

PREENCHIMENTO DO FURO REMANESCENTE EM SOLDAS POR FRICÇÃO COM MISTURA MECÂNICA DE REPARO EM ALUMÍNIO 6056-T4 ¹

Tiago B. Kaspary ²
Jorge F. dos Santos ³
Telmo R. Strohaecker ⁴

Resumo

Os processos de soldagem por fricção tradicionais sempre foram limitados geometricamente a aplicações específicas, até a introdução do *Friction Stir Welding (FSW)*, ou Solda por Fricção com Mistura Mecânica (1), pelo *The Welding Institute (TWI)*, em 1991. Esta técnica flexibiliza a utilização da fricção como fonte de calor, possibilitando a confecção de trilhas de solda. Inicialmente as pesquisas neste campo estavam focadas nas características fundamentais do processo, como por exemplo, a obtenção dos parâmetros de soldagem para diferentes materiais, aperfeiçoamento da ferramenta e levantamento do ciclo térmico. Mais recentemente, no entanto, esforços vêm sendo efetuados com intuito de aproximar as características do processo às necessidades industriais, atacando-se as dificuldades associadas à aplicação prática do processo, entre elas a existência do Furo Remanescente ao final da trilha soldada. Este trabalho, parte do projeto europeu *Welding of Airframes by Friction Stir (WAFS)*, propõe uma alternativa para o preenchimento do furo remanescente (KHC), através da utilização de um cabeçote de soldagem desenvolvido no GKSS (2) para a realização de Soldagem Pontual por Fricção (FSpW), ao qual é acrescentado um anel de preenchimento. Uma série de soldas foi realizada com sucesso, tendo sido avaliadas tanto as propriedades metalúrgicas quanto as propriedades mecânicas, através de microscopia óptica, ensaios de dobramento, microdureza, tração, fadiga e tenacidade à fratura. Os resultados alcançados, embora preliminares, demonstram que a aplicação deste método para o Preenchimento do Furo Remanescente é uma alternativa viável, apresentando propriedades bastante interessantes.

Palavras-chave: Preenchimento do furo remanescente; Solda por fricção com mistura mecânica; Solda pontual por fricção; Al 6056.

Abstract

Since its introduction in 1991, by The Welding Institute, the Friction Stir Welding processing has its potential applications increased every year. Its practical application, however, is still not completely consolidated. Former research efforts were focused on the primary characteristics associated to the process, as the parameter optimization for different materials, tool development and thermal cycles related to FSW, per example. Recently, however, several researchs are being conducted with the objective of approximating the process capabilities to the industry's needs, addressing FSW main limitations, as the residual keyhole located in the end of the welding trail. This work proposes the application of a Friction-Spot Welding (FSpW) tool, developed in GKSS, with an associated filler ring installed, as an alternative for the Keyhole Closure procedure. Several successful welds have been performed, and their metallurgical and mechanical properties were evaluated through optical analysis and bending, hardness, tensile, fatigue and fracture toughness testing. The results achieved, even though further testing is required, demonstrate that the utilisation of the FSpW Head is a viable alternative to the Keyhole Closure procedure, with very interesting properties achieved this far.

Key words: Keyhole closure (KHC); Friction stir welding (FSW); Friction spot welding (FSpW); Al 6056.

¹ Contribuição técnica apresentada no 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² M.Sc.Eng. – Laboratório de Metalurgia Física - UFRGS

³ Prof. Dr – GKSS Forschungszentrum GmbH – Geesthacht - Alemanha

⁴ Prof. Dr – Laboratório de Metalurgia Física – Demet – UFRGS

INTRODUÇÃO

O FSW é um método de soldagem realizado no estado sólido, trazendo diversas vantagens e alternativas aos processos tradicionais de solda por fusão. Por outro lado, sendo bastante recente, restam aspectos a trabalhar para torná-lo viável industrialmente, flexibilizando sua aplicação e permitindo melhor desempenho. Um desses aspectos é o furo remanescente ao final do trilho da soldagem, o *keyhole*.

Esta característica traz diversas limitações ao método, uma vez que dificulta ou impossibilita a realização de soldas cujo caminho seja fechado, como em eixos, tubos ou tanques, bem como a realização de soldas de reparo sobre trechos que eventualmente apresentem defeitos. Shepherd (3), por exemplo, destaca a necessidade da aferição da possibilidade de efetuar soldas de reparo com eficiência para a utilização do FSW na indústria aeronáutica.

Embora esforços para solucionar este problema já venham sendo aplicados, como o desenvolvimento de ferramenta com pino retrátil pela NASA (4, 5), a questão do furo remanescente ainda não tem uma solução definitiva.

AL 6056

A demanda de materiais leves e com boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e boa formabilidade, vem estimulando o desenvolvimento de novas ligas e processos. Ligas do tipo Al-Mg-Si (grupo 6xxx) surgem como fortes candidatas, especialmente em aplicações de alta responsabilidade, como aplicações aeronáuticas e automobilísticas. Estas ligas, no entanto, têm suas propriedades sensivelmente degradadas pelos processos de soldagem convencionais. Com isto em vista, foi desenvolvido o FSW, que por se tratar de um processo em estado sólido, afeta menos intensamente a microestrutura destas ligas.

O endurecimento por precipitação que provém do envelhecimento natural (T4) produz têmperas com alta resistência mecânica, alta tenacidade à fratura e boa resistência à fadiga. As ligas que são usadas nesta têmpera apresentam uma razão de átomos por vacância relativamente alta, mantida pelo resfriamento rápido, favorecendo a formação de zonas Guinier-Preston (GP). A resistência aumenta rapidamente, atingindo resultados estáveis em 4 ou 5 dias (6).

Os valores de dureza e tração são maximizados pela presença da fase β'' , que forma precipitados muito finos em forma de agulhas. O ciclo térmico de soldagem provoca a dissolução destas agulhas e, com seu resfriamento posterior mais lento, favorece a precipitação da fase β' , menos eficiente no reforço da liga (7). Analogamente, a **Figura 1** mostra um gráfico de tempo de envelhecimento versus dureza em uma liga de alumínio com 4% de cobre. Nesta liga, formam-se os precipitados θ'' (coerente) e θ' (semi-coerente), diferentemente dos precipitados β'' e β' das ligas 6xxx (8). Percebe-se que a queda na dureza coincide com a formação da fase θ' , ou seja, com a perda de coerência do precipitado em relação à matriz.

A liga Al6056 foi desenvolvida pela Pechiney francesa, e é equivalente à 6013 americana, que foi desenvolvida pela Alcoa para substituir o Al2024T3 em aplicações aeronáuticas (9). Esta liga possui excelente formabilidade na condição T4 associada à alta resistência na condição T6, sendo que o tratamento térmico de T4 a T6 é simples e relativamente barato, comparado ao tratamento térmico requerido para a liga 2024. Além disso, a liga 6056 apresenta a mesma resistência a propagação de trinca com densidade 3% menor, e uma maior resistência à corrosão, similar ao alumínio puro, sem a susceptibilidade a pites existente na 2024 (10).

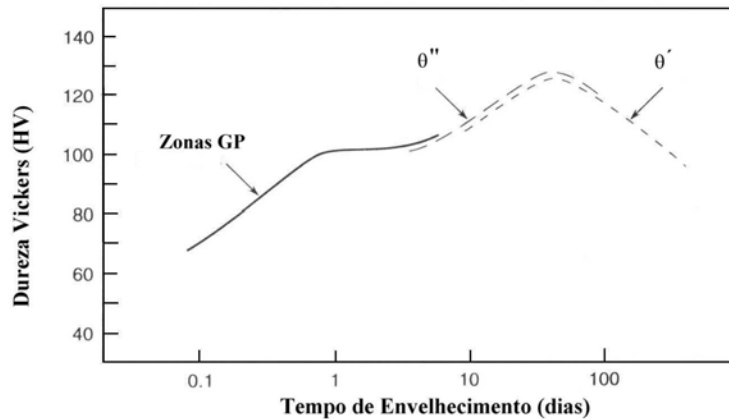


Figura 1. Dureza versus tempo de envelhecimento no liga 6xxx com cobre (8)

Friction Stir Welding em Alumínio

O *Friction Stir Welding* (FSW), ou Solda por Fricção com Mistura Mecânica, ocorre pela aplicação de uma ferramenta cilíndrica em rotação sobre a junta a ser soldada. Esta ferramenta é constituída por um ressalto (*shoulder*) em cuja base há um pino (11) que é mergulhado entre as placas até que o ressalto, já em rotação, entre em contato com a peça a ser soldada. Com a completa plastificação do material, inicia-se o deslocamento da ferramenta na direção da linha de união. As chapas são fortemente fixadas para impedir deflexão durante o processo. A **Figura 2** apresenta esquematicamente os diferentes estágios do FSW.

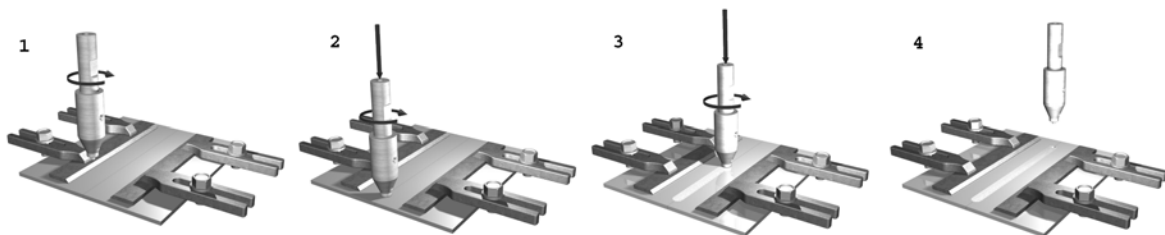


Figura 2. A ferramenta em rotação (1) é aplicada de forma que o pino seja inserido na linha de junção (2) a ferramenta é transladada no sentido da junta (3). Ao ser recolhida, a ferramenta deixa um vazio, ao final da trilha, o furo remanescente (4)

A soldagem se dá pela ação combinada do calor de fricção com a deformação plástica da interface (12). O pino é responsável tanto pela deformação quanto pela geração de calor. O ressalto contribui como fonte adicional de calor friccional e como barreira ao espalhamento do material, forjando a linha à medida que a soldagem prossegue.

A estrutura resultante da Solda por Fricção com Mistura Mecânica no alumínio pode apresentar características bastante variadas de acordo com a liga a ser soldada (13). De qualquer forma, as alterações provocadas são bem menos drásticas que as verificadas em processos de soldagem que envolvem a fusão do material. A **Figura 3** mostra esquematicamente uma macrografia de FSW (14).

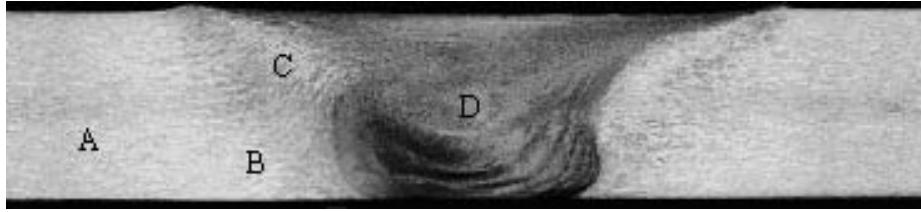


Figura 3. Representação ilustrativa da estrutura resultante do FSW

Define-se:

- Material Base – MB (A) – a temperatura atingida não causa alterações significativas, sendo que as propriedades seguem inalteradas.
- Zona Termicamente Afetada – ZTA (B) - não há deformação plástica, mas a temperatura promove alterações microestruturais, afetando as propriedades.
- Zona Termomecanicamente Afetada – ZTMA (C): há efeitos da temperatura e da deformação mecânica. Os grãos apresentam-se deformados, com recristalização localizada. A temperatura promove a recuperação.
- Centro da Solda ou *Stir Zone* (D): é a região onde o pino penetrou o material. A temperatura e a deformação plástica são suficientes para promover a recristalização dinâmica. Os grãos apresentam-se equiaxiais e refinados.

Verifica-se, ainda, para algumas ligas endurecidas por precipitação, a presença de uma região de menor dureza, localizada entre o centro da solda e a ZTMA, chamada Região de Menor Dureza, ou *Lowest Hardness Zone* (LHZ). Esta zona se diferencia do centro da solda pela não incidência da recristalização, e da ZTMA pela diferente morfologia de precipitação. Há uma alta densidade de discordâncias devido à deformação e total solubilização dos precipitados pré-existentes, sendo portanto favorecida a precipitação da fase β' durante o FSW. Desta forma, o envelhecimento natural não recupera a dureza nesta zona, pois não restam elementos de liga em solução sólida em concentração suficiente, (15).

Keyhole Closure (KHC)

A **Figura 4** mostra o cabeçote desenvolvido para a soldagem pontual por fricção, adaptado para o preenchimento de furo remanescente. A **Figura 5** mostra o equipamento montado no robô Tricept 805, pronto para utilização.



Figura 4. Cabeçote de soldagem para FSpW e KHC.



Figura 5. Cabeçote montado no Tricept 805.

A ferramenta é composta por dois cilindros montados sobre um mesmo eixo concêntrico, encapsulados por uma armação rígida. Estes cilindros são ligados ao eixo rotatório (*spindle*) do robô, que fornece o torque necessário à rotação dos mesmos, em sentidos opostos, gerando o calor friccional. O movimento vertical dos cilindros é controlado manualmente através de uma alavanca existente na lateral do cabeçote.

A principal diferença em relação ao FSpW é que, no KHC, a presença do furo causa uma falta de material. Para compensar este fator, se insere na ferramenta um anel, como mostra a **Figura 6**. Este anel pode ou não ser da mesma composição do material soldado originalmente. A **Figura 7** mostra um furo já preenchido.



Figura 6. Representação do anel sendo colocado na ferramenta

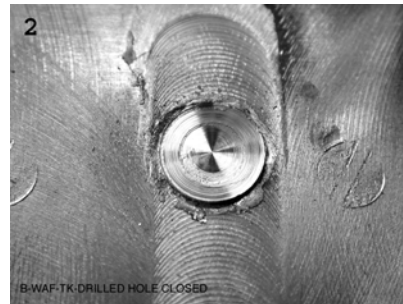


Figura 7. Furo preenchido utilizando o cabeçote de FSpW

Assim que a fricção sobre o anel é suficiente para a sua total plastificação, evidenciada pela estabilização na velocidade de rotação do *spindle*, inicia-se o recolhimento do pino, enquanto o ressalto injeta o material plastificado para dentro do vazio, preenchendo-o. Após o completo preenchimento do furo, pressiona-se o pino sobre a superfície da solda, a fim de consolidá-la.

A **Figura 8** apresenta o processo passo-a-passo.

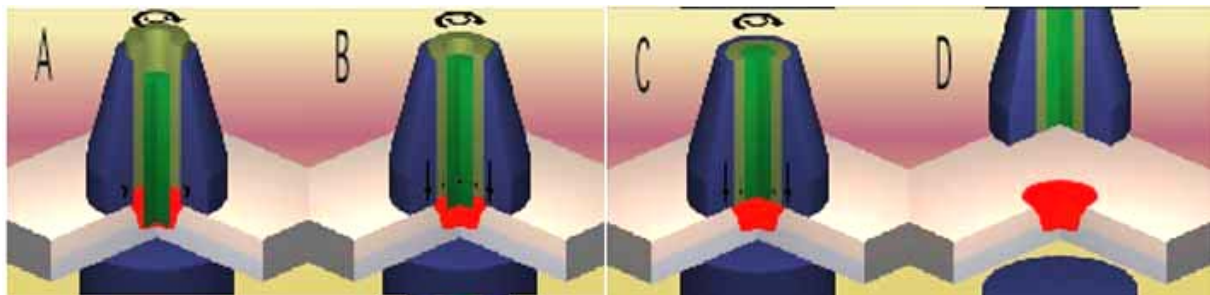


Figura 8. A ferramenta, com o anel assentado, é posicionada com o pino no interior do furo remanescente (A); com a total plastificação do material, recolhe-se do pino, injetando material no furo pela pressão exercida pelo ressalto descendente (B); após o completo preenchimento do furo, aplica-se uma pressão de forjamento pelo pino, para uniformizar a estrutura (C); com o preenchimento é consolidado, o cabeçote é recolhido.

As principais vantagens do método proposto pelo GKSS são a possibilidade de preenchimento fora da linha de soldagem, a simplicidade da ferramenta, que a torna aplicável a dispositivos portáteis e, principalmente, a possibilidade de efetuar o preenchimento em um único ponto, uma vez que a tecnologia de recolhimento de pino, por não fornecer o material necessário ao preenchimento do furo, requer que o recolhimento do pino seja suave ao longo de um trecho relativamente longo de solda, limitando sua aplicação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, foram utilizadas chapas laminadas de alumínio da liga 6056 na condição T4 (solubilizada e envelhecida naturalmente) com 4mm de espessura. A Tabela 1 mostra a composição química em peso da liga utilizada, A Tabela 2 mostra as propriedades mecânicas do material utilizado

Os parâmetros utilizados na avaliação das propriedades mecânicas do processo foram: anel de 2,2mm, rotação de 2000RPM e material de preenchimento Al6056-T4. Preenchimentos com anéis de liga diferentes da série 5xxx também foram para a visualização do fluxo de material durante o processo.

Tabela 1. Composição química em peso da liga de alumínio utilizada.

Al	Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Zn	Ti	Zr	Pb
balanço	0.954	0.764	0.768	0.563	0.24	0.194	0.012	0.11	0.003

Tabela 1. Propriedades mecânicas da liga utilizada – $l_0 = 50\text{mm}$

Tratamento	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Elongação [%]	Microdureza [HV0,2]
T4	224	345	21	100
Como soldado	213,75	304,5	9	85-105

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise Metalográfica

A **Figura 9** mostra um corte transversal de um furo preenchido com Al5xxx, mais claro. A microestrutura é bastante heterogênea, sendo possível definir a existência de pelo menos cinco regiões predominantes: material base, zona termicamente afetada, zona termomecanicamente afetada (sem recristalização), zona termomecanicamente afetada (com recristalização) e uma zona composta pelo material inserido, com um aspecto de “camadas”. Neste caso, não há defeitos aparentes e a junta está consolidada.

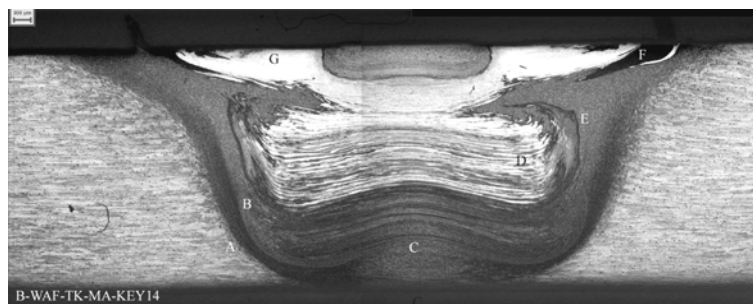


Figura 9. Macrografia de KHC com preenchimento em alumínio da série 5xxx.

A **Figura 10** mostra um corte longitudinal de um KHC preenchido com Al6056. Pode-se distinguir a solda original, à direita do preenchimento, e o material base, à esquerda. As mesmas regiões existentes na **Figura 9** podem ser observadas nesta macrografia, embora se notem algumas diferenças: o centro da solda apresenta uma estrutura com camadas mais refinadas e a raiz apresenta uma estrutura tipo “onion-ring”.

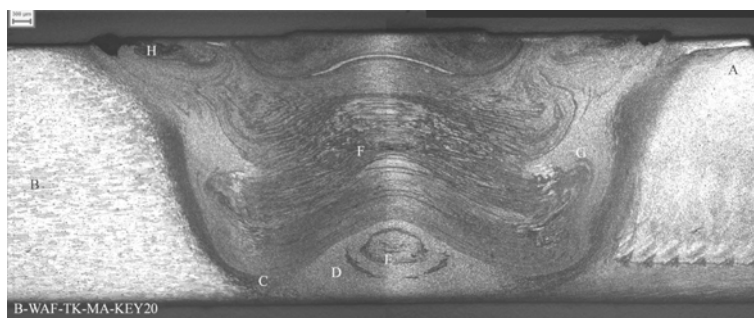


Figura 10. Corte transversal de um KHC com anel de Al6056.

A **Figura 11** mostra detalhes das regiões destacadas na **Figura 10**: as microestruturas anteriores ao processo de KHC, com os grãos equiaxiais e refinados típicos do centro da solda (A) e os grãos alongados oriundos da laminação do alumínio (B); a interface esquerda, completamente consolidada (C), com microestrutura semelhante à solda original (D). Falhas de preenchimento foram verificadas na raiz e no centro da solda (E, F). A interface direita também se encontra perfeitamente consolidada (G); no topo da solda verificou-se o arraste de impurezas, oriundas do desgaste da ferramenta, para o interior da solda (H).

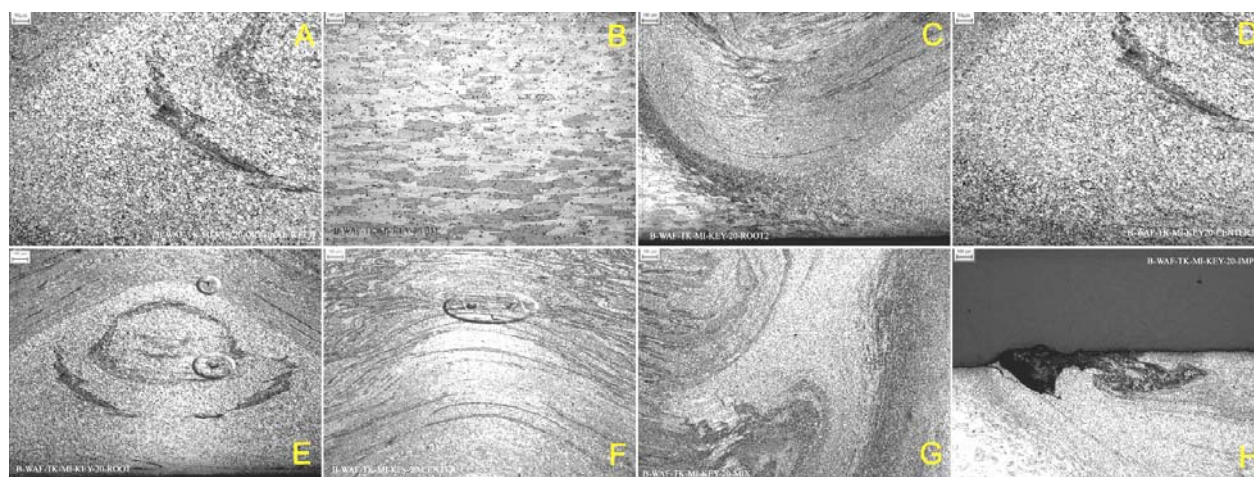


Figura 11. (A) solda original; (B) material base; (C) raiz da solda – interface; (D) raiz da solda - grãos recristalizados; (E) raiz com estrutura tipo "onion ring" - vazio em destaque; (F) centro da solda- falha de preenchimento destacada; (G) interface direita; (H) impurezas arrastadas durante o processo.

As **Figuras 12** e **13** mostram cortes transversais de KHC, soldadas com os mesmos parâmetros, sem ataque químico. Na **Figura 12**, na raiz da solda, defeitos são visíveis ao redor da estrutura tipo "onion-ring", enquanto na **Figura 13** não há defeitos visíveis, evidenciando a atual falta de reprodutibilidade do processo.

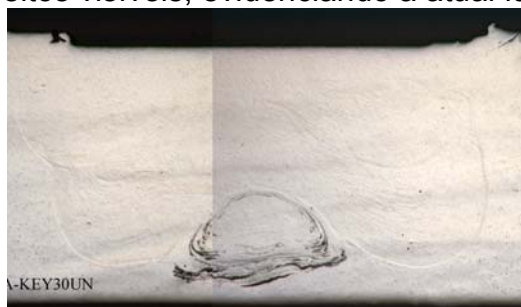


Figura 12. KHC com defeito na raiz.



Figura 13. KHC sem defeitos.

Dobramento

Foram realizados dobramentos furos preenchidos com Al6056, para a determinação da tenacidade das juntas soldadas. Os corpos de prova mostrados nas Figuras 26 e 27 alcançaram 180° com trincamento apenas superficial, mas o corpo de prova mostrado na Figura 25 trincou significativamente com apenas 90°. As Figuras 25, 26 e 27 mostram os cortes transversais destes corpos de prova.

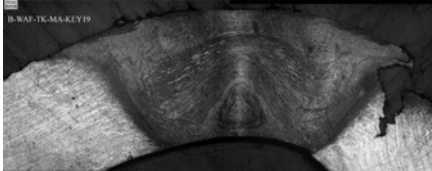


Figura 14. Corte transversal

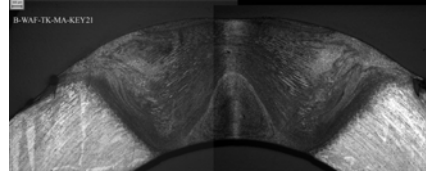


Figura 15. Corte transversal

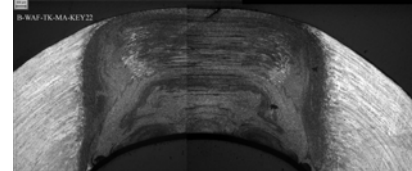


Figura 16. Corte transversal

Mapeamento de Dureza

O mapeamento da dureza revelou a heterogeneidade ao longo da área soldada, já observada na análise metalográfica. Os valores de dureza variaram entre 45 e 100 vickers, como pode ser observado na Figura 17, o que representa perda de até 50% da dureza da solda original.

A menor dureza está localizada na região que é composta por material que se encontrava originalmente nas paredes do furo, como pode ser observado na Figura 9, este material era composto pela periferia do centro da solda e pela ZTMA, contendo também a LHZ. Os valores, embora coerentes com as propriedades desta liga, apresentam uma perda severa de propriedade, demonstrando que o ciclo térmico adicional é excessivo.

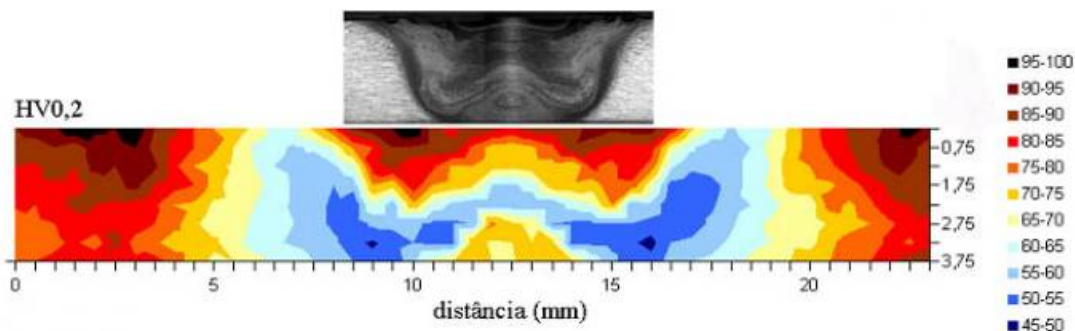


Figura 17. Mapeamento de dureza em KHC preenchido com Al6056.

Ensaio de Tração

Os ensaios de resistência à tração das soldas realizadas apresentaram resultados bastante interessantes, com 90% de eficiência em relação à solda original. Além disso, houve pouca dispersão dos valores. A Tabela 3 apresenta estes resultados. A fratura localizou-se sempre na zona termicamente afetada, demonstrando a consolidação efetiva da junta - Figura 18.

Tabela 3. Resultados do Ensaio de Tração – $l_0 = 50\text{mm}$.

Tratamento	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Elongação [%]
Al6056-T4	224,0	345,0	21
Como soldado	213,7	304,5	9
Key24	199,5	271	5
Key25	199,0	277,5	6
Key26	208	275	6
Média	202	274	5,7



Figura 18. Fratura na ZTA

Fadiga

Em relação à vida em fadiga, o desempenho apresentado foi inferior em relação à solda original. Além disso, os valores apresentaram uma grande variação, chegando a ordem de até 10 vezes para os corpos de prova de alto ciclo, apesar do prévio polimento dos corpos de prova. Esta variabilidade, que pode ser observada na **Figura 19**, se deve à baixa reprodutibilidade observada.

A presença de vazios na solda, embora menos importante na definição das propriedades estáticas, é crítica no que se refere à vida em fadiga do componente, especialmente em alto ciclo, como pode ser verificado na **Figura 20**.

Amostra	N	Fmax [kN]	Fmin [kN]	Fméd [kN]	Ciclos	N
K64	30	3	16,5	300		
K63	30	3	16,5	2100		
K75	30	3	16,5	430		
K66	23	2,3	12,65	63100		
K69	23	2,3	12,65	24400		
K67	23	2,3	12,65	22900		
K68	18	1,8	9,9	176500		
K71	18	1,8	9,9	114500		
K76	18	1,8	9,9	1131760		
K70	18	1,8	9,9	939800		
k73	15	1,5	8,25	337400		
K77	15	1,5	8,25	913200		
k72	15	1,5	8,25	5020600		
K74	15	1,5	8,25	11218000		

Figura 19. Resultados em fadiga para a construção da Curva de Wöhler

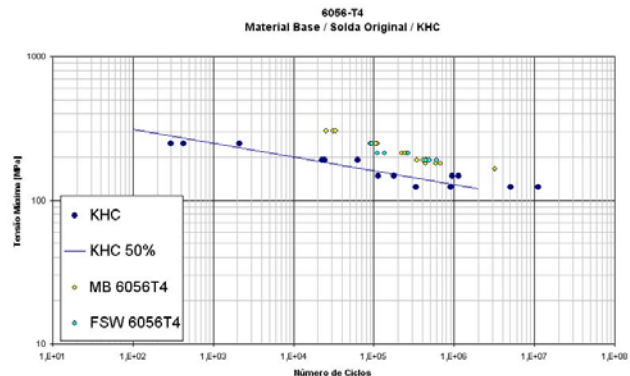


Figura 20. Curva de Wöhler para KHC

Tenacidade à Fratura – CTOD

O centro da solda apresenta uma tenacidade comparável àquela apresentada pelo na solda original, em média. Já a zona termicamente afetada mostra redução na tenacidade em relação à solda original. Estes valores são coerentes com os ensaios de tração e microdureza, que apresentam, respectivamente, propriedades inferiores na ZTA.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para todos os corpos de prova, em ambas as condições, enquanto a Tabela 5 mostra a comparação entre a tenacidade do material base, do KHC e da solda original.

Tabela 0. δ_{max} para o KHC.

Condição	CP	δ_{max} (mm)	K_{max}	a/W
Nugget	Key34	0,33	49,1	0,515
	Key50	0,43	49,1	0,490
	Key52	0,68	54,0	0,505
	Média	0,48	50,7	0,503
ZTA	Key56	0,23	45,6	0,515
	Key57	0,17	45,0	0,510
	Key61	0,18	43,2	0,505
	Média	0,19	44,6	0,510

Tabela 5. Valores comparativos de CTOD - MB, FSW e KHC

CONDIÇÃO	F _{Max} [kN]	δ_{max} [mm]
Material Base	4,2	0,37
Solda Original - Entalhe no Centro da Solda	4,3	0,48
Solda Original - Entalhe na ZTA	3,7	0,32
KHC - Entalhe no Centro da Solda	4,5	0,48
KHC - Entalhe na ZTA	3,9	0,19

CONCLUSÕES

Este trabalho propôs e caracterizou a aplicação da ferramenta FSpW para o KHC, com resultados bastante promissores. Foram obtidos preenchimentos consolidados, em geral livres de defeitos, e com boas propriedades mecânicas. Por outro lado, o controle manual da ferramenta resultou em reprodutibilidade insuficiente, mostrando que a automação da ferramenta é essencial.

As soldas produzidas apresentaram boas propriedades estáticas, em tração dobramento e CTOD no centro da solda. Por outro lado, o ciclo térmico adicional

provocou deterioração importante do material na ZTA, como pôde ser observado no mapeamento de dureza, na tração e no ensaio de tenacidade à fratura nesta região.

Já os resultados obtidos no ensaio de resistência à fadiga, apesar da redução em relação à solda original, mostram que a técnica tem bom potencial.

Complementarmente, mostrou-se que tanto a ferramenta quanto os parâmetros de solda necessitam aprimoramento, garantindo reprodutibilidade e melhores propriedades, tornando-o aplicável a nível prático.

REFERÊNCIAS

- 1 THOMAS W. M. et al **Friction Stir Butt Welding**, US Patent # 5.460.317, Int. Patent Application PCT/GB92/02203, GB Patent Application N° 9125978.8.1991.
- 2 SCHILLING C. **GKSS Patent Application 199 55 737.3-45**, 1999.
- 3 SHEPHERD G. E. **The Evaluation of FSW Joints on Airbus Aircraft Wing Structure**, 4th International Symposium on FSW – Park City, 2003.
- 4 DING J. **Retractable Pin Tool Technology for Friction Stir Welding**, AWS/ASM Trends in Welding Research Conference, 1998.
- 5 JONES, C.S. **FSW of Large Cryogenic Fuel Tanks for Aerospace Applications**, NASA-MSFC – 1999. <<http://www11.msfc.nasa.gov/news/news/photos/2002/photos02-009.html>> acesso em dezembro de 2003.
- 6 HATCH, J. **Aluminum, Properties and Physical Metallurgy** – ASM, EUA, 1984.
- 7 MYHR O.R., GRONG O. **Process Modelling Applied to 6082-T6 Al Weldments – I : Reaction Kinetics**, Acta Metall Mater, Vol 39, #11, pp 2693-2702, 1991.
- 8 REED-HILL R. E., **Physical Metallurgy Principles**, 3^a Edição, PWS Publishing Company, EUA, 1991.
- 9 BLANC C., ROQUES Y., MANKOWSKI G. **Application Of Phase Shifting Interferometric Microscopy To Studies Of The Behaviour Of Coarse Intermetallic Particles In 6056 Aluminium Alloy**, Corrosion Science, Vol40, #6, pp1019-1035, 1998, Elsevier Science Ltda.
- 10 BLANC C., MANKOWSKI G **Susceptibility to Pitting Corrosion of 6056 Aluminium Alloy**, Corrosion Science, Vol 39, #5, pp949-959, 1997, Elsevier Sc Ltd
- 11 McCLURE J. C. et al **Effect of Pin Tool Shape on Metal Flow During Friction Stir Welding**, 6th International Trends in Welding Research Conference Proceedings, 2002. ASM International 2003.
- 12 SHINODA T. et al **Recent Trends of Research and Development of FSW Technology in Japan**, 4th International Symposium in FSW – Park City, 2003.
- 13 THREADGILL, P.L., LEONARD A.J. **Macro and Microstructural Features of Friction Stir Welds in Various Materials**, TWI Internal Report, 1999.
- 14 RHODES C.G., MAHONEY M.W., BINGEL W.H. **Effects of FSW on Microstructure of 7075 Aluminium**, Scripta Materialia, Vol 36, #1, pp69-75, 1997.
- 15 DENQUIN A., et al. **Microstructural Evolution and Strenght Mismatch Within a FSWed 6056 Aluminium Alloy**, 3rd International Symposium in FSW, Kobe, 2001.