

ESTUDO DA SOLDABILIDADE DE CHAPAS DE ALUMÍNIO 3104 E MAGNÉSIO AZ31B COM 4MM DE ESPESSURA POR *FRICITION STIR WELDING* (FSW)*

Kaio Ferreira dos Santo¹
Carolina Alencar Caldeira de Souza²
Rafael Oliveira Santos³
Bruna Godoi Meirelles⁴
Miguel Borodiak⁵
Ana Carolina Brasil da Silva⁶
Rogério Albergaria de Azevedo Jr⁷
Niander Vargas Martins⁸
Saulo Brinco Diniz⁹

Resumo

O processo de união denominado *Friction Stir Weling* – FSW (Soldagem por Fricção e Mistura) é um processo no estado sólido, onde não ocorre a fusão localizada após a soldagem, e devido a isto, vários defeitos de soldagem são eliminados. Este trabalho teve como objetivo realizar testes iniciais da soldabilidade do alumínio 3104 e magnésio AZ31B por FSW, utilizando uma velocidade de rotação em 1380 rpm e um avanço de 105 mm/min, e duas ferramentas distintas. Pode-se observar que com os parâmetros utilizados, a ferramenta com o pino rosqueado e sulcos no ombro, proporcionou um melhor resultado na soldagem de chapas de alumínio / alumínio e magnésio / magnésio, porém ainda foram observadas defeitos na junta soldada.

Palavras-chaves: Friction Stir Welding; Alumínio 3104; Magnésio AZ31B; FSW.

SOLDABILITY STUDY OF AZ31B ALUMINUM AND AZ31B MAGNESIUM SHEETS WITH 4MM OF THICKNESS BY FRICTION STIR WELDING (FSW).

Abstract

The Friction Stir Welding - FSW is a solid state process where does not occur the localized melting of the material during welding, and due to this, several problems during the welding are eliminated. The aim of this paper was carry out initial tests on the weldability of 3104 aluminum and AZ31B magnesium with FSW, setting the rotational speed at 1380 rpm and an advance speed of 105 mm / min, with two different tools. It can be observed that the tool with the threaded pin and grooves in the shoulder, provided a better result in the welding of aluminum / aluminum and magnesium / magnesium sheets, but defects in the welded joint were still observed.

Keywords: Friction Stir Welding, 3104 aluminium, AZ31B magnesium, FSW.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, CEFET/RJ, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

² Graduanda em Engenharia Metalúrgica, CEFET/RJ, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

³ M.Sc., Eng. Metalurgista, Doutorando em Engenharia Metalúrgica (EEIMVR), UFF, Volta Redonda – RJ, Brasil; Professor DI – 1, CEFET - Angra dos Reis, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

⁴ Eng. Metalurgista, CBA, Alumínio, SP, Brasil.

⁵ Bacharel em Química, Técnico Metalográfico, CBA, Alumínio, SP, Brasil.

⁶ Graduanda em Engenharia Metalúrgica, CEFET/RJ, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

⁷ Graduando em Engenharia Mecânica, CEFET/RJ, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

⁸ Graduando em Engenharia Mecânica, CEFET/RJ, Angra dos Reis, RJ, Brasil.

⁹ D.Sc., Eng. Metalurgista, Professor DI – 1, CEFET - Angra dos Reis, Angra dos Reis, RJ, Brasil. saulo_brinco@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

O magnésio (Mg) é um dos elementos químicos mais abundantes na crosta terrestre, ocupando a posição de sexto lugar, no qual é mais facilmente encontrado na forma de carbonatos, sais, cloretos, sulfetos e óxidos. O metal Mg possui uma densidade relativamente baixa, que é de aproximadamente $1,74 \text{ g/cm}^3$ e por tal característica, é um dos metais com a menor densidade existente, podendo ser a primeira escolha nas aplicações que a densidade é o fator de importância. Porém umas de suas desvantagens, que impede sua grande utilização são: seu baixo ponto de fusão ($650 \text{ }^\circ\text{C}$) em comparação as outras ligas metálicas; em altas temperaturas sua reatividade com outros elementos é muito grande; baixa resistência mecânica; e na temperatura ambiente, pode ser inflamável em algumas circunstâncias [1].

Após o magnésio, o alumínio é o metal estrutural com a menor densidade ($2,7 \text{ g/cm}^3$), e dentre os metais não ferrosos, é o mais utilizado no mundo, principalmente nas indústrias aéreas, automobilísticas, navais, elétricas e farmacêuticas. Essa grande utilização se deve as seguintes características: abundância de seu minério na crosta terrestre, baixo custo na sua obtenção em relação aos demais metais não ferrosos, boa condutividade térmica e elétrica, resistência a corrosão, alta ductilidade, entre outros [2, 3]. O alumínio também apresenta 2 das desvantagens do magnésio, no qual a primeira é seu baixo ponto de fusão (por volta de $660 \text{ }^\circ\text{C}$), e sua baixa resistência mecânica [2].

Tradicionalmente, tanto o alumínio como o magnésio e suas ligas são metais difíceis de serem soldados principalmente por processos de soldagem por fusão. Dentre os principais problemas que estas ligas apresentam durante a soldagem, podem-se destacar para o alumínio: difícil aquecimento e fusão devido uma alta condutibilidade térmica; a formação do óxido de alumínio que apresenta um elevado ponto de fusão; alta expansão térmica provocando distorções; grande facilidade de formar trincas a quente; devido sua baixa densidade o metal fundido não consegue expulsar os óxidos e inclusões da poça de fusão. E para o magnésio além de alguns dos problemas apresentados pelo alumínio, também apresenta uma oxidação acelerada em temperaturas próximas ao seu ponto de fusão ($500 \text{ a } 600^\circ\text{C}$); e uma certa inflamabilidade que dependem de algumas condições durante a soldagem [4].

O processo *Friction Stir Welding* – FSW é um processo de soldagem no estado sólido, no qual não ocorre a fusão no material durante a soldagem, e devido a isto, vários problemas apresentados na soldagem de ligas de alumínio e magnésio somem com a execução do mesmo. Tal processo consiste no avanço de uma ferramenta não consumível, constituída por um pino acoplado a um ombro, no qual giram e avançam com uma velocidade constante. O atrito e a deformação plástica provocada entre a rotação da ferramenta com as partes a serem soldadas, são capazes de gerar calor e mistura dos materiais, e desta forma ocorre a união com o resfriamento do conjunto [5 – 7].

Para a obtenção de uma soldagem com qualidade e propriedades mecânicas desejadas, algumas variáveis são de extrema importância, pois estas influenciam diretamente no resultado obtido. Dentre as variáveis ligadas ao processo FSW existentes, as mais importantes são [6, 7]:

- (i) a geometria da ferramenta, pois esta não só é responsável pelo aquecimento do metal base durante a soldagem, como também, pela maneira com que o material é misturado e forjado durante a soldagem;
- (ii) a velocidade de soldagem e velocidade de rotação da ferramenta, influenciam fortemente no calor gerado durante o processo de soldagem;

(iv) A penetração da ferramenta (pino e ombro), define a pressão que é exercida sobre o material a ser soldado na parte posterior da ferramenta durante o processo de soldagem;

(v) a inclinação da ferramenta durante o processo FSW (ficando ligeiramente inclinada à 3° no sentido da soldagem) também é importante, pois tal variável auxilia na movimentação do material da frente para trás do pino;

(vi) o sentido no qual a ferramenta é rotacionada (sentido horário ou anti-horário) afeta o aquecimento da região a ser soldada e como o material é forjado plasticamente ao redor do pino.

Este trabalho teve como objetivo verificar a soldabilidade de uma chapa da liga de alumínio 3104 e magnésio AZ31B, quando estas foram submetidas ao FSW com distintas ferramentas. Para tal, foram realizadas inspeções visuais e visualizações da microestrutura da sessão transversal ao cordão de solda.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

Para a execução dos testes de FSW, foram utilizadas chapas de uma liga de alumínio 3104 e magnésio AZ31B laminadas a quente, ambas com uma espessura aproximada de 4 mm. Nas Tabelas 1 e 2, estão apresentadas as faixas de composições químicas típicas das liga de magnésio AZ31B e liga de alumínio 3104, respectivamente.

Tabela 1 – Faixa de composição química da liga de magnésio AZ31B apresentadas em porcentagem em peso (Adaptado de [8]).

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Outros	Mg
2,5 – 3,5	0,6 – 1,4	0,2	Max 0,10	Max 0,006	Max 0,005	Max 0,03	Balanço

Tabela 2 – Faixa de composição química da liga de alumínio 3104, apresentadas em porcentagem em peso (Adaptado de [9]).

Mn	Fe	Mg	Outros	Al
0,86	0,43	1,22	1,35	Balanço

2.2. Métodos

Para realização do FSW de chapas das ligas de alumínio e magnésio, foi-se utilizado uma fresadora universal (modelo Veker 300U, eixos X, Y e Z) cuja foi adaptada para a realização das soldagens. Na realização dos testes de soldabilidade, com as combinações de metais bases: magnésio / magnésio, alumínio / alumínio e magnésio / alumínio, foram utilizadas duas ferramentas conforme são apresentadas no desenho técnico da Figura 1. A ferramenta 1 foi usinada em aço 4340 e a ferramenta 2 foi usinada em aço H13, e em ambas as ferramentas, foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, cujos parâmetros de tratamentos térmicos foram escolhidos para a obtenção da máxima resistência mecânica do aço utilizado em cada ferramenta.

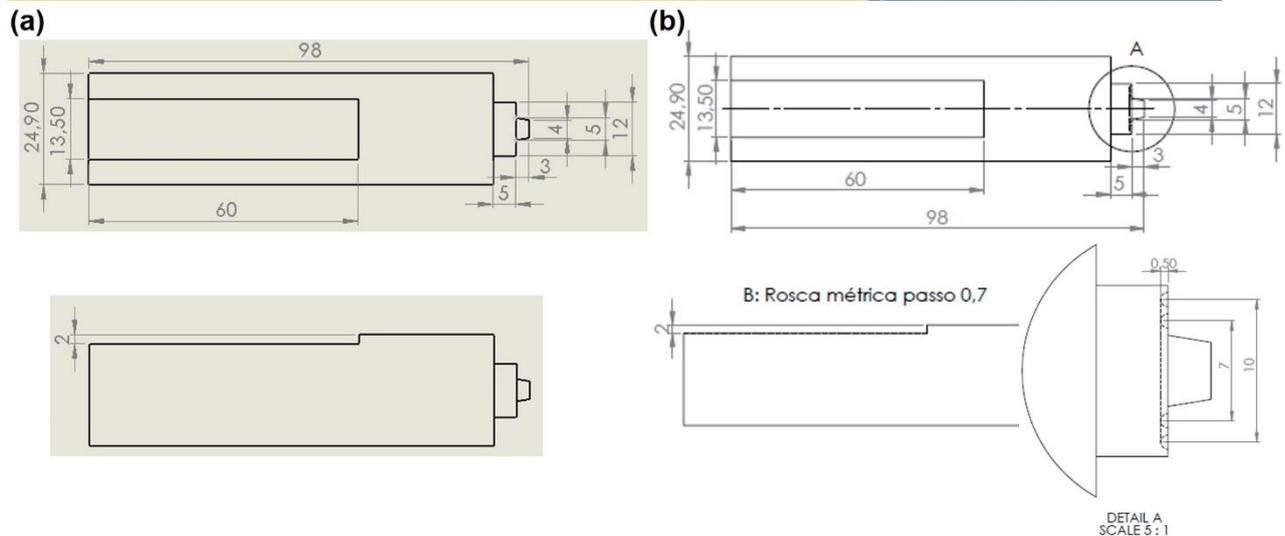


Figura 1 – Desenho técnico da (a) ferramenta 1 e (b) ferramenta 2.

Para a realização dos testes foram utilizadas chapas com um comprimento e largura aproximados de 15 e 7 cm, respectivamente. As chapas foram posicionadas em juntas de topo e fixadas fortemente na mesa da fresadora, para que as mesmas não se deslocassem com o início e avanço da ferramenta do FSW nas chapas.

Com intuito de verificar a soldabilidade dos materiais de acordo com as ferramentas utilizadas, foi-se escolhido como parâmetros de soldagem uma velocidade de rotação da ferramenta de 1380 rpm, inclinação da ferramenta de 3°, um avanço de 105 mm/min, uma penetração do ombro de 0,1 mm e o sentido de rotação da ferramenta anti-horário. Estes mesmos parâmetros foram utilizados para ambas as 3 combinações de metais base (magnésio / magnésio, alumínio / alumínio e magnésio / alumínio).

Após as tentativas de soldagem de chapas de magnésio e alumínio, as amostras foram conduzidas para a análise visual. Para isto, foi-se utilizado uma câmera de celular (13 Mpixels), para fazer o registro das imagens. Todas as imagens foram capturadas com uma distância aproximada entre as chapas e o celular.

Devido uma série de defeitos e conseqüentemente a não união por FSW de boa parte das chapas soldadas com a ferramenta 1, para a análise microestrutural foram destinadas apenas as amostras de magnésio / magnésio e alumínio / alumínio soldadas com a ferramenta 2, e suas respectivas condições antes da realização da soldagem. Esta comparação com o material antes da soldagem se deve para verificar a modificação microestrutural resultante após a soldagem.

Após o corte das amostras no sentido longitudinal a linha de solda, as mesmas foram embutidas com resina fenólica, e seguiram para a etapa de lixamento e polimento. As amostras foram lixadas com lixas de carbetto de silício até a granulometria de 1200, e após o lixamento as amostras foram polidas em alumina de 6 e 1 μm . Uma etapa adicional de polimento eletrolítico foi conduzida na amostra de alumínio/ alumínio em uma solução de 1,8 % HBF_4 + 98,2 % H_2O , durante 15 segundos a uma diferença de potencial de 15 V.

Para visualização e registro das imagens foi-se utilizado um microscópio óptico (fabricante Olympus, modelo BX51) com polarizador de luz. Com intuito de visualizar toda a região em que foi realizada a soldagem, foi-se utilizado uma baixa ampliação (20X).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise macro das chapas soldadas

Na Figura 2 estão apresentados os aspectos macros obtidos na soldagem de (a) alumínio / alumínio e (b) magnésio / magnésio, quando estas foram realizadas utilizando a ferramenta 1. E nas Figuras 3, 4 e 5 estão apresentados os aspectos macros de chapas soldadas via FSW, onde (a) apresentam a região do reforço do cordão de solda, e (b) apresentam a raiz do cordão de solda. Nas Figuras 3, 4 e 5 foram realizadas as soldagens com chapas de magnésio / magnésio, alumínio / alumínio e magnésio / alumínio, respectivamente, utilizando-se a ferramenta 2.

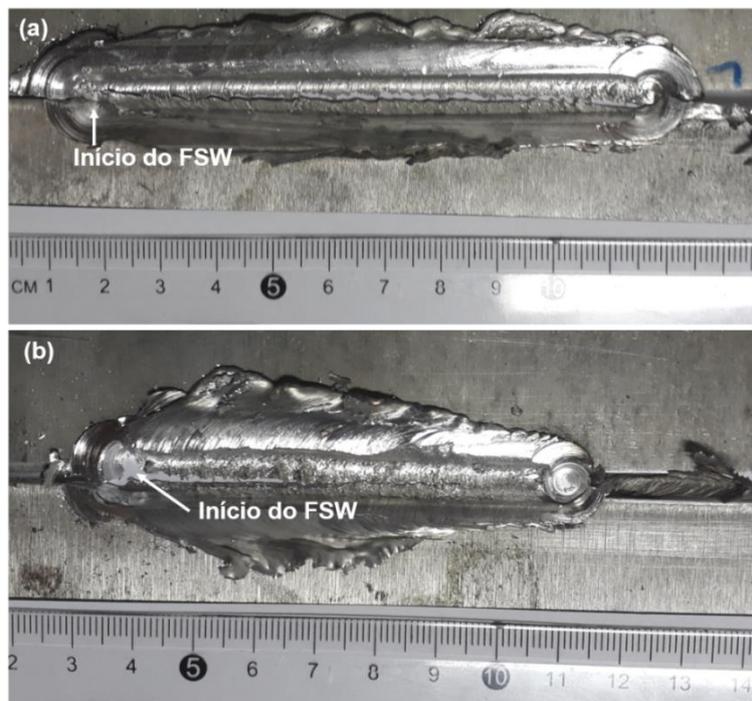


Figura 2 – Aspecto macro da soldagem via FSW com a ferramenta 1 de duas chapas de (a) alumínio e (b) magnésio.

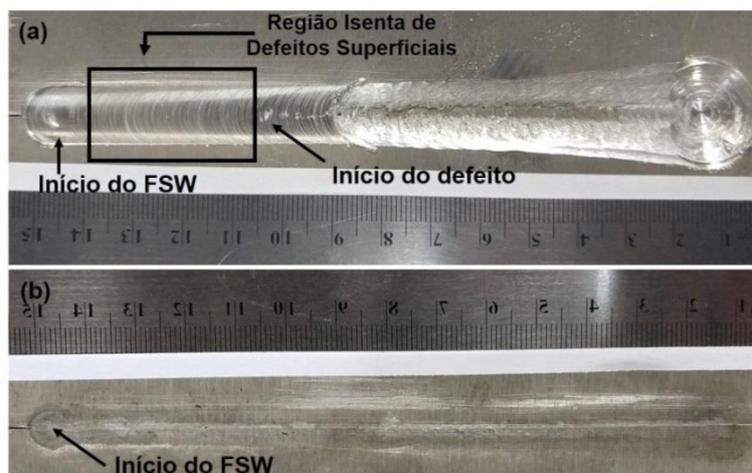


Figura 3 – Aspecto macro da soldagem via FSW com a ferramenta 2 de duas chapas de magnésio. (a) Superfície da chapa e (b) raiz do cordão de solda.

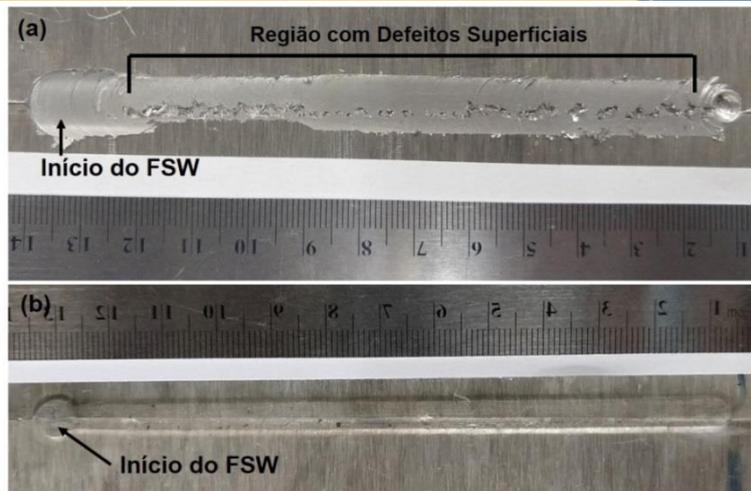


Figura 4 – Aspecto macro da soldagem via FSW com a ferramenta 2 de duas chapas de alumínio. (a) Superfície da chapa e (b) raiz do cordão de solda.

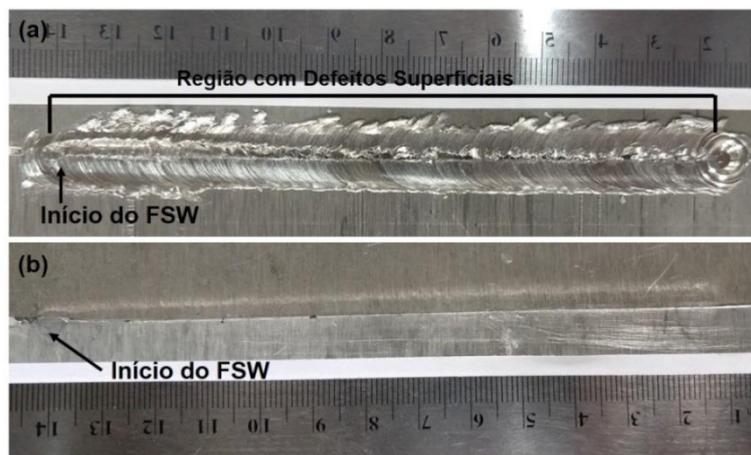


Figura 5 – Aspecto macro da soldagem via FSW com a ferramenta 2 de uma chapa de magnésio com uma chapa de alumínio. (a) Superfície da chapa e (b) raiz do cordão de solda.

Conforme pode ser observado na Figura 2, quando foi utilizado a ferramenta 1 na execução do FSW, não foi possível soldar independente do metal base utilizado. O primeiro ponto observado é que as chapas após serem posicionadas e fortemente fixadas tiveram um pequeno deslocamento com o início da soldagem. Outro fato também observado com a utilização desta ferramenta é um alto fluxo de metal que foi expulso da linha de soldagem, agravando ainda mais o distanciamento das chapas.

Nas soldagens seguintes, o primeiro ponto foi corrigido melhorando o sistema de fixação das chapas, e o segundo ponto assim como é reportado na literatura [5], o ombro da ferramenta é a parte responsável por restringir a expulsão do material da linha de solda, além de favorecer o escoamento do material ao redor do pino, e como o ombro utilizado na ferramenta 1 foi um ombro liso (sem ranhuras ou sulcos) e plano, esta configuração favoreceu que o metal “plastificado” não fosse contido na linha de solda.

Com a mudança para a ferramenta 2 e a melhora do sistema de fixação, é observado uma evolução significativa na soldagem das chapas, porém ainda não foi possível alcançar uma soldagem perfeita nas chapas, pois todas as soldagens realizadas com a ferramenta 2 apresentaram algum tipo de defeitos, os quais estão indicados posteriormente nas Figuras 3, 4 e 5.

Na soldagem realizada entre magnésio / magnésio (Figura 3) com a Ferramenta 2, é

possível observar uma região inicial isenta de defeitos superficiais, e tal região será destinada a análise microestrutural. Outro fato observado na soldagem do magnésio é um enorme “buraco” provocado na linha de soldagem, no qual pode ser explicado pelo aquecimento da região a temperaturas próximas ao ponto de fusão do magnésio, e estando a ferramenta com uma temperatura menor (devido a troca de calor da mesma com o eixo árvore da fresa), o magnésio foi incorporado à ferramenta, removendo-o da linha de solda.

Na soldagem de alumínio / alumínio (Figura 4) com a Ferramenta 2, é observado uma descontinuidade do início ao fim do cordão de solda, que devido o aspecto do cordão de solda, pode-se inferir que a temperatura obtida durante a soldagem com a ferramenta 2 e os parâmetros utilizados, não foram suficientes para proporcionarem uma temperatura ideal para que o metal ficasse “plastificado” e a ferramenta promovesse uma melhor mistura.

De acordo com a Figura 5, é também observado um defeito que se estende do início ao fim do cordão de solda, e ao contrário do defeito obtido quando foram soldadas as duas chapas de alumínio, o defeito presente na soldagem do alumínio / magnésio parece ser mais profundo, no qual este fato foi comprovado quando foi realizado o corte da seção transversal do sentido de soldagem da chapa, pois as duas chapas se separaram com o corte. Embora ainda seja precoce afirmar tal fato, pois ainda é necessário realizar outros testes de soldagem variando a geometria da ferramenta e parâmetros, o defeito gerado na tentativa de soldagem destes dois materiais, ou seja, a perfeita distinção do alumínio e magnésio na linha de solda, pode indicar que estes metais não são soldáveis entre si.

Conforme é reportado na literatura [10], a principal variável do processo FSW é a ferramenta, pois esta influencia não só na realização da soldagem de chapas ou não, como também na microestrutura formada e na extensão da região do *Nugget*. A função principal do pino é forçar a movimentação do material amolecido do metal base, que estará em um estado altamente plastificado, em ambas as direções, de cima para baixo e da parte frontal para a parte posterior da ferramenta [6]. Desta forma, a geometria do pino é de extrema importância, pois pode ditar como os materiais serão transportados da parte frontal para a parte posterior da ferramenta, no qual pode ser através de uma mistura caótica, ou até mesmo, simplesmente ser extrudado ao redor do pino conforme o avanço da ferramenta [7]. Sendo assim, a utilização de um ombro plano e liso e também de um pino sem nenhuma ranhura torna a soldagem mais difícil de ser realizada, e tal fato, pode ser observado na prática.

3.2. Análise microestrutural das chapas soldadas

As Figura 6 (a) e Figura 7 (a) apresentam as microestruturas das amostras de alumínio e magnésio, respectivamente, antes de serem soldadas. E as Figura 6 (b) e Figura 7 (b), apresentam as microestruturas das chapas de alumínio / alumínio e magnésio / magnésio soldadas com a ferramenta 2, respectivamente.

Como pode ser observado na figura 6 (a), a chapa da liga de alumínio 3104 apresenta grãos alongados na direção de laminação, no qual em regiões próximas a superfície da chapa os grãos são mais refinados, e isto se deve aos maiores esforços provocados pela laminação na superfície da chapa, e desta forma, ocorreu um maior encruamento nesta região, proporcionando uma maior energia para a nucleação de grãos recristalização.

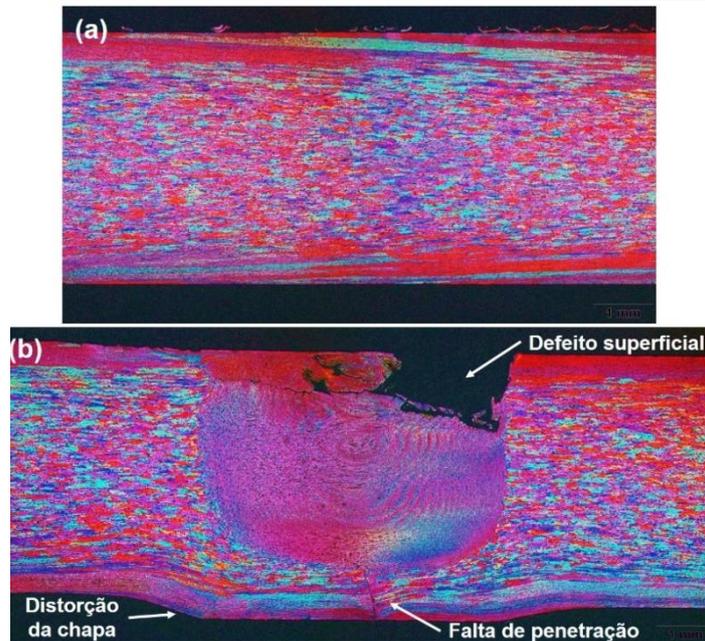


Figura 6 - Microestrutura sob luz polarizada na seção transversal do (a) alumínio antes da soldagem, e (b) após a realização da soldagem de duas chapas de alumínio com a ferramenta 2.

Na Figura 6 (b) observasse a microestrutura da chapa soldada, e pode-se observar o intenso refinamento de grão provocado pela soldagem. Observa-se também uma descontinuidade na raiz da soldagem, no qual já era esperada, que foi gerada devido à falta de penetração da ferramenta, pois a mesma tinha um comprimento de 3 mm enquanto que a chapa possuía uma espessura de 4 mm. Outro fato também observado é uma distorção na raiz da chapa, no qual possivelmente se deve a uma pequena diferença entre o cobre-junta utilizado e o plano da mesa fixadora, pois devido o aquecimento e o fluxo de metal, fez com que a raiz ficasse distorcida.

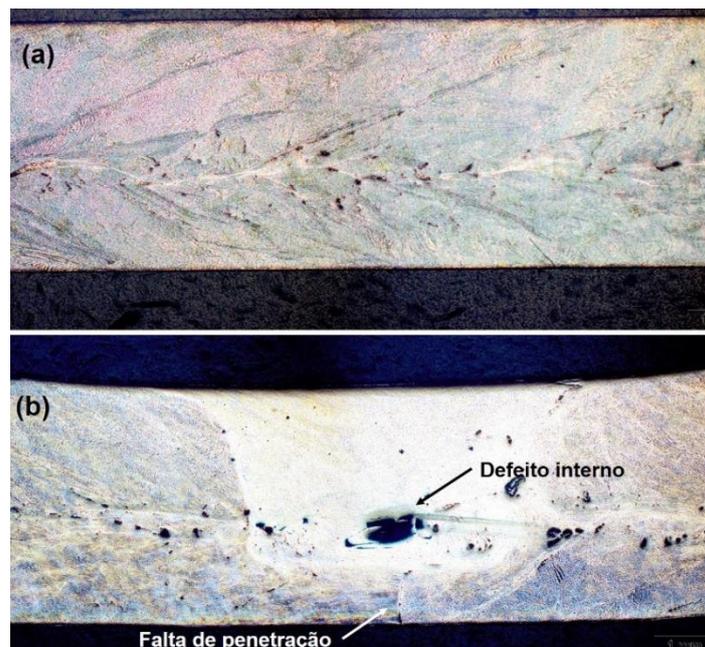


Figura 7 - Microestrutura da seção transversal do (a) magnésio antes da soldagem, e (b) após a realização da soldagem de duas chapas de magnésio, com a ferramenta 2.

Na Figura 7 (b) pode-se observar um certo destacamento do *nugget* do metal base, e este destacamento possivelmente se deve pelo elevado refinamento de grão apresentado pelo *nugget* em relação ao metal base.

Da mesma forma do que apresentado na amostra de alumínio soldada observa-se a falta de penetração da junta soldada devido a diferença entre o tamanho do pino da ferramenta e da espessura da chapa. E ao contrário da soldagem realizada com o alumínio, a distorção da raiz devido a diferença entre o cobre-junta e a mesa fixadora foi suprimida.

A região analisada não apresentou defeitos superficiais, porém com o corte transversal da chapa e o polimento da mesma, observa-se uma descontinuidade e tal descontinuidade possivelmente se estende como se fosse um “túnel” no *nugget*, no qual tal defeito é denominado de “wormholes” [7].

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir:

- Não foi possível obter uma soldagem isenta de defeitos ao longo de toda a chapa, com os parâmetros e ferramentas utilizadas;
- Ferramentas com ranhuras ou sulcos no ombro são melhores para conter o metal plastificado durante a soldagem;
- As ferramentas contendo o pino e o ombro lisos apresentaram um pior resultado em comparação com a ferramenta que possuía sulcos no ombro e o pino rosqueado, quando utilizados os mesmos parâmetros de soldagem.
- Foi evidenciado um elevado refinamento microestrutural no cordão de solda quando realizado a soldagem de alumínio / alumínio com a ferramenta 2.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica dos alunos Santos, K. F. e SOUZA, C. A. C.; à Votorantim Metais, pela doação das chapas de alumínio 3104 e pela realização da captura das imagens por microscopia de luz polarizada; ao CEFET-RJ pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FIGUEIREDO, AP. Análise da Solidificação de Ligas de Magnésio para Aplicação na Fabricação de Motores. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
2. ASM Handbook. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International: volume 2, 1990.
3. MINATEL, R. Um Estudo Comparativo Sobre a Recristalização de Chapas de Alumínio AA1200 e AA3003 Obtidas por Lingotamento Contínuo (Twin RollCaster) e por Fundição de Placas (Direct Chill). São Paulo, 2009. 84 f. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
4. OKUMURA, T; TANIGUCHI, C. Engenharia de Soldagem e Aplicações. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1982, 493 páginas
5. MISHRA, RS; MA, ZY. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering, n°. 50, p. 1–78, 2005.
6. OLIVIECKI, NJ; BESKOW, AB. Análise dos Parâmetros do Processo de Solda por Fricção em uma Liga de Alumínio. PERSPECTIVA, Erechim. v.37, n.138, p.15-29, junho/2013
7. GIBSON, BT; LAMMLEIN, DH; PRATER, TJ; LONGHURST, WR; COX, CD; BALLUN,

- MC; DHARMARAJ, KJ; COOK, GE; STRAUSS, AM. Friction stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, n 16, pag. 56–73, 2014.
8. CATORCENO, LLC. Estudo do Encruamento, Recristalização e Crescimento de Grão em Chapa da Liga de Magnésio AZ31B (Mg – 3% Al – 1% Zn – 0,3%Mn). Tese de doutorado: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2013.
 9. FERRARINI, JL. Caracterização de materiais para o processo de estampagem . Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
 10. DIEGUEZ, T; BURGUEÑO, A; SVOBODA, H. Superplasticity of a Friction Stir Processed 7075-T651 aluminum alloy. *Procedia Materials Science*, vol. 1, p. 110 – 117, 2012.