

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
MESTRADO PROFISSIONAL EM PROJETOS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Carlos Gustavo De Marco

CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DE UMA JUNTA SOLDADA
EM LIGA DE ALUMÍNIO AA5083

Passo Fundo

2014

Carlos Gustavo De Marco

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DE UMA JUNTA SOLDADA EM LIGA
DE ALUMÍNIO AA5083**

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2014

Carlos Gustavo De Marco

**CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES DE UMA JUNTA SOLDADA
EM LIGA DE ALUMÍNIO AA 5083**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: Dia mês de 20--.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Orientador

Prof. Dr. Paulo Henrique Sanchez Cardoso

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI

Prof. Dr. Luiz Airton Consalter

Universidade de Passo Fundo - UPF

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu filho, Carlos Eduardo, pelos dias de ausência. A ajuda e a compreensão de todos foi muito importante para a realização pessoal e profissional. Obrigado por fazerem parte da minha vida e ajudar a realização de um sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me concedido saúde e persistência para a elaboração deste trabalho. Minha gratidão a todos aqueles que contribuíram, direta e indiretamente, para a conclusão deste trabalho:

Ao meu orientador, Professor Dr. Charles Leonardo Israel, pela oportunidade em participar da primeira turma do Mestrado, pelos conhecimentos transmitidos e por suas contribuições na escrita e montagem deste trabalho, bem como pelos artigos publicados no decorrer da montagem do mesmo;

Ao Eng. Luiz Eduardo da Silva, funcionário do laboratório de materiais e processos da UPF, pela ajuda e tempo dedicado em ajudar no desenvolvimento dos ensaios;

Ao Sr. Celso Bevilacqua, Gerente de Serviços da TRIEL-HT S.A., pela ajuda na aquisição do material para a confecção dos corpos de prova;

Ao Eng. Sydnei Paloski, Gerente de Negócios da Empresa White Martins, pelo fornecimento dos gases de proteção utilizados na soldagem dos corpos de prova;

Ao Eng. Willian Haupt, Professor da UPF, pela ajuda para a obtenção dos artigos e normas utilizados para o enriquecimento deste trabalho;

Aos Laboratoristas do Núcleo de Tecnologia Mecânica da UPF, Sr. Emerson Ribeiro e Sr. Kauê, pela ajuda na soldagem e nos ensaios dos corpos de prova;

Aos Laboratoristas do Núcleo de Materiais e Processo da URI Erechim, Sr. André Sachet e Sr. Stefano, pela ajuda nos ensaios dos corpos de prova;

Aos Laboratoristas Carlos Edmundo e Srta Jaqueline Fernanda Lando do Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul, UPF / Soledade – RS pela ajuda nas análises das amostras por meio do Microtomografo de Raio-X.

“Seja você quem for, seja qual for a sua posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta, muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muita fé em Deus, que um dia você chega lá, de alguma forma você chega lá”.

Airton Senna

RESUMO

A globalização e o avanço tecnológico crescente têm obrigado cada vez mais as indústrias a buscarem redução nos custos e aumento na competitividade, produtividade e qualidade do produto. A busca por materiais que possuam ótima resistência mecânica e baixo peso é um requisito obrigatório nesse cenário. O alumínio e suas ligas aparecem como ótimas alternativas para satisfazer tais exigências. Desta forma, este trabalho realiza avaliação de uma junta soldada da liga AA5083-O por meio do processo MIG (metal inert gas) Pulsado Automatizado. A soldagem do alumínio, citada por Mathers (2002) como dificultosa, é assim considerada pela grande formação de porosidade no cordão de solda. Os corpos de prova foram fabricados, soldados e analisados nos laboratórios de soldagem da UPF. O material utilizado consistiu em chapas de alumínio 5083-O, com espessura de 6 mm, 250 mm de comprimento e 120 mm de largura, cortadas no sentido de laminação da chapa. A soldagem foi realizada em uma célula robotizada, com um robô da marca OTC SUMIG, com fonte de soldagem OTC Digital Inverter DP 400 e com auxílio de um dispositivo de fixação, ainda foram utilizados *backing* cerâmico para o aporte do metal líquido na raiz do cordão de solda. Os parâmetros de velocidade de soldagem, amperagem, voltagem e vazão de gás foram mantidos em todas as condições avaliadas, tendo a temperatura de pré-aquecimento e gás de proteção como condições alteradas. Os gases de proteção utilizados foram argônio 100% e uma mistura de argônio 75% e hélio 25%. Os corpos de prova das condições “B” e “D” foram submetidos a pré-aquecimento de 120°C, antecedendo cada execução de solda os corpos das condições “A” e “C” foram soldados sem pré-aquecimento. A análise e quantificação da porosidade foi realizada com auxílio de um microtomógrafo de raio-X. Os resultados dos ensaios para a redução da porosidade foram satisfatórios pois, a quantidade de poros foi menor com a utilização da mistura de argônio e hélio porém com a utilização do pré-aquecimento a quantidade de poros não foi alterada. A resistência mecânica das juntas foi prejudicada pelo material de adição possuir resistência mecânica menor que o metal de base.

Palavras-chave: Ligas de alumínio AA5083-O; Processos de soldagem; Porosidade.

ABSTRACT

Increasing globalization and technological developments have progressively demanded companies to seek cost reductions and higher competitiveness, productivity, and quality in products manufactured and marketed. The search for materials with high mechanical resistance and low weight is a mandatory requirement in this setting, and it is no different in metallurgy. Aluminum and its alloys come as great alternatives to meet those demands. Choosing a type of material that will adapt and meet the requirements imposed by aluminum-made equipment, most often occurs without a detailed study on property and process conditions. Welding is one of the most important manufacturing processes in the industry. Thus, an assessment is made of a welded joint of the alloy 5083-o, through the Automated Pulsed MIG (Metal Inert Gas) process. The aluminum welding, mentioned by Mathers, (2002) as difficult, is due to the formation of porosity in the weld bead. This work presents a study on the use of preheating to reduce porosity. The test specimens were manufactured, welded, and analyzed in welding laboratories at the University Foundation of Passo Fundo (UPF), RS, Brazil. The material used were aluminum sheets 5083-O with thickness of 6 mm, length of 250 mm, and width of 120 mm. Welding was performed in a robotic cell with an OTC – SUMIG robot with OTC Digital Inverter DP 400 welding source, a device was used to attach the test specimens, and welding was performed by Ceramic Backing. Parameters of welding speed, amperage, voltage, and gas flow were kept at a fixed rate for all welds. On the other hand, preheating temperature and shielding gas were varied. The shielding gases used were 100% argon, and a mix of 75% argon and 25% helium. Test specimens were submitted to preheating at 120 °C, preceding each welding. The main objective of this work is to use the techniques mentioned for reducing porosity in the weld bead of specimens analyzed. The reduction of the porosity will be a parameter to increase the strength of welded joints. The porosity analysis was performed using an X-ray microtomógrafo. The test results for the reduction in porosity were satisfactory because the amount of pores was lower with use of argon and helium mixture but since the use of the preheating can not be said that it was beneficial to use the results. The mechanical strength of the joints was affected by adding material having less strength than the base metal

Keywords: Aluminum Alloys. Welding processes. Mechanical Strength. Porosity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido para dois valores de pressão parcial de hidrogênio ...	20
Figura 2 - Efeito da recristalização e superaquecimento na microestrutura e dureza na ZTA e MB encruados sem transformação alotrópica.	21
Figura 3 - Representação do Processo GMAW / MIG convencional.....	23
Figura 4 - Transferência do metal líquido a) transferência globular b) transferência por spray.....	25
Figura 5 - Relação entre Tensão x Corrente para a soldagem do alumínio e para aços ao carbono.....	25
Figura 6 - Relação dos valores de velocidade de arame x corrente de soldagem (A) e diâmetro do arame de adição.....	26
Figura 7 - Posições de soldagem utilizadas no processo MIG alumínio.....	27
Figura 8 - Comportamento do arco MIG do alumínio (Material: ER 5183 com 1,6 mm de diâmetro, gás Argônio) Curvas de isoconsumo.....	30
Figura 9 - Diferentes resultados da utilização do argônio e do hélio na soldagem de alumínio.....	36
Figura 10 - Porosidades no interior do cordão de solda.....	38
Figura 11 - Microtomógrafo de Raio-X de bancada.....	41
Figura 12 - Principais componentes de um Microtomógrafo de Raios-X.....	42
Figura 13 - <i>Backing</i> cerâmico selecionado.....	43
Figura 14 - Secção transversal do corpo de prova (medidas são em milímetros).....	45
Figura 15 - Distribuição dos corpos de prova na chapa soldada.....	47
Figura 16 - Chapa soldada pelo processo MIG automatizado.....	47
Figura 17 - Posicionamento da tocha de soldagem em relação a chapa de alumínio.....	49
Figura 18 - Dispositivo para auxiliar a fixação das chapas para a soldagem.....	50
Figura 19 - Estufa para pré-aquecimento, Figura (a) Vista interna da estufa Figura (b) o controle de temperatura.....	51
Figura 20 - Análise de uma amostra soldada por meio do Microtomógrafo de Raio-X.....	53
Figura 21 - Corpos de prova para o ensaio de porosidade a) corpo de prova mostrando a face do cordão b) Vista mostrando a numeração da sequência do ensaio e da retirada do corpo de prova do cordão.....	54
Figura 22 - Imagem do corpo de prova analisado pelo Microtomógrafo de Raio-X.....	54
Figura 23 - Imagens geradas pelo Microtomógrafo de Raio-X. a) Vista frontal da lateral da amostra. b) Vista da secção transversal do cordão de solda da amostra. c) Vista frontal da lateral posterior da amostra.....	55
Figura 24 - Corpos de prova aprovados no ensaio de tração a) corpo de prova 02 e b) corpo de prova 05.....	60
Figura 25 - Corpos de prova reprovados no ensaio de tração, a) Fratura na região entre a ZAC e o material de adição b) Face fraturada mostrando poros e inclusões.....	61
Figura 26 - Fratura originada na interface do metal de base e a ZAC.....	61
Figura 27 - Ensaio de dobramento a) face b) raiz.....	63
Figura 28 - Detalhe da abertura de trinca nos corpos de prova, a) Trinca com 4 mm na dobra de face b) Trinca com 20 mm na dobra de raiz.....	63
Figura 29 - Área do metal de adição (solda).....	64
Figura 30 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição A.....	66
Figura 31 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição A.....	66
Figura 32 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição B.....	67
Figura 33 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição B.....	68
Figura 34 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição C.....	69
Figura 35 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição C.....	69
Figura 36 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição D.....	71
Figura 37 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição D.....	71
Figura 38 - Vista de perfil de uma amostra da condição D.....	72
Figura 39 - Pontos de medição das durezas das amostras.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das ligas de alumínio.....	17
Tabela 2 - Composição química da chapa de alumínio AA 5083-O	44
Tabela 3 - Composição química nominal da liga 5183	46
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do metal base e do metal de adição utilizados.	46
Tabela 5 - Condições de soldagem dos corpos de prova.	48
Tabela 6 - Parâmetros para a soldagem MIG para o passe de raiz e segundo passe.....	49
Tabela 7 - Potencial de ionização e condutividade térmica dos gases argônio e hélio.....	52
Tabela 8 - Valores de porosidades para cada condição.	65
Tabela 9 - Microdurezas das condições A, B, C e D.....	74
Tabela 10 - Durezas das condições	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Aluminium Association

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

GMAW – gas metal arc welding

ISO – International Organization for Standardization

MAG - metal active gas

MIG – metal inert gas

TIG (Tungsten arc welding).

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Identificação do Problema	15
1.2 Objetivo geral.....	15
1.3 Objetivos específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Ligas de alumínio	16
2.1.1 Classificação das ligas de alumínio	17
2.2 Aspectos metalúrgicos	20
2.3 Soldagem a Arco Elétrico	21
2.3.1 Aspectos da Soldagem por Fusão GMAW / MIG	22
2.3.2 Processo de transferência metálicas no Processo GMAW	23
2.4 Processo MIG Pulsado.....	26
2.5 Técnicas de Soldagem do Processo GMAW / MIG.....	27
2.6 Soldagem MIG do alumínio	28
2.6.1 Soldabilidade do Alumínio	30
2.6.2 Dificuldades da soldagem do alumínio	32
2.7 Variáveis na soldagem do Alumínio 5XXX	33
2.8 Metal de adição para a soldagem do alumínio 5XXX	34
2.9 Gases de proteção para a soldagem do alumínio	35
2.10 Temperatura de pré-aquecimento.....	36
2.11 Porosidade	36
2.11.1 Causas da porosidade.....	37
2.11.2 Fontes de hidrogênio.....	38
2.11.3 Redução da porosidade	39
2.12 Microtomógrafo de Raio-X	40
2.12.1 Componentes básicos do equipamento	41
2.13 Backings Cerâmicos	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 Material base	44
3.2 Material de adição.....	45
3.3 Soldagem dos Corpos de Prova	46
3.3.1 Parâmetros de Soldagem.....	48
3.4 Dispositivo de fixação das chapas para soldagem.....	49
3.5 Pré-aquecimento	50
3.6 Gás de proteção	52

3.7	Quantificação da porosidade	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	Ensaio Mecânicos	57
4.1.1	Ensaio de tração	57
4.1.2	Ensaio de Dobramento	62
4.1.3	Quantificação da porosidade por Microtomógrafo de Raio-X	63
4.1.4	Quantificação da porosidade das condições A, B, C e D.....	64
4.1.5	Ensaio de dureza	73
5	CONCLUSÃO	77
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	80

1 INTRODUÇÃO

A utilização do alumínio e suas ligas tem experimentado um crescimento nos diversos setores da indústria de manufatura, devido às características apresentadas por este metal. O baixo peso específico, aliado à alta resistência mecânica de algumas ligas, faz com que o alumínio seja uma das primeiras escolhas em termos de material para atender às exigências de determinadas aplicações. Outra questão que merece destaque é a da reciclagem deste metal. Cerca de 90% do alumínio presente em veículos é recuperado e reciclado, com enormes vantagens ambientais e econômicas (CAPELARI; MAZZAFERRO, 2009).

O alumínio é um metal que se destaca pelo conjunto de suas propriedades, pois, além de seu apelo estético singular a adição de elementos de liga, que permite o desenvolvimento de outras propriedades interessantes, como aumento da resistência mecânica, que amplia ainda mais seu espectro de aplicação nas indústrias (COPPERMETAL, 2012).

Quando se associa a crescente demanda por produtos de maior qualidade e durabilidade aos requisitos de redução de consumo e preservação do meio ambiente, o alumínio e suas ligas aparecem como alternativas bastante atrativas. O uso desses materiais, principalmente em substituição ao aço e ao ferro fundido, permite a redução do peso de componentes e equipamentos, a redução das perdas por corrosão e o aumento do potencial de reciclagem (COPPERMETAL, 2012).

Nesse contexto, as empresas procuram melhorar e aperfeiçoar seus produtos com o objetivo de aumento de desempenho, sendo que, hoje, a principal meta das indústrias é a redução do peso de seus equipamentos, a facilidade de fabricação (ALCAN, 1993). Assim, a substituição do aço por ligas de alumínio está cada vez mais frequentes na indústria metal mecânica. Porém, a escolha de uma liga que se adapte às condições de trabalho é feita, muitas vezes, sem um estudo mais aprofundado de suas propriedades e condições de processo, levando-se em consideração, como definidor de sua escolha, o custo do material. Suas ligas possuem forte utilização na indústria automotiva, naval e aeronáutica (MATHERS, 2002). A liga de alumínio AA 5083 é a mais resistente entre as ligas trabalháveis e não tratáveis termicamente. Tem alta ductilidade e boa soldabilidade (ALCAN, 1993).

Os processos de soldagem surgem como um ponto crítico na manufatura do alumínio, uma vez que as propriedades de algumas ligas deste metal acabam por se degradar quando submetido à soldagem por processos convencionais, onde a fusão do metal base ocorre (CAPELARI; MAZZAFERRO, 2009).

O uso do processo MIG (*metal inert gas*) em ligas de Alumínio 5083, com a utilização do argônio como gás de proteção, propicia boa soldabilidade, boas características mecânicas e estabilidade do arco elétrico. É desejada a utilização do hélio quando se necessita um maior aporte térmico, penetração mais larga e mais rasa, se comparada ao argônio. O hélio promove, também, maior fluidez da poça de fusão, reduzindo a porosidade. Em ligas de alumínio é recomendada uma porcentagem de aproximadamente 75% de argônio e 25% de hélio para um bom aproveitamento de suas propriedades (CARDOSO et al., 2014).

A soldagem do alumínio, bem como de suas ligas, apresenta algumas particularidades em relação à soldagem dos aços, entretanto é uma prática consideravelmente dominada. A principal dificuldade é o controle da porosidade no cordão de solda, que provoca redução das propriedades mecânicas da junta (SALVI, 2014).

A porosidade é caracterizada pelo aprisionamento de bolhas de gás no cordão de solda. Essas bolhas podem se apresentar com os mais diversos tamanhos, desde uma microporosidade até poros de alguns milímetros de diâmetro. Os poros podem se distribuir pela superfície de maneira uniforme, mas não alinhados, agrupados, alinhados e alongados-vermiformes (MODENESI, 2001).

A quantidade de poros presentes no cordão de solda, por si só, não exibe grande influência nas porosidades da junta. A alteração nas características se dá, principalmente, pelo modo como a porosidade está distribuída. Poros pequenos e uniformemente distribuídos influenciam pouco ou quase nada na resistência da junta (ALCAN, 1993).

A principal causa da porosidade em soldas de alumínio é o hidrogênio (H), devido à alta solubilidade no alumínio em altas temperaturas e baixa solubilidade em baixas temperaturas. Salvi (2014) apresenta a variação da solubilidade do hidrogênio em ligas de alumínio em função da temperatura, conforme Figura 2 – Solubilidade do Hidrogênio no Alumínio.

A soldagem realizada na indústria é, geralmente, realizada aplicando-se um ou mais cordões de solda, sendo que o soldador aplica um passe na junta e, em seguida, faz a goivagem para a retirada de qualquer imperfeição do cordão realizado, para, posteriormente, realizar o passe seguinte. Além das contaminações, que podem gerar defeitos nas etapas seguintes de solda, como, por exemplo, os poros, isso requer maior tempo de produção e domínio do processo pelo soldador.

Como manualmente o soldador não consegue realizar as soldas mantendo o ângulo da tocha de soldagem, a distância da tocha à peça e a velocidade de soldagem, estas variáveis podem ocasionar a formação da porosidade em níveis maiores do que se fossem mantidas durante todo o processo.

1.1 Identificação do Problema

O presente trabalho apresenta a caracterização de uma junta soldada em alumínio 5083-O com o metal de adição ER 5183 pelo processo MIG pulsado, soldado por um robô, usando parâmetros e condições de soldagem adequados com vistas na redução da porosidade.

1.2 Objetivo geral

Caracterizar juntas soldadas em alumínio AA5083 quanto à redução da porosidade através da aplicação de técnicas e parâmetros pertinentes ao processo de soldagem.

1.3 Objetivos específicos

- a) Avaliar a influência do pré-aquecimento na redução da porosidade;
- b) Avaliar a influência do gás de proteção Argônio e da mistura de Argônio com Hélio (25%) na porosidade da solda;
- c) Quantificar a porosidade nas amostras soldadas com a utilização de Microtomógrafo de Raios-X;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A liga de alumínio AA 5083 é comumente usada na fabricação de vasos criogênicos, embarcações, veículos blindados, aeronaves e equipamentos que tenham contato com materiais oxidantes. Esta liga é considerada uma das melhores para ser soldada, porém a soldagem MIG de ligas de alumínio é normalmente tida como dificultosa, pelas características do material (MATHERS, 2002).

2.1 Ligas de alumínio

O aumento da demanda do alumínio por proporcionar menor peso e resistência mecânica faz das ligas de alumínio um material com alto potencial de aplicação na indústria em geral, visto que seu peso específico é aproximadamente 35% do peso específico do aço. Em sua produção, o alumínio divide-se, quanto à obtenção, em primário e secundário. O alumínio primário é aquele obtido por meio do processo de redução da alumina, e caracteriza-se pelo elevado consumo de energia elétrica (ABAL, 2005).

O alumínio secundário é aquele obtido por meio do reprocessamento de sucata, em grande parte proveniente da reciclagem, e de sobras de processos de transformação. Devido a questões ambientais, e ao baixo custo de reprocessamento, a produção do alumínio secundário tem crescido em importância. Apenas 5% da energia elétrica que é consumida na obtenção do alumínio primário é necessária na sua reciclagem (COOPERMETAL, 2012).

Suas propriedades mecânicas também são consideráveis quando adicionados elementos de liga, que permitem obter um material de ampla utilização para estruturas com alta resistência específica, ou seja, consegue-se, com uma liga de alumínio, uma relação resistência x peso de 112 MPa/kg, enquanto para uma liga de aço tem-se 76 MPa/Kg.

Dentre as diversas ligas de alumínio encontradas no mercado, as mais utilizadas para construção de equipamentos em geral são as ligas da série 5XXX, por sua versatilidade nos processos de fabricação. Em 1954, foi registrada, na Aluminium Association, a liga AA 5083 que, além de ser considerada a liga-base da indústria naval, é amplamente utilizada na indústria metal mecânica (ALCAN, 1993).

2.1.1 Classificação das ligas de alumínio

A designação das diferentes ligas de alumínio é feita por meio de sistemas internacionais propostos por algumas associações, tais como Aluminium Association (AA), International Organization for Standardization (ISO) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

O alumínio e suas ligas possuem um campo de aplicação que abrange desde utensílios de cozinha até aplicações aeroespaciais. Como o crescente uso do alumínio e as vantagens que ele apresenta, aumenta-se a necessidade de estudos na área de fabricação, principalmente na soldagem deste material. Contudo, historicamente o alumínio é considerado um material de difícil soldabilidade, devido ao fato dos pioneiros na arte da soldagem do mesmo empregarem técnicas de soldagem semelhantes às empregadas para materiais ferrosos, obtendo assim soldas com baixa qualidade (SILVA; FERRARESI, 2003). Para uma melhor utilização deste material a indústria trabalhou em proporcionar alumínio com características mecânicas variadas, dando assim possibilidade de ser empregadas em todas as áreas metalúrgicas (SILVA; FERRARESI, 2003).

A classificação das ligas de alumínio baseia-se em um sistema numérico de quatro dígitos, sendo que o primeiro indica o grupo de elementos que determinam as características da liga, conforme indicado na Tabela 1. Nas ligas do grupo 1XXX, os dois últimos dígitos indicam a porcentagem de alumínio que excede a 99%. Nos grupos de 2XXX a 8XXX, os dois últimos dígitos apenas diferenciam ligas de um mesmo grupo; o segundo dígito, quando diferente de zero, indica que uma liga é derivada daquela com o segundo dígito zero. Por exemplo, a liga 5652 deriva da liga 5052 (ALCAN, 1993).

Tabela 1 - Classificação das ligas de alumínio

Liga	Principais elemento de liga
1XXX	Alumínio não ligado Mínimo 99% de pureza
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e silício

Continua

Continuação

7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: ALCAN (1993)

Dentre estas séries, é possível, ainda, fazer-se uma subdivisão quanto ao mecanismo de endurecimento aos quais as ligas respondem e que promovem o aumento da dureza e da resistência mecânica. As ligas das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX são classificadas como tratáveis termicamente, enquanto as ligas das séries 3XXX, 4XXX e 5XXX são denominadas endurecíveis por deformação. A seguir, são descritas as características gerais de cada uma das séries de ligas de alumínio, bem como suas mais frequentes áreas de aplicação.

Série 1XXX: com teor de pureza igual ou superior a 99%, encontra aplicação principalmente nas áreas elétrica e química. Possui excelente resistência à corrosão, elevadas condutividade térmica e elétrica, elevada ductilidade e baixa resistência mecânica. Respondem moderadamente a processos de endurecimento por deformação devido ao alto teor de pureza.

Série 2XXX: tendo o Cobre como principal elemento de liga, as propriedades mecânicas desta série podem ser superiores às de alguns aços com baixo teor de carbono. São largamente utilizadas em aplicações estruturais. Possui boa usinabilidade, baixa soldabilidade e baixa resistência à corrosão. Normalmente, as características de baixa resistência à corrosão são melhoradas por meio de recobrimento com alumínio de alta pureza ou por ligas da série 6XXX.

Série 3XXX: as ligas desta série são de moderada resistência mecânica, encontrando aplicações nos mais diversos segmentos, desde utensílios domésticos, trocadores de calor e placas de trânsito, até latas de bebidas. O principal elemento de liga é o Manganês, embora apresente solubilidade máxima de apenas 1,5%. A máxima resistência mecânica é obtida por meio de trabalho mecânico.

Série 4XXX: o principal elemento de liga desta série é o Silício, em teores de até 12%. Sua função é baixar a temperatura de fusão destas ligas sem que ocorra fragilização. Por fundirem-se em temperaturas mais baixas que as demais séries, estas ligas são utilizadas principalmente como arames de solda e ligas de brasagem.

Série 5XXX: o Magnésio, principal elemento de ligas desta série, em combinação com o Manganês, resulta em ligas de média-alta resistência mecânica. De boa soldabilidade e com destacada resistência à corrosão (principalmente em atmosfera salina), esta série encontra

aplicação em diferentes setores. A gama de produtos varia desde navios e embarcações, tanques criogênicos e latas, até estruturas automotivas.

Série 6XXX: nesta série, Magnésio e Silício são adicionados em proporções suficientes para formação de Silicato de Magnésio (Mg_2Si). As ligas desta série possuem elevada resistência à corrosão, a conformabilidade e possuem boa soldabilidade e de fácil usinagem. São utilizadas para uso arquitetônico, quadros de bicicletas e também estruturas soldadas.

Série 7XXX: em teores de 1% a 8%, o Zinco é o principal elemento de liga, embora Magnésio, Cobre, Cromo e Zircônio também possam estar presentes em menores quantidades. O Zinco combinado ao Magnésio confere às ligas desta série altíssima resistência mecânica, o que as torna muito utilizadas em aplicações estruturais, principalmente pela indústria aeronáutica.

As características mecânicas do alumínio são alteradas com a adição de elementos de liga, como manganês, magnésio, silício e zinco, associada a tratamentos térmicos que permitem obter um material de ampla utilização para praticamente todos os fins. A resistência à corrosão do alumínio advém da formação de uma película de óxido, de natureza quimicamente estável, na superfície do material (ANDERSON, 2010).

A adição de diferentes elementos de liga melhora a resistência à corrosão. Com o uso do alumínio, muitas vezes não é necessário o tratamento superficial para garantir a passividade em diversos tipos de atmosferas e meio ambientes agressivos, como ocorre comumente com os materiais ferrosos (MATHERS, 2002).

Outras características que ampliam consideravelmente o campo de aplicação do alumínio são: comportamento não ferromagnético, antifaiscante, não tóxico, aparência brilhante, elevada condutibilidade térmica e elétrica (cerca de 65% do cobre eletrolítico) e a capacidade de reflexão de energia radiante (luz visível, calor radiante, ondas eletromagnéticas). Algumas vantagens do alumínio sobre o aço:

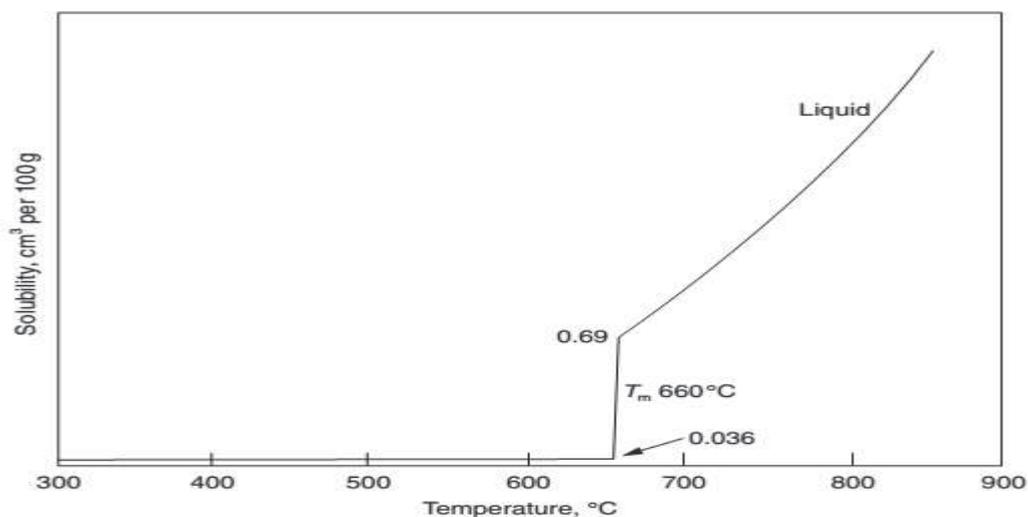
- a) O alumínio pode conduzir eletricidade seis vezes melhor que o aço e aproximadamente 30 vezes melhor que o aço inoxidável;
- b) O alumínio possui excelente resistência à corrosão;
- c) O alumínio é fácil de cortar e usinar;
- d) O alumínio é não magnético, possuindo uma boa estabilidade do arco elétrico na soldagem;
- e) A condutividade térmica do alumínio é cinco vezes mais alta que a do aço.

2.2 Aspectos metalúrgicos

Os principais problemas metalúrgicos na soldabilidade do alumínio e suas ligas é a formação da porosidade pelo hidrogênio (H_2) e a formação de trincas a altas temperaturas. A formação desta porosidade está amplamente ligada à grande variação da solubilidade do hidrogênio com a temperatura no alumínio líquido.

Conforme mostrado na Figura 1, a variação desta solubilidade mostra a ocorrência de supersaturação de hidrogênio, na parte posterior da poça de fusão, devido à sua menor temperatura em relação à região da poça de fusão (METHERS, 2002). Como o hidrogênio pode ser dissociado no arco, tornando-se mais reativo, existe a possibilidade de absorção deste elemento pela poça de fusão em teores superiores aos previstos pela equação, ocasionando, desta forma, uma formação de porosidade maior no cordão de solda.

Figura 1 - Solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido para dois valores de pressão parcial de hidrogênio

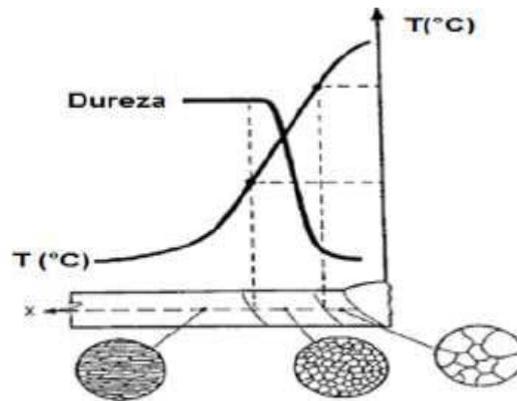


Fonte: Mathers (2002)

A liga de alumínio utilizada neste trabalho é classificada como não tratável termicamente. Para estes materiais, sem transformação alotrópica, os grãos encruados por trabalhos a frio do metal de base dão lugar, na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), a grãos equiaxiais cujo tamanho é crescente com a proximidade da linha de fusão, devido ao maior pico de temperatura. A Figura 2 ilustra esse fenômeno, juntamente com o comportamento da dureza da liga. Desta forma, o risco na soldagem é que o efeito endurecedor

do encruamento desapareça localmente, e sua dureza e resistência mecânica fiquem inferiores ao metal de base deformado frio.

Figura 2 - Efeito da recristalização e superaquecimento na microestrutura e dureza na ZTA e MB encruados sem transformação alotrópica.



Fonte: Salvi (2014)

2.3 Soldagem a Arco Elétrico

A soldagem a arco engloba um grande número de processos, que incluem os de maior utilização industrial. Todos esses processos utilizam como fonte de calor, para a fusão localizada, o arco, que é uma descarga elétrica em um meio gasoso parcialmente ionizado. Na maioria dos casos, o arco elétrico é mantido entre um eletrodo cilíndrico e o metal base, existindo, contudo, processos em que o metal base não faz parte do circuito elétrico ou em que se utilizam eletrodos de diferentes formas ou diversos eletrodos simultaneamente. Em geral, o eletrodo é fundido pelo arco e fornece metal de adição para a solda (soldagem com eletrodos consumíveis), existindo, porém, processos em que o eletrodo (em geral, de tungstênio ou grafite) não se funde de forma apreciável (soldagem com eletrodos não consumíveis) (ESAB, 2014).

Nos processos de soldagem a arco, a quantidade de calor fornecida à junta e, portanto, as dimensões e o formato do cordão de solda, dependem da corrente e tensão elétricas fornecidas ao arco e, na grande maioria, dos processos da velocidade de soldagem (isto é, a velocidade com que o arco é deslocado ao longo da junta) (FERRARESI, 2001).

A corrente de soldagem pode variar de valores inferiores a 1A (na soldagem microplasma) a valores superiores a 1000 ou 2000A (em processos como a soldagem ao arco

submerso). Esta variável afeta, de forma importante, a penetração do cordão e solda e a velocidade de fusão do eletrodo (e, portanto, a taxa de deposição). A tensão de soldagem varia tipicamente de menos de 10V a valores que podem superar 100V (na soldagem a plasma). Esta, em geral, controla o comprimento do arco (isto é, a separação entre o eletrodo e o metal base ou entre os eletrodos que mantêm o arco) e a largura do cordão de solda. Por fim, quando a fonte de calor se desloca ao longo da junta, a velocidade de soldagem controla a quantidade de calor que é fornecida ao longo da junta. Quanto maior a velocidade de soldagem, menor será a quantidade de energia recebida por unidade de comprimento da junta e, em geral, menores serão as dimensões do cordão. Finalmente, deve se deixar claro que, para se garantir uma estabilidade e controle adequados do processo e se obter um cordão de solda com um formato adequado, não se pode selecionar valores de corrente, tensão e velocidade de soldagem de forma independente. Além disso, cada processo de soldagem a arco possui uma extensa lista de variáveis adicionais que devem ser levadas em consideração ao se determinar as condições de soldagem para uma dada aplicação. Algumas destas variáveis serão apresentadas e discutidas na descrição sucinta abaixo, dos principais processos de soldagem a arco. Uma discussão adicional sobre este tópico será feita no capítulo de introdução à física da soldagem.

2.3.1 Aspectos da Soldagem por Fusão GMAW / MIG

O processo foi introduzido na década de 1920 e tornado comercialmente viável a partir de 1948. Consiste em um processo de alimentação constante de um arame consumível (polaridade positiva), que é direcionado a uma peça metálica (polaridade negativa), sob uma atmosfera de proteção gasosa.

GMAW é a sigla internacional que significa “gas metal arc welding” ou Soldagem a Arco com Proteção Gasosa e Eletrodo Metálico. O processo ficou caracterizado e conhecido no mercado como MIG/MAG, ou seja, MIG (metal inert gas), quando o gás de proteção utilizado para proteção da poça de fusão é inerte, ou MAG (metal active gas), quando o gás de proteção da poça de fusão é ativo.

MIG se refere ao processo cuja a proteção é realizada com gases inertes e é utilizado na soldagem de materiais não ferrosos como alumínio e suas ligas, cobre, níquel, entre outras; enquanto na MAG, que é o processo usual na soldagem de metais ferrosos como aços ao carbono e aços de baixa liga entre outros, se refere ao processo com proteção por gases ativos.

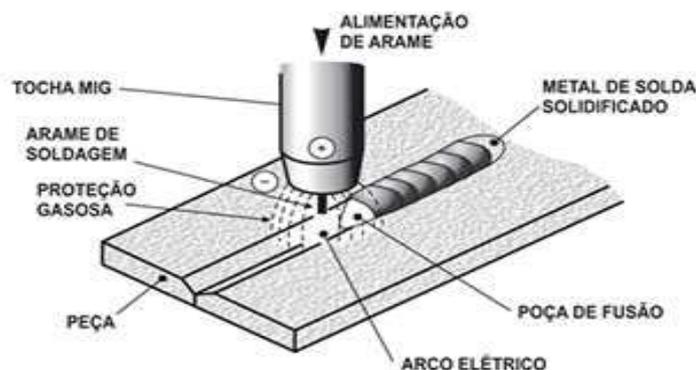
Hoje, com misturas gasosas contendo os mais variados teores de gases ativos e inertes seria até difícil dizer quando é MIG e quando é MAG, mas pode-se afirmar que a partir do

momento em que adiciona no gás inerte qualquer porcentagem de um gás que promova alterações químicas ou metalúrgicas do metal de solda, a mistura é considerada ativa.

Quando o arame consumível entra em contato com o metal de base, temos o fechamento do circuito e a circulação de corrente elétrica entre os polos positivo e o negativo, sendo os metais aquecidos até a temperatura de fusão. O resultado é a chamada “poça de fusão”, que efetua a coalescência dos metais ali presentes. Parte dessa poça de fusão é composta pelo arame consumível ou metal de adição, e parte é composta pelo resultado da fusão entre o arame e o metal de base, o que é chamado de diluição.

Após o resfriamento desta poça de fusão, temos a união entre esses metais. Trata-se de um processo muito flexível, que proporciona soldagens de qualidade com grande produtividade, principalmente quando comparado com processos manuais como eletrodos revestidos.

Figura 3 - Representação do Processo GMAW / MIG convencional



Fonte: ESAB (2014)

2.3.2 Processo de transferência metálicas no Processo GMAW

A deposição do metal de solda é realizada via transferência de “gotas” de metal através da coluna do arco, sendo que o tamanho, forma e frequência desta deposição caracteriza um determinado tipo de transferência metálica. Existem três tipos de transferências metálicas para o processo GMAW. Neste processo a deposição do metal de solda é realizada via transferência de “gotas” de metal através da coluna do arco, sendo que o tamanho, forma e frequência desta deposição caracteriza um determinado tipo de transferência metálicas utilizadas no processo de soldagem MIG e MAG (ABS, 2014).

Transferência Curto-circuito, conforme Figura 4 pequenas gotas de tamanho próximo ao do diâmetro do arame, destacadas no contato, em curto-circuito, do arame com a peça. Caracterizada pela baixa corrente e baixa tensão, é uma transferência muito utilizada em chapas finas, soldas fora de posição ou na soldagem de passe raiz em juntas tubulares.

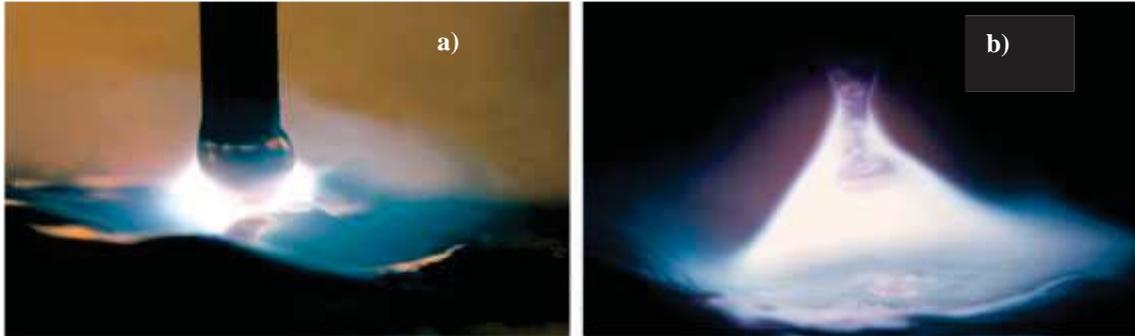
Usualmente limitada para arames de até 1,2 mm de diâmetro. Para se obter uma transferência em Curto Circuito estável e controlável é necessário utilizar o gás adequado e ter um equipamento com características apropriadas (ABS, 2014).

Transferência Spray, conforme Figura 4, grande quantidade de gotas com dimensões menores que o diâmetro do arame e projetadas através da coluna do arco em alta velocidade e com baixo volume de respingos. Estas gotas são depositadas com alta energia (alta corrente e alta tensão conforme o diâmetro do arame) e fazem com que a poça de fusão seja bastante fluida e o processo somente possa ser utilizado na posição plana e horizontal, geralmente em metal de base de espessuras superiores a 3 mm ou em enchimento de juntas.

Transferência Globular Está localizada entre a de Curto Circuito e a de Spray (opera com Tensão e Corrente de Arco intermediária as mesmas) e se caracteriza pela deposição de gotas com dimensões maiores que o diâmetro do arame e elevado nível de respingos devido a transferência das mesmas através da coluna do arco ocasionar curtos circuitos eventuais e o arco não ser considerado estável. Este é o tipo de transferência que pode ser muito perigoso e dependendo da regulagem dos parâmetros Tensão e Corrente e do tipo de Gás utilizado pode não ter uma energia de arco e de gota suficientemente altos o que ocasiona dificuldades para fundir o metal de base podendo causar defeito conhecido como COLAGEM ou falta de fusão. Somente é possível soldar nas posições Plana e Horizontal com a transferência Globular.

É importante salientar que cada transferência tem características e aplicabilidade próprias, que dependem fundamentalmente dos ajustes adequados da tensão e da corrente, do tipo do gás de proteção, entre outras variáveis relativas ao equipamento, e mesmo externas. Isto significa que o não conhecimento das características operacionais do processo GMAW pode colocar em risco a qualidade da junta e do componente a ser soldado (ABS, 2014).

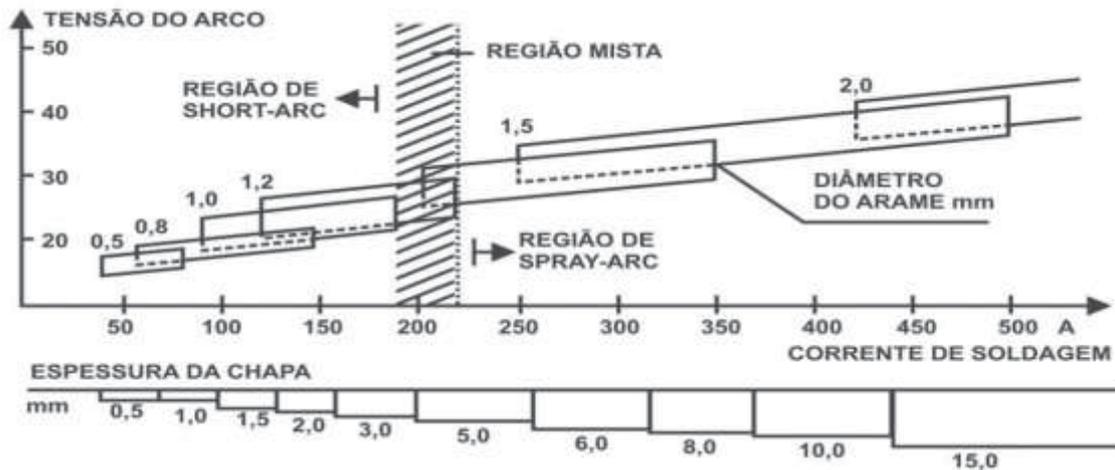
Figura 4 - Transferência do metal líquido a) transferência globular b) transferência por spray



Fonte: ABS (2014)

Como os processos de soldagem por transferência globular, curto circuito e spray precisam ter seus parâmetros ajustados para não ocorrer a troca dos processos a Figura 5 ilustra a relação Tensão x Corrente, posicionando os tipos de transferência metálica utilizando equipamento GMAW convencional, para diferentes bitolas de arame de alumínios e misturas de gases, onde pode se verificar a dependência entre variáveis para se atingir uma transferência metálica estável e eficiente para o processo utilizado.

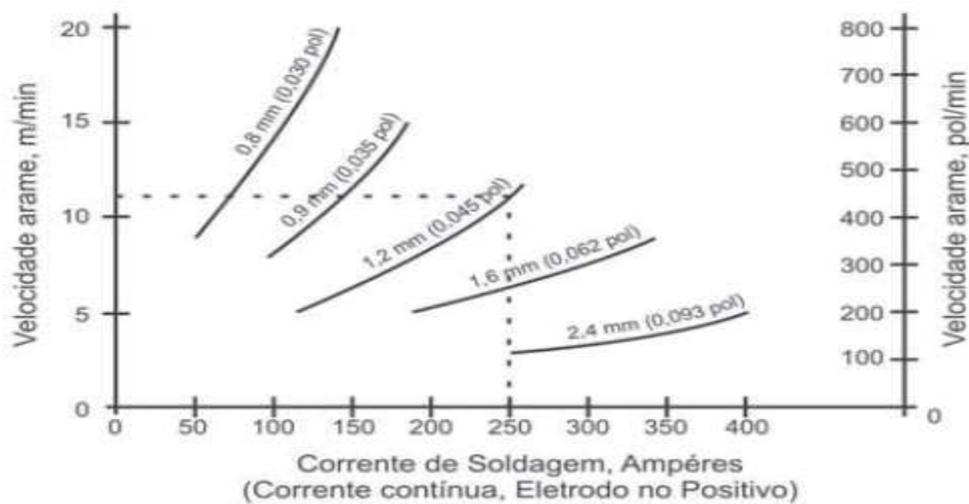
Figura 5 - Relação entre Tensão x Corrente para a soldagem do alumínio e para aços ao carbono



Fonte: ABS (2014)

Para os processos de transferência metálica na soldagem do alumínio como citados acima se faz necessário o maior controle dos parâmetros estes de total importância para o bom desempenho dos processos de soldagem. A figura 6 apresenta a relação dos valores de velocidade de arame (m/min) x corrente de soldagem (A) e diâmetro do arame de adição (mm). Estes valores são a relação inicial para a escolha do processo de transferência metálica a ser utilizado no processo de soldagem (ABS, 2014).

Figura 6 - Relação dos valores de velocidade de arame x corrente de soldagem (A) e diâmetro do arame de adição



Fonte: ABS (2014)

2.4 Processo MIG Pulsado

O processo de soldagem por fusão MIG/MAG é caracterizado, basicamente, pela abertura e manutenção de um arco voltaico estabelecido entre uma peça e um eletrodo alimentado continuamente por dispositivo mecânico, protegido por um fluxo de gás. Conforme Salvi (2014), a polaridade geralmente utilizada em soldagem MIG de alumínio é positiva (CC+), já que a mesma possui ação de remoção da camada de óxido superficial (Al_2O_3), que é fundamental para a realização desta soldagem. Além disso, mesmo para outros materiais, a polaridade CC+ confere maior estabilidade do arco, melhor geometria do cordão, e convencionalmente é a polaridade mais utilizada para este processo (ELIOMAR, et al., 2002). Atualmente, o processo mais utilizado para a união de ligas de alumínio é o MIG (*metal inert gas*). Os méritos deste processo se baseiam na sua versatilidade e na sua alta produtividade. Essa versatilidade operacional se deve à enorme gama de combinações possíveis dos

parâmetros, tais como o gás de proteção e sua vazão, o tipo de eletrodo e o seu diâmetro, a distância do bico de contato até a peça a tensão e a corrente de soldagem, etc.

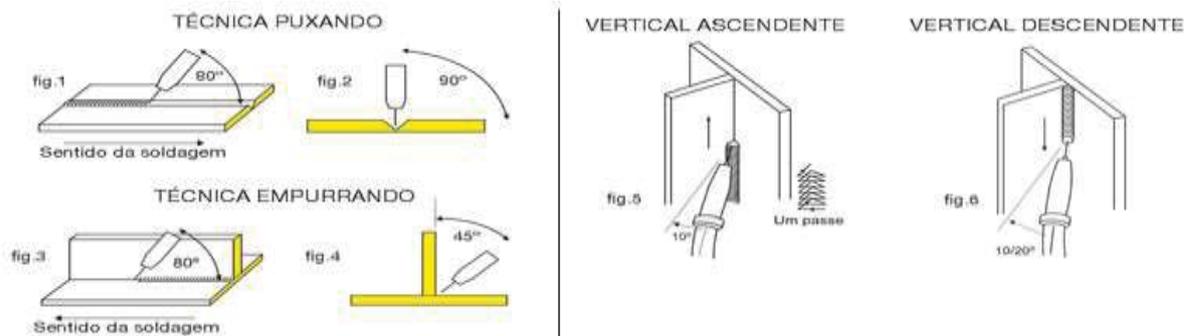
As combinações de tais parâmetros proporcionam ao processo características próprias, como é o caso da soldagem por curto circuito ou com pulsação de corrente. Entretanto, existem algumas limitações, tais como a sua maior sensibilidade a variações dos parâmetros elétricos do arco, que influenciam diretamente na qualidade do cordão de solda (ELIOMAR et al., 2002).

2.5 Técnicas de Soldagem do Processo GMAW / MIG

Para a soldagem nas posições plana e filete, duas técnicas são geralmente aplicadas: a técnica puxando e a técnica empurrando. Nas duas técnicas, existem ângulos que devem ser observados, o ângulo de ataque, formado entre a tocha de soldagem e o sentido longitudinal da junta a ser soldada, e o ângulo de posicionamento, formado entre a tocha e o sentido transversal da junta. A técnica de soldagem empurrando proporciona um cordão de solda mais largo, e um reforço menor, com menor penetração de garganta, ao passo que a técnica de soldagem puxando proporciona um cordão de solda mais estreito, e reforço do cordão de solda e penetração (ESAB, 2014). O que determina a técnica de soldagem, puxando ou empurrando, são os resultados a serem alcançados, bem como o tipo de junta a ser soldada, conforme mostrado na Figura 7.

Para a soldagem na posição vertical, progressão ascendente e descendente, o posicionamento da tocha é extremamente importante, e a soldagem deve ser realizada somente como ilustrado. Pequenas oscilações da tocha, principalmente na progressão ascendente, devem ser utilizadas a fim de garantir uma boa fusão lateral. Em ambos os casos, o arco deve ser mantido na borda da poça de fusão para assegurar uma penetração completa da solda.

Figura 7 - Posições de soldagem utilizadas no processo MIG alumínio



Fonte: ABS (2014)

A soldagem das ligas de alumínio segue algumas considerações com relação às posições de soldagem, considerando que estas podem ocasionar descontinuidades no cordão de solda, se não forem respeitadas. As posições mais frequentemente utilizadas para a soldagem do alumínio são: plana, em ângulo, ascendente, horizontal e descendente.

2.6 Soldagem MIG do alumínio

Apesar de ter surgido há mais de seis décadas, o processo de soldagem MIG/MAG continua a gerar sempre novas expectativas e tem sido continuamente assunto de pauta. Para um leigo, ao examinar o conjunto do processo, o mesmo se parece como nos seus primórdios. Entretanto, as inserções tecnológicas são de grande profusão e diversidade, restando apenas a similitude das partes macro componentes e de inovações tem como causa o aumento da importância que a tecnologia da soldagem obteve em relação aos demais processos de fabricação e o processo MIG/MAG é aquela que oferece as maiores chances de receber inovações. Entretanto, o que permitiu este desenvolvimento foram a vários ramos da ciência e tecnologia, as quais envolvem a eletrônica de controle, a eletrônica de potência, a informática e os sistemas de acionamento (DUTRA; MARQUES; SILVA, 2012).

A soldagem do alumínio pelo processo MIG, tido como o mais produtivo, se apresenta como tecnicamente viável e aceito universalmente. Porém, diversos aspectos devem ser considerados em relação à soldagem do alumínio pelo processo MIG. Dentre estes, destacam-se os tipos de fontes de soldagem e a relação destas com a estabilidade do arco e a geometria da junta (MATHERS, 2002).

Devido às características físico-químicas, a soldagem MIG de alumínio exige requisitos mais minuciosos do que o MIG/MAG para aços. Embora todos os metais e ligas formem óxidos em sua superfície, o caso do alumínio e de suas ligas é particularmente especial devido à grande diferença de temperatura de fusão com seus respectivos óxidos que constituem uma fina camada de óxidos que, mesmo com espessuras muito pequenas (25-50Å), confere ao metal uma maior resistência ao ataque corrosivo (MATHERS, 2002).

A soldagem das ligas de alumínio apresentam particularidades em comparação aos aços, devido às suas propriedades físico-químicas. Dentre as propriedades, pode-se citar o baixo ponto de fusão, alto coeficiente de expansão linear, alta condutividade térmica, que influenciam no resultado do cordão de solda e na formação de defeitos e na variação da altura do cordão.

Devido ao ponto de fusão do alumínio ser menor que do aço, supõe-se que o calor necessário para a execução da soldagem deva ser menor. Mas a condutividade térmica exerce

uma grande influência na soldabilidade, pois ela é aproximadamente cinco vezes maior que a do aço. Isso significa que, na prática, o alumínio precisa que seja fornecido mais calor e/ou aporte térmico durante a soldagem. A alta condutividade térmica do alumínio age como uma barreira para a formação da poça de fusão, desta forma nota-se que, no início do cordão, a alta condutividade térmica dissipa o calor rapidamente, dificultando a molhabilidade do metal base e a penetração do cordão de solda no metal base.

Conforme Salvi (2014), nessa polaridade acontece o efeito de limpeza catódica, em que o próprio arco elétrico se encarrega da remoção dos óxidos. Por ter uma maior facilidade de emissão de elétrons do que os metais puros, a alta concentração de calor que é gerada nos óxidos acaba por eliminá-lo. O gás de proteção evita uma nova oxidação, garantindo uma superfície limpa para a execução da soldagem.

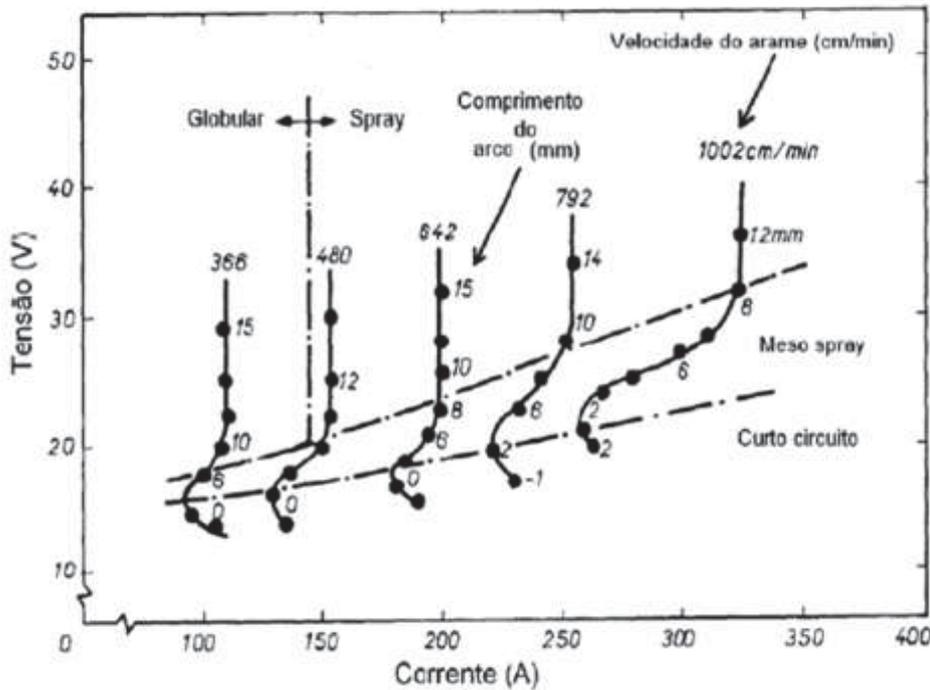
A soldagem MIG de alumínio é uma operação dificultosa devido às suas características físico-químicas. É natural do alumínio a formação de óxidos em sua superfície, a alumina (Al_2O_3). Por apresentar uma alta resistividade elétrica, a alumina dificulta a abertura do arco voltaico, exigindo mecanismos de atuação para facilitar essa abertura (SALVI, 2014). Além disso, Santos (2000) descreve que o ponto de fusão do alumínio é em torno de 660°C , enquanto a alumina se funde aos 2052°C . Desse modo, para tornar possível a soldagem de alumínio é necessária a remoção dessa camada de óxido. Outros fatores, como a alta condutividade térmica e elétrica, e a alta expansividade térmica, acarretam problemas que devem ser tratados e estudados para o melhor desenvolvimento das técnicas de soldagem aplicadas.

Conforme Cirino (2002), a hipótese mais correta que tenta explicar a remoção de óxidos está ligada ao mecanismo de emissão de elétrons a partir da peça de trabalho ou metal base, a qual ocorre durante as fases de correntes positivas. Este mecanismo é conhecido como efeito de campo e causa a limpeza catódica. Baseia-se no fato de que, durante a polaridade positiva, ocorre a formação de múltiplas manchas catódicas microscópicas sobre a região onde está ocorrendo a soldagem. Essas manchas apresentam-se em uma pequena área de concentração e, assim, uma alta densidade de corrente é capaz de remover ou fundir a camada de óxidos. Como a polaridade comumente utilizada no processo de soldagem MIG de ligas de alumínio é positiva, o óxido é removido naturalmente. Porém, se utilizarmos a polaridade negativa o mesmo não ocorre.

Por possuir baixa resistividade elétrica, em modalidades de soldagem em que a fonte impõe a corrente, o arco elétrico tende a variar aleatoriamente seu comprimento. Assim, para uma dada corrente o arco pode assumir valores diferentes de tensão. Podemos verificar e entender melhor pela Figura 8, conforme consta no trabalho de Salvi (2014), que interpreta as

características de fusão de eletrodos de alumínio na soldagem MIG, e que apresentam uma ligação direta com o comprimento de arco.

Figura 8 - Comportamento do arco MIG do alumínio (Material: ER 5183 com 1,6 mm de diâmetro, gás Argônio) Curvas de isoconsumo.



Fonte: Salvi (2014)

Pode-se perceber que para uma tensão de arco elevada, a corrente de soldagem é praticamente constante, e independe do aumento da tensão do arco (DUTRA, 1989). Na região onde ocorre a transferência spray, o aumento de tensão pode apresentar o mesmo valor de corrente (verificado na reta vertical da figura), sendo este fenômeno associado à instabilidade do arco, já que para as tensões mais abaixo, onde a transferência se dá por curto circuito, para cada valor de corrente existe um valor de tensão correspondente. Esses problemas, que são relacionados com a variação da altura do arco, na maioria das vezes resultam em dificuldades que podem ser muito prejudiciais ao cordão de solda ou até mesmo inviabilizando a solda.

2.6.1 Soldabilidade do Alumínio

As ligas metálicas, em sua maioria, são soldáveis, mas certamente algumas são muito mais difíceis de serem soldadas por um dado processo que outras. Por outro lado, o desempenho esperado para uma junta depende fundamentalmente da aplicação a que esta se

destina. Para determinar a soldabilidade de um material, é fundamental considerar o processo, o procedimento de soldagem, a sua aplicação e, principalmente, conhecer bem o material que está sendo soldado, o projeto da solda e da estrutura, bem como os requerimentos de serviços.

Conforme Handbook (1996) define-se soldabilidade como “A capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”.

Esta definição coloca pontos importantes, tais como adequação de projeto, condições de soldagem e procedimento de soldagem correto. Uma definição alternativa, mais prática, seria “a facilidade relativa com que uma solda satisfatória, que resulte em uma junta similar ao material que está sendo soldado, pode ser produzida”.

Conforme Salvi (2014), os problemas típicos relacionados com a soldabilidade das ligas de alumínio, citados no tópico anterior, aliados às mudanças de composição química e microestruturas na poça de fusão e na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), podem levar à redução das propriedades mecânicas e incidência de defeitos como porosidade, trincas e falta de fusão.

Segundo o manual Handbook (1996), as discontinuidades são divididas em três categorias:

- a) Descontinuidades Dimensionais: distorção, dimensões incorretas de solda, e perfil incorreto do cordão de solda.
- b) Descontinuidades Estruturais: porosidade, inclusões, trincas, falta de fusão, falta de penetração, mordedura.
- c) Propriedades Inadequadas: propriedades mecânicas e propriedades químicas.

As discontinuidades estruturais são as que geralmente comprometem a solda. A falta de fusão refere-se à ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base ou dos passes adjacentes, resultantes do não aquecimento adequado do metal presente na junta ou a presença de camadas de óxidos refratários, no caso do alumínio.

Na maioria dos casos, a produção de uma solda envolve o uso de calor e/ou deformação plástica, resultando em uma estrutura metalúrgica diferente da do metal de base. As soldas podem, também, apresentar discontinuidades, tais como vazios (poros), trincas, material incluso no cordão, entre outros problemas. Três tipos de problemas inter-relacionados devem ser considerados:

1. Problemas na zona fundida ou na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), que ocorrem durante ou imediatamente após a operação de soldagem, como poros, trincas de solidificação, trincas induzidas pelo hidrogênio, perdas de resistência mecânica, etc.

2. Problemas de solda ou no material adjacente, que ocorrem nas etapas de um processo de fabricação, posteriores à soldagem. Incluem, por exemplo, a quebra de componentes na região da solda durante processos de conformação mecânica.

3. Problemas na solda ou no material adjacente, que ocorrem em certo momento durante o serviço da estrutura soldada. Estes podem reduzir a resistência da junta nas condições de serviço e incluem, por exemplo, o aparecimento e propagação de trincas por diversos fatores, problemas de corrosão, fluência, etc.

Para evitar tais problemas, é importante conhecer as possíveis complicações que os materiais podem apresentar ao serem soldados, os fatores do material, do projeto e do procedimento de soldagem que afetam e a sua influência no comportamento em serviço da estrutura soldada.

2.6.2 Dificuldades da soldagem do alumínio

Conforme as orientações da norma AWS (1996) precisamos considerar as recomendações apresentadas, principalmente na soldagem do alumínio utilizado pelas indústrias como matéria prima. Como o alumínio apresenta diferentes propriedades físicas e químicas, ocorrem modificações com relação à solda realizada em aços:

- a) Elevada afinidade pelo oxigênio;
- b) Elevada condutividade térmica;
- c) Elevado coeficiente de expansão térmica;
- d) Baixo ponto de fusão (660°C).

Os efeitos relacionados às características térmicas do alumínio trazem problemas como a formação de trincas e a variação da geometria do cordão ao longo da solda. Silva (2005), em seu trabalho, mostra que por ter um coeficiente de expansão térmica cerca de duas vezes maior que o aço, o alumínio está sujeito a maiores níveis de deformação. Essa deformação exige um sistema de fixação mais rígido e, com isso, o surgimento de tensões residuais podem causar trincas, prejudicando a continuidade do cordão de solda.

A alta condutividade térmica promove cordões com baixa molhabilidade e penetração em seu início, quando o calor do arco é rapidamente distribuído pelo material de base, dificultando a formação da poça metálica (SILVA, 2005). À medida que a solda avança o metal de base se mantendo aquecido, proporciona o aumento de penetração e molhabilidade, até o nível máximo, que exige a interrupção do processo. Essa variação do cordão pode inviabilizar a soldagem em muitas situações, e por esse motivo é necessário o ajuste sobre a quantidade de energia imposta à peça, fazendo-se uma regulagem dos parâmetros estabelecidos para a soldagem.

2.7 Variáveis na soldagem do Alumínio 5XXX

Na soldagem MIG do alumínio, as variáveis de soldagem têm influência direta na quantidade de hidrogênio e no modo de solidificação da poça de fusão, fatores que interferem diretamente no volume de porosidade ou vazios dos cordões de solda. Entre essas variáveis estão a condição superficial da chapa, parâmetros de soldagem e conseqüentemente o modo de transferência metálica, e a configuração da junta de soldagem (MORAIS; FERRARESI, 2001).

A seguir, estão descritas as variáveis citadas, que podem influenciar no grau de porosidade dos cordões de solda em alumínio.

Condição superficial da chapa – A superfície áspera do alumínio retém umidade e contaminante, que ajudam na formação de porosidade. Desta forma, diferentes formas de limpeza removem diferentes tipos e quantidades de sujeiras, podendo afetar o volume de vazios do cordão de solda executado.

Tensão de soldagem – Na soldagem de alumínio com tensão em torno de 20 Volts, tem-se arcos muito pequenos, havendo grande instabilidade do processo, predispondo à formação de porosidade nos cordões. Em soldagem com arcos maiores, a partir de 24 Volts, aumenta-se a “zona anelar quente”, favorecendo a absorção de hidrogênio e a formação de porosidade no cordão de solda (MORAIS; FERRARESI, 2001).

Corrente de soldagem – É sabido que o aumento da corrente causa o aumento da temperatura da poça de fusão e, conseqüentemente, o aumento do volume da poça de fusão, elevando, com isso, a solubilidade e a absorção do hidrogênio. Entretanto, o aumento da temperatura da poça de fusão causa uma diminuição da taxa de solidificação (maior volume da

poça), favorecendo o escape do hidrogênio para a atmosfera. Verifica-se, então, uma relação entre a corrente de soldagem e a taxa de solidificação da poça de fusão: se por um lado existe a facilidade da absorção de gases, por outro lado existe, também, a facilidade de escape desses gases (WOODS, 1974).

Conforme mostrado no trabalho de Morais e Ferraresi (2001), na soldagem MIG com altas taxas de resfriamento, em correntes baixas, produz-se cordões com muitos poros de pequenos volumes, enquanto soldas lentamente resfriadas contêm poucos poros, porém de diâmetros grandes. Em cordões de solda com nível moderado de resfriamento do calor imposto se reduz ao máximo de volume de porosidade, ocorrendo um tamanho médio dos poros.

Transferência metálica – Diferentes modos de transferência metálica, diretamente associados aos valores de tensão e corrente de soldagem, certamente resultam em cordões com diferentes volumes de vazios.

Configuração da junta de soldagem – A configuração da junta de topo é uma variável de grande influência no grau de porosidade do cordão de solda de alumínio. Conforme observado por Kuriyama (1975), a soldagem sobre chapas, sem chanfro, tem grande influência e vantagens sobre a soldagem em juntas chanfradas. Juntas de topo estreitas e profundas tendem a reter o gás antes de percorrer o caminho até a atmosfera. Tal observação foi comprovada na soldagem MIG na posição horizontal, a mesma utilizada neste trabalho e com juntas de topo em “Y”, com aberturas de raiz de 1,2 mm. A porosidade com a abertura de 1,2 mm ficou bem abaixo das soldas realizadas com aberturas de raiz zero, aproximando do valor de porosidade da solda realizada diretamente sobre a chapa.

2.8 Metal de adição para a soldagem do alumínio 5XXX

Os consumíveis mais indicados e utilizados para a soldagem de chapas de alumínio 5083 também devem ser da mesma série, com composição química semelhante. Além disso, deve atender algumas propriedades necessárias para a integridade da junta com relação a trincas de solidificação, ductilidade, resistência mecânica da junta soldada e temperatura de serviço e resistência à corrosão (ALCAN, 1993).

A principal diferença entre os consumíveis é o teor de manganês, que, conseqüentemente, faz com que o consumível ER 5183 apresente resistência mecânica, do metal depositado, ligeiramente maior do que o depositado ER 5356. Outra opção é a liga ER

5087, que é uma liga especial para soldagem de ligas de Al-Mg, semelhante às ER 5183 e ER 5356, porém com adição de zircônio (Zr), que é responsável pelo incremento nas propriedades mecânicas e de corrosão. Conforme Gerr (1999), isso ocorre devido a este elemento de liga possuir a função de controlar o tamanho de grão, refinando a microestrutura da solda.

As consequências do refino de grão são melhorar a resistência mecânica, resistência à fadiga, resistência à corrosão sob tensão tenacidade e até mesmo reduzir ou dispersar porosidade.

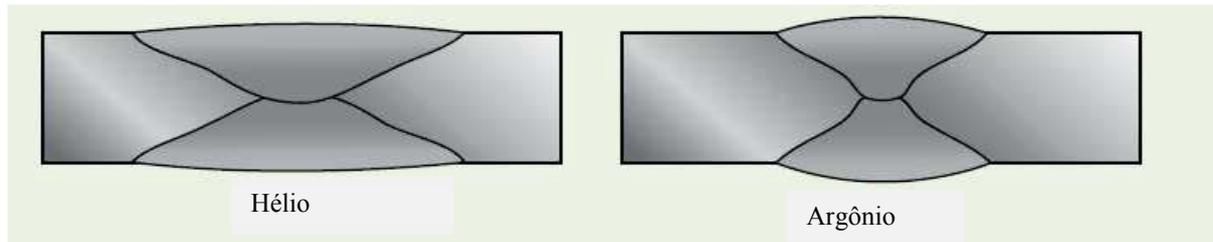
2.9 Gases de proteção para a soldagem do alumínio

O argônio puro é o gás de proteção mais comumente utilizado, é econômico, tem boas propriedades de limpeza de arco, e produz uma solda limpa. O argônio é mais pesado que o ar e dá uma excelente cobertura do gás de proteção, principalmente em soldagem na posição plana (TECHNICAL, 2014). A adição de hélio na mistura aumenta o potencial de ionização e a condutividade térmica do gás de blindagem, que produz maior calor, conduzido para o metal de base por meio do arco elétrico. Esta característica faz com que haja o aumento da penetração da solda e um aumento físico da largura do cordão de solda, bem como redução da porosidade no cordão. As desvantagens da utilização da mistura de gás argônio-hélio devem-se às vazões maiores, porque o hélio possui densidade menor e se faz necessário aumentar a vazão. Também o custo é elevado em comparação ao argônio puro.

Conforme Technical (2014), o gás hélio aumenta também a descoloração do cordão de solda, deixando-o mais claro, porque aumenta a queima do magnésio durante a soldagem, as temperaturas ficam mais elevadas, facilitando a soldagem. O uso do argônio, para a soldagem do alumínio, deve ter uma pureza mínima de 99,998% e um ponto de orvalho de 24,5°C ou inferior; já o hélio deve ter um grau de pureza de 99,995% e um ponto de orvalho de 21,5°C, podendo ser mais baixo.

Na Figura 9 verificam-se as diferenças da utilização dos gases argônio e hélio com base na penetração do cordão de solda.

Figura 9 - Diferentes resultados da utilização do argônio e do hélio na soldagem de alumínio



Fonte: Technical (2014)

Conforme Mathers (2002), os gases de proteção são os que proporcionam os melhores resultados na soldagem do alumínio, podendo ser utilizados puros ou em mistura: são o argônio e o hélio, nos quais o percentual de hélio em mistura com o argônio não pode ultrapassar índices superiores a 30%, pois além do problema de maior aporte térmico, esta mistura é onerosa em relação às outras misturas com porcentagens menores de gás hélio.

2.10 Temperatura de pré-aquecimento

O pré-aquecimento pode ser utilizado para reduzir os efeitos térmicos do tamanho da secção, quando a soldagem for realizada em materiais com diferentes espessuras, mas pode ser utilizado em materiais de mesma espessura, desde que é a principal função a redução da umidade e proporcionar ao material que será soldado um aumento da temperatura acima da ambiente. O manual AWS D1.2-D1.2M (2008) recomenda que os metais tratáveis termicamente e alumínios da classe 5XXX, contendo mais que 3% de Mg, não devem ser submetidos a pré-aquecimentos e passes com temperaturas acima de 200°C por mais de quinze minutos. Esse período de tempo presente nessa temperatura pode aumentar a zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), diminuindo a resistência mecânica da junta soldada.

2.11 Porosidade

É um defeito de descontinuidade com o formato de cavidade, podendo ser regular ou irregular, e é considerado um problema significativo para a soldagem do alumínio e suas ligas, causado, na maioria das vezes, pela absorção de hidrogênio durante a soldagem. O problema da porosidade é muito comumente encontrado nas soldagens MIG. Na transição do estado sólido para líquido, a solubilidade do alumínio aumenta quase vinte vezes. Durante a solidificação, bolhas de hidrogênio ficam presas no metal, formando o defeito da porosidade (MATHERS, 2002). O hidrogênio é altamente solúvel em alumínio fundido e, por esta razão, há a

possibilidade do surgimento de quantidades excessivas de porosidades durante a soldagem pelo processo GMAW - Gas Metal Arc Welding (Soldagem ao Arco Elétrico Gás Metal).

Em geral, a tendência à formação de descontinuidades está diretamente influenciada pela combinação de fatores mecânicos, térmicos, e metalúrgicos. A ZAC é uma parte importante da solda próxima à zona de fusão. A microestrutura da ZAC é muitas vezes complexa porque o ciclo térmico afeta o comportamento de precipitação, dissolução, reprecipitação e grãos grosseiros são verificados nesta região (SANTOS; PARIS, 2006). Santos e Paris (2006) tratam em seu trabalho que a presença da porosidade no cordão de solda aparecem na sua maioria na interface cordão de solda / ZAC. Estas porosidades, que podem ser encontradas nas soldas de alumínio, são movimentadas pelas correntes de convecção associadas com a vibração da corrente pulsada, ficando assim a porosidade aprisionada após o rápido resfriamento da poça de fusão.

2.11.1 Causas da porosidade

Os defeitos encontrados na soldagem do alumínio podem ocorrer por uma grande variedade de causas, associadas à fabricação, armazenagem e condições superficiais das chapas e do arame eletrodo, composição do gás de proteção, condições ambientais, além de procedimentos e técnicas de soldagem inadequadas. Entre as principais falhas usualmente encontradas na soldagem de alumínio está a porosidade (MORAIS; FERRARESI, 2001).

Conforme descrito por Technical (2014), aumentar a corrente de soldagem ou diminuir a velocidade de soldagem (deslocamento) irá aumentar a entrada de calor e ajudar a retardar o resfriamento, permitindo o escape de gases da poça de fusão, reduzindo, desse modo, o risco da formação de porosidade. A principal causa da porosidade na soldagem do alumínio é o hidrogênio, o qual tem alta solubilidade no alumínio fundido, mas baixa solubilidade em meio sólido, mostrando uma redução da solubilidade na ordem de vinte vezes quando ocorre a solidificação da poça de fusão que é uma das principais causas da formação da porosidade é as altas taxas de resfriamento ou solidificação da solda na poça de fusão, provocando assim o aprisionamento dos gases no interior da solda (MORAIS; FERRARESI, 2001).

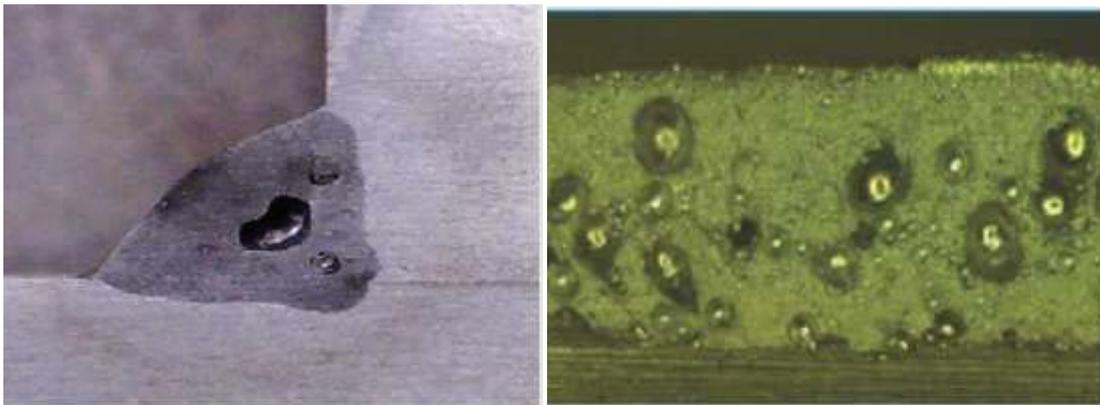
Quando as taxas de solidificação são muito altas, qualquer gás que normalmente escaparia fica aprisionado. Devem ser evitados velocidades de soldagens muito elevadas e valores de corrente muito baixas.

O gás hidrogênio cresce com o processo de solidificação da poça de fusão. Se a taxa de resfriamento for elevada, o gás se mantém no metal sob a forma de porosidade. Desta forma,

todo e qualquer composto contendo hidrogênio, que esteja contaminando o arame de adição ou que esteja na peça, pode ser causador da porosidade. Na Figura 10 é mostrado os poros ou vazios presentes no cordão de solda em alumínio da liga AA 5083 soldado pelo processo MIG tendo como metal de adição arame ER 5183, com porosidades distribuídas pelo cordão de solda em toda a face do cordão (TECHNICAL, 2014).

Os poros se formam devido à variação da solubilidade dos gases submetidos aos efeitos do ciclo térmico, da fusão à solidificação do alumínio, gerando bolhas de gás. Em fase independente, o hidrogênio causa a porosidade no alumínio e suas ligas devido à brusca queda da solubilidade com a diminuição da temperatura de fusão até a temperatura ambiente. Outros gases, como o oxigênio e o nitrogênio, não sofrem queda tão brusca de solubilidade no alumínio quanto o hidrogênio. As maiores fontes de hidrogênio para a poça de fusão são os hidrocarbonetos (MORAIS; FERRARESI, 2001).

Figura 10 - Porosidades no interior do cordão de solda



Fonte: TECHNICAL (2014)

2.11.2 Fontes de hidrogênio

Esse problema pode ser minimizado com a aplicação de corretas técnicas de limpeza e preparação do metal base antes da soldagem. Segundo Tuttle (1991), a presença de água e óleo sobre a peça funciona como uma fonte de hidrogênio. A limpeza inadequada da peça é o contribuinte mais expressivo no mecanismo de formação de porosidade. Outros motivos podem ser: contaminação por hidrogênio do metal de adição (tanto na superfície quanto na sua composição), presença de hidrogênio ou vapor de água no gás de proteção, ou perturbações na atmosfera gasosa protetora.

Os efeitos relacionados na soldagem do alumínio podem ocorrer por uma grande variedade de causas, associadas à fabricação, armazenagem e condições superficiais das chapas

e do arame eletrodo, composição do gás de proteção, condições ambientais, além de procedimentos e técnicas de soldagem inadequadas. Entre as principais falhas encontradas na soldagem do alumínio está a porosidade (MORAIS; FERRARESI, 2001).

Para alcançar baixos níveis de porosidade para a qualidade das soldas é importante compreender os métodos disponíveis para a remoção eficaz de hidrocarbonetos e da umidade na área de soldagem, e para incorporar os métodos adequados para o processo de soldagem. Se estes contaminantes estão presentes na área de solda durante a soldagem, irão produzir hidrogênio e aumentar os níveis de porosidade. A umidade (H_2O), que contém hidrogênio, pode ser introduzida para a poça de fusão por meio de inúmeras fontes:

1. Vazamentos de água dentro do equipamento de soldagem, caso se esteja usando um sistema de refrigeração na fonte de soldagem por meio da água;

2. Mesmos que seja soldado com uma mistura de gases dois ou mais gases este deve atender aos requisitos mínimos de pureza especificados pelo código de soldagem adequado aos padrões. Gases de proteção podem ser contaminados dentro das linhas de distribuição, tais como tubos ou mangueiras com vazamento;

3. Outra fonte de umidade e porosidade é o óxido de alumínio hidratado. O alumínio tem uma camada de óxido de proteção que é relativamente fina e se constitui naturalmente em qualquer superfície exposta ao tempo. Os problemas potenciais com a porosidade surgem quando o óxido é exposto à umidade, a camada de óxido de alumínio é porosa e pode absorver a umidade.

4. Projeto das juntas adequado com processo de soldagem adequado e parâmetros adequados.

2.11.3 Redução da porosidade

A redução do nível de porosidade pode ser conseguida também por meio da utilização de misturas dos gases de proteção argônio e hélio (MATHERS, 2002). A vantagem da utilização da mistura de gás com hélio está associada à capacidade que este gás possui em fornecer calor adicional durante o processo de soldagem e, conseqüentemente, permitir a fuga do hidrogênio antes da solidificação do alumínio. O uso do hélio como aditivo pode contribuir para a redução dos índices de porosidade, no entanto, a melhor linha de defesa contra os níveis de porosidade inaceitáveis é remover as possíveis fontes de hidrogênio ou contaminações (SALVI, 2014).

O hidrogênio pode ser inadvertidamente introduzido durante a operação de soldagem por meio de contaminantes na área de soldagem. A exposição do metal de solda fundida na atmosfera circundante durante a operação de soldagem é uma consideração na análise do problema de porosidade. Essa situação pode ocorrer como resultado de blindagem de gás inadequado durante a soldagem, podendo ser determinante para a formação das bolhas ou poros:

a) Soldagem em condições de corrente de ar, devido a aberturas de áreas destinadas à soldagem ou fontes de correntes de ar que podem arrastar o gás de proteção durante a soldagem;

b) Acúmulo excessivo de respingos no interior do bocal da tocha de soldagem; esta condição pode restringir o fluxo de gás e reduzir a eficiência do gás de proteção;

c) A falta de aplicação de técnica correta de soldagem; esta pode estar afetando a distribuição do gás sobre a área de fusão do metal de adição com o metal base;

d) Estabelecer e manter uma taxa de fluxo de gás de proteção correta; isto deve ser projetado para proporcionar a proteção de gás mais eficiente.

2.12 Microtomógrafo de Raio-X

Esta tecnologia funciona com uma observação completa em 3D da amostra de dentro para fora, utilizando radiação eletromagnética, sendo possível observar vários aspectos das amostras como porosidade e estrutura morfológica dos materiais, e é aplicável em diversas áreas do conhecimento como a geologia, estudo dos fósseis, medicina, ciências dos materiais e engenharia. Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre a técnica de Microtomografia de Raios-X, apresentando seus princípios de funcionamento, principais formas de utilização e aplicações encontradas como mostrado na figura 11.

Figura 11 - Microtomógrafo de Raio-X de bancada.



Fonte: Shimadzu (2014)

A Microtomografia Computadorizada de Raios-X (μ -CT) é uma técnica não destrutiva que reconstrói e modela estruturas de amostras em escala micrométrica (milésimos de milímetros), com resolução e contraste aplicáveis a vários problemas atuais na área da química de sólidos e materiais. Tal técnica fornece um mapa preciso da atenuação de raios-X em uma amostra, independente da existência de uma subestrutura de diferentes fases bem definidas (ABREU; SILVA, TONEZER, 2014).

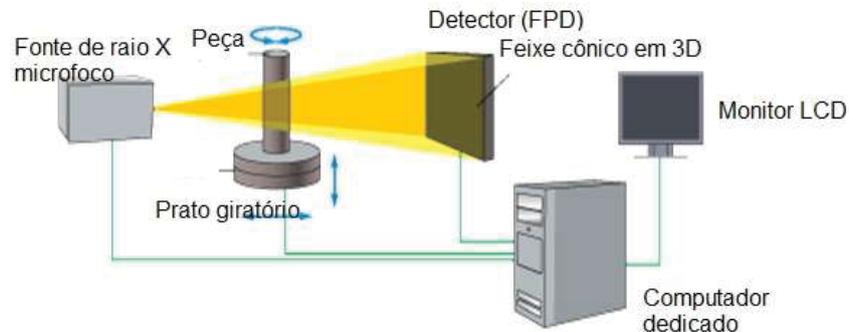
Quando os Raios-X passam pela amostra, eles são atenuados em intensidades distintas, dependendo das diferenças entre os coeficientes de atenuação linear das fases contidas (LANDIS, et al., 2010).

Na tomografia computadorizada é feita uma reconstrução matemática com os dados adquiridos das projeções de Raios X na amostra, para produção de cortes transversais, perpendiculares à dimensão axial do material analisado (SKYSCAN, 2013).

2.12.1 Componentes básicos do equipamento

Os componentes básicos de um tomógrafo são: fonte de raios-X, detector e um sistema de rotação (MEES et al., 2003). Os tomógrafos mais antigos possuem a geometria do feixe de raios-X em paralelo, onde a fonte realiza movimentos de rotação e translação, já os modelos mais atuais possuem a geometria do feixe cônico, sendo que a amostra é colocada à rotacionar sobre seu próprio eixo. As principais partes do microtomógrafo podem ser visualizadas na Figura 12.

Figura 12 - Principais componentes de um Microtomógrafo de Raios-X.



Fonte: Shimadzu (2014)

2.13 Backings Cerâmicos

Desde sua introdução no segmento de naval e offshore, o uso de *Backings* Cerâmicos vem crescendo constantemente. Hoje são utilizados para diversas fabricações, como, por exemplo, pontes, vasos de pressão e caldeiraria em geral. Esse crescimento foi estimulado pela busca da produtividade e pelos resultados obtidos com a utilização deste material de apoio para a soldagem.

A utilização de *backings* cerâmicos possibilita a utilização de correntes de soldagem mais altas para o passe de raiz e elimina a necessidade de goivagem, contras solda e passe de selagem. O material também proporciona alta qualidade de raiz e facilidade de uso.

O modelo utilizado foi o OK *Backing* Concave 9, espessura 7,3 mm, largura 27 mm, abertura 9 mm, e profundidade 1,3 mm. Este tipo de *backing* possui o chanfro no formato côncavo e é utilizado na soldagem de consumíveis que geram pouca ou nenhuma escória, como arames sólidos (GMAW), arames tubulares básicos e arames tubulares *metal cored* (MCAW). É ideal para soldagem unilateral topo a topo e de chanfros em “V”. Possui fita adesiva de alumínio para fixação. Com a utilização de *backing* cerâmicos, as seguintes vantagens são observadas:

- Possibilidade de utilização de maiores correntes de soldagem para o passe de raiz, facilitando a soldagem total da junta na raiz;
- Alta qualidade do cordão de soldagem na raiz;
- Eliminação da goivagem, contrassolda e passe de selagem (enchimento), diminuindo a possibilidade de inclusão de material cerâmico do abrasivo no corpo de prova ou na junta;

- Maior facilidade de utilização.

O *backing* é fabricado de materiais inertes e não provoca nenhum tipo de alteração na composição química e nas propriedades mecânicas do material depositado. Esse material é seco e não possui tendência a absorção de umidade, o que garante alto desempenho na soldagem de consumíveis de baixo hidrogênio. A linha OK (ESAB) é constituída de diversos tipos e dimensões, cobrindo as mais variadas aplicações. A fita adesiva para a fixação do *backing* na peça é de alta qualidade, permitindo uma colagem eficiente e resistente para a aplicação da solda. Na Figura 13, são apresentadas as características do *backing* cerâmico.

A escolha do *backing* cerâmico no processo de soldagem é a eliminação de um passe de solda na face inferior do corpo de prova, pois a concavidade existente no *backing* cerâmico conforma a raiz do cordão. Para a soldagem, foi utilizado o *backing* OK Concave 9 ESAB, pois suas características construtivas atendem a necessidade de soldagem, conforme pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - *Backing* cerâmico selecionado.



Fonte: ESAB – Catálogo de *Backings* Cerâmicos (2012)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada nos procedimentos para verificar a influência nos corpos de prova soldados com diferentes gases de proteção, com e sem aquecimento, e utilizando os parâmetros: velocidade de soldagem; amperagem; voltagem; metal de adição e posição de soldagem fixos.

3.1 Material base

Os experimentos foram realizados em amostras retiradas de chapas alumínio 5083-O, estado recozido, com espessura de 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ "), cortadas nas dimensões de 220 x 250 mm, utilizadas para a confecção dos corpos de prova. A composição química da chapa ensaiada é apresentada na Tabela 2 e estão de acordo com valores estabelecidos nas normas de referências.

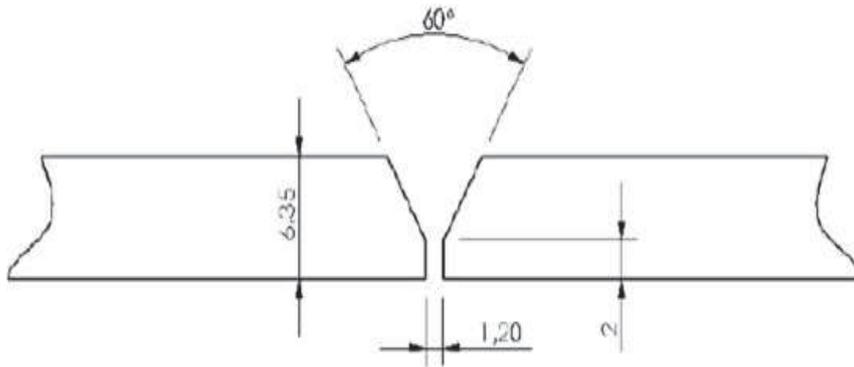
Tabela 2 - Composição química da chapa de alumínio AA 5083-O

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Bi	Sb	Ti
0,126	0,43	0,046	0,44	4,38	0,048	0,25	0,014	0,075	0,02

Fonte: Laboratório de materiais da UPF - FOUNDRY – MASTER Xline Série 59R0180. UPF (2014).

A usinagem das chapas para a obtenção da geometria do chanfro foi executada em centro de usinagem com comando numérico marca ROMI, está alocada no Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo. O chanfro foi executado com 30° medidos da face de corte dos corpos de prova, deixando aproximadamente 1,5 mm de espessura da ponta do corpo de prova, comumente chamado de nariz. A Figura 14 apresenta a seção transversal do corpo de prova.

Figura 14 - Secção transversal do corpo de prova (medidas são em milímetros)



Fonte: Autor.

3.2 Material de adição

O material de adição (consumíveis) mais indicados e utilizados para a soldagem de chapas de alumínio AA 5083, também devem ser da mesma série, com composição química semelhante. Além disso, deve atender algumas propriedades necessárias para a integridade da junta com relação a trincas de solidificação, ductilidade, resistência mecânica da junta soldada, temperatura de serviço e resistência à corrosão.

Selecionar a melhor liga para metal de adição ou enchimento para uma dada aplicação depende do desempenho desejado em relação à soldabilidade, resistência, ductilidade, e resistência à corrosão. (HAKEM et al., 2012).

O metal de adição utilizado para a soldagem dos corpos de prova deste trabalho é o OK Autrod 5183 - ESAB, com diâmetro de 1,2 mm e em bobinas com 9 kg. Este material de adição é projetado para fornecer a maior resistência mecânica na junta soldada, proporcionando as melhores condições de soldagem para as ligas de alto magnésio.

A liga deste consumível é tipicamente usada para aplicações estruturais, nas quais fatores como alta resistência, dureza elevada, fratura para resistência ao impacto e à exposição a elementos corrosivos e corrosão marinha são relevantes. A liga não é recomendada para aplicações com temperaturas elevadas devido à sua suscetibilidade à corrosão sob tensão (ESAB, 2014). A Tabela 3 apresenta a composição química do metal de adição.

Tabela 3 - Composição química nominal da liga 5183

Fe	Si	M	M	Zr	Cr
< 0,4	< 0,4	0,5 - 1,0	4,3 – 5,2	0,05	0,05 – 0,25

Fonte: Salvi (2014)

O trabalho de Salvi (2014) cita que o metal de adição destas ligas de alumínio geralmente é a parte mais frágil da junta e é o local onde ocorrerá a falha, devido a sua menor resistência e pode ser observado na Tabela 4. Isto está em contraste com a maioria das ligas de alumínio tratáveis termicamente ou ligas de aço, em que a zona afetada pelo calor geralmente é o local mais propício a romper. Nesta situação, pode-se observar que a junta soldada da liga e a zona termicamente afetada são praticamente semelhantes em termos de propriedades mecânicas.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do metal base e do metal de adição utilizados.

LIGA	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	σ_{esc} (MPa)
AA 5083-O ¹	292,5	176,6
ER 5183 ²	275	125

Fonte: 1 - Ensaio realizado no laboratório de materiais da UPF

2 – Dados fornecidos pelo fabricante

3.3 Soldagem dos Corpos de Prova

De cada chapa soldada, após a realização da união foram extraídos três corpos de prova para ensaio de tração, dois para o ensaio de dobramento, sendo um de face e um de raiz, e um corpo de prova localizado na parte central da peça soldada para o ensaio da microdureza, macrografia e posterior e análise da porosidade no Microtomógrafo de Raio-X conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Distribuição dos corpos de prova na chapa soldada.



Fonte: Autor (2014)

Para as análises dos corpos de prova retirados das chapas para cada condição avaliada, foi cortada nas dimensões de 220 mm de largura por 20 mm de comprimento. A Figura 16 mostra os corpos de prova seccionados da chapa e preparados para ensaio.

Figura 16 - Chapa soldada pelo processo MIG automatizado



Fonte: Autor (2014)

Para a soldagem das chapas foram utilizadas as seguintes variáveis: gás de proteção e temperatura de pré-aquecimento. Já o metal base, o metal de adição, velocidade de soldagem, corrente de soldagem, tensão, vazão de gás de proteção e sentido de soldagem (Puxando), ângulo de soldagem, foram mantidos fixos para soldagem de todos os corpos de prova. A

Tabela 5 apresenta a metodologia adotada para orientar a soldagem das chapas e referência para os ensaios.

Tabela 5 - Condições de soldagem dos corpos de prova.

Condição	Chapas	Gás de Proteção	Pré aquecimento
A	1 - 5	Argônio 100%	Sem
B	2 - 6	Argônio 100%	Com
C	3 - 7	75% Argônio + 25% He	Sem
D	4 - 8	75% Argônio + 25% He	Com

Fonte: Autor (2014)

Para auxiliar a identificação dos corpos de prova foram criadas as condições A, B, C e D estas são a união das chapas soldadas com os mesmos parâmetros (gás de proteção e temperatura de pré-aquecimento). As condições serão utilizadas para representar os resultados deste trabalho.

Cada condição é composta por 2 chapas soldadas independentemente, tendo uma configuração de gás específica e de temperatura.

3.3.1 Parâmetros de Soldagem

Baseado em dados disponíveis na literatura, alguns pré-testes foram conduzidos para se obter o ajuste ideal dos parâmetros de soldagem, afim de se conseguir a penetração total da junta.

A soldagem foi realizada em dois passes, sendo o primeiro passe de raiz e o segundo de preenchimento. Antes de ser efetuado o segundo passe, realizou-se a limpeza da junta soldada, por meio de escova de aço inoxidável circular rotativa, com o objetivo de retirar as impurezas do passe anterior. Os parâmetros utilizados para a soldagem dos corpos de prova são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros para a soldagem MIG para o passe de raiz e segundo passe.

Corrente de soldagem (A)	Tensão de Soldagem (V)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	Vazão de gás (L/min)
190	21	830	20

Fonte: Autor (2014)

Para melhor proteção gasosa da região próxima ao arco elétrico (poça de fusão), a regulagem da tocha de soldagem do robô foi posicionada sob um ângulo de 12° e o avanço de deslocamento negativo da esquerda para direita ou comumente dito como puxando, conforme a Figura 17. Estes ajustes foram utilizados para a soldagem de todas as chapas.

Figura 17 - Posicionamento da tocha de soldagem em relação a chapa de alumínio

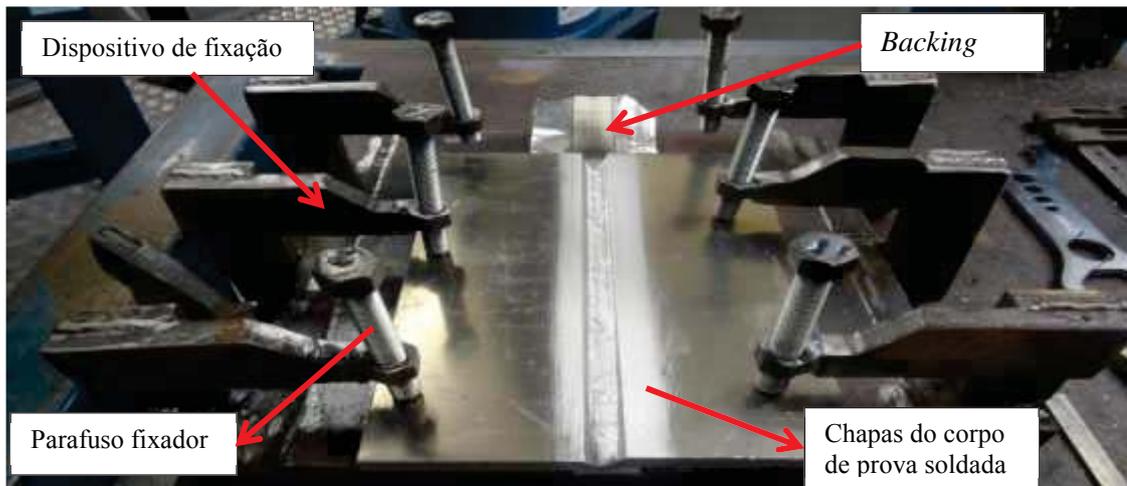


Fonte: Autor (2014)

3.4 Dispositivo de fixação das chapas para soldagem

O dispositivo de fixação mostrado na Figura 18 foi utilizado para facilitar a montagem das chapas de alumínio sobre o *backing* cerâmico. Ainda, como a distorção pode promover ao corpo de prova um empenamento na união, o dispositivo reduziu a distorção longitudinal das chapas durante soldagem. O mesmo foi fabricado todo em aço ao carbono ASTM SAE A36, os fixadores das chapas são barras roscadas M12.

Figura 18 - Dispositivo para auxiliar a fixação das chapas para a soldagem



Fonte: Autor (2014)

3.5 Pré-aquecimento

Na soldagem de alumínio, o uso de pré-aquecimento e de um maior aporte térmico é comum na soldagem de juntas de maior espessura. Para garantir a formação da poça de fusão e evitar problemas de falta de fusão, o pré-aquecimento na soldagem do alumínio não deve ser superior a 200°C. Os problemas metalúrgicos de soldabilidade do alumínio e suas ligas são a formação de porosidade pelo H_2 , a formação de trincas de solidificação e a perda de resistência mecânica, isso para metal de base encruado ou endurecível por precipitação.

O propósito principal do pré-aquecimento dos corpos de prova foi a tentativa de redução da umidade no material de base, bem como aumentar a temperatura durante a soldagem para facilitar a saída dos gases formadores das porosidades.

O aquecimento dos corpos de prova foi realizado com uma estufa elétrica construída para atender a necessidade deste trabalho, como mostrado na Figura 19. A estufa é composta por uma caixa fabricada em MDF, com dimensões de 500 mm de largura, 500 mm de comprimento e 450 mm de altura forrada com manta de lã de rocha com espessura de 50 mm e protegidas por chapa de aço ao carbono galvanizada com espessura de 0,6 mm, duas resistências elétricas fixadas nesta chapa elevam a temperatura dos corpos de prova até a temperatura 120°C temperatura esta que atende os requisitos da norma ASW D1.2/D1.2M (2008).

Como citado por Mathers (2002) a temperatura de pré-aquecimento pode ser utilizada antecedendo a soldagem desde que não sejam ultrapassados 200°C e que a peça não permaneça por mais de 15 minutos a esta temperatura.

A variação da temperatura da estufa foi identificada em aproximadamente 3°C, desta forma a temperatura efetiva da chapa pode atingir entre 117 e 123°C, sendo medida por meio de um termostato de contato, controlado pelo display digital alimentado com uma tensão de 220V, a estufa é composta por duas resistências que possuem 1000W (cada uma) e estão conectadas ao display digital que faz o monitoramento da temperatura.

O pré-aquecimento dos corpos de prova antes da soldagem é realizado conforme os passos a seguir descritos:

- 1) Início do programa de soldagem e do deslocamento do robô;
- 2) Colocação da estufa sobre o dispositivo com as chapas de alumínio já fixadas sobre o *backing* cerâmico;
- 3) O termostato de contato é posicionado sobre a chapa de alumínio;
- 4) A estufa é ligada até a temperatura do corpo de prova atingir 120°C;
- 5) Retira-se a estufa;
- 6) O robô inicia a soldagem aproximadamente 3 segundos depois da retirada da estufa;
- 7) É verificada a integridade do cordão de solda;
- 8) Limpeza mecânica do cordão para a retirada dos fumos de solda e possíveis resíduos que possam comprometer o passe seguinte após a escovação é realizada a limpeza do cordão com acetona e algodão;
- 9) Repetem-se todos os passos novamente até ter a totalidade das soldas realizadas.

Figura 19 - Estufa para pré-aquecimento, Figura (a) Vista interna da estufa Figura (b) o controle de temperatura.



Fonte: Autor (2014)

A estufa atendeu as necessidades impostas para este trabalho, em teste realizado posterior a soldagem dos corpos de prova à estufa elevou a temperatura de uma chapa de alumínio até a temperatura de 250°C comprovando assim a eficácia da estufa.

3.6 Gás de proteção

Na escolha dos gases de proteção da poça de fusão também é considerada importante à relação existente entre a intensidade da corrente e a tensão elétrica. Para comprimentos equivalentes do arco, o hélio apresenta tensão apreciavelmente maior que o argônio, o que indica o uso de hélio em caso da soldagem de metais de boa condutibilidade térmica e elevados pontos de fusão; todavia, a estabilidade do arco é também fator importante, fazendo com que se prefira o argônio ao hélio. Além disto, o argônio é mais denso e possui um potencial de ionização menor, o que favorece a abertura do arco sem considerar seu menor custo. Os gases de proteção formados por He e Ar ou misturas deles apresentam maior aplicação em metais não ferrosos (TATAGIBA; GONÇALVES; PARANHOS, 2012).

Dentre os gases de proteção utilizados no processo GMAW, por exemplo, o argônio é o gás que apresenta menor condutividade térmica para qualquer faixa de temperatura na atmosfera do arco. A Tabela 9 mostra o potencial de ionização (PI) e a condutividade térmica (CT) de gases utilizados normalmente em proteção na soldagem a arco elétrico.

Tabela 7 - Potencial de ionização e condutividade térmica dos gases argônio e hélio.

Gás de proteção	Símbolo	PI (eV)	CT (mw/mK)
Argônio	Ar	15,8	16,4
Hélio	He	24,6	142,6

Fonte: Tatagiba, Gonçalves, Paranhos (2012)

Como várias literaturas citam que a soldagem MIG das ligas de alumínio é dada como difícil à adição de gás hélio aumenta a temperatura da poça de fusão facilitando a penetração do metal de adição e auxiliando a saída do hidrogênio, este um dos principais agentes causadores da porosidade. Para a soldagem dos corpos de prova foi utilizado uma mistura comercial com dois gases de inertes: Argônio 75% e Hélio 25% e o gás argônio 100% com grau de pureza de 99,998%, com o objetivo principal simular os gases mais utilizados pelas indústrias.

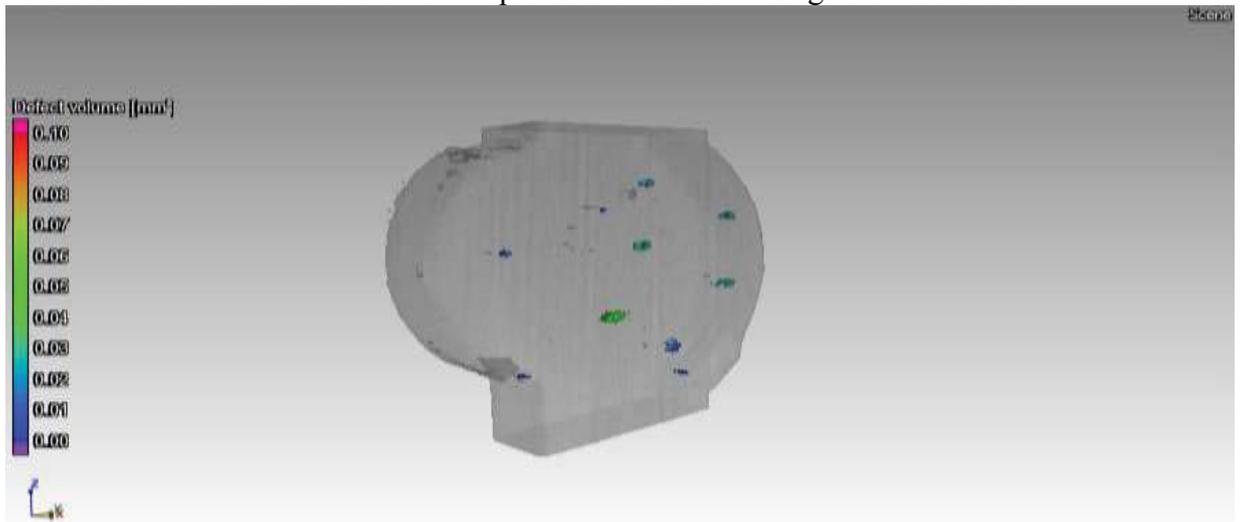
3.7 Quantificação da porosidade

O objetivo principal deste trabalho é a quantificação da porosidade nas amostras soldadas em alumínio AA 5083 soldadas pelo de MIG automatizado por robô e comparar entre as condições qual possui menor formação de poros.

Devido a dificuldades para a quantificação total da porosidade em amostras de solda o presente trabalho faz a quantificação da porosidade por meio de um Microtomógrafo de Raio-X. Este aparelho possibilita a visualização da amostra analisada em três dimensões (3D) desta forma é possível quantificar o número total de poros ou vazios existentes na amostra podendo quantificar seu volume e localização (posição no plano da amostra) dentro da amostra ainda é possível analisar em qualquer face da amostra.

Esta análise pode ser verificada como exemplo na Figura 21 que mostra uma imagem retirada de uma amostra qualquer de um cordão de solda utilizada neste trabalho.

Figura 20 - Análise de uma amostra soldada por meio do Microtomógrafo de Raio-X.



Fonte: Microtomógrafo de RaioX - Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul, Universidade de Passo Fundo (2014)

A tomografia computadorizada produz uma imagem mais próxima do real por apresentar a atenuação média de cada pequeno elemento de volume, ordenando a informação de atenuação do feixe de Raios X, e traduzindo a informação de forma quantitativa, com uma precisão muito maior que a obtida por técnicas convencionais (ABREU; SILVA, TONEZER, 2014).

Para a realização dos ensaios pelo Microtomógrafo de Raio-X (μ -CT) as amostras do cordão de solda das condições A, B, C e D foram cortadas em fatias com espessura de 2 mm no sentido transversal do cordão de solda conforme Figura 22 - Corpos de prova para o ensaio de Microtomógrafo de Raio-X.

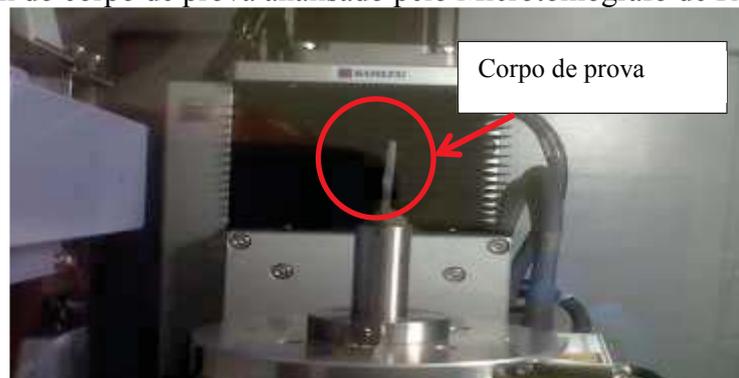
Figura 21 - Corpos de prova para o ensaio de porosidade a) corpo de prova mostrando a face do cordão b) Vista mostrando a numeração da sequência do ensaio e da retirada do corpo de prova do cordão.



Fonte: Autor (2014)

Neste ensaio, a numeração 1, 2 e 3 é a ordem de retirada dos corpos de prova do corpo de prova designado para a quantificação da porosidade de cada condição conforme apresentado na Tabela 5 – Condições de soldagem dos corpos de prova.

Figura 22 - Imagem do corpo de prova analisado pelo Microtomógrafo de Raio-X



Fonte: Microtomógrafo de Raios X - UPF – Soledade-RS (2014)

Após a análise realizada pelo Microtomógrafo de Raio-X é gerada a imagem que posterior será utilizada para gerar a imagem 3D da amostra analisada, das imagens em 3D foram realizadas análises para a quantificação de poros ou vazios desde $0,08 \text{ mm}^3$ até 10 mm^3

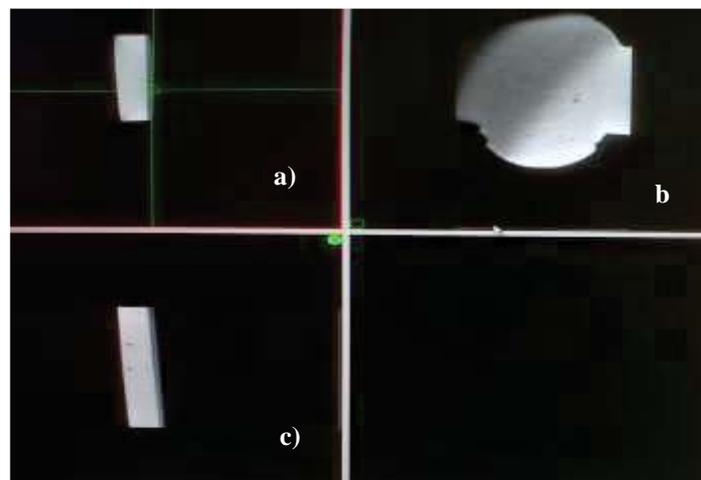
para todas as amostras analisadas. Para este trabalho foram analisadas 24 amostras sendo seis amostras para cada condição (A, B, C, D). Considerando que o equipamento identifica os elementos de acordo com a faixa dimensional, cada amostra foi analisada tendo utilizando dois critérios:

- a) Análise de porosidade com $0,08 \text{ mm}^3$ até 1 mm^3
- b) Análise de porosidade com 1 mm^3 até 10 mm^3 .

As imagens são geradas em três vistas estas são vistas referenciais estas gerarão a imagem em três dimensões (3D) possibilitando a análise da quantificação da porosidade.

Na etapa seguinte o microtomógrafo gera três imagens em escala de cor cinza onde são as análises iniciais das amostras a Figura 23 mostra as imagens geradas pelo equipamento que por essas imagens já é possível verificar os defeitos aparentes.

Figura 23 - Imagens geradas pelo Microtomógrafo de Raio-X. a) Vista frontal da lateral da amostra. b) Vista da secção transversal do cordão de solda da amostra. c) Vista frontal da lateral posterior da amostra.



Fonte: Microtomógrafo de Raios X - UPF-Soledade-RS (2014)

As imagens das amostras são armazenadas pelo programa de imagens do Microtomógrafo que a partir dessas gera as imagens em três dimensões das amostras possibilitando a quantificação da porosidade e verificação de outras análises se necessário.

A porosidade em soldagens GMAW observada aqui é principalmente atribuída à solubilidade de hidrogênio em alumínio. Tal como é sabido, há um átomo de hidrogênio de alta solubilidade no alumínio fundido, mas uma baixa solubilidade no estado sólido, e tal discrepância se tornam ainda mais significativa no alumínio-Mg e suas ligas, principalmente na

liga 5083. Conforme o trabalho de K. MUTOMBO (2010), supersaturação do hidrogênio na poça de fusão pode ser reduzida se a solidificação da região fundida for muito rápida para permitir a volatilização completa dos gases gerados durante a soldagem.

Na soldagem Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), o resfriamento é mais lento em comparação com a soldagem Gas Metal Arc Welding (GMAW), podendo ser um modo eficaz para reduzir a probabilidade de formação de porosidade. Além disso, as fontes de hidrogênio no processo de soldagem podem acontecer por outras razões. Para soldagem a arco, as possíveis fontes de hidrogênio incluem a base de metal, o metal de enchimento, e o gás de blindagem Martukanitz (1982).

Mathers (2002) e Anderson (2014) citam que a causa do surgimento da porosidade está diretamente relacionada com a velocidade do resfriamento do corpo de prova depois da soldagem. Sabemos que o argônio como gás de proteção aumenta a velocidade de solidificação da poça de fusão, fazendo com que os gases oriundos do processo de soldagem fiquem retidos, formando vazios ou poros. Ao ser promovido um acréscimo na temperatura de soldagem, e a adição do gás hélio na mistura, a temperatura de soldagem aumenta, ajudando a expulsar os gases da poça de fusão, e contribuindo para a redução da porosidade (ANDERSON, 2014).

Em seu trabalho Anderson (2014) mostra que a adição do hélio pode ter resultados que satisfaçam as necessidades pontuais, porém para um melhor resultado é necessário trabalhar no percentual deste gás na mistura. A porosidade pode ser diminuída por meio de vários fatores ligados diretamente e indiretamente ao processo de soldagem (LINCOLN, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A soldagem do alumínio é considerada dificultosa pois necessita da escolha correta do metal de adição, do processo de soldagem, dos parâmetros de soldagem, da geometria da junta de soldagem, do gás de proteção utilizado para conseguir um cordão de solda com qualidade e que atenda requisitos de projeto. Todas essas considerações são relevantes para obter uma união soldada com qualidade e que tenha suas características mecânicas iguais ao do metal base. Os resultados presentes neste trabalho são provenientes dos ensaios realizados.

Em todos os ensaios foram realizadas inspeções visuais, que tem por finalidade o controle de qualidade imediatamente e após qualquer operação de soldagem ou limpeza do cordão de solda executado seja ele manual ou automatizado. Todos os outros ensaios destrutíveis e não destrutíveis foram executados após rígida inspeção visual, que foi realizada à vista desarmada, ou com auxílio de lupa.

Esta inspeção foi realizada entre as etapas de cada processo executado com o objetivo de verificar possíveis descontinuidades visíveis e que possam interferir nos resultados finais dos ensaios.

4.1 Ensaios Mecânicos

4.1.1 Ensaio de tração

A finalidade do ensaio de tração é a obtenção dos valores de tensão absorvida pelo corpo de prova, assim é possível avaliar diversas propriedades mecânicas entre elas a tensão de escoamento, tensão máxima, alongamento.

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina de tração universal EMIC DL 10000 TRD28 com extensômetro Trd 06 para os ensaios as amostras foram usinadas conforme a norma ASTM E8m.

O metal de adição das ligas de alumínio principalmente da classe 5XXX, geralmente é a parte mais frágil da junta e é o local onde possivelmente ocorrerá a falha, devido a sua menor resistência. Isto está em contraste com a maioria das ligas de alumínio tratáveis termicamente ou ligas de aço, em que a zona afetada pelo calor geralmente é o local mais propício a romper. Nesta situação, pode-se observar que a junta soldada da liga e a zona termicamente afetada são praticamente semelhantes em termos de propriedades (SALVI, 2014).

Na análise dos valores apresentados no gráfico das tensões máximas para as condições A, B, C e D os valores não atingiram a tensão do metal de base, de 292,5 MPa. A condição “A” foi a que obteve o valor mais próximo a da tensão obtendo um valor de tensão de 260,47 MPa para esta condição a soldagem foi realizada sem pré-aquecimento de 120°C e o gás utilizado foi argônio 100%. O Gráfico 1 mostra os valores das tensões máximas (MPa) para as condições A, B, C e D respectivamente, em valores médios para 6 corpos de prova para cada condição (as barras indicam o valor do desvio padrão).

Gráfico 1 - Tensões máximas para cada condição estabelecida



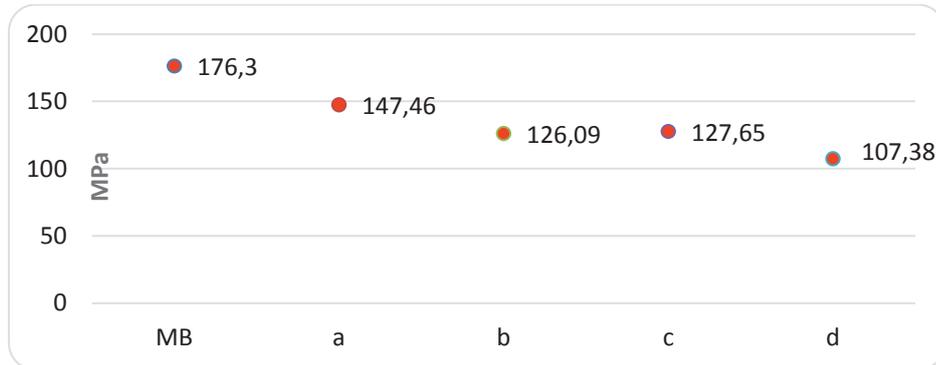
Fonte: Ensaio de tração UPF (2014)

No que se refere aos resultados do limite de escoamento, a soldagem dos corpos de prova foi executada com o eletrodo ER 5183 que possui a tensão de escoamento menor que a do material base os ensaios mostraram que a fratura ocorreu em sua maioria na região entre a ZAC e o metal base. Nas condições A, B e C os ensaios obtiveram a tensão de escoamento superior a do material de adição ou eletrodo que possui uma tensão de escoamento de 125 MPa, somente a condição “D” o valor ficou abaixo do valor da tensão de escoamento do eletrodo, com 107,38 MPa, esta condição a soldagem foi realizada com pré-aquecimento de 120°C e o gás de proteção utilizado foi mistura de 75% argônio e 25% hélio.

A presença do gás hélio na mistura do gás de proteção e pelo gás possuir a condutividade térmica oito vezes maior do que o argônio, pode ter provocado a fragilização da região e pelo acréscimo da temperatura. (TATAGIBA; GONÇALVES; PARANHOS, 2012).

O Gráfico 2 mostra os valores das tensões escoamento (MPa) das condições A, B, C e D, respectivamente comprovando os resultados.

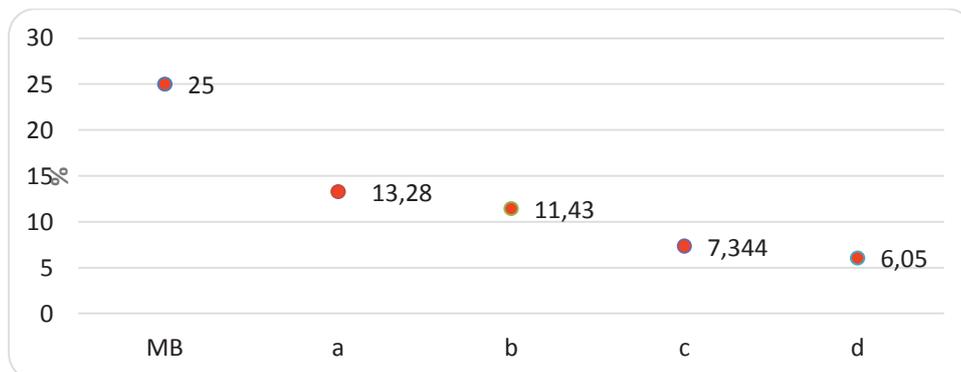
Gráfico 2 - Tensão de escoamento das condições A, B, C e D



Fonte: Ensaio dos corpos de prova – UPF (2014)

Os resultados apresentados dos ensaios de tração se repetiram para os valores do alongamento, em todas as condições os valores de alongamento foram inferiores ao valor do metal base. A diminuição do valor do alongamento pode ser explicada pelos valores da tensão de escoamento que por sua vez também ficaram abaixo do metal de adição e ainda a presença de porosidade nos metais de adição. Como o metal de adição possui menor resistência que a do metal de base os valores do alongamento ficam inferiores ao valor do metal de base (TATAGIBA; GONÇALVES; PARANHOS, 2012).

Gráfico 3 - Valores do Alongamento (%) das condições A, B, C e D.



Fonte: Ensaio de tração UPF (2014)

Conforme o trabalho de Salvi (2014) os valores tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento podem ter seus valores aumentados se for utilizado um metal de adição com resistência mecânica maior do metal de adição utilizado.

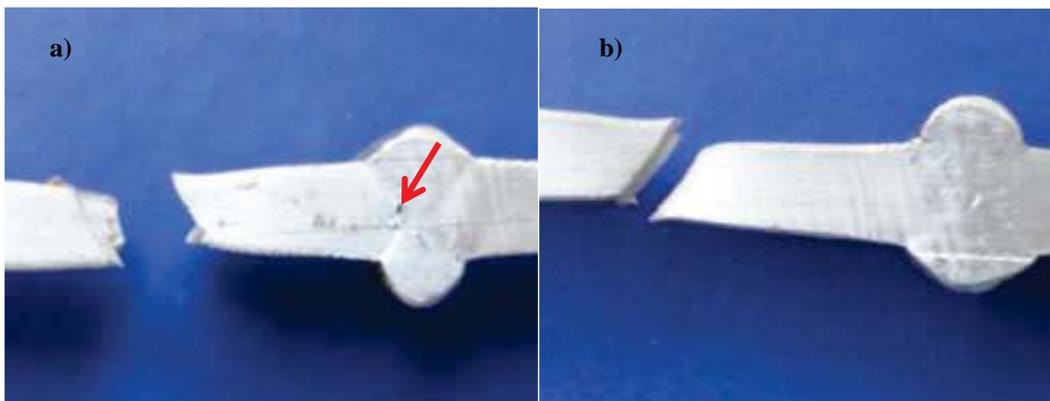
No que se refere a propriedades mecânicas, a liga do metal base possui uma tensão de escoamento (σ_{esc}) superior a do metal de adição. Assim podemos afirmar que os resultados encontrados nos ensaios de tração dos corpos de prova foram próximos a tensão de escoamento

do metal de adição, provocando assim a fratura dos corpos de prova na região da solda e não na região do metal base.

Para a ALCAN (1993) o metal de base indicado para a liga AA 5083 é o eletrodo ER 5183 por suas características mecânicas apropriadas para a sua aplicação, pois possui resistência mecânica ligeiramente maior que as outras ligas indicadas para a soldagem do alumínio série 5XXX. No caso das soldas, as fraturas ocorreram na maioria dos casos numa região que abrange o cordão de solda e a zona termicamente afetada do metal de base ou inteiramente no metal de solda dos 24 corpos de prova ensaiados em tração somente romperam no metal de base.

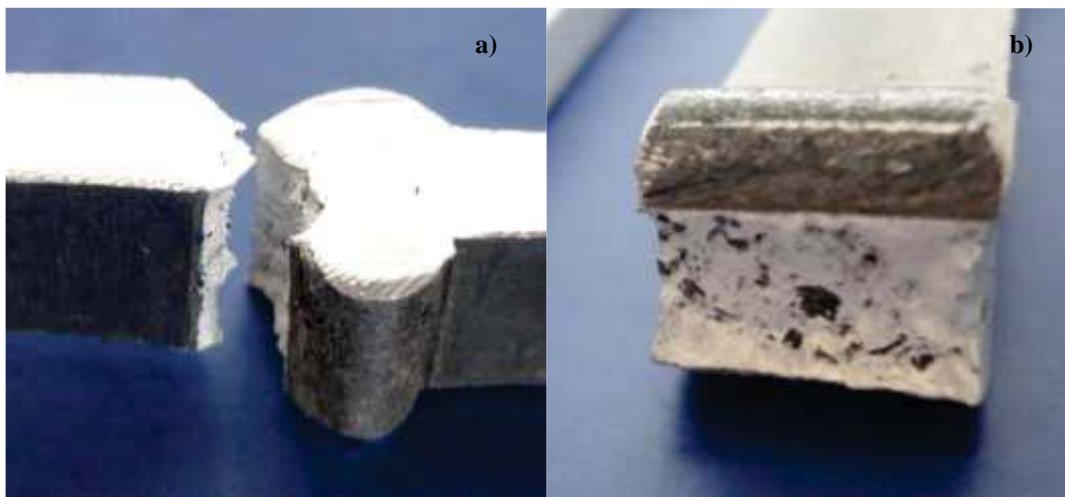
Alguns exemplos de fratura são apresentados na Figura 24 e ainda na Figura 25 e na Figura 26. Na Figura 24 a condição da foto (a) mesmo rompendo no ensaio de tração no metal base nota-se o surgimento de trincas dispostas paralelas ao cordão de solda. O gás de proteção quanto à temperatura de pré-aquecimento não tiveram influências na resistência mecânica da junta soldada, comprovando que como o metal de adição para as ligas da classe 5XXX possui menor resistência mecânica. Trincas ou fissuras irão ocorrer no metal de adição ou na região da solda, (GUNGOR, 2014).

Figura 24 - Corpos de prova aprovados no ensaio de tração a) corpo de prova 02 e b) corpo de prova 05.



Fonte: Autor (2014)

Figura 25 - Corpos de prova reprovados no ensaio de tração, a) Fratura na região entre a ZAC e o material de adição b) Face fraturada mostrando poros e inclusões.



Fonte: Autor (2014)

Figura 26 - Fratura originada na interface do metal de base e a ZAC



Fonte: Autor (2014)

O trabalho apresentado por Hakem (2012) pondera que pode-se observar que a junta soldada da liga 5XXX utilizando metal de adição com resistência inferior ao do metal base e a zona termicamente afetada são semelhantes em termos de propriedades mecânicas. Os resultados apresentam-se coerentes com os estudos realizados por Liu Yao (2012), nos quais se utiliza de um metal de adição com menor limite de resistência que o metal de base, sendo que os mesmos devem atingir no mínimo o valor de resistência especificado pelo fabricante e restringiu a obtenção de valores maiores ou iguais ao alongamento e tensões máximas das amostras.

O gráfico 01 mostra valores das tensões máximas (MPa) para as condições A, B, C e D respectivamente; Como o metal de adição possui 275 MPa de tensão máxima todas as condições ficaram com tensões menores (SALVI, 2014).

4.1.2 Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento é utilizado para verificar a ocorrência de defeitos no cordão de solda e foi observado na face convexa da solda. Os critérios de validação são estabelecidos conforme indicado na norma ASME Seção IX:

- a) Não existir nenhuma trinca ou outra imperfeição lateral excedendo 3mm em qualquer direção;
- b) Trincas originadas na superfície externa de dobramento, originadas durante o teste devem ser desconsideradas, a não ser que tenham mais de 6 mm.

Para realização do procedimento foram confeccionadas amostras retiradas de cada condição de ensaio. O ensaio de dobramento foi realizado em duas etapas, a primeira na face do corpo de prova, com o intuito de avaliar o comportamento da solda, e por segundo o ensaio de dobramento pela raiz da solda. Sendo que o ensaio de dobramento não é parâmetro para projeto, seu objetivo do ensaio é apenas avaliar a integridade do cordão de solda posterior ao ensaio. O equipamento utilizado para o ensaio foi uma máquina universal de ensaios, a disposição da amostra no ensaio é regulamentada pela NBR 06153 ANBT (1988).

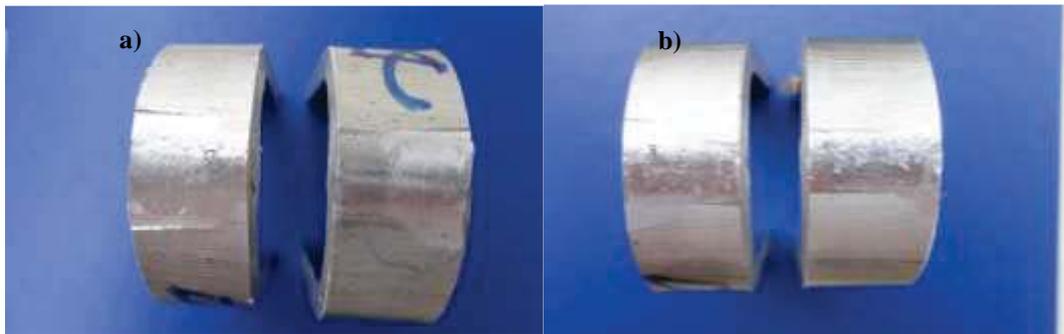
Para realização do procedimento, foram confeccionadas amostras retiradas de cada corpo de prova, conforme indicado na norma ASME (2010). Estes critérios já citados neste trabalho.

Para este trabalho foram criadas condições A, B, C e D onde cada condição é formada por corpos de prova soldados com os mesmos parâmetros e condições de temperatura.

Para cada condição foram ensaiados quatro corpos de prova um dobramento de face onde a ferramenta aplica a carga na face contrária ou na raiz do corpo de prova aplicando força de tração na face de raiz o segundo dobramento de raiz onde ferramenta aplica carga de tração na face do corpo de prova.

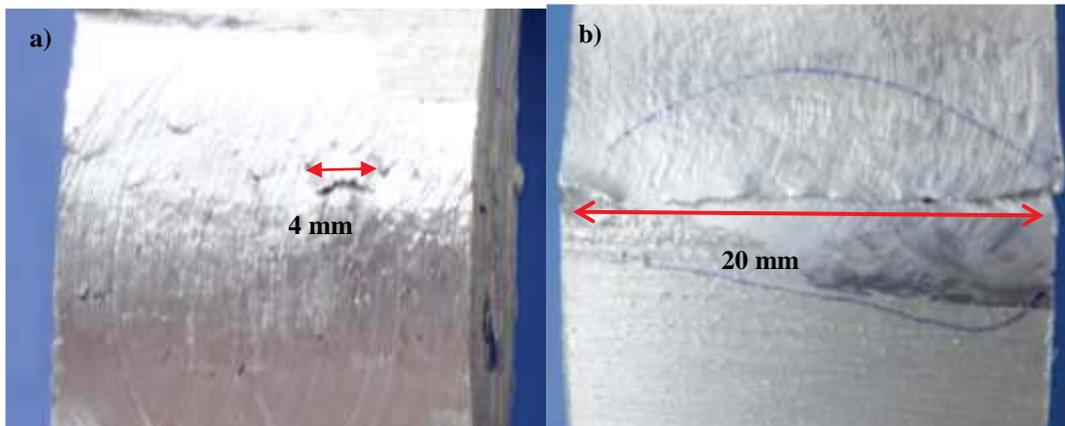
O trabalho de Gungor (2014) cita que o metal de adição destas ligas de alumínio geralmente é a parte mais frágil da junta e é o local onde ocorrerá a falha, devido à sua menor resistência. Isto está em contraste com a maioria das ligas de alumínio tratáveis termicamente, ou ligas de aço, em que a zona afetada pelo calor geralmente é o local mais propício a romper.

Figura 27 - Ensaio de dobramento a) face b) raiz



Fonte: Autor (2014)

Figura 28 - Detalhe da abertura de trinca nos corpos de prova, a) Trinca com 4 mm na dobra de face b) Trinca com 20 mm na dobra de raiz.



Fonte: Autor (2014)

Os resultados obtidos com os ensaios de dobramento foram realizados nos corpos de prova nas condições A, B, C e D e todos os ensaios foram reprovados.

4.1.3 Quantificação da porosidade por Microtomógrafo de Raio-X

Como o objetivo principal deste trabalho e a quantificação da porosidade foi realizada o uso de um Microtomógrafo de Raio-X. Os resultados mostram o volume e a distribuição dos poros de cada corpo de prova. Como citado por Mathers (2002) a porosidade pode ser de várias formas e tamanhos e também podem estar localizadas em diferentes posições dentro do cordão de solda, mais na superfície no meio do cordão de solda.

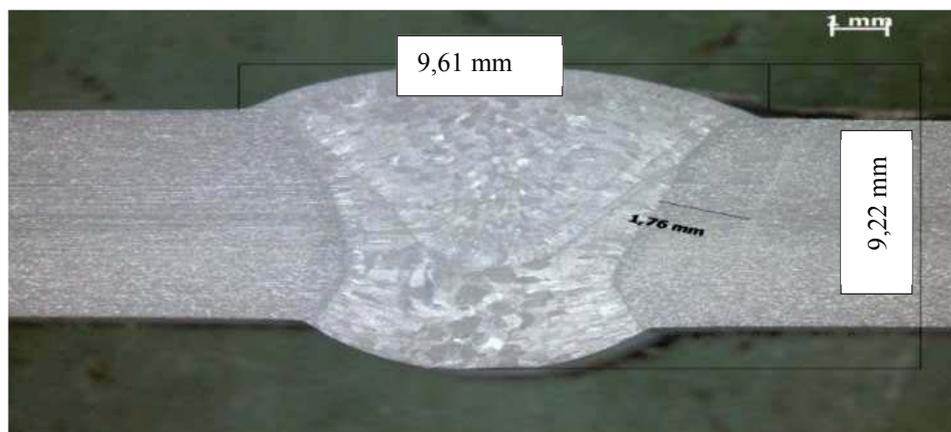
Como o Microtomógrafo de Raio-X gera uma imagem em três dimensões é possível saber a real localização de qualquer porosidade ou vazio analisado. Para este trabalho

utilizamos esse recurso somente para obter o diâmetro, o volume e a quantidade da porosidade (ABREU; SILVA, TONEZER, 2014).

Abreu, Silva, Tonezer (2014) citam em seu trabalho que o problema que afeta a capacidade de um tomógrafo de representar exatamente o material analisado é o ruído. A semelhança nos coeficientes de atenuação dos materiais dificulta a diferenciação entre determinadas partes da amostra. No processamento computacional do valor do pixel pode ocorrer um erro na forma e variação estatística e esta variação limita a resolução da densidade final.

Todas as amostras foram preparadas para atender as necessidades de operação do Microtomógrafo a partir destas amostras poderemos quantificar a porosidade existente em cada condição de soldagem. Para que a contagem da porosidade seja total ou possuir um grau de certeza maior foi mensurado o volume de cada amostra ensaiada no Microtomógrafo.

Figura 29 – Área do metal de adição (solda).



Fonte: Laboratório de materiais UPF (2014).

O valor dos volumes das amostras ensaiadas foi obtido a partir dos valores encontrados da ZAC da largura do cordão de solda e da altura do cordão de solda. Estas medições foram feitas nas amostras preparadas antes do ensaio de microdureza.

4.1.4 Quantificação da porosidade das condições A, B, C e D

Como pode ser observado na Tabela 8, os valores apresentados para o diâmetro e volume dos poros são médios correspondentes a 2 chapas e para cada chapa, 3 amostras, totalizando assim 6 leituras para cada condição. Já o volume da amostra e o número de poros trata-se de valor total.

Tabela 8 - Valores de porosidades para cada condição.

Condição	Diâmetros Porosidade (mm)		Volume Porosidade (mm ³)		Volume da amostra (mm ³)	Número de poros na amostra	Poros por mm ³
	Média	S	Média	S			
A	0,740	0,129	0,568	0,349	1075,3	266	0,2473
B	0,683	0,133	0,227	0,131	1001,2	148	0,1478
C	0,547	0,260	0,072	0,101	964,7	62	0,0642
D	0,677	0,113	0,490	0,397	1169,8	239	0,2043

Fonte: Ensaios de Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014)

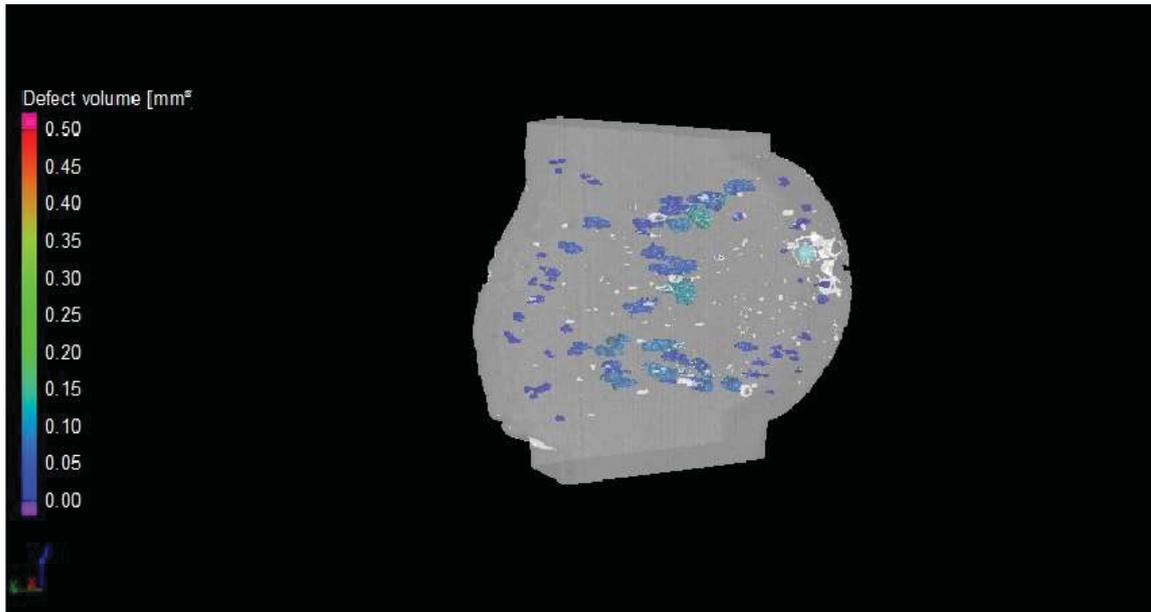
Para a condição “A” os valores encontrados são: o diâmetro médio dos poros é de 0,74 mm o volume médio dos poros na amostra foi de 0,568 mm³ e foram registrados 266 poros. Para o cálculo de quantificação da porosidade o volume total da amostra é de 1075,5 mm³ totalizando 0,59 % da amostra ocupada por poros.

Como nesta condição utilizou-se o gás de proteção argônio 100% e não foi utilizado o pré-aquecimento de 120°C o número da porosidade aumentou, a ausência do gás hélio que elevar a temperatura da poça de fusão para a expulsão dos gases gerados na fusão e mantém o cordão de solda mais quente diminuindo a solubilidade do hidrogênio e por consequência a diminuição da porosidade.

O baixo valor do alongamento é consequência da menor resistência mecânica do metal de adição utilizado, como o alongamento do metal de base é de 25% o esperado era um valor igual ou superior ao do metal base para esta condição, o valor encontrado foi de 13% muito abaixo, essa diferença interferiu nos resultados.

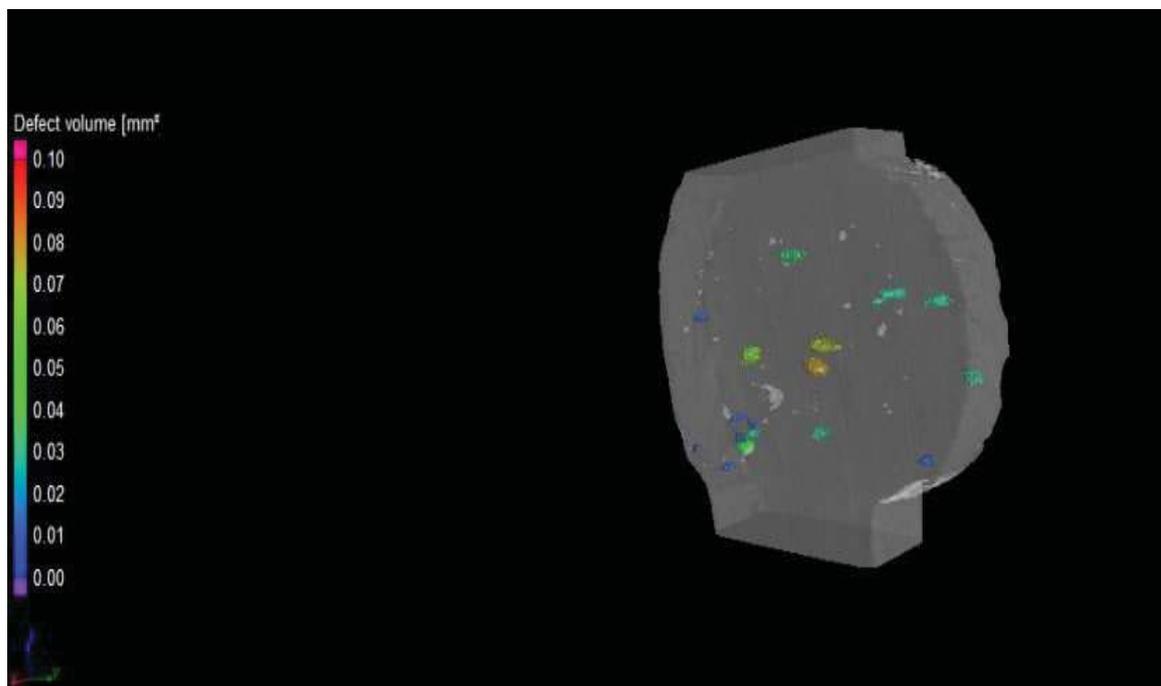
Na Figura 30 e na Figura 31 são mostradas as imagens das análises no Microtomógrafo de Raio-X para a condição “A”. A porosidade está representada pelas cores seguindo a legenda do gráfico identificando a porosidade e seu respectivo volume (mm³), as imagens na cor branca são as sombras geradas por imperfeições do acabamento superficial da amostra que não possuem influência na análise e nos resultados.

Figura 30 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição A



Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

Figura 31 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição A



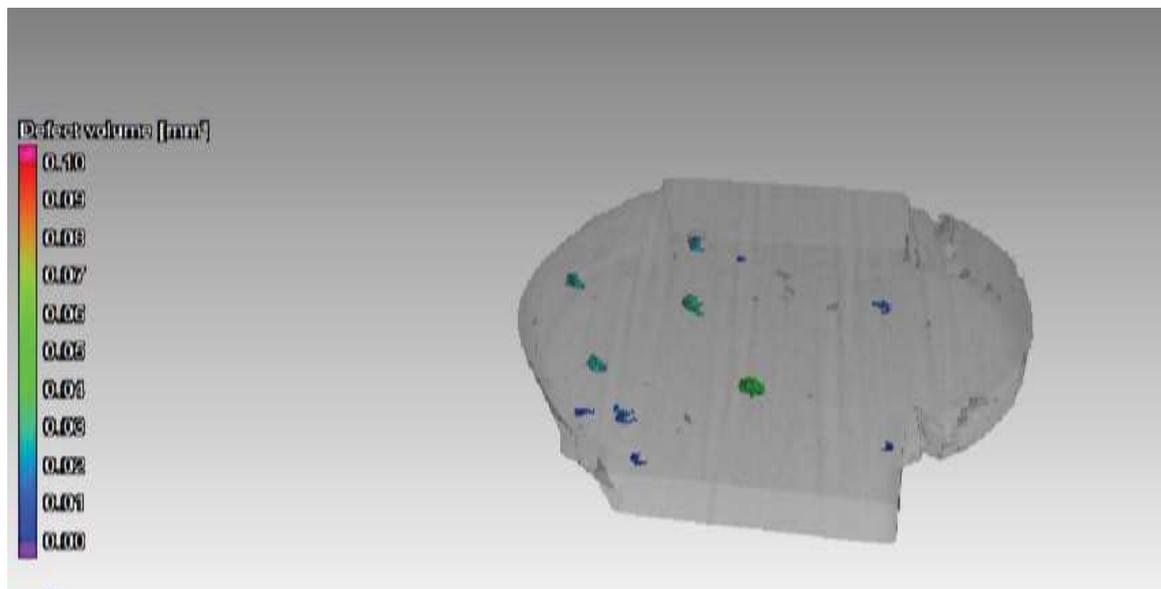
Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

Para a condição “B” os valores encontrados são: o diâmetro médio dos poros é de 0,683 mm o volume médio dos poros na amostra foi de 0,227 mm³ e foram registrados 148 poros ou vazios. Para o cálculo de quantificação da porosidade o volume total da amostra é de 1001,2 mm³ totalizando 0,27 % da amostra ocupada por poros.

Foi utilizado gás de proteção argônio 100% com pré-aquecimento de 120°C o número de porosidade em relação a condição “A” diminuiu foram encontrados 148 poros a ausência do gás hélio que eleva a temperatura foi compensada pelo pré-aquecimento antecedendo a soldagem o que ajudou a manter a temperatura em níveis acima da condição anterior assim promoveu a expulsão dos gases gerados na fusão mantendo o cordão de solda mais quente diminuindo a solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido e por consequência a diminuição da porosidade, conforme Mathers (2002).

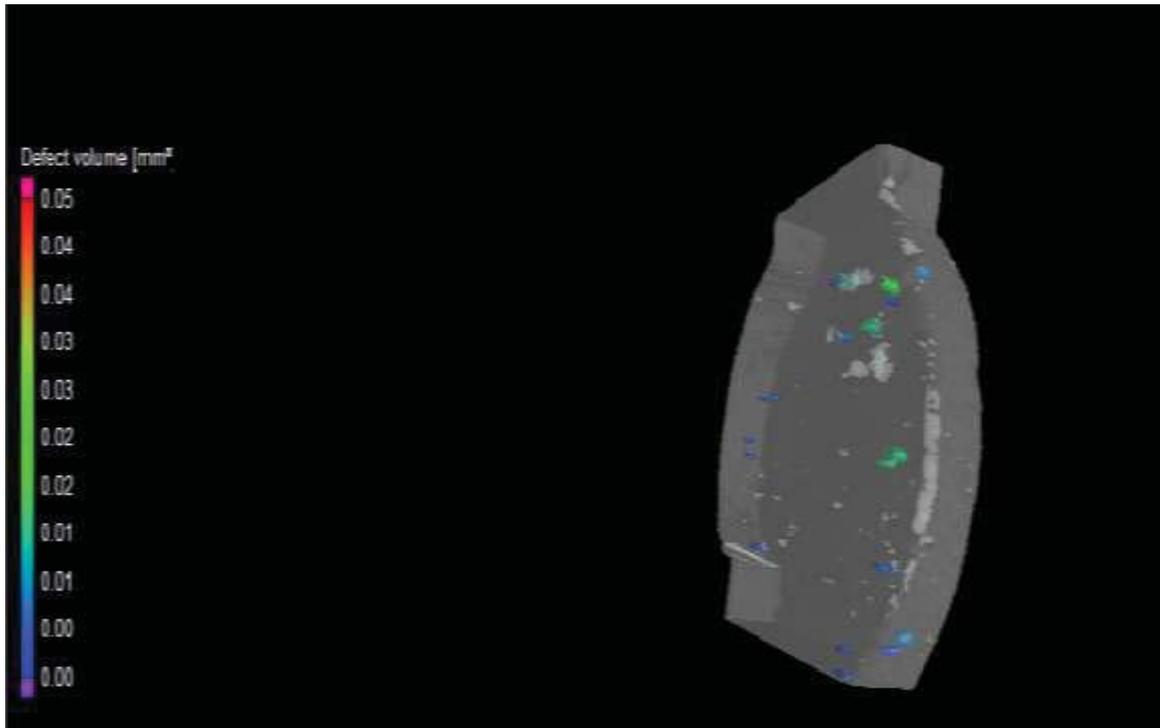
Na Figura 32 e na Figura 33 para a condição B são mostradas as imagens das análises no Microtomógrafo de Raio-X.

Figura 32 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição B



Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

Figura 33 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição B



Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

Se compararmos as condições “A” e “B” podemos considerar que, o gás de proteção contribuiu para a redução da porosidade. A condição “A” apresentou 266 poros ou vazios, onde a condição “B” apresentou 148 poros ou vazios uma redução de 44,3% na quantidade de poros. As tensões máximas das duas condições apresentaram valores inferiores ao do metal de base a tensão máxima da condição “A” teve um acréscimo de 26,6% em relação a condição “B” a tensão de escoamento a diferença entre a condição “A” e “B” apresentou uma diferença de 14,5% e os valores do alongamento a diferença entre as duas condições foi de 0,14%. Podemos considerar que essa tendência não se repete para as demais condições.

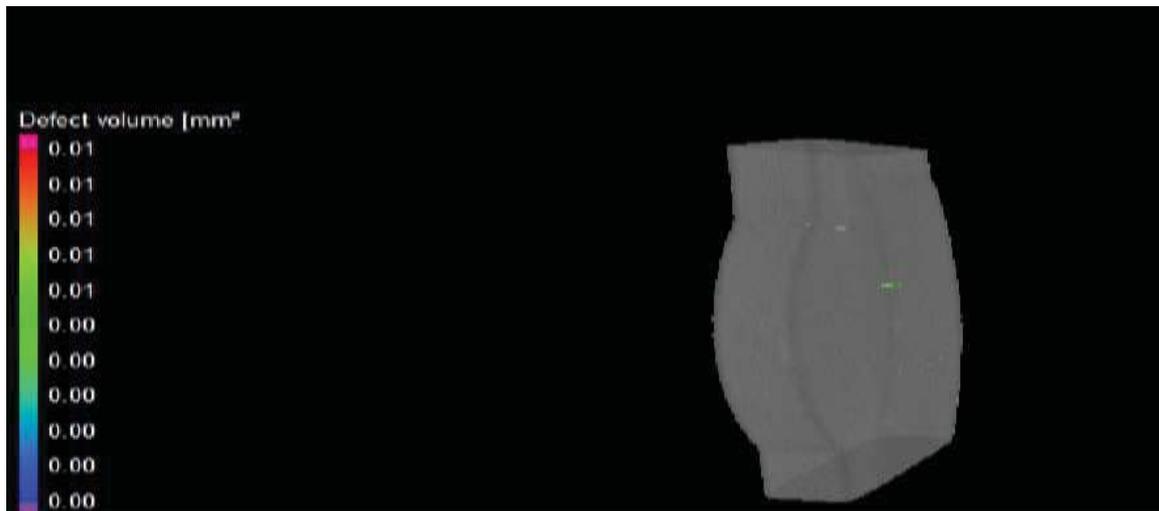
A condição “C” foi soldada com utilizando-se uma mistura de 75% de argônio e 25% de hélio e não foi utilizado o pré-aquecimento de 120°C esta condição foi a que apresentou o menor número de poros.

Como a mistura utilizada possui gás hélio este possui propriedades de elevar e manter a temperatura da poça de fusão este aumento da temperatura promove a expulsão dos gases gerados na fusão mantendo o cordão de solda mais quente diminuindo a solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido e por consequência a diminuição da porosidade em relação as demais condições, conforme Mathers (2002) Figura 01.

Para a condição “C” os valores encontrados são: o diâmetro médio dos poros é de 0,547 mm o volume médio dos poros foi de na condição foi de 0,072 mm³ e foram registrados 62 poros ou vazios. Para o cálculo de quantificação da porosidade o volume total da amostra é de 969,7 mm³ totalizando 0,07 % da amostra ocupada por poros.

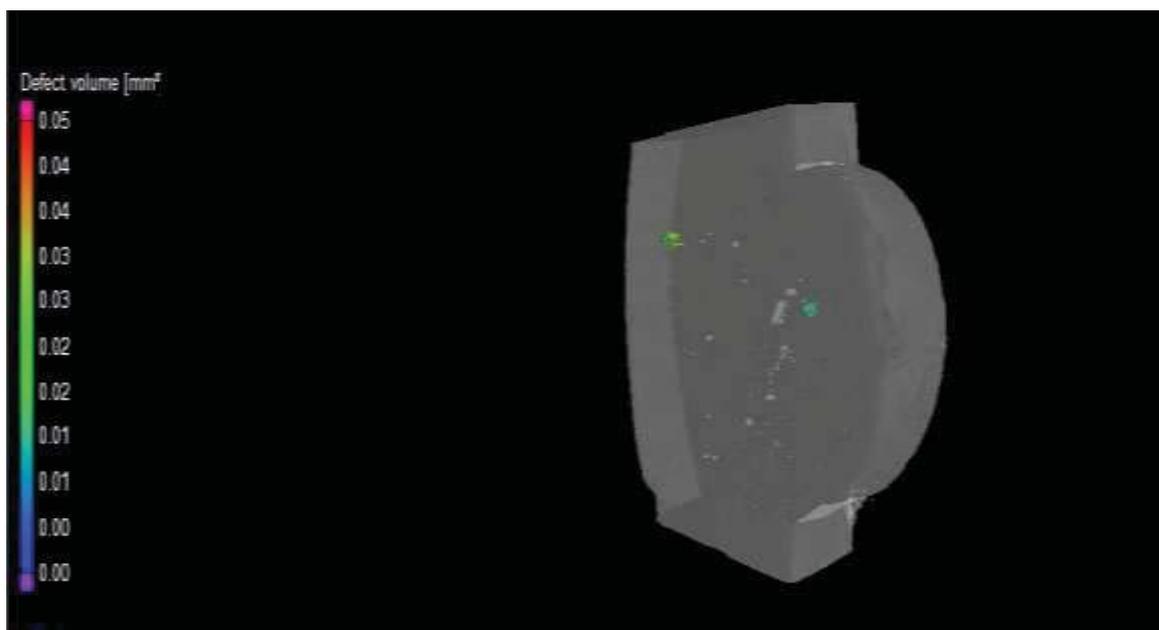
Na Figura 34 e na Figura 35 são mostrados os poros encontrados pela análise no microtomógrafo de Raio-X.

Figura 34 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição C



Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

Figura 35 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição C.



Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

A condição “D” foi soldada utilizando-se uma mistura de 75% de argônio e 25% de hélio com pré-aquecimento de 120°C esta condição foi a que apresentou o maior número de poros das demais condições.

Para a condição “D” os valores encontrados são: o diâmetro médio dos poros é de 0,677 mm, o volume médio dos poros na condição foi de 0,490 mm³ e foram registrados 239 poros ou vazios. Para o cálculo de quantificação da porosidade o volume total da amostra é de 1169,8 mm³ totalizando 0,5 % da amostra ocupada por poros.

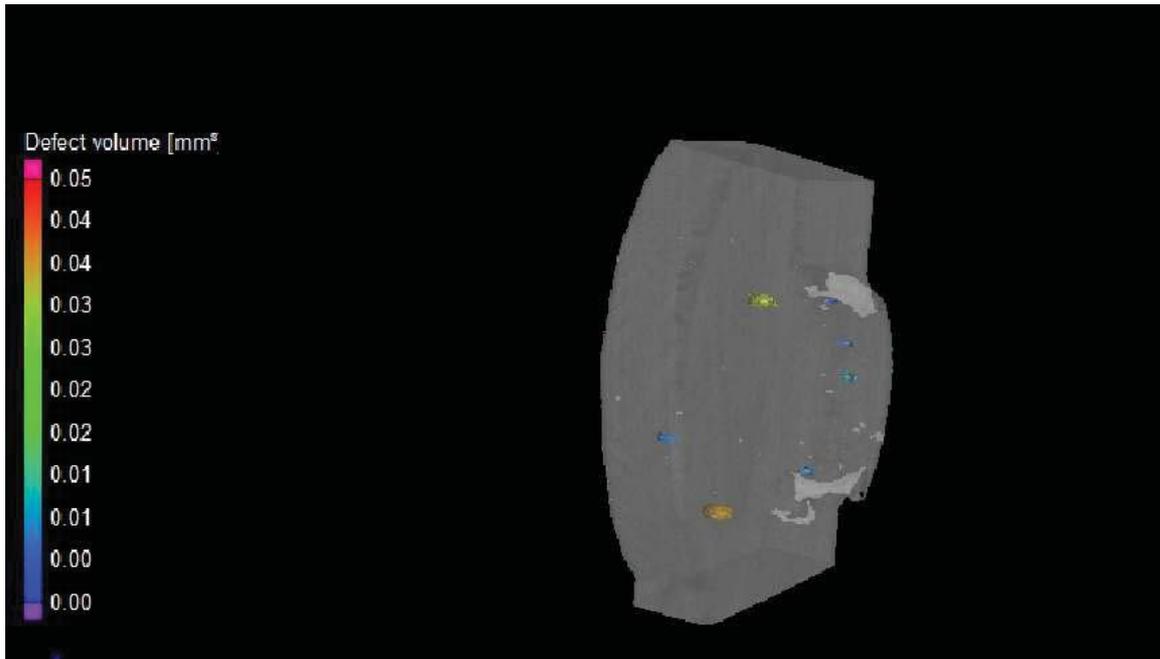
A mistura utilizada como gás de proteção para esta condição possui 25% do gás hélio este possui propriedades para elevar e manter a temperatura da poça de fusão o aumento da temperatura promove a expulsão dos gases gerados na fusão durante a soldagem mantendo o cordão de solda mais quente diminuindo a solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido e por consequência a diminuição da porosidade em relação as demais condições conforme Mathers (2002) Figura 01.

O pré-aquecimento de 120°C utilizado para auxiliar a diminuição do hidrogênio (umidade) nas chapas antes do processo de solda na tentativa de diminuir a formação da porosidade pode ter sido o principal agente do aumento da porosidade. Conforme Mathers (2002) a solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido aumenta com o acréscimo da temperatura a variação desta solubilidade mostra a ocorrência de supersaturação de hidrogênio, na parte posterior da poça de fusão, devido à sua menor temperatura em relação à região da poça de fusão.

Como o hidrogênio pode ser dissociado no arco, tornando-se mais reativo, existe a possibilidade de absorção deste elemento pela poça de fusão em teores superiores aos previstos pela equação, ocasionando, desta forma, uma formação de porosidade maior no cordão de solda (METHERS, 2002).

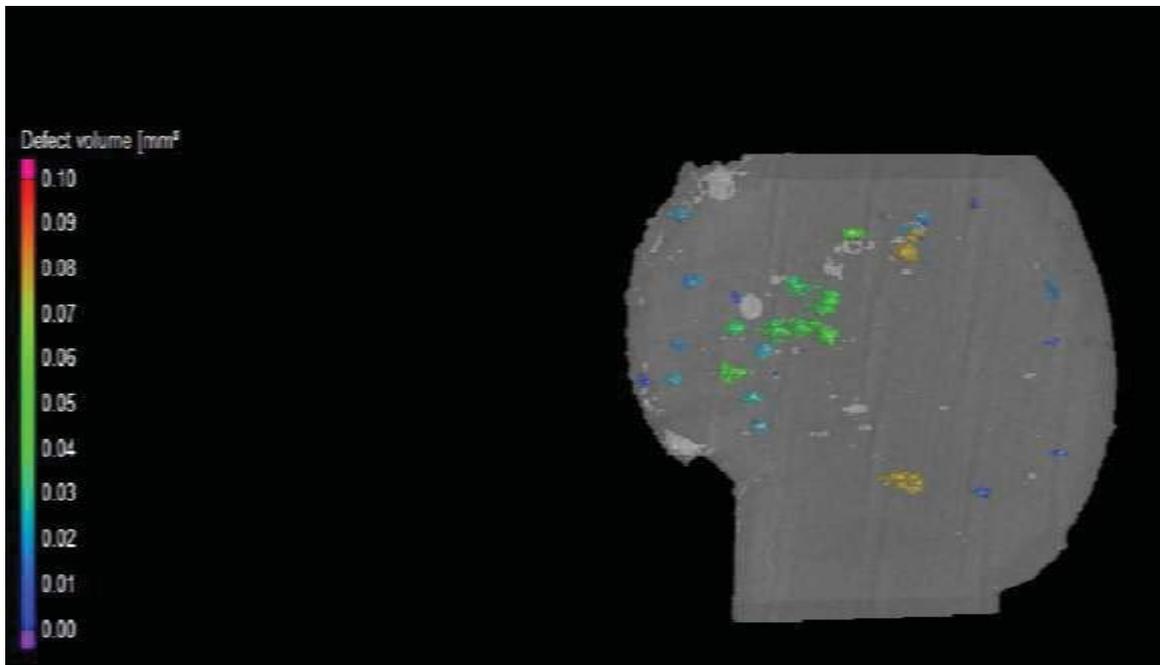
Na Figura 36 e na Figura 37 são mostrados os poros encontrados pela análise no microtomógrafo de Raio-X

Figura 36 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição D



Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

Figura 37 - Volume da amostra analisado por microtomografia para a condição D.



Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

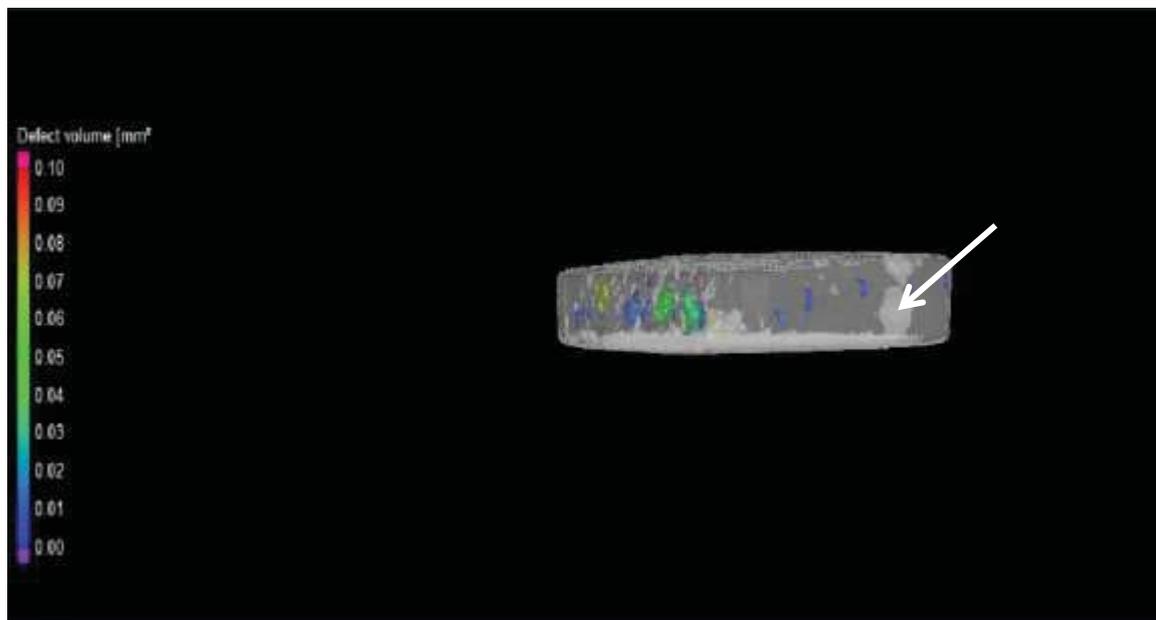
A Figura 38 apresenta uma vista da face lateral do corpo de prova, nesta imagem podemos visualizar a porosidade em cores, as manchas em tons de cinzas são os reflexos ou sombras das imperfeições no preparo das amostras (polimento).

Saliente-se que a condição inicial para a realização do teste é de que o corpo de prova deve obrigatoriamente apresentar espessura exata de 2 mm, com o objetivo de garantir as condições impostas pelo processo de geração das imagens através da testagem em microtomógrafo de raio-x.

No entanto verifica-se que o dimensionamento exato do corpo de prova apresenta-se de difícil consecução podendo gerar imperfeições em sua superfície, as quais devem ser lisas ou polidas.

A presença das manchas em tom cinza claro verificadas na figura 38, relativas às imperfeições no corpo de prova não influenciam nos resultados das análises.

Figura 38 - Vista de perfil de uma amostra da condição D.



Fonte: Ensaio do Microtomógrafo de Raio-X UPF (2014).

Pode-se destacar que o gás hélio aumenta como gás de proteção a temperatura da poça de fusão fazendo com que os gases formados durante o processo de fusão sejam expulsos antes da solidificação do alumínio líquido. O trabalho de Yau Liu et al. (2012) cita em tabela comparativa dos processos TIG e MIG o uso de uma mistura de gás de proteção para a soldagem do alumínio AA5083 pelo processo MIG comprovando que o hélio é o gás mais indicado para a soldagem do alumínio.

A redução da porosidade na condição C se deu pela adição do hélio como constituinte do gás de proteção sendo esta mistura a mais indicada para a soldagem dos materiais não ferrosos (TATAGIBA; GONÇALVES; PARANHOS, 2012).

Quanto à consecução dos objetivos propostos para este trabalho, pode-se concluir que a adição do gás hélio, como constituinte da mistura para a proteção da soldagem, é de grande acuidade, pois, ao serem utilizados, proporcionaram a redução da porosidade.

A quantidade do gás hélio em percentual na mistura neste trabalho foi utilizado 25% de hélio, pois o fornecedor do gás de proteção possui esta mistura pronta ou chamada de mistura comercial para trabalhos futuros esta porcentagem pode ser variada para níveis inferiores ao utilizado esta variação poderá resultar em respostas mais significativas em redução da porosidade.

4.1.5 Ensaio de dureza

A escala de dureza Vickers foi utilizada para os ensaios neste trabalho, seguindo a norma ASTM (2003). Utilizando como penetrador um diamante de base piramidal com um ângulo de 136° entre as faces opostas, aplicou-se uma carga de 0,5 kg por um tempo de 15 segundos. As amostras foram submetidas à preparação da superfície necessária para atender o ensaio. Todas as amostras foram preparadas seguindo o processo de lixamento com granas de lixas de 220, 440, 600, 800 e 1200. O polimento final foi realizado com pastas de polimento diamantadas para alumínio fornecidas pela empresa ARSYSTEM foi utilizado duas pastas, uma cinza com granulação de zero até ¼ de microns para o primeiro polimento e segunda pasta vermelha com um micron para a lapidação final das amostras.

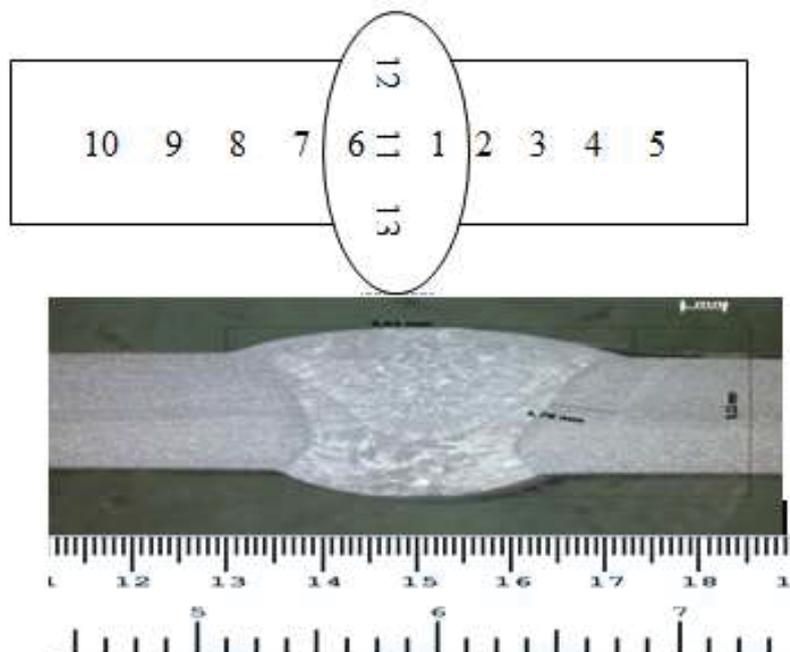
A dureza foi medida em treze (13) pontos ao longo da secção transversal das amostras. As diagonais geradas pelas impressões do penetrador foram medidas e convertidas em dureza Vickers. Para traçar o perfil de dureza, foram feitas marcações, espaçadas entre si por uma distância de aproximadamente 1,5 mm. A primeira marcação será posicionada a 1,5 mm do centro do cordão de solda, e as demais marcações percorreram o material no sentido transversal ao cordão de solda. A Tabela 9 apresenta as microdurezas dos ensaios.

Tabela 9 - Microdurezas das condições A, B, C e D

Análises	DUREZAS			
	A	B	C	D
1	55,4	55,4	51,7	58
2	58,1	53,75	55,15	61
3	53,2	53,75	45,65	59,95
4	56,95	55,25	55,75	61,65
5	40,95	57,3	59,15	55,05
6	50,95	54,75	57,75	60,35
7	53,6	52,85	52,65	56,6
8	53,05	54,4	57,6	54,5
9	50,95	53,85	57,2	54,15
10	55,5	53,35	51,45	51,35
11	55,1	56,45	56,05	44,45
12	51,55	54,65	53,5	52,25
13	57,2	55,8	53,2	59,7

Fonte: Autor (2014)

Figura 39 – Pontos de medição das durezas das amostras.



Fonte: Autor (2014).

A dureza do metal base encontrada foi de 79 HV todos os resultados dos ensaios foram valores abaixo da dureza do metal base como o metal de adição possui resistência mecânica menor do que o material de base à dureza fica reduzida acordando os valores encontrados. Hakem (2012) em seu estudo para mesma liga utilizando processo TIG encontrou um decréscimo de 20% e Mirihanage (2004) de 32% de redução na microdureza com processo MIG, todos para amostras de 6 mm de espessura. Salvi (2014) cita em seu trabalho que resultados semelhantes foram encontrados nos trabalhos de Koçak (2010) e Mochizuki, M; et al. (2006), onde provavelmente trabalhou-se em condições de “*undermatching*”, já que a força máxima cai para as amostras com soldas, mesmo na presença de defeitos. *Undermatching* é um termo utilizado quando se usa na soldagem um metal de solda de menor resistência que o metal de base. Em situação contrária, quando o metal de solda é mais resistente que o metal de base tem-se a condição *overmatching*.

O trabalho de Gungor (2014) cita que o metal de adição destas ligas de alumínio geralmente é a parte mais frágil da junta e é o local onde ocorrerá a falha, devido à sua menor resistência. Isto está em contraste com a maioria das ligas de alumínio tratáveis termicamente, ou ligas de aço, em que a zona afetada pelo calor geralmente é o local mais propício a romper desta forma ocorre à redução da dureza nestes pontos.

Conforme os resultados da microdureza na Tabela 10 nenhuma das condições obtiveram valores de dureza iguais ou superiores ao do metal de base de 79Hv. Como citado que no processo MIG a dureza pode ser reduzida em até 32% todos os valores das condições tiveram uma redução maior.

Tabela 10 - Durezas das condições

Condição de Soldagem	Dureza (Hv)
A	53,27
B	54,73
C	54,37
D	56,08
Dureza Material Base	79

Fonte: Ensaios de Microdureza Laboratório de Materiais UPF (2014)

No ensaio observou-se um decréscimo na microdureza na região da solda a média desta região ficou em 54,7HV, abaixo da dureza do metal base mas, próximo a média das condições. Entre a solda e metal base, característico de uma zona termicamente afetada com alteração

microestrutural, houve decréscimo da dureza na mesma escala que provavelmente ocorreu pela recristalização e/ou crescimento de grão do metal base devido o aquecimento que ocorre durante a soldagem.

Como já citado, a propriedade da zona de fusão é muito semelhante à zona termicamente afetada. Resultado semelhante foi encontrado por Gungor (2014). No ensaio de microdureza observou-se um decréscimo significativo da microdureza principalmente na região entre solda e metal base, característico de uma zona termicamente afetada sendo superior a 32% conforme trabalho de Mirihanage (2004).

Os valores de dureza ficaram abaixo do valor da dureza do metal base. Esse decréscimo, que provavelmente ocorreu pela recristalização e/ou crescimento de grão do metal base devido o aquecimento que ocorre durante a soldagem, de aproximadamente 15% na ZTA, onde a propriedade da zona de fusão é muito semelhante à zona termicamente afetada, esta redução pode chegar a 32% no processo de soldagem GMAW conforme (SALVI, 2014).

5 CONCLUSÃO

Após a realização dos processos de testagem propostos neste estudo, descritos no item 3- Materiais e métodos, relativos aos efeitos do pré-aquecimento de soldagem registrados e expressos através da utilização de microtomógrafo de raio x, é possível delimitar resultados específicos relativos a diminuição dos níveis de porosidade, relatando-os através da estruturação dos vários testes realizados.

As abordagens efetuadas nos testes possibilitaram visualizar alterações nos níveis de porosidade voláteis coerentes e diretamente ligados ao ensaio realizado.

– Os valores de tensão das condições não atingiram o valor de tensão máxima do metal de base 292,5 MPa, a condição “A” obteve o maior valor de tensão 260,47 MPa.

– Os valores de tensão das condições “A”, “B”, “C” e “D” tiveram sua tensão máxima reduzida pelo uso de metal de adição com menor limite de escoamento em relação ao metal de base.

– Na tensão de escoamento é menor do que o material de base porém, não podemos afirmar que a variabilidade da condição “B” foi maior das condições A, C e D em função das descontinuidades ocorridas na solda como por exemplo a falta de fusão.

– Os valores de tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento podem ter seus valores aumentados se utilizado um metal de adição com maior resistência mecânica maior que o metal de adição utilizado.

– Com base nos resultados, podemos concluir que o pré-aquecimento proposto não contribuiu para a redução da porosidade, visto que os corpos de prova com melhores resultados na redução da porosidade foram os corpos de prova soldados sem pré-aquecimento.

– Pode-se concluir que a adição do gás hélio, como constituinte para proteção do cordão de solda é de grande acuidade, pois, ao ser utilizado proporciona a redução da porosidade.

– Todas as condições foram reprovadas no ensaio de dobramento, conforme a norma citada no item 4.1.2- Ensaio de Dobramento.

– A baixa resistência ao dobramento tanto de face como de raiz podemos relacionar aos problemas de descontinuidades encontradas no interior dos cordões de solda.

– A utilização do metal de adição com menor tensão de escoamento e alongamento possibilitou a fragilização da região da solda reprovando todos os corpos de prova no ensaio de dobramento.

– A porosidade foi reduzida na condição “C” que podemos concluir o citado por muitas bibliografias que acordam que o uso do gás hélio na soldagem do alumínio reduz a formação da porosidade.

– O gás hélio aumenta a temperatura da poça de fusão fazendo com que os gases formados durante o processo de fusão sejam expulsos antes da solidificação do alumínio líquido proporcionando a redução da porosidade.

– A utilização do pré-aquecimento não influenciou na redução da porosidade mas, como o hidrogênio pode ser dissociado no arco elétrico, tornando-se mais reativo, existe a possibilidade de absorção desse elemento pela poça de fusão em teores maiores, ocasionando desta forma um aumento na formação de porosidade.

– Os valores de microdureza para todas as condições foram inferiores ao valor da microdureza do metal base 79 HV, com base nas microdurezas encontradas, podemos concluir que a soldagem pelo processo MIG (Metal Inerte Gás) pode ser reduzir até 32%, desta forma comprova os valores listados na Tabela 10 – Dureza das condições.

– A redução da microdureza pode ser acordada pela recristalização ou crescimento do grão do metal de base devido ao aquecimento que ocorre durante a soldagem.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou abordagens sobre a soldagem do alumínio, dando ênfase a necessidade da quantificação e redução da porosidade como solução tecnológica para a indústria em geral que utiliza o alumínio como matéria prima. Certamente, estes resultados servem para atender outras necessidades, visto as dificuldades e desafios encontrados em soldagem, especialmente nas aplicações com ligas e materiais não convencionais.

Diante dos resultados podemos considerar que o pré-aquecimento não atendeu a necessidade com base na redução da porosidade nos cordões de solda executados conforme as condições apresentadas neste trabalho. Para um resultado mais eficiente precisamos melhorar o controle da temperatura e dos parâmetros de soldagem utilizados.

A resistência mecânica das juntas soldadas com metal de adição ER 5183, possui resistência mecânica inferior ao metal base utilizado, portanto todos os resultados obtiveram valores inferiores, assim se faz necessário uma escolha de um material de adição com maior resistência e que atenda as recomendações das ligas da classe 5XXX melhorando a solda em termos de qualidade e de resistência mecânica (SALVI, 2014).

A porosidade continua como um dos maiores problemas na soldagem do alumínio e de suas ligas mesmo em condições de soldagem controladas. Os parâmetros de soldagem, temperatura de pré-aquecimento, técnicas adequadas de soldagem e o uso de metal base e de adição corretos não são suficientes para a redução total da porosidade.

Para estudos futuros pode-se utilizar como gás de proteção mistura com diferentes porcentagens de hélio, utilizar variações dos parâmetros de soldagem do metal de adição e da temperatura de pré-aquecimento. Os parâmetros que podem influenciar para a redução da porosidade são velocidade de soldagem; Tensão; Voltagem; Metal de adição; Posição de soldagem; Técnica de soldagem e Volume de gás de proteção.

Com relação a quantificação da porosidade a utilização do microtomógrafo de raio-x atendeu a necessidade a contagem da porosidade é real pois com

Quanto à consecução dos objetivos propostos para este trabalho, pode-se concluir que os mesmos foram atingidos.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em: dez. 2014.

ABNT NBR 6153:1988. **Produtos metálicos** – Ensaio de dobramento semi-guiado. 1988.

ABNT NBR ISO 209. **Alumínio e suas ligas** – Composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ABREU, C. E. L. I.; SILVA, J. F. L., TONEZER, J. **Microtomografia computadorizada de raios-x: definições e aplicações**. Centro Tecnológico de Pedras, Gemas e Joias do Rio Grande do Sul, Universidade de Passo Fundo, 2014.

ALCAN. **Manual de Soldagem**. Alcan Alumínio do Brasil S/A. 1ª Edição. 1993.

ANDERSON, T. **Aluminium Welding Tecnilogy** – Director of Aluminium for ITW North America, Engineering for AWS - American Welding Society, 2014.

ANDERSON, T. Aluminium Welding Tecnilogy – Director of Aluminium for ITW North America, Engineering for AWS - American Welding Society, **Welding Journal**, 2010.

ASM HANDBOOK: Metallography and Microstructures, v. 9, ASM Handbook, ASM International, 2004.

ASM. Metals Handbook – Welding and Brazing, American Society for Metals, 8 Ed., v. 6, 1971.

ASME. **Boiler & Pressure Vessel Code**, Section IX - Welding and Brazing Qualifications. New York, 2010.

ASTM E 23-06 - **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. West Conshohocken, United States: ASTM 2007.

ASTM E 8M-00b - **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. West Conshohocken, United States: ASTM, 2008.

ASTM E 92-82 - **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**. West Conshohocken, United States: ASTM, 2003.

AWS - American Welding Sociaty. Welding Handbook: **Welding Processes Part II**. 9 ed., v.3, 1996.

AWS **A5.10/A5.10M:2012** (ISO 18273:2004 MOD) in Section II Part C as SFA5.10/5.10M and Modification to QW-432 in Section IX to add associated F-numbers.

AWS **D1.2/D1.2M:2008** An American National Standard Approved by the American National Standards Institute June 23, 2008.

AWS, **Welding Handbook, Materials and Applications** – Part 1, American Welding Society, 8 ed., v. 3, 1996.

AWS, **Welding Handbook, Materials and Applications** – Part 2, American Welding Society, 8 ed., v. 4, 1998.

BOUMA A.H. Notes on X-ray Interpretation of Marine sediments. **Marine geology**, v.2, p.278-309. 1964.

CAPELARI, T.V.; MAZZAFERRO, J. A. E. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. **Soldag. Insp.**, v.14, n.3, São Paulo, july/Sept., 2009.

CARDOSO, P.H.S. Avaliação de Junta Soldada em uma Liga de Alumínio 5083 – Paper / Fundação Universidade de Passo Fundo UPF, 7 P. 2014.

CIRINO, Luciano Machado. **Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG**. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica). UFSC. Florianópolis, p. 89. 2002.

CLEBER, M. **Projeto de dissertação** – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

COPPERMETAL. **Alumínio Naval 5083**. Disponível em: <www.coppermetal.com.br>. Acesso em: 2 abr. 2012.

DIN 54122. Non-destructive testing; reference block 2 and its use for the adjustment and control of ultrasonic echo equipment, 1973.

DUTRA, J.C. **Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG**. Tese (Doutorado em Engenharia). UFSC, p. 151. 1989.

ESAB – **Catálogo de Backings Cerâmicos** (www.esab.com.br), 2014.

ESAB. **Metalurgia da Soldagem**. Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget, 2005.

FELDKAMP, DAVIS, E KRESS. O algoritmo de Feldkamp. **J. Opt. Soe. Sou.** A 1, 612-619, 1984.

GERR, D. **The Elements of BOAT STRENGTH for Builders, Designers, and Owners. International Marine**: McGraw-Hill, 1999.

GUNGOR, B.; et al. Mechanical and Microstructural Properties of Robotic Cold Metal Transfer (CMT) Welded 5083-H111 and 6082-T651 Aluminum Alloys. **Materials and Design**, v. 54, p.207-211, 2014.

HAKEM, M. et al. **Welding and Characterization of 5083 Aluminum**, 2012

K. MUTOMBO, M.D. **Toit, Mater. Sci. Forum**, v. 654-656, p. 2560-2563, 2010.

KETCHAM, R.A. Three-dimensional grain fabric measurements using high-resolution X-ray computed tomography. **Journal of Structural Geology**, 2005.

KIYOHARA, M.; YAMAMOTO, H.; HARADA, S. Melting characteristics of a wire electrode in the MIG – Welding of aluminium. **Arc Physics and Weld Pool Behaviour**, 1979. P. 165-175.

KURIYAMA, Y.; MINODA, K.; NAGAOKA, H.; ISHIKAWA, -K. Prevention of porosity in aluminum alloy weldments: effect of atmospheric humidity and groove shape on porosity in aluminum alloy weldments. **Ihi-Eng.-Rev.**, v.8, n.3, p. 1-12, sept., 1975.

LANCASTER, J.F. **The physics of welding. Physics Tecnology**: Northern Ireland., v.15, 1984.

LANDIS, E.N.; NAGI, E.N.; KEANE, D.T. **Microstructure and fracture in three dimensions**, 2005.

LIMA, D. R. S.; SCHAEFFER, C. C. Y. L. LdTM / EE / UFRGS. **Caracterização da evolução da microdureza vickers no processo de forjamento de alumínio**, 2009.

LINCOLN ELECTRIC. The Procedure Handbook of Arc Welding, **Lincoln Electric**, Cleveland, (2000).

LIU, Y. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum 5083 Weldments by Gas Tungsten Arc and Gas Metal Arc Welding. **Materials Science and Engineering A**, n. 549, p. 7-13, 2012.

MAC ARTHUR, I, Quality control in aluminium welding: Weld defects their cause and correction. **Welding Journal**, v. 54, n. 7; p. 514-16, July 1975.

MATHERS, G. **The welding of aluminium and its alloys**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2002.

MEES F., SWENNEN R., GEET M.V., JACOBS P. Applications of x-ray computed tomography in geosciences. London, **Geological Society Special Publications**, 2003.

MIG WELD. **Products**: Aluminum Welding Wires. Disponível em: <<http://www.migweld.de/english/products/aluminiumwelding-wire/ml-5087-lmg45mnzr.html>>.

MIG WELD. **Products**: Aluminum Welding Wires. Disponível em: <<http://www.migweld.de/english/products/aluminium-welding-wire/ml-5087-almg45mnzr.html>>.

MODENESI, P. J. **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas**. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

OTSUKA, RIYOTATSU. Physical Metallurgy and Process. In: TOTTEN, G. E.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of Aluminum**, p.643-63: Marcel Dekker Inc., 2003.

PH TOOL. **Reference Standards Calibration Blocks**, 2007. Disponível em: <www.phtool.com>. Acesso em: 25 maio 2012.

POURKIA, N. et. al. The effect of Ti and Zr elements and cooling rate on the microstructure and tensile properties of a new developed super high-strength aluminum alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 20, p. 5318–5325, 2010.

QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: EDEME, 1979. 248 p.

MARTUKANITZ, R.P P.R. MICHNUK, P.R. **Aluminium**, v.58, p. 276, 1982.

SALVI, B. M. **Desenvolvimento Tecnológico para Soldagem MIG de Alumínio 5083 H116**. Dissertação (Mestrado), UFSC. Florianópolis, SC, 2014.101p.

SANTOS, T. F. **Estudo sobre a abertura e estabilidade do arco MIG na soldagem de alumínio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, p. 69, 2000.

SANTOS, T. P.; PARIS, A. A. F. Estudo da soldabilidade do alumínio 7475-0 com Processo TIG. **Soldagem Insp.**, v.11. n.1. jan.\mar., 2006.

SARKAR, P.S.; SINHA, A.; KASHYAP, Y.; MORE, M.R.; GODWAL, B.K. Development and characterization of a 3D cone beam tomography system. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, 2009.

SHIMADZU. **Tomógrafo de Raio-X**. Disponível em: <http://www.shimadzu.com.br/empresa/>. Acessado em: dez. 2014.

SILVA, C. L. M. **Avaliação da técnica de pulsação térmica na soldagem de alumínio**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, p.127.2005.

SILVA, H. R.; FERRARESI, V. A. Influência dos Parâmetros de Soldagem MIG de Alumínio na Qualidade do Cordão de Solda. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v.8, n. 1, p. 39-45, mar., 2003.

SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, p. 127. 2005.

SKYSCAN. Disponível em: < http://www.skyscan.be/home.htm>. Acesso em: 16 dez. 2013.

SONOTRON NDT. **Operating Manual**. Revision 2.37, 2005.

TATAGIBA, L. C. S.; GONCALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no desenvolvimento de gases de proteção utilizados na soldagem MIG/MAG. **Soldag. insp.**, v.17, n.3, p. 218-228, 2012.

TECHNICAL ASSISTANCE FOR ALUMINUM DESIGN ENGINEERS. **Process Engineers & Welders - Guide for Aluminum Welding** (maxal_guide_for_aluminium_wldg_6-11).

T-PUT Phoenix-Union-Thermanit. **Consumíveis de Soldagem para Alumínio**. Disponível em: <<http://www.t-put.com/content/page/de/Produktportfolio-23.php>>.

T-PUT Phoenix-Union-Thermanit. **Consumíveis de Soldagem para Alumínio**. Disponível em: <<http://www.tput.com/content/page/de/Produktportfolio-23.php>. 96>.

TREIBER, M. X. et al. **Tipos de Chanfros para juntas Soldadas**. Disponível em: <www.infosolda.com.br/nucleo/downloads/ep.pdf>. Acesso em: 31 maio 2012.

TUTTLE, W. Understanding Aluminium Welding. **Welding Journal**, v.70, n.2, p. 43-46, fev., 1991.

VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. São Paulo: Pioneira Thonson Learning, 2001.

WANG, J. Z; et. al. Effects of Zr on microstructures and mechanical properties of 2E12 aluminum alloy. **Chinese Journal of Nonferrous Metals**, v. 19, n. 2, p. 247-251, 2009.

WANG, Jian-Zhao; et. al. Effects of Zr on microstructures and mechanical properties of 2E12 aluminum alloy. **Chinese Journal of Nonferrous Metals**, v. 19, n. 2, p. 247-251, 2009.

WOODS, R. A. Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminium Welds. **Welding Journal**, v. 53, n. 3, p. 97s – 108s, Mar. 1974. Alloy. METAL, 23. - 25. 5. Brno, Czech Republic, EU, 2012.