. Porosidade. 3. Gás de Proteção. I
Faculdade de Tecnologia Senai Cimatec. II. Oliveira, Tiara Pimentel
de. III. Título.

CDD: 671.2

HYLYNTHON LUIS ALVES PEREIRA FILHO

INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO E DO GÁS DE
PROTEÇÃO NA POROSIDADE EM JUNTAS SOLDADAS DA
LIGA DE ALUMÍNIO-MANGANÊS AA 3003

Trabalho de conclusão de curso apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Inspeção de Equipamentos e de Soldagem, Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

Aprovada em 06 de dezembro de 2010.

Banca Examinadora

Tiara Pimentel de Oliveira – Orientadora _____
Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC),
Florianópolis, Brasil
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Manoel Carreira Neto – Presidente _____
Doutor em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo (USP),
São Paulo, Brasil
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Ronaldo da Rocha e Silva – Membro _____
Especialista em Engenharia de Segurança no Trabalho pela Universidade Católica do
Salvador (UCSAL),
Salvador, Brasil
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

06 de dezembro de 2010

Com amor e admiração:

À minha mãe, Maria.

Ao meu pai, Tuta.

À minha noiva, Yalle.

À minha irmã, Mariana.

Aos meus amigos, Agnaldo,
Erivaldo, Nereu e Fernando.

À minha orientadora, Tiara.

In Memoriam:

Aos meus avôs, Agenor e Sabino.

RESUMO

A porosidade é um dos defeitos mais comuns na soldagem de alumínio, a ocorrência desse tipo de defeito em soldas pode comprometer a integridade do equipamento. As paradas de manutenção de emergência, perda de produção e impactos ambientais são exemplos de impactos causados pela falha inesperada de um componente soldado apresentando um nível de porosidade elevado. O principal objetivo deste trabalho é estudar a incidência e o comportamento dos poros ao longo de um cordão de solda em uma chapa de alumínio AA 3003 e correlacionar essa incidência com os parâmetros de soldagem como, tipo de gás de proteção e pré-aquecimento. Os corpos de provas foram soldados pelo processo TIG em três condições de pré-aquecimento e tipo de gás de proteção. Durante a soldagem os parâmetros como, a tensão, corrente, vazão de gás, consumíveis e número de passes foram monitorados e os valores mantidos o mesmo, independente da condição de soldagem. A velocidade de soldagem foi medida, porém não foi possível manter os valores uniformes por se tratar de uma soldagem TIG manual. Os corpos de prova foram analisados através do ensaio de radiografia para avaliação da porosidade. A porosidade foi analisada a partir das imagens digitalizadas dos filmes radiográficos utilizando um software de visualização. Os poros foram quantificados e os resultados mostraram que, levando em conta somente os parâmetros de soldagem analisados, concluiu-se que a redução da porosidade ocorre pelo aumento da temperatura de pré-aquecimento e adição de hélio no gás de proteção. Mas as exposições prolongadas da liga de alumínio em temperaturas elevadas (300 °C) provocam mudanças em suas propriedades e alterações metalúrgicas descartando a sua utilização em serviços em meios corrosivos. Portanto, a utilização de parâmetros de pré-aquecimento moderado (150 °C) associado ao gás de proteção com elevado potencial térmico pode ser utilizada independente da severidade do meio que será exposto à liga.

Palavras-Chave: Soldagem de Alumínio. Porosidade. Pré-aquecimento. Gás de Proteção.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas de soldagem: (a) bancada para soldagem dos corpos de provas; (b) pré-aquecimento com maçarico de oxiacetileno; (c) soldagem do corpo de prova posição plana e (d) aspecto visual da junta soldada	35
Figura 2: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio puro.....	38
Figura 3: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio 75% Hélio 25%.....	39
Figura 4: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio 25% Hélio 75%.....	41
Figura 5: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio puro	42
Figura 6: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio-75%/hélio-25%.. ..	43
Figura 7: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio 25% Hélio 75%.. ..	45
Figura 8: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio puro.....	46
Figura 9: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio 75% Hélio 25%.....	47
Figura 10: Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio 25% Hélio 75%.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicações do alumínio e suas ligas (ALCAN, 2001).....	12
Tabela 2: Propriedades do alumínio e suas ligas (ASM,1990).....	12
Tabela 3: Classificação das ligas trabalháveis, segundo AA.....	14
Tabela 4: Classificação das ligas fundidas, segundo AA.....	15
Tabela 5: Defeitos, causas e prevenções (ALCAN, 2001).....	27
Tabela 6: Composição química do alumínio SB 209 <i>Alloy</i> 3003 utilizados nos ensaios (% em peso).....	31
Tabela 7: Composição química do alumínio SB 209 <i>Alloy</i> 3003 requerida pela norma (% em peso)	31
Tabela 8: Composição química das varetas utilizadas na soldagem TIG.....	32
Tabela 9: Identificação dos corpos de prova e suas condições de soldagem	34
Tabela 10: Parâmetros de soldagem para os três níveis de energia.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO DA LITERATURA	10
2.1 ALUMÍNIO	10
2.2 ELEMENTOS DE LIGAS E SEUS EFEITOS SOBRE O ALUMÍNIO.....	15
2.2.1 EFEITOS DOS ELEMENTOS QUÍMICOS NO DESEMPENHO EM SERVIÇOS DAS SÉRIES 1XXX E 3XXX	17
2.3 SOLDAGEM DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	19
2.3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.....	19
2.3.2 GÁS DE PROTEÇÃO	20
2.3.3 METAL DE ADIÇÃO	22
2.3.4 MÉTODOS DE PREPARAÇÃO E CUIDADOS NA SOLDAGEM DO ALUMÍNIO	23
2.4 DESCONTINUIDADES	26
2.4.1 AS PRINCIPAIS CAUSAS DA POROSIDADE EM JUNTAS SOLDADAS DE ALUMÍNIO E A IMPORTÂNCIA DO GÁS DE PROTEÇÃO E DO PRÉ-AQUECIMENTO EM SEU CONTROLE.....	28
3 OBJETIVOS.....	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 METAIS DE BASE	31
4.2 METAIS DE ADIÇÃO.....	32
4.3 SOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVAS	32
4.4 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 ENSAIOS RADIOGRÁFICOS DAS JUNTAS SOLDADAS.....	37
5.1.1 ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM JUNTAS SOLDADAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA AMBIENTE E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO PURO	37
5.1.2 ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM JUNTAS SOLDADAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA AMBIENTE E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO 75% HÉLIO 25%.....	39
5.1.3 ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM JUNTAS SOLDADAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA AMBIENTE E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO 25% HÉLIO 75%.....	40

5.1.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM SOLDAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA DE 150 °C E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO PURO	41
5.1.5 RESULTADOS DO ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM SOLDAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA DE 150 °C E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO-75%/HÉLIO-25%	43
5.1.6 RESULTADOS DO ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM SOLDAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA DE 150 °C E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO 25% HÉLIO 75%.....	44
5.1.7 RESULTADOS DO ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM SOLDAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA DE 300 °C E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO PURO	45
5.1.8 RESULTADOS DO ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM SOLDAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA DE 300 °C E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO 75% HÉLIO 25%.....	47
5.1.9 RESULTADOS DO ENSAIO DE RADIOGRAFIA EM SOLDAS NA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM DE TEMPERATURA DE 300 °C E GÁS DE PROTEÇÃO ARGÔNIO 25% HÉLIO 75%.....	48
6 CONCLUSÕES	50
6.1 INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO E DO GÁS DE PROTEÇÃO NA POROSIDADE DAS UNIÕES SOLDADAS DE ALUMÍNIO AA 3003	50
6.1.1 CONDIÇÃO DE SOLDAGEM SEM PRÉ-AQUECIMENTO (TEMPERATURA AMBIENTE)	50
6.1.2 CONDIÇÃO DE SOLDAGEM COM PRÉ-AQUECIMENTO MODERADO (150 °C).....	51
6.1.3 CONDIÇÃO DE SOLDAGEM COM PRÉ-AQUECIMENTO ELEVADO (TEMPERATURA DE 300 °C)	51
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o alumínio está entre os metais de maior consumo anual nas indústrias, sendo o mais importante entre os metais não ferrosos. A versatilidade em relação ao seu uso está associada as suas características físico-químicas, com destaque a boa resistência mecânica e química (corrosão), baixa densidade, alta condutividade térmica e elétrica

Podemos citar as indústrias petroquímicas, químicas, e de fertilizantes como as mais beneficiadas com o aumento da utilização das ligas de alumínio, tendo uma boa quantidade de seus produtos (uréia, amônia, nitrato de amônia e ácido nítrico) armazenados, produzidos e transportados através de reatores, vasos, tanques e tubulações fabricadas em ligas de alumínio.

Durante as paradas de manutenção nessas indústrias, a segurança e garantia operacional das plantas é motivo de grande preocupação, pois de acordo com os históricos, manutenção em equipamentos fabricados de alumínio é caracterizada por soldas com baixa qualidade e elevado nível de porosidade causando vazamentos e falhas na partida da planta.

Mesmo a soldagem de alumínio sendo realizada no Brasil desde os meados da década de 70, não se tem uma solução tecnológica afirmada que minimizem essas ocorrências.

Em virtude desses fatos, este trabalho pretende através de um experimento prático verificar o nível de porosidade em soldas de alumínio (AA 3003) com base nos ensaios radiográficos, estudando principalmente a influência da temperatura de pré-aquecimento e dos tipos de gases de proteção.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão descritos alguns conceitos relacionados ao alumínio e suas ligas, incluindo seu histórico, propriedades, classificação, ocorrência, aplicações e elementos de ligas.

Em seguida serão abordados aspectos sobre a soldagem do alumínio e suas ligas, tais como processo de soldagem, seleção de consumíveis, gases de proteção, cuidados e métodos de preparação. Por fim, será descrito as causas das descontinuidades em soldas de alumínio e suas medidas corretivas, dando um enfoque especial sobre a causa da porosidade em soldas da liga de alumínio AA 3003 e a influência dos parâmetros de soldagem (tipo de gás de proteção e temperatura de pré-aquecimento).

2.1 ALUMÍNIO

O alumínio apesar de ser é o mais profuso elemento metálico na crosta terrestre (cerca de 8%), em relação aos outros, é o mais jovem metal a ser utilizado pela indústria. Sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. Os Estados Unidos e o Canadá mesmo sem possuir jazidas de bauxitas, dependendo exclusivamente da importação, são atualmente os maiores produtores de alumínio no mundo. Após a Austrália e Guiné, o Brasil tem a maior reserva de minério no mundo, localizada na região amazônica. A *bauxita* é o minério mais importante para produção do alumínio, contendo de 35% a 55% de óxido de alumínio (ABAL, 2005).

O nome do metal alumínio (Al) deriva do latim *alumen* (pedra natural de natureza salina). A denominação “alumínio” (*aluminium*) foi proposta em 1807 pelo químico inglês Sir *Humphry Davy* (1778-1829), essa nomenclatura foi adota principalmente para entrar em conformidades com o nome dos outros elementos químicos que já possuíam em seus nomes o sufixo “*ium*”. Em 1809, *Humphry* foi o responsável pela primeira obtenção do que até então mais se aproximava com

alumínio, fundindo ferro na presença de alumina. O físico e químico dinamarquês Sr. *Hans Christian Orsted* (1777-1851) em 1825, foi o primeiro pesquisador a obter alumínio metálico, ele conseguiu isolar o alumínio utilizando o cloreto de alumínio com amálgama de potássio.

O químico alemão Sr. *Frederick Wohler* (1800-1882), em 1827, aperfeiçoou o processo de redução química utilizando potássio metálico no lugar da amálgama de potássio e melhorando a desidratação do alumínio. Em 1854, *Henri Saint-Claire Devile* é responsável pela primeira obtenção de alumínio por via química (eletrólise do fundido sódio, alumínio, cloreto), mas pela necessidade de uma fonte econômica de energia elétrica, o processo ficou inviabilizado (BARRA, 2003).

Já em 1886, surge quase que simultaneamente por *Paul Louis Toussaint Héroult* (França) e *Charles Martin Hall* (EUA) o processo de obtenção de alumínio por meio da redução eletrolítica da alumina dissolvida em banho fundido de criolita, esse processo ficou conhecido como “*Hall - Héroult*” tem o domínio absoluto na produção indústria de alumínio (ABAL, 2005).

As ligas de alumínio vêm substituindo o aço em algumas aplicações industriais em função da combinação entre suas propriedades físicas (relação resistência mecânica x peso) e químicas (passividade). Além disso, devido a sua baixa densidade o alumínio é classificado com um metal leve e usualmente tem sua aplicação quando no projeto existe a preocupação em relação ao peso final do componente mecânico ou estrutura (BARRA, 2003).

Em relação as suas propriedades químicas, o maior atrativo quanto ao aumento da utilização do alumínio em aplicações indústrias, é o fato de ao ser atacado pelo O_2 provoca de imediato a formação de uma película de óxido conhecida como “Alumina”, o que torna este metal “passivo” e ideal para aplicações em ambientes sujeitos a ataque químico e oxidação. Além da alta resistência química e oxidações estão também como principais características da “Alumina”:

- Elevada tenacidade e dureza;
- Boa aderência ao metal de base;
- Quimicamente inerte e relativamente estável.

Em relação as suas propriedades mecânicas, o alumínio tem como seus pontos fortes para o mercado são a alta condutividade elétrica, resistência mecânica (quando ligado a outros metais), ductilidade e baixa densidade na qual vem

substituindo o cobre em aplicações em linhas de transmissão elétrica e o aço em aplicações estruturais (BARRA, 2003).

As Tabelas 1 e 2 apresentam um resumo de algumas aplicações industriais e propriedades específicas do alumínio, respectivamente.

Tabela 1 – Aplicações do alumínio e suas ligas (ALCAN, 2001).

Liga	Aplicações
1XXX	Tanques, tubulações, fio condutor, barramentos elétricos, refletores, frisos decorativos, utensílios domésticos.
2XXX	Rodas de carro de combate, tanques de combustível de aeronaves.
3XXX	Tanques, tubulações, bote de navegação, carrocerias de onibuse, extintores.
5XXX	Silos, veículos militares, frisos para automóveis.
6XXX	Estruturas elétricas, rebites, ornamentos, grades, embarcações.
7XXX	Pontes militares, blindagem de veículos militares, estruturas aeroespaciais, vagões ferroviários.

Tabela 2 – Propriedades do alumínio e suas ligas (ASM,1990).

Propriedades	Considerações
Temperatura de Fusão	O alumínio e suas ligas apresentam uma baixa temperatura de fusão na ordem de 660 °C.
Densidade	O alumínio e suas ligas apresentam uma baixa densidade na ordem 2700Kg/m ³ .
Condutividade Elétrica e Térmica	O alumínio apresenta uma condutividade elétrica de 65% do padrão internacional do cobre (%IACS) e térmica de 222 W/(m.°C).
Ductilidade	O alumínio apresenta uma excelente ductilidade $E = 69 \times 10^3$ MPa.
Resistência Mecânica	A resistência mecânica varia entre 70 MPa (série 1XXX) e 600 MPa (série 7XXX).
Dureza	A dureza varia entre 19 Brinell (série 1XXX) e 145 Brinell (série 7XXX).
Arranjo Cristalino	Arranjo CFC na temperatura ambiente.
Número, Raio e Peso Atômico	O número atômico é 13, seu raio é 0,143 nm e o peso atômico 26,98 amu

A classificação do alumínio e suas ligas é baseada no sistema proposto pela *Aluminium Association*. Este sistema denominado de “*The Aluminum Association Alloy and temper Designation System*” é adotado pela ABNT como referência no Brasil, através da norma NBR 6834 (ALCAN, 2001).

Os principais elementos de ligas adicionado ao alumínio são o cobre, silício, magnésio e zinco. Outros elementos adicionados em pequenas quantidades a liga são apenas para fins de refino de grão ou desenvolvimento de alguma propriedade em especial (BARRA, 2003).

A classificação proposta pela *Aluminum Association* é subdividida em grupos das ligas trabalháveis e fundidas.

Considera-se como ligas trabalháveis aquelas na qual na forma final do produto (parafuso e pino) é obtida pela transformação de um componente semi-manufaturado (chapa e vergalhão) ou pela transformação mecânica, a frio ou a quente, do metal no estado sólido (tarugo ou placa) (BARRA, 2009).

As ligas trabalháveis ainda apresentam uma subdivisão quanto ao mecanismo de resistência da liga, ou seja, elas se subdividem em ligas tratáveis termicamente ou em ligas não tratáveis termicamente (BARRA, 2009).

A classificação das ligas trabalháveis emprega um sistema de quatro dígitos $YX_1X_2X_3$. O primeiro dígito representa o elemento de liga principal e o grupo da liga. O segundo dígito representa as variações em relação os limites de impurezas. Por sua vez o terceiro e quarto dígitos indicam as diferentes ligas da série ou o teor de pureza do alumínio.

Exemplo da classificação de uma liga trabalhável:

Liga AA 3003

AA – *Aluminum Association*

3(Y) – principal elemento da liga (manganês);

0(X_1) – sem variação na composição original. Se 1 – primeira variação da liga (0,15 a 0,5 % de variação em um ou mais elementos químicos da liga) e para 2, 3, 4... significa que a liga sofreu sucessivas variações na composição original;

03($X_2 X_3$) – designa uma liga específica da série.

Para ligas fundidas, utiliza-se uma designação equivalente aquela adotada para as ligas trabalháveis, ou seja, as ligas fundidas, também, utilizam quatro dígitos de identificação. Como diferença principal, existe um ponto “.” separando o

terceiro e quarto dígito (indicação que o produto está sob a forma de peça fundida ou lingote). Nesse caso, o último dígito, após o ponto, indicará a forma do produto (fundido ou lingote) e o primeiro dígito identificará o grupo da liga (série). Os dois dígitos seguintes caracterizam a liga ou a pureza do alumínio ou somente as diferentes ligas de uma série (BARRA, 2003).

As Tabelas 3 e 4 apresentam um resumo da classificação das ligas trabalháveis e das ligas fundidas, respectivamente.

Tabela 3 – Classificação das ligas trabalháveis, segundo AA.

Designação Aluminum Association (YX₁X₂X₃)	Liga	Mecanismo de Resistência	Têmpera
1XXX	Al 99%	Não – tratáveis termicamente(*)	F (Como fabricado)
2XXX	Al-Cu	Tratáveis termicamente(**)	
3XXX	Al-Mn	Não – tratáveis termicamente(*)	O (Recozido)
4XXX	Al-Si	Não – tratáveis termicamente(*)	
5XXX	Al-Mg	Não – tratáveis termicamente(*)	H (Encruado)
6XXX	Al-Mg-Si	Tratáveis termicamente(**)	
7XXX	Al-Zn	Tratáveis termicamente(**)	W (Solubilizado)
8XXX	AL+ outros elementos	-	
9XXX	Série não utilizada	-	T (Tratáveis Termicamente)

*Variação de resistência através de encruamento;

**Variação da resistência através de tratamento térmico.

Tabela 4 – Classificação das ligas fundidas, segundo AA.

Designação Aluminum Association (YX ₁ X ₂ .X ₃)	Liga	Identificação do Quarto Dígito (x ₃)	Variações na Liga (a, b ou c)
1XX.X	Al 99%	0 - Peça fundida 1 ou 2 - Lingote	Modificações das ligas originais
2XX.X	Al-Cu		
3XX.X	Al-Si+Cu e/ou Mg -Mn		
4XX.X	Al-Si		
5XX.X	Al-Mg		
6XX.X	Série não utilizada		
7XX.X	Al-Zn		
8XX.X	Al – Sn		
9XX.X	Al + outros elementos		

2.2 ELEMENTOS DE LIGAS E SEUS EFEITOS SOBRE O ALUMÍNIO

O alumínio pode ser ligado com diferentes elementos de ligas, divididos em elementos primários e secundários, em busca do aumento da resistência mecânica, resistência à corrosão e soldabilidade. Os elementos de ligas primários são o cobre, o silício, manganês, o magnésio e o zinco. Por sua vez, os elementos secundários como cromo, zircônio, vanádio, ferro, bismuto, titânio e níquel, incrementados em pequenas quantidades à liga, realizam a função de refino de grão e desenvolvimento de uma propriedade especial (BARRA, 2003). Abaixo é apresentado um resumo dos efeitos elementos de liga ao alumínio, como:

- Manganês – apresenta solubilidade limitada na matriz de alumínio, na concentração de 1% do peso. É o elemento de liga primário responsável pela caracterização da série 3XXX das ligas trabalháveis e não tratáveis termicamente. Melhora a resistência mecânica sem comprometer a ductilidade e a resistência a corrosão nas ligas tratáveis e não tratáveis

termicamente. Devido sua baixa solubilidade na matriz, normalmente forma segunda fase;

- Cobre – é o elemento de liga de maior importância para o alumínio. Sua apreciável solubilidade na matriz, com substancial efeito na resistência mecânica, através da característica de endurecimento por envelhecimento, é único para o alumínio. O cobre apresenta-se como elemento de liga principal nas ligas trabalháveis e fundidas (2XXX e 2XX.X);
- Silício – Tem como característica abaixar o ponto de fusão e aumentar a fluidez da liga. Sua adição provoca um moderado aumento na resistência mecânica. Seu excesso na matriz tende a formar segunda fase.
- Magnésio – Provoca um elevado aumento na resistência mecânica e melhora a característica de endurecimento por encruamento do alumínio. Possui uma relativa solubilidade na matriz de alumínio, porém as ligas Al-Mg contendo menos 7% em peso de magnésio não apresentam características apreciáveis ao tratamento térmico. O magnésio é adicionado em combinação com outros elementos de ligas, para elevar a resistência mecânica sem afetar a resistência a corrosão.
- Zinco – é usado em ligas fundidas, e combinação com o magnésio, nas ligas trabalháveis, é utilizada para produzir ligas tratáveis termicamente, com a as maiores resistência mecânica entre as ligas de alumínio;
- Cobre e Silício – combinação usada nas ligas na série 3XX.X. Boas propriedades são obtidas nas ligas tratáveis e não tratáveis termicamente;
- Magnésio e Silício – são incrementados em proporções equivalentes para forma Mg-Si, que se constitui como uma das bases para o processo de endurecimento por envelhecimento nas ligas trabalháveis e fundidas;
- Estanho – melhora as características antifricção do alumínio e das ligas Al-Sn empregadas em mancais de deslizamento;
- Cromo – é um elemento de liga secundário que em combinação com o magnésio forma segunda fase.

2.2.1 Efeitos dos elementos químicos no desempenho em serviços das séries 1XXX e 3XXX

Os elementos de ligantes, utilizados na obtenção de algumas propriedades de uma liga metálica também podem ser classificados em três grupos principais, o grupo dos elementos de liga básicos (Cu, Mn, Mg, Li e Zn), o grupo dos elementos de adição auxiliares (Cr, Ni, Zr e Ti) e o grupo das impurezas (Fe e Si). Portanto, dependendo da natureza de uma liga (condição almejada pelo projeto), um determinado elemento de liga possa se enquadrar em dois grupos citados anteriormente. Nesse caso um elemento de liga poderá ocasionar, para ligas de diferentes séries, desempenho melhor ou pior em relação à condição de serviço (por exemplo, resistência a corrosão) (BARRA, 2009).

Os elementos básicos controlam o processo de fundição e o desenvolvimento de uma determinada propriedade da liga. Para o grupo dos elementos de adição auxiliares resume-se o controle do modo de solidificação, refino das fases primárias, o tamanho e forma do grão, a promoção e supressão de fases e a redução da oxidação. Por último, o grupo das impurezas influencia o processo de fundição e a formação de fases insolúveis na matriz conhecido como intermetálicos (KAUFMAN e ROOY, 2004).

As ligas não tratáveis termicamente (séries 1XXX, 2XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX) exibem de forma geral boa resistência a corrosão, a seleção de uma liga será baseada em fatores definidos em projeto. Como exemplo dessa característica, as ligas AA 1100 exibem resistência mecânica inferior a liga AA 3003 e, portanto, para uso em ambientes corrosivos, as ligas AA 3003 são preferencialmente escolhidas por agregar resistência mecânica e resistência à corrosão (SCHWEITZER, 2003).

O manganês (Mn), considerado um elemento de liga básico na série 3XXX, tem a função de melhorar a resistência mecânica da liga por meio do mecanismo de solução sólida e do endurecimento por deformação. A presença do manganês, na série 3XXX, eleva em 20% a resistência mecânica em relação ao alumínio da série 1XXX (KISSEL e FERRY, 2002).

O Mn apresenta limitada solubilidade na matriz de alumínio e, sob a concentração na ordem de 1% em peso, forma a série 3XXX das ligas trabalháveis e

não tratáveis termicamente (TOTTEN E MACKENZIE, 2003). Em função da sua baixa solubilidade na matriz, o manganês forma predominantemente segunda fase (precipitação de intermetálicos). A presença das impurezas Fe e Si reduzem a solubilidade do Mn na matriz de Al e acelera a decomposição da solução sólida supersaturada com Mn, em temperaturas nas faixas 400 e 500 °C.

A adição de Mn nas ligas de alumínio, na ordem de 0,5% ou mais auxilia a neutralização dos efeitos negativos de Fe sobre a matriz (controle na formação de intermetálicos de caráter catódico e potencial de corrosão superior ao potencial da matriz – redução da drive force galvânica para formação de pite). A presença de Mn na matriz (0,1 a 1,0%) provoca um incremento na resistência mecânica, em virtude da anomalia na formação de soluções sólidas supersaturadas, sob condições de solidificação em não equilíbrio (ASM, 2003).

O silício para as séries 1XXX e 3XXX estão no grupo das impurezas. A presença do silício na matriz de alumínio baixa o ponto de fusão e eleva a fluidez da liga. Adicionalmente, uma moderada elevação da resistência mecânica e da ductilidade é obtida pela adição de Si (endurecimento por precipitação), seu excesso na matriz tende a formar segunda fase (TOTTEN e MACKENZIE, 2003).

Adição de Si melhora a resistência ao mecanismo de decoesão, em condições de temperatura elevada, a resistência à trinca quente e a capacidade do metal líquido preencher a cavidade do molde (controle da relação entre a taxa de solidificação x volume de metal líquido x formação de porosidade). O silício se combina com o ferro e outros elementos químicos para formar compostos insolúveis na matriz (KAUFMAN e ROOY, 2004). Em soldagem, a região do depósito (proximidade da linha de fusão e ZTA) pode sofrer variações da resistência à decoesão em função da presença de inclusões não metálicas (silicatos e sulfetos), paralelas à direção de laminação (KOU, 2002).

O ferro pertence ao grupo das impurezas assim como o silício nas séries 1XXX e 3XXX. O ferro reduz a solubilidade do Mn na matriz do alumínio (MATHERS, 2002). Quando os níveis individuais dos elementos Fe e Si estão abaixo de 0,1% a tenacidade da liga é melhorada (SCHWEITZER, 2003). Para a série 1XXX, o processo de produção da liga não permite a eliminação completa das impurezas Fe e Si. Dessa forma, devido à baixa solubilidade do Fe e Si na matriz do alumínio, haverá precipitação dos intermetálicos Al-Fe e Al-Fe-Si. Como regra geral a fração

volumétrica das partículas de segunda fase tem relação direta com a quantidade de Fe presente na forma de impureza (KAUFMAN e ROOY, 2004).

A corrosão intercrystalina é causada pela presença do intermetálico $FeAl_3$ nos contornos de grão (VERGEL *et al* , 2004). Por sua vez a formação de intermetálicos, nobres em relação à matriz, como o caso do $FeAl_3$, produz pontos catódicos localizados, causa a dissolução alcalina da matriz e dos contornos dos intermetálicos e eleva pH local dando início à quebra da passivação (ASM, 2003).

A soldagem de alumínio, o incrementos das impurezas Fe e Si durante a formação da zona fundida, induzem o aumento do processo de corrosão intercrystalina do depósito. A utilização de alumínio de elevada pureza incrementa a vida em serviço dos equipamentos em até 5 vezes (DOVBISHCHENKO *et al* , 1973).

2.3 SOLDAGEM DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

2.3.1 Processo de soldagem TIG

O alumínio e suas ligas podem ser soldados por diversos processo de soldagem, como os processo de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa (TIG, MIG e Plasma), a gás (Oxi-acetileno e Oxi-hidrogênio), por resistência elétrica, laser e feixe de elétrons (BARRA, 2003).

O processo soldagem TIG com corrente alternada é o mais aplicado na soldagem das ligas de alumínio. Ele foi desenvolvido antes do processo MIG , com isso durante muito tempo foi sendo utilizado para soldar diversos tipo de produtos e estruturas com diferentes espessuras, mas após o surgimento do processo MIG, o TIG passou a ser utilizados em peças mais finas , juntas complexas e soldas autôgenas. As principais limitações do processo TIG em relação ao MIG pulsado são a dificuldade penetração em chanfros estreitos, baixa velocidade de soldagem e taxa de deposição (ALCAN, 2001).

O Arco TIG (CA) reverte a polaridade na mesma frequência da rede, ou seja, ora ele é negativo, ora é positivo, por essa razão o calor pode ser bem dividido entre o eletrodo e poça de fusão. O processo TIG (CA) combina as vantagens dos

processos TIG (CCEN) e (CCEP), isto é limpeza e penetração. O calor que vai para o eletrodo precisa ser atenuado para evitar o superaquecimento, por isso é essencial que as tochas para soldagem de alumínio sejam refrigeradas a água. O aspecto da alternância do arco acarreta um problema de estabilidade do arco. O tungstênio especialmente quando aquecido, é um bom emissor de elétrons, mas o alumínio não, devido a isto o arco se extingue na metade do seu ciclo, para acabar este inconveniente é preciso adicionar ao arco uma descarga de alta voltagem proveniente de energia de alta frequência, as máquinas de soldagem atuais dispõem desse componente na própria fonte (ALCAN, 2001).

Os equipamentos para soldagem TIG (CA) é composto de uma fonte de potência CA projetada para soldagem TIG, gerador de alta frequência, suprimento de gás de proteção com regulador e fluxímetro, uma tocha refrigerada com bocal de gás leans, eletrodo de tungstênio puro (ponta verde), suprimento de água de refrigeração, é necessário que nas máquinas exista no mínimo os ajuste da intensidade da alta frequência, circuito de controle para ligar e desligar o gás e água além de um relé de tempo para controlar a pré e pós vazão do gás de proteção (expulsar o ar da mangueira e resfriar o tungstênio) e um controle remoto (pedal) para ajustar a corrente, já máquinas especiais provem também de unidades de onda quadrada, este benefício surgiu devido ao avanço da eletrônica (transistores de alta potência e velocidade de comutação) com isso conseguisse obter intervalos de tempo desiguais em cada polaridade, melhorando ação de limpeza ou penetração (ALCAN, 2001).

2.3.2 Gás de Proteção

O gás de proteção além de proteger a região do arco compreendida pela poça de fusão através da expulsão do ar, eliminando o oxigênio, nitrogênio e o hidrogênio do contato com metal fundido, transfere a corrente elétrica quando ionizado (ALCAN, 2001).

Boa parte dos diversos gases inertes, argônio, hélio, criptônio e xenônio poderiam ser aplicados como atmosfera protetora na soldagem TIG, mas por razões

comerciais (custo, disponibilidade no mercado), os únicos gases utilizados na soldagem TIG (CA) do alumínio são o argônio, hélio e misturas formadas entre eles. (ALTSHULLER, 1998).

A atmosfera inerte influencia no aspecto do cordão, estabilidade do arco, propriedades mecânicas, penetração da solda e na formação de discontinuidades. As principais características dos gases de proteção são o potencial de ionização e condutividade térmica (LYTTLE e STAPON, 1990).

A abertura e manutenção do arco sofrem grande influência do potencial de ionização do gás, ou seja, quanto mais baixo for o potencial de ionização maior será a estabilidade do arco. O argônio, por exemplo, possui um potencial de ionização menor que o hélio, portanto sua capacidade em relação a acendimento e estabilização do arco são superiores (LYTTLE e STAPON, 1990). Por sua vez, o hélio possui uma condutividade térmica elevada comparada ao argônio, sendo que uma melhor transferência de calor na soldagem promove principalmente em materiais excelentes condutores (alumínio e cobre) uma melhor penetração, uma poça de fusão mais fluida e a minimização do efeito do escoamento térmico provocado pela alta condutividade térmica do material.

De acordo com Lyttle e Stapon (1990), o argônio gás de proteção possui as seguintes características:

- Possibilita melhor partida do arco e mais estabilidade devido ao baixo poder de ionização (15 eV);
- Penetração reduzida devido à baixa condutividade térmica (0,427 mWcmK⁻¹);
- Alta densidade (1,38 vezes maior que o ar)
- Ação de limpeza mais intensa;
- Baixo custo e alta disponibilidade;
- Maior resistência a deslocamento de ar;
- Baixa viscosidade cinemática (13 10⁻⁶ m²/s).

Ainda de acordo com Lyttle e Stapon (1990), O hélio segundo Altshuller (1998) possui as seguintes propriedades:

- Alto poder de ionização (25 eV);
- Alta condutividade térmica (3,63 mW.cm.K⁻¹);
- Perfis de cordões arredondados, largos, planos e com alta penetração;

- Baixa densidade em relação ao ar (0,138);
- Alta viscosidade cinemática ($114 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Misturas gasosas entre o hélio e argônio são utilizadas a fim de se obter durante a soldagem características específicas de ambos como, melhor partida e estabilidade do arco, ação de limpeza e penetração. De acordo com Altshuller (1998) a seleção do tipo de gás de proteção ou mistura na soldagem de alumínio depende principalmente da espessura do metal a ser soldado. Em espessuras até 12,7 mm, o ideal é a utilização do argônio puro, pois o benefício causado pela adição do hélio não justifica o custo. Para espessuras acima de 12,7 até 25,4 mm é usada mistura de argônio e hélio. Para espessuras acima de 25,4 mm é utilizado hélio puro e processos de soldagem automáticos.

Segundo Wainer *et al* (1992) a vazão de gás excessivamente alta ou baixa provoca descontinuidades e, conseqüentemente, elevam o custo. A determinação correta da vazão de gás depende dos seguintes fatores:

- Tipo de gás de proteção;
- Distância do bocal a peça;
- Tipo de junta;
- Geometria do bocal;
- Intensidade de corrente;
- Inclinação da tocha;
- Deslocamento de ar;
- Comprimento de arco;
- Velocidade de soldagem;
- Posição de soldagem;
- Tipo de metal de base.

2.3.3 Metal de Adição

Os maiores fornecedores de consumíveis de soldagem de alumínio seguem as normas do ASME Seção II parte C e especificação SFA 5.10 e AWS com a especificação A 5.10. A nomenclatura do metal de adição utilizada na soldagem do

alumínio e suas ligas seguem a especificação adotada pela *Aluminum Association*, ou seja, a nomenclatura empregada se baseia na composição química do consumível e é composta pelas letras E e R, seguidas por quatro dígitos (ERXXXX) (BARRA, 2003 e ALCAN, 2001). Exemplo: ER-1100, onde:

ER – Metais de adição para soldagem a arco com proteção gasosa.

1100 – Liga da série 1XXX (Al comercialmente puro)

O eletrodo (vareta) utilizado como consumível na soldagem ao arco elétrico é visto como um elemento crítico. O diâmetro do eletrodo e combinação metal de base x metal de adição são os fatores fundamentais na seleção do metal de adição (BARRA, 2003).

As propriedades mecânicas como a resistência mecânica e a alongação são afetadas pela escolha do par metal de base x metal de adição. A resistência da união soldas em ligas de alumínio é será ditada pela zona termicamente afetada (BARRA, 2003).

De acordo com ALCAN (2001), AWS (1996) e Barra (2003) a seleção do melhor metal de adição para uma determinada condição de soldagem deverá seguir os seguintes fatores:

- Facilidade de soldagem ou redução a tendência a fissuração a quente;
- Resistência requerida na região da solda;
- Ductilidade da região soldada;
- Temperatura de serviço;
- Resistência à corrosão;
- Diferença de coloração entre a região soldada e o restante do metal;
- Geometria da junta.

2.3.4 Métodos de preparação e cuidados na soldagem do alumínio

As ligas de alumínio deve estar sempre limpa e isenta de umidade. É característica dessas ligas a formação natural da sua película protetora (alumina) sobre a superfície, porém esta película de óxido é porosa e pode reter umidade e sujeiras (ALCAN,2001).

Nessas circunstâncias o filme espesso (devido à umidade) e contaminado (devido à impregnação de sujeiras) ocasionará no momento da solagem, instabilidade do arco e porosidade. Além disso, é necessário, através de ferramentas isentas de ferro, a remoção da alumina na região da solda para garantir a coalescência entre o metal de adição e metal de base. Sendo assim, o armazenamento do alumínio em ambientes secos, limpos e com temperaturas moderadas é importante, a fim de assegurar que a espessura do filme de óxido será mantida normal e livre de sujeiras. Para evitar as indesejáveis “mancha d’água” e o acúmulo de hidrocarbonetos (óleo, graxa) e poeiras no alumínio devem-se atender os seguintes pontos (ALCAN, 2001):

- Armazená-lo em ambientes com temperatura e umidade moderada;
- Dispor as peças sempre que possível na vertical, de forma que o ar circule em torno da peça;
- Envolver o material com folha de plástico.

Para preparar o metal alumínio para a soldagem são necessários utilizar operações de esmerilhamento e de corte. A operação de esmerilhamento é bastante usada na preparação do alumínio, tanto para chanfrar e goivar, elas apresentam melhores resultados quando utiliza-se discos semiflexíveis de fibra de vidro e ou metálicos em forma de serra com os dentes de Widea. É necessário para maior eficiência deste processo, que as esmerilhadeiras atigam a rotação 8600 rpm. O processo de arco plasma é também um método de corte e goivagem de alumínio altamente produtivo. A qualidade do corte depende de vários fatores. O primeiro deles é a liga, o outro é a velocidade de corte. O corte ao arco plasma gera uma zona termicamente afetada e alguns contorno de grão parcialmente fundidos (pode acarretar em microtincas na região do corte), por isso após o corte, devemos remover 3,2 mm da face da borda. A goivagem com plasma, é de uso recente, mas as regiões das superfícies goivadas pelo processo apresenta-se de forma plana e limpa, sendo que a profundidade do sulco por passe é limitada em 6,3 mm (ALCAN, 2001).

A limpeza da junta a ser soldada é um fator determinante para se obter soldas livres de descontinuidade, independente do processo de soldagem. Na soldagem de ligas de alumínio, é ideal que o material seja armazenado e manuseado de tal maneira, que a limpeza pré-soldagem seja mínima. Em virtude disso economiza-se

tempo de preparação, evita-se um tempo de exposição maior a produtos químicos (acetona e tolueno) na remoção de óleos, graxas e gorduras, e o aspecto final do metal tendo regiões menores de esmerilhamento/escovamento (ALCAN, 2001).

A limpeza mecânica (remoção da alumina) e química (remoção de óleos, graxas e etc.) é essencial para soldagem. No caso da remoção inadequada da alumina, ocasionará no cordão de solda além de inclusões e porosidades, problemas de falta de fusão entre o metal de solda e metal de base. Por sua vez, a não remoção de óleos e graxas que são compostos a base de hidrocarbonetos (são decomposto pelo calor do arco elétrico), implicará em porosidade na solda originada pela liberação do hidrogênio atômico na poção de fusão. A limpeza deve abranger o chanfro e 50 mm da superfície em ambos os lados (ALCAN, 2001).

A remoção de umidade pode ser realizada através de aquecimento, em algumas ocasiões também se faz necessário um aquecimento inicial antes da soldagem para minimizar o efeito da dissipação do calor, facilitando a estabilidade do arco, diminuindo o desprendimento de energia para alcançar o ponto de fusão da liga, minimiza porosidade e tensões residuais. Todavia, é importante que este aquecimento seja moderado (máximo 250 °C) para não ocasionar perdas ou mudanças nas propriedades e características metalúrgicas das ligas (ALCAN, 2001).

Contudo a soldagem deve ser executada imediatamente após a preparação, pois o filme óxido forma-se rapidamente. Portanto, recomenda-se algumas precauções na preparação antes da soldagem:

- As escovas manuais e rotativas devem possuir cerdas de alumínio ou aço inoxidável e sempre matidas limpas (utilização exclusivo em serviços de alumínio);
- A remoção da alumina deve ser executada com pressão de escovamento leve e após a limpeza química.

2.4 DESCONTINUIDADES

As soldas chamadas de “reprovadas” ou “defeituosas” pelo controle de qualidade, são aquelas que ao serem inspecionadas apresentam descontinuidades com dimensões ou formas acima do critério de aceitação estabelecido pelas normas utilizadas, onde a resistência da junta soldada será afetada. As descontinuidades em soldas de alumínio ocorrem devido uma variedade de causas, tais como: preparação do metal de base, procedimento e técnicas de soldagem inadequadas, entre outros. Os principais defeitos encontrados em uniões de alumínio são: trincas, falta de penetração, falta de fusão, inclusões, modeduras e porosidade (ALCAN, 2001).

Conforme o manual da ALCAN (2001) estes defeitos serão descritos a seguir:

- Trincas - são fissuras que podem ocorrer durante a solidificação, o resfriamento da solda, tanto na zona fundida, como na zona termicamente afetada. Para surgimento das trincas é necessário a combinação de estrutura susceptível e carregamento (tensão aplicada). Cada tipo de trinca resulta de uma forma diferente de tensão. Os principais tipos de trinca encontrados na soldagem do alumínio e suas ligas são: trincas longitudinais, trincas transversais, trincas de cratera, trincas intergranulares.
- Falta de Penetração – ocorre quando o cordão de solda não penetra toda a espessura do metal de base (deixando altura da face da raiz ou “nariz” sem fundir). A falta de penetração é um defeito crítico, pois além reduzir a seção transversal da junta, atua como concentrador de tensão.
- Falta de Fusão – ocorre quando o metal de solda não consegue coalescer com metal de base ou com o próprio metal de solda depositado no passe anterior. A falta de fusão é um defeito extremamente perigoso, pois reduz a eficiência da junta, e a depender do carregamento provoca um coarço na junta soldada.
- Mordedura – é a formação de sulcos ou entalhes na margem da solda. A depender da dimensão do entalhe e do nível de solicitação da junta torna-se um defeito crítico por reduzir a seção transversal da junta e atuar como concentrador de tensão.
- Porosidade – é a presença de bolsas de gás ou cavidades na solda. A porosidade por ser um defeito volumétrico tem pouca influência na resistência

da junta. Todavia se estiver presente em grande quantidade ou alinhada, a resistência e ductilidade da junta fica prejudicada.

A Tabela 5 resume de os principais defeitos encontrados em soldas de alumínio, com suas causas e medidas de prevenções.

Tabela 5 - Defeitos, causas e prevenções (ALCAN, 2001).

Tipo de defeito	Causas	Prevenções
Trinca de Cratera	<ul style="list-style-type: none"> -manipulação incorreta da tocha e vareta. - extinção do arco de forma brusca. 	<ul style="list-style-type: none"> - interromper o arco suavemente, mas continue adicionando metal de adição. - utilize chapa apêndice.
Trinca Longitudinal	<ul style="list-style-type: none"> - metal de adição incorreto. - abertura inadequada. 	<ul style="list-style-type: none"> - utilizar metal de adição correto. - utilizar abertura especificado. - aumentar a velocidade de soldagem. - utilizar a corrente correta.
Falta de Penetração	<ul style="list-style-type: none"> - corrente de soldagem baixa. - abertura de junta inadequada. - comprimento de arco longo. 	<ul style="list-style-type: none"> - utilizar os parâmetros de soldagem da EPS. - diminuir o comprimento do arco.
Falta de Fusão	<ul style="list-style-type: none"> - corrente de soldagem inadequada. - comprimento de arco muito longo. - camada de óxido espessa. 	<ul style="list-style-type: none"> - limpeza e preparação para soldagem. - utilizar os parâmetros de soldagem da EPS.
Mordedura	<ul style="list-style-type: none"> - manipulação incorreta da tocha. - corrente de soldagem alta. - velocidade de soldagem baixa. 	<ul style="list-style-type: none"> - reduzir a corrente de soldagem. - aumentar a velocidade de soldagem.
Porosidade	<ul style="list-style-type: none"> - metal de adição sujo. - metal de base sujo. - comprimento de arco incorreto. 	<ul style="list-style-type: none"> - metal de adição limpo. - metal de base limpo. - utilizar tensão de arco especificada.

2.4.1 As principais causas da porosidade em juntas soldadas de alumínio e a importância do gás de proteção e do pré-aquecimento em seu controle

A porosidade em soldas de alumínio é uma descontinuidade comum e suas principais causas são bastante conhecidas. A principal causa é referente ao hidrogênio dissolvido na poça de fusão, que se dá através da presença de materiais estranhos no metal base ou adição, hidratos que coexistem com a película de óxidos na superfície do alumínio, impurezas gasosas e hidrogênio presentes no gás de proteção e a umidade do ar absorvida pelo gás de proteção. Outro fator que contribui é a alta condutividade térmica do alumínio, que por sua vez, faz com que ocorra um resfriamento rápido sem que haja tempo para os gases serem expelidos antes da solidificação, ocasionando a porosidade (GIMENES e TREMONTI, 1994).

A elevada condutividade térmica do alumínio provoca um alto escoamento do calor ao longo do material, dificultando o aumento da temperatura localizado, dessa forma ao soldar alumínio é necessário um grande aporte térmico e com auxílio de calor adicional. A camada de óxido possui um ponto de fusão de 2050 °C, portanto é importante estabelecer um mecanismo de retirada deste óxido, ou seja, o arco elétrico atua no sentido de remover a camada de óxido (limpeza catódica com eletrodo positivo) e atmosfera inerte impede a penetração do oxigênio, evitando a regeneração do filme passivo (GIMENES e TREMONTI, 1994).

O controle da porosidade nas soldagem de alumínio, não limita-se apenas a cuidados e manuseio na estocagem do metal de base e consumíveis, parâmetros de soldagem adequados, tais como pré-aquecimento e gás de proteção são extremamente importantes para minimizar o surgimento dos poros.

O pré-aquecimento é responsável por aspectos importantes na redução da porosidade, visto que diminui a velocidade de resfriamento, ou seja, a poça de fusão leva mais tempo para solidificar, reduzindo a possibilidade de retenção de gases na zona fundida. Entretanto, a temperatura de pré-aquecimento não pode ser muito alta (máxima de 250 °C), pois suas propriedades e características metalúrgicas são alteradas com o efeito do aquecimento prolongado (ALCAN, 2001).

Como descrito no capítulo 2.4.2, o gás de proteção é também uma variável essencial para minimizar a porosidade em juntas soldadas de alumínio, visto que

sua principal função é fornecer uma atmosfera inerte capaz proteger a poça de fusão. Os gases de proteção mais utilizados na soldagem do alumínio e suas ligas são argônio, hélio e misturas entre eles. O argônio por ser mais denso que o hélio produz um efeito de limpeza maior, por sua vez, o hélio possui alta condutividade térmica propiciando um arco mais quente em relação ao argônio. As misturas entre argônio e hélio permitem associar vantagens ambos, sendo assim, podemos associar características como estabilidade de arco, ação de limpeza, aporte térmico que são fundamentais para minimizar o aparecimento de poros. De acordo com os manuais e catálogos dos fornecedores de gases *White Martins, Linde Gás e Air Liquide*, o percentual de argônio não pode ser inferior a 20% para produzir arco estável e os percentuais de hélio utilizados em misturas comerciais são 25%, 50% e 75%, sendo que quanto maior for o teor de hélio adicionado ao argônio maior será a energia do arco e menor a quantidade de poros, pois o calor imposto durante a soldagem afeta diretamente a porosidade. Esse calor é representado pela energia gerado pelo arco ao longo do cordão de solda, que ao ser elevada promove maior tempo disponível para escape dos gases evitando o aprisionamento na frente de solidificação.

3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre o nível de porosidade em juntas soldadas de alumínio AA 3003, e os objetivos específicos são os seguintes:

- a) Desenvolver uma metodologia pela qual consiga estabelecer parâmetros adequados para soldagem de alumínio em chapas espessas com o processo TIG.
- b) Determinar como variáveis tais como o tipo de gás de proteção e temperatura de pré-aquecimento pode afetar a qualidade da junta soldada quanto à quantidade e distribuição de poros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para definir as condições de soldagens adequadas atenderem a exigência em relação à porosidade em soldas de alumínio SB 209 *Alloy* 3003 em meios de HNO₃, foi necessário aplicar alguns métodos e ensaios que fornecessem respostas quanto ao comportamento da porosidade e a influência dos parâmetros como: tipo de gás de proteção e temperatura de pré-aquecimento.

Neste capítulo serão abordados detalhes relacionados ao material de base e de adição utilizado, às soldagens executadas e ao ensaio de radiografia.

4.1 METAIS DE BASE

O metal de base utilizado foi o alumínio ASTM SB-209 *Alloy* 3003 (espessura 16 mm), largamente usado em tubulações de transporte e tanques de armazenamento de HNO₃ concentrado 98%.

Na Tabela 6, mostra a composição química do metal de base (ASTM SB 209 *Alloy* 3003), obtida por via úmida. Como se pode observar, os valores estão dentro daqueles requeridos pelas normas (vide Tabela 7)

Tabela 6 - Composição química do alumínio SB 209 *Alloy* 3003 utilizados nos ensaios (% em peso).

Composições Químicas do SB 209 <i>Alloy</i> 3003 (% em peso)									
Alumínio	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA 3003	0,11	0,42	0,11	1,3	0,02	-	0,03	0,1	Restante

Tabela 7 - Composição química do alumínio SB 209 *Alloy* 3003 requerida pela norma (% em peso).

Composições Químicas do SB 209 <i>Alloy</i> 3003 (% em peso)									
Alumínio	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA 3003 ¹	0,6	0,7	0,05-0,2	1,0-1,5	-	-	0,1	-	Rest.

(1) norma ASTM B 209-04

4.2 METAIS DE ADIÇÃO

O consumível utilizado foi o UTP A47(ER 1100) de bitola 4,0 mm. A composição química das varetas (ER, do inglês “*electrode rod*”) utilizada na soldagem TIG, e a respectiva especificação AWS estão na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química das varetas utilizadas na soldagem TIG.

Composições Químicas ER 1100 (% em peso)									
ER 1100	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
1100 ¹	d	d	0,05 - 0,20	0,05	-	-	0,10	-	99 (mín.)
1100 ²	0,095	0,235	0,001	0,011	-	-	-	-	Restante

(1) Composição química conforme a norma ASME II C – AWS 5.10 (2007).

(2) Composição química conforme Certificado *Bohler*.

(d) O somatório de Fe e Si não pode exceder 0,95%.

4.3 SOLDAGENS DOS CORPOS DE PROVAS

Para o desenvolvimento de um procedimento de soldagem adequado para minimizar a porosidade em soldas de AA 3303, há necessidade de, primeiramente, estudar cada condição de soldagem em separado, com a finalidade de determinar a influência dos parâmetros analisados (tipo de gás de proteção, temperatura de pré-aquecimento) em seu aspecto.

Análises químicas prévias às execuções das soldagens foram realizadas nos materiais de base e de adição (SB 209 *Alloy* 3003 e ER1100) independente das análises realizadas pelo fabricante, com o intuito de garantir a conformidade deste aspecto, assegurando também que apenas os parâmetros analisados influenciem nos resultados.

Para atingir o objetivo proposto, foi executado o ensaio não destrutivo por radiografia industrial nas soldas a fim de se analisar o aspecto da porosidade nas soldas em cada condição.

Para facilitar a análise das soldas obtidas nesses materiais optou-se pela seguinte metodologia. Primeiro foram definidos três condições de soldagem em função da temperatura de pré-aquecimento (temperatura ambiente, 150 °C e 300 °C) e do tipo de gás de proteção (argônio puro, Ar 75% - He 25% e Ar 25% e He 75%) onde todos os parâmetros de soldagem como, tensão, corrente, método de limpeza, técnica de deposição, posição de soldagem, quantidade de passe, vazão de gás foram mantidos os mesmo valores para as três condições, exceto a velocidade de soldagem, devido à dificuldade de manter-se constante num processo de soldagem TIG manual. Por sua vez este parâmetro foi desprezado para análise dos resultados deste trabalho.

As soldagens foram realizadas na posição plana (1G), através de uma fonte inversora tendo as seguintes características:

- Alimentação: monofásica e trifásica;
- Saída Nominal: 500 A – 40 V com fator de trabalho em 100%;
- Faixa de corrente: 5 – 700 A
- Tensão máxima em vazio: 75 V
- *Auto-line*: é um circuito interno da fonte de energia inversora que adapta automaticamente a unidade à tensão da rede elétrica entre 190 e 625 V mono ou trifásico, 50 ou 60 Hz.

As amostras utilizadas foram chapas de alumínio AA 3003, com espessuras 16 mm , comprimento de 150 mm e chapas apêndices de 50 mm ponteadas em ambos os lados , usinadas no seu sentido longitudinal, deixando o chanfro com as seguintes medidas:

- Espessura para depósito: 10 mm
- Ângulo do chanfro: 80°
- Abertura para 1º passe: 5 mm

O pré-aquecimento foi realizado por meio de maçarico tipo chuveiro e controlado (assim como a temperatura interpases) por pirômetro infravermelho. Foram tomados os cuidados de realizar a mesma quantidade de passes em todos os corpos de provas. A corrente de soldagem média utilizada foi 229 A, sendo que 250 A quando o eletrodo está negativo (EN) e 166 A no momento em que o eletrodo era positivo (EP), a tensão média foi de 22 V, a vazão de gás foi de 28 l/min com bocal

cerâmico nº 10 (14 mm de diâmetro) e difusor gás *leans* e a velocidade de soldagem variou entre 15 e 20 cm/min.

Foram empregados na soldagem o metal de adição ER 1100, diâmetro de 4,0 mm, marca comercial UTP A47 e corrida 912.501. O eletrodo de tungstênio usado foi o de W puro (ponta verde) com diâmetro de 4,0 mm e ponta arredondada. A Tabela 9 resume a identificação dos corpos de prova e suas condições de soldagem.

Tabela 9 – Identificação dos corpos de prova e suas condições de soldagem.

CP	Temperatura Pré-aquecimento	Gás de Proteção
CP1; CP2; CP3	ambiente	Ar 100%
CP4; CP5; CP6	ambiente	Ar 75% - He 25%
CP7; CP8; CP9	ambiente	Ar 25% - He 75%
CP10; CP11; CP12	150 °C	Ar 100%
CP13; CP14; CP15	150 °C	Ar 75% - He 25%
CP16; CP17; CP18	150 °C	Ar 25% - He 75%
CP19; CP20; CP21	300 °C	Ar 100%
CP22; CP23; CP24	300 °C	Ar 75% - He 25%
CP25; CP26; CP27	300 °C	Ar 25% - He 75%

Na Tabela 10 constam os valores estimados de energia, calculados mediante a seguinte equação e considerando para o processo TIG uma eficiência térmica $\eta = 0,6$:

$$E = \eta \cdot (I \cdot U) / v_s$$

onde: I é a corrente (A), U é a tensão (V) e v_s é a velocidade de soldagem (cm/min).

Tabela 10 - Parâmetros de soldagem para os três níveis de energia.

Condições de soldagem	Nível de energia de soldagem		
	1	2	3
Corrente (A)	229	229	229
Tensão (V)	22	22	22
Velocidade de soldagem (cm/min)	15	17	20
Energia (kJ/cm)	20	18	15

Várias das etapas da soldagem estão documentadas mediante fotografias na Figura 1, sendo em 1-a bancada utilizada para soldagem, em 1-b pré-aquecimento com maçarico de oxiacetileno, em 1-c soldagem do corpo de prova na posição plana, e em 1-d aspecto visual da junta soldada.

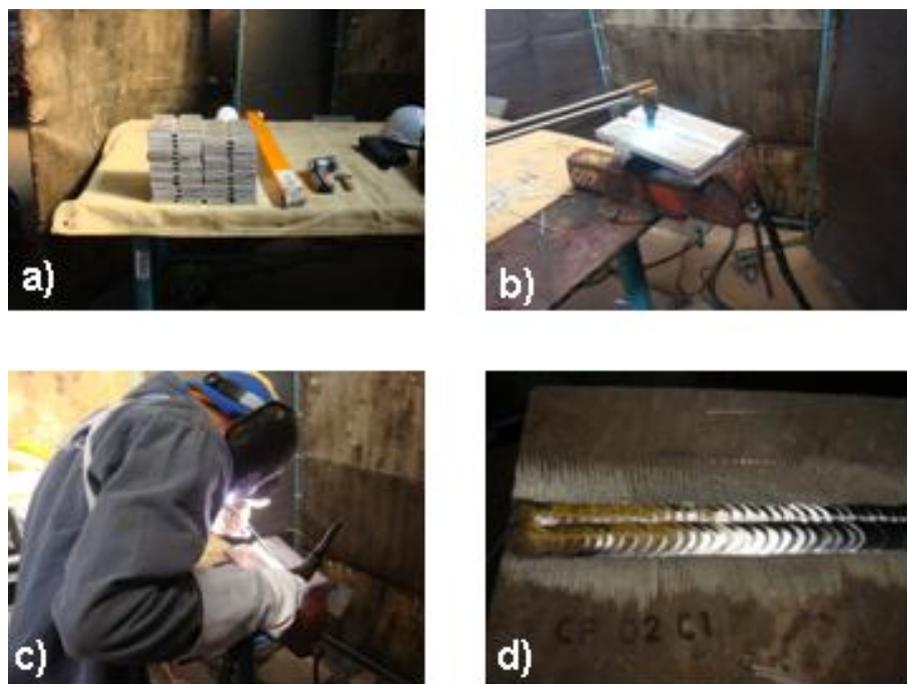


Figura 1 - Etapas de soldagem: (a) bancada para soldagem dos corpos de provas; (b) pré-aquecimento com maçarico de oxiacetileno; (c) soldagem do corpo de prova posição plana e (d) aspecto visual da junta soldada.

4.4 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Para avaliar a porosidade das soldas foi aplicado o ensaio de radiografia industrial. O aparelho utilizado foi de o raio-x com capacidade de 160 kV e 3,7 mA .O ensaio foi realizado com energia de 100 kV e 0,5 mA, através da técnica radiográfica “Parede Simples Vista Simples” (PS-VS). Os filmes após a sua revelação foram digitalizados, e posteriormente fornecidos em mídia com auxílio de um software para sua visualização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados do ensaio de radiografia realizado em juntas soldadas. Este ensaio teve como objetivo avaliar, por meio de imagens radiográficas das uniões soldadas, a influência exercida dos parâmetros de soldagem analisados (tipo de gás de proteção e temperatura de pré-aquecimento) sobre a porosidade.

5.1 ENSAIOS RADIOGRÁFICOS DAS JUNTAS SOLDADAS

O ensaio de radiografia foi aplicado em uniões soldadas de alumínio AA 3003 com o objetivo de observar por intermédio da imagem produzida pelo ensaio, o comportamento e o aspecto da porosidade em relação à quantidade, tamanho e agrupamento.

5.1.1 Ensaio de radiografia em juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio puro

A Figura 2 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondentes aos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento (à temperatura ambiente) e usando o argônio como gás de proteção (CP1, CP2 e CP3).

Conforme evidenciado na Figura 2, as juntas soldadas nestas condições apresentaram elevada concentração de poros agrupados com dimensões grandes no início da solda (destacados em branco) e quantidade pequena de poros dispersos com dimensões pequenas ao longo do cordão.

A porosidade apresentada na imagem radiográfica das soldas executadas na supracitada é devida ausência de pré-aquecimento associada ao gás de proteção de

potencial térmico baixo (argônio puro). Os poros grandes no início da união soldada foram ocasionados pela instabilidade do arco e pela alta velocidade de resfriamento (grande escoamento do calor aportado). A melhora ao longo do cordão se deve ao aumento significativo da temperatura das chapas, causado pelo tempo de arco aceso numa junta de dimensões restritas. Ao longo da união soldada também foram verificadas inclusões de óxido (destacados em vermelho), ocasionadas, possivelmente, pela limpeza catódica deficiente.

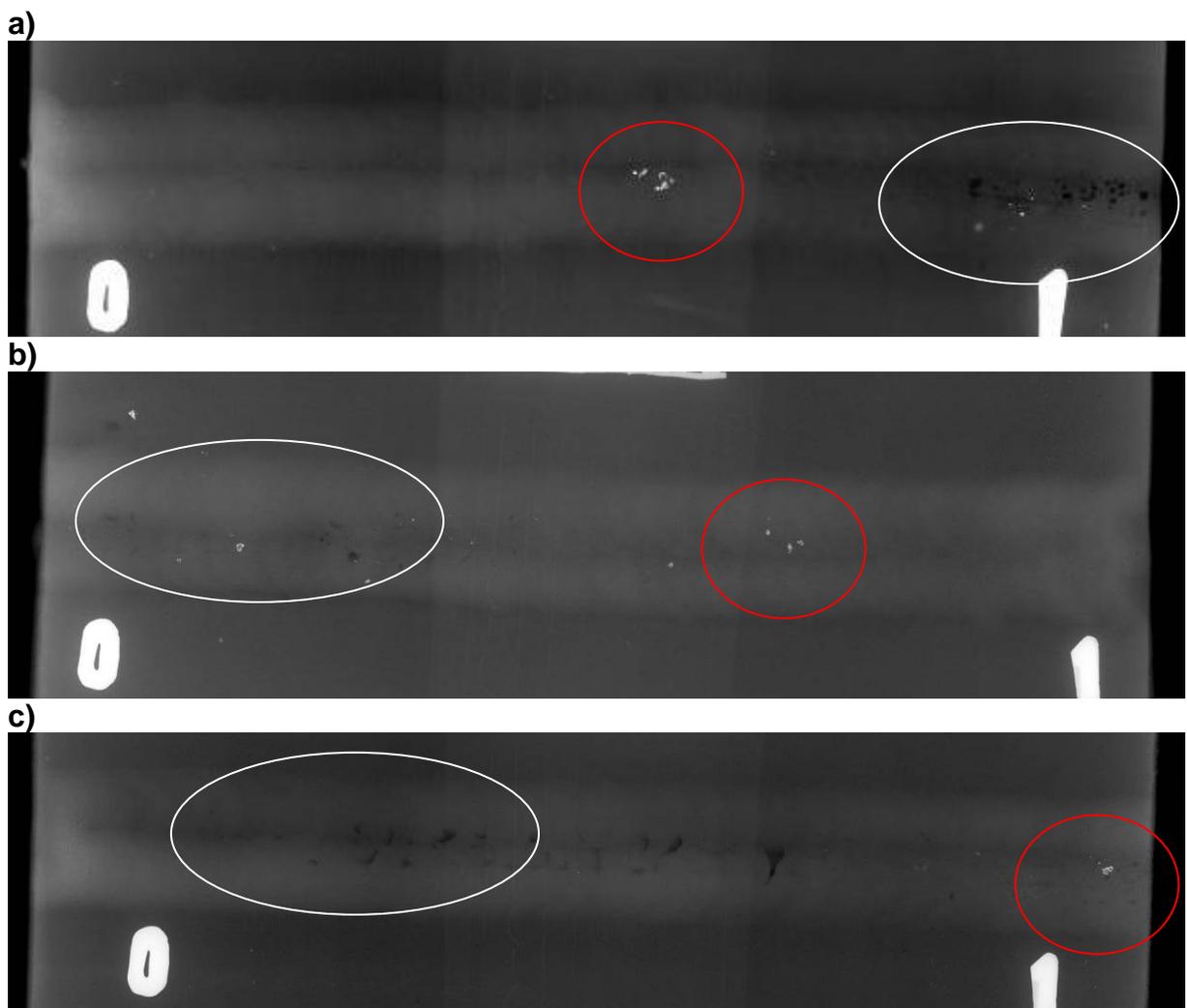


Figura 2 – Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio puro.

5.1.2 Ensaio de radiografia em juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio 75% Hélio 25%

A Figura 3 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondentes aos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento (à temperatura ambiente) e usando a mistura argônio-75%/Hélio-25% como gás de proteção. Foram ensaiados três corpos de provas nessa condição de soldagem (CP4, CP5 e CP6).

Conforme evidenciado na Figura 3, as uniões soldadas nessas condições apresentaram razoável concentração de poros agrupados com dimensões pequenas no início da solda e alguns poros dispersos com dimensões pequenas ao longo do cordão.

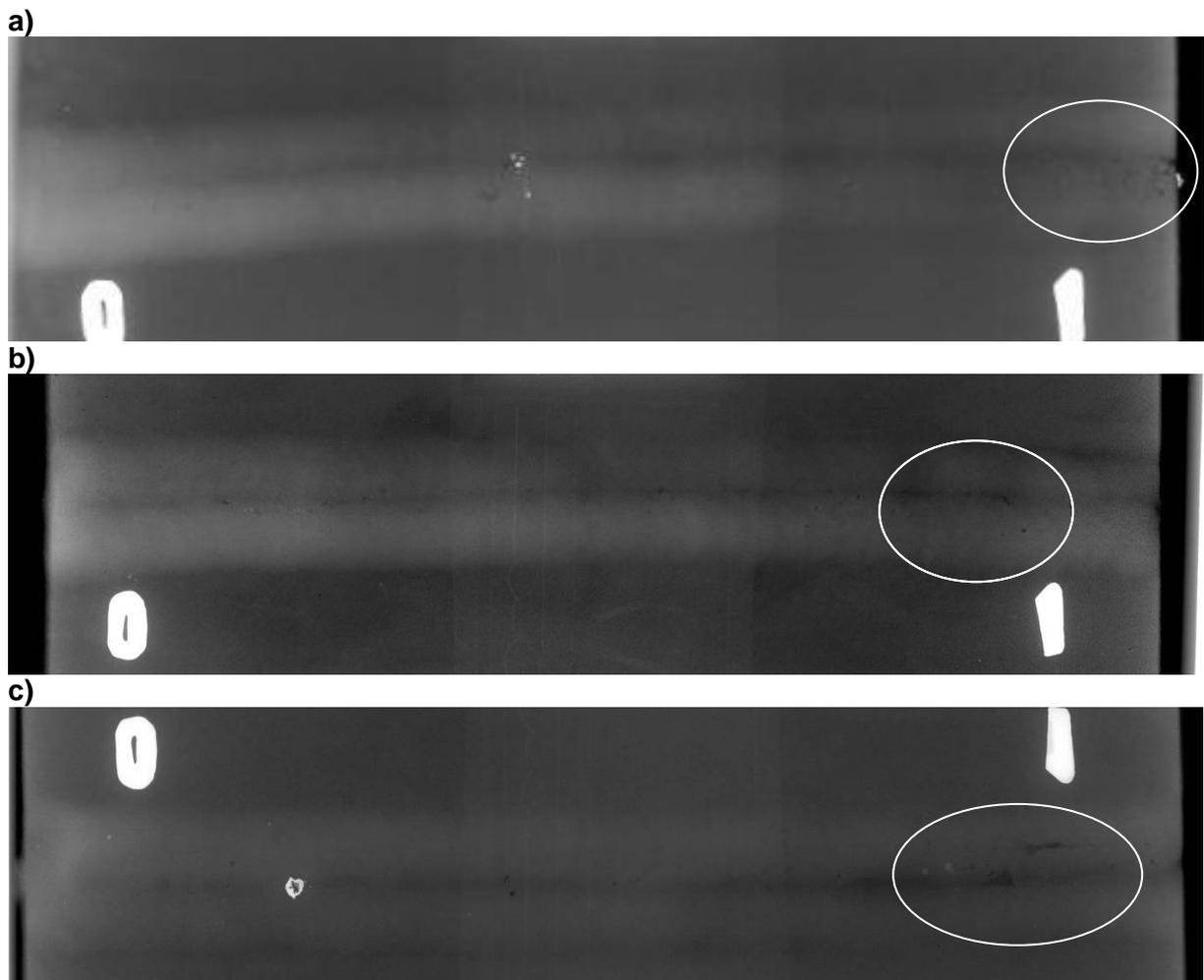


Figura 3 - Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio 75% Hélio 25%.

Os poros nos CP4, CP5 e CP6 (destacados em branco) apresentaram significativa redução em relação aos CP1, CP2 e CP3 em função, exclusivamente, do gás de proteção. A adição de 25% de hélio na composição da proteção gasosa promoveu um arco mais quente, o que minimizou a quantidade de porosidade, mesmo na ausência do pré-aquecimento.

5.1.3 Ensaio de radiografia em juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio 25% Hélio 75%

A Figura 4 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondentes aos corpos de prova soldados sem pré-aquecimento (à temperatura ambiente) e usando a mistura argônio-25%/Hélio-75% como gás de proteção. Foram ensaiados três corpos de provas nessa condição de soldagem (CP7, CP8 e CP9).

Conforme evidenciado na Figura 4, as juntas soldadas nessas condições apresentaram baixa concentração de poros agrupados (destacados em branco) com dimensões pequenas no início da solda e alguns poros dispersos com dimensões muito pequenas ao longo do cordão.

Dentre os corpos de provas soldados sem pré-aquecimento, os CP7, CP8 e CP9 apresentaram o nível de porosidade menor.

Como dito anteriormente, em relação aos corpos de provas citados acima, esse nível baixo de poros deve-se, exclusivamente, ao acréscimo no percentual de hélio no gás de proteção, deste modo, verificou-se que quanto maior adição de hélio à mistura gasosa com argônio, maior foi a energia do arco e menor a quantidade de poros.

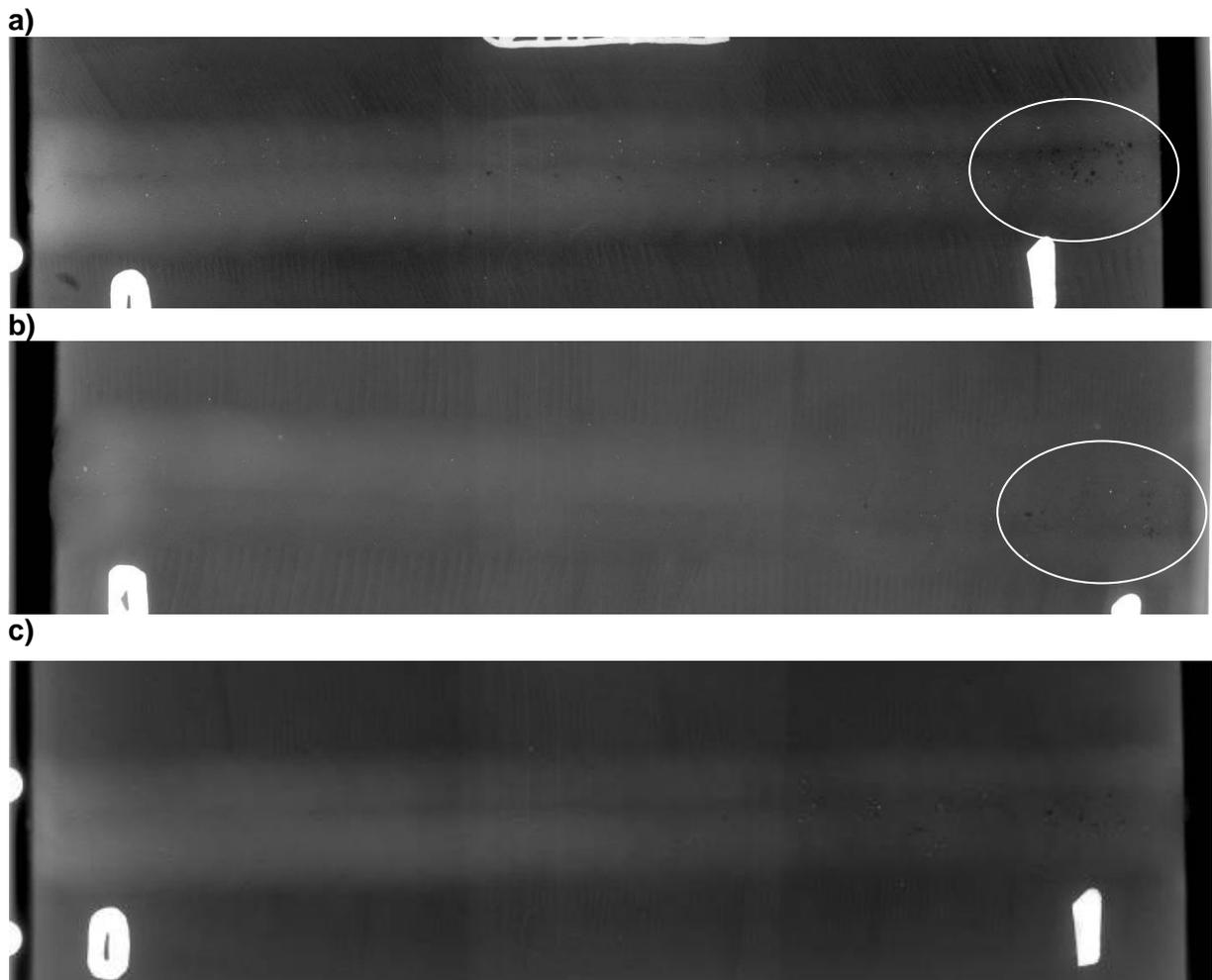


Figura 4 - Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição soldagem de temperatura ambiente e gás de proteção argônio 25% Hélio 75%.

5.1.4 Resultados do ensaio de radiografia em soldas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio puro

A Figura 5 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondentes aos corpos de prova soldados com pré-aquecimento de 150 °C e o argônio como gás de proteção.

Foram ensaiados três corpos de provas nessa condição de soldagem (CP10, CP11 e CP12). Conforme evidenciado na Figura 5, as juntas soldadas nessa condição supramencionada apresentaram pouca quantidade de poros dispersos com dimensões pequenas ao longo do cordão.

O nível de porosidade encontrado nas imagens radiográficas das uniões soldadas dos CP10, CP11 e CP12 é aceitável para o padrão exigido para as soldas de AA 3003 submetidas em serviço de transporte e armazenamento de ácido nítrico concentrado. O pré-aquecimento e alta capacidade de estabilização de arco do argônio promoveram a ausência de porosidade agrupada no início da solda (lado direito). Vale ressaltar que o tamanho reduzido do corpo de prova (se comparado ao de um tanque de armazenamento, por exemplo) minimiza o efeito do escoamento de calor, ou seja, em peça com dimensões maiores haveria necessidade de um incremento na temperatura de pré-aquecimento ou adição de hélio ao gás de proteção para compensar alta velocidade de resfriamento ocasionada pela condutividade térmica do alumínio.

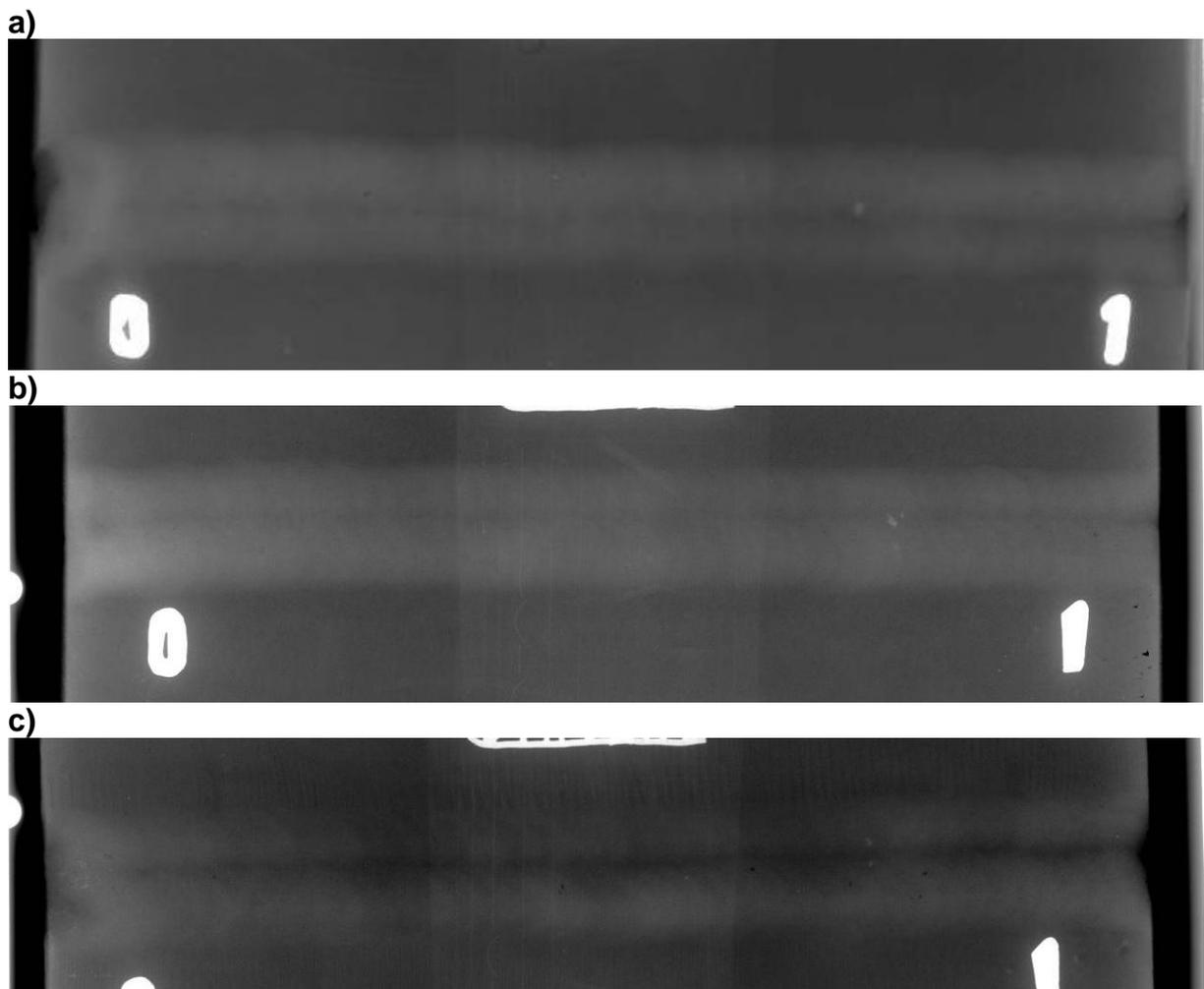
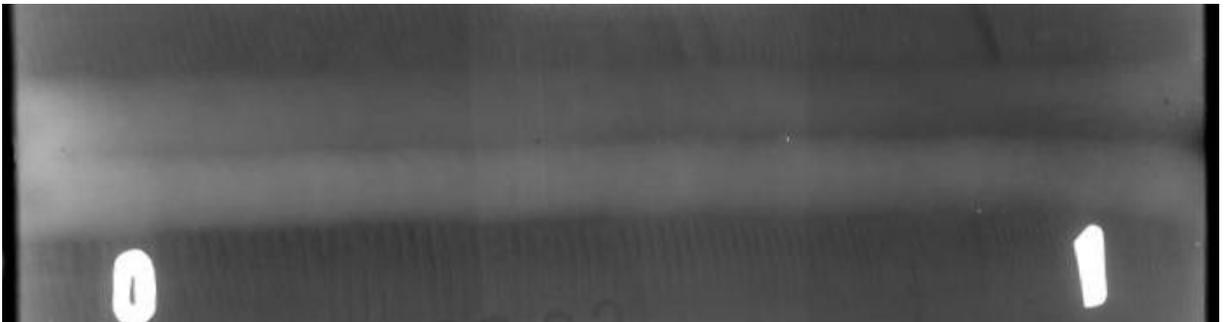


Figura 5 - Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio puro.

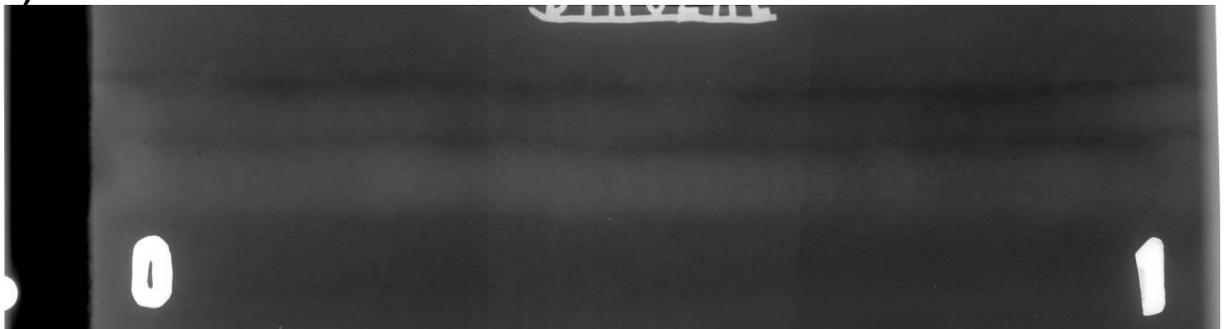
5.1.5 Resultados do ensaio de radiografia em soldas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio-75%/hélio-25%

A Figura 6 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondentes aos corpos de prova soldados com pré-aquecimento de 150 °C e a mistura gasosa contendo argônio-75%/hélio-25% como gás de proteção. Foram ensaiados três corpos de provas nessa condição de soldagem (CP13, CP14 e CP15).

a)



b)



c)

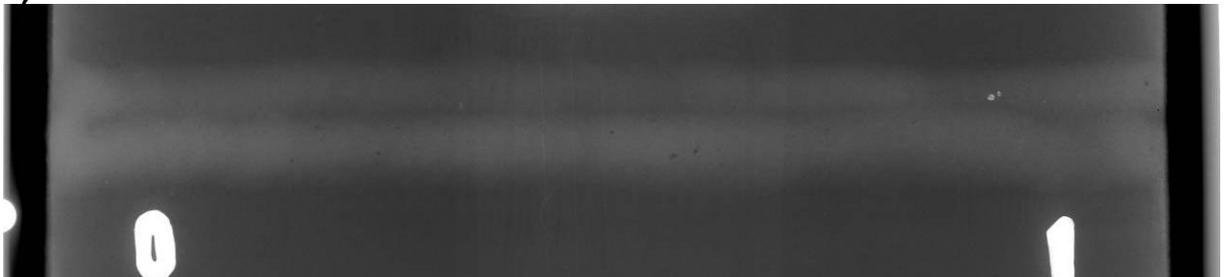


Figura 6 - Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio-75%/hélio-25%.

Conforme evidenciado na Figura 6, as uniões soldadas na condição supracitada apresentaram pequenos poros dispersos em quantidade inferior ao

encontrado na condição de soldagem de temperatura de 150°C e gás de proteção com argônio puro.

Em virtude da composição química do gás de proteção possuir hélio, os CP13, CP14 e CP15 apresentaram uma quantidade de poros menor quando comparado aos CP10, CP11 e CP12.

5.1.6 Resultados do ensaio de radiografia em soldas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio 25%/Hélio 75%

A Figura 7 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondentes aos corpos de prova soldados com pré-aquecimento de 150 °C e a mistura gasosa contendo argônio-25%/hélio-75% como gás de proteção. Foram ensaiados três corpos de provas nessa condição de soldagem (CP16, CP17 e CP18). Conforme evidenciado na Figura 7, as juntas soldadas nessas condições não apresentaram poros.

As uniões soldadas com a combinação da mistura gasosa de Ar-25%/He-75% como gás de proteção e do uso do pré-aquecimento com temperatura de 150 °C apresentaram os melhores resultados (menor grau de porosidade), logo, foi à condição que se mostrou mais adequada para soldagem da liga de alumínio-manganês (AA 3003), a qual é usada, por exemplo, em serviços de transporte e armazenamento de ácido nítrico concentrado.

Outro ponto favorável que esta condição de soldagem apresenta é o potencial térmico suficiente para compensar possíveis escoamentos de calor em peças maiores e mais espessas, como tanque de grande diâmetro e tubovias com trechos de tubulação longos sem afetar as propriedades e característica metalúrgica do material devido à temperatura baixa de exposição.

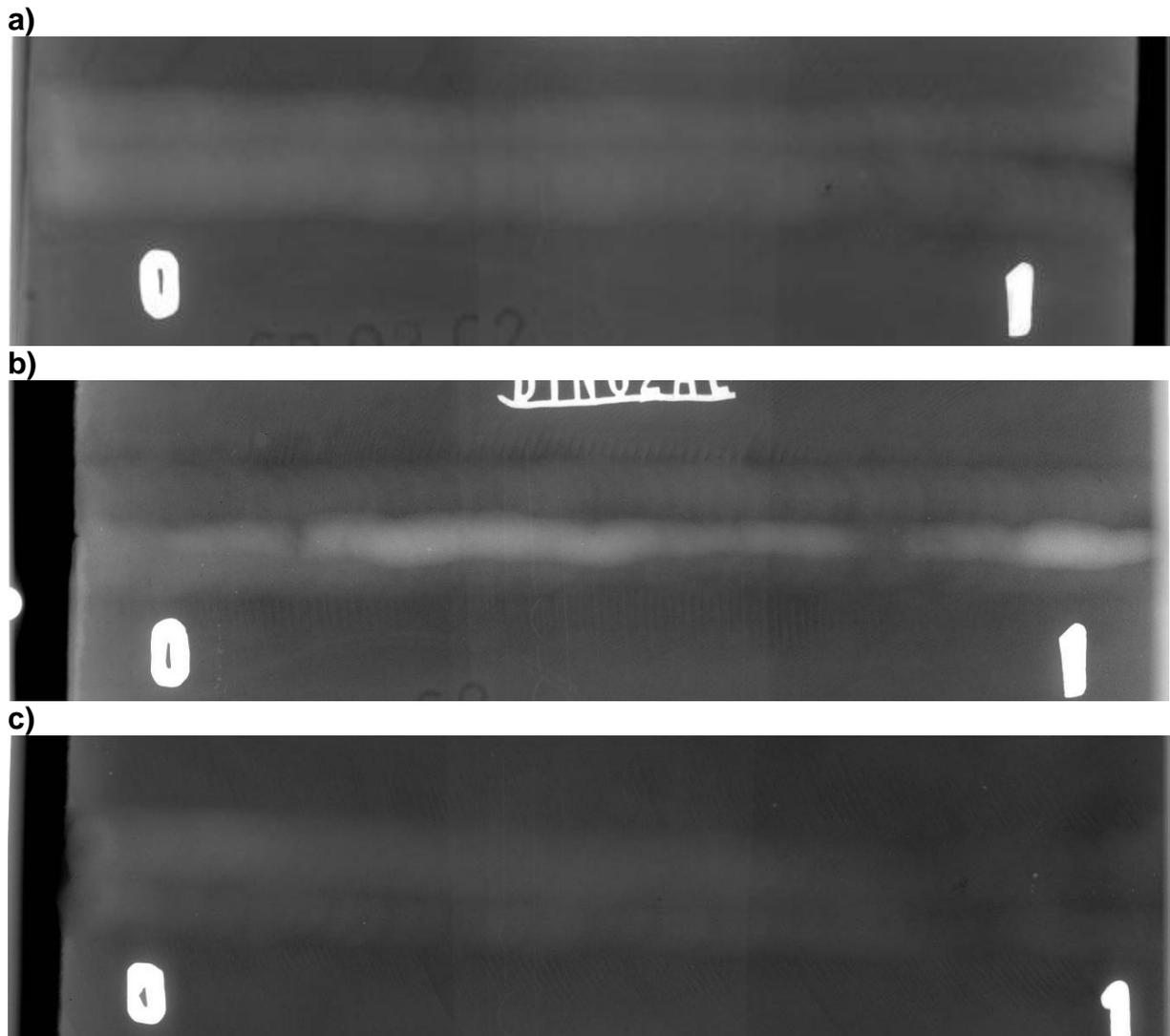


Figura 7 – Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 150 °C e gás de proteção argônio 25% Hélio 75%.

5.1.7 Resultados do ensaio de radiografia em soldas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio puro

A Figura 8 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondentes aos corpos de prova soldados com pré-aquecimento de 300 °C e argônio puro como gás de proteção.

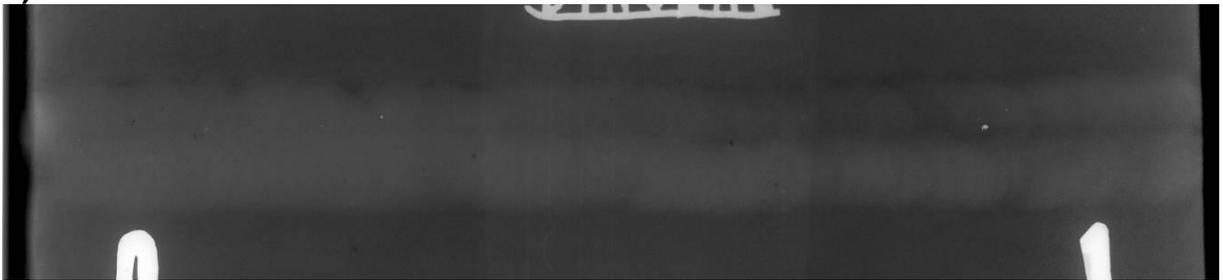
Foram ensaiados três corpos de provas nessa condição de soldagem (CP19, CP20 e CP21). Conforme evidenciado na Figura 8, as uniões soldadas nessas condições apresentaram alguns poros pequenos e isolados.

Apesar da boa qualidade da junta soldada (pouca porosidade) obtida nesta condição, é preciso destacar a possível influência da temperatura elevada de pré-aquecimento exercido (300 °C) sobre corpo de prova. Possivelmente, esta condição de soldagem pode provocar perdas nas propriedades e danos metalúrgicos às ligas alumínio, logo não é indicada para aplicação em serviços onde o meio o qual as soldas sejam expostas seja extremamente corrosivo, por exemplo, como meios de HNO₃ a 98%.

a)



b)



c)

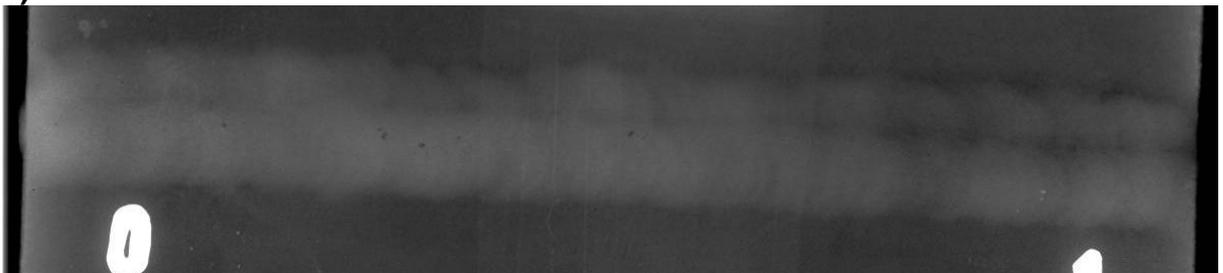


Figura 8 – Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio puro.

5.1.8 Resultados do ensaio de radiografia em soldas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio 75% Hélio 25%

A Figura 9 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondente aos corpos de prova soldados com pré-aquecimento de 300 °C e a mistura de argônio-75%/Hélio-25% como gás de proteção.

Foram ensaiados três corpos de provas nessa condição de soldagem (CP22, CP23 e CP24). Conforme evidenciado na Figura 9, as juntas soldadas nessas condições apresentaram poros pequenos e isolados.

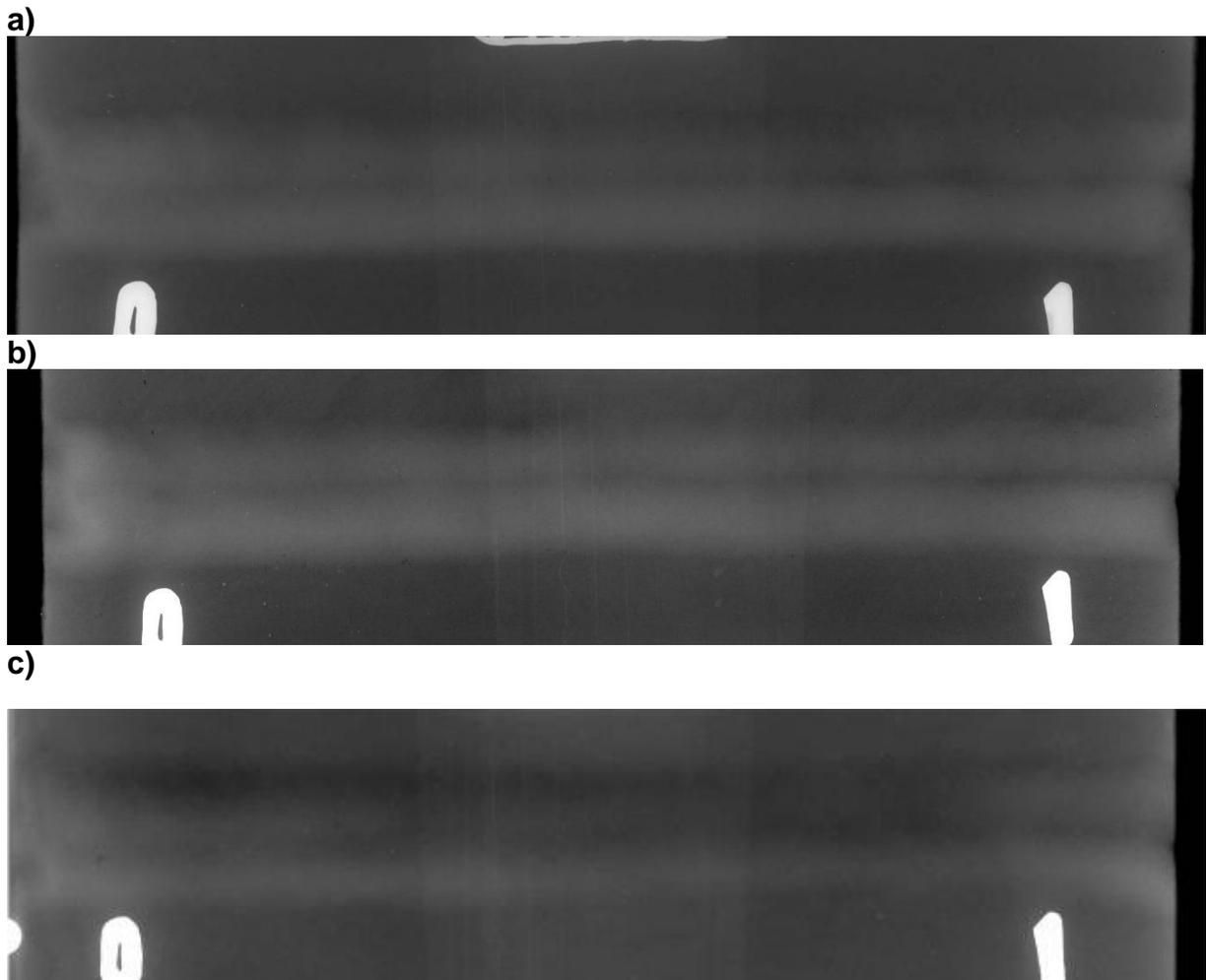


Figura 9 – Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio 75% Hélio 25%.

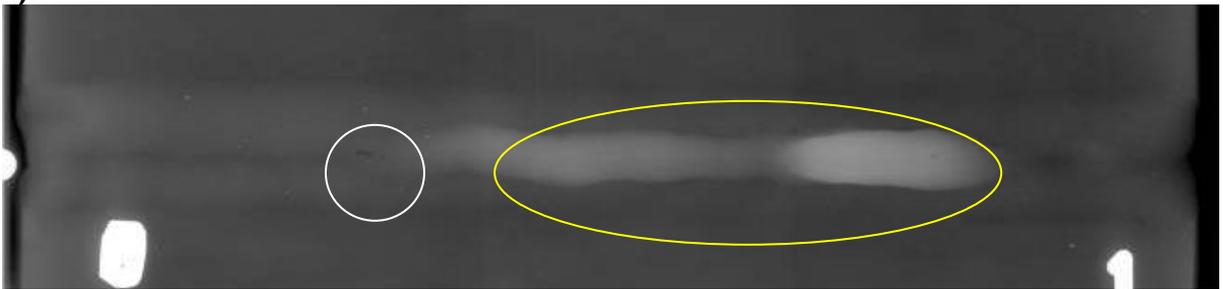
A porosidade nessa condição teve comportamento semelhante à condição do item 5.3.7, sendo que a quantidade de poros foi um pouco menor. Portanto, vale-se

da mesma ressalva da condição do item 5.3.7, quanto às restrições em sua utilização em serviços com severo ataque corrosivo.

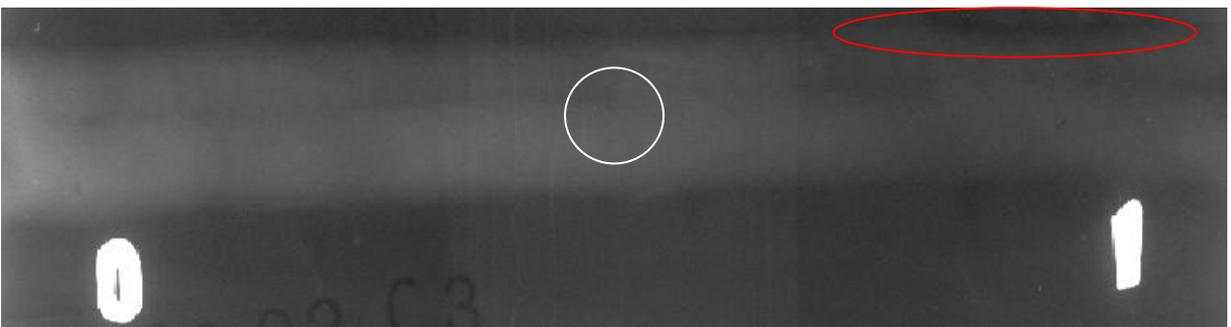
5.1.9 Resultados do ensaio de radiografia em soldas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio 25% Hélio 75%

A Figura 10 mostra as imagens radiográficas das juntas soldadas correspondentes aos corpos de prova soldados com pré-aquecimento de 300 °C e a mistura de argônio-25%/Hélio-75% como gás de proteção.

a)



b)



c)



Figura 10 – Imagens radiográficas das juntas soldadas na condição de soldagem de temperatura de 300 °C e gás de proteção argônio 25% Hélio 75%.

Foram ensaiados três corpos de provas nessa condição de soldagem (CP25, CP26 e CP27). Conforme evidenciado na Figura 10, as juntas soldadas nessas condições apresentaram alguns poros de tamanho médio e isolados (destacados em branco).

A porosidade nessa condição teve comportamento diferenciado, pois apresentou poros de tamanho médio e isolados. Estes poros são provenientes da turbulência na poça de fusão provocada pela alta energia do arco elétrico. Os cordões de solda apresentaram mordeduras (destacados em vermelho na imagem).

O efeito combinado do gás de proteção rico em hélio com temperatura de pré-aquecimento elevada acarretou numa considerável instabilidade do arco durante a soldagem. A penetração foi bastante alta (destacados em amarelo na imagem) Contudo, é essa condição é apenas indicada para serviços onde o processo pode ser automatizado, peças de espessuras muito altas e de baixa responsabilidade.

6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pelo ensaio radiográfico aplicado às juntas soldadas de AA 3003, podem ser extraídas as conclusões descritas abaixo:

6.1 INFLUÊNCIA DO PRÉ-AQUECIMENTO E DO GÁS DE PROTEÇÃO NA POROSIDADE DAS UNIÕES SOLDADAS DE ALUMÍNIO AA 3003

6.1.1 Condição de soldagem sem pré-aquecimento (temperatura ambiente)

Foi observado que com ausência de pré-aquecimento na soldagem dos corpos de provas de alumínio, o efeito do escoamento do calor é mais intenso e determinante para qualidade da solda, visto que a alta condutividade térmica do alumínio dificulta o aumento de temperatura localizada, ou seja, a estabilidade do arco fica prejudicada gerando poros no início do cordão de solda, após um tempo de arco aceso a peça (chapa pequena) aquece e o arco passa a ficar mais estável e a velocidade de resfriamento diminui, conseqüentemente, a porosidade ao longo da junta soldada é reduzida.

A porosidade foi menos intensa nos corpos de provas que utilizaram gases de proteção com hélio em sua composição química, o arco mais quente gerado pela presença desse elemento, atenuou o efeito do escoamento de calor e minimizou a ausência do pré-aquecimento. Observou-se também que os cordões de soldas apresentaram baixa qualidade, em função das emendas devido às diversas interrupções do arco elétrico.

6.1.2 Condição de soldagem com pré-aquecimento moderado (150 °C)

Notou-se que nesta condição de pré-aquecimento moderado (150 °C), a porosidade se apresentou em níveis bem pequenos. Com destaque dos corpos de provas soldados com mistura rica em hélio, que não apresentaram poros relevantes.

O efeito combinado do pré-aquecimento com o gás de proteção com alto potencial térmico, neutralizou o efeito do escoamento térmico, provocou velocidades de resfriamento mais lentas. Foi visto também que os cordões de soldas foram mais uniformes e livres de mordeduras apresentando aspecto brilhante.

6.1.3 Condição de soldagem com pré-aquecimento elevado (temperatura de 300 °C)

Evidenciou-se nessa condição de pré-aquecimento elevado, que durante a soldagem utilizando gás de proteção rico em hélio, a poça de fusão muito fluida e turbulenta dificultando seu controle e os cordões irregulares com penetração elevada.

Quanto à porosidade, independente do gás de proteção, todas as juntas soldadas apresentaram um nível aceitável, destacando as uniões soldadas utilizando gás de proteção rico em hélio que apresentaram alguns poros isolados de tamanho médio.

Devido à alta temperatura de pré-aquecimento imposta nesta condição, esses parâmetros não devem ser utilizados em serviços de alta responsabilidade.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de aprofundar os conhecimentos sobre a porosidade em soldagem de alumínio AA 3003, sugere-se:

- a) Executar ensaios mecânicos nas soldas para avaliar a influência da presença de poros na resistência mecânica da junta, e com base nos resultados, estabelecer critérios específicos de aceitação.
- b) Estudar influência da porosidade na resistência à corrosão de juntas soldadas de alumínio AA 3003 em meios de ácido nítrico concentrado a 98%, realizando ensaios de corrosão acelerada.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Guia técnico do Alumínio: Fundamentos e Aplicações do Alumínio**, São Paulo,

ALCAN. **Manual de Soldagem**. Alcan Alumínio do Brasil S/A, 1ª Edição, São Paulo, 2001.

ALTSHULLER, B. A Guide to GMA Welding of Aluminum. **Welding Journal**, Vol. 77, nº 6, p. 49-55, 1998.

ASM, Metals Handbook. **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. Ohio: Metals Park, 1990.

ASM, Metals Handbook. **Corrosion Vol. 13A**. Ohio: Metals Park, 2003. 2597 p.

ASTM B209M. **Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate**. 2001.

AWS Welding Handbook Vol. 3. **Materials and Applications – Part 1**. USA, 1982.

BARRA, S. R.; OLIVEIRA, T. P.; ALMEIDA, A. R.; TELLES, A. C. Efeito da Geometria do Chanfro e da Composição Química do Metal de Adição sobre a Resistência à Corrosão na União da Liga AA 3003, Imersa em HNO₃. In: **anais V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Salvador, 2008.

BARRA, S. R.; BUSCHINELLI, A. J. **Aspectos da Metalurgia da Soldagem do Alumínio e Suas Ligas**. Estudo Dirigido do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, Florianópolis, 2003.

BARRA, S. R.; OLIVEIRA, T. P.; PEREIRA, A. J. Metodologia Experimental para Medição do Perfil de Corrosão em Juntas Soldadas da Liga Al-Mn (AA 3003) imersas em HNO₃. In: **anais 59º Congresso da SBPC**, Belém, 2007.

DOVBISHCHENKO, I. V. et al. The effect of iron and silicon on the corrosion resistance of welded joints in commercial aluminum in nitric acid. **Avt. Svarka**, Nº 3, p. 44-47, 1979.

GIMENES, L.; TREMONTI, M. A. **Influência dos Parâmetros de Soldagem, no Formato da Poça de Fusão, com Relação à Formação da Macro e Microestrutura**. Disciplina de Tecnologia da Soldagem do Curso de Pós-Graduação do Departamento de Fabricação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, 1994.

KAUFMAN, J. G.; ROOY, E. L. **Aluminum Alloy Castings: Properties, Process and Applications**. USA: ASM international, 2004. 340 p.

KISSEL, R. J.; FERRY, R. L. **Aluminum Structures: A guide to their specifications and design**. New York: John Wiley & Sons, 2002.

KOU, S. **Welding metallurgy**. USA: John Wiley & Sons, 2002.

LYTTLE, K. A., STAPON, W. F. G. Select The Best Shielding Gas Blend For The Application. **Welding Journal**, p. 21-27, 1990.

MATHERS, G. **Welding of Aluminum and Its Alloys**. England: Abington Publishing, 2002. 236 p.

SAUNDERS, H. L. **Welding Aluminum: Theory and Practice**. Capítulo 1-9, 1º Edição, The Aluminum Association, 1989.

SCHWEITZER, P. A. **Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties V. 1**. New York: Marcel Dekker Inc., 2003. 702 p.

TOTTEN, G. E.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes V. 7**. New York: Marcel Dekker Inc., 2003. 1310 p.

TOTTEN, G. E.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Process**. New York: Marcel Dekker, 2003. V. 1.

VARGEL, C.; JAQUES, M.; SCHIMID, M. P. Corrosion of Aluminum. **Elsevier Science**, 626p. , 2004.

WAINER, E.; BRANDI, S. D. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo, 1992.