

ESTUDO DOS PARÂMETROS DE SOLDADURA NA CORROSÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA6082-T6 SOLDADA POR FRICÇÃO LINEAR

WELDING PARAMETERS STUDY IN THE CORROSION OF ALUMINUM ALLOY AA6082-T6 WELDED BY FRICTION LINEAR

N. Toniato¹, J. E. Ribeiro², P. M. G. P. Moreira², A. C. F. Silva³

¹Engenheira Metalurgista - IFES, Espírito Santo - Brasil.

²Instituto Politécnico de Bragança, Bragança - Portugal.

³Instituto de Engenharia Mecânica, Porto – Portugal.



RESUMO

Entre os processos de ligação utilizados na indústria para a ligação de materiais metálicos, a soldadura é o mais importante, já que é mais eficaz e económico. Na década de 1990 foi desenvolvida uma nova técnica de soldadura denominada de Fricção Linear, que é uma técnica no estado sólido e que foi inicialmente utilizada em ligas de alumínio. O presente trabalho apresenta o estudo do comportamento do fenómeno de corrosão em amostras da liga de alumínio AA6082-T6 soldadas por Fricção Linear. Variou-se a velocidade de avanço, enquanto a velocidade de rotação foi mantida constante. Para a análise da corrosão, realizaram-se dois ensaios em meios diferentes: água do mar (pH 8,5) e solução de ácido sulfúrico (pH 1). A perda de massa foi mais significativa nos provetes mergulhados na solução de ácido sulfúrico (superior a 10%) do que na água do mar (inferior a 0,1 %). Os resultados obtidos permitiram verificar que com o aumento da velocidade de avanço ocorreu um aumento da taxa de corrosão e de dureza no cordão de soldadura.

ABSTRACT

The welding is the most important joining processes currently used in industry because is one of the most efficient and economic process to join materials. A new welding technique, appeared in 1991, called Friction Stir Welding has become very popular in the transportation industry. This work presents the study of the corrosion behaviour of the samples welded by FSW process, where the rotation speed was held constant and the travel speed had changed. The corrosion tests were performed in two ways: seawater (pH between 8,5) and sulphuric acid solution (pH 1). The corrosion rate was measured from the mass loss of welding specimens who were immersed in two solutions. Mass loss was more significant in the samples which were immersed in sulphuric acid solution (over 10%) than in seawater (below 0,5%). The results showed that with the increase of travel speed have been increased corrosion rate and the hardness of the weld.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem-se observado a utilização de um conjunto de materiais com características bastante interessantes sob o ponto de vista de leveza e propriedades mecâ-

nicas na indústria de transportes (Ghassemieh, 2011), (Aghion, 2003), (Buchholz, 1998), (McWilliams, 2007), permitindo a diminuindo custos energéticos e garantindo as exigências cada vez mais apertadas dos consumidores. Entre os diferentes materiais empregues, as

ligas de Alumínio de alta resistência são as mais usadas (Miller, 2000), (Baumeister, 1997), (Skillingberg, 2007).

As ligas de alumínio possuem propriedades que as tornam muito competitivas para uma ampla variedade de utilizações, sendo de destacar: a baixa densidade, elevada resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas. Contudo, em aplicações onde há a necessidade de ligações soldadas com processos de soldadura clássicas (MIG ou TIG) algumas das vantagens enumeradas anteriormente poderão sofrer um decréscimo, de tal forma elevado, que pode inviabilizar sua utilização. Para promover a ligação entre os materiais, os métodos mais comuns de soldadura utilizam uma fonte de calor, que gera mudanças na microestrutura do metal base, alterando assim suas propriedades mecânicas. Pode ainda acrescentar-se que, associado ao arrefecimento não controlado destes processos, podem surgir tensões residuais de origem térmica que limitam a carga máxima suportada pela estrutura e diminuem a sua vida em fadiga (Ribeiro, 2006), (Moreira, 2007). Outro fenómeno que ocorre, com alguma frequência, nos processos de soldadura no estado líquido são os defeitos no cordão de soldadura, tais como, micro ou macroporosidades, falta de deposição de material e fissuração, entre outros (Rangel, 2012). Com a finalidade de eliminar alguns desses inconvenientes, surgiu em 1991 uma nova técnica que permite a ligação de metais no estado sólido, denominado por soldadura por fricção linear ou, na sua designação inglesa, *Friction Stir Welding* (FSW). Essa técnica foi desenvolvida pelo instituto de soldadura na Grã-Bretanha e apareceu como uma alternativa para ser utilizada em ligas de alta resistência que eram difíceis de unir com as técnicas convencionais de ligação. Foi, inicialmente, desenvolvido para ligas de alumínio, mas, desde então também tem sido utilizada numa grande variedade de materiais (Koumoulos, 2011), (Properties and Selection, 1987).

Uma das principais vantagens das ligas de Alumínio é a sua resistência à corrosão (Properties and Selection, 1987), porém essa resistência depende do meio envolvente (Vereecken, 1994) e de possíveis alterações

microestruturais decorrentes de processos de fabrico, como é o caso da soldadura (Rao, 2004), (Squillace, 2004). As ligas de alumínio soldadas por FSW apresentam suscetibilidade à corrosão nas regiões onde ocorre sensibilização da microestrutura (Frankel, 1999). O cordão de soldadura apresenta uma microestrutura composta por grãos finos, equiaxiais recristalizados dinamicamente. O refinamento de grão é causado principalmente pela rotação da ferramenta, associado a processos de deformação intensa e recristalização dinâmica (Paglia, 2008). Durante a soldadura, as regiões afetadas pelo calor podem atingir uma temperatura entre 250 e 450°C, que sensibilizam a microestrutura.

Sendo a FSW um processo relativamente recente, necessita de estudos mais apurados para melhor compreensão do seu comportamento mecânico. O objetivo deste trabalho é analisar a resistência à corrosão da liga de alumínio AA6082-T6 soldada pelo processo de FSW em diferentes meios, mais especificamente, em água do mar e em solução de ácido sulfúrico. Pretende-se também verificar a influência da velocidade de avanço da ferramenta no processo de corrosão e na dureza das juntas soldadas.

2. MATERIAL

2.1 Soldadura dos provetes

A preparação dos provetes para posterior ensaio de corrosão consistiu na soldadura, com a técnica de FSW, de duas placas (360x120x3 mm³) de liga de alumínio AA6082-T6. A composição química da liga e suas principais propriedades mecânicas encontram-se nas Tabela 1 e Tabela 2, respetivamente. As propriedades mecânicas foram determinadas a partir do ensaio de tração de 6 provetes de acordo com a norma EN 10002-1 (EN 10002-1, 2006) e os valores da Tabela 1 correspondem ao valor médio dos resultados obtidos no ensaio.

A soldadura foi executada com os chanfros em bordos retos. Após preparação e limpeza das placas (acetona como desengordurante e um pano macio), estas foram fixadas num gabari apropriado e procedeu-se à soldadura de

Tabela 1 – Composição química da liga AA6082-T6 (%peso).

| Elemento | Si | Mg | Mn | Fe | Cr | Cu | Zn | Ti | Al |
|----------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| % | 0,91 | 0,69 | 0,56 | 0,23 | 0,035 | 0,062 | 0,098 | 0,019 | 97,4 |

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da liga AA6082-T6, material base.

| Propriedade | Valor |
|--------------------------|-------|
| Tensão de rotura [MPa] | 322,9 |
| Tensão de cedência [MPa] | 276,2 |
| Alongamento [%] | 17,5 |

acordo com os parâmetros indicados nas Tabelas 3 e 4. FSW é a abreviatura do processo de soldadura *Friction Stir Welding*. A letra seguinte refere-se à velocidade de avanço, onde S é baixa (*slow*), M média (*medium*) e F rápida (*fast*).

Tabela 3 – Parâmetros de soldadura.

| Parâmetros | Valor |
|------------------------------------|-------|
| Diâmetro do <i>shoulder</i> [mm] | 12 |
| Diâmetro da ferramenta [mm] | 6 |
| Penetração do pino [mm] | 2,83 |
| Penetração do <i>shoulder</i> [mm] | 0 |
| <i>Tilt angle</i> [°] | 0 |

Tabela 4 – Parâmetros de velocidade da soldadura FSW.

| Amostras ^a | Velocidade de Rotação (RPM) | Velocidade de avanço (mm/min) |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| FSW S | 1000 | 78 |
| FSW M | 1000 | 130 |
| FSW F | 1000 | 360 |

A soldadura foi executada com os chanfros em bordos retos. Após preparação e limpeza das placas (acetona como desengordurante e um pano macio), estas foram fixadas num gabari apropriado e procedeu-se à soldadura de acordo com os parâmetros indicados nas Tabela 3 e Tabela 4, a direção do movimento de avanço foi paralela à direção da laminagem da placa.

Na Fig. 2, pode observar-se o provete obtido após soldadura das duas placas.

Neste trabalho foram analisados três provetes, onde se variou somente a velocidade de avanço (na direção paralela à direção da laminagem da placa). A velocidade de rotação da ferramenta foi de 1000 rpm, no sentido horário.

Na Fig. 2, pode-se observar o provete (20mmx60mm) obtido após soldadura das duas placas.

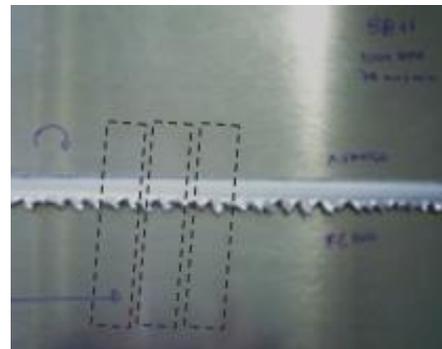


Fig. 2 – Provette obtido após a soldadura de FSW.

2.2 Ensaio de corrosão

Optou-se por simular ambientes marítimos, submergindo três amostras em água do mar, e simular ambientes industriais, mergulhando três outras amostras numa solução de ácido sulfúrico. Na tabela 5, os números 1, 2 e 3 referem-se aos grupos para a análise de diferentes propriedades conforme apresentado ao longo do trabalho.

Tabela 5 – Propriedades a ser analisada em cada grupo de amostras.

| Grupo | Meio Corrosivo | Denominação das Amostras |
|-------|-----------------|--------------------------|
| 1 | Não aplicável | FSW S 1 |
| | | FSW M 1 |
| | | FSW F 1 |
| 2 | Água do mar | FSW S 2 |
| | | FSW M 2 |
| | | FSW F 2 |
| 3 | Ácido sulfúrico | FSW S 3 |
| | | FSW M 3 |
| | | FSW F 3 |

A concentração da solução ácida utilizada no ensaio foi de 150g/l de ácido sulfúrico. A água do mar utilizada no ensaio foi retirada do Atlântico Norte, na costa Portuguesa. Esta água é rica em fitoplâncton e outros microrganismos que podem acelerar o processo de corrosão. Determinou-se, também, a salinidade da água em um refratômetro digital (HI96822 da HANNA) que faz a medição do índice de refração para determinar a salinidade da água salgada, que foi de 32 ppt.

Para evitar uma significativa alteração nas características micro-orgânica da água, conservou-se uma quantidade de água em ambiente refrigerado, a uma temperatura de 5°C, a qual foi utilizada para repor as perdas que ocorreram por evaporação durante o ensaio. Antes da imersão das amostras nos respectivos recipientes com os meios corrosivos fez-se uma prévia preparação que consistiu no polimento com uma lixa de granulometria #220 e na posterior limpeza com desengordurante e acetona.

Na Fig. 3, estão apresentados os dois conjuntos de amostras imersas nos meios corrosivos.

Os ensaios decorreram por 94 dias para a água do mar e 70 dias para o meio ácido a uma temperatura ambiente média de 20°C.

A perda de massa ocorrida no meio corrosivo de água do mar foi muito pequena, por isso optou-se por manter as amostras durante mais vinte e quatro dias com o objetivo de observar-se uma perda de massa mais significativa.

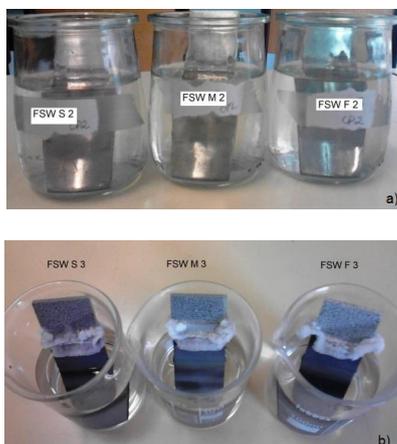


Fig. 3 – Amostras das juntas soldadas por FSW imersas nos dois meios corrosivos: a) água do mar; b) solução de ácido sulfúrico.

Para determinação da perda de massa provocada pela corrosão, as amostras foram sujeitas a pesagens semanais numa balança de precisão, ADA 210C da Algen Scale. As amostras eram retiradas dos recipientes, lavadas em água corrente, limpas numa máquina de ultra-sons (modelo H da Selecta) durante 15 minutos a uma temperatura de 50°C. Finalmente, foram secas com ar quente e pesadas na balança de precisão.

Para a medição do pH dos dois meios corrosivos foi utilizado um indicador universal com papel de tornassol. Na tabela 6 estão indicados os resultados de pH obtidos para a água do mar e solução de ácido sulfúrico.

Tabela 6 – Resultados do teste de pH.

| <i>Meio corrosivo</i> | <i>Valor de pH</i> |
|-----------------------|--------------------|
| Água do mar | 8,5 |
| Ácido sulfúrico | 1,0 |

2.3 Metalografia e microdurezas

Com o intuito de estudar a influência do parâmetro velocidade de avanço na qualidade da soldadura, microestrutura e microdureza do material na região da soldadura realizou-se um ensaio metalográfico e a medição de micro-dureza Vickers.

Procedeu-se a uma análise metalográfica na junta de soldadura das amostras do grupo 1 (ver tabela 5). Estas foram lixadas com lixas da granulometria #220, #320, #500 e #1000 e, posteriormente, polidas com uma suspensão de sílica coloidal. Em seguida, foram atacadas com o reagente Keller (1mL de HF com 200 mL de H₂O) durante 30 segundo e lavadas em água quente. Por fim, realizou-se uma análise no microscópio ótico, marca Nikon, modelo LHS-H50C-1.

Para análise da microdureza no cordão e na região termomecanicamente afetada foram cortadas 3 amostras para embutir na resina a frio, lixadas com lixas de granulometria #220, #320, #500 e #1000, posteriormente foram polidas em suspensão de sílica coloidal. De seguida mediu-se a

microdureza Vickers na superfície dessas amostras. As medições foram efetuadas num microdurómetro de marca Mitotoyo, modelo HM-210.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Micrografia

As micrografias obtidas foram realizadas com uma ampliação de 100 vezes e encontram-se representadas nas Fig. 4 (amostras FSW S1), Fig.5 (FSW M1) e Fig.6 (FSW F1).

Observa-se claramente, na Fig. 4 a), o limite entre o cordão de soldadura e o metal base. Na Fig. 4 (b) nota-se uma falta continuidade de material no cordão de soldadura.

Na Fig. 5 a) pode-se verificar o limite entre o cordão de soldadura e o metal base. Já na Fig. 5 b) vê-se claramente que a parte central sofreu uma maior deformação plástica devido ao aumento da velocidade de avanço que deformou com maior intensidade o centro do cordão de soldadura. Da Fig. 5, também é possível observar-se na amostra FSW M1 não existe qualquer descontinuidade de material, desta análise pode concluir-se que os parâmetros utilizados nesta soldadura são os mais adequados para a ligação desta liga de alumínio e espessura de chapa.

Observa-se na Fig. 6 a) o limite entre o cordão de soldadura e o metal base. Na Fig. 6 (b) nota-se uma falta continuidade de material no cordão de soldadura.

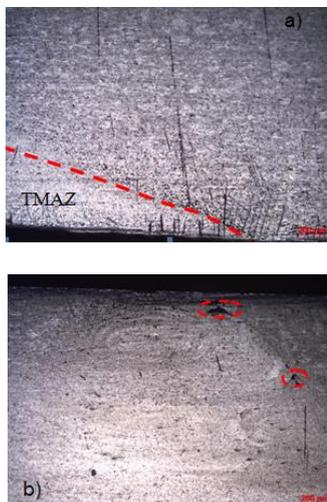


Fig.4 – Soldadura da amostra FSW S1: a) Zona termo-mecanicamente afetada. b) Cordão de Soldadura.

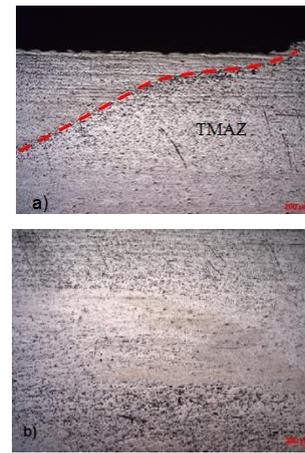


Fig.5 – Soldadura da amostra FSW M1: a) Zona termicamente afetada. b) Cordão de Soldadura.

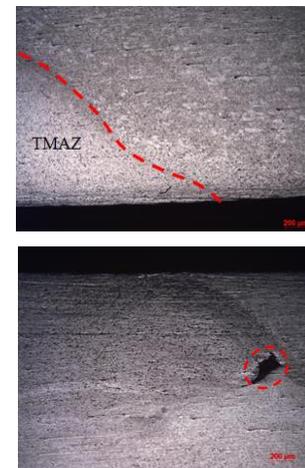


Fig.6 – Soldadura da amostra FSW F1: a) Zona termicamente afetada. b) Cordão de Soldadura.

3.2 Microdureza Vickers

A Fig.7 mostra esquematicamente as regiões onde foram realizadas as medições de microdureza Vickers e a Tabela 7 mostra os valores medidos em cada uma das cinco áreas.

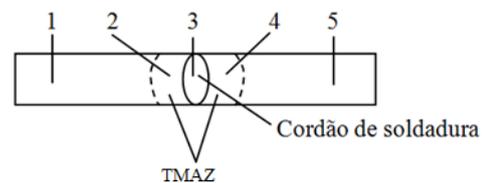


Fig.7 – Representação esquemática dos locais de medição de microdureza.

Nas regiões 1 e 5, não ocorreram mudanças significativas na microdureza, pois a medição foi efetuada diretamente no metal base. Esta região não foi afetada pelo calor nem pela deformação plástica

Tabela 7 – Medição da Microdureza Vickers.

| Amostra | Pontos de medida | | | | |
|---------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| FSWS | 100,3 | 77,23 | 57,00 | 77,23 | 93,23 |
| FSWM | 102,7 | 85,76 | 56,48 | 77,23 | 93,51 |
| FSWF | 102,7 | 82,19 | 78,84 | 82,19 | 93,64 |

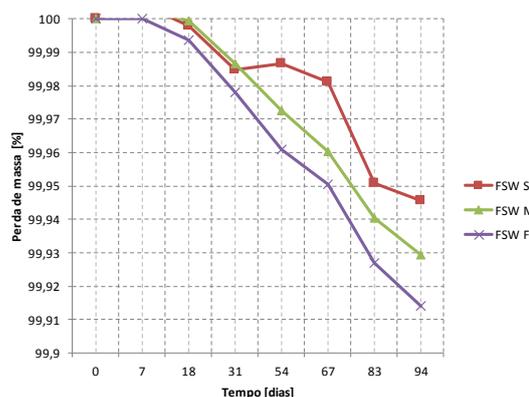
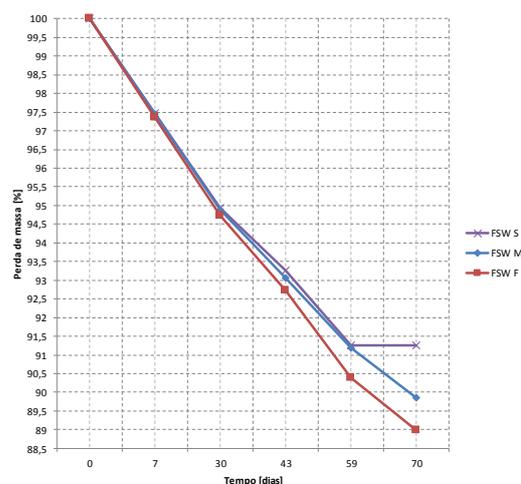
que ocorrem durante o processo FSW. Assim, tal como no estudo desenvolvido por Peel *et al.* (Peel, 2003) verificou-se que o metal base apresentou uma dureza Vickers superior ao cordão de soldadura. Isso ocorre devido ao processo de soldadura que amacia significativamente o metal com a redução da dureza em torno do cordão. Kumar e Kailas (Kumar, 2008) explicam que a temperatura mínima necessária para modificar os precipitados em ligas de Al-Zn-Mg é de 200°C, como a temperatura de soldadura da FSW varia entre 250°C e 450°C, formam-se precipitados grosseiros, assim a ZTMA apresenta menor dureza.

À medida que a velocidade de avanço aumenta, a transferência de calor por unidade de distância percorrida diminui (a entrada de calor é menor), fazendo com que a zona recristalizada seja mais estreita, refletindo-se no aumento de dureza. Esse facto pode ser constatado pelo valor de dureza encontrado na amostra FSW F, que foi soldada com maior velocidade de avanço e apresentou dureza mais elevada.

3.3 Corrosão

O processo de corrosão foi avaliado pela perda de massa ao longo do tempo.

As Fig.8 e Fig.9 mostram os resultados do ensaio de corrosão em água do mar e solução de ácido sulfúrico, respetivamente. Através da análise dos gráficos pode-se perceber que o pH da água do mar está dentro do intervalo de passivação de acordo com o diagrama de Pourbaix, por esse motivo não houve perda efetiva de massa (perda inferior a 0,1%) das amostras do grupo 2. Já para o ácido sulfúrico, o pH está dentro da faixa de corrosão, facto esse que foi comprovado pela perda significativa de massa das amostras do grupo 3 (aproximadamente 10%).

**Fig.8** – Perda de massa ocorrida nas amostras do ensaio de corrosão em água do mar.**Fig.9** – Perda de massa no ensaio de corrosão numa solução de ácido sulfúrico.

A maior taxa de corrosão foi encontrada para a amostra FSW F, soldada com a maior velocidade de avanço das amostras em estudo. Peel *et al.* (Peel, 2003) explicam que devido à velocidade de avanço surgem tensões de pico próximas da linha de soldadura. Essas tensões aumentam em magnitude com o aumento da velocidade de avanço. E de acordo com Paglia e Buchheit (Paglia, 2008), ligas de alumínio de alta resistência, como é o caso da liga em estudo AA6082-T651, são suscetíveis à corrosão sob tensão em determinadas condições metalúrgicas e a condição de soldado é uma delas. Então é provável que tenha ocorrido corrosão sob tensão, devido às tensões residuais geradas durante o processo de soldadura.

Na Fig.10 estão apresentadas as amostras após o ensaio de corrosão em água do mar e solução de ácido sulfúrico, respetivamente.

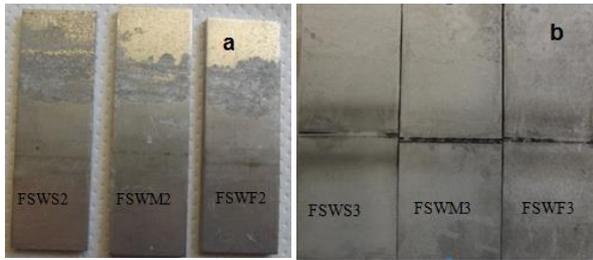


Fig.10 – Amostras FSW S 2, FSW M 2, FSW F 2 após ensaio de corrosão em água do mar (a); amostras FSW S 3, FSW M 3, FSW F 3 após ensaio de corrosão em solução de ácido sulfúrico (b).

4. CONCLUSÕES

O processo FSW mostrou ser eficaz para a soldadura da liga de alumínio AA6082-T6. O aumento da velocidade de rotação ou a diminuição da velocidade de avanço aumentam a geração de calor durante o processo de soldadura.

Os parâmetros usados para soldar a amostra FSW M deram origem à soldadura com menos defeitos de descontinuidade de material.

A dureza do cordão de soldadura é menor que do metal base, devido ao amaciamento do cordão durante a soldadura.

A amostra FSW F, soldada com maior velocidade de avanço, obteve uma maior taxa de corrosão e maior microdureza no cordão de soldadura.

A corrosão na solução de ácido sulfúrico foi muito mais intensa, já que é um meio mais agressivo (menor pH) que a corrosão provocada pela água do mar. No ácido sulfúrico a perda de massa rondou os 10% enquanto na água do mar foi inferior a 0,5%.

Verificou-se que ocorre o fenómeno de corrosão sob tensão devido às tensões residuais geradas durante o processo de soldadura.

REFERÊNCIAS

Aghion, E., Bronfin, B., Von Buch, F., Schumann, S., Friedrich, H., "Newly developed magnesium alloys for powertrain

applications", Jom-J Miner Metals Mater Society, 55: A30–A33, 2003.

Baumeister, J., Banhart, J., Weber, M., "Aluminium foams for transport industry", Materials & Design, 18: 217-220, 1997.

Buchholz, K., "Lightweight Body Panel Materials", Automotive Engineering International, 106: 19-22, 1998.

Corrosion, Metals Handbook, Ninth ed., ASM International, Metals Park, Ohio, USA, 13: 1428-1506, 1987.

Dadfar, M., Fathi, M., Karimzadeh, F., Dadfar, M., Saatchi, A., "Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel", Materials Letters, 61: 2343–2346, 2007.

Davis, J.R., Corrosion of Weldments, Chapter 1: Basic Understanding of Weld Corrosion, ASM International, Edited by J. R., Davis & Associates, Ohio, USA, 2006.

EN 10002-1, Tensile Test for Metallic Materials at Ambient Temperature, 2006.

Frankel, G., Xia, Z., "Localized Corrosion and Stress Corrosion Cracking Resistance of Friction Stir Welded Aluminum Alloy 5454", Corrosion, 55: 139-150, 1999.

Gentil, V., Corrosão, Editora LTC, 6ª Edição, Rio de Janeiro, 2011.

Ghassemieh, E., Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects, Chapter of New Trends and Developments in Automotive Industry, Edited by Marcello Chiaberge, Publisher: InTech, 2011.

Jariyaboon, M., Davenport, A., Ambat, R., Connolly, B., Williams, S., Price, D., "The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024–T351", Corrosion Science, 49: 877–909, 2007.

Koumoulos, E., Charitidis, C., Daniolos, N., Pantelis, D., "Nanomechanical properties of friction stir welded AA6082-T6 aluminum alloy", Materials Science and Engineering: B, 176: 1585-1589, 2011.

Kumar, K., Kailas, S.V., "The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation", Materials Science and Engineering: A, 485(1): 367-374, 2008.

Maggiolino, S., Schmid, C., "Corrosion resistance in FSW and in MIG welding

- techniques of AA6XXX", *Journal of materials processing technology*, 197: 237–240, 2008.
- McWilliams, A., *Advanced Materials, Lightweight Materials in Transportation*, Report Code: AVM056A, 2007.
- Miller, W., Zhuang, L., Bottema, J., Wittebrood, A., Smet, P., Haszler, A., Vieregge, A., "Recent development in aluminium alloys for the automotive industry", *Materials Science and Engineering: A*, 280: 37–49, 2000.
- Moreira, P., Figueiredo, M., Castro, P., "Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys", *Theoretical and applied fracture mechanics*, 48: 169-177, 2007.
- Paglia, C., Buchheit, R., "A look in the corrosion of aluminum alloy friction stir welds", *Scripta Materialia*, 58: 383–387, 2008.
- Peel, M., Steuwer, A., Preuss, M., Withers, P.J., "Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds", *Acta Materialia*, 51: 4791-4801, 2003.
- Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, *Metals Handbook*, Ninth ed., ASM International, Metals Park, Ohio, USA, vol. 2, 1987.
- Rangel, J., "Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas T soldadas por MIG na liga AA6082", *Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra*, 2012.
- Rao, K., "Pitting Corrosion of Heat-Treatable Aluminium Alloys and Welds: A Review", *Trans. Indian Inst. Met.* 57: 593-610, 2004.
- Ribeiro, J., *Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.
- Skillingberg, M., Green, J., "Aluminum Applications in the Rail Industry", *Light Metal Age*, 65: 8–12, 2007.
- Squillace, A., Fenzo, A., Giorleo, G., Bellucci, F., "A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints", *Journal of Materials Processing Technology*, 152: 97–105, 2004.
- Srinivasan, P., Arora, K., Dietzel, W., Pandey, S., Schaper, M., "Characterisation of micro-structure, mechanical properties and corrosion behaviour of an AA2219 friction stir weldment". *Journal of Alloys and Compounds*, 492: 631–637, 2010.
- Vereecken, J., *Corrosion Control of Aluminium - Forms of Corrosion and Prevention*, TALAT Lectures 5103, European Aluminium Association, 1994.