

DESENVOLVIMENTO DE SUPORTE CERÂMICO PARA APLICAÇÃO
EM SOLDAS UNILATERAIS EM LIGAS DE ALUMÍNIO

ROGÉRIO VICENTINI

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE

DARCY RIBEIRO - UENF

CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA – CCT

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

DEZEMBRO - 2013

**DESENVOLVIMENTO DE SUPORTE CERÂMICO PARA APLICAÇÃO EM
SOLDAS UNILATERAIS EM LIGAS DE ALUMÍNIO**

ROGÉRIO VICENTINI

"Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais".

Área de concentração: Metalurgia Física

Orientador: Prof. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
DEZEMBRO DE 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

/2014

Vicentini, Rogério.

Desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais em ligas de alumínio / Rogério Vicentini. – Campos dos Goytacazes, 2013.

xii, 123 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2013.

Orientador: Ronaldo Pinheiros da Rocha Paranhos.

Área de concentração: Metalurgia física.

Bibliografia: f. 115-120.

1. SUPORTE CERÂMICO 2. SOLDAS UNILATERAIS DE
LIGAS DE ALUMÍNIO 3. PARÂMETROS DE SOLDAGEM
4. CAMPO OPERACIONAL I. Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia.

DESENVOLVIMENTO DE SUPORTE CERÂMICO PARA APLICAÇÃO EM SOLDAS
UNILATERAIS EM LIGAS DE ALUMÍNIO

ROGÉRIO VICENTINI

“Dissertação de Mestrado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”.


Área de concentração: Metalurgia Física

Aprovada em 17 de Dezembro de 2013.


Comissão Examinadora:



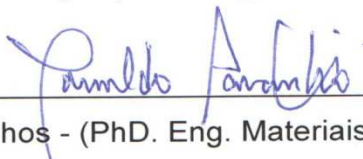
Prof^ª. Cátia Cristina Brito Viana - (DSc. Eng. Materiais) – IFF



Prof^ª. Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova - (PhD. Eng. Ciência de Materiais Metálicos e Tratamentos Térmicos) – PPGECEM - UENF



Prof^ª. Ana Lúcia Diegues Skury – (DSc. Eng. Materiais) – PPGECEM - UENF



Prof. Ronaldo P. R. Paranhos - (PhD. Eng. Materiais) – PPGECEM - UENF

(Orientador)

DEDICATÓRIA

A minha esposa Rosângela Maria Zoppé Mardegan e meu filho Guilherme Mardegan Vicentini aos meus pais Zeferino Vicentini e Zélia Bazoni Vicentini, a minha tia Zilda Vicentini e a todos os pesquisadores que contribuem para o desenvolvimento Científico e Tecnológico da Engenharia e Ciência de Materiais.

AGRADECIMENTOS

À Deus por Iluminar meus caminhos, proporcionando-me força e bênçãos, tornando-me capaz para a realização deste trabalho.

À minha Família, por estar presente em todos os momentos, incentivando-me e me proporcionando conforto nas horas difíceis.

À Universidade Estadual Norte Fluminense "Darcy Ribeiro" - UENF, por ter me concedido a vaga para cursar o Mestrado.

Ao professor e orientador Dr. Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos, pela sinceridade, ensinamentos, paciência e principalmente pelo exemplo dado durante todo o trabalho, bem como a orientação em todas as etapas.

Aos amigos, e colegas do grupo de pesquisa: Everton Maick Rangel R. Pessanha Renata Barbosa Gonçalves, Zulmira Guimarães e Márcia. Foram companheiros em todos os momentos e permitiram troca de informações e idéias na sala de estudos.

Aos técnicos de laboratório do LAMAV: Elaine Cristina Pereira, Silvio Gonçalves Mendes, Rômulo Leite Loiola, Renan da Silva Guimarães, Zulmira Guimarães, que ajudaram na condução do trabalho, preparação de amostras, ensaios em laboratórios e funcionamentos dos equipamentos.

Ao Prof. Dr. Eduardo Atem de Carvalho, responsável pela realização dos ensaios de tração das amostras.

Ao Prof. Dr. Angelus Giuseppe Pereira da Silva, por permitir que a amiga Zulmira Guimarães realizasse as fotos de MEV de minha dissertação, sempre com boa vontade e disponibilidade.

A todos os colegas do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV), pelos momentos de aprendizagem.

Aos professores e funcionários do LAMAV, pelo apoio na realização dos ensaios e pelo incentivo diário pelos momentos de aprendizagem, diversão e cooperação, que, de alguma forma auxiliaram-me no decorrer deste trabalho.

Aos Centros de Educação SENAI/SESI inserindo-me no programa Hora de Estudar e por ter cedido os laboratórios para os testes de soldagem. Em especial pelos professores da área de soldagem Marcelo Jordão e Gustavo Silva.

À Direção e Coordenação do IFES de Cachoeiro de Itapemirim ES pela compreensão e flexibilização de horário para os dias de estudos e pesquisas na UENF.

A todos os pesquisadores da área de Ciência e Engenharia de Materiais com os quais deram-me suporte para as pesquisas e estudos do assunto proposto neste trabalho.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABELAS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	X
RESUMO.....	XI
ABSTRAT.....	XII
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II: OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	2
2.1 Objetivos Gerais.....	2
2.2 Objetivo Específico.....	2
2.3 Justificativas.....	2
CAPÍTULO III: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Introdução.....	4
3.2 Histórico do alumínio.....	4
3.3 O alumínio e seu uso.....	5
3.4 Características e propriedades físicas e químicas do alumínio.....	6
3.4.1 Propriedades mecânicas	8
3.5 Elementos de Ligas.....	11
3.6 Ligas e Características das ligas trabalháveis	13
3.6.1. Características - Ligas da série 1xxx.....	14
3.6.2. Ligas da série 2xxx.....	14
3.6.3. Ligas da série 3xxx.....	14

3.6.4. Ligas da série 4xxx.....	15
3.6.5 Ligas da série 5xxx.....	15
3.6.6 Ligas da série 6xxx - Ligas tratadas termicamente de média resistência..	16
3.6.7 Ligas da série 7xxx -Ligas tratada termicamente de elevada resistência..	16
3.6.8 Ligas da série 8xxx.....	16
3.7 Soldagem a arco elétrico e modo de transferência de metal	18
3.8 Equipamento, processo e soldagem GMAW das ligas de alumínio e insumos.....	19
3.9 Equipamento, processo de soldagem GTAW das ligas de alumínio e insumos.....	22
3.10 Aporte térmico.....	24
3.11 Soldagem do Alumínio.....	25
3.11.1 Técnicas de soldagem de Al e suas ligas.....	25
3.11.2 Condições de Soldagem da liga de Al e cuidados especiais.....	26
3.11.3 Problemas metalúrgicos na soldagem do alumínio.....	27
3.11.3.1 Fissuras.....	28
3.11.3.2 Respingos.....	29
3.11.3.3 Porosidade.....	31
3.11.3.4 Óxido de alumínio.....	34
3.11.3.5 Soldagem das ligas de Al incluindo a liga 5083 usada no seguimento naval e seleção de consumíveis.....	35
3.12 Condutividade térmica e geometria da junta.....	36
3.13 Soldagem unilateral e suas vantagens	37
3.14. Suporte de cobre.....	39

3.15 Suporte cerâmico.....	40
3.15.1 Tipos e formatos de suportes cerâmicos.....	41
3.15.2 Defeitos ocorridos na soldagem sem suporte no passe de raiz.....	43
3.15.3 Vantagens usando os suportes cerâmicos na soldagem no passe de raiz.....	45
3.16 Materiais para fabricação do suporte cerâmico	47
3.16.1 Materiais refratários.....	47
3.16.2 Materiais cerâmicos – características e composições.....	47
3.16.3 Cordierita.....	49
3.16.4 Silicato de sódio.....	51
3.17 Processos de fabricação do suporte cerâmico.....	52
3.17.1 Dosagem.....	52
3.17.2 Homogeneização.....	53
3.17.3 Peneiramento.....	53
3.17.4 Prensagem.....	53
3.17.5 Secagem e queima (sinterização).....	54
3.18 Conclusão da Revisão Bibliográfica	56
CAPÍTULO IV: MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
4.1 Materiais utilizados para confecção do suporte cerâmico.....	57
4.2 Equipamentos utilizados.....	59
4.3 Difração de Raios X(DRX) e análise química do suporte cerâmico comercial	61
4.4 Metodologia.....	62
4.4.1 Etapa I.....	63

4.4.1.1 Teste dos Suportes com Passe de Raiz.....	67
4.4.2 Etapa II.....	67
4.4.2.1 Inspeção visual.....	69
4.4.2.2 Ensaio não-destrutivo por líquido penetrante (LP).....	69
4.4.2.3 Macrografia.....	70
4.4.3 Etapa III.....	70
4.4.3.1 Ensaio de dobramento e de tração.....	72
4.4.3.2 Macrografia	73
4.4.3.3 Dureza Vickers.....	74
4.4.3.4 Microscopia Ótica.....	75
4.4.3.5 EDS das inclusões do cordão de solda.....	75
CAPÍTULO V: RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
5.1 Difração de Raios X (DRX) do suporte cerâmico comercial.....	76
5.2 Análise química do suporte comercial.....	76
5.3 Resultado da Etapa I – Processo de fabricação do suporte cerâmico	77
5.3.1 Aspecto do suporte cerâmico confeccionado da F1 A.....	80
5.3.2 Análise microestrutural dos suportes cerâmicos confeccionados.....	80
5.3.3 Avaliação dos suportes cerâmicos na soldagem unilateral	82
5.4 Resultado da Etapa II.....	89
5.4.1 Determinação de um possível campo operacional.....	99
5.5 Resultado da Etapa III.....	101
5.5.1 Ensaio de dobramento.....	102
5.5.2 Ensaio de tração.....	103

5.5.3 Macrografia.....	106
5.5.4 Dureza Vickers.....	107
5.5.5 Microscopia ótica.....	108
5.5.6 EDS das inclusões do cordão de solda.....	111
5.6 Considerações finais.....	113
CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO.....	115
CAPÍTULO VII: SUGESTÕES.....	117
CAPÍTULO VIII: REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Criolita usada para a separação da alumina.....	5
Figura 2- Transferência de metal de solda.....	18
Figura 3- Distância da tocha em relação ao metal base e comprimento do arco..	19
Figura 4- Representação do mecanismo e equipamento para a soldagem.....	20
Figura 5- Perfis de solda GMAW com diferentes atmosferas de proteção.....	20
Figura 6- Mecanismo para facilitar a saída do arame de alumínio Linha Push-Pull (a) e (b) modelos de tocha	21
Figura 7- Representação do esquema de um sistema de soldagem TIG	22
Figura 8- Arco elétrico utilizando o argônio como gás de proteção	23
Figura 9- Sentido do bico de solda na soldagem inclinação negativa	24
Figura 10- Exemplo de trinca no centro do cordão.....	29
Figura 11- Efeito do intervalo de solidificação na contração	32
Figura 12- Solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido para dois valores de pressão parcial de hidrogênio	34
Figura 13- Gradientes térmicos no alumínio e no aço.....	37
Figura 14- Posição do suporte junto como cordão de solda	38
Figura 15- Características geométricas das regiões no passe de raiz	39
Figura 16- Tipo e posição de cobre junta.....	40
Figura 17- Macrografias dos cordões de solda (deficiência de fusão lateral)	44
Figura 18- Macrografia dos cordões de solda	42
Figura 19- Apresentação do suporte com fita adesiva.....	45
Figura 20 - Diagrama de fases do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$	50

Figura 21 - Perspectiva do molde e moldura para produção dos sup cerâmicos..	60
Figura 22 - Suporte cerâmico comercial.....	62
Figura 23 Perspectiva isométrica do suporte cerâmico	65
Figura 24- Representação ortográfica: vista frontal e lateral do suporte cerâmico.	65
Figura 25- Apresentação esquemática da posição do suporte cerâmico.....	66
Figura 26- Apresentação esquemática das chapas ponteadas.....	66
Figura 27- Inclinação da tocha e direção de soldagem.....	67
Figura 28- Campo marcado para inpeção visual.....	69
Figura 29- Perspectiva com as dimensões das chapas e o ângulo do chanfro.....	71
Figura 30- Medidas de localização para cortes dos CP para os ensaios de dobramento e tração.....	73
Figura 31- Dimensões dos CP para ensaio de dobramento e tração.....	73
Figura 32- Pontos de microdureza Vickers na ZF, ZTA e MB.....	74
Figura 33- Difrátograma.....	76
Figura 34- Suporte cerâmico com empeno e susporte sem empeno.....	78
Figura 35- Imagem da superfície do suporte cerâmico.....	80
Figura 36- Micrografia do suporte cerâmico produzido, F1 e F2.....	81
Figura 37- Micrografia do suporte cerâmico produzido, F3 e F4.....	81
Figura 38- Junta 1. Aspecto do suporte cerâmico. Aspecto do cordão de solda e macrografia.....	83
Figura 39- Junta 2. Aspecto do suporte cerâmico. Aspecto do cordão de solda e macrografia.....	85
Figura 40- Junta 3. Aspecto do suporte cerâmico. Aspecto do cordão de solda e macrografia.....	86

Figura 41- Junta 4. Aspecto do suporte cerâmico. Aspecto do cordão de solda e macrografia.....	88
Figura 42- Junta 1. Aspecto da raiz de solda. Ensaio por LP e macrografia.....	90
Figura 43- Junta 2. Aspecto da raiz de solda. Ensaio por LP e macrografia.....	91
Figura 44- Junta 3. Aspecto da raiz de solda. Ensaio por LP e macrografia.....	92
Figura 45- Junta 4. Aspecto da raiz de solda. Ensaio por LP e macrografia.....	93
Figura 46- Junta 5. Aspecto da raiz de solda. Ensaio por LP e macrografia.....	94
Figura 47- Junta 6. Aspecto da raiz de solda. Ensaio por LP e macrografia.....	95
Figura 48- Junta 7. Aspecto da raiz de solda. Ensaio por LP e macrografia.....	96
Figura 49- Junta 8. Aspecto da raiz de solda. Ensaio por LP e macrografia.....	97
Figura 50- Possível campo operacional de soldagem cerâmico.....	99
Figura 51- Resultado do ensaio de dobramento. Corpos de prova da junta A.....	102
Figura 52- Resultado de ensaio de dobramento. Corpos de prova da junta B.....	102
Figura 53- Ensaio de tração da Junta A e aspecto da superfície de fratura.....	104
Figura 54- Ensaio de tração da Junta B e aspecto da superfície fratura.....	105
Figura 55- Macrografia da junta A; Macrografia da junta de solda B.....	106
Figura 56- Micrografia do passe de raiz do cordão de.....	109
Figura 57- Micrografia do primeiro passe de deposição	109
Figura 58- Micrografia do segundo passe de deposição.....	110
Figura 59- Imagem de MEV sem ataque químico da raiz de solda e análise pontual por EDS da ZF.....	111
Figura 60- Imagens do MEV do cordão de raiz de solda e o EDS de inclusões globulares.....	112

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades do Alumínio.....	8
Tabela 2- Propriedades mecânicas de distintos tipos de alumínio e suas ligas...	10
Tabela 3- Solubilidade no estado sólido dos principais elementos de liga adicionados ao alumínio.....	12
Tabela 4- Classificação das ligas de alumínio trabalháveis segundo AA	13
Tabela 5- Características e aplicações das ligas de alumínio trabalháveis	17
Tabela 6- Parâmetro de regulação para as soldagens comparativas entre GMAW e FCAW	31
Tabela 7- Propriedades mecânicas dos consumíveis de Al em relação à resistência a tração e cisalhamento.....	36
Tabela 8- Suportes comerciais.....	41
Tabela 9- Composição química (% peso) da cordierita.....	57
Tabela 10- Propriedades físicas da cordierita.....	58
Tabela 11- Composição química nominal do metal de adição.....	59
Tabela 12- Formulações.....	64
Tabela 13- Matriz de experimentos.....	68
Tabela 14- Resultado da Composição química (% peso) do suporte comercial..	77
Tabela 15- Dados coletados na confecção dos suportes cerâmicos.....	79
Tabela 16- Resumo dos resultados obtidos na execução das oito juntas soldadas.....	100
Tabela 17- Resultado do ensaio de tração.....	103
Tabela 18- Valores de dureza da junta de solda B.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Alumina (óxido de Alumínio)
AMPÈRE	Unidade de medida do sistema internacional de unidades de Intensidade de Corrente Elétrica
ASTM	Sociedade Americana para Análise e Padronização de Materiais
AWS	American Welding Society
CCC	Rede cristalina cúbica de corpo centrado
DRX	Difração de Raios-X
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
E	Módulo de elasticidade
EDS	Espectrometria por Energia Dispersiva
SFA	Specification for Bare Aluminum and Aluminum Alloy Welding Electrodes and Rods
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GPa	Giga pascal
ISO	International Organization for standardization
IACS	International Annealed Copper Standard
LAMAV	Laboratório de materiais avançados
Ltda	Limitada
MIG	Metal Inert Gas
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MB	Metal base
MPa	Mega pascal
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
XRD	Difração de Raios X
ZF	Zona de Fusão
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ER	Consumível na forma de eletrodo nu ou vareta aplicado em processo de soldagem TIG, MIG, MAG e Arco Submerso.

RESUMO

Este trabalho apresenta um método para o desenvolvimento, em laboratório, de um suporte cerâmico apropriado para a execução de soldas unilaterais em ligas de alumínio pelo processo Gas Metal Arc Welding - GMAW. O procedimento experimental foi realizado em três etapas: A etapa 1 envolveu o processo de fabricação, em laboratório, dos suportes cerâmicos. Formulações foram propostas a partir da caracterização de um suporte comercial, que foram testados no passe de raiz em soldagem unilateral. As soldas foram avaliadas por inspeção visual e macrografias. Na etapa 2 foram analisados os parâmetros de soldagem: corrente, tensão, velocidade de soldagem e abertura de raiz. Na etapa 3 foram preparadas duas juntas soldadas a fim de caracterizar as propriedades mecânicas (tração, dobramento e dureza) e a microestrutura. Os resultados obtidos mostraram que a cordierita é adequada para a confecção de suporte cerâmico para a soldagem unilateral de ligas de alumínio. A melhor formulação consiste de 93% de cordierita e 7% de silicato de sódio. Foi possível delinear um possível campo operacional do processo: abertura de raiz de: 2 a 6 mm; tensão de: 17,6 a 27 V 14 a 18V; corrente de: 100 a 135A e energia de soldagem de: 0,65 a 1,46 kJ/mm. As propriedades mecânicas das juntas soldadas foram consideradas satisfatórias, assim como a microestrutura, porém fortemente dependentes do processo de limpeza antes da soldagem.

Palavras-chave: suporte cerâmico; soldas unilaterais de ligas de alumínio; parâmetros de soldagem; campo operacional.

ABSTRACT

This master's presents a methodology for the development in the laboratory of an appropriate ceramic support for the implementation of one-sided welds in aluminum alloys by the process Gas Metal Arc Welding - GMAW. The experimental procedure was performed in three steps: Step 1 involved the manufacturing process in the laboratory of ceramic brackets. Formulations were proposed from the characterization of commercial support, which were tested at the root pass welding in unilateral. Welds were evaluated by visual inspection and macrographs. In step 2 welding parameters were analyzed: current, intensity, speed of welding and root opening. In step 3, two welded joints in order to characterize the mechanical properties (tensile, bending and hardness) and microstructure were prepared. The showed results that the cordierite is suitable for making ceramic backing for unilateral welding of aluminum alloys. The best formulation is 93% cordierite and 7 % of sodium silicate. It was possible to outline a possible field operational process: opening root: 2- 6 mm; voltage: 17.6 to 27 V 14 to 18V, current: 100 to 135A and energy welding: 0.65 to 1 46 kJ / mm. The mechanical properties of welded joints have been found satisfactory, as well as the microstructure, but strongly dependent on the cleaning process prior to welding.

Keywords: ceramic materials, welding of aluminum alloys unilateral; welding parameters; operational field.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas têm ampla aplicabilidade na indústria metal mecânica. São utilizados processos de soldagem com estas ligas para a fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas metálicas como veículos, equipamentos rodoviários, vagões ferroviários, elementos estruturais, utensílios, equipamentos para indústria química e alimentícia e indústria naval – embarcações, entre outros. A soldagem da maioria das ligas de alumínio é compatível com os processos tradicionais de união. Um importante desafio na atualidade é a aplicação de técnicas de soldagem que proporcionem o aumento da produtividade mantendo a qualidade da união soldada. (Marques, 2006)

A soldagem unilateral vem sendo utilizada para aumentar a produtividade da soldagem. As estruturas metálicas, por possuírem dimensões que dificultam a sua movimentação, são beneficiadas com o uso dessa técnica. A soldagem é realizada apenas por um lado da peça, evitando paradas para sua movimentação. É obtida a penetração total no primeiro passe de solda, evitando-se a subsequente operação de goivagem para a soldagem no outro lado da peça. Com isso é possível aumentar a produtividade na soldagem com redução dos custos de fabricação.

Uma das técnicas de soldagem unilateral utiliza-se de um suporte cerâmico. Este tipo de suporte tem a capacidade de suportar altas temperaturas da poça de solda quando no estado líquido, e ainda, evita a formação de gases durante a soldagem, proporcionando também um acabamento adequado ao cordão de solda e isento de defeitos. Entretanto, muito pouco destas técnicas tem sido aplicadas no caso da soldagem do alumínio e suas ligas (Tardei, 2004).

Neste projeto de mestrado propõe-se o desenvolvimento de um suporte cerâmico com características específicas para atender as exigências tecnológicas no campo de soldagem unilateral de ligas de alumínio, visto que há uma tendência crescente de fabricação de peças ou conjuntos destas, com previsão, em grande parte, de serem soldadas. Ainda, é relevante o fato de que os suportes cerâmicos não são produzidos no Brasil.

CAPÍTULO II - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

2.1 – OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldagem unilateral de ligas de alumínio.

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Determinar as matérias primas e formulações para a produção dos suportes cerâmicos;
- Avaliar a eficiência do suporte cerâmico durante a operação de soldagem da chapa de alumínio e determinar o campo operacional do processo.
- Avaliar as características do cordão de solda obtido com a utilização do suporte: acabamento da superfície do cordão; isenção de descontinuidades; trincas.
- Avaliar as propriedades mecânicas de juntas soldadas usando a soldagem unilateral com os suportes produzidos.

2.3 - JUSTIFICATIVAS

2.3.1 - Importância Científica

A importância científica do presente trabalho consiste em ampliar os conhecimentos relacionados aos suportes cerâmicos utilizados como apoio na soldagem unilateral de ligas de alumínio.

2.3.2 – Importância Econômica

A principal vantagem econômica do uso de suporte cerâmico para a soldagem unilateral do alumínio refere-se ao aumento da produtividade da soldagem, com a conseqüente redução dos custos de fabricação.

2.3.3 - Importância Tecnológica

O uso do suporte cerâmico nos processos de soldagem unilateral apresenta um forte impacto tecnológico, pois reduz o número de passes de solda, reduz o número de operações intermediárias associadas à operação de soldagem, com conseqüente redução do tempo de soldagem. Desta forma, aumenta-se consideravelmente a produtividade da operação de soldagem, mantendo-se inalterada a qualidade da junta soldada.

CAPÍTULO III: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

Este capítulo tem o objetivo de apresentar informações referentes à análise da bibliografia técnica considerada relevante para melhor entendimento dos objetivos e da metodologia adotada neste trabalho. Foram apresentados vários tópicos, tais como: as características, propriedades e aplicações das ligas de alumínio; condições metalúrgicas na soldagem do alumínio; principais aspectos do material refratário utilizado no desenvolvimento do suporte cerâmico e principais vantagens no uso dos suportes cerâmico. Foram apresentadas conclusões de alguns trabalhos realizados sobre a soldagem unilateral do alumínio com uso de suporte cerâmico, dentre as quais, pode destacar o efeito da remoção da camada superficial de alumina. Finalmente, foram apresentados: a metodologia e sequência do processo de fabricação do suporte cerâmico.

3.2 Histórico do alumínio

O alumínio é o elemento metálico mais abundante presente na crosta terrestre (cerca de 8,13%). Todo o alumínio da Terra é combinado com outros elementos, formando compostos como óxidos ou silicatos. Em 1821, o francês P. Berthier descobriu um minério avermelhado, perto da aldeia de Lês Baux, no sul da França, que continha 52% de óxido de alumínio. Então é descoberta a bauxita, o minério mais comum de alumínio.

O dinamarquês Hans Christian Oersted, em 1825, foi o primeiro pesquisador a isolar o alumínio empregando o aquecimento de cloreto de alumínio em conjunto com uma liga de potássio e mercúrio (amálgama), com a posterior destilação do mercúrio. Até 1845, Frederick Wöhler aperfeiçoou este processo substituindo a amálgama e melhorando o processo de desidratação do alumínio (Leite, 1996).

Segundo Leite (1996), dois fatos marcantes ocorridos em 1886 mudaram a história da produção do alumínio em escala industrial. O primeiro fato foi o invento do gerador de eletricidade por Gramme, que abriu o caminho para o desenvolvimento de modernos processos de redução do Al por meio de eletrólise. O segundo fato marcante foi o desenvolvimento do processo Hall-Héroult de

produção do alumínio no qual a alumina refinada da bauxita é dissolvida em um banho de Criolita (Na_2AlF_6) contendo adições de sal de fluoreto para controlar a temperatura do banho, a densidade, a resistividade e a solubilidade da alumina.

A criolita é um mineral do grupo dos halóides, composto basicamente por: sódio, alumínio e flúor, com fórmula Na_3AlF_6 . Cristaliza-se no sistema monociclo e sua coloração pode ser branca, incolor, avermelhado ou amarronzado. Melhora a condutividade elétrica da célula e reduz o consumo de energia do forno (Orlando, 2008). No processo, uma corrente elétrica passa pelo banho para promover a eletrólise da alumina dissolvida com oxigênio reagindo com o anodo de carbono, e em seguida o alumínio é coletado como um metal (Davis, 1993)..A figura 1 mostra a criolita cristalizada.



Figura 1- Criolita usada para a separação da alumina (Chichester, 1995).

3.3 O alumínio e seu uso

O alumínio é extraído da bauxita, rocha constituída, principalmente, de minerais hidratados de alumínio. Aproximadamente, 92% da produção mundial de bauxita é utilizada na produção de alumina. As especificações de mercado são as seguintes: mínimo de 55% de Al_2O_3 , máximo de 7% de SiO_2 reativa, 8% de Fe_2O_3 e 4% de TiO_2 . A bauxita, também é empregada nas indústrias químicas (sulfato de alumínio), equipamentos para indústrias alimentícias, naval, condutores elétricos, bebidas, trocadores de calor ou utensílios domésticos, indústria de abrasivos e de cimento (aluminoso). Essa rocha ocorre na natureza em grandes depósitos de onde é extraída para produção da alumina – óxido de alumínio (Al_2O_3), que é então submetida a uma redução eletrolítica que elimina o oxigênio e produz o alumínio metálico. Neste processo os principais insumos são: 5 t de bauxita que

submetida ao ataque de 0,14 t de soda cáustica produz 2 t de alumina que submetida a um processo de redução que consome em média 13.000 kW/t produz 1 toneladas de alumínio (IAI, 2008).

O alumínio, depois do aço, é o metal mais metal mais produzido no mundo com 38 milhões de toneladas, graças a uma série de propriedades como a maleabilidade, ductilidade, soldabilidade, condutividade térmica e elétrica, resistência à tração e a alta resistência à corrosão. Possui baixa densidade relativa, facilidade de trabalhar e alta reciclabilidade sem perda das propriedades físicoquímicas (IAI, 2008).

As reservas mundiais somam 34 bilhões de toneladas estando perfeitamente adequadas para atender a demanda atual e suportar aumento na produção mundial. São reservas de bauxita do tipo trihidratadas: Austrália, Guiné, Brasil, Jamaica, China, Índia e Jamaica (Barra, 2003). Na França, Grécia e Hungria são encontradas bauxitas do tipo monohidratadas.

O Brasil produz em seu território 1.970.596 de toneladas de bauxita com 62,6% produzido no estado do Pará. A principal área de ocorrência e exploração nesse estado é a região de Oriximiná, no vale do Rio Trombetas, onde opera a CMRN - Companhia de Mineração Rio do Norte (DNPM, 2008).

3.4 Características, propriedades físicas e químicas do alumínio

O alumínio (Al) é um elemento químico metálico, leve, sólido cristalino, de cor branco-prateada e sem odor característico. Este metal é incluído no conjunto dos metais representativos, com número atômico igual a 13 (grupo do boro) e uma massa atômica relativa de 26,98 e densidade 2,7 g/cm³. Ele não é magnético, não sofre transformações alotrópicas e se cristaliza para a rede cúbica de face centrada (CFC) com o parâmetro $a = 0,4041\text{nm}$. Em estado ligado, o alumínio normalmente apresenta a valência +3, e nos casos raro, +1 (Epstein, 1980).

Suas principais limitações referem-se a resistência mecânica e dureza, que são relativamente baixas, mas podem ser melhoradas pela adição de elementos de liga. Possui ponto fusão de 660°C e ponto de ebulição 2520°C.

O alumínio pode ser supercondutor a temperatura abaixo de 1.19 K e em campo magnético de 100 Gauss). A Supercondutividade é um fenômeno observado em diversos metais e materiais cerâmicos. Quando esses materiais são

resfriados a temperaturas que vão do zero absoluto (0 graus Kelvin, - 273°C) à temperatura do nitrogênio líquido (77 K, -196°C). O alumínio encontra-se nos compostos químicos na forma de Al^{3+} . São conhecidos nove isótopos do alumínio, com números de massa entre 23 e 30, ocorrendo naturalmente, apenas, os isótopos ^{27}Al e ^{26}Al , sendo o primeiro o mais abundante e o segundo o mais estável. Adicionando pequenas adições de Ni provoca um aumento significativo da resistência. As ligas endurecíveis de alumínio mostram resistência inferior graças às reações galvânicas com cobre dissolvido (M. Park, 1979).

Em contato com o ar, do ponto de vista termodinâmico, o alumínio deve reagir e produzir óxido de alumínio Al_2O_3 , chamado de alumina e que aparece com grande variedade de formas cristalográficas. Este óxido ocorre pelo processo de passivação, fenômeno superficial e bastante complexo. É um processo natural, o qual pode ser entendido como sendo a reação que ocorre entre as espécies metálicas e as substâncias contidas nesse meio. Essa reação de passivação também pode ocorrer à temperatura ambiente e formar produtos de oxidação, que agem na proteção do metal, tornando esta superfície mais estável ao meio. As superfícies de alumínio possuem uma elevada afinidade com o oxigênio, logo o metal é recoberto sempre com uma fina camada de óxido, fato este que identifica basicamente sua estabilidade química (DIGGLE et al., 1969; BREAKSPERE, 1970; UHLIG, 1990; THOMAS & SHERWOOD, 1992). Isto o torna um dos materiais mais utilizados para proteção contra a corrosão em diversos meios, entre eles o mais agressivo que é o meio salino. Em contato com água ou umidade pode ocorrer o aparecimento de diferentes formas dos óxidos hidratados ou hidróxidos, dependendo das condições. Além disso, pode haver diversas fases cristalográficas, as quais distinguem isômeros. Ainda estes compostos de alumínio podem apresentar-se em formas cristalinas ou amorfas.

A camada de óxido é uma película contínua, fina, resistente cuja espessura é da ordem de 0,050 a 0,100 μm que é formada em 15 s Este óxido tem a dureza “próxima” à do diamante e alto ponto de fusão (2038°C). A rapidez com que esta camada de óxido é formada sobre a superfície do substrato, torna este metal “passivo” e, portanto, ideal para um leque de aplicações em ambientes sujeito a ataque químico e oxidação. O seu caráter anfotérico, permite-lhe reagir com ácidos inorgânicos e bases fortes. Pode ser dissolvido por soluções alcalinas e por alguns ácidos, como o ácido sulfúrico e ácido nítrico (M. Park, 1979).

As propriedades físicas do Al de alta pureza (99,996% Al) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do Alumínio (ALCOA, 1990)

Propriedades	Unidade (SI)	Dados	Temperatura de medição
Número atômico	-	13	-
Massa atômica	-	26,98	-
Raio Atômico	nm	0,143	-
Densidade	g/cm ³	2,7	20°C
Ponto de Fusão	°C	660	-
Ponto de ebulição	°C	2520	-
Calor específico	J/kg.K	400	20°C
Calor latente de fusão	KJ/kg	397	-
Estrutura cristalina	T (ambiente)	CFC	-
Coefficiente de dilatação térmica	-	12,8.10 ⁻⁶	20°C a 100°C
Condutividade Térmica (a 25°C)	[J/s/(m.K)] ou W/(m. °C)	222	25°C
Condutibilidade elétrica	IACS	64,94%	-
Resistividade elétrica	Ω.m nΩ.m	2,69.10 ⁻⁸ 26,55	20°C
Módulo de Elasticidade	Kgf/mm ²	7030	25°C

3.4.1 Propriedades mecânicas

Os valores das propriedades mecânicas podem dividir-se em dois grupos: os valores garantidos - são parâmetros mínimos estabelecidos pelas especificações e os valores típicos - obtidos por meio de dados estatísticos propiciados por ensaios rotineiros, que garantem que o material obedece às especificações. Sendo assim, o Limite de Resistência é a máxima tensão que o material resiste antes de haver sua ruptura. Para o alumínio puro recozido, essa razão é de aproximadamente 48 MPa (4,9 kg/mm²). O valor aumenta em função da liga, do trabalho a frio e do tratamento térmico (Alcoa, 20112).

O Limite de Escoamento consiste na tensão em que o material começa a deformar-se plasticamente e que para o alumínio é de 0,2% do comprimento

original medido em um corpo-de-prova. O limite de escoamento do alumínio puro é de aproximadamente 12,7 MPa (1,3 kg/mm²).

O Alongamento é expresso em porcentagem relativamente ao comprimento original medido em um corpo-de-prova e é calculado pela diferença entre os pontos de referência, antes e depois do ensaio de tração. Esse alongamento indica a ductilidade do metal ou da liga. Quanto mais fino o corpo-de-prova, menor será o alongamento e vice-versa.

A Dureza do alumínio definida como a medida da resistência de um metal à penetração. Para os metais, os mais comuns são os métodos de Brinell, Vickers e Rockwell. Não existe uma relação direta entre o valor da dureza e as propriedades mecânicas das várias ligas de alumínio. Os elementos de liga aumentam em muito sua resistência com o alumínio, assim como o tratamento térmico e o endurecimento pelo trabalho a frio. Entretanto a dureza é significativamente mais baixa do que a maioria dos aços (Epstein, 2009).

O Módulo de Elasticidade (Young) do alumínio é de 7030 kg/mm². A adição de outros elementos nas ligas não altera esse valor consideravelmente, que pode chegar a até 7500 kg/mm². Portanto, o Módulo de Elasticidade do alumínio representa um terço do módulo de elasticidade do aço.

O limite de resistência a Fadiga no alumínio, em testes normais, o chega a 50 milhões de inversão de tensão e pode variar de 25% a 50% da tensão de ruptura, conforme a liga (Epstein, 2009).

Quando exposto a temperaturas abaixo de zero, o alumínio não se torna frágil. sua resistência aumenta sem perder a ductilidade, logo pode ser escolhido para construção de tanques soldados para armazenamento de gás metano liquefeito, em temperaturas de (-160°C). A Tabela 2 apresenta algumas propriedades típicas de alumínio e suas ligas (Epstein, 2009).

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do alumínio e suas ligas. F - como fabricado; O - recozido; H - encruado; T - termicamente tratada (Esptein, 1980).

Ligas e Têmperas		Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%) em 50 mm x 12,7 esp.	Dureza HB (50 kgf, 10 mm)
Ligas Dúcteis	1100 O	34	90	35	23
	H18	150	165	15	44
	2024	76	185	22	47
		325	470	119	120
	3003 O	42	110	30	28
	H18	185	200	4	55
	5005 O	41	124	25	28
	H34	138	159	8	41
	5052 O	90	193	25	47
	H34	214	262	10	68
	5083 O	145	290	22	-
	H34	285	345	9	-
	6061 O	55	125	30	30
	T6	275	310	17	95
	7075 O	105	230	16	60
T6	505	570	11	150	
4032 T6	31	380	9	120	
Ligas Fundidas	206.0 T4	345	435	12	-
	360.0 F	170	325	3	-
	380.0 F	165	330	3	-
	413.0 F	140	300	3	-
	535.0 F	140	275	13	-
	712.0 F	170	240	5	-
	850.0 T5	75	160	10	-

3.5 Elementos de ligas

Os principais elementos de ligas adicionados ao alumínio são: cobre (Cu), magnésio (Mg), manganês (Mn), silício (Si) e zinco (Zn). Outros elementos podem estar presentes com a finalidade de provocar o refino de grão metálico ou conferir outra propriedade específica, tais como: cromo, zircônio, vanádio, ferro, bismuto, níquel e titânio. Este último, adicionado em pequena quantidade à liga, terá a função de refinamento dos grãos. Ele forma com o alumínio o composto $TiAl_3$ e com carbono forma o carbeto de titânio (TiC) os quais fazem o papel dos núcleos múltiplos no processo de cristalização. Neste caso o boreto TiB_2 também é eficiente (Caldeira, 2011).

Segundo Caldeira (2011), o aquecimento para solubilização seguido de resfriamento brusco para manter a solução sólida supersaturada provoca um efeito acentuado de endurecimento na liga. As ligas que são suscetíveis ao endurecimento por tratamentos térmicos são as que contêm cobre, zinco, e magnésio com silício. Os demais elementos adicionados provocam um efeito de endurecimento por formação de solução sólida com o alumínio nas condições de equilíbrio em temperatura ambiente. A tabela 3 ilustra a máxima solubilidade dos principais elementos adicionados ao alumínio e suas respectivas temperaturas.

As Ligas de Al-Si não podem endurecer por precipitação. Veja Tabela 4 p.13. Estas ligas são responsáveis pela maior parte de produção industrial e ainda são consideradas como base para muitas ligas e amplamente usada em peças fundidas contendo entre 10 e 13% de Si, melhorando consideravelmente a fluidez, necessária à fundição (Gomes, 1987).

As ligas fundidas de alumínio-magnésio, Al-Mg, (série 5xxx.) são adequadas para aplicações de peças tencionadas que são expostas à atmosfera marinha. As ligas trabalhadas, série 5xxx, que não são tratadas termicamente, preservam sua resistência com a formação de soluções sólidas as quais são, posteriormente, endurecidas por processo de deformação a frio. Para aumentar a resistência do alumínio é necessário apenas 1% de manganês. Quando for necessária a resistência à corrosão, deve-se adicionar nestas ligas até 5% de magnésio (Gomes, 1987).

Segundo Gomes (1987) as ligas de Al-Mn (série 3xxx) não são endurecíveis por precipitação, ou seja, não obtêm ganho de dureza mediante tratamento térmico

por envelhecimento e sim por encruamento, ou seja, por trabalho mecânico a frio. A liga 3003, com 1% de Mn, por exemplo, são muito utilizadas na fabricação de painéis e a 3004 (Al-Mn-Mg) são utilizadas na fabricação de latas para acondicionamentos de bebidas. Pode-se dizer que estas ligas possuem melhores propriedades mecânicas que o Al puro, com ductilidade ligeiramente inferior e boa resistência à corrosão.

As ligas de Al-Cu são ligas endurecidas por precipitação e são conhecidas da série 2xxx (trabalhadas) e 2xxx (fundidas) como ligas duralumínio. A liga 2017 contém 4,0 % de cobre, além da introdução de outros elementos (Al-4%Cu-0,5Mg-0,7) para elevar a resistência à tração de 9,1 kg/mm² a 18,2 kg/mm². São conhecidas como duralumínio.

Além das ligas do tipo duralumínio outras podem passar pelo processo de endurecimento por precipitação. São as que contêm pequenas adições de magnésio e silício. Elas formam compostos Mg₂Si, cuja solubilidade aumenta consideravelmente com elevada temperatura. A Tabela 3 mostra a solubilidade no estado sólido dos principais elementos de liga adicionadas ao alumínio.

Tabela 3 – Solubilidade no estado sólido dos principais elementos de liga adicionados ao alumínio (Mondolf, 1976).

Máxima solubilidade			
Elemento	% em peso	% em átomo	Temperatura (°C)
Cu	5,65	2,40	548
Mg	17,40	18,50	450
Mn	1,82	0,90	658
Si	1,60	1,60	577
Zn	82,80	66,40	382
Fe	0,05	0,025	655
Cr	0,77	0,40	661
Li	4,20	16,30	600
Mg ₂ Si	1,80	1,90	595
MgZn ₂	16,90	9,60	475

3.6 Ligas e características das ligas trabalháveis

A classificação do alumínio, bem como suas ligas, é baseada no sistema proposto pela *Aluminum Association, Inc. (AA)*. Com título denominado de *Aluminium and aluminium alloys – Chemical Composition*, também é adotado pela ABNT como referência no Brasil, através da norma NBR 6834 (2006), substituída pela ABNT NBR ISO 209:2010 que estabelece a classificação da composição química do alumínio e suas ligas. A classificação proposta pela AA é subdividida nos grupos das ligas fundidas e das ligas trabalháveis.

As ligas trabalháveis são aquelas na qual a forma final do produto é obtida pela transformação de um semimanufaturado (chapa, varas-vergalhão, perfil, etc.) ou pela transformação mecânica a frio ou a quente, do metal líquido solidificado (tarugo ou placa). A classificação destas ligas emprega um sistema de quatro dígitos $YX_1X_2X_3$. O primeiro dígito “Y” representa o elemento de liga principal e o grupo da liga. O segundo dígito “ X_1 ” representa as variações em relação aos limites de impurezas ou modificações na liga. O terceiro e o quarto dígito, “ X_2 ” e “ X_3 ”, indicam as diferentes liga do grupo ou o teor de pureza para o alumínio (Gomes, 1985).

A tabela 4 demonstra a classificação das ligas trabalháveis empregando o sistema de quatro dígitos $YX_1X_2X_3$, o principal elemento da liga de cada designação, o mecanismo de resistência e o processo de tratamento térmico.

Tabela 4 – Classificação das ligas de alumínio trabalháveis segundo AA (Abal, 2009).

Designação AA ($YX_1X_2X_3$)	Principal Elemento da Liga	Mecanismo de Resistência	Tratamento Térmico
1 XXX	Al não ligado com 99% de pureza	Não - Tratáveis termicamente	. F (como fabricado) Sem controle especial sobre o mec. de resistência.
2 XXX	Al-Cu	Tratáveis termicamente	
3 XXX	Al-Mn	Não - Tratáveis termicamente	. O (recozido) Menor valor de resistência mecânica.
4 XXX	Al-Si	Não - Tratáveis termicamente	. H (encruado) Aumento da resistência mecânica por deformação plástica
5 XXX	Al-Mg	Não - Tratáveis termicamente	
6 XXX	Al-Mg-Si	Tratáveis	

7 XXX	Al-Zn	termicamente Tratáveis termicamente	. W (solubilizado) Envelhecimento natural em temperatura ambiente após solubilização
8 XXX	Al + Outros Elementos	-	. T (tratado termicamente) Possibilidade da variação de resistência mecânica com ou sem encruamento complementar.

3.6.1 Características - ligas da série 1XXX

As ligas desta série não possuem outros elementos de liga. Considera-se alumínio não ligado com 99% de pureza e têm excelente resistência à corrosão. As principais ligas representantes são 1100, 1060 e 1350. São soldadas principalmente pelos processos MIG, TIG e eletrodo revestido. Os consumíveis aconselháveis são: ER1100 e ER 4043 (Bray *et al.*, 1992; Anderson, 2005).

3.6.2 Ligas da série 2XXX

Nesta série, o cobre é o elemento de liga principal e o Magnésio, o elemento secundário. São ligas tratáveis termicamente podendo atingir resistência de 450 MPa. A resistência à corrosão é inferior a das outras séries. Possui boa usinabilidade e suas características de solda são limitadas. Principais representantes 2014, 2017, 2024, 2219 e 2115.

Os eletrodos recomendados são: ER4043 e ER4145 (Bray *et al.*, 1992; Anderson, 2005).

3.6.3 Ligas da série 3XXX

Nesta série, o manganês é o elemento ligante principal. Ao adicionar 1,2% de manganês ao alumínio, aumenta-se levemente sua resistência mecânica e não reduz sua ductilidade ou resistência à corrosão. É uma das mais utilizadas. Sua conformabilidade e a resistência à corrosão são similares às do alumínio comercialmente puro e ligas da série 1XXX, possui propriedades mecânicas maiores do que desta. Os principais representantes são as ligas 3003, 3004 e

3005 e os eletrodos recomendados são: ER4043 e ER 5356 (Bray *et al.*, 1992; Anderson, 2005).

3.6.4 Ligas da série 4XXX

Nesta série, o elemento que o caracteriza é o silício e, quando adicionado ao alumínio, reduz seu ponto de fusão contribuindo na fluidez. Os principais representantes são as ligas 4047, 4032 e metal de adição ER4043 (Bray *et al.*, 1992; Anderson, 2005).

3.6.5 Ligas da série 5XXX

O elemento predominante, nesta série, que o caracteriza é o magnésio. Seu percentual na liga está entre 2,0% e 5,5%. Não deve exceder o máximo nas ligas trabalhadas para evitar a formação de precipitados de magnésio que atuam como fase anódica (Mg_5Al_3 ou Mg_5Al_8), causando corrosão sob tensão e trincas intergranulares (Bray *et al.*, 1992; Anderson, 2005).

As ligas principais desta série são: 5052, 5182, 5086 e 5083. As ligas com teores abaixo de 2,5% Mg (5052, 5005, 5050, 5056, 5183, 5556) ficam vulneráveis a fissuras a quente durante a solidificação. Estas podem ser superadas aumentando para 3,0% de Mg na liga (ALCAN, 1993). Especificamente na liga Al 5052, o teor de magnésio deve ser entre 2,20% e 2,80% e o cromo deve ficar entre 0,15% e 0,35%. Outros elementos que complementam a composição dessa liga são manganês, cobre e zircônio, que não podem ultrapassar a quantidade de 0,10%. A quantidade de ferro e silício deve ser respectivamente no máximo até 0,40% e 0,25% (ASTM, 2001).

A série 5XXX apresenta mecanismo de resistência mecânica baseado no endurecimento por deformação e possuem moderada resistência mecânica, excelente resistência à corrosão em ambientes salinos (água do mar) e alta tenacidade em temperaturas criogênicas próximas ao zero absoluto.

Os metais de adição, eletrodo nú (ER) são: ER-5356, ER-5556 e ER-5183. Estes são sugeridos a fim de evitar fissuração (ASTM B209M, 2001).

3.6.6 Ligas da série 6XXX - ligas tratadas termicamente de média resistência

Esta série é ligada com os elementos magnésio e silício. São tratáveis termicamente e apresentam características satisfatórias de usinabilidade, resistência à corrosão e soldabilidade. Durante a soldagem, este tipo de liga pode sofrer uma perda de dureza na zona de solda, devido ao aporte de calor. Exemplos típicos desta série são as ligas 6061, 6063 e 6111. Possuem elevada capacidade de extrusão (Bray *et al.*, 1992; Anderson, 2005).

3.6.7 Ligas da série 7XXX ligas tratadas termicamente de elevada resistência

Nas ligas da série 7XXX, o Zinco é o elemento de maior porcentagem, variando de 1 a 8%, sendo que juntamente com uma pequena porcentagem de magnésio resulta em uma liga tratável termicamente e com alta resistência mecânica. Outros elementos como cobre e cromo são adicionados em pequenas quantidades. As principais representantes são: 7005, 7075, 7475 e 7150. Os consumíveis recomendados são pertencentes à série 5XXX (Bray *et al.*, 1992; Anderson, 2005).

3.6.8 Ligas da série 8XXX

Estas ligas envolvem um grande número de composições com vários elementos de liga. As ligas não tratáveis termicamente que possuem lítio são usadas em fios de construção e cabos de serviços e construções de equipamento espaciais. Possui resistência mecânica média. O eletrodo recomendado é o ER4043 e as ligas principais são: 8017, 8176, 8081, 8280 e 8090 (Bray *et al.*, 1992; Anderson, 2005).

A Tabela 5 apresenta as ligas, características e aplicações das ligas de alumínio trabalháveis.

Tabela 5 - Características e aplicações das ligas de alumínio trabalháveis
(Abal, 2009)

Ligas de Alumínio Trabalháveis		
Liga	Características	Aplicações
1050 1100	Alumínio comercialmente puro, muito dúctil no estado recozido, indicado para deformação a frio. Estas ligas têm excelente resistência à corrosão, a qual é crescente com o aumento da pureza da liga.	Embalagens, folhas muito finas, recipientes p/ a indústria química, condutores elétricos, equipamentos para indústrias alimentícias, químicas, bebidas, trocadores de calor ou utensílios domésticos.
1350	Alumínio 99,5% de pureza, com condutibilidade mínima de 61% IACS	Barramentos elétricos, peças ou equipamentos que necessitam de alta condutibilidade elétrica.
2017 2024 2117 2219	Ligas de AlCu. Elevada resistência mecânica, alta ductibilidade, média resistência à corrosão e boa usinabilidade.	Peças usinadas e forjadas, indústria aeronáutica, transporte, máquinas e equipamentos. Rodas de caminhões, rodas, estrutura e asas de aviões, cabeçotes de cilindros de motores de aviões e caminhões, pistões e blocos de cilindros de motores.
3003	Ligas de AlMn, com boa resistência à corrosão, boa conformabilidade e moderada resistência mecânica. São ligas de uso geral.	Carrocerias de ônibus e de furgões, equipamentos rodoviários e veículos em geral, reboques, vagões, utensílios domésticos, equipamentos em geral, telhas, cumeeiras, rufos, calhas, forros, construção civil e fachadas.
4043 4047	Ligas de AlSi utilizadas em varetas de solda.	É utilizada na fabricação de consumíveis de soldagem e brasagem nas diversas formas, incluindo-se: arame, vareta e chapa de recobrimento sobre outras ligas.
5005 5052 5056 5083	Ligas de AlMg são dúcteis no estado recozido, mas endurecem rapidamente sob trabalho a frio. Alta resistência à corrosão em ambientes marítimos. Em geral a resistência mecânica aumenta com os teores crescentes de Mg.	Tanques criogênicos, carrocerias de ônibus, equipamentos rodoviários e veículos, vagões ferroviários, elementos estruturais, utensílios, equipamentos para indústria química e alimentícia e indústria naval (embarcações).
6053 6061 6063 6351	Ligas de AlMgSi, tratáveis termicamente com excelente resistência mecânica na têmpera T6.	Largamente empregadas em esquadrias de alumínio para construção civil, na confecção de treliças, na construção de pontes, em automóveis e na produção de trilhos condutores.
7075 7178	Ligas de AlZn, tratáveis termicamente, alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão e boa conformabilidade.	Peças sujeitas a elevados esforços mecânicos em indústria aeronáutica, militar, máquinas e equipamentos, moldes para injeção de plástico, estruturas, equipamentos e móveis.

3.7 Soldagem a arco elétrico e modo de transferência de metal

Soldagem a arco elétrico é um processo de união de metais por fusão. Consiste em aplicação de intenso calor entre duas partes metálicas até que se fundem. Pode ser empregado um material chamado de metal de adição durante a fusão. O calor necessário é produzido por um arco elétrico formado entre a peça a ser soldada e o eletrodo (Lincoln, 2000). No processo conhecido como soldagem MIG (Metal Inert Gas) e MAG (Metal Active Gas), o arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. O arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado à peça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás, inerte, ou por uma mistura de gases como a combinação do gás carbônico e Argônio (Harris, 2004). O gás que geralmente é usado na soldagem do alumínio é o argônio.

A transferência de metal através do arco, ocorre basicamente por distintos modos: curto-circuito, globular, globular repellido e *spray* (aerosol ou goticular) que podem ser obtidos pelo ajuste adequado das condições de operação (Taniguchi, 1982 *et al.*, 2005; Modenesi, 2009). Os parâmetros responsáveis pela delimitação do modo de transferência e condições operacionais (Lesnewich, 1958) são: corrente, tensão, velocidade de soldagem, abertura de raiz, ângulo de chanfro, ângulo de inclinação da tocha, polaridade, diâmetro do arame de solda, composição do eletrodo; composição do gás de proteção e polaridade (Modenesi, 2004). A Figura 2 mostra a geometria da transferência de metal de solda para o metal base.

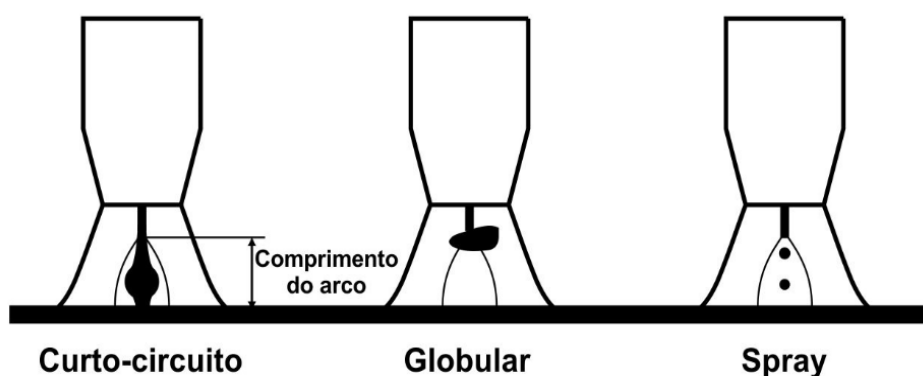


Figura 2 – Transferência de metal de solda, Fonte (Modenesi, 2004).

O alumínio tem uma condutividade elétrica muito mais elevada do que outros materiais, 64,94% (IACS). Quando a distância entre a ponta do eletrodo é aumentado, como mostra a Figura 3, o arco comprimento permanece sobre o mesmo. Isto significa que a técnica de soldagem usada pode interferir no arco elétrico. Em geral, para uma boa proteção do arco elétrico pelo gás, torna-se necessário um comprimento de arco curto (Lincoln, 2013).

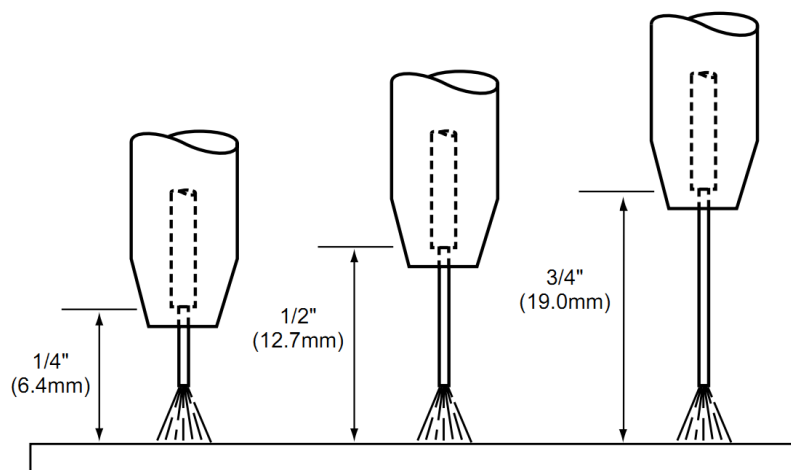


Figura 3 - Distância da tocha em relação ao metal base e comprimento do arco, Fonte (Lincoln, 2013).

3.8 Equipamento, processo de soldagem GMAW das ligas de alumínio e insumos.

O equipamento básico para o processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) consiste de tocha de soldagem, fonte de energia de corrente constante, fonte de gás e alimentador de arame. O processo é caracterizado por arco elétrico entre a peça e o consumível em forma de arame não revestido (arame nu), fornecido pelo alimentador contínuo, que uni materiais metálicos pelo aquecimento e fusão. O arco elétrico funde de forma contínua o arame à medida que é alimentado à poça de fusão. O metal de solda é protegido por um fluxo de gás, ou mistura de gases inertes (Cleber *et al.*; Cláudio, 2005). A Figura 4 mostra o mecanismo e o equipamento para soldagem GMAW.

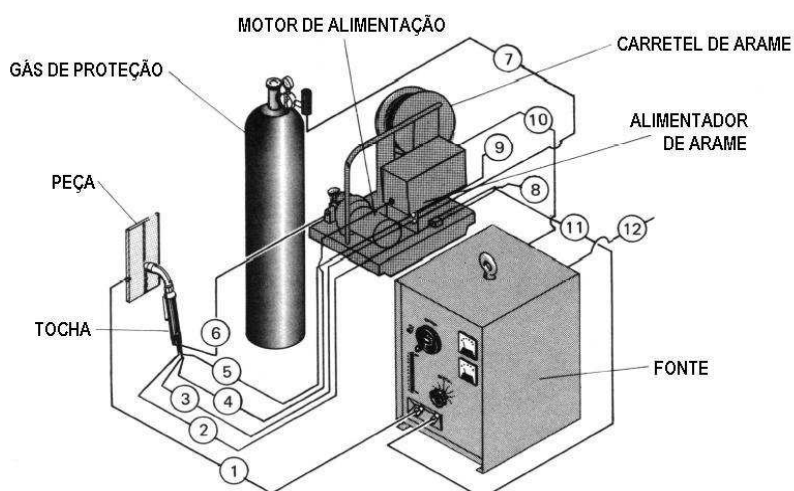


Figura 4 – Representação do mecanismo e equipamento para a soldagem GMAW (Fortes, 2004).

Os gases de proteção normalmente recomendados a soldagem GMAW do alumínio são o argônio, o hélio ou mistura argônio mais hélio. O argônio é indicado para soldas semi-automáticas e para materiais de pequena espessura, pois proporciona uma boa estabilidade de arco e uma forte ação de limpeza.

O perfil de penetração acentuado produzido pela atmosfera protetora de argônio puro é causado pela coluna de arco de alta densidade de corrente elétrica (Ampère), que gera uma grande concentração de energia numa pequena superfície. A Figura 5 apresenta uma ilustração esquemática dos perfis de cordões de solda obtidos com argônio, hélio e misturas argônio/hélio (Cleber *et al.*; Cláudio, 2005).



Figura 5 - Perfis de solda GMAW com diferentes atmosferas de proteção (Fortes e Araújo, 2004).

Para a soldagem do alumínio e suas ligas é utilizada a corrente contínua (CC) e geralmente o arame é utilizado no terminal negativo da fonte de soldagem. O arame para as ligas de alumínio mais utilizado é o de liga 4043 (Al-Si) com diâmetro que varia de 0,6 mm a 1,2 mm. O processo de soldagem MIG (Metal Inert Gas) também se opera de forma semi-automática ou automatizada e apresenta elevada produtividade. É o que apresenta maior taxa de deposição para o alumínio e pode soldar em chapas de espessura a partir de 3,2 mm. Há a possibilidade de soldagem em todas as posições (Cleber *et al.*; Cláudio, 2005), quando é utilizado dispositivo que facilite a soldagem.

A tocha do tipo *Push-Pull*, Figura 6, é um acessório que facilita o processo de soldagem GMAW no alumínio, contribuindo com o arraste do arame, facilitando sua saída indo em direção a poça de solda. Possui um motor de 24 volts e pequenas roldanas que ajudam no movimento do arame em direção ao bocal da tocha. A velocidade do arame neste ponto é a mesma do alimentador de arame acoplado na máquina de solda. Esta tocha é vantajosa no sentido de evitar o embolamento do arame na entrada do sistema de alimentação anterior ao cabo de solda, evitando paradas inesperadas nos procedimentos de soldagem. Como citado, este acessório é ideal para sustentação pesada de arames como alumínio, arames finos e para longas necessidades de cabos. A figura 6 (a, b) representam dois tipos do mecanismo (Cleber *et al.*; Cláudio, 2005).

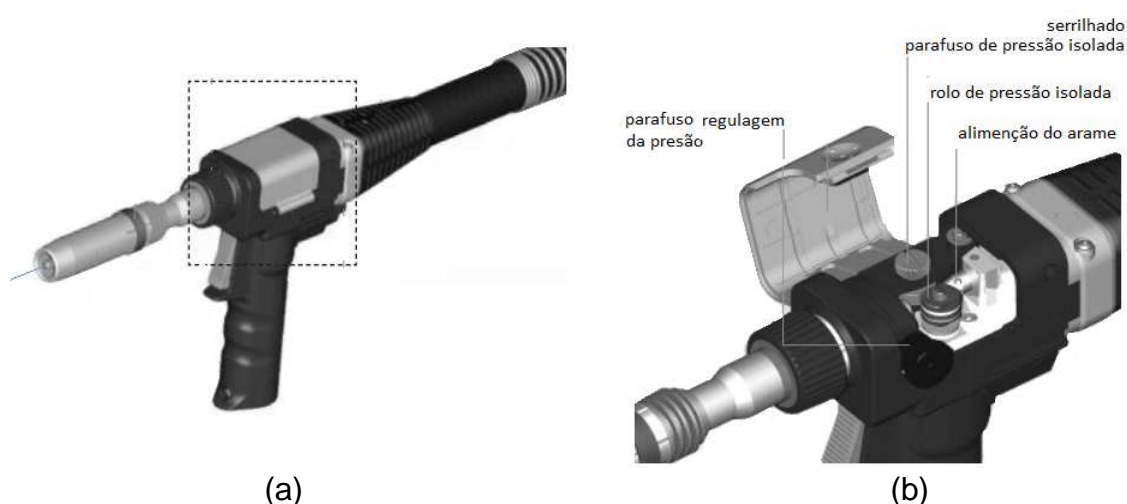


Figura 6 - Mecanismo para facilitar a saída do arame de alumínio – Linha Push-Pull: (a) modelos de tocha; (b) Mecanismo que pucha o arame de solda (Abicor, 2013).

3.9 Processo de soldagem GTAW/TIG das ligas de alumínio, equipamento, e insumos.

O processo de soldagem GTAW - Gas Tungsten Arc Welding, também chamado de processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), se caracteriza por um arco voltaico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível que suporte altas temperaturas (ponto de fusão de 3422 °C) e a peça (+) a ser soldada com ou sem metal de adição conforme é visto na Figura 7. O alumínio é soldado na condição de corrente contínua (CC) onde o eletrodo é conectado no terminal negativo da fonte de soldagem. Quando esta corrente é usada, o fluxo de elétrons alterna-se entre CC- e CC+, momento no qual a camada de óxido é quebrada, permitindo assim o fluxo de corrente elétrica.

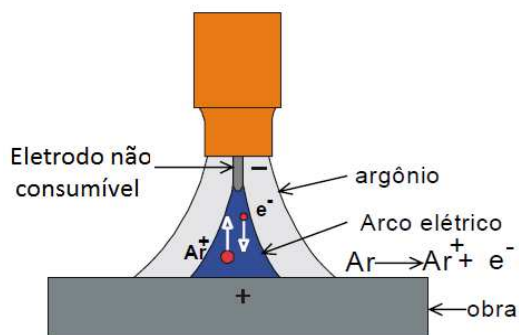


Figura 7 - Arco elétrico utilizando o argônio como gás de proteção (Araújo, 2008).

A Figura 8 mostra a representação do esquema de um sistema de soldagem TIG. O equipamento básico utilizado na soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) contém: mesa de soldagem, fonte de energia tipo corrente constante, cabos, tocha, eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção com regulador de vazão, ferramentas e equipamentos de segurança e um ignitor, gerador de alta frequência (Altshuller, 1998).

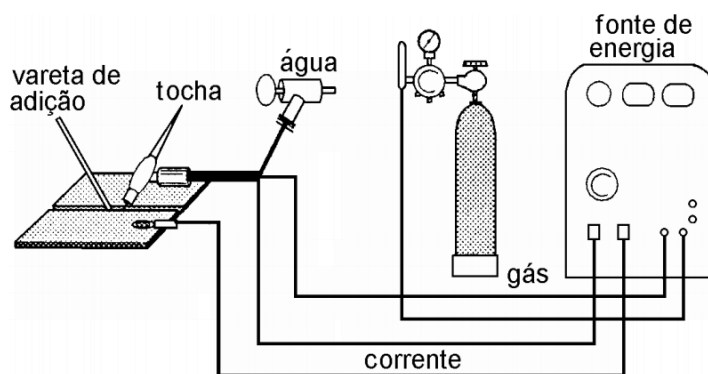


Figura 8 - Representação do esquema de um sistema de soldagem TIG (Altshuller, 1998).

Pelo estabelecimento de um forte campo elétrico em uma região com tamanhos de microns sobre a superfície da peça a corrente é conduzida através de plasma, parcialmente por íons e principalmente por elétrons que são emitidos a partir do eletrodo de tungstênio (cátodo). O tungstênio puro é um metal que suporta trabalhos em alta temperatura. Tem o mais alto ponto de fusão de todos os metais, $3.422\text{ }^{\circ}\text{C}$ e apresenta o menor coeficiente de expansão térmica entre todos os metais puros e que permite a emissão dos elétrons por efeito termiônico quando a energia acumulada supera um dado valor necessário. Quando os elétrons são emitidos na região de emissão (localizada na ponta do eletrodo de tungstênio) é apresentada uma densidade de corrente que fica entre 10^6 e 10^8 A/m^2 . As densidades de correntes são atingidas quanto maior for a temperatura do cátodo. A pequena expansão térmica e os elevados ponto de fusão e resistência do tungstênio devem-se a ligações covalentes formadas entre os átomos de tungstênio pelos elétrons 5d. Quanto mais alta a temperatura que o cátodo pode atingir, mais fácil atingirá a faixa de densidade de corrente característica da emissão termiônica (Key, 1993).

O metal de adição, vareta, que é usado na soldagem, possui comprimento de de 1,0 metro, nas bitolas de 1,6 a 6,4 mm. Na soldagem automatizada o metal de adição é fornecido em bobinas que deve ser instalado no mecanismo de arraste. O processo consiste em alimentar a poça de fusão por meio de um cabeçote alimentador, sendo possível a regulagem da saída o arame durante o processo (Altshuller, 1998).

Na soldagem do alumínio a tocha que contém o eletrodo de tungstênio deve trabalhar com inclinação negativa (empurrando ou atacando). A figura 9 mostra um exemplo da inclinação e o sentido do bico de solda no ato de soldagem.

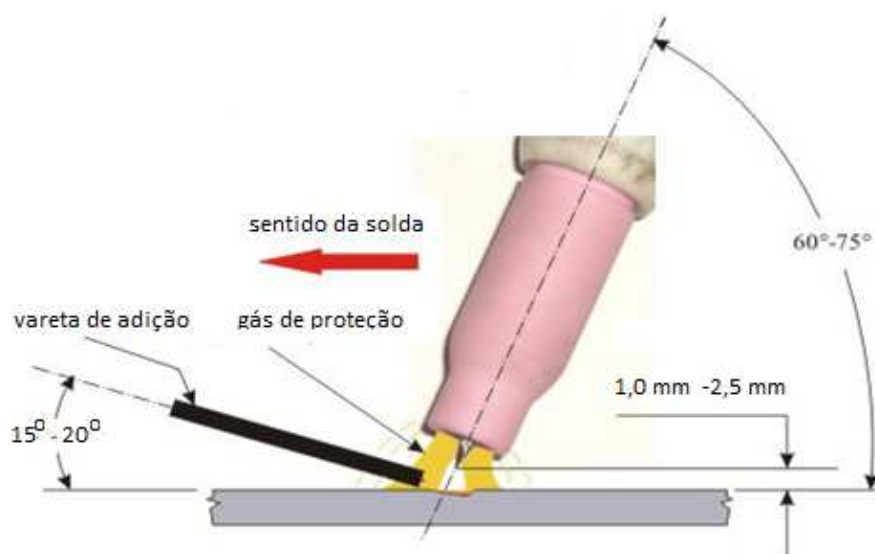


Figura 9 – Sentido do bico de solda na soldagem inclinação negativa (Araújo, 2008).

3.10 Aporte térmico

A maioria dos processos de soldagem por fusão é caracterizada pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Esta energia concentrada pode gerar, em pequenas regiões, temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume do material.

Na soldagem a arco elétrico, o aporte térmico (*heat input*) é definido como o calor cedido a junta soldada por unidade de comprimento calculado através da equação 3.1.

$$\text{Aporte Térmico (KJ/mm)} = \frac{\text{Tensão (V)} \times \text{Corrente (A)}}{\text{Veloc. de soldagem (mm/s)}} \quad (3.1)$$

3.11 Soldagem do alumínio

3.11.1 Técnicas de soldagem de Al e suas ligas

A soldagem do alumínio e suas ligas apresentam algumas peculiaridades em relação à soldagem dos aços, entretanto, é uma prática já consideravelmente dominada. Um problema característico na soldagem do alumínio é a facilidade do mesmo em reagir com o oxigênio, formando a alumina (Al_2O_3). A alumina é porosa, podendo reter umidade e sujeira que podem contaminar o cordão de solda. A alta condutividade térmica e elétrica do alumínio, bem como o seu alto coeficiente de expansão linear, também influencia nos requisitos de soldagem (Domingues, 2011).

Segundo Domingues (2011), a maioria das ligas de alumínio é soldável pelos processos tradicionais de união: soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (GMAW e GTAW), soldagem por resistência elétrica e brasagem. Estes processos são empregados, e em grande parte, nas ligas de alumínio fundidas e/ou trabalhadas.

A obtenção de bons resultados na soldagem do alumínio e suas ligas exige certos cuidados no armazenamento e manuseio dos materiais base e de adição, na preparação da junta, na própria operação de soldagem e na limpeza e acabamento da junta. A contaminação do material, em qualquer etapa do processamento, representará a geração de descontinuidades, instabilidade no processo de soldagem e/ou baixo desempenho da junta soldada. A limpeza do local de soldagem deve ser um item de especial atenção, pois muitos contaminantes são oriundos do ambiente de fabricação industrial comum (óleo, graxa, partículas de abrasivos, limalhas de ferro, entre outros). O ambiente para armazenamento deve ser coberto, seco e com temperatura uniforme para evitar a exposição e condensação de água na superfície do material (Domingues, 2011).

Segundo Domingues (2011), durante a soldagem do alumínio é muito comum à formação de porosidade. O maior responsável por essa ocorrência é o hidrogênio, normalmente introduzido na forma de hidrocarbonetos (óleos e graxas) e umidade. A condensação de água na superfície do material é particularmente indesejável, pois a água acumulada entre as chapas produz uma fina camada de

óxido hidratado, que além de ser uma fonte de hidrogênio para formação de porosidade, é uma barreira dielétrica que produz instabilidade no arco elétrico.

3.11.2 Condições de soldagem da liga de Al e cuidados especiais

A soldagem envolve a fusão conjunta das bordas a serem unidas, frequentemente pela adição de metal líquido para preencher um canal com a forma de V com um determinado grau (Barra, 2003).

Na preparação para soldagem as etapas que envolvem o corte e a preparação do chanfro das chapas de alumínio devem ser feitas com cuidados. O corte mecânico é uma alternativa muito utilizada devido à boa qualidade da superfície obtida, havendo a possibilidade, entretanto, de ocorrer deformações, principalmente nas bordas, dependendo do método de corte mecânico empregado. O corte por plasma e por laser são alternativas, que estão crescendo, face à maior disponibilidade desses processos e à sua alta flexibilidade para cortar geometrias complexas com grande precisão e de forma muito rápida (Zulian, 2010).

Antes da soldagem o filme de óxido da superfície do material deve ser removido, pois este passa a ser um contaminante na poça de fusão. A limpeza das chapas deve ser executada de forma a retirar toda a rebarba. Também se deve limpar a superfície do arame de solda a fim de retirar o hidrogênio contido em sua superfície para evitar a contaminação pelo próprio da poça de fusão. (Barra, 2003).

Para uma boa soldagem, podem-se listar boas práticas antes da soldagem:

- i) Fazer limpeza no metal de adição e proteger o arco elétrico contra o ar atmosférico a fim de reduzir o contato deste elemento químico no momento da soldagem da liga;
- ii) Remover graxas e óleos da área a ser soldada;
- iii) Utilizar gás “limpo” e seco. Argônio ou hélio.
- iv) Usar gás hélio para juntas espessas;
- v) Armazenar os consumíveis de soldagem em locais secos e com umidade de temperaturas controladas;
- vi) Pré-aquecer o material a ser soldado.

O pré-aquecimento nas chapas de alumínio fundido deve ser feito aplicando calor de 65°C a 100°C durante dez minutos (Barra, 2003).

A limpeza deve ser efetuada tão próxima do momento da soldagem quanto possível, pois a camada de óxido de alumínio começa a se regenerar

imediatamente após a sua remoção, aproximadamente em quinze segundos. Existem dois métodos diferentes de limpeza: química e mecânica. A limpeza química pode ser executada com aplicação de um solvente (acetona ou álcool) ou com solução de soda cáustica e/ou ácido nítrico para decapagem da superfície do material. A limpeza mecânica é, em geral, efetuada com uma escova de aço inoxidável e/ou lixadeira exclusiva para a limpeza da superfície das peças de alumínio (Domingues, 2011).

3.11.3 Problemas metalúrgicos na soldagem do alumínio

O alumínio é muito suscetível à formação de trincas e porosidade durante a soldagem principalmente pelo o hidrogênio. Como citado no item 3.11.1, a condensação de água na superfície do material é particularmente indesejável, pois a água acumulada entre as chapas produz uma fina camada de óxido hidratado, que além de ser uma fonte de hidrogênio para formação de porosidade, é uma barreira dielétrica que produz instabilidade no arco elétrico. Pode-se citar também a formação de respingos de solda, formação de trincas ou fissuras a alta temperatura (principalmente na solidificação), a perda de resistência mecânica (para metal encruado ou endurecido por precipitação). O óxido de alumínio (Al_2O_3), mencionado no item 3.4.1, pode contaminar o cordão de solda na solidificação. Possui ponto de fusão de 203 Uma má regulagem na alimentação do arame e falta de limpeza deste também gera problemas metalúrgicos na soldagem do alumínio (Modenesi, 2008).

O coeficiente de expansão térmica do alumínio é duas vezes maior do que o aço e este provoca a ocorrência de distorção e aparecimento de trincas ou fissuras. Estas são descontinuidades que tendem a se propagar por efeito de contração local na direção de propagação (contração do metal de solda – redução do volume da poça pela contração líquida, contração de solidificação e contração devido a mudança de fase). Estas descontinuidades são consideradas as mais severas em soldagem, por servirem como concentradores de tensões, podendo criar então as fissuras (Modenesi, 2008).

3.11.3.1 Fissuras

As fissuras por solidificação, que é uma descontinuidade em uma junta soldada, podem ocorrer como na soldagem do aço, na liga de alumínio durante a soldagem. Isto ocorre nas ligas de alumínio devido às tensões geradas pela solda, ocasionado pela alta expansão térmica e a contração substancial na solidificação, normalmente 5% a mais do que nas soldagens em aço. Sobretudo, as fissuras formam-se quando tensões de tração se desenvolvem em um material fragilizado, incapaz de se deformar plasticamente para absorver estas tensões. Tensões de tração elevadas se desenvolvem na região da solda como resultado das expansões e contrações térmicas localizadas (associadas com o aquecimento não uniforme característico da soldagem), das variações de volume devido a transformações de fase e como resultado das ligações entre as peças sendo soldadas e o restante da estrutura (Modenesi, 2008).

Segundo Modenesi (2008), nota-se que em certas ligas de alumínio (até 5% Si), a trinca se forma em temperaturas bem inferiores à linha *sólidus*, quando o filme final de metal líquido já se solidificou, contrários a de ligas de aço, em que trincas ocorrem em altas temperaturas, próximas à temperatura *sólidus* do material. Trincas, inferiores à linha *sólidus*, também são formadas na liga bronze de alumínio (com até 7,5% Al) e também nas ligas de níquel contendo elementos como Pb, Bi, S, P, Cd, Zr e B. As trincas são longitudinais e superficiais, ocorrendo, com frequência no centro do cordão, como mostra a Figura 10, mas podem ser também transversais ou, na cratera, radiais. Trincas internas podem também ser formadas e serem macro ou microscópicas.

Os riscos de fissuras podem ser reduzidos utilizando metais de adição mais resistentes como ligas da série 4xxx (Al-Si) e liga da série 5xxx (Al-Mg). A linha de soldagem deve ter uma espessura que resista às tensões causadas pelas contrações.

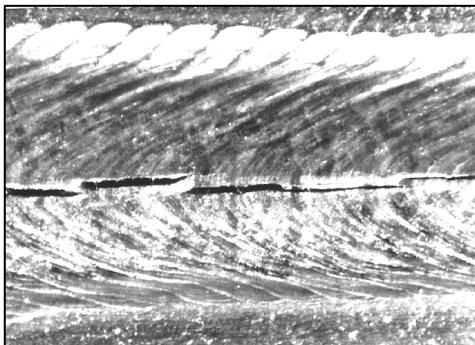


Figura 10 - Exemplo de trinca no centro do cordão de liga de alumínio após processo de soldagem (Modenesi, 2008)

3.11.3.2 Respingos

A geração de respingos é considerada um fator influente tanto na qualidade quanto na produtividade final da solda (Dantas e Costa, 2004). A geração de respingos apresenta como inconvenientes, além do desperdício de material fundido que não vira solda, o custo com mão-de-obra para a remoção dos mesmos, quando permanecem aderidos à peça soldada, e a dificuldade operacional pela adesão dos respingos à parede do bocal, que dificulta a passagem do gás de proteção. Desse modo, a geração de respingos torna-se um componente do indicador de produtividade para cada processo. Entretanto, a geração de respingos depende do processo de soldagem. Por outro lado, ela é influenciada por vários parâmetros que compõem o processo, dentro dos quais citam-se:

- A composição do gás de proteção. A quantidade do respingo gerado pode ser minimizada pela composição do gás de proteção, sendo que 100% de CO_2 tende a gerar uma quantidade maior do que misturas de Ar com CO_2 . Para a soldagem do alumínio é recomendado o uso do Argônio puro.
- As características do metal de adição e de base;
- Tensão muito baixa;
- O tipo de transferência metálica. Para Hashimoto e Morimoto (2006), o modo de transferência metálica atua significativamente no modo de formação do respingo, sendo que no modo de curto-circuito ocorre a formação do respingo logo após o destacamento da gota.

Testes para promover uma análise comparativa em relação à geração de respingos envolvendo processo FCAW e o GMAW, foram realizados de acordo com procedimento de soldagem (Fernandes Ernandes & Scotti, 2009). No teste foi utilizado uma fonte de soldagem MIG/MAG eletrônica de tensão constante e uma unidade robótica. Tanto para o arame tubular como para o arame maciço, diâmetro de 1,2 mm, os parâmetros foram dimensionados a fim de manter um volume constante de solda sobre uma barra quadrada de dimensões 9,5 x 9,5 x 480 mm e o mesmo nível de corrente, ambas as abordagens para criar um indicador de comparação coerente entre os dois processos. Tais testes foram realizados com parâmetros regulados conforme Tabela 6, sendo que valores como distância bico contato peça e vazão de gás seguem recomendação do fabricante de arame. Como se vê, procurou-se trabalhar com ambos os processos em condições de regulagem de parâmetros apropriadas e usuais na prática para a faixa de corrente escolhida para a comparação (que no caso foi curto-circuito com o GMAW).

A melhor estabilidade operacional mostrou estar entre 20 em 22 V, através do critério de estabilidade de transferência do metal de solda (Souza, *et al.* 2009). Para o arame tubular, verificou-se que este processo apresenta uma robustez maior que MIG/MAG, pois não apresenta uma grande variabilidade no aspecto do cordão e rendimento de deposição quando se varia a regulagem de tensão.

Os respingos das soldas realizadas foram separados inicialmente por alcance, posteriormente, por granulometria, e medida as respectivas distribuições das massas. A classificação por faixas está de acordo com o procedimento de solda (Fernandes & Scotti, 2009). Desse modo, as seguintes observações foram feitas sobre os resultados:

Para os processos em questão, não há uma diferença significativa na geração de respingos (tanto em alcance como em tamanhos) entre as regulagens de tensão quando se trabalha na faixa adequada de tensão.

Tabela 6 - Parâmetro de regulagem para as soldagens comparativas entre GMAW e FCAW (Fernandes & Scotti, 2009).

Parâmetros	Maciço	Tubular
Arame	AWS ER 70S-6	AWS E 71T-1
Faixa de Tensão (V)	20 -24	24 - 28
Corrente (A)	190	190
Gás Proteção	100% e 25% CO ₂	100% e 25% CO ₂
Vazão do Gás (l/min)	15	20
Val (m/min)	4,8	5,1
Vsol (cm/min)	32,5	35
DBCP (mm)	12	20

Obs: Val = velocidade de alimentação; Vsol = velocidade de soldagem; DBCP = distância do bico de contato até a peça.

O gás de proteção apresenta influência significativa sob a geração de respingos apenas para o arame tubular, ou seja, a mistura Ar + CO₂ gera uma quantidade menor de respingos.

No que se refere à distribuição dos respingos por alcance e tamanho, o arame tubular gera respingos maiores (igual ou superior a dois milímetros de diâmetro) e mais próximos ao cordão de solda, enquanto que para o maciço gera respingos mais finos (inferiores a meio milímetro) e a distribuição ocorre de forma mais homogênea entre os três alcances estabelecidos para a realização do ensaio.

Em suma, do ponto de vista de geração de respingo, o processo eletrodo tubular parece não ser satisfatório. Porém, quanto à produtividade, é necessário avaliar o grau de dificuldade para remoção dos respingos de cada processo e a quantidade de horas de mão-de-obra para a realização da remoção dos mesmos da região soldada. Logo, para a escolha de um processo em detrimento ao outro se deve realizar antes uma análise sistemática sobre dificuldades de remoção dos respingos (Fernandes & Scotti, 2009).

3.11.3.3 Porosidade

A porosidade é um conjunto de poros formados no interior do material, originados pela dissolução de gases. Os mecanismos de formação se acontecem

no momento em que as ligas se solidificam. O alumínio é um metal susceptível a porosidade na solidificação.

A presença de poros pode ser causada por fenômenos diferentes: contração de solidificação e presença de gases dissolvidos. Durante a transformação do estado líquido para sólido, ocorre um agrupamento (empacotamento) dos átomos, formando estruturas cristalinas, o que é chamado de contração da liga. Na absoluta maioria dos casos esta transformação é acompanhada por um aumento da densidade, onde há uma contração. Como resultado, surgem poros no material, que podem ser de dois tipos: macroporosidades e microporosidades. As condições para o surgimento de micro ou macroporosidades depende do fator de dependência em relação ao intervalo de solidificação, Figura 11. Ligas metálicas com pequeno intervalo de solidificação possuem dendritas pequenas na interface L-S e tendem a gerar macroporosidades. O alumínio é um caso excepcional, que apesar de apresentar dendritas pequenas, possui grande contração de solidificação. (Mathers, 2002). A Figura 11 mostra o efeito do intervalo de solidificação na contração em função da temperatura e percentual de elemento de liga.

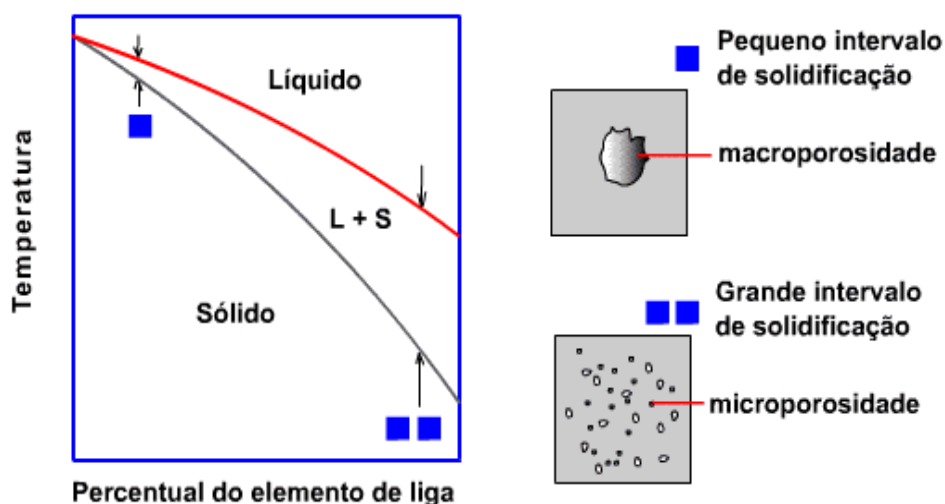


Figura 11 - Efeito do intervalo de solidificação na contração (Mathers, 2002).

O hidrogênio é altamente solúvel no alumínio fundido e além de poros pode provocar também a trinca a frio após a solidificação da solda.

A porosidade na soldagem das ligas de alumínio é originada, principalmente pelo hidrogênio presente no gás de proteção, como impurezas e no metal base ou na superfície do material de enchimento. Também são encontrados como hidratos coexistentes no filme de óxidos na superfície do alumínio. O hidrogênio presente na umidade pode ser absorvido durante a soldagem, mesmo com gás de proteção. O hidrogênio captado pelo metal em fusão diminui a solubilidade durante o resfriamento da poça de fusão. Como a velocidade de resfriamento é alta e a densidade do alumínio é baixa, o hidrogênio captado não consegue escapar para a atmosfera e fica retido na estrutura solidificada, sob a forma de poros. Como é difícil exercer um controle efetivo na velocidade de resfriamento, o meio mais eficiente de evitar a porosidade na soldagem do alumínio e suas ligas seria controlar as fontes que originam o hidrogênio. Os poros podem ser extremamente finos ou chegar a de 3 a 4 mm de diâmetro (Mathers, 2002).

Alguns procedimentos antes da soldagem devem ser feitos:

- Limpeza rigorosa do metal base e do metal de adição para eliminar os hidrocarbonetos.
- Executar escovação, para retirada do Al_2O_3 .
- Utilizar gás de boa qualidade.
- Aquecer o metal de adição e o metal base para eliminar a água contida na superfície do material.
- Fazer uma manutenção nos equipamentos e tubulações
- Tentar manter baixa a temperatura do metal líquido, minimizando assim a dissolução dos gases no metal. Para isto devem-se observar os parâmetros de soldagem.
- Fundir o metal sob condições de vácuo.
- Borbulhar gás inerte (argônio, nitrogênio) no metal líquido arrastando os gases dissolvidos para fora da massa de metal.

A figura 12 descreve a solubilidade do hidrogênio no alumínio em função da temperatura.

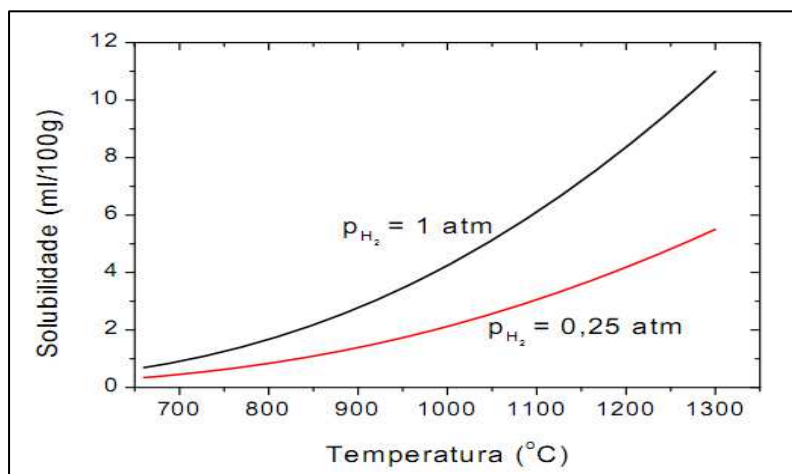


Figura 12 – Solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido para dois valores de pressão parcial de hidrogênio (Modenesi, 2011).

3.11.3.4 Óxido de alumínio

Conforme mencionado no 3.4 sobre sua formação, o óxido de alumínio é considerado uma camada que protege o alumínio da oxidação, ou seja, eleva a resistência ao desgaste, porém como este óxido possui ponto de fusão elevado (2038°C), sua fusão é dificultada durante o processo de solda, visto que o Al possui ponto de fusão de 660°C. Este problema metalúrgico ocorre, se não for feita a remoção, ao máximo, do Al₂O₃ da superfície da chapa de alumínio, antes do processo de soldagem (Domingues, 2011).

A remoção da camada do Al₂O₃ pode ser feita pelas seguintes formas: ação mecânica, limpeza química ou ataque catódico. A remoção por ação mecânica é feita por meio de esmerilhamento ou escovamento, momentos antes da soldagem. A limpeza química é feita pela aplicação de bases e ácidos alternadamente, a temperaturas variadas, intercaladas por lavagem com água. O ataque catódico consiste em alternar o sentido da corrente elétrica de soldagem, sendo muito utilizado no processo TIG

3.11.3.5 Soldagem das ligas de alumínio incluindo a liga 5083 usada no seguimento naval e seleção de consumíveis.

A soldagem das ligas de alumínio são descritos através de pontos-chave para um bom resultado: qualidade do consumível de Al; armazenagem e uso do consumível de Al; preparação da junta (goivagem/esmerilhamento); seleção do gás de proteção; seleção de manuseio do equipamento e seleção de consumíveis.

Tanto no processo MIG e TIG, a seleção de consumível é baseada na composição química e em aspectos metalúrgicos e mecânicos. A especificação de consumíveis para a soldagem de alumínio e suas ligas para esses dois processos é coberta pelas normas AWS A5.3 e A5.10 (Modenesi, 2008).

Para a maioria das ligas de alumínio, a seleção do consumível não é apenas baseada no seu limite de resistência. Há um número significativo de variáveis que devem ser consideradas durante o processo de seleção dos consumíveis entre as quais se citam (Lighth, 2009):

a) Integridade da junta: baseada na combinação consumível e metal base e na sua relativa sensibilidade à trinca de solidificação a quente;

b) Resistência mecânica da junta soldada: baseada na possibilidade de o consumível atingir ou exceder a resistência requerida pela junta na condição como soldador;

c) Ductilidade: um aumento de ductilidade em consumível para soldas de Al representa maior possibilidade de deformação plástica e redistribuição de cargas, reduzindo a sensibilidade à propagação de fissuras. A ductilidade deve ser considerada como requisito chave quando há conformação ou impacto após soldagem;

d) Temperatura em serviço: acima de 65°C, devem ser selecionados consumíveis que possam operar a essas temperaturas, sem que afetem as propriedades requeridas para a junta soldadas. A Tabela 7 apresenta as propriedades mecânicas dos consumíveis de Al em relação à resistência a tração e cisalhamento. Os consumíveis para ligas Al-Mg com mais de 3% Mg, como os consumíveis 5183, 5356, 5556 e 5654, quando expostos a elevadas temperaturas, podem produzir uma segregação de magnésio nos contornos de grãos do material causando uma tensão maior neste ponto (Domingues, 2011).

Tabela 7 – Propriedades mecânicas das ligas à base de Al em relação à resistência a tração e cisalhamento (ABS Rules for Materials and Welding, 2006)

Consumíveis	Min. Resistência ao Cisalhamento		Limite de resistência à tração do consumível	
	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa

1100	7,5	52	13,5	93
2319	16	110	37,5	93
4043	11,5	79	29	200
5183	18,5	128	41	283
5356	17	117	38	268
5554	17	117	33	230
5556	20	138	42	290
5654	12	83	32	221

No seguimento naval a liga-base 5083 do sistema Al-Mg é a mais empregada. A escolha desta liga depende das aplicações e serviços demandados para a estrutura a ser soldada. Estas ligas podem ser aplicadas na soldagem dos cascos e da estrutura dos tanques de estocagem, em temperaturas criogênicas e sob pressão. É utilizada na indústria naval por conta de suas propriedades e por oferecer uma boa resistência mecânica e à corrosão. Possui em suas ligas o magnésio, manganês, cromo e titânio Domingues (2011).

Segundo Domingues (2011), outras ligas, de menores resistências, tais como 5052 e 5086, têm sido empregadas para fabricação de pequenos barcos na indústria naval, mas a liga 5083 apresenta-se ainda como a predominante neste seguimento.

3.12 Condutividade térmica e geometria da junta

Materiais de elevada condutividade térmica, como o cobre e alumínio, dissipam o calor rapidamente por condução (maior velocidade de resfriamento),

dificultando a fusão localizada, exigindo fonte de calor mais intensa, conforme mostrado na Figura 13(a). Materiais de menores condutividades térmicas, com o aço, dissipam o calor por condução mais lentamente, tendendo a apresentar gradientes térmicos mais fechados no aquecimento e menor velocidade de resfriamento. Ambos podem se tornar problema metalúrgico se não forem conferidos os procedimentos de soldagem adequados (Modenesi, 2004).

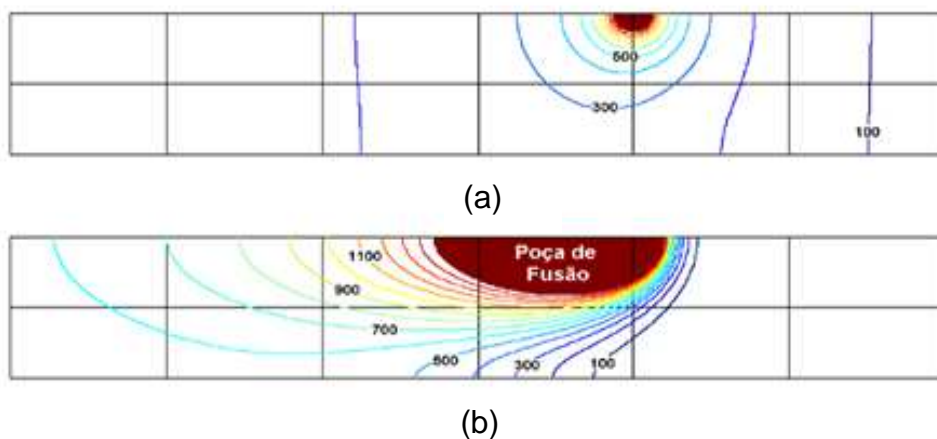


Figura 13 – Gradientes Térmicos. (a) Alumínio, (b) Aço (Modenesi, 2008).

3.13 Soldagem unilateral e suas vantagens

A soldagem unilateral, como o próprio nome sugere é uma soldagem na qual a solda é realizada somente por um lado da peça. Existem vários tipos de soldagem unilateral que pode ser utilizada com ajuda de suportes ou com juntas adequadas para a realização da soldagem.

No século vinte, quando se utilizava a soldagem unilateral de grandes tubos de aço para caldeiras foi inventado o suporte de solda chamado de “*Backing ring*” utilizado em tubos de aço de grande espessura. Neste período apenas o processo de soldagem a gás era utilizado (Teral, 1969). Desenvolveram-se técnicas para solucionar problemas como a eliminação de trabalho ineficiente de soldagem na posição sobre cabeça, em peça que não pode ser virada e redução do tempo de soldagem. Após mudanças na competitividade e escassez de mão de obra especializada e a busca de melhoria de produtividade se tornou necessidade urgente. A racionalização de sistemas de produção e o forte controle da qualidade se tornaram parâmetro para o crescimento da indústria de construção. Como

resultado dos esforços a indústria influenciou a utilização de soldagem unilateral mais intensamente, suprimindo trabalhos extras na preparação da junta antes e após a soldagem, com o menor tempo possível, eliminando a necessidade de virar a peça (Teral, 1969).

A utilização de suportes na parte inferior da solda, Figura 14, ajuda a conter o metal fundido na operação de soldagem e pode ser removido após o término da soldagem (Fortes e Araújo, 2004).

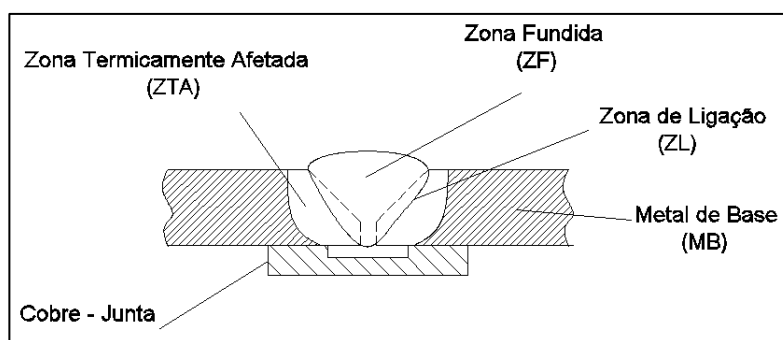


Figura 14 - Posição do suporte junto como cordão de solda (Marques e Modenesi, 2006).

Os suportes de solda são utilizados quando o metal base não apresenta massa suficiente para fornecer um adequado suporte para a poça líquida, ou quando se deseja obter penetração total em um único passe. A poça que é gerada fica por um período de tempo em estado líquido, tornando necessário um suporte para conter a poça líquida até a sua solidificação (Paranhos, 1999).

A soldagem unilateral possui um amplo campo de aplicação, pois é evitado o giro da peça para soldar o lado oposto. Evita a realização da goivagem ou esmerilhamento do passe de raiz executado anteriormente e a finalização da soldagem através realização do novo passe de acabamento (Muir, 1985).

Segundo Muir (1985), as vantagens deste procedimento são:

- a) Redução dos ensaios não destrutivos (END) e dos reparos, comparados com a soldagem pelos dois lados da junta.
- b) Passes reduzidos nas soldas de fabricação de peças, tendo como resultado a redução na distorção e nos custos.
- c) Redução na quantidade de exames radiográficos devido à prevenção do defeito da falta de fusão.

A soldagem unilateral pode ser utilizada em processos automáticos, semi-automáticos e manuais. É bastante empregada na fabricação de grande porte como, por exemplo, na indústria naval (Paranhos e Souza, 1999).

Para obter informações referentes às soldagens unilaterais citam-se ainda autores de trabalhos técnicos (Macedo, 1985; Malin, 2001; Cantrell, 1982 e Muir, 1985). Nestes trabalhos destaca-se a importância da execução do passe de raiz na soldagem unilateral com qualidade. De acordo com Malin (2001) é necessário indicar algumas características geométricas pertinentes ao passe de raiz, como mostrado na Figura 15.

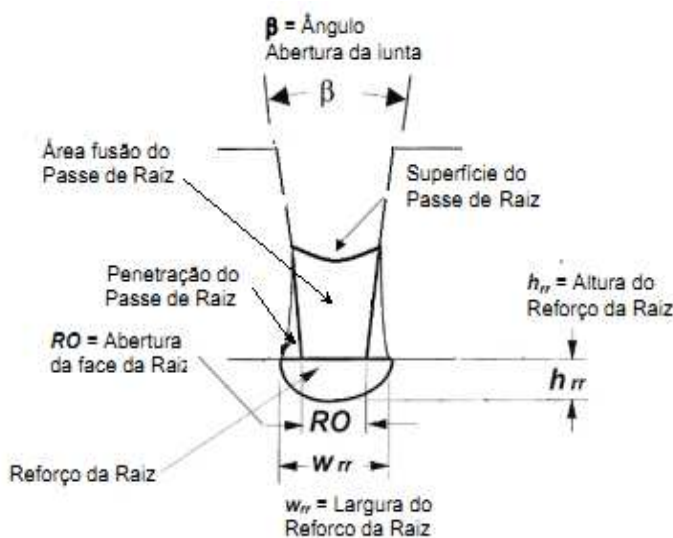


Figura 15 - Características geométricas das regiões no passe de raiz (Malin, 2001)

3.14 Suporte de cobre

Este suporte é também chamado de suporte de cobre junta não fusível e temporário. É removido após a solidificação do metal de solda. O cobre é condutor de calor fazendo com que a poça de solda líquida, se resfrie rapidamente, não se fundindo junto com o metal líquido. Este tipo de suporte é bastante utilizado na soldagem do aço (Fortes e Araújo, 2004).

A vida útil deste suporte depende do seu cuidado e de sua utilização. Deve ser protegido contra possíveis empenamentos e superaquecimentos. Deve-se tomar o cuidado com a superfície de contato para que não esteja suja e nem com pequenas depressões ou inclusões (Fortes e Araújo, 2004).

A dimensão do suporte de cobre é escolhida em proporção da espessura da chapa (Paranhos e Souza, 1999).

A figura 18(a) mostra o tipo de cobre junta e o cobre junta refrigerado a água. O cobre junta refrigeração de água, possui dois furos onde um fluxo de água passa ajudando no resfriamento do cobre-junta. Este dispositivo é utilizado para evitar empenamento do suporte, devido ao superaquecimento. (Teral, 1969).

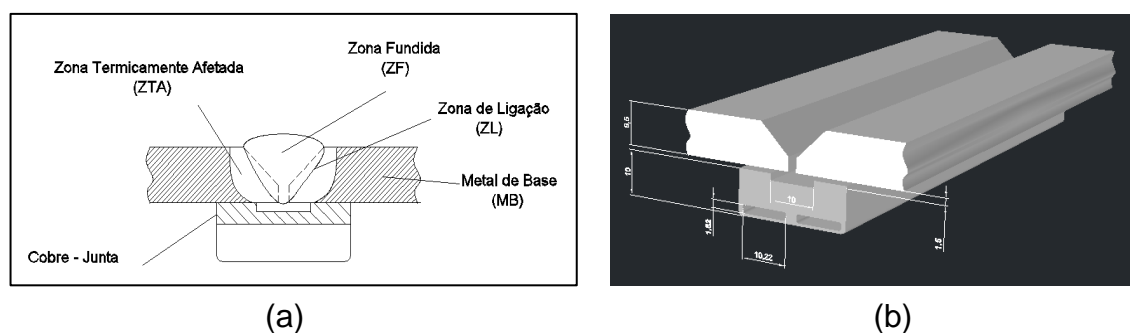


Figura 16 - Tipo e posição de cobre junta. (a) Cobre junta simples. (b) Cobre junta refrigerado a água (Paranhos e Souza, 1999).

3.15 Suporte cerâmico

O suporte cerâmico é também chamado de *backing* cerâmico ou mata junta. São utilizados quando o metal base não apresenta uma massa suficiente que compense a poça de solda líquida, ou quando se deseja obter uma boa penetração em um único passe, logo se destina à proteção da raiz ajudando a conter o metal fundido na operação de soldagem unilateral com excelente custo/benefício. O lado da cerâmica protege a poça de solda de defeitos. A poça gerada fica por um período de tempo em estado líquido, tornando necessário o *backing* cerâmico para contê-la até sua solidificação de modo que o cordão fica com a superfície lisa, homogênea e livre de respingos (Paranhos e Souza, 1999).

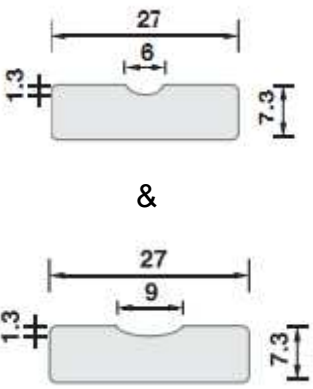
O suporte cerâmico garante uma moldagem no alinhamento das partes da peça e acompanha curvas de acordo com o formato das peças. Garante ainda bons resultados no Ultrassom ou Raios X, elimina retrabalho devido aos defeitos, economiza tempo com esmerilhamento ou goivagem entre passes e aumenta a taxa de deposição (Intertekno, 2006).

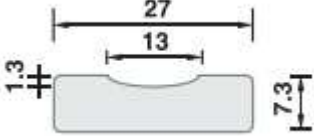
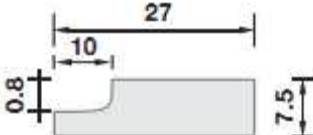
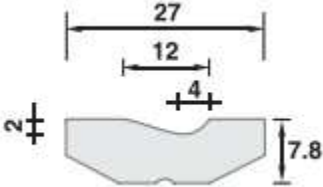
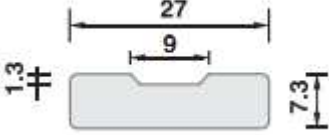
3.15.1 Tipos e formatos de suporte cerâmico usados na soldagem unilateral


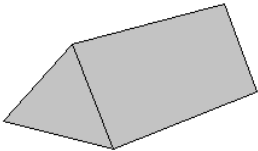
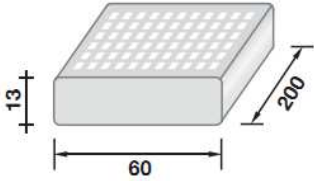
Os tipos de suportes variam de acordo com as situações de fabricação durante a produção de peças e equipamentos, como posição de soldagem, tipo de junta, tipo de chanfro, alinhamento/desalinhamento da junta, juntas dissimilares, peças de formato reto ou curvado e processo de soldagem aplicável. Contudo é exigido que o suporte cerâmico adapte-se às situações e, por conseguinte, possua diversas formas e dimensões (Fortes e Araújo, 2004).

Os suportes cerâmicos apresentam-se de diversas formas, tanto cilíndricas como retangulares, dependendo do tipo de chanfro e da posição a ser soldada. São utilizados para soldagem unilateral com proteção gasosa processos de soldagem com eletrodos revestidos, GTAW (TIG), GMAW (MIG/MAG), plasma ou arco submerso, aplicando-se em diversos perfis cerâmicos, um para cada tipo de junta: de topo, ângulo, em chanfros V, K ou X. A Tabela 8 mostra alguns tipos de suportes comerciais.

Tabela 8 - Suportes Comerciais (ESAB, 2012).

NOME e DIMENSÕES	FORMATO	APLICAÇÃO
<p>Côncavo 6 e Côncavo 9</p> 	<p>Possui o chanfro no formato côncavo</p>	<p>Utilizado na soldagem de consumíveis que geram pouca ou nenhuma escória como arames sólidos, arames tubulares básicos e arame tubulares "metal cored"(MCAW). É usado em soldagem unilateral topo a topo e de chanfro em "V".</p>

<p>Côncavo 13</p> 	<p>Possui o chanfro no formato côncavo</p>	<p>Utilizado na soldagem de consumíveis que geram pouca escória como arames sólidos, arames tubulares básicos e "metal cored" (MCAW). É usado em soldagem unilateral topo a topo e de chanfro em "V".</p>
<p>Côncavo 10 S</p> 	<p>Possui o chanfro no formato J na horizontal</p>	<p>Usado na soldagem de flanges em junta de 1/2 polegada. Usado mo processos: SMAW, GMAW, FCAW e MCAW.</p>
<p>Côncavo 12 H</p> 	<p>Possui o chanfro no formato que contra-balanceia o efeito da gravidade</p>	<p>Usado na soldagem na posição horizontal nos processos: SMAW, GMAW, FCAW e MCAW.</p>
<p>Retangular 9 e 13</p> 	<p>Possui a chanfro no formato retangular que permite uma melhor acomodação da escória</p>	<p>Utilizado na soldagem de processo que geram elevada quantidade de escória como: SMAW, FCAW e SAW. Evita mordedura e penetração insuficiente. Ideal para soldagem unilateral de topo a topo e de chanfro em "V".</p>

<p>Pipe 7, 9, 12, 15 e 20 Diâmetro: 7 mm e 20mm</p> 	<p>Possui o corpo cilíndrico</p>	<p>Usado em todos o processos de soldagem. Usado em soldagem de chanfros em K e "duplo V" sem extração de raiz.</p>
<p>Triangular</p> 	<p>Formato triangular</p>	<p>Usado em soldagem de chanfros em K e "duplo V" sem extração de raiz.</p>
<p>Suporte 21. 21</p> 	<p>Possui o corpo prismático</p>	<p>Pastilha compactada revestido com fibra de vidro. Utilizado como cobre junta na soldagem de união de trilho.</p>

3.15.2 Defeitos ocorridos na soldagem sem suporte cerâmico no passe de raiz

A dificuldade da aplicação da soldagem sem o suporte cerâmico reside na ocorrência de defeitos: falta de fusão e falta de penetração na região do passe de raiz, os quais influenciam para a má formação deste. Pode ainda ocorrer o defeito de inclusão de escória ao longo do cordão de solda da junta chanfrada. Quando à aplicação do processo de soldagem GMAW - Gas Metal Arc Welding, na posição plana, foi observado por Oliveira (2002) o efeito da fusão concentrada em um dos

lados da raiz da junta, ficando o outro lado inalterado. Este efeito ocorreu com ou sem aprisionamento de escória do lado não fundido, como mostrado na Figura 13 (a e b). Este efeito não foi observado nas outras posições de soldagem, o que leva a acreditar que se trata de um problema exclusivo da posição plana (Oliveira, 2002).

Segundo Oliveira (2002), quando comparados, os testes realizados com arame sólido, processo GMAW e arame tubular, os resultados são diferentes. Obtiveram-se melhores resultados, utilizando processo de soldagem com arame sólido, Figura 17(a). A falta de fusão foi constatada com a soldagem pelo processo de soldagem a arco elétrico com arames tubulares (FCAW - Flux Cored Arc Welding) Figura 18(b). Mesmo sendo obtido melhor resultado com o GMAW, o não uso do suporte cerâmico se observou um reforço de raiz de solda não satisfatório.

Os defeitos relativos ao formato da soldagem de raiz decorre nos fatores presentes na soldagem como: abertura da junta, ângulo do chanfro, dimensão da face da raiz, ângulo da tocha em relação a direção de soldagem, a velocidade de soldagem, aporte térmico e manejo da tocha.

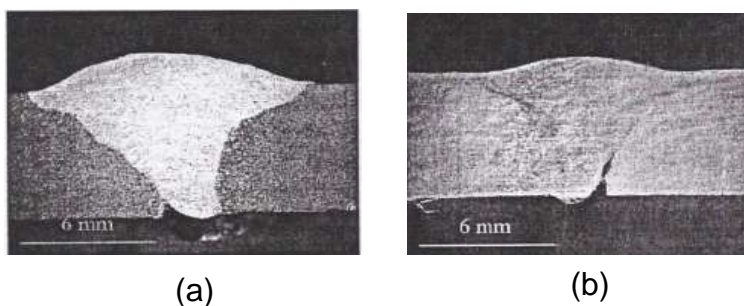


Figura 17 - Macrografias dos cordões de solda. (a) e (b) Deficiência de fusão lateral na região da raiz, Fonte (Oliveira, 2002).

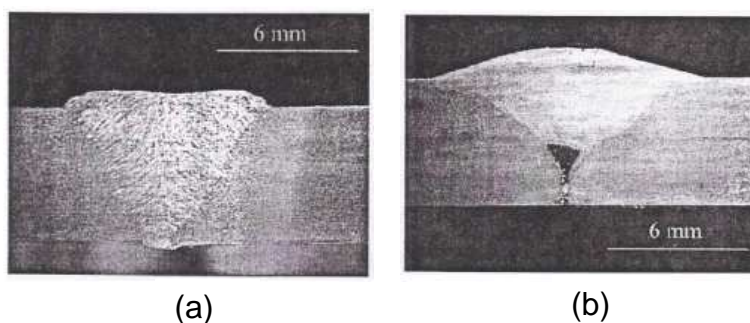


Figura 18 - Macrografias dos cordões de solda. (a) Cordões com GMAW; (b) Cordões com FCAW, Fonte (Oliveira, 2002).

3.15.3 Vantagens usando os suportes cerâmicos na soldagem no passe de raiz

A soldagem unilateral tem sido executada, pela sua produtividade, com suporte cerâmico no seguimento de caldeiraria pesada, indústria naval, e estruturas metálicas onde exigem versatilidade e agilidade na construção e montagens das estruturas soldadas onde se evita o retrabalho. Nestas condições, o suporte cerâmico apresenta vantagens em relação ao suporte metálico: possibilidade de utilização de maiores correntes de soldagem para o passe de raiz, alta qualidade da raiz, eliminação de goivagem, contra-solda e passe de selagem, maior facilidade de utilização, não provoca nenhum tipo de alteração na composição química e nas propriedades mecânicas do metal depositado (Intertekno, 2006).

A realização do passe de raiz com suporte cerâmico contribui para uma solda sem descontinuidades e que influencia nos passes de enchimento e acabamento contribuindo para uma microestrutura na ZF e ZTA dentro dos padrões esperados (Intertekno, 2006). A figura 19 apresenta um tipo de suporte cerâmico, com fita adesiva que facilita a fixação na superfície da chapa a ser soldada. A sua utilização industrial (Cantrell, 1982). A fixação é feita com uma fita adesiva fabricada de alumínio com resistência a elevada temperatura, garantindo uma colagem eficiente junto às peças a serem soldadas (Design, 2006).

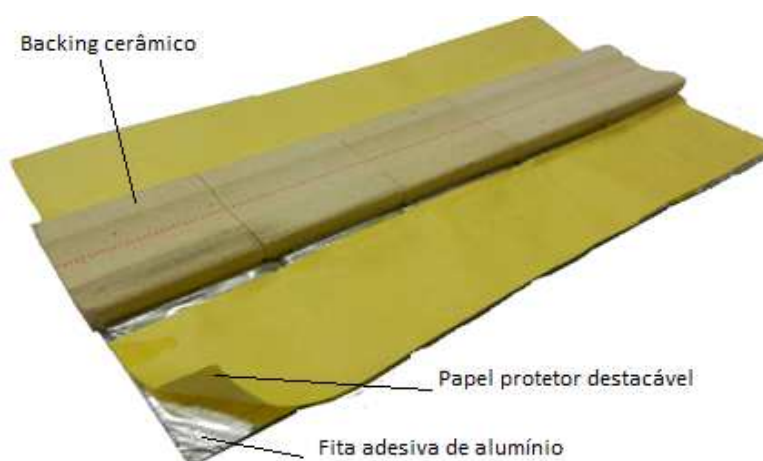


Figura 19 - Apresentação do suporte com fita adesiva (Design, 2006).

Segundo Design (2006), o papel protetor destacável tem o objetivo de proteger as propriedades do adesivo da fita de alumínio.

Uma das características para o uso do suporte é a possibilidade de fixação direta na junta (chapa) a ser soldada e sua posterior remoção. A fixação pode ser feita com fita adesiva, com cordão de fio de aço, com auxílio de base metálica tipo trilho, com aplicação de uma base ou dispositivos magnéticos. A aplicação do suporte cerâmico pode ser útil em estaleiros, caldeiraria, vasos de pressão, tanques e estruturas metálicas. São conhecidos como: suporte cobre junta, suporte com cama de fluxo, suporte por passe de selagem e suporte metálico fusível. Os suportes cerâmicos são descritos e escolhidos conforme o tipo de junta, suas espessuras e por vezes de acordo com ângulo de inclinação. (Isnard, 2005).

Normalmente o suporte cerâmico é utilizado uma única vez, ou seja, aceita apenas a realização de um passe de solda e deve ser descartado. Esta característica consumível o diferencia do suporte de ligas de cobre, que pode ser usado inúmeras vezes. O sistema de fixação que é mais adequado a atender esta característica é a fita adesiva de alumínio.

As pastilhas cerâmicas são constituídas de óxido refratário com elevada temperatura de fusão. Estes óxidos são prensados formando pastilhas de diversos formatos e logo após são sinterizados em elevadas temperaturas (1000°C a 1400°C) para tornarem resistentes, eliminando qualquer possibilidade de geração de gases durante a soldagem. Apresentam pequenos chanfros com ângulos apropriados para melhor modelar o cordão de solda no lado oposto (Intertekno, 2006).

Outra denominação dada é a CBM (*Ceramic Backing Material*). É uma cerâmica fina composta de substâncias inorgânicas naturais como: o caulim (minério composto de hidratado de alumínio, caulinita e haloisita); alumina (óxido de alumínio) e magnésio submetidos a tratamento térmico em altas temperaturas (1350°C a 1400°C). Possui coeficiente de expansão térmica de $1,85$ a $2,5 \times 10^{-6}$ em 1000°C. O material é sintetizado, seco e não possui tendência à absorção de umidade, o que garante alta performance e desempenho na soldagem de consumíveis de baixo hidrogênio.

3.16 Materiais para fabricação do suporte cerâmico

3.16.1 Materiais refratários

Uma classe de cerâmica, que são utilizadas em grande quantidade, é a das cerâmicas refratárias. As propriedades relevantes desses materiais incluem a capacidade de suportar temperaturas elevadas sem se fundir ou de se decompor e a capacidade de permanecer não reativos e inertes quando expostos a ambientes severos. Além disso, a habilidade de proporcionar isolamento térmico é, com frequência, uma combinação importante. Os materiais refratários são comercializados em inúmeras formas, mas os tijolos são as formas mais comuns. Aplicações típicas incluem os revestimentos de fornos para o refino de metais, fabricados de vidros, tratamentos térmicos metalúrgicos e geração de energia (Sanchez 2004).

Segundo Sanchez (2004) o desempenho de uma cerâmica refratária depende em grande parte de sua composição e baseado nesse critério, existem várias classificações, tais como: argila refratária, de sílica, básicos e refratários especiais. Para muitos materiais comerciais as matérias primas consistem tanto em partículas grandes (chamotes) quanto em partículas finas, que podem possuir composições diferentes. Como cozimento, as partículas finas ficam normalmente envolvidas na formação de uma fase de ligação, que é responsável pela maior resistência do tijolo. Essa fase pode ser predominantemente vítrea ou cristalina.

A porosidade é uma variável microestrutural que deve ser controlada e obviamente dependerá das condições de serviço (Callister, 2008)

3.16.2 Materiais cerâmicos – características e composições

Materiais cerâmicos podem ser definidos como uma combinação de elementos metálicos e não metálicos, como exemplo os óxidos, os carbetos e sulfetos entre outros. Em geral estes materiais são preparados por um processo de síntese possuindo, assim, resistência à alta temperatura e preparados pela moderna engenharia cerâmica (Alumina e Nitrato de Silício). São duras e quebradiças (Chawla, 1993).

Os materiais cerâmicos são classificados de acordo com sua aplicação em: vidro, produtos estruturais a base de argila, louça branca, refratários, abrasivos, cimentos e cerâmicas avançadas (Callister, 2000). São encontrados nos dispositivos eletrônicos, componentes aeroespaciais, ferramentas de corte e na soldagem. Há cerâmicas que pertencem aos seguimentos tradicionais (cerâmicas e louças) e as que pertencem ao grupo moderno da engenharia cerâmica (Alumina e Nitrato de Alumínio são encontrados nas placas eletrônicas, componentes aeroespaciais, ferramentas de usinagens e na soldagem).

As cerâmicas possuem uma fortíssima ligação iônica e/ou covalente que confere propriedades associadas, semelhantes ou mais fortes do que as dos aços: dureza, forças de compressão, baixa condutividade térmica e elétrica, entre outras. Com isso, pode ser usada às altas temperaturas, como isolante térmico, e aplicações em atmosferas corrosivas. Possui como desvantagens: baixa ductilidade e baixa resistência à tração (Taylor, 2001).

Segundo Taylor (2001), os principais grupos dos componentes cerâmicos são basicamente os óxidos, os nitretos e os carbeto. O óxido de alumínio, Alumina (Al_2O_3), é um dos mais usados na engenharia, cerâmica nos grupos dos óxidos, devido à disponibilidade de matéria-prima e o baixo custo. O Nitreto de Silício (Si_3N_4), e o nitreto de alumínio (AlN_4) são a principal evolução da engenharia cerâmica na categoria dos nitretos. O Carbeto de Silício (SiC) é muito usado devido a sua baixa condutividade térmica, resistência à corrosão e dureza.

A combinação com outras partículas que resulta em mulita, Al_2O_3 , SiO_2 ocorre em temperatura de $1200^\circ C$ e é semelhante a preparação da cordierita (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO). As reações entre os pós-reativos são muito usados na preparação do material cerâmico como a mulita e cordierita. Entretanto há um processo chamado sol-gel que é diferenciado e tem apresentado resultados promissores. Neste processo o gel facilita a modelagem obtendo corpos cerâmicos com formato pré-definido (Lima, 1998).

A característica destes materiais permite ser utilizada como apoios removíveis que suportam o metal fundido nos processos de soldagem conhecidos como backing cerâmico ou tão somente de suportes cerâmicos (Tardei, 2004).

A classificação dos materiais cerâmicos varia de acordo com os países. No Brasil, de acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC), dividem o setor cerâmico em subsetores ou segmentos em função de diversos fatores, como

matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. A cerâmica é classificada da seguinte forma: Cerâmica vermelha – tijolos, materiais de revestimento pisos e azulejos; Cerâmica branca (louça sanitária, louças de mesa e materiais elétricos) (Chawla, 1993). Os produtos dos isolantes térmicos podem ser classificados como refratários isolantes, e como isolantes térmicos não refratários, compreendendo produtos como: sílica diatomácea e cerâmica de alta tecnologia usada nas placas eletrônicas (Junior, 2006).

3.16.3 Cordierita

A cordierita é uma vítrea cerâmica com estequiometria de $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$, fórmula química $Al_3(Mg,Fe)_2 Si_5AlO_{18}$, composição 13,78% MgO, 34,86% Al_2O_3 , 51,36% SiO_2 cuja denominação foi em homenagem ao geólogo francês P.L.A. Cordier (1777-1861). A cordierita é bastante representativa no grupo dos materiais cerâmicos, pois é constituída de óxidos que representam maior parte das cerâmicas com ou aplicações tecnológicas de vários componentes (Lima, 1998).

Este mineral pode ser encontrado em três formas polimórficas: *α-cordierita*, (estável as temperaturas 1450°C a 1460°C e uma estrutura hexagonal desordenada e isomórfica com o mineral berílio $Al_2Be_3Si_6O_{18}$); *u-cordierita* (forma metaestável uma estrutura análoga a b-quartzo e *b-cordierita* (estável a temperatura inferior a 1450°C com estrutura ortorrômbica). Estas formas se diferenciam em função da temperatura de cristalização e conseqüentemente dos sistemas cristalinos (Silva, 2003).

A expansão térmica da cordierita é anisotrópica e o alfa foi determinado utilizando-se análises térmicas concluindo que na faixa de 20 a 1200°C o coeficiente de dilatação térmica seria de $2,94 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ (Angioletto *et al.*, 2006).

A Figura 20 mostra o diagrama de fases ternário MgO- Al_2O_3 - SiO_2 . O diagrama indica que pode ocorrer formação de fase líquida a partir de 1355°C, dependendo da composição química e das reações entre as matérias primas. É comum na cerâmica a base de cordierita apresentar fase líquida, mulita e fase vítrea (Yoshimura *et al.*, 2007).

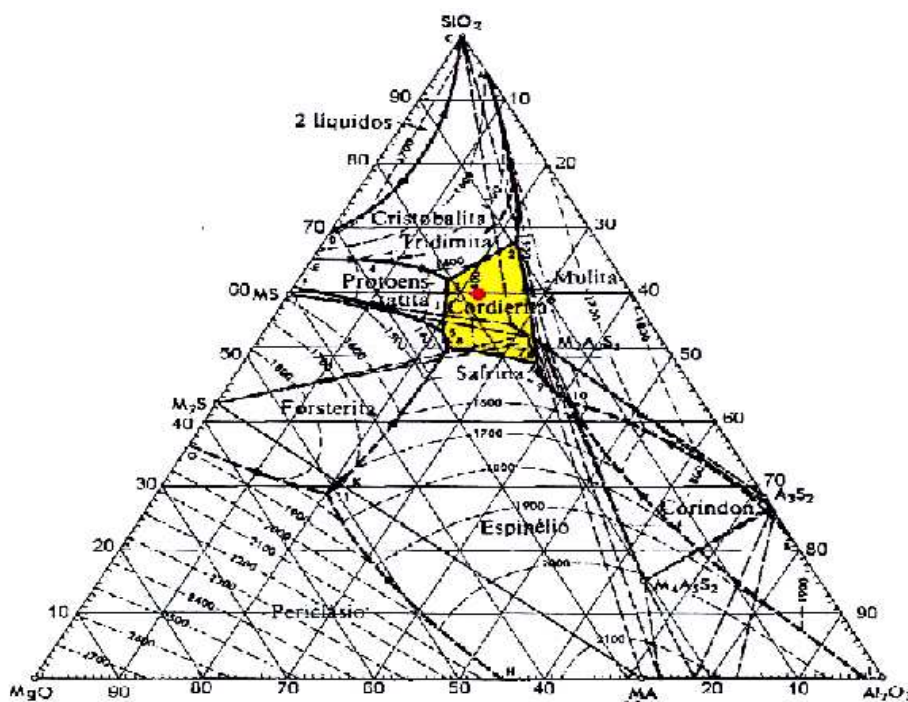


Figura 20 – Diagrama de fases do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ (Silva, 2003)

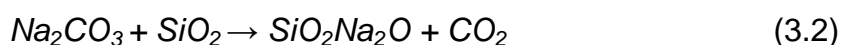
A principal característica da cordierita é o baixo valor de coeficiente de extensão térmica, que resulta em elevada resistência ao choque térmico, sendo utilizada como: refratários, mobílias de fornos, substrato de conversor catalítico para controle de exaustão de gás de automóveis e materiais para trocadores de calor. Além disso, apresenta boa resistividade elétrica, sendo utilizada como material para isoladores elétricos de baixa voltagem. A principal característica da cordierita é o baixo valor de coeficiente de extensão térmica, que resulta em elevada resistência ao choque térmico, sendo utilizada como refratários, mobílias de fornos, substrato de conversor catalítico para controle de exaustão de gás de automóveis e materiais para trocadores de calor. (Yoshimura, et al., 2007).

O mineral cordierita é incolor, mas raramente possui as cores amarela, violeta ou azul claro. A rota de sinterização mais conhecida é do estado sólido, que consiste na mistura dos óxidos multielementares na forma de argila, talco e hidróxido de alumínio e sua posterior queima de 1300°C a 1450°C (Lima, 1998). Esta rota de produção não é muito eficiente, uma vez que a homogeneidade do produto final não é aceitável, ocorrendo o surgimento de várias fases cristalinas indesejáveis como: espinélio (MgOAl_2O_3), cristobalita (SiO_2), quartzo (SiO_2), mullita ($3\text{Al}_2\text{SiO}_5$) e forsterita (2MgOSiO_2) (Balan, 1989).

Devido as suas propriedades termo-dinâmicas, a cordierita pode ser utilizada como os auxiliares removíveis que suportam o metal fundido nos processos de soldagem, conhecidos como suporte cerâmico (Tardei, 2004). Logo esta vítrea cerâmica pode ser considerada matéria prima ideal a exercer a função de cobre junta no processo de soldagem unilateral de ligas de alumínio.

3.16.4 Silicato de sódio

O silicato de sódio (Na_2SiO_3) conhecido como *vidro líquido* é constituído por dióxido de silício (SiO_2) e óxido de sódio (Na_2O) e encontrado em solução aquosa ou em forma sólida. É estável em solução neutras e alcalinas. Em solução ácidas, o íon silicato reage com íons hidrogênio para formar ácido silícico, o qual quando aquecido e calcinado forma sílica gel, uma dura e vítrea substância. O material para sua formação são o carbonato de sódio (Na_2CO_3) e areia siliciosa (SiO_2) (Ineos, 2003). O carbonato de sódio é misturado por processo mecânico e em seguida, esta mistura é submetida à altas temperaturas (1200 a 1400°C), por queima de óleo combustível, ocorrendo a fusão. Por fim, é realizada a dissolução do produto (sob a forma de um sólido vítreo) em autoclaves sob pressão de vapor e em contato com água, desse modo, se obtendo uma solução aquosa de silicato de sódio. A reação global que resume a obtenção do silicato de sódio é apresentada na equação 3.2



A variação da relação entre os óxidos constituintes e o teor de sólidos da solução, gera produtos com especificações variadas e com características específicas para cada utilização nos diversos segmentos de mercado. Classificado como reagente modificador e desempenha diferentes funções no processo como: depressor dispersante, regulador de pH, entre outros. É um produto químico amplamente utilizado industrialmente devido às suas propriedades originais como: estabilidade química, viscosidade, capacidade de polimerização, modificador de cargas superficiais, entre outros, tem sido empregado nos mais diversos campos, dentre os quais na flotação de minérios como reagente modificador (Santos, 1997).

Devido sua adesividade, é utilizado com sucesso na produção de tubos de papel e na colagem manual ou automatizada de caixas de papelão. Pode ser usado também como agente aglomerante de pós de metais, madeiras, argilas e outros pós, como matéria-prima na fabricação de catalisadores para a indústria petrolífera (Santos, 1997).

Segundo Santos (1997) o silicato de sódio é muito importante na fabricação de bases de sílica inerte, na confecção de colunas de cromatografia, no tratamento de água, protegendo a tubulação da corrosão atuando como sequestrador de ferro e manganês. Também é usado em tintas especiais, eletrodos e fluxos, precipitados de sílica e gel. Na cerâmica, desestabiliza as suspensões, pela formação de aglomerados.

3.17 Processos de fabricação do suporte cerâmico

Na mineração, os materiais devem ser beneficiados, isto é desagregados ou moídos, classificados de acordo com a granulometria e muitas vezes também purificados. O processo de fabricação das cerâmicas tem início somente após essas operações. As matérias-primas sintéticas geralmente são fornecidas prontas para uso, necessitando apenas, em alguns casos, de um ajuste de granulometria (Tomazetti, 2003).

O papel de cada uma dessas etapas e principalmente a inter-relação são importantes no desenvolvimento da microestrutura responsável pelas propriedades finais do material. Os materiais são elaborados visando à obtenção de propriedades que atendam a usos específicos. As etapas são: dosagem, homogeneização, peneiramento, prensagem, secagem e queima.

3.17.1 Dosagem

Os materiais cerâmicos geralmente são fabricados a partir da composição de duas ou mais matérias primas, além de aditivos e água. Raramente emprega-se apenas uma única matéria prima. Dessa forma, uma das etapas fundamentais do processo de fabricação de produtos cerâmicos é a dosagem da matéria prima e do aditivo, que deve seguir com rigor as formulações de massas, previamente estabelecidas (Tomazetti, 2003).

3.17.2 Homogeneização

A homogeneização é de extrema importância na produção do suporte cerâmico, uma vez que a irregularidade na composição da matéria-prima é a causa mais frequente dos problemas que se apresentam durante o processo de fabricação e da falta de constância na qualidade do produto acabado.

A matéria prima dosada é misturada com água, onde se inicia a homogeneização que pode ser manual ou mecanizada.

3.17.3 Peneiramento

Essa etapa é executada através de peneiras com aberturas que se diferenciam uma das outras e que são padronizadas internacionalmente. Cada peneira tem um número de abertura por polegada linear denominada “*mesh*”. Logo, quanto maior o “*mesh*”, maior o número de aberturas e, conseqüentemente, mais fino deverá ser o grão para que passe por ela. Assim, para materiais grosseiros, usam-se peneiras de baixo “*mesh*”, e para finos usam-se peneiras com maior “*mesh*”. O peneiramento permite identificar o tamanho e a distribuição dos grãos, permitindo a mistura maior uniformidade (Fonseca, *et al.*,1994).

3.17.4 Prensagem

A prensagem consiste na utilização de uma matriz na forma adequada em medidas lineares e de volume preenchida pelo material que sofrerá a aplicação de carga em uma ou mais direções. A prensagem mais comum e econômica é a uniaxial. Consiste na aplicação de uma carga em uma única direção sobre uma matriz contendo pó cerâmico. Pode ser usada neste processo um prensa de carga máxima em torno de 25 toneladas (Batista e Beltran, 1986).

A prensagem uniaxial tem como característica a produção de peças com grandes gradientes interiores de densidade. Devido ao atrito entre as partículas e a parede da matriz, perde energia ao longo da prensagem, ocorre uma concentração de maior densidade na parte superior da peça e uma região de menor densidade

na parte inferior da peça. A ação de duplo pistão diminui este gradiente e concentra a região de menor densidade no centro do corpo (Tomazatti, 2003).

3.17.5 Secagem e queima (sinterização)

Após a etapa de formação, as peças em geral continuam a conter água, proveniente da preparação da massa. Para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água, de forma lenta e gradual, em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50°C e 200°C.

A secagem é uma operação em que deve ser retirada toda a água adicionada à peça durante a moldagem. Uma vez seca, a cerâmica adquire consistência suficiente que permite o manuseio, transporte e empilhamento no forno. Também estará em condições de resistir às transformações físicas e químicas que ocorrem na queima (Roman, 1983).

A secagem pode ser realizada de duas formas: secagem natural ou secagem artificial. Na secagem natural, as peças são dispostas em prateleiras em galpões cobertas e secas pelo ar ambiente. Em algumas indústrias essas prateleiras são próximas aos fornos, acelerando a secagem. O processo é lento, totalmente dependente das condições atmosféricas e dificilmente há uma homogeneidade na umidade das peças, não havendo controle sobre a secagem. Assim, se a perda de água for maior, tem-se como resultado uma grande retratação das peças, originando deformações e trincas superficiais (Fonseca, *et al.*, 1994).

Na secagem artificial, as peças são colocadas em estufas, que normalmente recuperam atingindo temperaturas em torno de 80°C. Há controle sobre a secagem onde há uma maior homogeneidade das peças. O tempo de permanência do material nestas estufas deve ficar entre 12 e 24 horas (Fonseca *et al.*, 1994 gases quentes dos fornos ou utilizam fonte própria de calor através de uma fornalha,).

Conforme Romam (1983), a secagem deve ser muito bem executada, pois é a grande causadora das deformações e fissuras que a peça pode vim apresentar.

Após a secagem as peças são submetidas a queima. Nesta operação, conhecida também por sinterização, os produtos são submetidos a um tratamento

térmico a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se entre 800 a 1700°C, em fornos contínuos ou intermitentes que operam em três fases:

- Aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada;
- Patamar durante certo tempo na temperatura especificada;
- Resfriamento até temperaturas inferiores a 200 °C.

A queima é a etapa final do processo de fabricação e tem como objetivo transmitir energia térmica gerada (calor) às peças, criando assim condições para que ocorram transformações físicas e químicas que levam às propriedades finais desejadas (Van Vlack, 1984).

Para Van Vlack (1984), a finalidade da queima é alongar as partículas formando uma massa coerente pela sinterização, que traz como consequência ao produto cerâmico a redução de sua área específica total, redução no volume aparente total e aumento da resistência mecânica.

A sinterização, que ocorre na queima, é a remoção dos poros entre partículas, acompanhadas pela contratação do componente, combinadas com aumento da união e resistência da ligação química entre as partículas adjacentes (Kingery *et. al.*, 1976).

3.18 Conclusão da revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica apresentou tópicos relevantes como: características, propriedades e aplicações das ligas de alumínio; condições metalúrgicas na soldagem do alumínio e aspectos de material refratário, cordierita. Também forneceu informações sobre as principais vantagens no uso dos suportes cerâmicos bem como técnicas e metodologia para a confecção do suporte. Além disso, contribuiu para determinar as etapas de trabalho e a sequência no processo de fabricação do suporte cerâmico para soldagem unilateral em ligas de alumínio.

CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os equipamentos usados para confeccionar o suporte cerâmico. A metodologia utilizada foi organizada em três etapas de trabalho, que serão posteriormente abordadas no tópico 4.4.

4.1 Materiais utilizados para confecção do suporte cerâmico

Para confecção dos suportes cerâmicos e realização dos experimentos foram utilizados os seguintes materiais.

a) Cordierita industrial: mineral refratário que tem por objetivo suportar as elevadas temperaturas em condições específicas do processo e da operação de soldagem. Este material foi fornecido pela Inducel Comércio e Indústria de Cerâmicos Especiais Ltda. A Tabela 9 apresenta a composição química da cordierita industrial. A Tabela 10 apresenta as faixas de propriedades físicas da cordierita fornecida pela Inducel.

Tabela 9 – Composição química (% peso) da cordierita (Indulcel, 1994).

ELEMENTO	PESO (%)
Al ₂ O ₃	43,0 - 45,0
SiO ₂	42,0 - 45,0
TiO ₂	0,8 - 1,5
Fe ₂ O ₃	1,2 - 1,7
MgO	5,6 - 6,2
Álcalis	1,9 - 2,5

Tabela 10 – Propriedades físicas da cordierita (Indulcel, 1994).

Dilatação Térmica Linear ($a - b \cdot 10^{-7} / ^\circ\text{C}$)	25 - 28
Densidade Aparente (g/cm^3)	2,6
Absorção de Água (%)	13
Porosidade Aparente (%)	25
Módulo de Resistência a Compressão (Kgf/cm^2)	350
Módulo de Ruptura a Frio (Kgf/cm^2)	125
Dureza (Mohs)	7

- b) Silicato de sódio neutro:** Líquido viscoso, inodoro e incolor, miscível com água em qualquer proporção que se apresenta como uma solução alcalina. Foi utilizada com função de adesividade e como agente aglomerante. Este material foi fornecido pela empresa Diatom Mineração LTDA com certificado de qualidade emitido pelo fabricante com composição química de 30% SiO_2 ; 9,0% Na_2O e 61% H_2O . A densidade é 1,40 g/l, a viscosidade é 530 cP e 41,90 ° Be à temperatura de 25 °C.
- c) Água (H_2O):** adicionada como variável do processo de fabricação do suporte cerâmico, sendo fundamental para se obter uma determinada umidade da massa cerâmica a ser compactada. A adição de água foi de 3% da massa total do suporte cerâmico.
- d) Chapa de alumínio:** foi utilizado para a soldagem chapa de alumínio com características desconhecidas. A medição da dureza foi de 47,9 HV, sendo possível que a liga empregada nos experimentos seja o alumínio 5052, cuja dureza é 47 HV (ALCAN, 1993).
- e) Metal de adição:** Foi utilizado o arame AWS ER4043 com diâmetro de 1,0 mm conforme as normas AWS/ASME: A5.10; SFA 5.10 (AWS, 1996). Este metal possui dureza de 47 HV, resistência à tração de 140 N/mm^2 e temperatura de fusão entre 574 – 632°C. A composição química é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição química nominal do metal de adição conforme ANSI/AWS A5.01 (AWS, 2004) .

Al	Mn	Cu	Mg	Si	Cr	Zn
94	0,059	0,03	0,05	4,5	0,25	0,046

- f) Gás de proteção:** Foi utilizado o Argônio puro, fornecido pela empresa White Martins.
- g) Peneira:** Para obter grãos de cordierita com tamanhos uniformes foi utilizado peneira de 40 mesh, permitindo identificar seu tamanho bem com a distribuição de grãos na massa, apropriada para a operação de compactação.

4.2 Equipamentos utilizados

Para a confecção do suporte cerâmico, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Prensa:** Para conformação do suporte cerâmico, foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade de 20 toneladas, disponível no LAMAV/CCT/UENF.
- b) Estufa:** O suporte cerâmico foi posto em uma estufa de secagem, marca ODONTOBRÁS EL 1.5 e 110 V com a capacidade de 0 a 250 °C disponível no LAMAV/CCT/UENF.
- c) Forno:** O forno, disponível no LAMAV, utilizado para a queima do suporte cerâmico foi o de marca Servitech modelo CT 320 com três zonas de aquecimento: zona de pré-aquecimento, de queima e de resfriamento.
- d) Molde e moldura:** Para a confecção do suporte foi utilizado molde e moldura, de aço carbono, composta por três peças (a, b e c) conforme mostra a figura 21. A peça (a) indica o molde com medida de comprimento de 115 mm, largura de 25 mm e a face com superfície convexa com medidas de 10 mm x 1,5 mm e raio de 9,08 mm. A peça (b) é a moldura que encaixa a peça (a) possuindo folga com tolerância de 0,1 mm. A peça (c) atuou como punção de apoio e contenção da massa cerâmica.

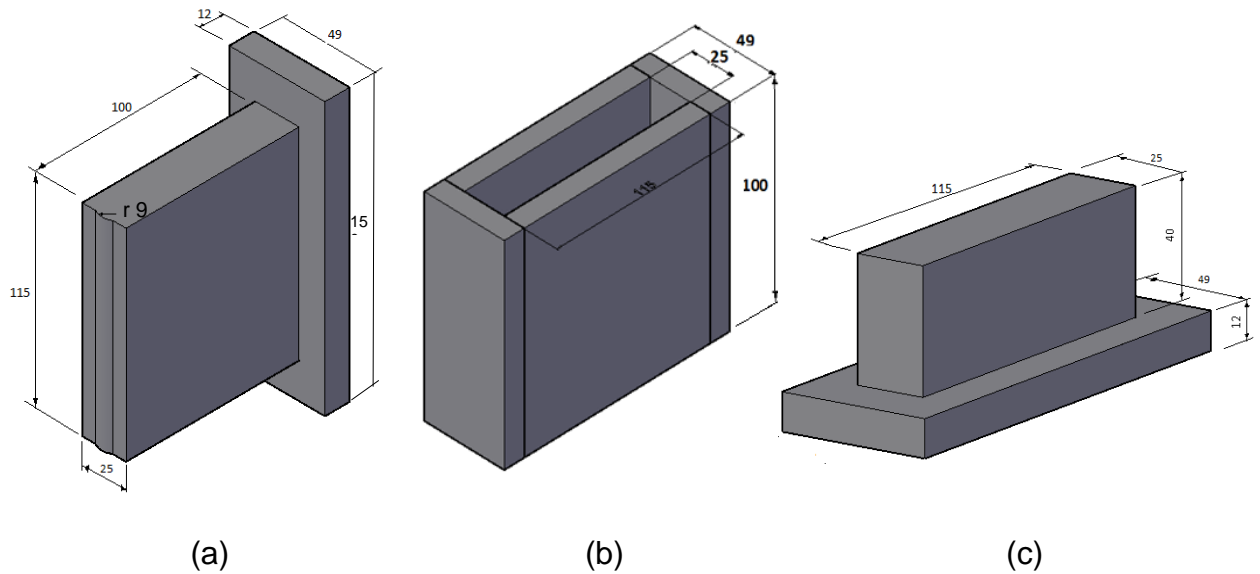


Figura 21 - Perspectiva do molde e moldura para produção dos suportes cerâmicos.

(a) Peça molde; (b) Peça moldura; (c) Peça de apoio e contenção da massa cerâmica.

Para a soldagem unilateral com suporte cerâmico, foram utilizados os seguintes equipamentos:

a) Equipamento de soldagem por GMAW [Gas metal Arc Welding]: Foi utilizada máquina de solda MIG/MAG, Hawk 330, marca SUMIG, usando como proteção o gás argônio com vazão de 18 l/min, para soldagem das chapas de alumínio.

b) Tocha de solda Push-Pull: “PP” 26 D modelo EN 60 974-7, refrigerada a gás com capacidade de 230 A que comporta arame de diâmetro de 0,8 a 1,2 mm. Mecanismo existente na ponta da tocha que tem a função de facilitar o processo de soldagem contribuindo com o arraste do arame de solda de alumínio, no momento da soldagem.

Para os ensaios das chapas soldadas foram utilizados os seguintes equipamentos:

a) Máquina universal de ensaios mecânicos: Para a execução dos ensaios de tração foi utilizada a máquina universal de ensaios mecânicos da marca INSTRON modelo 5582 com velocidade de carregamento de 20 mm/min com sistema avançado de testes mecânicos disponível no LAMAV/CCT/UENF.

b) Máquina para ensaio de dobramento: Para a execução dos ensaios de dobramento foi utilizada a máquina universal de ensaios mecânicos da marca AROTEC modelo 5582 com velocidade de carregamento de 1mm/min com sistema avançado de testes mecânicos com capacidade de 100 kN, disponível no IFF - Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goitacazes/RJ. A operação de dobramento foi feita a frio.

c) Equipamento de dureza: A impressão de dureza Vickers com carga de 300g, foi executada no equipamento MHV SHIMADZU com sistema de carregamento semi-automático disponível no LAMAV/CCT/UENF. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E 92-82 (ASME, 1997).

d) Microscópio confocal: A microestrutura da ZF foi analisada por imagens obtidas no OPYMPUS LEXT 3D Measuring Laser Microscope OLS4000, disponível no LAMAV/CCT/UENF.

e) Microscópio óptico: A microscopia ótica foi realizada com o microscópio óptico NEOPHOT-32, de Carl Zeiss, disponível no LAMAV/CCT/UENF.

4.3 Difração de raios X (DRX) e análise química do suporte cerâmico comercial

A Figura 22 mostra um suporte cerâmico comercial usado na soldagem unilateral de ligas de alumínio. Para investigar a composição mineralógica, após o suporte ser triturado, moído e peneirado a 300 mesh, este suporte foi submetido à análise de difração de Raios X (DRX, operando com radiação de cobre (Cu) no intervalo de 10 à 120°, com velocidade de varredura de 1,5°/min. Para esta análise foi utilizado o difratômetro XRD modelo SHIMADZU XRD-7000. Para análise química foi utilizado um Espectrômetro de Raios X (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) modelo EDX 700 da SHIMADZU disponível no LECIV/CCT/UENF.

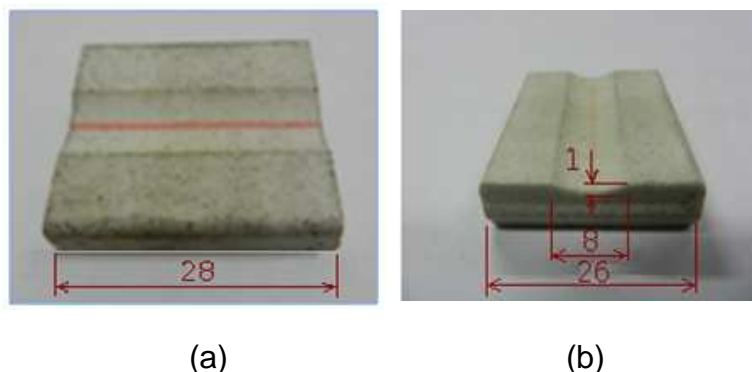


Figura 22 – Suporte cerâmico comercial; (a) seção longitudinal e (b) seção Transversal. Dimensões em mm.

Os resultados da Difração de Raios X e a Análise Química, foram comparados com os da composição química da Cordierita informada pelo fabricante mostrado na tabela 9.

4.4 Metodologia

A parte experimental deste trabalho consistiu em três etapas de trabalho.

Etapa I - Propor formulações a partir da caracterização do suporte comercial, usando a matéria prima Cordierita e confeccionar suportes cerâmicos conforme metodologia adotada por Almeida e Tatagiba (2009). Estes suportes foram testados no passe de raiz com soldas unilaterais de chapas de alumínio. As soldas foram avaliadas por inspeção visual. Nesta etapa pretendeu-se obter uma formulação de suporte cerâmico adequada à soldagem unilateral de liga de alumínio.

Etapa II - Avaliar os parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem, abertura da raiz e ângulo de inclinação da tocha) para a execução do passe de raiz na soldagem de chapas de ligas de alumínio com apoio dos suportes cerâmicos. Nesta etapa pretendeu-se delinear um possível campo operacional do processo. As soldas foram avaliadas por inspeção visual, líquido penetrante e macrografias.

Etapa III - Usar um conjunto de parâmetros de soldagem no interior do campo operacional definido na etapa II e executar duas juntas de solda, utilizando o suporte cerâmico confeccionado. Foram caracterizadas as propriedades mecânicas (tração, dobramento e dureza) e a microestrutura desta junta soldada.

4.4.1 Etapa I

O objetivo principal nesta etapa foi obter um suporte cerâmico adequado à soldagem unilateral de liga de alumínio. Para isto foram confeccionados três suportes cerâmicos para cada uma das quatro composições mostradas na Tabela 12. Foi usada a cordierita como constituinte principal conforme a caracterização do suporte comercial mostrada no item 4.3. Foram realizados testes dos suportes com soldas unilaterais em ligas de alumínio.

A escolha da mistura para a obtenção do suporte cerâmico foi baseado nas proporções (percentuais) dos elementos que compõe a cordierita, mostrados na composição química e nas propriedades físicas, ambos fornecidos pelo fabricante. Foi observado os percentuais na combinação dos elementos metálicos (óxidos) e não-metálicos (silica, mulita, espinélio), capazes de suportar elevadas temperaturas em condições específicas do processo na operação de soldagem elétrica. Foi feito um estudo do suporte cerâmico com composição semelhante, produzido por Almeida e Tatagiba (2009) para soldar aço-carbono, sendo feito modificações nos percentuais para a soldagem das ligas de alumínio, conferindo as propriedades físicas e químicas fornecidas pela INDULCEL - Comércio e Indústria de Cerâmicos Especiais Ltda. Os requisitos básicos, observados no estudo do mineral refratário foram: Porosidade aparente, dilatação térmica linear, capacidade de suportar elevadas temperaturas (em condições específicas de soldagem do Al) e isolamento térmica.

Na mistura, Tabela 12, foi utilizado o Silicato de Sódio (Na_2SiO_3) conhecido como *vidro líquido*, constituído por dióxido de silício (SiO_2) e óxido de sódio (Na_2O), encontrado em solução aquosa ou em forma sólida. A variação (%p) foi proporcional a quantidade de percentual de cordierita sendo esperado resultados diferenciados durante a compactação da massa bem como na queima do suporte. O silicato de sódio atuou como agente aglomerante das partículas durante a mistura, possuindo propriedades originais como: estabilidade química, viscosidade, capacidade de polimerização, modificador de cargas superficiais, adesividade de pós de metais, madeiras, argilas e outros entre outros de. Foi escolhido por ser um produto químico amplamente utilizado industrialmente devido às suas propriedades e por ser

empregado nos mais diversos campos, dentre os quais na flotação de minérios como reagente modificador (Santos,1997).

Tabela 12 – Formulações

Formulação	Quant. (por Form.)	Cordierita (%p)	Silicato de Sódio(%p)	H ₂ O (%p)
F 1	3	97	3	3
F 2	3	95	5	3
F 3	3	93	7	3
F 4	3	91	9	3

O processo de fabricação dos suportes cerâmicos dividiu-se em:

a) Peneiramento: Esta etapa foi executada através de peneiras com aberturas padronizadas internacionalmente. A abertura da peneira utilizada foi de 40 "mesh", o que permitiu identificar o tamanho e a distribuição de grãos uniformes, na massa. A quantidade de massa definida foi proporcional para confeccionar 12 suportes cerâmicos.

b) Pesagem das matérias primas: Foi utilizada uma balança de precisão com duas casas decimais. Cada matéria prima foi pesada separadamente, utilizando uma balança de precisão, obedecendo às proporções citadas na tabela 12. O peso médio do total de 12 suportes, antes de sinterizar foi de 50,93 g.

c) Mistura: Foi realizada manualmente com o uso de uma espátula adicionando a água para deixar a massa cerâmica umidecida e em seguida foi misturado o silicato de sódio com o objetivo de adesivar e aglomerar os grãos da massa.

d) Compactação: Foi realizada com uma prensa com capacidade de 20 toneladas, utilizando o molde apresentado na figura 14, a uma força de 15 toneladas por um período de tempo de 2 minutos.

e) Secagem: a retirada do excesso da umidade dos suportes foi realizada de forma lenta e gradual em estufa de secagem, disponível no LAMAV/CCT/UENF, a fim de evitar possíveis empenos durante o processo de queima (sinterização) e formação de trincas. A temperatura aplicada foi de 120°C.

f) **Queima:** Para queima do suporte cerâmico foi utilizado um forno com controle de temperatura. Após atingir temperatura de 150°C foi aplicado um ciclo de aquecimento de 3°C/min com permanência de 3 horas na temperatura de sinterização de 1100 °C. A taxa de resfriamento utilizada foi de 4°C/min até a temperatura ambiente, sendo estes ciclos controlados pelo forno. O tempo total no processo foi de 10:00 horas.

As figuras 23 e 24 apresentam o perfil ortográfico com as dimensões definidas para a confecção do suporte cerâmico conforme o molde e moldura apresentados no item 4.2, d. A imagem real do suporte é mostrado no capítulo cinco no item 5.3.

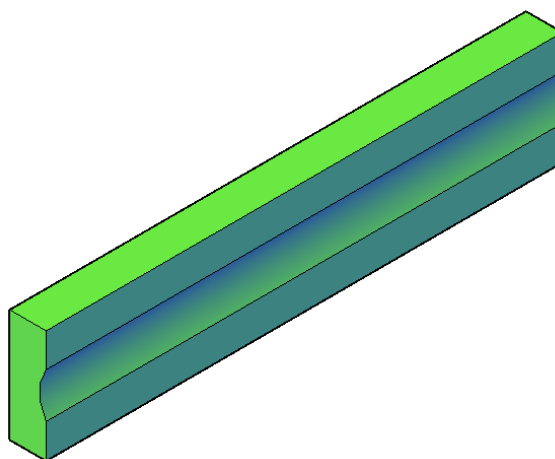


Figura 23– Perspectiva isométrica do suporte cerâmico

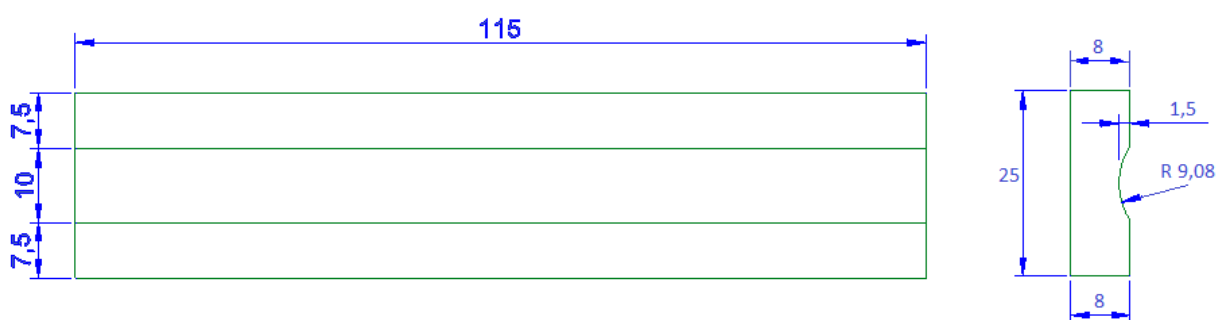


Figura 24 – Vista frontal e lateral do suporte cerâmico. Dimensões em mm.

A preparação para soldagem é mostrada na figura 25 e expõe como as chapas de alumínio foram preparadas: dimensões de 130 x 50 x 6,35 mm, chanfro de 60° com nariz de solda de 2 mm e 4 mm de abertura de raiz. O suporte cerâmico foi fixado junto às chapas de alumínio por meio de grampos tipo "C", conforme mostrado, esquematicamente. A figura 26 (a) mostra a vista ortográfica com chapas

ponteadas a apêndices nas extremidades com o objetivo de iniciar e terminar a solda fora da chapa de teste, permitindo ainda, durante a montagem das chapas, que a abertura de raiz permanecesse constante. Também mostra o modo como o suporte cerâmico foi apoiado na parte inferior da chapa, posicionado exatamente sob a junta de solda.

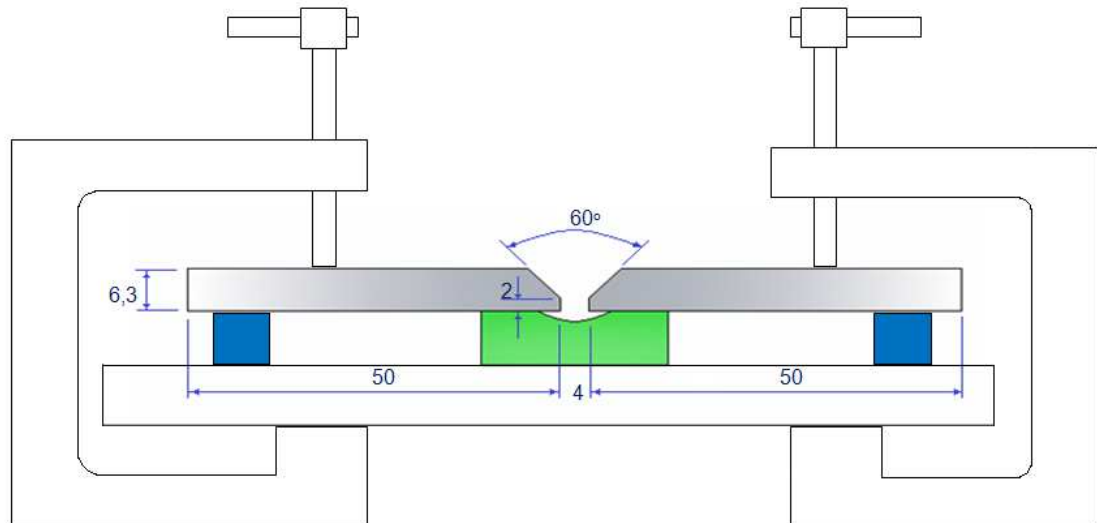


Figura 25 - Apresentação esquemática da posição do suporte cerâmico, fixado às chapas de alumínio por meio de grampos tipo "C".

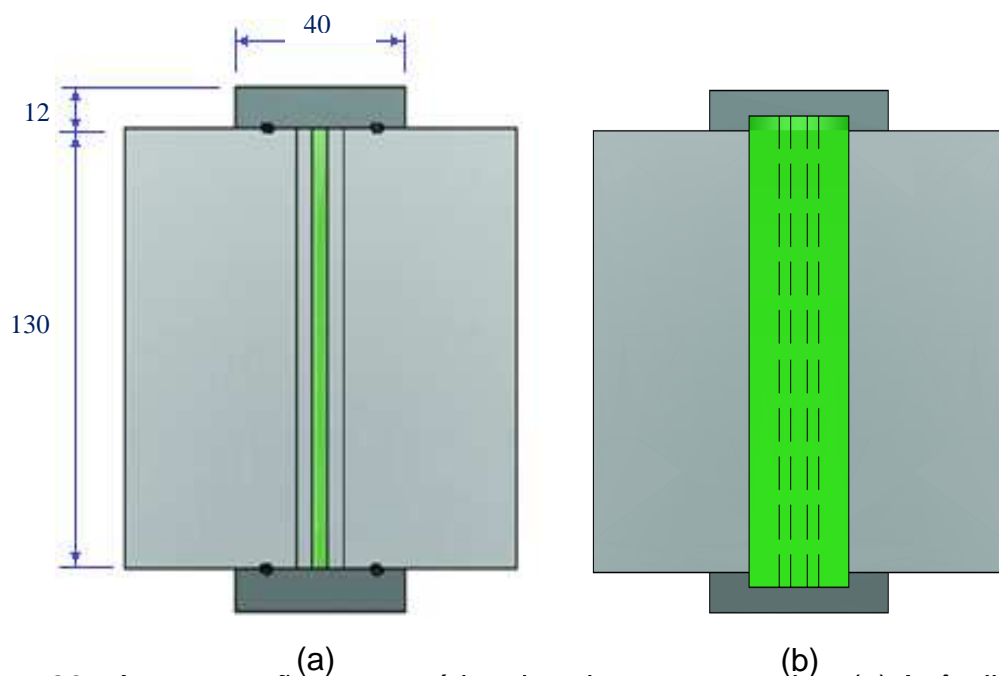


Figura 26 - Apresentação esquemática das chapas ponteadas. (a) Apêndices no suporte cerâmico; (b) Vista inferior das chapas com suporte cerâmico. Dimensões em mm.

4.4.1.1 Teste dos suportes com passe de raiz

O teste dos suportes foi realizado com passe de raiz com soldas unilaterais utilizando chapas de alumínio, preparadas conforme dimensões visto na figura 25, soldado na posição plana, com ângulo de inclinação da tocha de 5° , em relação a vertical, puxando, no sentido da esquerda para direita, Figura 27, com ligeiro tecimento da tocha. Foi utilizado o processo de soldagem utilizado, GMAW (MIG) e arame ER 4043 de 1,0 mm de diâmetro. O gás de proteção foi o argônio puro com vazão de 18 l/min. Foram usados: corrente de 125 A, tensão de 17 V e velocidade de soldagem de 2,1 mm/s.

A solda foi avaliada por inspeção visual verificando-se o aspecto do cordão de solda e a possível presença de descontinuidades como: falta de fusão, falta de penetração, porosidades e mordeduras. Após soldagem e avaliação do suporte cerâmico por inspeção visual e macrografia foi escolhido, entre as quatro composições, o suporte que proporcionou as melhores características do cordão na soldagem unilateral do alumínio. O suporte escolhido foi usado para avaliação e definição dos parâmetros de soldagem na segunda etapa.

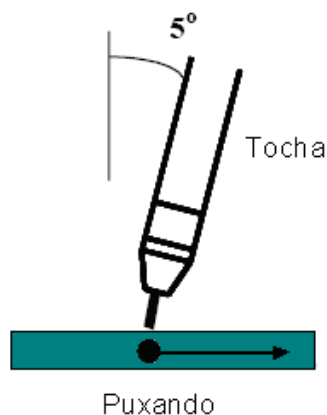


Figura 27 – Inclinação da tocha e direção de soldagem

4.4.2 Etapa II

O objetivo desta etapa foi avaliar os parâmetros de soldagem como corrente, tensão, velocidade de soldagem, abertura da raiz, e delinear um possível campo operacional do processo. Nesta etapa a composição escolhida do suporte

cerâmico após a conclusão da primeira etapa foi a F3 com 93% de cordierita e 7 % de silicato de sódio sendo adicionado 3% de H₂O.

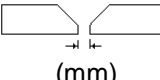
Novos suportes foram confeccionados com a formulação F3 e usados na soldagem de oito cordões de solda. A preparação das chapas de alumínio para soldagem foi realizada conforme a figura 25 e 26.

A Tabela 13 mostra a matriz de experimentos, onde a abertura da raiz varia de 0 a 6 mm, a corrente de 80 a 135 A, a tensão de 14 a 27 V e velocidade de soldagem de 1,8 a 2,5 mm/s. A energia de soldagem variou de 0,62 a 1,46 kJ/mm.

O ângulo de inclinação da tocha durante a soldagem foi de 5°, sendo "puxada" conforme procedimento usado na etapa I. A energia de soldagem foi calculada pela equação 3.3.

$$\text{Energia de soldagem (kJ/mm)} = \frac{\text{Tensão (V)} \times \text{Corrente (A)}}{\text{Veloc.de Soldagem (mm/s)}} \quad (3.3)$$

Tabela 13 – Matriz de experimentos com parâmetros de soldagem no processo GMAW (MIG) usando como proteção o gás argônio com vazão de 17 l/min e arame ER 4043 de Ø 1,0mm.

SOLDA (S1 - S8)	ABERTURA DE RAIZ	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	VELOCIDADE DE SOLDAGEM (mm/s)	ENERGIA DE SOLDAGEM
	 (mm)				
S1	0	14,0	80	1,8	0,62
S2	2	15,0	83	1,9	0,65
S3	2	17,6	100	2,0	0,88
S4	4	18,5	113	2,2	0,95
S5	5	22,0	121	2,2	1,21
S6	6	25,0	123	2,3	1,34
S7	6	25,0	129	2,3	1,40
S8	6	27,0	135	2,5	1,46

Após soldar o passe de raiz das chapas com o suporte cerâmico pelo processo de soldagem mencionado, foram executadas as inspeções: visual, ensaio não destrutivo por líquido penetrante (LP) e macrografia.

4.4.2.1 Inspeção visual

A inspeção visual foi realizada no lado inferior da raiz de solda, com objetivo de verificar o acabamento do cordão e a presença de descontinuidades: falta de fusão, falta de penetração, porosidades e mordeduras. A figura 28 indica o campo marcado para análise da inspeção, sendo desconsiderados os 25 mm de cada lado do cordão de solda.

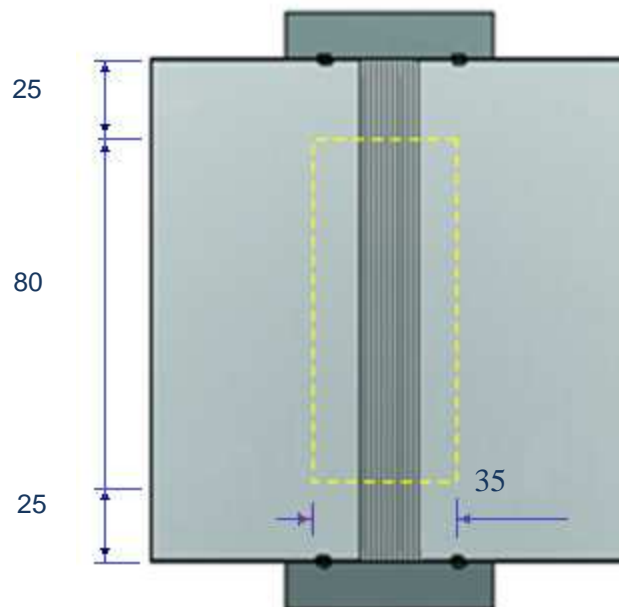


Figura 28 – Campo marcado para inspeção visual. Dimensões em mm.

4.4.2.2 Ensaio não destrutivo por líquido penetrante (LP)

O ensaio não destrutivo por LP foi realizado no lado da junta soldada que esteve em contato com o suporte cerâmico. O objetivo foi verificar pequenas descontinuidades superficiais na raiz do cordão de solda. O ensaio de LP foi realizado em etapas e de acordo com a norma (ASME - American Society of Mechanical Engineers seção V, edição 2004). A sequência desta operação foi: a)

Limpeza da superfície da chapa. Foi feita com pano seco; b) Aplicação em temperatura ambiente, por spray, do líquido penetrante. Esta aplicação foi feita com LP de cor vermelha, sobre a superfície, formando um filme na superfície da chapa no intervalo de 15 minutos; c) A remoção do excesso de penetrante. Foi aplicado o emulsificador Lipofílico, por spray e a remoção do excesso foi feito com pano umedecido com solvente, mantendo-se apenas o penetrante que possivelmente ficaria alojado no interior das possíveis descontinuidades; d) Aplicação do revelador. Foi aplicado o revelador úmido em solução aquosa com um tempo de espera para secagem de 10 minutos; f) Avaliação e inspeção (interpretação dos resultados). Após a avaliação foi feita a limpeza final com solventes em toda a superfície da junta soldada.

4.4.2.3 Macrografia

O objetivo da macrografia na etapa II foi verificar a geometria do cordão de solda das oito juntas soldadas. A amostra foi retirada com corte transversal ao cordão de solda e preparada com lixas 220, 400 e 600 mesh e atacada com ácido fluorídrico (norma ASTM E 340), a fim de observar o passe de raiz, linha de fusão, zona termicamente afetada e descontinuidades da região da junta soldada. Foi medida a penetração, a largura e o reforço do passe de raiz de solda. O procedimento foi realizado de acordo com a norma ASME E 250 que dispõe sobre as corretas técnicas de Metalografia.

Após a realização das inspeções visuais dos cordões de solda, ensaios não destrutivos por LP e macrografias bem como os resultados obtidos, na etapa II, foi construído um gráfico da energia de soldagem com a abertura de raiz das juntas soldadas. Neste gráfico foi delineado um possível campo operacional do processo.

4.4.3 Etapa III

O objetivo desta etapa foi executar duas juntas soldadas utilizando os mesmos parâmetros de soldagem no interior do campo operacional, caracterizando as propriedades mecânicas por ensaios de dobramento, tração e dureza. O procedimento de limpeza das juntas foi diferenciado antes da soldagem.

Na junta de solda A, a retirada de óxido de alumínio na superfície da chapa, próximo a região de solda, foi executada escovação com escova de aço (limpeza simples) e em seguida passado pano seco para retirada de resíduos.

Na junta de solda B, o escovamento foi feito utilizando escova com cerdas em aço inox para evitar contaminações por óxido de ferro. Após a retirada do óxido, foi usado pano de limpeza embebido com acetona, produto volátil, sendo passado na superfície da chapa e na do arame de solda.

A figura 29 mostra como as chapas de alumínio foram preparadas para soldagem das juntas A e B: dimensões de 125 x 250 x 6,35 mm, chanfro de 60° com nariz de solda de 2 mm e 5 mm de abertura de raiz. A imagem real está capítulo cinco no item 5.3

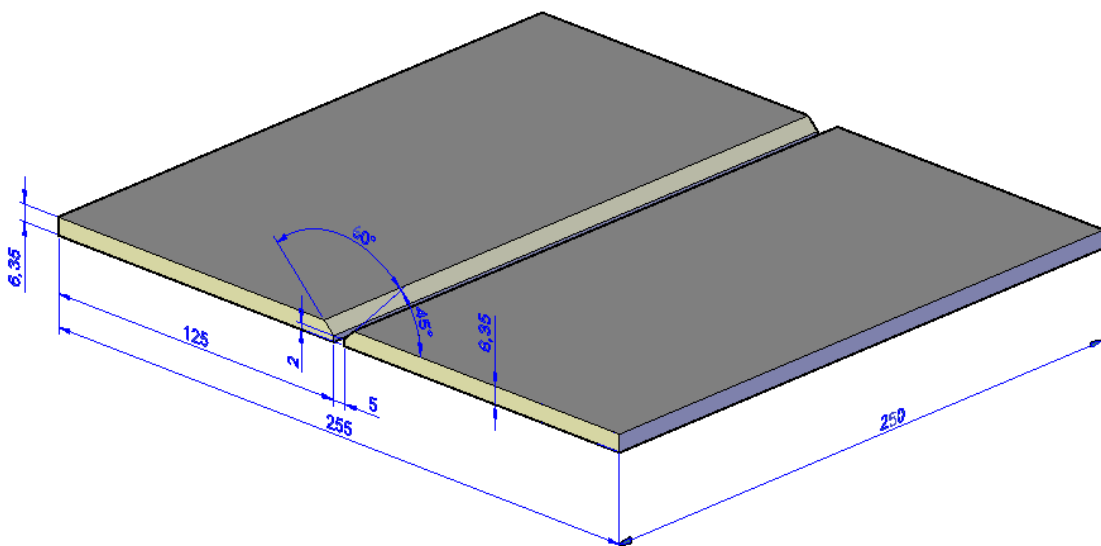


Figura 29 – Vista em perspectiva com as dimensões das chapas chanfradas em "V" com ângulo de 60°. Dimensões em mm.

A soldagem da junta A foi realizada na posição plana, puxando a tocha inclinada a 5°, da esquerda para direita com o suporte cerâmico fixado junto às chapas de alumínio por meio de grampos tipo "C". Foi realizado, o passe de raiz com os seguintes parâmetros de soldagem: corrente de 22 V e tensão de 121 A e velocidade de soldagem de 2,2 mm/s. Os demais passes de deposição foram realizados com os mesmos parâmetros.

Na soldagem da junta B, as chapas e o arame de solda foram introduzidos na estufa elétrica para retirada de umidade de suas superfícies antes da execução dos cordões de solda. O aquecimento foi com temperatura entre 75°C e 100°C durante 10 minutos. Em seguida foi realizada a fixação do suporte cerâmico junto às chapas

e executados os cordões de raiz e passes de acabamentos, na posição plana. Os parâmetros foram: corrente de 22V e tensão de 121 A e velocidade de soldagem de 2,2 mm/s.

4.4.3.1 Ensaio de dobramento e de tração

O ensaio de dobramento foi realizado primeiramente com o CP do metal base ou seja com a liga de alumínio 5052, sem passar pelo processo de soldagem, a fim de analisar as propriedades mecânicas e compará-los com os resultados dos ensaios de tração dos CP da junta A e B que foram realizados em seguida.

A figura 30 mostra a quantidade e a posição dos corpos de prova retirados no sentido transversal ao cordão de solda das juntas A e B, com cortes feito por serra fita mecânica. Em seguida, os CP foi desbastados, com as dimensões mostradas na figura 31, na Fresadora Ferramenteira, marca DIPLOMAT, modelo FVF 3000 Serie AL com leitor digital nos três eixos, disponível no SENAI ES. Foram preparados quatro CP para o ensaio de dobramento da junta A e quatro na junta B. Foram feitos dois dobramentos transversais de face do cordão e dois de faces de raiz de cada junta. Foram descartados as extremidades (a) e o CP (m) de cada junta foi separado para a macrografia. A Figura 31 mostra as dimensões dos CP de dobramento e tração. Durante o dobramento, tanto o CP da junta A quanto a junta B foram submetidos a uma carga com velocidade de ensaio de 0,5 mm/min, com equipamento específico para este ensaio utilizando um cutelo de 38 mm, até 180° ou até apresentarem algum sinal de falha (trinca). Souza (1982) observou que, com este tipo de ensaio é possível que as deformações promovidas no material, possam a ser uniformemente distribuídas em toda superfície e que é possível verificar a ductilidade da junta soldada e pequenas descontinuidades que se propagam durante o ensaio. Os CP foram preparados para este ensaio, de acordo com a norma ASTM E 190/97.

O ensaio de tração foi realizado no metal base (MB), utilizado nas soldagens das juntas A e B. Este ensaio foi submetido a uma carga uniaxial com velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. Foram considerados: o limite de resistência (LR), a tensão de escoamento (LE) e o alongamento (ϵ) e indicado o local de ruptura. A velocidade de deformação foi de 0,5 mm/min.

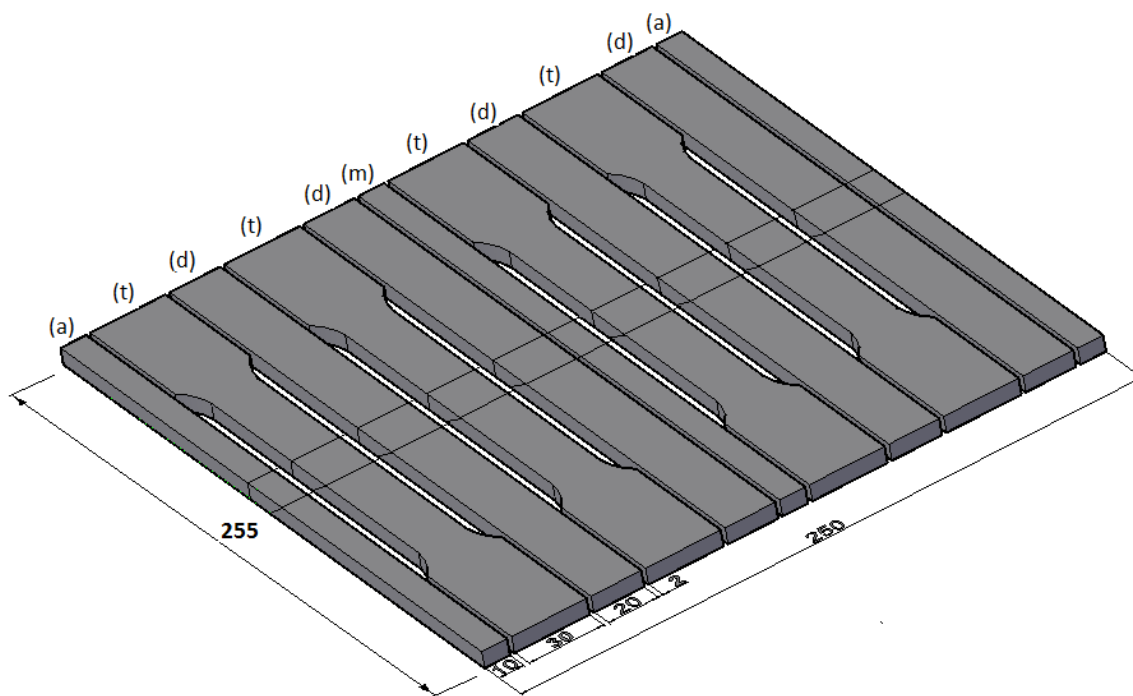


Figura 30 - Medidas de localização para cortes dos CP para os ensaios de dobramento e tração. (a) Partes descartadas; (t) CP para ensaio de tração; (d) CP para ensaio de dobramento; (m) CP para macrografia. Dimensões em mm.

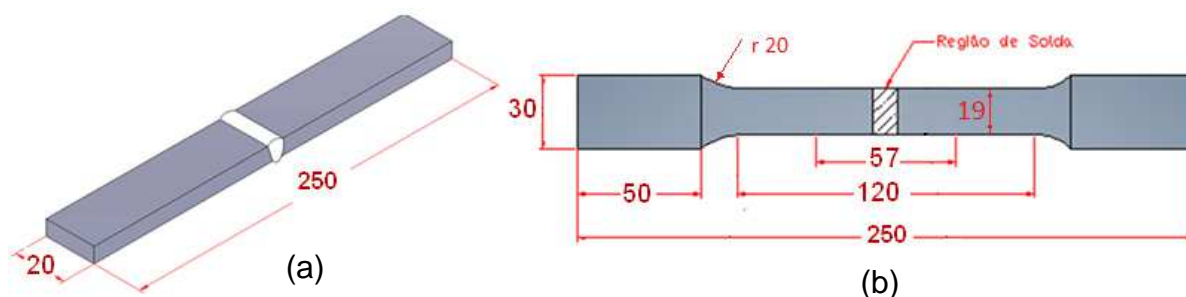


Figura 31 - Dimensões dos CP para ensaio de dobramento e tração. (a) CP para ensaio dobramento; (b) CP para ensaio de tração. Dimensões em mm.

4.4.3.2 Macrografia

A macrografia realizada na etapa III das juntas A e B com o objetivo de mostrar o número de passes, linha de fusão, e as três regiões de solda: o metal base (MB), a zona termicamente afetada, (ZTA) e a zona de fusão (ZF). A amostra foi retirada com corte transversal ao cordão de solda e preparada com lixas 220,

400 e 600 mesh e atacada com ácido fluorídrico (norma ASTM E 340). Após a preparação das macrografias foram medidos a penetração lateral, a largura do cordão e o reforço do passe de raiz de solda. Foram observadas as descontinuidades como poros e possíveis mordeduras na zona de solda. O procedimento foi realizado de acordo com a norma ASME E 250.

4.4.3.3 Dureza Vickers

O ensaio de dureza, da amostra retirada da junta de solda B teve o objetivo determinar a dureza do metal base, da zona termicamente afetada e do metal de solda. Para determinação do perfil de dureza, foram realizadas 36 medições, sendo 12 medidas no metal base (MB), 12 medidas na zona termicamente afetada (ZTA) e 12 medidas na zona fundida (ZF). As impressões foram aplicadas em pontos a 1,5 mm da superfície conforme representado na figura 32.

O penetrador utilizado foi do tipo piramidal de base quadrada. A impressão de dureza Vickers foi executada no equipamento MHV SHIMADZU com sistema de carregamento semi-automático que está disponível no LAMAV/CCT/UENF. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma (ASTM E92, 1982).

O valor médio de dureza foi definido após as medições na parte superior e inferior das três zonas. A carga utilizada foi de 300 gf, aplicada em 30s e em direção da linha horizontal paralela a superfície da chapa soldada com tempo de aplicação da carga de 15 segundos.

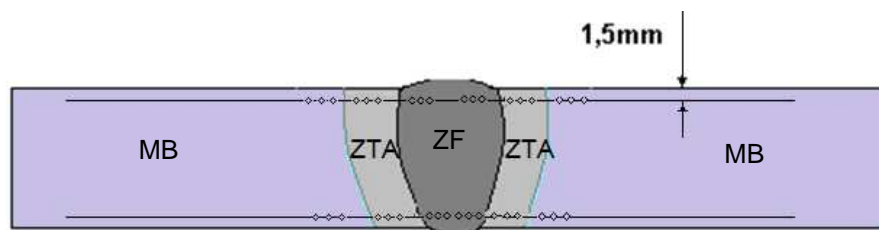


Figura 32 – Pontos de microdureza Vickers na ZF, ZTA e MB.

4.4.3.4 Microscopia Ótica

A Microscopia ótica permitiu analisar a microestrutura, com aumento de 430x e 688x da região de solda do passe de raiz de solda e de deposição da junta de solda B com o microscópio óptico Neophot - 32, de Carl Zeiss, disponível no LAMAV/CCT. A preparação da superfície foi executada através de lixamentos, usando lixas com granulometrias de 220, 400, 600 e 1200 mesh e o polimento com pastas de Alumina de granulometria de 1µm a 0.5 µm de alumina (Al₂O₃). Após a preparação, a amostra foi atacada com uma solução de 0,5 ml de ácido fluorídrico e 99,5 ml de água destilada que permitiu observar: a quantidade, distribuição dos diversos constituintes, inclusões fixadas no cordão, tamanho dos grãos, textura, trincas e/ou formação de poros. Foi feita uma microanálise por EDS do grão e do contorno de grãos da ZF.

4.4.3.5 EDS das Inclusões do cordão de solda

A amostra retirada da junta de solda B foi preparada, sem ataque químico, de para uma microanálise EDS acoplada ao MEV SSX-550 do LAMAV/CCT/UENF. Esta análise teve o objetivo de identificar se houve inclusões de solda e de material refratário do suporte cerâmico no cordão de solda bem como identificar os possíveis elementos, caso estejam presentes, na composição de inclusões do passe de raiz.

CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Difração de Raio X (DRX) do suporte cerâmico comercial

A Figura 33 mostra o difratograma de Raios X do suporte cerâmico comercial, onde se observou a presença de picos característicos correspondentes às fases cristalinas presentes: Cordierita ($\text{Al}_3(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_5\text{AlO}_{18}$), Quartzo (SiO_2), Mulita ($3\text{Al}_2\text{SiO}_5$) e Espinélio (MgAl_2O_4). Observa-se que a fase cristalina com o pico de maior intensidade e em maior quantidade é a cordierita.

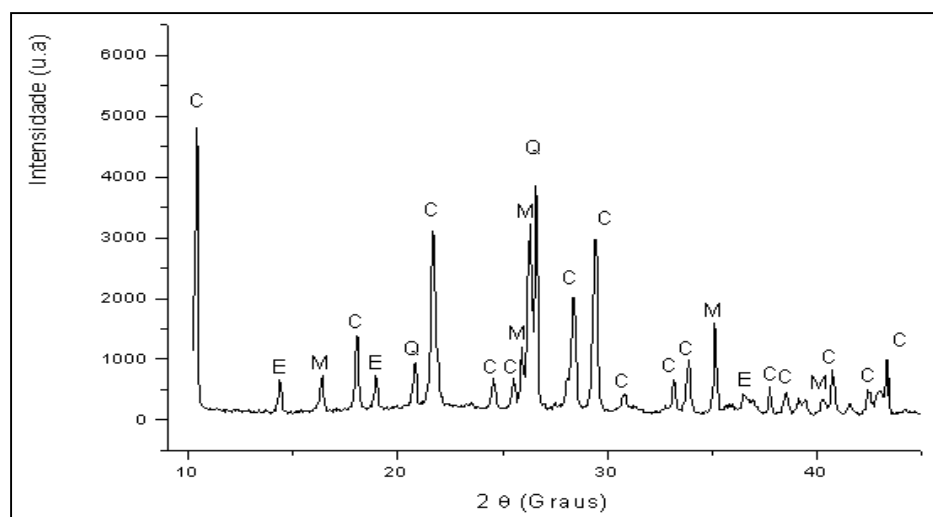


Figura 33 – Difratograma de raios-X do suporte comercial (C= cordierita, E= espinélio, M= mulita, Q= quartzo)

5.2 - Análise química do suporte comercial

A Tabela 14 mostra o resultado da composição química (% peso) da amostra do suporte cerâmico comercial após ser analisado pelo equipamento Espectrômetro (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) disponível no LECIV/CCT/UENF.

Tabela 14 - Resultado da Composição química (% peso) do suporte comercial.

COMPOSIÇÃO	% EM PESO
SiO ₂	49,048
Al ₂ O ₃	34,378
MgO	8,938
TiO ₂	0,839
Fe ₂ O ₃	0,739

De acordo com os resultados, observou-se uma maior concentração de óxidos de silício (SiO₂ (49,048%)), seguido do alumínio (Al₂ O₃ (34,378%)) e magnésio (MgO (8,938%)). Ao se comparar a composição química da matéria prima cordierita informada pelo fabricante, Tabela 9, e o resultado da composição química (% peso) do suporte comercial apresentada na tabela 14, constatou-se que os valores estão aproximados da composição da cordierita informada na revisão bibliográfica (item 7.2.1).

Com base na fórmula de cordierita (Al₃(Mg, Fe)₂ Si₅AlO₁₈), e possuindo em sua maior parte, óxidos multielementares que representam uma parcela significativa das cerâmicas (Lima et al, 1998), a sua composição, dada por óxidos, passa a ser: 13,70% MgO; 34,93% Al₂ O₃; 51,37% SiO₂.

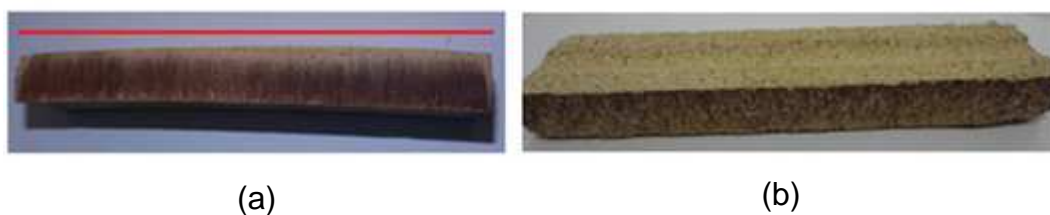
A partir desse resultado, embora encontrados outros elementos químicos, minerais e fases na forma de aditivos como o espinélio, o quartzo e ferro, pode-se concluir que a composição mineralógica do suporte comercial é compatível com o mineral Cordierita.

5.3 - Resultado da Etapa I - Processo de fabricação do suporte cerâmico

A partir das análises de caracterização do suporte comercial, foram definidas quatro formulações, de acordo com a Tabela 15, sendo confeccionados 12 suportes cerâmicos, em laboratório, com o mineral cordierita.

Foram feitas as seguintes observações durante a produção dos suportes cerâmicos:

- 1- Umidificação e Compactação: durante os testes preliminares dos primeiros suportes foi utilizado, na formulação, 5 % de peso de água para umificação da massa, tendo sido utilizado força de compactação de 12 toneladas. O suporte apresentou-se baixa consistência, esfarelado-se. Para evitar esfarelamento do suporte foi utilizado 3% de água do total de peso da massa e foi aumentado a força de compactação para 15 toneladas. O suporte apresentou-se com alta consistência evitando seu esfarelamento ao ser manuseado após a compactação.
- 2- Secagem e Empeno: após a compactação e ao passar pelo processo de secagem com o objetivo de remover gradualmente a água usada na mistura úmida, foi observado empeno, nos primeiros suportes cerâmicos, conforme é visto na Figura 34(a). O empeno foi indesejável, pois evitaria o pleno contato do suporte com a chapa a ser soldada, podendo resultar em defeitos durante o processo de soldagem do alumínio. Para reduzir o empeno, o forno foi regulado, inicialmente, em 50 °C deixando os suportes cerâmicos por um período de 3 horas, sendo apoiado por uma chapa de aço inox sobre eles. Após este período, a estufa foi regulada para 125 °C, permanecendo por mais 18 horas na estufa de secagem. A Figura 34(b) mostra o suporte, sem empeno, após adaptação na operação de secagem na estufa.



A Figura 34 - Suporte cerâmico com empeno (a) e sem empeno (b).

- 3- Queima: O processo de sinterização ocorreu a 1100 °C. O resultado foi satisfatório e permitiu que os suportes permanecessem com perfil adequado.

A Tabela 15 mostra os dados coletados durante a confecção dos suportes cerâmicos com as formulações F1, F2, F3 e F4, onde se observa alterações nos pesos e nas dimensões dos suportes cerâmicos após o processo de sinterização.

Para cada formulação foram confeccionados três suportes cerâmicos com objetivo de aumentar a confiabilidade nas médias de pesos e medidas. Assim conclui-se que:

1- A coluna "peso antes de sinterizar" apresenta valor médio de 50,93 g e a coluna "peso após sinterizar" o valor médio foi de 50,89 g. Observou-se uma diferença de peso de 0,35 g. Esta diferença, referente à perda de umidade após o processo de secagem e após a queima, foi considerada desprezível.

2- Em relação às colunas, C e L, relacionadas ao comprimento e largura, após o processo de sinterização, apresentaram-se valor médio de 114,48 mm e 25,35 mm, respectivamente. As dimensões mostram que não houve diferença significativa de medidas dos suportes cerâmicos, em relação às medidas-padrão do molde, item 4.2.

3- Em relação à coluna "ESP" (espessura do suporte) foi observado uma variação de 9,77 a 10,97 mm, resultando em 1,2 mm de diferença. Isto ocorreu devido à distribuição diferenciada da massa no molde, antes de ser compactado.

Tabela 15 – Dados coletados na confecção dos suportes cerâmicos.

FORMULAÇÃO	SUPORTE	PESO ANTES DE SINTERIZAR (Após Secagem) (g)	PESO APÓS SINTERIZAR (g)	DIFER. PESO (g)	C (mm)	L (mm)	ESP (mm)
F1 A	1	48,55	47,97	0,58	114,52	25,43	09,77
F1 A	2	50,99	50,70	0,29	114,43	25,31	11,32
F1 A	3	51,21	50,89	0,32	114,49	25,32	10,10
F2 B	4	51,22	50,94	0,28	114,45	25,27	10,72
F2 B	5	51,25	50,97	0,28	114,58	25,38	10,65
F2 B	6	51,24	50,98	0,26	114,41	25,28	10,97
F3 C	7	50,97	50,68	0,29	114,54	25,31	10,13
F3 C	8	51,54	51,21	0,33	114,41	25,25	10,12
F3 C	9	51,14	50,83	0,31	114,54	25,42	10,15
F4 D	10	50,99	50,67	0,32	114,52	25,43	10,03
F4 D	11	50,97	50,63	0,34	114,53	25,41	10,46
F4 D	12	50,18	50,60	0,34	114,51	25,42	10,18
MÉDIA		50,93	50,89	0,35	114,48	25,35	10,38

Nota: C= comprimento do suporte; L= largura do suporte; ESP= espessura

5.3.1 - Aspecto do suporte cerâmico confeccionado da formulação F1 A

A Figura 35 apresenta o formato do corpo de prova da composição F1 A após a queima do suporte cerâmico confeccionado.



A Figura 35 - Imagem do suporte cerâmico.1mm.

O processo de fabricação usado foi efetivo na produção do suporte cerâmico de cordierita. Todos os suportes confeccionados tiveram aspectos superficiais iguais. Não apresentaram fragilidade apresentando grãos característicos à malha usada no peneiramento. Pode-se observar uma superfície compacta e rugosa. A concavidade apresentou-se inalterada após o processo de secagem e queima.

As dimensões deste suporte forma de 114,5 x 25,4 x 10,1 mm, similares às dimensões coletadas dos 12 suportes mostradas na tabela 15.

5.3.2 – Análise microestrutural dos suportes cerâmicos confeccionados

As Figuras 36 e 37 mostram a superfície plana dos suportes cerâmicos das formulações F1, F2, F3 e F4, obtidas no microscópio confocal. Todos apresentaram uma textura rugosa com presença de porosidade.

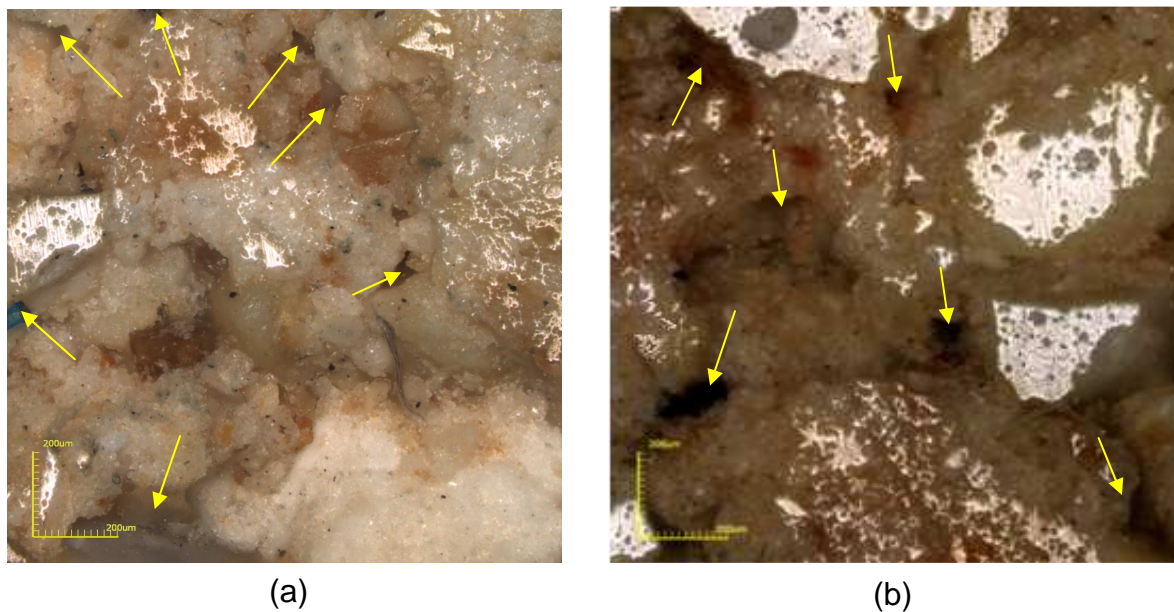


Figura 36 - Micrografia do suporte cerâmico produzido. (a) Formulação F1; (b) Formulação F2. As setas indicam os poros. Aumento: 108x Color.

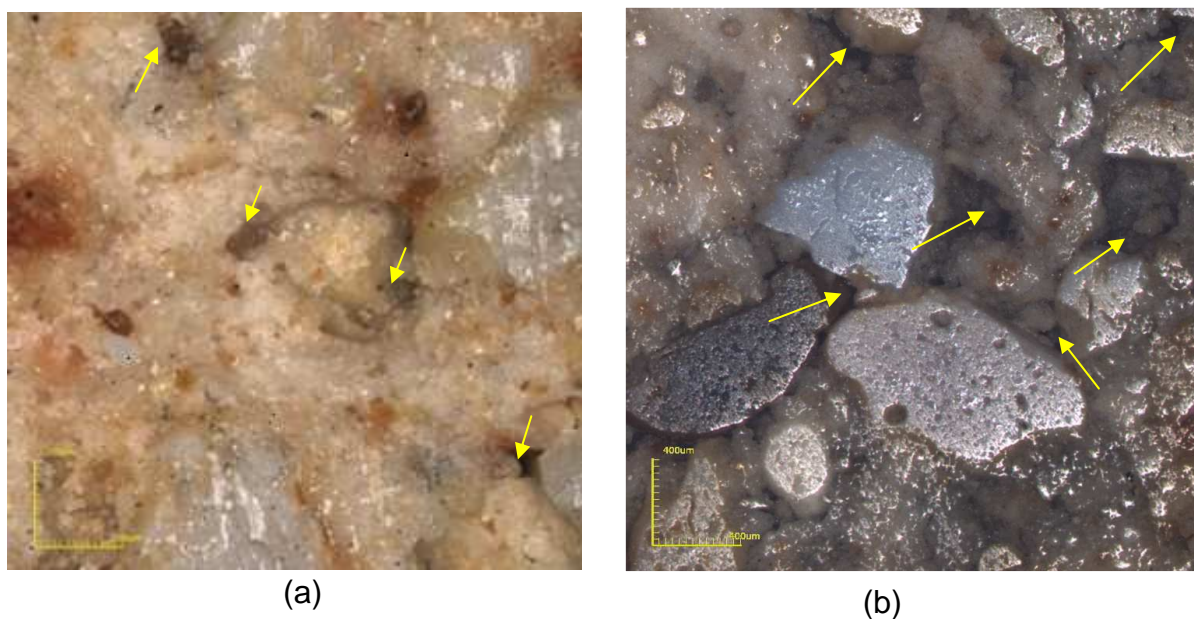


Figura 37 - Micrografia do suporte cerâmico produzido. (a) Formulação F3; (b) Formulação F4. As setas indicam os poros. Aumento: 108x Color.

As diferenças que existem entre as imagens referem-se aos tamanhos e formas dos grãos que foram sinterizados e à quantidade de poros existentes, que podem ser atribuídos à técnica de fabricação do suporte, com pressão de compactação de 15 toneladas. As setas indicam os locais dos poros, e mostram que estão presentes em todas as imagens com as respectivas formulações. Na Figura 37(a), referente à Formulação F3, notam-se quantidades menores de poros entre as partículas, comparados com as outras imagens, o que pode inferir que houve uma compactação satisfatória entre os grãos decorrente da carga aplicada, e do percentual do silicato de sódio, aditivo aglomerante. Acredita-se que a presença de poros indicados na imagem, não interferiria na superfície do cordão de solda quando estes passassem pelo processo de soldagem do alumínio. No trabalho de Tatagiba (2009) durante o processo de soldagem do aço carbono, os poros existentes no suporte cerâmico, não interferiram no resultado do processo de soldagem.

Pode-se concluir que há pouca diferença na estrutura dos suportes confeccionados atribuídos a pressão de compactação e pelo aditivo aglomerante, silicato de sódio. Logo, todos os suportes cerâmicos confeccionados com suas devidas formulações estavam aptos a serem avaliados pelo processo de soldagem unilateral.

5.3.3 - Avaliação dos suportes cerâmicos na soldagem unilateral

A seguir são mostrados os resultados dos suportes cerâmicos usados na soldagem unilateral de passe de raiz de solda em chapas de ligas de alumínio com abertura de raiz constante (4 mm), nariz de solda de 2 mm e velocidade de soldagem de 2,1 mm/s. Foram observados o aspecto dos suportes cerâmicos após o processo de soldagem, o aspecto do passe de raiz da solda e a macrografia da junta soldada. de soldagem iguais para todos os quatros suportes testados

Formulação F1

A Figura 38 mostra: (a) o suporte cerâmico F1 após soldagem; (b) o aspecto do passe de raiz de solda e (c) a macrografia da junta soldada.

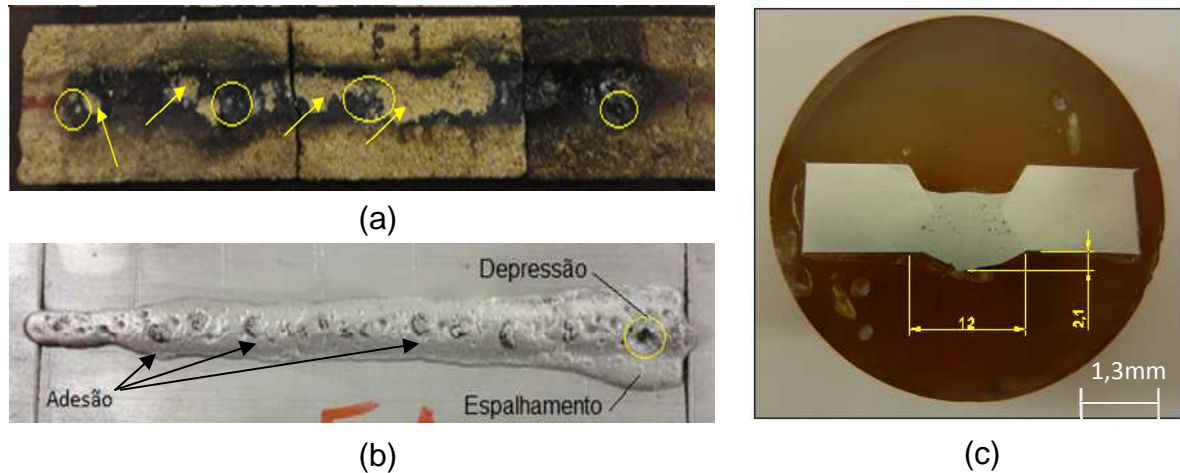


Figura 38 - Junta 1. (a) aspecto do suporte cerâmico; (b) aspecto do cordão de solda e (c) macrografia.

A Figura 38(a) mostra que devido à temperatura elevada na poça de fusão e o contato com a superfície do suporte, obteve-se uma superfície com tonalidade escura. É mais provável que, o silicato de sódio contido no suporte, quando submetido à temperatura acima da fusão do alumínio, 632°C , reagiu de forma que a superfície permanecesse escura durante a soldagem. Observa-se respingos de solda, indicada na figura por círculos, formados pelo excesso de corrente ou tensão do arco muito baixa. Foi observado fragmentação da superfície do suporte e trinca transversal, devido à dilatação térmica ou possivelmente por ter direcionado o arco elétrico sobre o suporte de solda, produzindo um excessivo aporte térmico causando a ruptura do suporte.

A Figura 38(b) mostra que a superfície do cordão de solda que esteve em contato com o suporte cerâmico de cordierita apresentou inclusões do material cerâmico. Não foram observados trincas, poros e mordeduras, mas nota-se que a largura do cordão aumentou comparando com o início deste (lado esquerdo). O alumínio tem uma condutividade elétrica muito mais elevada do que outros materiais, 64,94% (IACS). Como a corrente não variou é possível que a diferença na largura do cordão esteja associado a variação do comprimento do arco, visto

que se trata de soldagem manual e que não teve uma constância da altura da ponta do arame até o cordão de solda. Isto significa que a técnica de soldagem usada pode interferir no arco elétrico (Lincoln, 2013), e conseqüentemente na largura do cordão. Verifica-se, também que o cordão se espalhou - escoamento de material líquido - em alguns pontos, atribuído a falta de contato do suporte com a chapa. Analisando o restante do cordão, foram observadas algumas depressões na superfície, originadas pelos respingos de solda.

A macrografia, Figura 38(c), mostrou que a largura do cordão foi de 12 mm, na região central do cordão. A penetração lateral foi estimada em 4 mm e o reforço do passe de raiz foi de 2,1 mm. Ambos medidos com paquímetro no sistema métrico decimal. Podem-se observar poros, mas não se observa a presença de trincas e mordeduras. A presença de poros foi atribuída à dissolução de gases, principalmente o hidrogênio, resultante da decomposição do vapor d'água que incide no arco, proveniente da umidade na superfície do arame de solda e na chapa a ser soldada. A junta soldada mostrou um aspecto satisfatório da geometria da solda devido a medidas consideradas aceitáveis. Embora não se tenha um padrão específico de medidas para avaliar a macrografia, considerou-se desejada penetração lateral e bom reforço do passe de raiz, sem perfuração ou descontinuidades, sabendo que não houve variação da corrente elétrica, tensão e velocidade de soldagem em um cordão de passe de raiz simples.

Formulação F2

A Figura 39 mostra: (a) o suporte cerâmico F2 após soldagem; (b) o aspecto do passe de raiz de solda e (c) a macrografia da junta soldada.

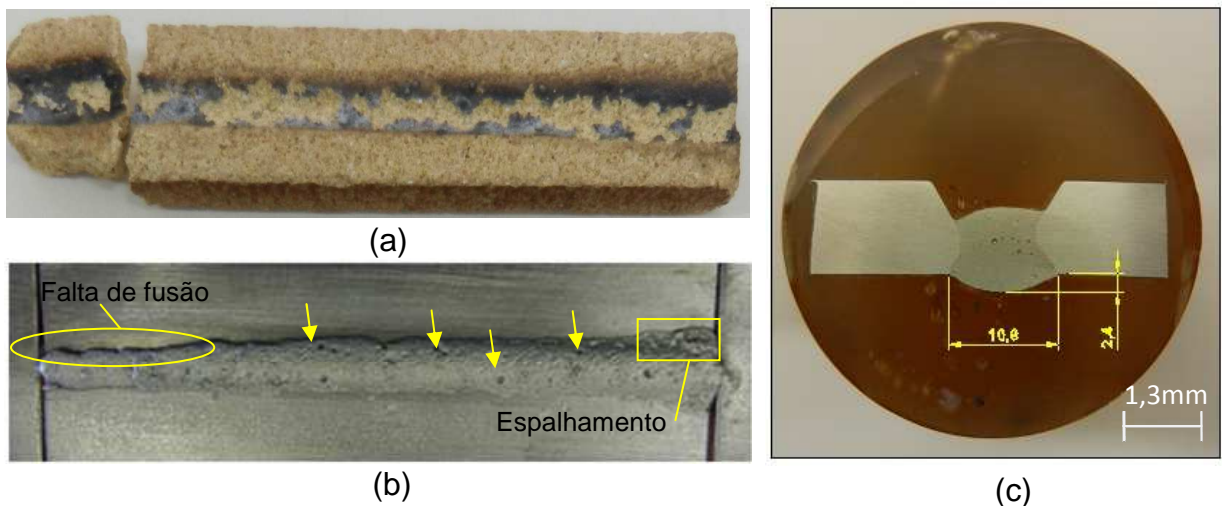


Figura 39- Junta 2. (a) aspecto do suporte cerâmico; (b) aspecto do cordão de solda e (c) macrografia.

A Figura 39(a) mostra que o suporte cerâmico se partiu na direção transversal. Isto ocorreu no momento da retirada do suporte aderido ao cordão de solda, mesmo após o resfriamento. Nota-se fragmentação da superfície do suporte. Isto ocorreu, possivelmente, devido a aderência do material cerâmico à superfície do cordão após a soldagem. Nesta formulação o percentual, em peso, de silicato de sódio na mistura da massa, mudou de 3 para 5%. O percentual do aditivo, mesmo com pequeno aumento, ainda pode ser considerado baixo para esta ocorrência. Outra causa provável para as fratura superficiais, foi atribuída à expansão térmica durante o processo de soldagem. Observou-se também uma superfície com tonalidade escura devido à temperatura elevada na poça de fusão que esteve em contato com a superfície do suporte.

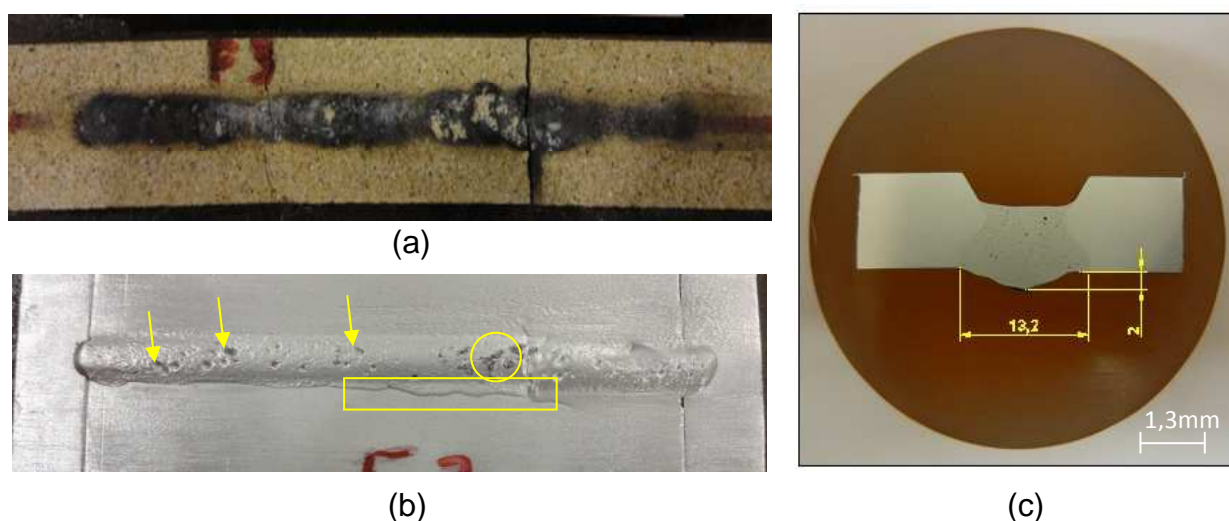
A Figura 39(b) mostra o aspecto do cordão de solda de raiz. Não foram observadas inclusões de solda ou de material cerâmico na superfície, trincas, poros e mordeduras. Foi observado no final do cordão, à direita da figura, espalhamento de material líquido, provavelmente atribuído à falta de contato do suporte com a chapa ou por aumento de temperatura, ao final da chapa, durante a soldagem. Analisando o restante do cordão, foi observada a presença de pequenas

depressões na superfície, indicados por setas, provocadas pelos respingos de solda.

A macrografia, Figura 39(c), mostrou que a largura do cordão foi de 10,8 mm. A penetração lateral foi estimada em 3,4 mm e o reforço do passe de raiz foi de 2,4 mm. Podem-se observar poros, mas não se observa a presença de trincas e mordeduras. Logo, o aspecto da geometria da solda foi satisfatório.

Formulação F3

A Figura 40 mostra: (a) o suporte cerâmico F3 após soldagem; (b) o aspecto do passe de raiz de solda e (c) a macrografia da junta soldada.



A Figura 40 - Junta 3. (a) aspecto do suporte cerâmico; (b) aspecto do cordão de solda e (c) macrografia.

A Figura 40(a) mostra que o suporte cerâmico resistiu à energia de soldagem, durante o processo de soldagem. O suporte foi efetivo em proteger o metal de solda líquido. A trinca na direção transversal foi atribuída ao manuseio após se desprender do cordão de solda. Nota-se pouco desprendimento de material cerâmico da superfície do suporte, geralmente atribuído à elevada temperatura e provavelmente pelo aumento do percentual de silicato de sódio (7%) na mistura da massa, durante o processo de fabricação do suporte cerâmico, conforme Tabela 12. Observam-se ainda marcas de respingos - depressões -

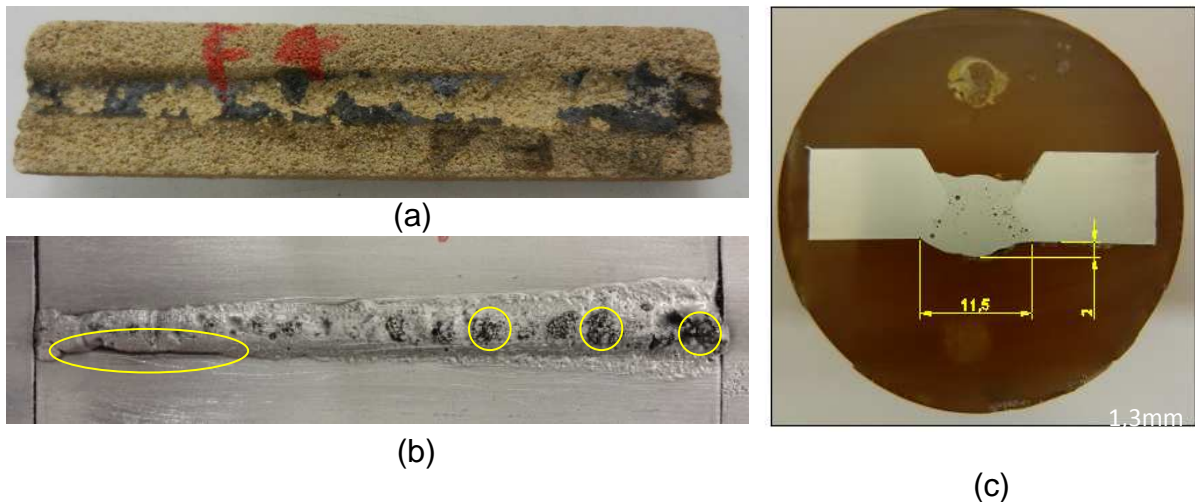
provocados por material de solda, fundidos, durante a soldagem, provavelmente atribuído a energia de soldagem.

A Figura 40(b) mostra o aspecto visual da superfície do cordão de solda que esteve em contato com o suporte cerâmico de cordierita. O aspecto e o acabamento foram satisfatórios, sendo observada adesão mínima do material cerâmico no cordão, indicado por círculo, e poucas depressões causadas pelos respingos de solda, indicados por setas. Não se observa falta de fusão e houve espalhamento de solda na lateral do cordão. Analisando o restante do cordão, observa-se uma marca transversal, justificando a emenda de topo dos dois suportes cerâmicos usados na soldagem. O suporte cerâmico foi eficiente neste teste.

A macrografia, Figura 40(c), mostrou que a largura do cordão foi de 13,2 mm. A penetração lateral foi estimada em 4,6 mm e reforço de solda de 2 mm. Podem-se observar poros, mas não se observa a presença de descontinuidades, como trincas e mordeduras. A macrografia desta junta soldada mostrou-se aspecto geométrico apropriado, visto que a medida da penetração lateral foi a maior em relação às medidas macrográficas das juntas soldadas com suportes com formulações F1, F2 e F4. O reforço de solda aumentou 0,5 mm em relação às medidas originais do suporte (1,5 mm).

Formulação F4

A Figura 41 mostra: (a) o suporte cerâmico F4 após soldagem; (b) o aspecto do passe de raiz de solda e (c) a macrografia da junta soldada.



A Figura 41 - Junta 4. (a) aspecto do suporte cerâmico; (b) aspecto do cordão de solda e (c) macrografia.

A Figura 41(a) mostra o suporte cerâmico com desprendimento de material cerâmico em sua superfície côncava, atribuído à dilatação térmica durante o processo de soldagem e possivelmente influenciada pelo aumento de silicato de sódio na composição da massa cerâmica. Durante a soldagem, o silicato se fundiu e parte da superfície do material cerâmico aderiu ao material em estado líquido e, após a solidificação, ocorreu a fratura.

A Figura 41(b) mostra que o cordão de solda teve falta de fusão no início da solda, lado esquerdo da figura. Esta incorreção foi atribuída à chapa fria. Houve espalhamento no final da solda de solda, lado direito da figura, justificando o aumento de temperatura da chapa durante a soldagem. Foram observadas depressões causadas por respingos e considerável adesão do material cerâmico no cordão, mostrando a fragilidade da superfície do suporte. Não foi observada a presença de descontinuidades, como mordedura e trinca.

A macrografia, Figura 41(c), mostrou que a largura do cordão foi de 11,5 mm. A penetração lateral foi estimada em 3,7 mm e reforço de solda de 2,0 mm. O cordão acompanhou o perfil da concavidade do suporte cerâmico. Podem-se

observar poros, mas não se observa a presença de descontinuidades como trincas e mordeduras. A macrografia da região central da junta soldada mostrou um aspecto satisfatório da geometria da solda.

Ao comparar a soldagem dos passes de raiz com as quatro formulações usadas, conclui-se que:

a) Em relação à inspeção visual o suporte cerâmico de melhor aspecto e acabamento foi o suporte F3, justificado pela adesão mínima de material cerâmico, por ausência de inclusão de solda no cordão e ausência de descontinuidades.

b) Todos os cordões soldados com suportes cerâmicos com as respectivas formulações apresentaram uma macrografia com medidas geométricas proporcionais a aberturas de raiz e aos parâmetros de soldagem utilizados nos testes sendo aprovados a altura do cordão, penetração lateral e reforço de solda.

c) O F3 foi considerado melhor devido ao aspecto do cordão, maior penetração lateral, menores quantidades de poros e por apresentar pouca adesão de material cerâmico e ausência de descontinuidades.

5.4 Resultado da Etapa II

Para esta etapa foram soldadas 8 juntas de topo e observados os efeitos da mudança dos parâmetros de soldagem: abertura de raiz, corrente e tensão. Após a execução das soldas, foram feitas observações por meio de inspeção visual (IV), líquido penetrante (LP) e macrografia. Com os resultados obtidos, foi definido o possível campo operacional do processo. Conforme informado, o processo de soldagem usado foi o GMAW utilizando arame ER4043 de 1,0 mm de diâmetro e com gás de proteção, argônio puro, na vazão de 18 l/min.

Junta 1

A Figura 42 mostra o aspecto da raiz da solda (a), após o ensaio por LP (b) e a macrografia (c) da Junta 1. Nesta junta, foi usada abertura de 0 (zero) mm. A corrente foi de 80 A, tensão de 14 V e velocidade de soldagem de 1,8 mm/s, conforme Tabela 11. A energia de soldagem foi de 0,62 kJ/mm.

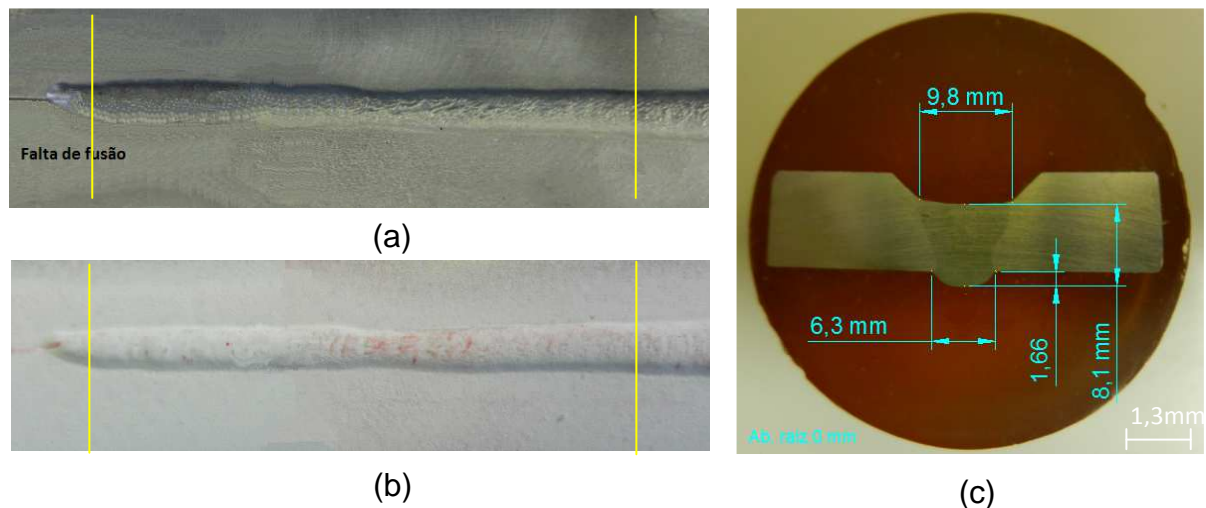


Figura 42 - Junta 1. (a) aspecto da raiz de solda; (b) após ensaio por LP e (c) macrografia.

A inspeção visual e por LP na raiz da solda, Figura 42(a) e (b), mostra que no início da solda ocorreu uma falta de fusão. Esta foi atribuída à abertura de raiz igual a zero neste corpo de prova, associado à condição de chapa fria no início da solda. No restante do cordão, não foram observadas descontinuidades, tendo ocorrido contato da superfície da raiz da solda com a superfície do suporte cerâmico. Tatagiba (2009) e Gurgel (2010) também observaram que na soldagem unilateral do aço com suporte cerâmico, a ausência de abertura de raiz torna a solda susceptível à ocorrência de falta de fusão.

A macrografia da solda revelou uma seção transversal com aspecto satisfatório do passe de raiz com adequada geometria do cordão. Foram observados pequenos poros atribuídos à formação de gases durante o processo de soldagem. A avaliação dimensional mostrou que houve um reforço de solda de 1,6 mm e largura do cordão de 6,3 mm. Logo, a penetração lateral foi estimada em 3,1 mm de cada lado da chapa na raiz da solda.

Os resultados acima mostram que, apesar da macrografia no centro do cordão ser satisfatória, a ausência de abertura de raiz torna a solda susceptível a ocorrência de falta de fusão, o que deve ser evitado.

Junta 2

A Figura 43 mostra o aspecto da raiz da solda (a), após o ensaio por LP (b) e a macrografia (c) da Junta 2. Nesta junta, foi usada abertura de raiz de 2 mm, com corrente de 83 A, tensão de 15 V e velocidade de soldagem de 1,9 mm/s. A energia de soldagem foi de 0,65 kJ/mm.

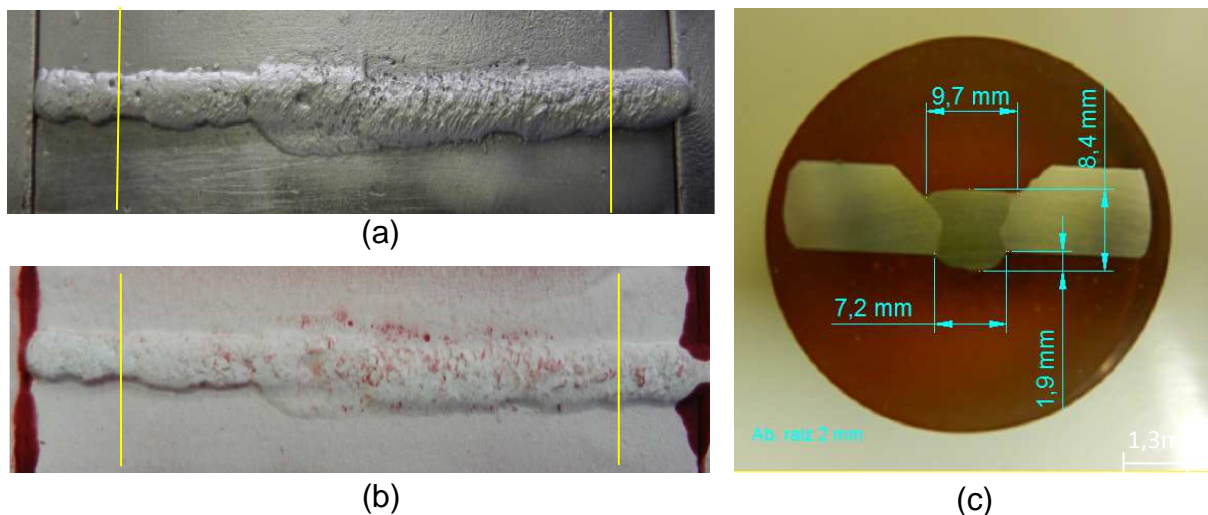


Figura 43 - Junta 2. (a) aspecto da raiz de solda; (b) após ensaio por LP e (c) macrografia.

A inspeção visual e por LP na raiz da solda, Figura 43(a) e (b), mostra boa fusão atribuída à energia de soldagem e abertura de raiz. Foram observadas pequenas diferenças na altura e largura do reforço de raiz, à esquerda do cordão de solda, atribuído à variação da velocidade de deslocamento da tocha. Observou-se espalhamento no centro do cordão devido à falta de contato do suporte com a superfície da chapa, e pequenas depressões na superfície do cordão de solda, provocados por respingos de solda durante o processo. No restante do cordão não foram observadas a presença de trincas e mordeduras.

A macrografia, Figura 43(c), mostrou que a largura do cordão foi de 7,2 mm. A penetração lateral foi estimada em 2,6 mm e reforço de solda de 1,9 mm. Podem-

se observar poros, mas não se observa a presença de descontinuidades como trincas e mordeduras. A macrografia da região central da junta soldada mostrou um aspecto satisfatório da geometria da solda.

Os resultados de inspeção visual, líquido penetrante e macrografia mostram que para o caso de preparação de junta com 2 mm de abertura de raiz e energia de soldagem de 0,65 kJ/mm na soldagem unilateral com o suporte cerâmico, a junta é considerada satisfatória.

Junta 3

A Figura 44 mostra o aspecto da raiz da solda (a), após o ensaio por LP (b) e a macrografia (c) da Junta 3. Nesta junta, foi usada abertura de raiz de 2 mm, com corrente de 100 A, tensão de 17,6 V e velocidade de soldagem de 2,0 mm/s. A energia de soldagem foi de 0,88 kJ/mm.

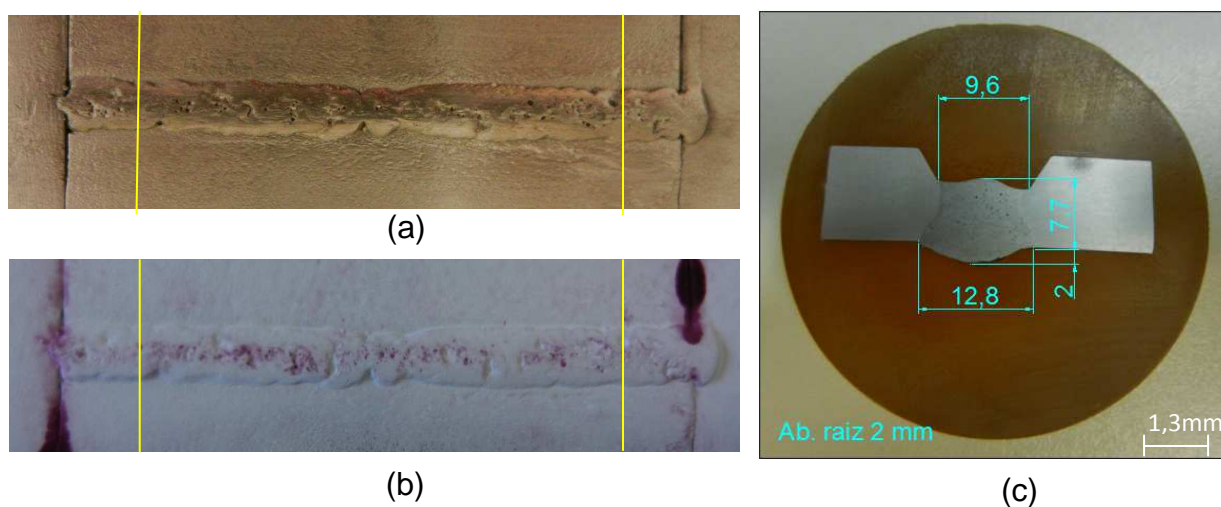


Figura 44 - Junta 3. (a) aspecto da raiz de solda; (b) após ensaio por LP e (c) macrografia.

A inspeção visual e por LP na raiz da solda, Figura 44 (a) e (b), mostra as regiões onde ocorreram aderências de resíduo cerâmico. As pequenas depressões na superfície do cordão de solda, originadas pelos respingos de solda são vistos em menores quantidades. Na região central do cordão de solda, foi observado um estreitamento do cordão, acompanhado de pequenas falhas nas

laterais do cordão, atribuído possivelmente à energia de soldagem e afastamento da tocha durante a soldagem nesta região. No restante do cordão, não foram observadas descontinuidades como trincas e mordeduras.

A macrografia, Figura 44(c), mostrou que a largura do cordão foi de 12,8 mm. A penetração lateral foi estimada em 5,4 mm e reforço de solda de 2 mm. Podem-se observar poros, mas não se observa a presença de descontinuidades como trincas e mordeduras.

Os resultados de IV, LP e Macrografia da junta 3 mostram que, para o caso de preparação de junta com 2 mm de abertura de raiz e energia de soldagem de 0,88 kJ/mm na soldagem unilateral com o suporte cerâmico, a junta é considerada satisfatória.

Junta 4

A Figura 45 mostra o aspecto da raiz da solda (a), após o ensaio por LP (b) e a macrografia (c) da Junta 4. Nesta junta, foi usada abertura de 4 mm, com corrente de 113 A, tensão de 18,5 V e velocidade de soldagem de 2,2 mm/s. A energia de soldagem foi de 0,95 kJ/mm.

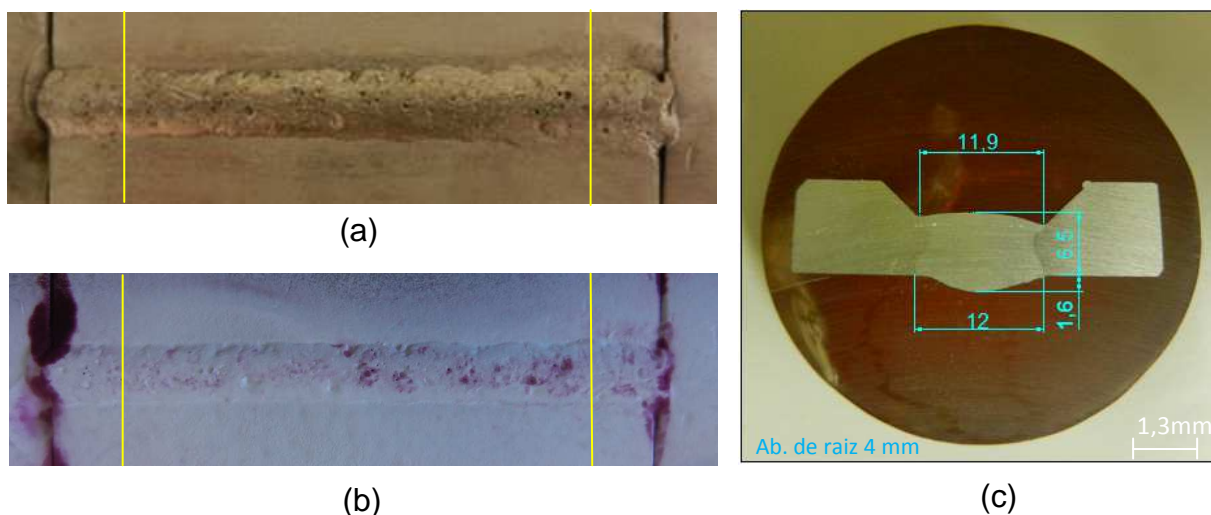


Figura 45 - Junta 4. (a) aspecto da raiz de solda; (b) após ensaio por LP e (c) macrografia.

A inspeção visual e por LP do cordão de solda, Figuras 45 (a) e (b) mostram um cordão de solda com bom acabamento, sendo observadas depressões na

superfície do cordão. Não foram observadas trincas e mordeduras. Foram observadas marcas atribuídas à adesão de resíduos cerâmicos na superfície do cordão de raiz de solda, constatando a efetividade do suporte cerâmico.

A macrografia, Figura 45(c), mostra que a largura do cordão, medido na parte inferior, foi de 12 mm e a penetração lateral foi estimada em 4 mm. O reforço de solda foi de 1,6 mm.

Os resultados de IV, LP e Macrografia da Junta 4 soldada com energia de soldagem de 0,95 kJ/mm e abertura de raiz de 4 mm, mostraram que o cordão de solda foi satisfatório.

Junta 5

A Figura 46 mostra o aspecto da raiz da solda (a), após o ensaio por LP (b) e a macrografia (c) da Junta 5. Nesta junta, foi usada abertura de 5 mm, com corrente de 121 A, tensão de 22 V e velocidade de soldagem de 2,2 mm/s. A energia de soldagem foi de 1,21 kJ/mm.

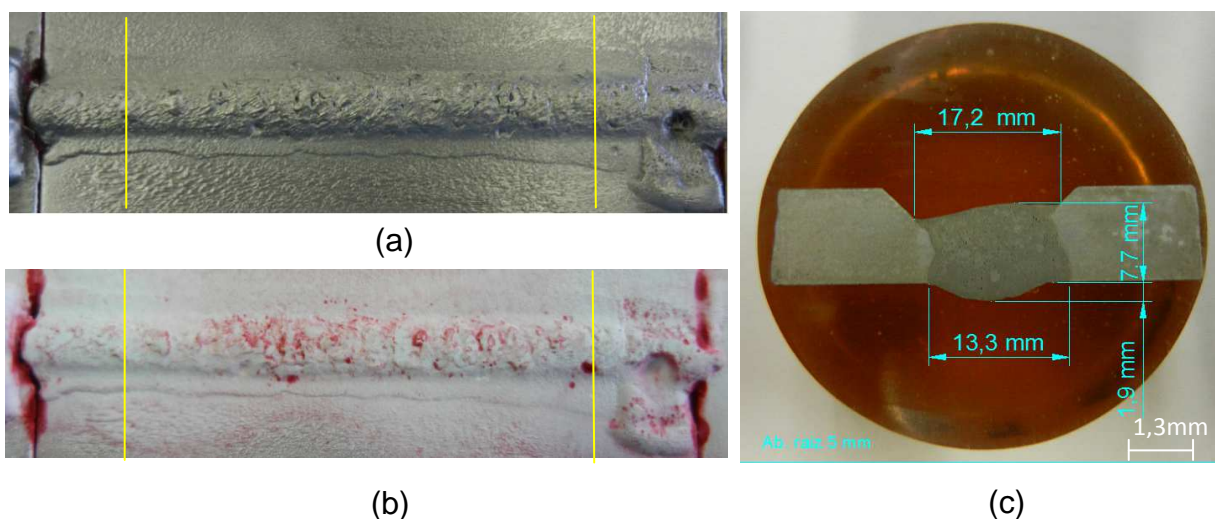


Figura 46 - Junta 5. (a) aspecto da raiz de solda; (b) após ensaio por LP e (c) macrografia.

A inspeção visual e por LP do cordão de solda, Figuras 46(a) e (b) mostra um cordão de solda com boa aparência sendo observada a ocorrência de espalhamento na lateral - escoamento de material líquido - atribuído à falta de contato do suporte cerâmico na chapa. Foram observadas pequenas depressões

na superfície do cordão de solda, atribuído a respingos durante o processo de soldagem. Não foram observadas descontinuidades como trincas e mordeduras.

A macrografia, Figura 46(c) mostra que a largura do cordão, medido na parte inferior, foi de 13,3 mm e a penetração lateral estimada em 4,2 mm. O reforço de solda foi de 1,9 mm. Nota-se a presença de pequenos poros formados durante a solidificação na zona de solda.

Os resultados de IV, LP e Macrografia da junta 5 soldada com energia de soldagem de 1,21 kJ/mm e abertura de raiz de 5 mm mostraram que o cordão de solda foi satisfatório.

Junta 6

A Figura 47 mostra o aspecto da raiz da solda (a), após o ensaio por LP (b) e a macrografia (c) da Junta 6. Nesta junta, foi usada abertura de 6 mm, com corrente de 123 A, tensão de 25 V e velocidade de soldagem de 2,3 mm/s. A energia de soldagem foi de 1,34 kJ/mm.

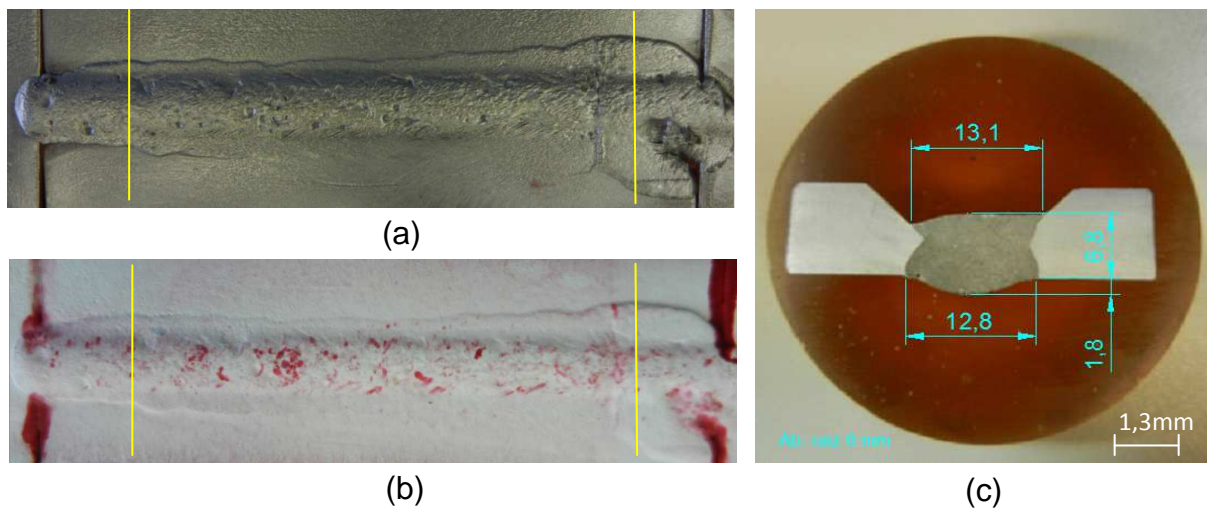


Figura 47 - Junta 6. (a) aspecto da raiz de solda; (b) após ensaio por LP e (c) macrografia.

A inspeção visual e por LP do cordão de solda, Figuras 47(a) e (b) mostra um cordão de solda com boa aparência, sendo observada a ocorrência de espalhamento na lateral - escoamento de material líquido - atribuído à falta de contato do suporte cerâmico com a superfície da chapa de alumínio. Foram

observadas marcas de respingos e poucas depressões. Não foram observadas descontinuidades como trincas e mordeduras e não foi encontrada a presença de resíduo cerâmico na superfície do cordão, reforçando a eficiência do suporte cerâmico.

A macrografia, Figura 47(c), mostra que a largura do cordão, medido na parte inferior, foi de 12,8 mm e a penetração lateral foi estimada em 3,4 mm. O reforço de solda foi de 1,8 mm. Não foi observada a presença de poros.

Os resultados de IV, LP e Macrografia da Junta 6 soldada com energia de soldagem de 1,34 kJ/mm e abertura de raiz de 6 mm, mostraram que o cordão de solda foi satisfatório com boas características, justificando sua aprovação.

Junta 7

A Figura 48 mostra o aspecto da raiz da solda (a), após o ensaio por LP (b) e a macrografia (c) da Junta 7. Nesta junta, foi usada abertura de 6 mm, com corrente de 129 A, tensão de 25 V e velocidade de soldagem de 2,3 mm/s. A energia de soldagem foi de 1,40 kJ/mm.

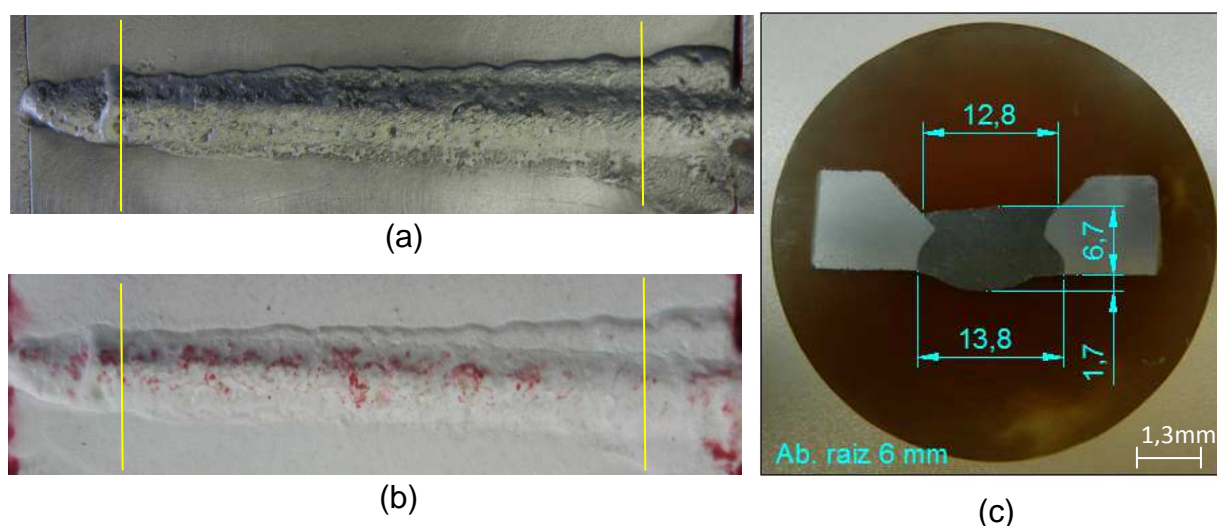


Figura 48 - Junta 7. (a) aspecto da raiz de solda; (b) após ensaio por LP e (c) macrografia.

A inspeção visual e por LP do cordão de solda, Figuras 48(a) e (b) mostra um cordão de solda com boa aparência, sendo observado a ocorrência de espalhamento - escoamento de material líquido - atribuído à falta de contato do

suporte cerâmico com a superfície da chapa de alumínio e com a energia de soldagem de 1,40 kJ/mm. Foram observadas marcas de respingos e poucas depressões. Não foram observadas descontinuidades como trincas e mordeduras, e não foi encontrada a presença de resíduo cerâmico na superfície do cordão.

A macrografia, Figura 48(c), mostra que a largura do cordão, medido na parte inferior, foi de 13,8 mm e a penetração lateral foi estimada em 3,9 mm. O reforço de solda foi de 1,7 mm. Não foi observada a presença de poros.

Os resultados de IV, LP e Macrografia mostram que, para o caso de preparação de junta com abertura de 6 mm e energia de soldagem de 1,40 kJ/mm, pode ocorrer um aumento na largura do cordão de raiz de solda, sendo sujeita a eventuais espalhamentos da poça de metal líquido. Com o bom aspecto na geometria do passe de raiz considera-se aprovada o cordão de solda da Junta 7.

Junta 8

A Figura 49 mostra o aspecto da raiz da solda (a), após o ensaio por LP (b) e a macrografia (c) da Junta 8. Nesta junta, foi usada abertura de 6 mm, com corrente de 135 A, tensão de 27 V e velocidade de soldagem de 2,5 mm/s. A energia de soldagem foi de 1,46 kJ/mm.

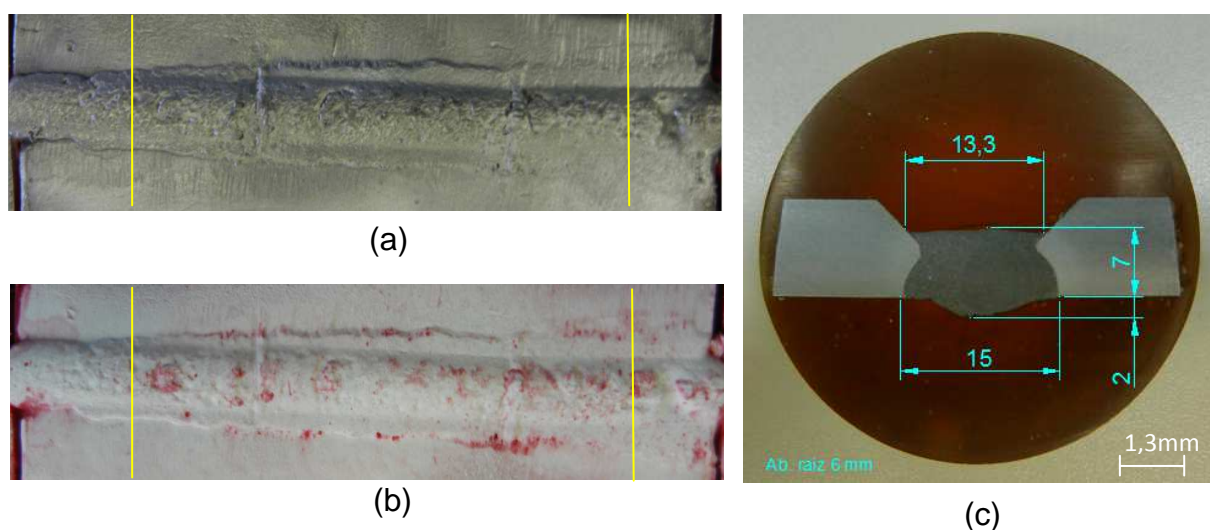


Figura 49 - Junta 8. (a) aspecto da raiz de solda; (b) após ensaio por LP e (c) macrografia.

A inspeção visual e por LP do cordão de solda, Figura 49(a) e (b) mostram um cordão de solda com bom aspecto, sendo observadas poucas depressões na superfície do cordão. Não foram observadas trincas e mordeduras. Não foram observadas marcas atribuídas à adesão de resíduos cerâmicos na superfície do cordão de raiz de solda. Observa-se espalhamento de material líquido nas laterais, e constata-se a efetividade do suporte cerâmico. Foram observados os pontos de emenda do suporte no sentido transversal, indicando o ponto exato da junção entre os suportes cerâmicos. O cordão não apresentou descontinuidades.

A macrografia, Figura 49(c), mostra que a largura do cordão, medido na parte inferior, foi de 15 mm e a penetração lateral foi estimada em 4,5 mm. O reforço de solda foi de 2 mm. Não foi visível a presença de poros.

Os resultados de IV, LP e Macrografia mostram que, para o caso de preparação de junta com abertura de 6 mm e energia de soldagem de 1,46 kJ/mm, podem ocorrer eventuais vazamentos da poça de metal líquido e aumento na largura do cordão de raiz de solda. Com o bom aspecto na geometria do passe de raiz, considera-se aprovado o cordão de solda da Junta 8.

5.4.1 Determinação de um possível campo operacional

A Figura 50 mostra o gráfico da energia de soldagem com a abertura de raiz das juntas soldadas, indicando suas aprovações e reprovações. Com os resultados obtidos foi definido um possível campo operacional do processo.

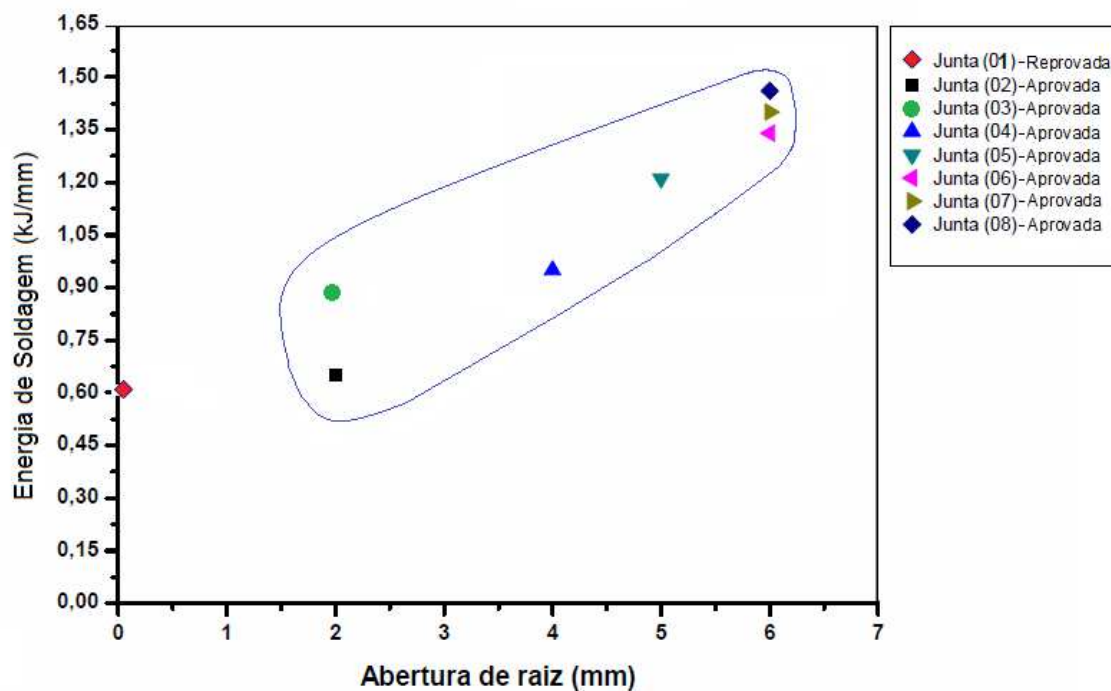


Figura 50 - Possível campo operacional de soldagem

Este possível campo operacional pode ser também expresso por meio dos parâmetros e variáveis do processo, de forma que se obtenham cordões de solda adequados. Logo, são descritos:

- Abertura de raiz: 2 a 6 mm;
- Tensão: 17,6 a 27 V;
- Corrente: 100 a 135 A
- Energia de soldagem: 0,65 a 1,46 kJ/mm.

A Tabela 16 apresenta um resumo dos resultados obtidos das oito juntas soldadas nesta etapa.

Tabela 16 – Resumo dos resultados obtidos durante a execução das oito juntas soldadas.

Junta	Abertura de Raiz (mm)	Energia de Soldagem (kJ/mm)	Inspeção Não Dest.		Macrografia do Passe de Raiz		Resultado Final
			LP	IV	Largura (mm)	Penetração Lateral (mm)	
1	0	0,62	A	NA	6,3	3,1	NA
2	2	0,65	A	A	7,2	2,6	A
3	2	0,88	A	A	12,8	5,4	A
4	4	0,95	A	A	12,0	4,0	A
5	5	1,21	A	A	13,3	4,2	A
6	6	1,34	A	A	12,8	3,4	A
7	6	1,40	A	A	13,8	3,9	A
8	6	1,46	A	A	15,0	4,5	A

A: Aprovada
NA: Não aprovada

A Tabela 16 mostra as seguintes tendências:

a) Apenas a junta 1 realizada sem abertura de raiz foi considerada inadequada, conforme também verificado nos trabalhos de Tatagiba (2009) e Gurgel (2013). No início do cordão foi observado falta de fusão, possivelmente pela ausência de abertura de raiz da junta de solda, já que a

energia de soldagem de 0,62 kJ/mm foi aproximada da energia de soldagem, (0,65kJ/mm) da junta 2, onde não ocorreu este defeito:

b) À medida que se aumentou a abertura de raiz, foi necessário um aumento da energia de soldagem para a realização do passe de raiz. De fato, tornou-se necessário a deposição de mais metal de solda para a formação do passe de raiz com maior abertura de raiz.

c) A largura do cordão de solda aumentou proporcionalmente com o aumento da abertura de raiz. De fato, o afastamento das chapas, na junta, produziu um cordão com maior largura durante a deposição do metal de solda.

d) Quando se aumentou a energia de soldagem foi observado um aumento na penetração lateral.

e) A abertura de raiz de solda de 2, 4, 5 e 6 mm, foi considerada aprovada para os níveis de energia de soldagem usados.

5.5 Resultados da Etapa III

Nesta etapa foram executadas duas juntas, A e B, com parâmetros de soldagem no interior do campo operacional delineado na etapa II, utilizando o suporte cerâmico definido na etapa I. Segue abaixo observações no aspecto visual das superfícies dos cordões de solda após os cuidados diferenciados, na preparação e limpeza de cada junta soldada:

- Junta A: foi obtido um cordão de solda com pequenas marcas de respingos e pequena quantidade de poros na sua superfície. O lado da face do cordão não foi observado falhas em sua superfície. Notou-se pequena descontinuidade no lado do passe de raiz de solda.

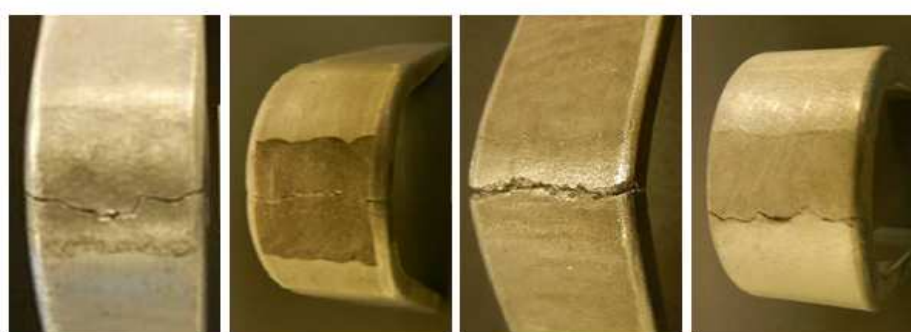
- Junta B: foi obtido um cordão de solda com bom aspecto visual em sua superfície e não foi observado descontinuidades tanto no lado da face quanto no lado do passe de raiz.

Após a limpeza e soldagem das juntas foram retirados os CP e realizados os seguintes ensaios:

5.5.1 Ensaio de dobramento

A Figura 51 mostra as fissuras no dobramento transversal de face e de raiz de todos os CP da junta A. As fissuras se manifestaram até a fratura em todos os CP durante o ensaio, desta forma no ensaio de dobramento da Junta A todos os CP foram considerados reprovados.

A Figura 52 mostra os resultados de dobramento de face e de raiz da junta B. Neste ensaio apenas o CP3 B foi considerado reprovado por apresentar fissura de 7 mm, superior 3 mm, que é critério de aceitação previsto na norma ASTM E 190/97.



(a)



(b)

Figura 51 – Resultado do ensaio de dobramento. (a) Corpos de prova da junta A; (b) Superfície de fratura do CP1 A, dobramento de face.

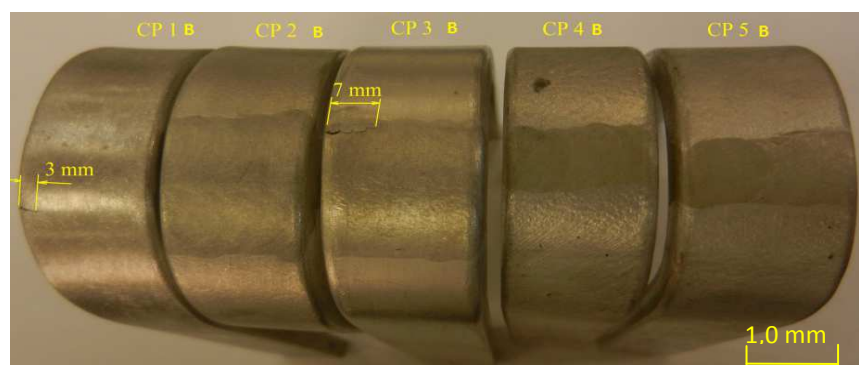


Figura 52 - Resultado do ensaio de dobramento. Corpos de prova da junta B.

As fraturas dos CP da junta A na ZF foram atribuídas ao excesso de porosidade, observado na superfície de fratura, Figura 51(b), que por sua vez está associado ao procedimento de limpeza realizada antes da operação de soldagem. Esta porosidade são descontinuidades comuns na soldagem do alumínio, que ocorrem quando o metal em estado líquido reduz as condições de solubilidade do gás (hidrogênio), aprisionando-o em forma de bolhas. Outra possibilidade refere-se à contaminação da ZF por óxido de alumínio hidratado, durante a soldagem, o que pode ter contribuído para a formação de porosidades (Morais e Ferraresi, 2001).

O resultado do ensaio de dobramento da Junta B, mostrado na Figura 52, foi satisfatório para quatro dos cinco CP que foram submetidos ao ensaio de dobramento. Este resultado foi atribuído ao procedimento de limpeza efetuado, que incluiu, antes da soldagem, a permanência das chapas de alumínio em estufa com temperatura entre 75°C e 100°C durante 10 minutos e a limpeza na superfície do arame com o uso de acetona. Ambos tiveram como objetivo eliminar a umidade.

5.5.2 Ensaio de tração

A Tabela 17 apresenta os resultados do ensaio de tração do MB e das Juntas A e B.

Tabela 17 – Resultado do Ensaio de Tração

Corpo de Prova	Local da Ruptura	LRT (MPa)	σ_{esc} (MPa)	ϵ [%]
Ensaio de Tração do MB				
CP MB	MB	239,3	180,0	14,3
Ensaio de Tração da Junta B				
CP 1 A	ZF	91,6	48,7	1,9
CP 2 A	ZF	157,9	80,1	5,9
CP 3 A	ZF	102,4	54,4	2,4
CP 4 A	ZF	97,4	49,2	3,1
Ensaio de Tração da Junta B				
CP 1 B	ZF	112,4	73,1	3,6
CP 2 B	MB	159,4	88,5	14,4
CP 3 B	ZF	109,7	68,9	4,1
CP 4 B	ZF	153,5	79,6	7,9

$\sigma_{m\acute{a}x\ LRT}$ - Limite de resist\ancia

σ_{esc} - Tens\ao de escoamento

ϵ [%] - Alongamento

A Figura 53 mostra os CP da Junta A, onde se observa porosidades grosseiras na superfície de fratura na ZF. A figura 54 mostra os CP da Junta B que foi observada pouca porosidade na superfície de fratura na ZF.

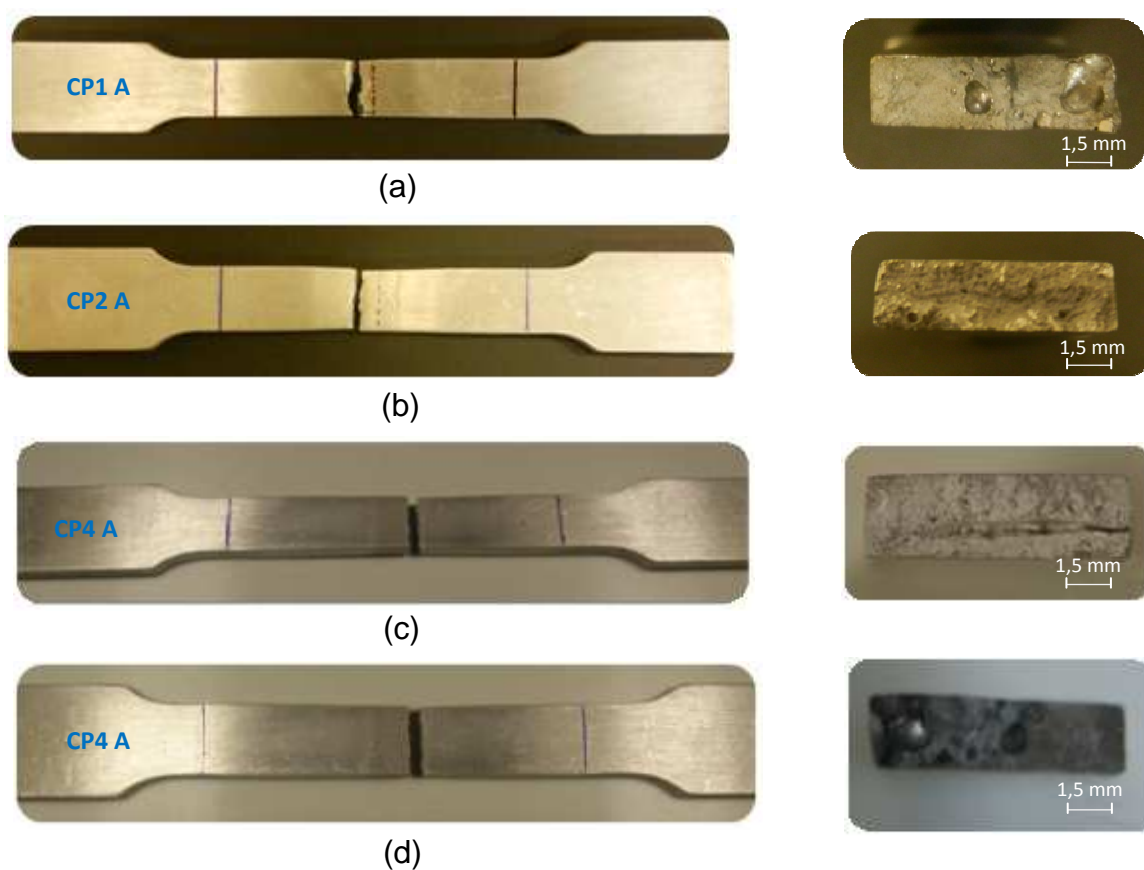


Figura 53 - Ensaio de tração da Junta A. (a), (b), (c) e (d) CP da Junta A com ruptura e as respectivas superfícies de fratura.

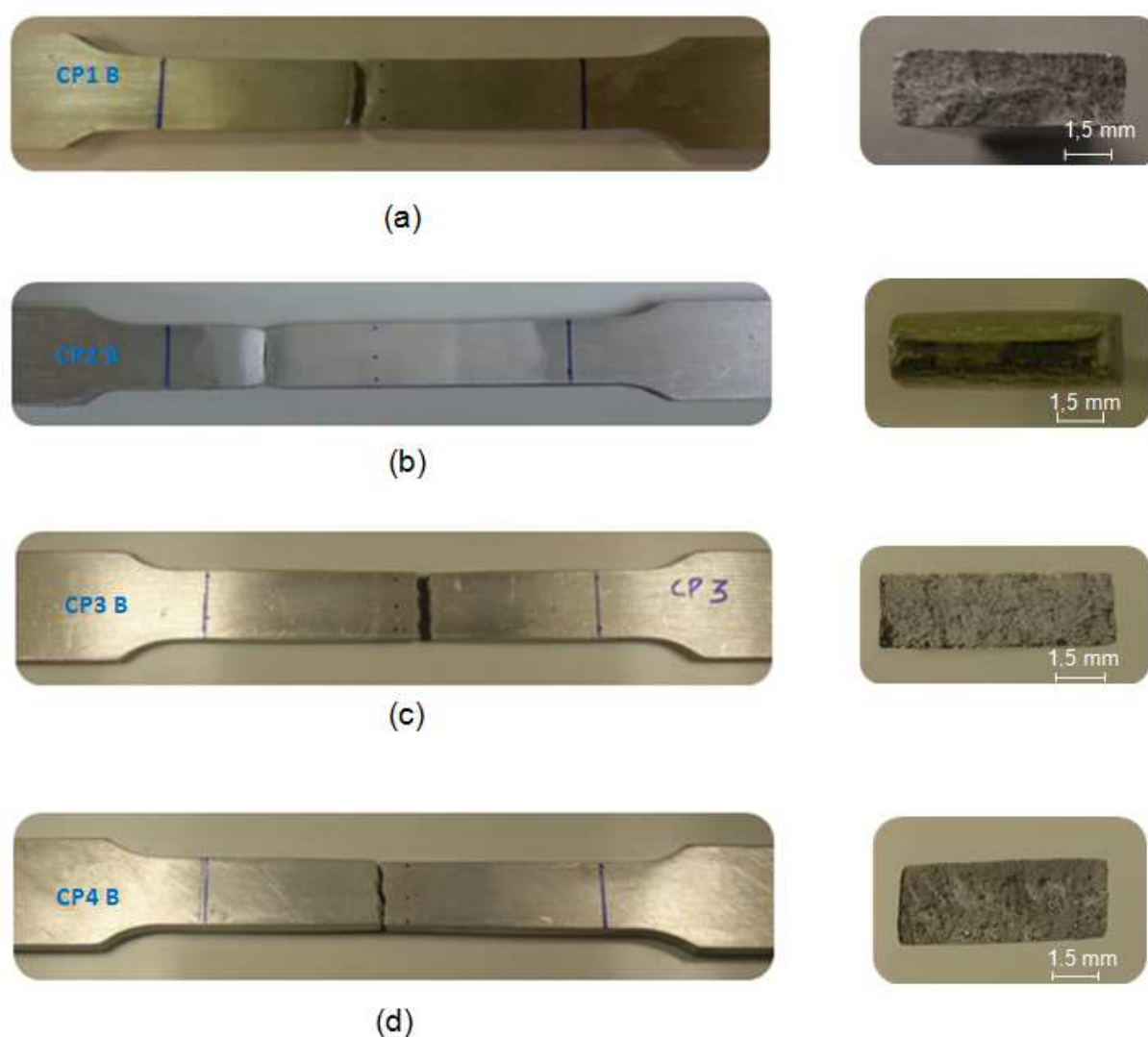


Figura 54 - Ensaio de tração da Junta B. (a), (b), (c) e (d) CP Junta B com ruptura e as respectivas superfícies de fratura.

A Tabela 17 apresenta o LRT da junta A com variação de 91,6 a 157,9 MPa, inferiores ao LRT do MB que foi de 239,3 MPa. Este baixo LRT pode estar relacionado à presença de porosidades observada na superfície de fratura, diminuindo a seção resistiva e consequentemente a resistência mecânica da ZF, local onde ocorreu a fratura (Capilare e Mazzaferro, 2009). O alongamento variou de 1,9% a 5,9%. Este baixo percentual foi devido à porosidade grosseiras na ZF atribuído ao procedimento de limpeza da junta A.

Em relação à Junta B, o LRT variou de 109,7 a 159,4 MPa. Em relação ao ensaio de tração da junta A, houve um aumento do LRT. Este aumento pode estar associado à redução da porosidade observada na superfície de fratura. Logo, aumentou a seção resistiva e conseqüentemente a resistência mecânica da ZF na qual ocorreu a fratura. O alongamento variou de 3,6% a 14,4%. Este percentual foi devido a menor porosidade na ZF atribuído ao procedimento de limpeza da junta B.

A redução do LRT na ZF das juntas A e B é considerada comum. Os valores encontrados do LRT no ensaio das juntas A e B estão associados aos resultados obtidos nos ensaios de dobramento, Figura 51, e de tração, Figura 54.

5.5.3 Macrografia

A Figura 55 (a,b) mostra as macrografias das juntas A e B, onde se observa um aspecto satisfatório da seção transversal dos cordões de solda depositados. Os passes de deposição tiveram adequada fusão na lateral do chanfro. Não foi observada a presença de trincas e mordeduras. A geometria do passe de raiz foi analisada com medições quantitativas, feitas com paquímetro, no sistema métrico decimal. Os passes de raiz apresentaram as seguintes dimensões: 11,5 e 12,1 mm (largura do cordão), 3,3 e 3,6 mm (penetração lateral estimada) e 1,9 e 2 mm (reforço de solda).

A macrografia da junta A, Figura 55(a) mostra a presença de porosidade grosseira o que não ocorreu na junta B, Figura 55(b).

Conclui-se que a análise macrográfica está de acordo com os resultados obtidos no ensaio mecânico de dobramento e de tração.

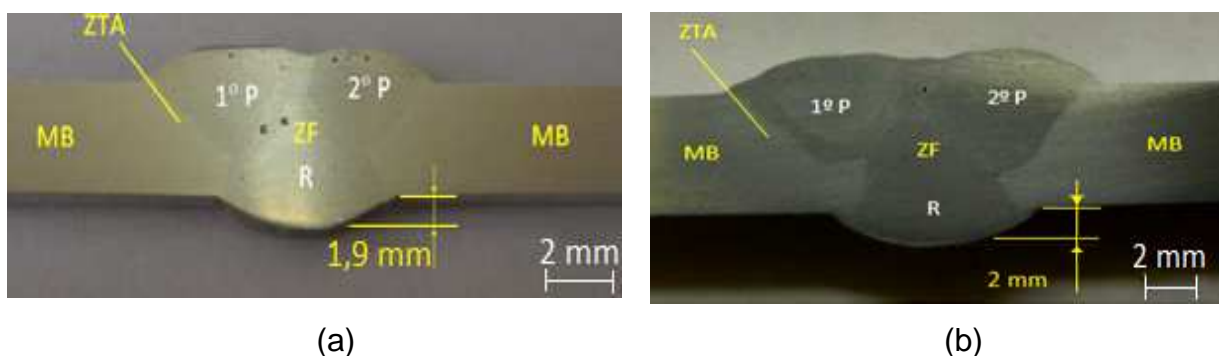


Figura 55 - (a) Macrografia da junta A; (b) Macrografia da junta de solda B.

5.4 Dureza Vickers

A Tabela 18 apresenta os resultados de dureza Vickers da junta B com passe de raiz e dois passes de deposição. A dureza da junta A não foi avaliada devido ao tamanho e quantidade de poros existentes, o que poderia influenciar os resultados de dureza desta junta.

Tabela 18 – Valores de dureza da junta de solda B. Dureza Vickers (HV); Dureza Média (HV m). Carga usada - HV 300 gf. Obs: valores máximos e mínimos apresentados em negrito.

Região	Pontos A (região esquerda)	Dureza (HV)	Pontos B (região direita)	Dureza (HV)	HV médio (Desvio Padrão) (HV)
(MB) (superior)	1	49,0	10	49,5	47,9 ± 0,8
	2	49,4	11	48,4	
	3	48,5	12	47,2	
(MB) (inferior)	1	47,1	10	46,8	
	2	46,6	11	48,7	
	3	47,2	12	47,5	
(ZTA) (superior)	4	45,4	13	47,9	47,3 ± 1,2
	5	48,9	14	47,9	
	6	47,5	15	45,9	
(ZTA) (inferior)	4	49,0	13	45,2	
	5	47,8	14	47,0	
	6	46,7	15	47,4	
(ZF) (superior)	7	45,8	18	49,5	49,8 ± 1,9
	8	50,1	17	45,9	
	9	50,7	16	50,2	
(ZF) (inferior)	7	47,3	16	51,4	
	8	52,7	17	52,7	
	9	50,8	18	50,7	

Notação: MB - Metal base; ZTA - Zona Termicamente Afetada; ZF - Zona Fundida.

O MB apresentou dureza entre 46,6 e 49,5 HV, com média de valores de 47,9 HV. A liga utilizada como MB na realização deste trabalho é desconhecida, sendo possível que seja a liga de alumínio 5052, cuja dureza é 47 HV (ALCAN, 1993).

A ZTA apresentou dureza entre 45,2 a 49,0 HV, com média de 47,3 HV, evidenciando que o ciclo térmico da soldagem não produziu um aumento de dureza nessa região.

A ZF apresentou dureza entre 45,9 e 52,7 HV com média de 49,8 HV, com ligeiro aumento comparado com o metal de adição ER4043 (47 HV). Acredita-se que essa diferença esteja associada aos poros existentes na região, que influenciou na medição como afirma (Rondon; Neto, 2011).

Se acordo com a Tabela 18 pode-se observar que os valores médios no metal base superior e do metal base inferior estão bem próximos, ou seja possuem propriedades idênticas em relação à dureza do alumínio 5052. Em relação a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona de fusão (ZF) os resultados de dureza apresentaram poucas diferenças, mostrando que a técnica de soldagem com suporte cerâmico de cordierita não comprometeu a dureza da junta soldada.

5.5.5 Microscopia Ótica

As figuras 56, 57 e 58 mostram, respectivamente, as micrografias do passe de raiz, do segundo e do terceiro passe depositado. Todas se referem à junta B. Nestas figuras, o numero 1 indica grãos de solução sólida de alumínio (α) com morfologia dendrítica, rodeado por uma rede (número 2) de constituintes eutéticos Si-Al ($\alpha+\beta$) com o silício (β) na forma de plaquetas. O número 3 indica grãos colunares alongados com crescimento competitivo, similares aos resultados encontrados por Oliveira (2008). O numero 4 indica o poro que foi originado durante a dissolução de gases, principalmente o hidrogênio, durante o processo de soldagem (Mathers, 2002).

Em relação aos grãos vistos na micrografia do passe de raiz, estão dispostos e orientados perpendicularmente às isotermais que crescem com maior facilidade que os demais. De acordo com os grãos, a zona fundida apresenta granulação grosseira e estrutura orientada.

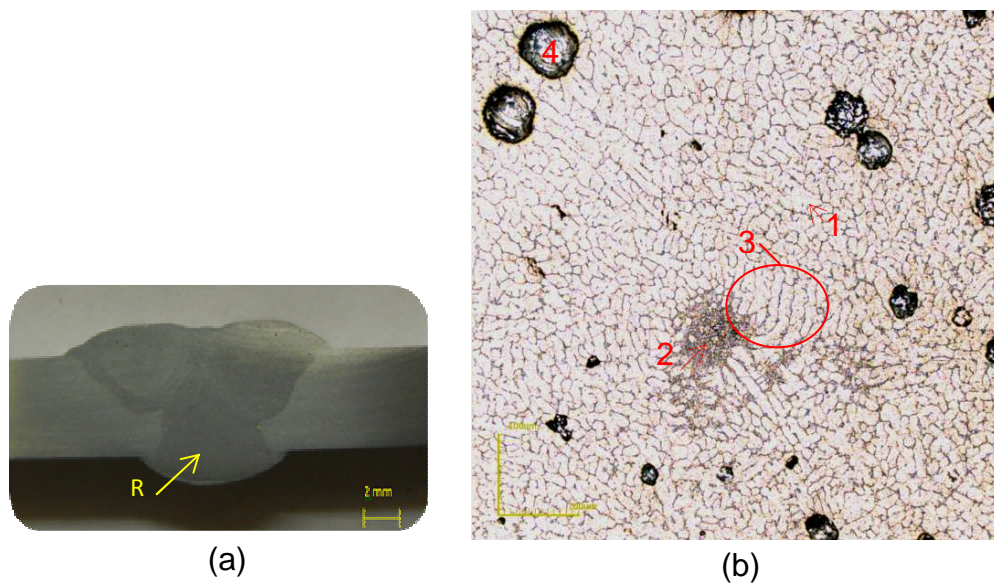


Figura 56 - Micrografia. (a) Passe de raiz; (b) Imagem da microestrutura no passe de raiz. Aumento de 430x no microscópio óptico NEOPHOT-32, de Carl Zeiss, disponível no LAMAV/CCT/UENF.

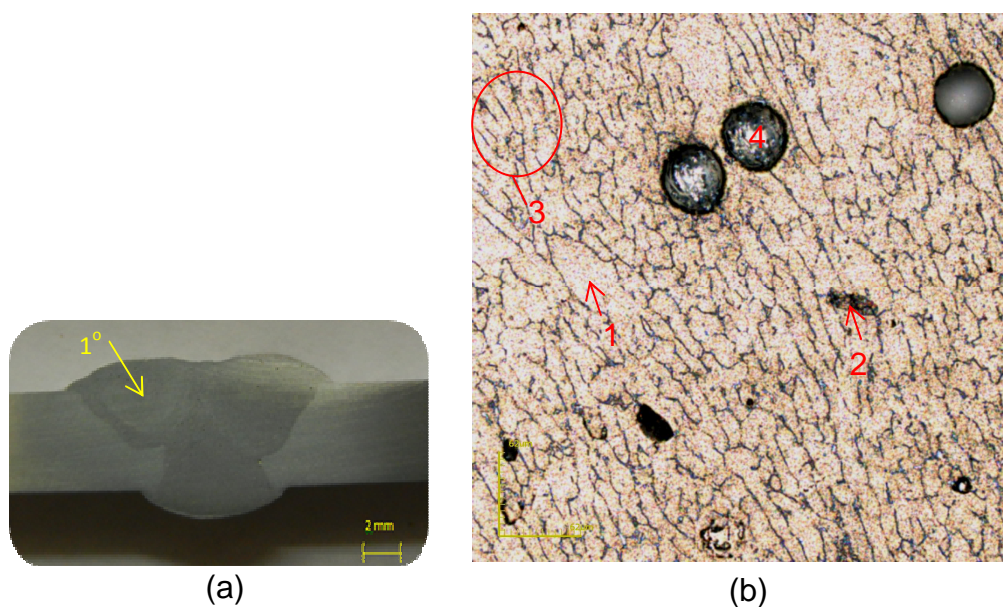


Figura 57- Micrografia. (a) Passe de deposição da ZF; (b) Imagem da microestrutura do 1º passe de deposição. Aumento de 688x no microscópio óptico NEOPHOT-32, de Carl Zeiss, disponível no LAMAV/CCT/UENF.

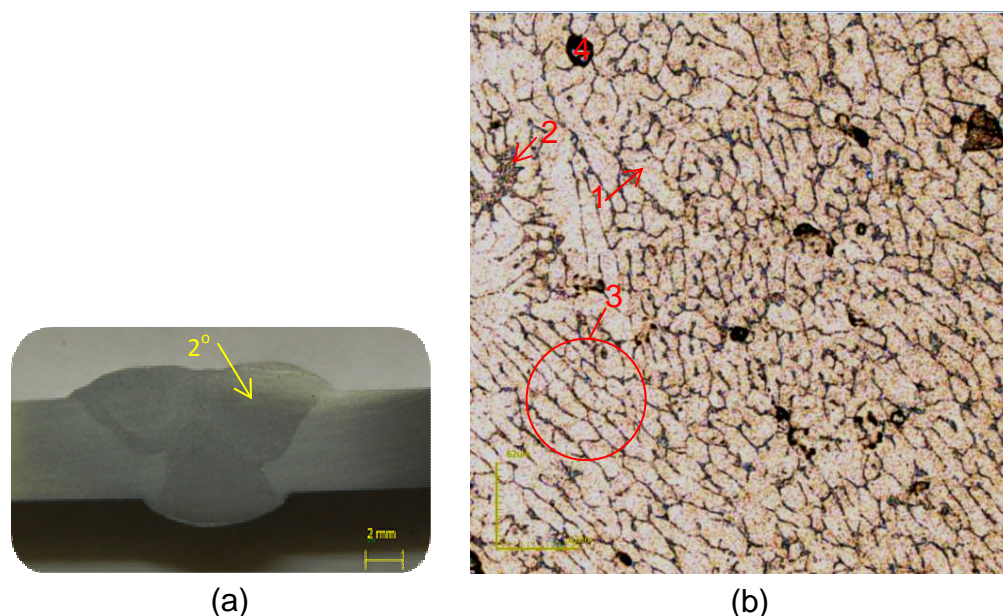


Figura 58 - Micrografia. (a) Passe de deposição da ZF; (b) Imagem da microestrutura do 2º passe de deposição. Aumento de 688x no microscópio óptico NEOPHOT- 32, de Carl Zeiss, disponível no LAMAV/CCT/UENF.

A Figura 59 mostra imagem de MEV sem ataque químico do passe de raiz e análise pontual por EDS. Foi confirmada a predominância do Al na matriz e a presença de Si no contorno de grãos da ZF.

A estrutura analisada indica uma matriz rica em Al (parte cinza) e o Si (parte escura) no contorno dos grãos, como segunda fase nos intertícios dendríticos (Hatch, 1984). A Figura 59 (b e c) mostra os espectros integrais nos contornos de grão, com presença de Al e Si, confirmando que se trata de constituinte eutético Si-Al ($\alpha+\beta$). A presença do silício teve a função de criar substrato para nucleação na matriz com estrutura dendrítica (Kou, 1987). A Figura 59(d) mostra o espectro integral no ponto 3, referente à matriz, onde apenas o Al foi detectado, confirmando ser solução sólida de alumínio (α) com morfologia dendrítica. A presença de Al e Si presente no EDS confirmam os elementos majoritários do arame de solda.

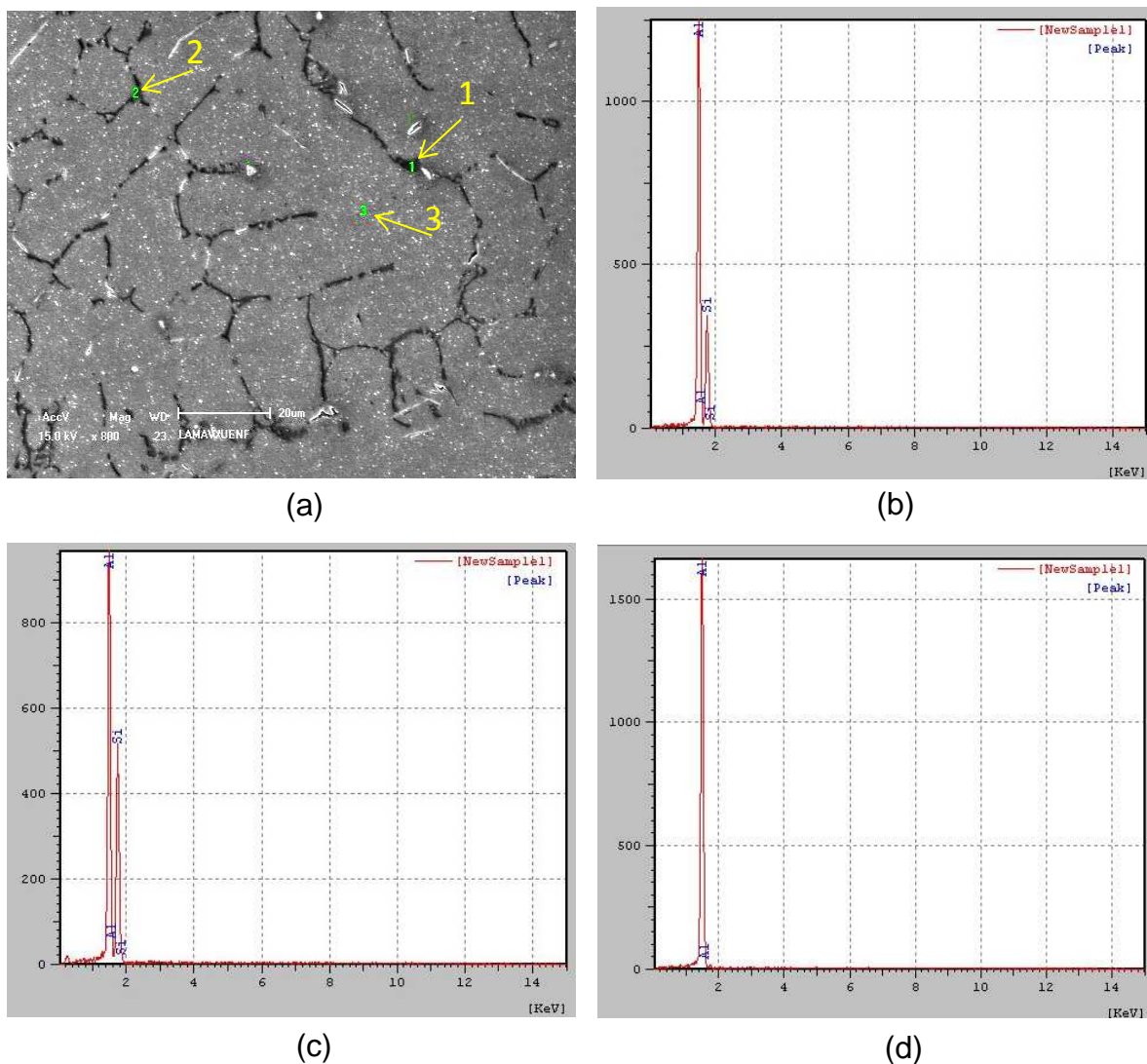


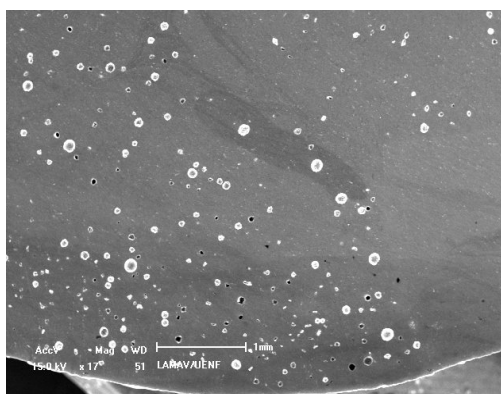
Figura 59 - Imagem de MEV sem ataque químico da ZF e análise pontual por EDS do contorno de grão e da matriz do metal depositado. (a) Microestrutura do passe de raiz de solda; (b) EDS do ponto 1; (c) EDS ponto 2 e (d) EDS do ponto 3.

5.5.6 EDS das inclusões do cordão de solda

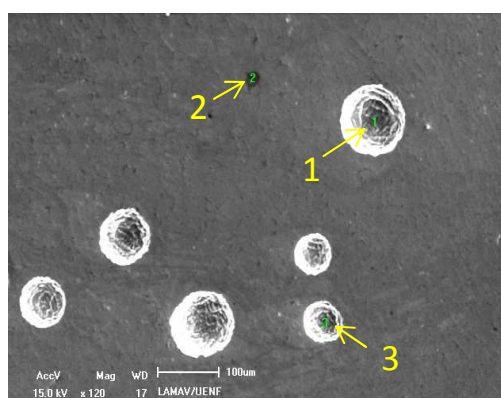
O passe de raiz da amostra retirada da junta de solda B, preparada sem ataque químico, foi analisado por microanálise EDS acoplada ao MEV SSX-550. A figura 60 (a) mostra grande número de inclusões globulares (porosidade) com tamanhos variados que se originaram durante o processo de soldagem do passe de

Resultados e Discussões

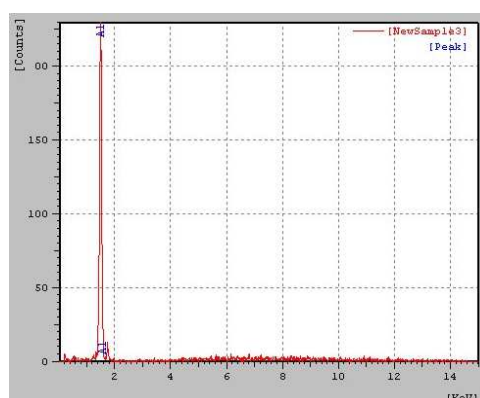
raiz e no metal de solda do 1º e do 2º passe de deposição ao passe de raiz utilizando o suporte cerâmico de cordierita.



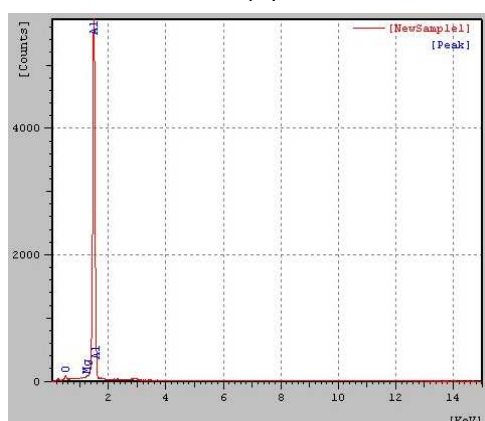
(a)



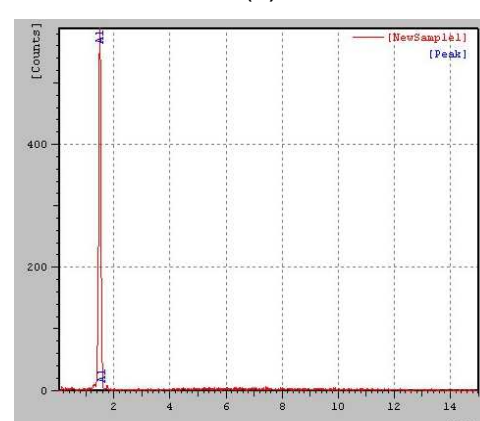
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 60 - Imagens do MEV do passe de raiz de solda e o EDS de inclusões globulares. (a) Imagem da superfície do cordão. Aumento 1500x; (b) EDS da inclusão selecionada do passe de raiz; (c) EDS ponto 1; (d) EDS ponto 2; (e) EDS do ponto 3.

O resultado de EDS mostra que não houve inclusão de material cerâmico e de solda nos passes de raiz, nos pontos observados, indicando que em sua composição, o que predomina é o Al. Embora o espectro de EDS do ponto 2 ter indicado a presença de oxigênio, não se pode concluir que houve contaminação do material cerâmico e de inclusões de solda.

Todos os pontos analisados indicaram a presença de elementos característicos do metal base e metal de solda tais como: alumínio (94,48%), magnésio (1,18%) e oxigênio (4,33%). Os elementos magnésio (Mg) e oxigênio (O) encontrados, não se apresentam com percentuais significativos, o que confirma a ausência de material cerâmico nas inclusões globulares durante a solda do passe de raiz. A presença destes elementos mostrados no espectro do ponto 2, pode estar atribuída à diluição dos elementos químicos do metal de solda e do metal base na poça de fusão, na forma de desoxidantes (Musardo, 2005).

5.6 Considerações finais

Os ensaios mecânicos realizados após a utilização do suporte cerâmico de cordierita no processo de soldagem da liga de alumínio foi importante para conhecer as propriedades mecânicas da junta soldada e definir um possível campo operacional por meio dos parâmetros e variáveis do processo, de forma que se obtivesse cordões de solda adequados, com boa aparência e boa geometria de solda. Os ensaios de dobramento e tração, macrografia e dureza foram relevantes para mostrar os bons resultados da junta de solda, sendo comprovados com a microscopia ótica dos cordões de solda e por microanálise de EDS - Espectrometria por Energia Dispersiva das inclusões do cordão de solda.

As macrografias dos cordões de solda indicaram boa geometria dos passes de raiz como por exemplo, penetração lateral de 4,2 mm até 5,4 mm e largura do cordão de 7,2 até 15 mm, indicando que os parâmetros utilizados, como corrente e tensão, influenciaram de forma positiva na geometria dos cordões de solda. No cordão de raiz da junta de solda B, por exemplo, não se observou a presença de descontinuidades grosseiras como trincas e poros e o reforço de solda (2 mm)

acompanhou o perfil da concavidade do suporte cerâmico mostrando sua eficiência durante a soldagem permitindo um aspecto satisfatório da geometria da solda.

O ensaio de dureza Vickers, com impressões aplicadas em 36 pontos a 1,5 mm da superfície, com penetrador do tipo piramidal, executadas no equipamento MHV SHIMADZU contribuiu para a confirmação do material usado no processo de soldagem. A dureza média do MB (47,9 HV) foi próxima da dureza da Al 5052 (47 HV) (ALCAN, 1993), possuindo assim propriedades idênticas. Em relação a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona de fusão (ZF) os resultados de dureza apresentaram poucas diferenças, com valores de 47,3 HV e 49,8 HV, respectivamente, mostrando que a técnica de soldagem com suporte cerâmico de cordierita não comprometeu a dureza da junta soldada. Comparando a dureza entre a ZF e o metal de adição (ER4043) houve um ligeiro aumento, sendo 49,8 HV e 47HV respectivamente. Este ligeiro aumento pode ter sido influenciado pela presença do silício no contorno de grão, conforme visto na microscopia ótica.

O resultado da análise química por EDS mostrou que não teve inclusão de material cerâmico e de solda no passe de raiz e nos cordões de acabamento sobrepostos nos pontos observados, indicando que, em sua composição, o que predominou foi o Al.

Ressalta-se ainda que, os melhores resultados, observados na junta de solda e conseqüentemente nas propriedades mecânicas, foi também conseqüência das mudanças nos procedimentos de preparação e limpeza das chapas de liga de alumínio, antes da operação de soldagem, sendo executadas com parâmetros de soldagem determinados no interior do campo operacional com o uso do suporte cerâmico de cordierita. Logo, mesmo sabendo da eficiência do suporte cerâmico na soldagem da liga de alumínio, os cuidados com a preparação e limpeza são imprescindíveis antes do processo de soldagem, para ter resultados aceitáveis.

Por fim, a técnica de soldagem unilateral de liga de alumínio com suporte cerâmico de cordierita, utilizando parâmetros de soldagem definidos no interior de um possível campo operacional, é uma opção viável e produtiva para vários segmentos industriais, como já mencionados: indústria alimentícia, indústria de embarcações navais, indústria de veículos automotores e ferroviários.

CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO

As conclusões no desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais na soldagem de ligas de alumínio foram:

1) A fórmula mais promissora para a confecção do suporte cerâmico de cordierita consiste em: 93%p de cordierita, 7%p de silicato de sódio. A força de compactação, após a mistura, foi de 15 toneladas e a temperatura de queima do suporte cerâmico, após a secagem, foi de 1100° C. O suporte cerâmico apresentou-se com bons aspectos superficiais, grãos uniformes e com tamanhos em acordo com a malha usada no peneiramento.

2) O empeno do suporte cerâmico deve ser evitado durante a secagem na estufa após ao processo de compactação na prensa hidráulica. Deve-se apoiar uma chapa de aço sobre o suporte cerâmico apoiado na base interna da estufa de secagem regulada em 120°C até a eliminação total da umidade existente na massa.

3) O campo operacional estimado após os teste de soldagem, para que fossem obtidos cordões de solda no passe de raiz com bom acabamento no cordão de solda e geometria adequada, isento de discontinuidades, boa penetração lateral e reforço de raiz de solda foi baseado nos parâmetros e variáveis do processo, de forma a obter cordões de solda adequados: Abertura de raiz: 2 - 6 mm; Tensão: 17,6 - 27 V; Corrente: 100 - 135 A; Energia de soldagem: 0,65 a 1,46 kJ/mm.

4) Os cuidados relacionados à qualidade da junta soldada foram: a remoção do óxido de alumínio (Al_2O_3) contido na superfície das chapas deve ser realizada com escova com cerdas de aço inox; as superfícies das chapas e do arame de solda devem ser limpos com acetona, produto químico volátil; as chapas e o arame de solda devem ser aquecidos em estufa durante 10 minutos para remoção da umidade contida nas superfícies.

5) Os resultados das propriedades mecânicas comparados com os resultados oficiais da ALCAN, obtidos com ensaios de dobramento, tração e dureza e macrografia das juntas soldadas, mostraram que a técnica de soldagem

Conclusão

de ligas de alumínio, com uso do suporte cerâmico de cordierita, não comprometeu a junta de solda.

6) A estrutura analisada na região de solda indicou uma matriz rica em alumínio (Al - 63,42%) e o silício (Si - 33,57%) no contorno dos grãos, como segunda fase nos intertícios dentríticos.

7) O resultado da análise química por EDS mostrou que não teve inclusão de material cerâmico e de solda no passe de raiz e cordões de acabamento sobrepostos nos pontos observados, indicando que em sua composição, o que predomina, é o Al. Logo, conclui-se que o suporte cerâmico fabricado é opção viável na técnica de soldagem unilateral das ligas de alumínio.

CAPÍTULO VII: SUGESTÕES

A seguir são apresentadas sugestões para trabalhos posteriores:

- Diminuir a granulometria da cordierita com intuito de ter um suporte cerâmico mais compacto, utilizando carga de compactação superior a 15 toneladas a fim de diminuir as porosidades encontradas na estrutura do suporte cerâmico confeccionado.
- Diminuir o comprimento do suporte cerâmico evitando assim, sua fratura durante seu manuseio e possível empeno durante a secagem e queima.
- Adquirir fita adesiva adequada que facilite a fixação do suporte cerâmico na superfície da chapa a ser soldada.
- Utilizar processo de soldagem automatizado.
- Melhorar controle das condições de soldagem.
- Elaborar uma forma de avaliação de todo o processo de confecção do suporte cerâmico, utilizado na soldagem unilateral de junta de alumínio pelo processo de soldagem GMAW (MIG) a fim de comprovar a viabilidade econômica na produção em escala para o seu uso nas áreas industriais.

CAPÍTULO VIII: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira do Alumínio (2004) Fundamentos do Alumínio e suas Aplicações. ABAL, 81p. São Paulo.

Associação Brasileira do Alumínio (2010) dnpm.gov.br. Brasília. Disponível em: [http://www.dnpm.gov.br/ Abre. htm](http://www.dnpm.gov.br/Abre.htm)> Acesso em: 02/04/2013, **ABAL**.

Almeida, L.L.P., Tatagiba (2009) Desenvolvimento de Suporte Cerâmico para Aplicação em Soldas Unilaterais com Elevada Produtividade. "Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 127p.

Aluminum Association, Inc. (1998) Aluminum Alloy Selection and Applications. New York.

ASM Specialty Handbook (1998) Aluminum and Aluminum Alloys. Fourth Edition USA. ASM International. p. 185-192.

American Society For Testing And Materiais (1998) Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds, ASTM E 190.

American Society For Testing And Materiais (1977) Test method for water absorption, bulk density, apparent porosity and apparent specific gravity of fired whiteware products, ASTM C373-72.

American Society for Testing and Materials (2006) Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2000 ABS Rules for Materiais and Welding-Aluminum and Fiber Reinforced Plastic (FRP) **ASTM E 8M**.

American Welding Society, Welding Handbook (2004) Referências bibliográficas: AWS 9a Ed., Miami.

Barra, Sergio Rodrigues, (2003) Aspecto de Metalurgia da Soldagem do alumínio e Suas Ligas. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

Barrand, P.& Gadeau, R Utilización del aluminio y sul aleaciones (1969) Enciclopedia Del Aluminio, Bilbao, vol. 6 Ed. 6ª.

Barrena, M. I.; Salazar, J. M. G. (2003) Dissimilar fusion welding of aa7020/mmc reinforced with al2o3 particles. Microstructure and mechanical properties. Materials Scienceand Engineering: A, v. 352, p. 162–168.

Bhatia, B. (2011). Overview of Refractory Materials.

Bresciani Filho, E., Seleção de metais não ferrosos (1997) Editora da Unicamp, ed. 2ª.

BREAKSPERE, R. J. (1970) High-temperature oxidation of aluminium in various gases. J. Appl. Chem. v.20, p. 208-212, jul.

Butuc M C, Gracio J J, da Rocha A B. An (2006) Experimental and theoretical analysis on the application of stress-based forming limit criterion. International Journal of Mechanical Sciences 48(4): 414-429.

Calister, Willian D. Jr. (2008) Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 705p.

Caldeira, João Paulo Elias (2011) Estudo da resistência à corrosão de ligas de magnésio para a industria automobilística. Dissertação (Mestrado)- ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.89p.

Cantrell, R. E. (1982) "Ceramic weld backing evaluation", Welding Jornal, vol. 61 pp. 27-34, march.

Capilari, T. V.; Mazzaferro, J. A. E. (2009) Process Parameters And Tool Geometry Evaluation In The FSW of AA 5052 Aluminum Alloy. Soldag. Insp. (Impr.) Vol. 14 no. 3 São Paulo July/Sept. pp 215-217.

Catálogo. <www.binzel.abicor.com>(2013) Acessado em: 12 de fevereiro de 2013.

Chicot, D., Mercier, D., Roudet, F., Silva, K., Sraia, M. H., Lesaje J.(2006). Comparison of instrumented Knoop and Vickers hardness measurement on various.

Dantas, M. S.; Costa, S. C. (2004) Uma Contribuição ao Estudo da Influência dos Parâmetros de Pulso na Qualidade da Solda em um Processo MIG/MAG Pulsado através da Técnica DOE, XXIV Enegep. Disponível em www.sciencedirect.com.

DIGGLE, J. W.; DOWNIE, T. C.; GOULDING, C. W. (1969) Anodic oxide films on aluminum. Chem. Rev. v. 63, n. 3, p. 365-405.

Domingues (2011). Soldagem do alumínio. Esab. n.16. p. 41-47.

Domingues, José Roberto (2011) Soldagem de ligas de alumínio para o seguimento naval. Revista Esab. n.16.pp. 41-47.(Zulian et al, 2010).Edição,Campinas. São Paulo.

Eletrodo Revestido. <www.infosolda.com.br>. Acessado em: 05 de junho de 2012.

Epstein, S.G., Aluminum and its Alloys, The Aluminum Ass. Washington, (1980) Metals Handbook, Vol. 1 - Properties and Selection of Metals, ASM, M. Park, 1964 (8ª ed.), pp. 44-51.(Pereira, Jorge Manuel Martins Vieira Silva, Et al, 2010).DNV – Rules for Ships/High Speed, Lighth Craftand naval Surface, January 2005/2009.

Fernades, D. B.; Scotti A. (2009) Procedimento para o Ensaio Laprosolda de Geração de Respingos em Soldagem MIG/MAG 14/2009, versão 9-1, p. 1-12.

- Fortes, C., Araújo, W. (2004a)** Arames Tubulares OK. Brasil: ESAB BR, 101p.
- Fortes, C., Araújo, W. (2004b)** Arco Submerso OK. Brasil: ESAB BR, 104p.
- Fundação ALCOA, (2012).** São Paulo.
- German, R. M. Sintering Theory and Practice (1996) [S.I.]:** Wiley,. 568 p.
- Gomes, M. R.; Filho, E. B. (1987)** Propriedades e usos de metais não ferrosos. ABM, São Paulo.
- Gurgel, R. F. (2013)** Desenvolvimento de Suporte de Solda à Base de Corda de Fibra de Vidro e Fibra Cerâmica para aplicação em Soldas Duplo "V" de Elevada Produtividade. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Campos dos Goytacazes, RJ, 119 p.
- Harben, P., Kuszvart, M. (1996)** Clays: Bentonite and Hectorite. In: Industrial Minerals – A Global Geology, p.128-138, Industrial Minerals Information Ltd., Metal Bulletin PLC, London.
- Hashimoto, T.; Morimoto, T. (2007)** Reduction of Spatter Generation on Gas Shielded Arc Welding from the Viewpoint of Welding Material, Welding International, vol 5, p. 331-336.
- Hatch, J. E. (1984) Aluminum: Properties and Physical Metallurgy.** 2°. ed. [S.I.]: Asm Inter-national, 1984. Disponível em: <<http://www.dalmolim.com.br/Educação/Materias/Biblimat>>. Acessado em 03 de março de 2013.
- International Aluminium Institute (2009a)** Global aluminium recycling: a cornerstone of sustainable development IAI - Disponível em: <http://www.worldaluminium.org/cache/fl0000181.pdf>>. Acesso em 10 de abril de 2013.
- Instituto Brasileiro de Qualidade Nuclear (1987)** Processos de Soldagem. <http://www.ibqn.com.br>>. Acessado em 12 de abril de 2012, IBQN.
- Inducel, (2013)** Industrial Cerâmicos Especiais Ltda. Rod. Genésio Mazon Km 04 – Bairro São Pedro. Urussanga – SC.
- Intertekno. Cerâmicas Elétricas (2006)** Backings Cerâmicos para Soldas. Disponível em: <<http://www.intertekno.com/it031.htm>>. Acessado em 10 de agosto 2012.
- Isnard webdesigner (2005)** Backing Cerâmico. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/termari/produtos>>. Acessado em 12 de agosto de 2012.
- Júnior, A.V.S. (2003)** Sínteses de Cordierita por sol-gel utilizando TEOS ou ácido silícico. A influencia do ácido cítrico na cristalização. Tese (Mestrado em Química) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 72p.

Key, J.F, Arc Physics of Gás (1993) Tungsten Arc Welding. ASM Handbook Welding Brazing and Soldering Vol 6, p.81-92, 1993.

Kingery, W. D. (ed.) Technology and Style. Ceramics and Civilisation (1992) Vol. II. American Ceramic Society. Columbus, OH.

Leite, do Canto Eduardo (1996) Minerais, minérios e metais. 1ª ed. São Paulo, Moderna, 1996. Coleção Polêmica.

Lesnewich, A. (1958) Control of melting rate and metal transfer in gas-shielding metal-arc melting rate, Journal of American Welding Society, p. 343-353.

Malin, V. (2001) "Root Weld Formation in Modified Refractory Flux One--Sided Welding: part 1 - Effect of Welding Variables, Welding Journal, vol. 80 pp. 227s-237s, Setembro.

Manual de Soldagem (1993) ALCAN 1a Edição,São Paulo.

Marques, P. V., Modenesi, P. J, Bracarense, A. Q (2005) Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: UFMG, 363 p.

Marques, P. V., Modenesi, P. J. (2006) Introdução aos Processos de Soldagem. UFMG.Belo Horizonte.

MATHERS, G. (2002) The Welding of Aluminium and its Alloys. [S.l.]: Woodhead Publishing.

Minuzzi, Orlando R.R. et al (2008) Rare earth element and yttrium geochemistry applied to the genetic study of cryolite ore at the Pitinga Mine (Amazon,Brazil). *An. Acad. Bras. Ciênc.* Vol.80, n.4. Acessado 2012-11-13 pp. 719-733.

Morais, F.C.; Ferraresi, V. A. (2001) Influencia de Parâmetros no Grau de Porosidade em soldagem MIG de Alumínio. Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba PR. 9p.

Mondolfo, L.F. Aluminum alloys (2006): structure and proprieties, Boston, Butterwoths, (1976). MARQUES, P.V. Tecnologia de Soldagem. Belo Horizonte.

Monteiro, S.N., Sanchez, R., Vieira, C.M.F. (2004) "Comparison of Roofing Tile Clay Ceramic Bodies From Campos dos Goitacazes, Brazil", *Silicates Industriels*, v.69,n.11-12,PP.103 – 109.

Norton, F.H (1973) Introdução à tecnologia cerâmica, tradução de Jefferson Vieira de Souza. São Paulo: Edgard Blucher, 324p.

Oliveira, N. R. (2008) Transformações Microestruturais nas Ligas de Alumínio Arrefecidas desde o Domínio Semi-sólido. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Aveiro -Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro.

- Oxigen, S. E. (2008)** Manual de Soldagem do Alumínio. Informativo Técnico.
- Paranhos, R. P. R., Souza, A. C (1999)** Soldagem a Arco Submerso. Rio de Janeiro: FIRJAN/SENAI, 87 p.
- QUITES A.M.; DUTRA, J. (1983)** O Pré-aquecimento e os Domínios de Soldabilidade dos Aços.
- Revista Thema (2010)** Vol.07(01), p.01.
- Rondon, V.; Neto, C. M. (2011)** Correlação entre Microestrutura e Propriedades Mecânicas, Estáticas e Dinâmicas, da Liga Fundida Al-Si-Mg-E357 Envelhecida. p.115-125.
- Santos, R.S. (1997)** Materiais Cimentosos Isentos de Macro Defeitos Utilizando Álcool Polivinílico (PVA) e Silicato de Sódio: Influencia da Massa Molar Média e do Grau de Hidrólise do Polímero. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP.
- Santos, Túlio (2000)** Estudo Sobre a Abertura e Estabilidade do MIG na Soldagem do Alumínio. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.
- Silva, J. (2011)** Mecanismo de Ação do Silicato de Sódio como Depressor em Flotação. Dissertação - Universidade Federal de Pernambuco.
- Silva, N.T. (2003)** Síntese, caracterização e cinética de cristalização de pós precursores de cordierita por sol-gel coloidal sob ação de ácido cítrico. Tese (Doutorado) – Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 169p.
- Souza, D.; Rossi, M. L.; Keocheguerians, F.; Nascimento, V. C.; Vilarinho, L.O.; Scotti, A. (2009)** Influência dos Parâmetros de Soldagem na Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito, XXXV Consolda, Congresso Nacional de Soldagem.
- Suban, M.; Tušek, J. (2001)** Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 119, p.
- Tardei, G., Gavrilu, G., E Hagiopol, M. (2004)** “Ceramic backing materials used in one-side welding methods”, *Key Engineering Materials* vols. 264-268 pp. 671-674.
- Terai, K.; Arikawa, M. (1969)** Recent Developments in One-side Automatic Welding. [S.l.]:
- Termari (2012)** Disponível em: <www.termari.com.br>. Acesso em: 25 de julho de 2012.
- THOMAS, S.; SHERWOOD, M. A. (1992)** Valence band spectra of aluminum oxides, hydroxides, and oxyhydroxides interpreted. *Anal. Chemistry*. v.64, p.2488-2495.

Tomazetti, R.R. (2003) Análise da produção de cerâmica vermelha da região central do estado do Rio de Grande do Sul. Tese (Mestrado) – Santa Maria –RS, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 207p.

Torre, J. (2004) Manual prático de fundição: e elementos de prevenção da corrosão. São Paulo: Hemus, 243p.

Trivellato, Andrade Silvio (2007) Mapeamento do processo mecanizado de soldagem unilateral FCAW com backing cerâmico aplicável no passe de raiz em aço carbono. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, Minas Gerais.

UHLIG, H.H.(1948) The Corrosion Handbook. 1ed. New York:John Wiley. p. 618.

Van Vlack, L.H. (1973) Propriedade dos materiais cerâmicos.10° ed. Rio de Janeiro, ed. Universidade de São Paulo.

Van Vlack, L.H. (1984) Princípios de Ciência e tecnologia dos materiais. 10° ed. Rio de Janeiro, ed. Campus, 1984.

Wainer, E.; Brandi, Sérgio D.; Mello, Fábio D. H. Soldagem (1992) Processos e metalurgia, Edgard Blücher Ltda, São Paulo.