

DESENVOLVIMENTO DE FORMULAÇÕES DE SUPORTE CERÂMICO PARA SOLDAGEM UNILATERAL DE LIGAS DE ALUMÍNIO*

Rogério Vicentini¹

Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos²

Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um suporte cerâmico apropriado para a soldagem unilateral de liga de alumínio, utilizando a cordierita, uma vítrea cerâmica constituída de óxidos. Trata-se de uma proposta tecnológica que viabiliza a produtividade da operação de soldagem, mantendo-se inalterada a qualidade da junta soldada ampliando os conhecimentos relacionados aos suportes cerâmicos focando a redução dos custos de fabricação. A soldagem unilateral com este tipo de suporte de solda foi executada em chapas de alumínio com arame de solda de alumínio 4043 pelo processo Gas Metal Arc Welding (GMAW). A eficiência do suporte cerâmico em suportar o metal de solda líquido foi verificada durante a soldagem do passe de raiz. Várias soldas foram executadas em chapas com espessura de 6,35mm para testar a eficiência do suporte. Parâmetros e variáveis do processo foram estudadas: a abertura de raiz, a tensão, a corrente e a energia de soldagem. Os resultados mostraram que o suporte foi eficiente para suportar a poça de solda líquida. Foi possível estimar uma faixa de operação do processo, com abertura de raiz de 2,0 a 6,0 mm e a energia de soldagem calculada ficou entre 0,62 e 1,46 kJ/mm. A soldagem foi realizada com mecanismo para facilitar a saída do arame de alumínio (tocha Push-Pull) sendo soldado puxando, da esquerda para direita, com pequena oscilação lateral em relação ao cordão de solda. As macrografias das juntas soldadas, além de revelar boa penetração lateral (entre 2 a 4,5mm) e reforço de solda com até 2,1mm de altura, pôde revelar ausência de descontinuidades como: trincas, falta de fusão, inclusão de escórias e porosidades.

Palavra-chave: Suporte cerâmico; Soldas unilaterais de ligas de alumínio; Parâmetros de soldagem; Campo operacional.

DEVELOPMENT OF FORMULATIONS OF CERAMIC BACKING FOR ONE-SIDED WELDING OF ALUMINUM ALLOYS

Abstract

The objective of this work was to develop an appropriate ceramic support for unilateral welding aluminum alloy using cordierite, a ceramic victory consists of oxides. This is a technological proposal that enables the productivity of welding operation, keeping unchanged the quality of the welded joint using knowledge related to ceramic brackets focusing on the reduction of manufacturing costs. Unilateral welding with this type of support welding was performed on aluminum sheets with aluminum welding wire by the process Gas Metal Arc Welding (GMAW). The efficiency of the ceramic support in supporting the liquid weld metal was observed during welding of the root pass. Various solders were performed in plates with a thickness of 6.35 mm to test the efficiency of the bracket. Parameters and process variables were studied: the root opening, voltage, current and power welding. The results showed that it was efficient support for supporting the liquid puddle weld. It was possible to estimate a range of process operation with root opening 2.0 to 6.0 mm, the welding energy was calculated between 0.62 and 1.46 kJ / mm. The welding was performed with a mechanism to facilitate the output of the aluminum wire (torch Push-Pull) being welded drawing, from left to right, with a small lateral shift with respect to the weld bead. The macrografias of welded joints, besides showing good lateral penetration (between 2 to 4.5 mm) and reinforcement welding with up to 2.1 mm high, can reveal the absence of discontinuities such as cracks, lack of fusion, slag inclusion and porosities.

Keywords: Ceramic materials; Welding of aluminum alloys unilateral; Welding parameters; Operational field.

¹ LAMAV, CCT, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

² INFOSOLDA, São Paulo, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio, depois do aço, é o metal mais produzido no mundo, devido a uma série de propriedades, entre outras, a maleabilidade, a ductilidade, a soldabilidade, a condutividade térmica e elétrica, a resistência à tração e resistência à corrosão [1]. Ainda, possui baixa densidade relativa, facilidade de trabalho a frio e pode ser facilmente reciclado [2]. O alumínio possui muitas aplicações nos segmentos industriais de transporte, como embarcações marítimas, veículos terrestres e aviões, além da indústria de alimentos e de produtos químicos. Devido a sua capacidade de reagir quimicamente com outros elementos, é capaz de formar ligas com elevada resistência mecânica [3]. O grande uso do Al nas indústrias de peças e estruturas metálicas requer a necessidade do uso de técnicas de soldagem que resultem na produtividade.

Uma técnica conhecida refere-se à soldagem unilateral, cujos cordões de solda são depositados somente por um lado da peça, podendo ser aplicada com a ajuda de um suporte cerâmico na junta de solda [4]. Esta técnica é considerada uma solução para o aumento da produtividade na soldagem [4,5], evitando que a peça seja virada para a soldagem do lado oposto e remoção por goivagem, reduzindo o tempo de soldagem. Na soldagem unilateral com suporte cerâmico obtém-se um adequado acabamento do passe de raiz, isento de descontinuidades e, conseqüentemente, com ganhos de produtividade [6] quando comparada à soldagem pelos dois lados da peça.

O suporte cerâmico é de fácil e rápida aplicação, sendo normalmente fixado na superfície inferior da peça a ser soldada por meio de uma fita adesiva de alumínio. Seu uso é mais comum na soldagem de peças e equipamentos em aço, mas pode também ser aplicado na soldagem do alumínio e suas ligas. Devido às diferenças na temperatura de fusão e outras propriedades entre o aço e alumínio, o suporte cerâmico disponível no mercado para a soldagem do aço não é adequado para a soldagem do alumínio. Este requer composição e características próprias para suportar o alumínio líquido durante a soldagem do passe de raiz.

O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver formulações de suporte cerâmico usando a cordierita e aditivos como matérias-primas, adequadas à deposição do passe de raiz na soldagem unilateral de ligas de alumínio pelo processo GMAW. Para tanto, a eficiência do suporte cerâmico durante a soldagem do passe de raiz foi avaliada, assim como as características do cordão de solda produzido, como acabamento e formato do cordão e possíveis descontinuidades. Por fim, com os resultados obtidos, será delineado um possível campo operacional do processo, indicando a faixa de parâmetros de soldagem adequados para a deposição do passe de raiz na soldagem unilateral do alumínio usando o suporte cerâmico desenvolvido.

2 . MATERIAIS E MÉTODOS

Duas classes de matérias-primas foram identificadas para a confecção dos suportes cerâmicos: óxidos refratários e aditivos que auxiliam a aglomeração da massa cerâmica. Como refratário foi usado a cordierita, uma vítrea cerâmica com razão estequiométrica de $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$, fórmula química $Al_3(Mg,Fe)_2 Si_5AlO_{18}$ e

composição típica de 13,78% MgO, 34,86% Al₂O₃, 51,36% SiO₂. A escolha da cordierita como principal matéria-prima para a confecção do suporte de solda foi feita em função de suas características: baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta resistência à corrosão e abrasão, capacidade de suportar altas temperaturas sem se deformar, resistente a decomposição, não-reativa e um eficiente isolante térmico [7]. O aditivo utilizado foi o silicato de sódio neutro (30% SiO₂; 9,0% Na₂O e 61% H₂O) com densidade de 1,40 g/l, viscosidade de 530cP e 41,90% Be à temperatura de 25°C, que teve a função de facilitar a aglomeração e fornecer resistência ao suporte cerâmico após sua queima. Água foi utilizada para umedecer a massa cerâmica e facilitar a aglomeração durante a compactação. Estas duas matérias-primas já tinham sido usadas em outros trabalhos para a confecção de suporte de solda [8].

Na primeira etapa do trabalho, quatro formulações foram propostas para a confecção do suporte cerâmico, mostradas na tabela 1. A preparação do suporte de solda foi realizada de acordo com a seguinte sequência de produção em escala de laboratório:

- peneiramento da cordierita, utilizando a parte passante numa peneira 40 mesh;
- pesagem: cada matéria prima foi pesada separadamente, com balança de duas casas decimais. O peso médio de cada suporte foi de 50,9 g. Foi projetado para se obter um suporte com cerca de 8 mm de espessura.
- mistura úmida da massa cerâmica com a adição do silicato de sódio e água;
- molde e moldura: feitos em aço, o molde permite obter peças com medidas de 115 x 25 mm. O molde permite obter uma concavidade na região central do suporte, com raio de 9,08 mm e profundidade de 1,5 mm. Esta concavidade tem a função de adequar o formato do cordão de solda quando no estado líquido na parte inferior da chapa. A figura 1 mostra a seção transversal do suporte cerâmico. Mais detalhes sobre o molde pode ser visto em [11];
- compactação: realizada em uma prensa manual com força de 15 t. Após atingir a carga, permaneceu por 2 min sob esta carga;
- secagem em estufa com temperatura de 120°C por período de 24 h, com objetivo de remover a humidade;
- sinterização em forno marca Servitech modelo CT 320. O ciclo de aquecimento foi de 3° C/min, até o patamar de 1100°C com permanência de 3 h nesta temperatura. O ciclo de resfriamento foi de 4°C/min até a temperatura ambiente.

Tabela 1. Formulações (porcentagem peso) dos suportes cerâmicos produzidos em laboratório.

Formulação	Cordierita (%)	Silicato de Sódio (%)	Água (%)
F 1	97	3	3
F 2	95	5	3
F 3	93	7	3
F 4	91	9	3

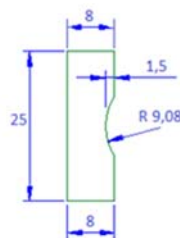


Figura 1. Dimensões da seção transversal do suporte cerâmico produzido.

Os suportes cerâmicos foram avaliados na soldagem do passe de raiz em soldas unilaterais utilizando chapas de alumínio com dureza de 47,9 HV, similares à liga 5052, cuja dureza é 47 HV [9]. As chapas de teste, com dimensões 130 x 50 x 6,4 mm foram preparadas com chanfro em V, ângulo de 60°, face de raiz de 2 mm e abertura de raiz de 4 mm, como mostra a figura 2. Apêndices foram inseridos no início e final da chapa, de forma a iniciar e terminar a soldagem fora da chapa de teste, além de permitir manter constante a abertura de raiz. A figura 2 mostra também como o suporte cerâmico foi posicionado na junta, como também o dispositivo de fixação (grampos tipo “C”) utilizado. As superfícies a serem soldadas foram escovadas e limpas com acetona momentos antes da soldagem. A soldagem foi executada na posição plana, com ângulo de inclinação da tocha de 5° em relação a vertical, isto é, puxando. Ainda, foi usado um pequeno tecimento da tocha. O processo de soldagem foi o GMAW, com arame ER4043 diâmetro 1,0 mm. A tocha de soldagem foi do tipo push-pull, para facilitar a alimentação do arame. O gás de proteção foi o Argônio puro com vazão de 18 l/min. Os seguintes parâmetros de soldagem foram usados: corrente: 125 A, tensão: 17 V, velocidade de soldagem 2,1 mm/s. Apenas o passe de raiz foi depositado. Após a soldagem, os corpos de prova foram avaliados por inspeção visual, tanto no lado inferior da raiz de solda, que teve contato com o suporte cerâmico, como na face superior do cordão de solda, com o objetivo de verificar o acabamento e formato do cordão, bem como a presença de descontinuidades. Macrografias foram preparadas, retirando-se uma seção transversal no centro do corpo de prova soldado, que foi embutida, preparada com lixas 220, 400 e 600 mesh e atacada com ácido fluorídrico. O objetivo da macrografia foi verificar a geometria do cordão de solda (reforço e largura do passe de raiz em contato com o suporte cerâmico), além de verificar a presença de descontinuidades internas. No final desta etapa, foi escolhida uma entre as 4 formulações do suporte de solda testadas, que proporcionou características adequadas à deposição do passe de raiz [10].

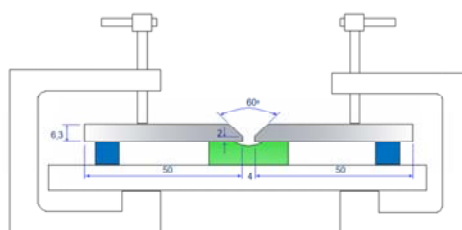


Figura 2. Desenho esquemático da montagem da chapa de teste para soldagem. Dimensões do chanfro, posição do suporte cerâmico, dispositivo de fixação por meio de grampos tipo “C”.

Para a segunda etapa, novos suportes cerâmicos foram confeccionados com a formulação escolhida na primeira etapa. Foi utilizado o mesmo procedimento descrito acima. O objetivo desta etapa foi avaliar a faixa dos parâmetros de soldagem adequados à soldagem do passe de raiz com uso do suporte cerâmico. Foram avaliados a corrente, a tensão, a velocidade de soldagem e a abertura da raiz. Tentou-se ainda delinear um possível campo operacional do processo. A preparação dos corpos de prova para soldagem foi idêntica à descrita para a primeira etapa.

A Tabela 2 mostra a matriz com oito experimentos realizados para a soldagem do passe de raiz, onde a abertura da raiz variou de 0 a 6 mm, a corrente de 80 a 135 A, a tensão de 14 a 27 V e a velocidade de soldagem de 1,8 a 2,5 mm/s. A energia de soldagem foi calculada como indicado, e variou de 0,62 a 1,46 kJ/mm. Similar à primeira etapa, foi usado o processo GMAW, tocha push-pull com arame ER 4043 de Ø 1,0mm, gás de proteção argônio com vazão de 18 l/min, soldagem na posição plana, ângulo de inclinação da tocha de 5º puxando e tecimento da tocha.

Tabela 2. Matriz de experimentos. A energia de soldagem foi calculada como $ER = (V \times I)/v$, onde ER : energia de soldagem; V : tensão; I (corrente); v : velocidade de soldagem

Corpo de Prov	Abertura de Raiz (mm)	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Energia de Soldagem (kJ/mm)
S1	0	14	80	1,8	0,62
S2	2	15	83	1,9	0,65
S3	2	18	100	2,0	0,88
S4	4	19	113	2,2	0,95
S5	5	22	121	2,2	1,21
S6	6	25	123	2,3	1,34
S7	6	25	129	2,3	1,40
S8	6	27	135	2,5	1,46

Após a soldagem, as seguintes avaliações foram realizadas:

Inspeção visual e por líquido penetrante no lado inferior da raiz de solda, que esteve em contato com o suporte cerâmico, com objetivo de verificar o acabamento do cordão e a presença de descontinuidades. Foram desconsiderados o início e o final da solda (25 mm de cada lado). Macrografias foram preparadas, com mesmo procedimento descrito na etapa 1 acima. Foi avaliada a geometria do cordão de solda e medido, com auxílio de paquímetro, o reforço e a largura do passe de raiz em contato com o suporte cerâmico, além de verificar a presença de descontinuidades internas. Com os resultados obtidos nesta etapa, foi elaborado um gráfico plotando a energia de soldagem versus a abertura de raiz das juntas soldadas. Neste gráfico foi delineado um possível campo operacional do processo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

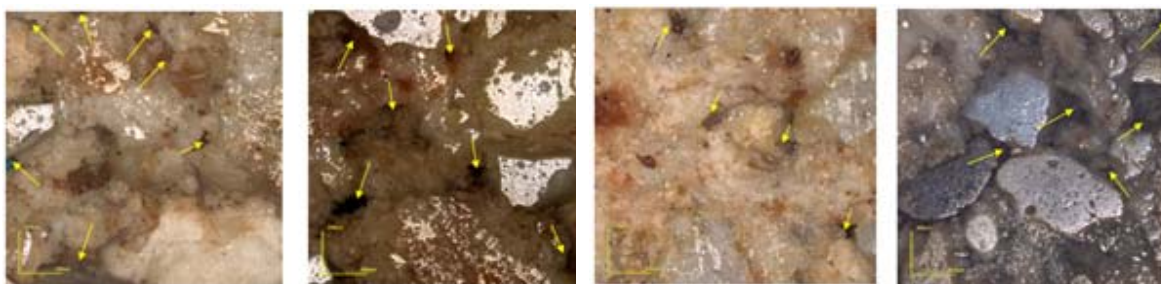
A primeira etapa do trabalho teve por objetivo avaliar o processo de fabricação do suporte cerâmico em laboratório, bem como o comportamento durante a soldagem do passe de raiz das formulações propostas, que usaram matérias-primas previamente identificadas como de uso potencial.

O processo de fabricação em laboratório do suporte cerâmico aqui adotado é similar ao proposto por Almeida [6], que coincide com o processo convencional de fabricação cerâmica. Este mostrou ser efetivo e adequado, como mostrado na figura 3. O aspecto superficial é compacto e rugoso, sendo atribuído à granulometria da cordierita (passante malha 40 mesh). A concavidade apresentou-se inalterada após o processo de secagem e queima. Não foi observada fragilidade ou esfarelamento dos suportes cerâmicos, atribuído à carga de 15 ton usada na compactação e à sinterização realizada em alta temperatura, a 1100 °C. As dimensões médias dos suportes foram de 114,5 x 25,4 x 9,8 mm. O comprimento e largura foram muito próximos às dimensões do molda utilizado. Já a espessura, ficou próxima dos 8 mm previstos, e deve-se à quantidade de matéria-prima usada para produzir os suportes.



Figura 3. Aspecto do suporte cerâmico produzido em laboratório.

A figura 4 mostra, no microscópio confocal e aumento de 108X, as superfícies dos suportes cerâmicos das 4 formulações. Todos apresentaram uma textura rugosa. De uma forma geral, pode ser observado o efeito do aditivo aglomerante, com a vitrificação do silicato de sódio que ocorreu durante a sinterização. As setas indicam pequenos poros entre os grãos de cordierita. A tensão de compressão foi de cerca de 0,6 ton/cm². A tensão de compressão utilizada, juntamente com a temperatura de queima de 1100 °C contribuíram para que fosse obtida uma pequena fração de porosidade dos suportes cerâmicos produzidos. Entretanto, observa-se na figura 3 que a formulação F3, que usou 7% de silicato de sódio, foi obtida menor quantidade de poros. Todas as formulações foram consideradas aptas a serem avaliadas na soldagem do passe de raiz.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4. Superfície do suporte cerâmico observada no microscópio confocal. Aumento: 108x. (a) Formulação F1; (b) Formulação F2; (c) Formulação F3; (d) Formulação F4. As setas indicam os poros.

As figuras, a seguir, mostram o suporte cerâmico após soldagem, o aspecto da face do passe de raiz em contato com o suporte de solda e as macrografias das juntas soldadas para as 4 formulações testadas. De uma forma geral, os suportes

cerâmicos suportaram a temperatura elevada do metal de solda líquido durante a soldagem.

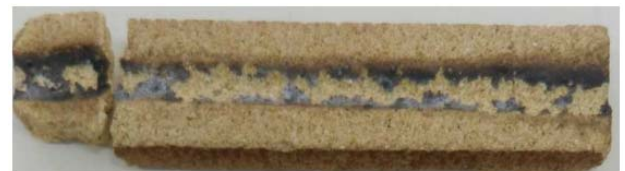
Em relação ao aspecto do suporte de solda após a soldagem, figura 5 a, b, c e d, observa-se que o suporte cerâmico das formulações F1, F2 e F3 quebrou-se na direção transversal, que foi atribuído ao manuseio durante a retirada do suporte após soldagem. Ainda, foi observada a remoção de fragmentos da superfície dos suportes, que ficaram ligeiramente aderidos ao cordão de solda, mas que foram facilmente removidos na limpeza do passe de raiz após soldagem. Exceção à formulação F3, figura 5 c, onde praticamente não houve remoção de fragmentos do suporte e adesão deste no cordão de solda. A adesão de fragmentos do suporte no cordão de solda foi atribuída à diferença de temperatura de fusão do material do suporte e da liga de alumínio.

Em relação à inspeção visual da face dos cordões de solda em contato com o suporte de solda, figura 6 a, b, c e d, foram observadas algumas pequenas depressões e a adesão de material cerâmico na superfície dos cordões, que não foram consideradas como defeitos. A formulação F3 não apresentou adesão e com menor quantidade de depressões. Algumas soldas apresentaram problemas nas extremidades do cordão, como falta de fusão nas formulações F2 e F4 e espalhamento excessivo na formulação F1. Porém, a inspeção visual não considerou os 25 mm no início e no final da solda. Não foram observadas mordeduras e trincas nos cordões de solda. O cordão de solda da formulação F3 foi considerado o que apresentou melhor resultado.

Em relação às macrografias da seção transversal ao cordão de solda, figura 7 a, b, c e d, observa-se que todas apresentaram um formato adequado. Alguns poros foram observados em todas as macrografias, com menor intensidade nas formulações F3 e F2, atribuído a limpeza das chapas, porém considerado comum na soldagem do alumínio. O reforço da superfície do cordão em contato com o suporte de solda variou de 2,0 a 2,4 mm, ligeiramente superior à profundidade de 1,5 mm da concavidade na região central do suporte, mostrando que houve um bom contato entre o suporte de solda e as chapas de alumínio. A largura do cordão variou de 10,8 a 12,0 mm, ligeiramente superior ao raio de 9,08 mm da concavidade na região central do suporte. Foi observada uma boa penetração nas laterais do chanfro para todas as formulações, estimada entre 3,4 e 4,6 mm, mostrando que a energia de soldagem e a abertura da raiz foram bem dimensionadas para este tipo de soldagem.



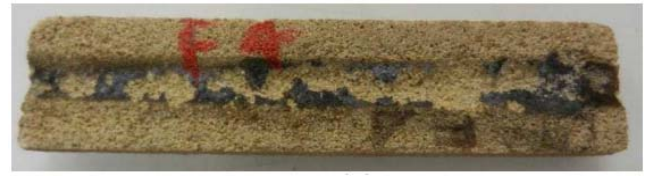
a



b

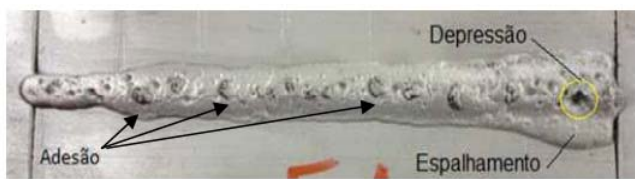


c

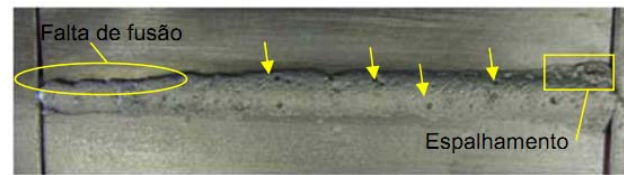


d

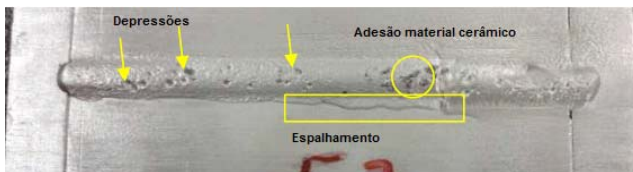
Figura 5. Aspecto do suporte de solda. (a) Suporte cerâmico desenvolvido com a Formulação F1; (b) Com Formulação F2; (c) Com a Formulação F3; (d) Com a Formulação F4.



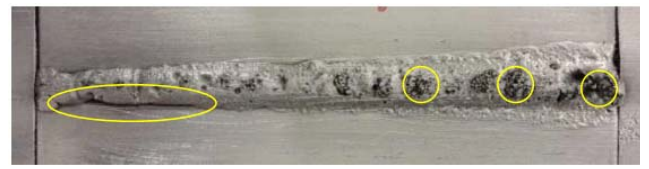
a



b

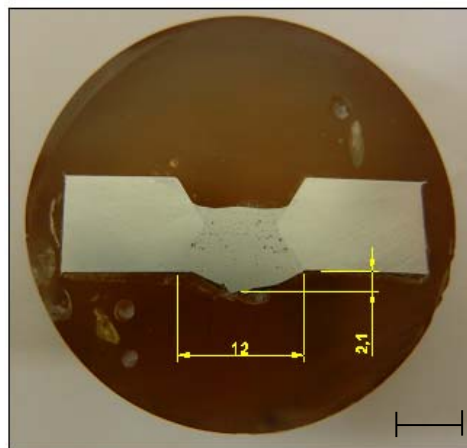


c

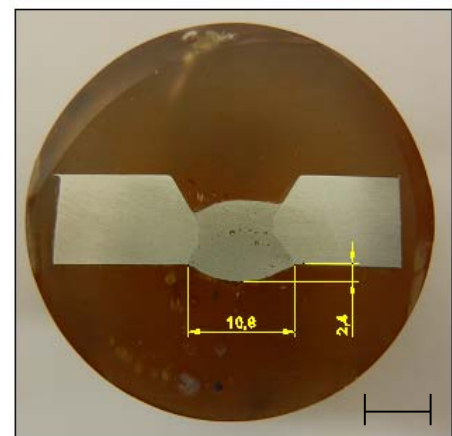


d

Figura 6. Aspecto da face dos cordões de solda. (a) Cordão de solda realizado com o suporte cerâmico d formulação F1; (b) Cordão de solda realizado com o suporte cerâmico de formulação F2; (c) Cordão de sold realizado com o suporte cerâmico de formulação F3; (d) Cordão de solda realizado com o suporte cerâmico d formulação F4.



a



b

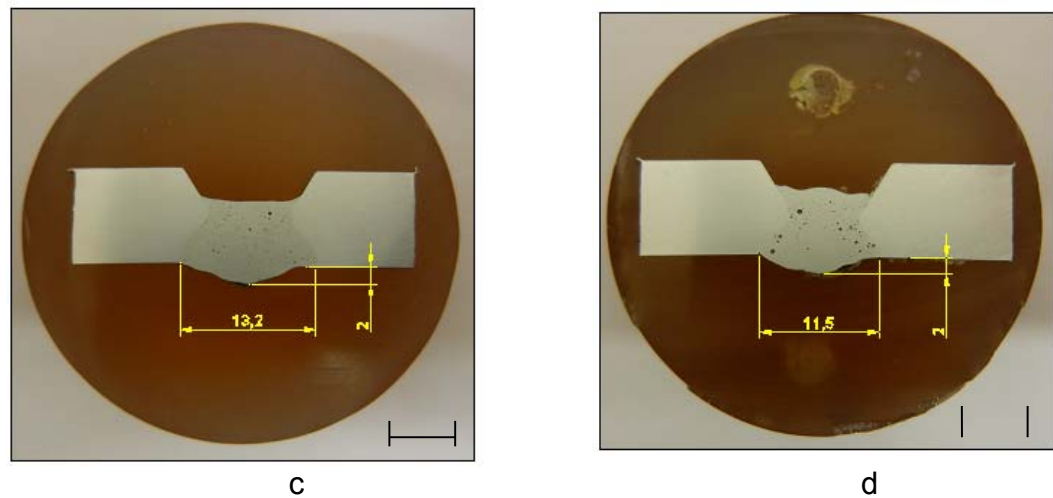


Figura 7. Macrografias da seção transversal ao cordão de solda. (a) Macrografia do cordão de solda, figura 6a; (b) Macrografia do cordão de solda, figura 6b; (c) Macrografia do cordão de solda, figura 6c. (d) Macrografia do cordão de solda, figura 6d.

Os resultados obtidos a partir dos testes mostram um potencial uso das formulações e do processo de produção em laboratório do suporte de solda, a base de cordierita, para a soldagem do passe de raiz em ligas de alumínio. O suporte cerâmico com formulação F3, com 93% de cordierita, 7% de silicato de sódio neutro e adição de 3% de água foi considerado o que obteve melhores resultados, sendo a formulação escolhida para ser usada na segunda etapa do trabalho.

3.1 Avaliação dos Parâmetros de Soldagem

Na segunda etapa do trabalho, o suporte com formulações F3 foi usado nos testes de soldagem variando os parâmetros de soldagem:

- Abertura de raiz: 2 a 6 mm;
- Tensão: 17,6 a 27 V;
- Corrente: 80 a 135 A
- Energia de soldagem: 0,62 a 1,46 kJ/mm.
- Velocidade de soldagem: 1,8 e 2,5 mm/s.

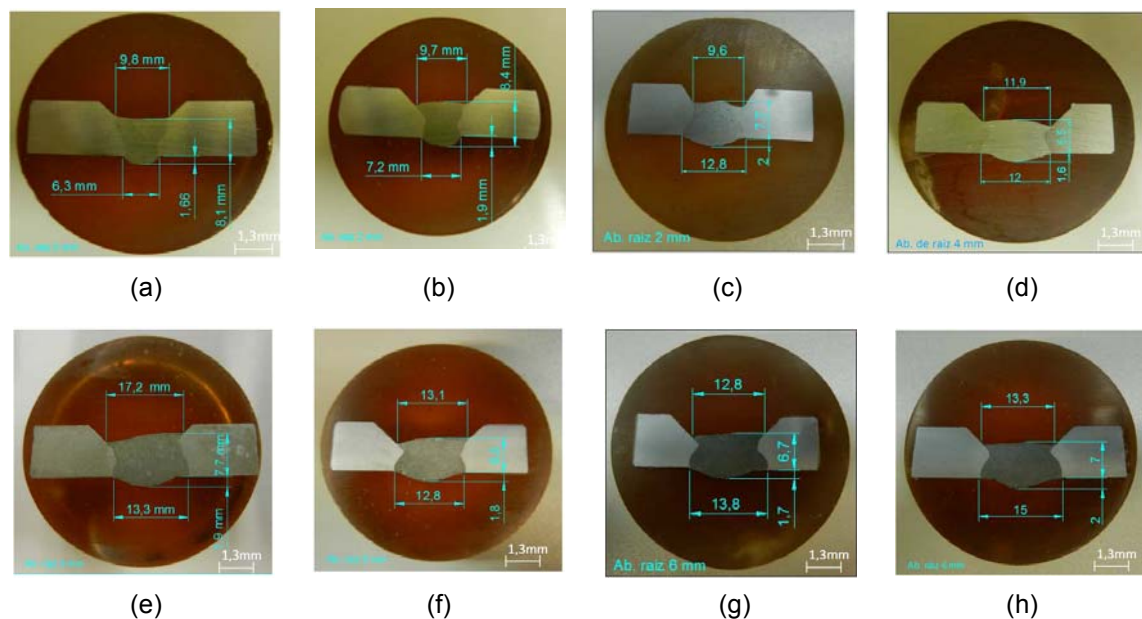
Foram soldadas 8 juntas de topo e observados os efeitos da mudança dos parâmetros de soldagem. Após a execução das soldas, foram feitas observações por meio de inspeção visual (IV), líquido penetrante (LP) e macrografia como mostrada na Figura 8. Com os resultados obtidos, foi definido o possível campo operacional do processo. Esta etapa foi realizada com passe de raiz com soldas unilaterais em ligas de alumínio no processo de soldagem GMAW. Durante a soldagem foi usado as correntes nas juntas variando entre 80 e 135 A, com tensão de 14 e 27 V e velocidade de soldagem entre 1,8 e 2,5 mm/s. A energia de soldagem variou entre 0,62 e 1,46 kJ/mm conforme visto na matriz de experimento na Tabela 3.

Tabela 3. 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

**Figura 8** - Macrografias e aspecto da raiz da solda na macrografia das oito juntas de solda.

As macrografias das oito juntas soldadas revelaram uma seção transversal com aspectos satisfatórios do passe de raiz, com adequada geometria do cordão. Foram observados pequenos poros atribuídos à formação de gases durante o processo de soldagem. Todas as macrografias das juntas soldadas foram analisadas após a inspeção visual e líquido penetrante (LP) dos cordões de solda, nos quais não se observou descontinuidades, tendo ocorrido contato da superfície da raiz da solda com a superfície do suporte cerâmico. No trabalho de Tatagiba (2009) e Gurgel (2010) também se observou a soldagem unilateral do aço com suporte cerâmico no qual foi constatado o contato da superfície da raiz da solda com

a superfície do suporte cerâmico o que possibilitou uma boa análise na macrografia após a soldagem.

As larguras dos cordões de solda vistos nas macrografias da Figura 8 (d,e,f,g e h), aumentaram proporcionalmente com o aumento da abertura de raiz. De fato, o afastamento das chapas, nas juntas, produziu um cordão com maior largura durante a deposição do metal de solda. Outra observação feita foi que quando se aumentou a energia de soldagem observou-se um aumento na penetração lateral.

A avaliação dimensional das macrografias mostrou que houve um reforço de solda entre 1,6 e 2 mm e largura do cordão de 6,3 e 15 mm. A penetração lateral foi estimada entre 2,6 e 5,4 mm de cada lado da chapa na raiz da solda, compatível com a energia de soldagem que ficou entre 0,62 e 1,46 kJ/mm. Logo, os cordões de solda executados com o apoio do suporte cerâmico, escolhido na primeira etapa, mediante o aspectos e características das macrografias, foram aprovados. Apenas a junta da figura 8a foi reprovado, devido a ausência de abertura de raiz o que tornou a solda susceptível a ocorrência de falta de fusão no início do cordão à esquerda, o que deve ser evitado, conforme mostrado na Figura 9.

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

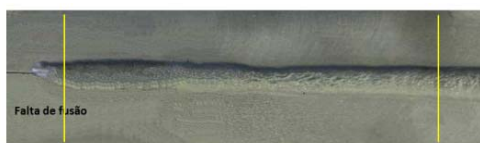


Figura 9 - Junta 1. Aspecto do cordão de solda com falta de fusão no início do cordão, à esquerda.

3.2 - Determinação de um Possível Campo Operacional

A soldagem das 8 juntas de topo e os efeitos das mudanças dos parâmetros de soldagem: abertura de raiz, corrente e tensão, foram fundamentais para determinar o possível campo operacional do processo, Figura 10.

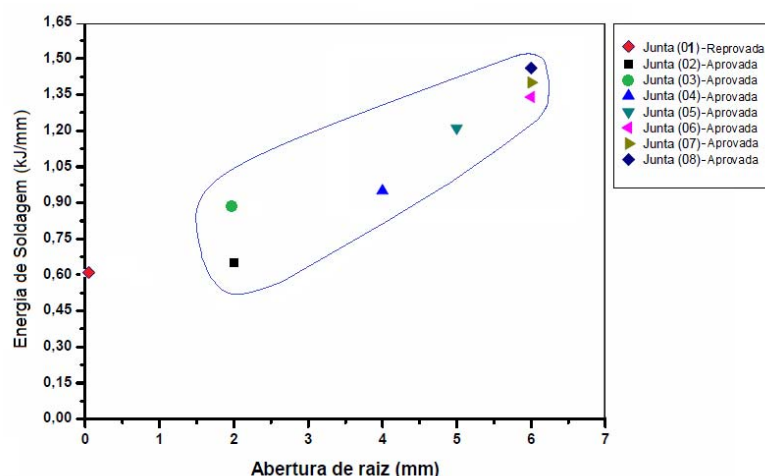


Figura 10 - Possível campo operacional de soldagem.

Os resultados de IV, LP e Macrografia visto nas macrografias da figura 7 mostram que, para o caso de preparação de junta com abertura entre 2 e 6 mm e energia de soldagem entre 0,65 a 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 os cordão de solda das 7 juntas.

À medida que 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.

Os testes eventuais com cordões de solda utilizando suportes cerâmicos e os parâmetros de soldagem com: (a) Abertura de raiz: 2 a 6 mm; (b) Tensão: 17,6 a 27 V; (c) Corrente: 100 a 135 A; (d) Energia de soldagem: 0,65 a 1,46 kJ/mm, podem proporcionar soldas adequadas em chapas de alumínio.

4. CONCLUSÕES

No trabalho realizado, estudando formulações, matérias-primas, técnicas de fabricação de suporte de solda cerâmico e sua aplicação no passe de raiz, as seguintes conclusões podem ser descritas:

- a) Entre as composições testadas, o suporte cerâmico com 93% de coordierita, 7% de silicato de sódio foi considerado o que apresentou melhor resultado durante e após a soldagem com liga de alumínio.
- b) O processo de fabricação convencional de cerâmica mostrou-se adequado para a obtenção de suporte para soldagem unilateral.
- c) Foi constatado que a temperatura mínima de 1100°C para sinterização foi suficiente para que o suporte apresentasse aspecto adequado e boas condições para a realização da soldagem.
- d) A soldagem das 8 juntas de topo e os efeitos da mudança dos parâmetros de soldagem: abertura de raiz, corrente e tensão, foram fundamentais para determinar o possível campo operacional do processo.

REFERÊNCIAS

- 1 International Aluminium Institute. Global aluminium recycling: a cornerstone of sustainable development IAI.
- 2 Epstein, SG., 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.
- 3 Thomas, S.; Sherwood, M. A. (1992) Valence band spectra of aluminum oxides, hydroxides, and oxyhydroxides interpreted. Anal. Chemistry. v.64, p.2488-2495.
- 4 Paranhos, R. P. R., Souza, A. C. Soldagem a Arco Submerso. Rio de Janeiro: FIRJAN/SENAI, 87 p., 1999.
- 5 Malin, V. "Root Weld Formation in Modified Refractory Flux One-Sided Welding: part 1 – Effect of Welding Variables", Welding Journal, vol. 80 pp. 217s- 226s, e part 2 – Effect of Joint Geometry, Welding journal, vol. 80 pp. 227s-237s, September 2001.
- 6 Almeida, L.L.P. Desenvolvimento de suporte cerâmico para aplicação em soldas unilaterais com elevada produtividade. 2009, 111p. Tese (Mestrado em Engenharia e



- Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.
- 7 Van Vlack, L.H. Princípios de Ciência e tecnologia dos materiais. 4 ed. Rio de Janeiro: Campus, 566p, 1984.
 - 8 Andrade, S. T, Mapeamento do processo mecanizado de Soldagem unilateral fcaw com backing Cerâmico aplicável no passe de raiz em aço Carbono. 2007, 103p. Belo Horizonte – MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.
 - 9 Aluminum Association, Inc. Aluminum Alloy Selection and Applications. New York. (1998).
 - 10 American Society For Testing And Materials (1998) Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds, ASTM E 190.
 - 11 Vicentini, R.; Paranhos, R. P. R.. Desenvolvimento de Suporte Cerâmico para Soldagem Unilateral de Ligas de Alumínio. 2013, 123p. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.