



OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM POR FSW DA LIGA DE ALUMÍNIO 2198-T851 APLICADA EM TAILORED BLANKS¹

Ivan Moroz²

Nelson Guedes de Alcântara³

Jorge Fernandez dos Santos⁴

Resumo

A aplicação da soldagem por FSW – *Friction Stir Welding* em ligas de alumínio com diferentes espessuras é bastante desejável nos setores industrial aeroespacial e automobilístico. Com este objetivo foi realizada a otimização dos parâmetros de soldagem por FSW em liga de alumínio 2198-T851, aplicada em *tailored blanks*. Para tanto se variaram os parâmetros de soldagem por FSW: ângulos de soldagem e *offset* do pino, em dois conjuntos de espessuras na configuração *tailored blanks*: (4,2 e 3,5 mm) e (4,2 e 2,5 mm). Como critérios para determinação da solda de melhor qualidade foram realizadas caracterização macro e microestrutural (MO), ensaios de tração e de microdureza. Resultados mostraram que a variação de parâmetros de soldagem afeta as propriedades mecânicas das soldas, sendo que em algumas amostras observou-se a presença de defeitos. Também foram obtidas soldas com desempenho mecânico igual ou superior ao do metal base, salvo para valores de alongamento.

Palavras-chave: *Friction stir welding (FSW); Tailored blanks; Soldagem.*

OPTIMIZING FSW WELDING PARAMETERS OF ALUMINUM ALLOY 2198-T851 APPLIED IN TAILORED BLANKS CONFIGURATION

Abstract

The application of FSW - Friction Stir Welding in aluminum alloys with different thicknesses is quite desirable in the aerospace and automobile industrial sections. With this objective the optimization of the welding parameters was accomplished by FSW in the aluminum alloy 2198-T851, applied in tailored blanks. For so much the welding parameters were varied by FSW: welding angles and offset of the pin, in two groups of thicknesses in the configuration tailored blanks: (4,2 and 3,5 mm) and (4,2 and 2,5 mm). As criteria for determination of the weld of better quality, macro and microstructural characterization, tensile and microhardness testing were accomplished. Results showed that the variation of welding parameters affects the mechanical properties of the welds, and in some samples the presence of defects was observed. Welds with equal or better mechanical behavior than that of the base metal were obtained, except for elongation values.

Keywords: Friction stir welding; Tailored blanks; Welding.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Estudante do Dep. de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar, Rodovia Washington Luís, km 235. Caixa Postal 676 – 13565-905 – São Carlos, SP, Brasil. ivanmrz@gmail.com

³ Professor Adjunto IV PhD do Dep. de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar. Rodovia Washington Luís, km 235. Caixa Postal 676 – 13565-905 – São Carlos, SP, Brasil. nelsong@ufscar.br

⁴ Líder do grupo de soldagem do instituto GKSS Forschungszentrum GmbH. Joining Technology Group – Max-Planck-Str.1.D21502 – Geesthacht, Alemanha. Jorge.dos.santos@gkss.de

1 INTRODUÇÃO

Os setores industriais aeroespacial e automobilístico têm demonstrado crescente desenvolvimento nas últimas décadas, com grande parte dos investimentos direcionados à redução de peso dos veículos e conseqüente redução de consumo de combustível. Nesse contexto, ligas de Alumínio e processamentos relacionados têm sido largamente pesquisados,⁽¹⁻⁹⁾ em especial, ligas de Alumínio-Lítio já que apresentam características de alta resistência mecânica e baixa densidade.⁽¹⁰⁻¹²⁾

Processos de soldagem aplicados em ligas de alumínio, quando envolvem fusão, tendem a gerar defeitos como trinca a quente, porosidade, vazios de contração, entre outros. Sem envolver fusão, um processo inovador de soldagem é o FSW - *Friction Stir Welding*, desenvolvido na década de 90 pelo *The Welding Institute*.⁽¹³⁾ FSW é um processo de soldagem no estado sólido, atingindo, em geral, temperaturas inferiores a 500°C.⁽¹⁴⁾

Nesse processo, a energia para o aquecimento do material é fornecida por uma ferramenta rotativa, composta de um pino (porção da ferramenta que penetra nas superfícies a serem soldadas) que emerge da base da ferramenta, e o *shoulder*, que exerce leve pressão sobre as superfícies.

A energia gerada leva à formação de uma zona de metal "amolecido", que não pode escapar devido à pressão exercida pelo *shoulder*. Desse modo, com o movimento transversal da ferramenta, o material amolecido presente no lado de retrocesso é arrastado (já que o movimento do pino, nessa região, é contrário ao movimento transversal) para o lado de avanço. A Figura 1 mostra um desenho esquemático do processo.

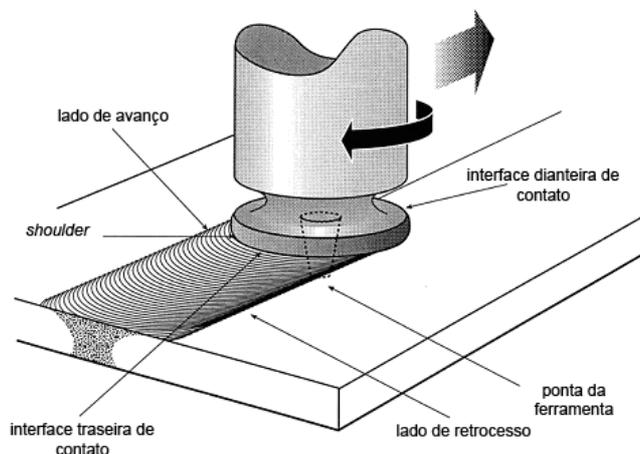


Figura 1. Esquema do processo de FSW - *Friction Stir Welding*.⁽¹⁵⁾

O processo FSW também apresenta viabilidade quando aplicado à tecnologia *tailored blanks*, que consiste na união de chapas de espessuras diferentes, ou mesmo de materiais dissimilares,⁽⁵⁾ possibilitando a combinação de propriedades diversas em regiões diferentes de uma peça. Em geral, podem-se estampar as chapas individualmente e soldá-las em seguida, porém, a aplicação de FSW para unir as chapas e proceder a uma só estampagem geralmente leva a redução de custos de produção.⁽²⁾

O objetivo deste trabalho foi determinar valores ótimos dos parâmetros de soldagem por FSW da liga de Alumínio 2198-T851, aplicada em *tailored blanks*, para dois conjuntos de espessuras diferentes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As soldas por FSW foram produzidas no instituto alemão GKSS, através do robô Neos Tricept TR 805, capaz de mover-se em cinco eixos centrais, controlado por um sistema CNC. Estas soldas foram realizadas em chapas da liga de alumínio 2198-T851, para dois grupos de chapas de diferentes espessuras. As quatro soldas de um grupo envolveram chapas de 4,5 mm e 3,2 mm, sendo o outro grupo composto de 3 soldas realizadas em chapas de 4,5 mm e 2,5 mm. Para os dois grupos, o lado de avanço foi a chapa de menor espessura, em estado laminado.

O pino utilizado em todas as soldas tinha 5 mm de diâmetro, confeccionado em aço ferramenta. O rebaixo do pino (*shoulder*), feito de titânio, tinha diâmetro de 15 mm. A fixação das placas, de modo a evitar a separação das mesmas, foi feita através de utilização de mesa de vácuo e fixação mecânica.

A Tabela 1 mostra a composição química da liga utilizada.

Tabela 1. Composição química da liga (% em peso)

Elemento	Li	Cu	Mg	Zr	Si	Fe	Mn	Ag	Zn	Al
%	1,0	3,2	0,31	0,076	0,03	0,046	0,005	0,27	0,014	balanço

Os parâmetros de processo “velocidade transversal de soldagem”, “velocidade rotacional” e “força aplicada” foram constantes para todas as amostras, e iguais a 250 mm/min, 600 rpm e 10 kN, respectivamente. Os demais parâmetros estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de processo utilizados

Amostra	Espessuras LA / LR *[mm]	Ângulo X [°]	Ângulo Y [°]	Comprimento do Pino [mm]	Offset do Pino [mm]
Amostra 1	3.2 / 4.5	-2.0	+0.5	3.1	0.0
Amostra 2	3.2 / 4.5	-3.5	+0.5	3.1	+1.0 p/ LR
Amostra 3	3.2 / 4.5	-3.0	+1.0	3.1	+1.5 p/ LR
Amostra 4	3.2 / 4.5	-3.0	+2.0	3.1	+1.5 p/ LR
Amostra 5	2.5 / 4.5	-2.5	+1.5	2.5	+1.5 p/ LR
Amostra 6	2.5 / 4.5	-3.0	+2.0	2.5	+1.5 p/ LR
Amostra 7	2.5 / 4.5	-3.0	+2.5	2.5	+1.5 p/ LR

*LA: lado de avanço; LR: lado de retrocesso.

Os ângulos X e Y, citados na Tabela 2, são, respectivamente, em relação à direção de movimento transversal do robô e à direção perpendicular àquela de movimento transversal, como esquematizado na Figura 2. Os sinais algébricos utilizados obedecem à regra da mão direita.



Figura 2. Ângulos de soldagem X e Y.

O parâmetro “*offset* do pino” representa o deslocamento do eixo da ferramenta de soldagem em direção perpendicular à linha de contato entre as chapas a serem soldadas.

As amostras metalográficas foram seccionadas utilizando-se discos de corte por abrasão e resfriamento por água. O embutimento foi realizado com resinas poliméricas auto-curáveis, e o processo de lixamento envolveu *meshs* #320, #600, #800, #1.000 e #1.200. Para o polimento, foram utilizadas soluções de suspensão de diamante de granulometrias de 3 μm e 0,5 μm . As microestruturas foram evidenciadas via ataque químico com reagente de Keller por 30 segundos e então observadas ao microscópio óptico.

As medidas de microdureza foram realizadas na linha central da seção transversal das soldas, utilizando-se carga de 200 gf e tempo de 10 segundos, com distância entre indentações de 500 μm .

Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, de acordo com a norma DIN 50122, com velocidade de deslocamento do travessão de 0,5 mm/min. A deformação dos corpos de prova foi medida com o auxílio de extensômetro a laser.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 METALOGRAFIA

Com o intuito de verificar, primeiramente, a presença de defeitos macroscópicos, foram obtidas macrografias das amostras. O aumento utilizado para a composição das imagens foi de 16 vezes.

A Figura 3 mostra os defeitos observados, e indica em quais amostras a presença de defeitos foi verificada.

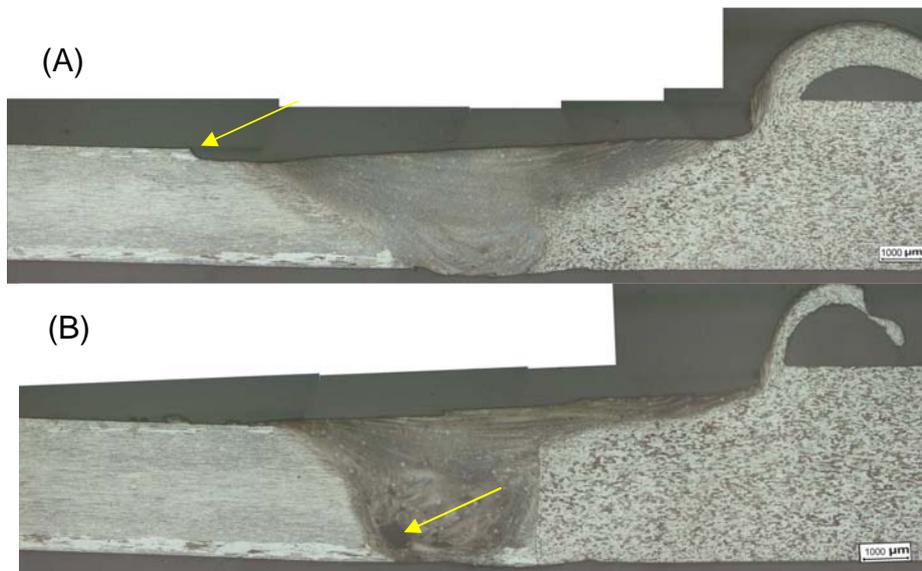


Figura 3. (A): Defeito na superfície, observado para as amostras 1, 3, 6 e 7; (B): Região de vazio no centro da solda, presente na amostra 2.

O defeito apontado na Figura 3A, presente no lado de avanço, é representativo para as amostras em que foi encontrado. Em função dos parâmetros utilizados, formam-se descontinuidades (possíveis concentradores de tensões) na superfície superior. O defeito visto no lado de retrocesso, nas Figuras 3A e 3B, é conhecido como *flash*; segundo Threadgill et al.,⁽¹⁴⁾ está associado a excesso no *input* de energia durante o processo de FSW, e nem sempre é considerado prejudicial.

Segundo o mesmo autor,⁽¹⁴⁾ a técnica de FSW pode ser entendida como um processo onde forma-se uma cavidade atrás da ferramenta de soldagem, que deve ser preenchida por material plastificado arrastado da parte da frente do pino até essa cavidade (devido ao movimento de rotação do pino).

Se essa cavidade formada não for preenchida, devido a fluxo insuficiente de material, pode haver formação de defeitos em túnel, como aquele visto na Figura 3B. Esse tipo de defeito pode resultar de parâmetros inadequados de processo, tais como alta velocidade de soldagem ou baixa pressão (força aplicada), e pode comprometer seriamente a qualidade da solda. O conjunto de parâmetros utilizados para a Amostra 2 não levou a uma condição satisfatória de fluxo de material.

De forma geral, as amostras apresentaram microestruturas semelhantes, não havendo diferença significativa de tamanho de grão de amostra para amostra. A Figura 4 é, portanto, representativa e apresenta a microestrutura resultante na seção transversal das soldas.

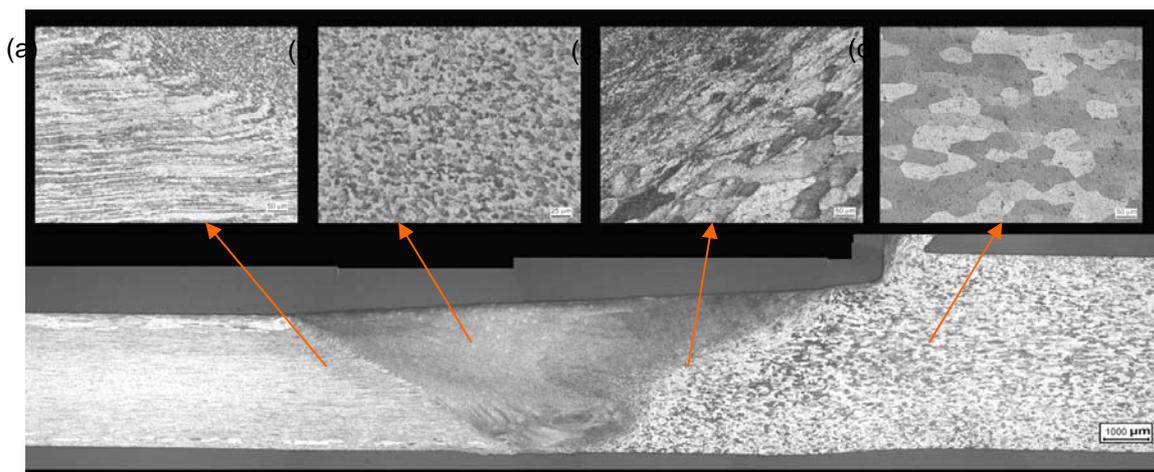


Figura 4. Imagem representativa da microestrutura resultante na seção transversal das soldas. (a): TMAZ, lado de avanço; (b) *nugget*; (c) TMAZ, lado de retrocesso; (d) metal base.

A variação microestrutural decorrente do processo de FSW em ligas de alumínio tem sido amplamente descrita na literatura.^(1,4,7,8,11,14) Por ser um bom condutor de calor, cada região do metal está sujeita a ciclos térmicos diferentes, levando à formação de zonas características na seção transversal da solda.

De forma geral, a região central da solda (*nugget*) apresenta microestrutura de grãos equiaxiais, de tamanho refinado (da ordem de alguns micrômetros), formados por recristalização (predominantemente dinâmica) devido ao efeito conjunto de altas deformações e temperaturas.⁽¹⁴⁾ Em especial, para a liga 2198, Cavaliere *et al.*,⁽¹⁰⁾ detetaram a presença de precipitados dos tipos θ' (Al_2Cu) e δ' (Al_3Li) nessa região, em formato esférico e de dimensões mais refinadas que aqueles presentes nas outras regiões. Os precipitados do tipo T1 (Al_2CuLi), principais endurecedores do material base (no formato de placas finas) são dissolvidos durante o processo e não são encontrados nessa região.

Adjacente ao *nugget* há a zona termomecanicamente afetada (TMAZ - *thermomechanically affected zone*). Essa região sofre influência térmica e mecânica do processo de soldagem, apresentando variação na orientação dos grãos (aproximadamente 90°) e recuperação dos mesmos, além de recristalização parcial. Nessa região, Cavaliere *et al.*,⁽¹⁰⁾ detetaram, para a liga 2198, precipitados dos tipos θ' (Al_2Cu), δ' (Al_3Li) e T1 (Al_2CuLi), em formato alongado e presentes no interior dos grãos.

Entre o metal base e a TMAZ encontra-se a zona termicamente afetada (ZTA, ou HAZ - *heat affected zone*). Nessa região não há evidência de influência mecânica, e a influência térmica pode causar aumento do tamanho de grão médio. Para a liga 2198, foi observada a presença dos mesmos precipitados da TMAZ, mas em formato arredondado e distribuídos no interior e no contorno dos grãos.⁽¹⁰⁾

O tamanho de grão médio variou entre ASTM 5 (diâmetro médio aproximado de $63,5 \mu\text{m}$), no metal base, e ASTM 11 (diâmetro médio aproximado de $7,9 \mu\text{m}$) no *nugget*. As classificações foram feitas segundo a norma ASTM E112.

3.2 Microdureza

A Figura 5 apresenta os perfis de microdureza obtidos para as amostras do grupo com chapas de 4,5 mm e 3,2 mm de espessura.

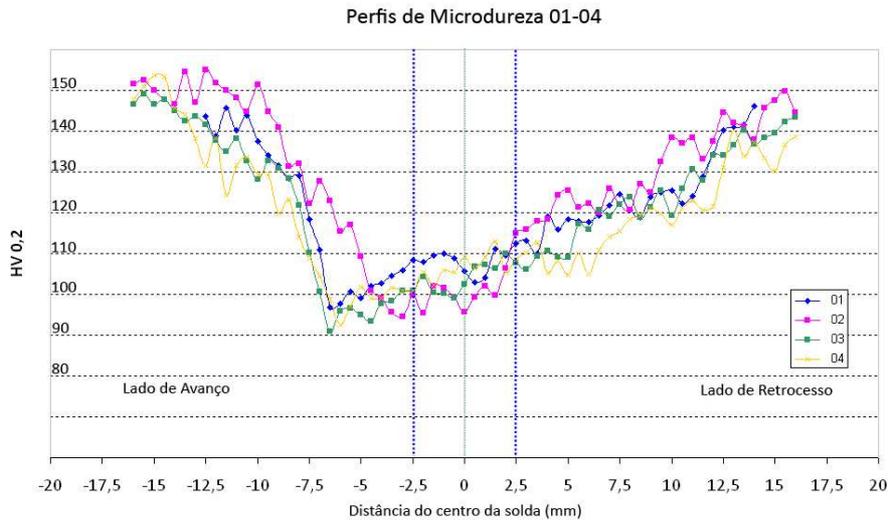


Figura 5. Comparação dos perfis de microdureza obtidos para as amostras do grupo com chapas de 4,5 mm e 3,2 mm de espessura.

Os perfis de microdureza observados condizem com aqueles vistos na literatura.⁽¹²⁾ Nota-se que, embora a amostra 02 tenha apresentado valores mais altos de dureza, não há diferença significativa no formato do perfil, de amostra para amostra. Na Figura 6, observam-se os perfis obtidos para as amostras do grupo com chapas de 4,5 mm e 2,5 mm de espessura.

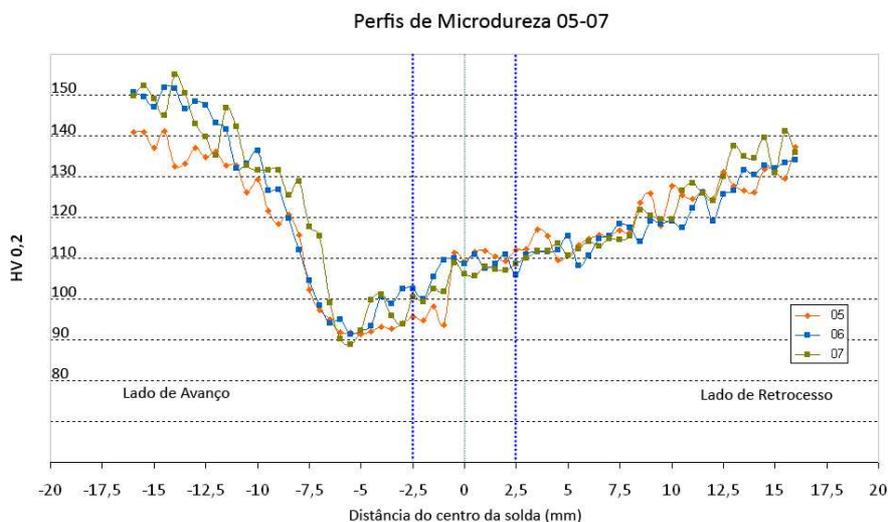


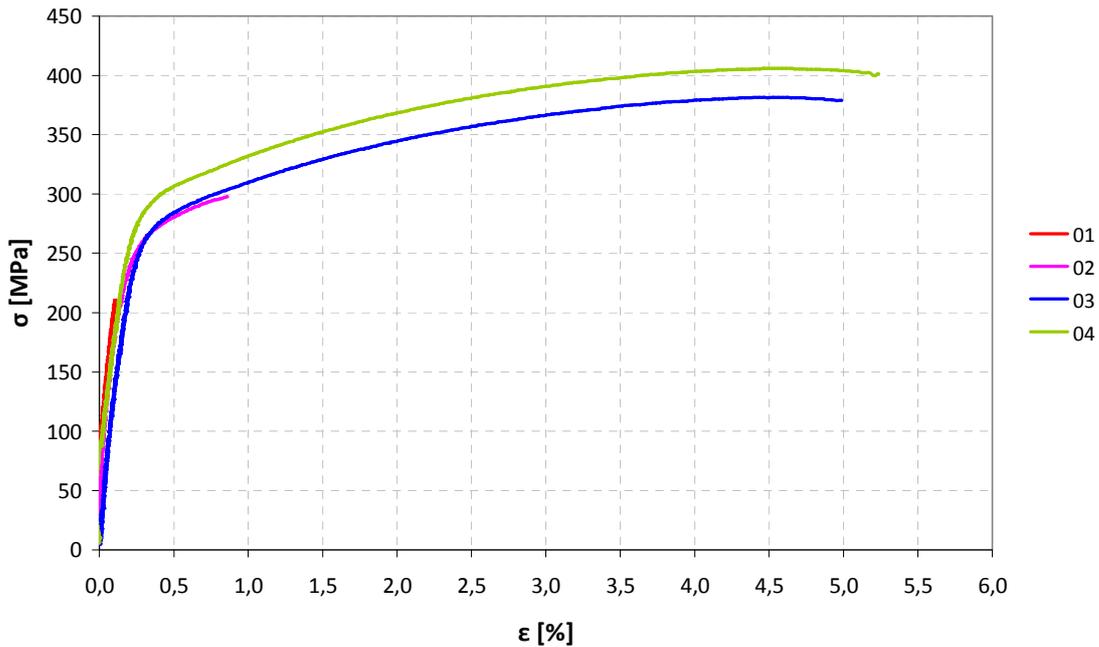
Figura 6. Comparação dos perfis de microdureza obtidos para as amostras do grupo com chapas de 4,5 mm e 2,5 mm de espessura.

Novamente, pode-se afirmar que não há diferenças significativas entre os perfis observados. Embora o metal de base no lado de avanço estivesse encruado, devido à laminação, observa-se queda de microdureza a aproximadamente 5 mm do centro da solda, para todas as amostras, exceto para a amostra 2. Estudos para essa liga^(10,12) já detetaram essa característica, e análises por microscopia eletrônica de transmissão demonstraram haver, nessa região, zonas livres de precipitados devido a um superenvelhecimento, explicando a queda de dureza.

3.3 Ensaios de Tração

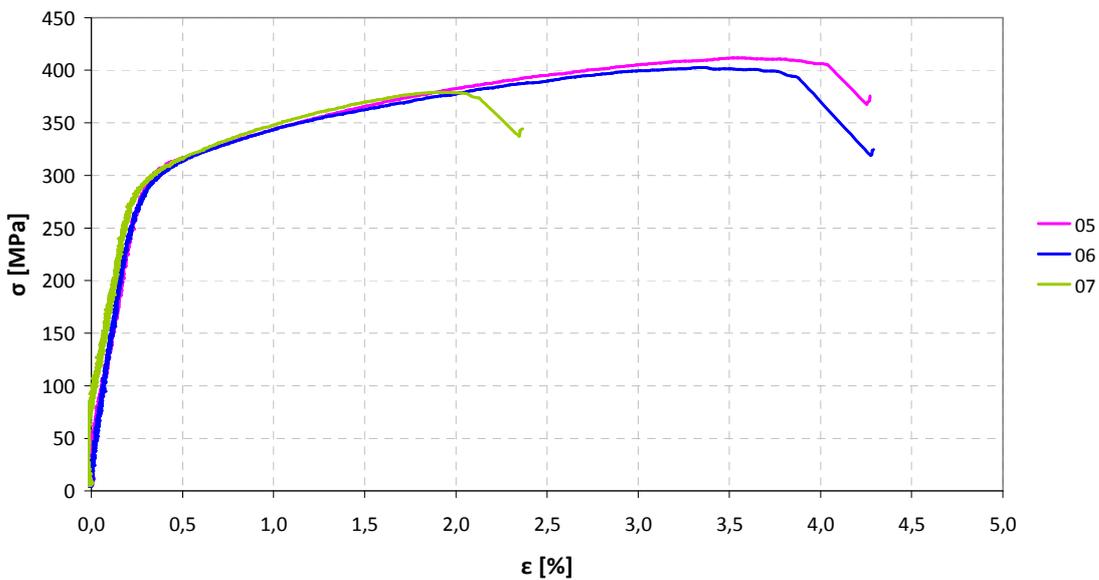
Foram ensaiados cinco corpos de prova de cada amostra com carregamento em sentido perpendicular às soldas. Os resultados obtidos não apresentaram variação significativa entre os corpos de prova de cada amostra; desse modo, a Figura 7 mostra curvas representativas das amostras, além da curva obtida para o metal base na direção transversal ao sentido de laminação.

Tensão x Deformação - Amostras 01-04



(a) Amostras do grupo com chapas de 4,5 e 3,2 mm de espessura.

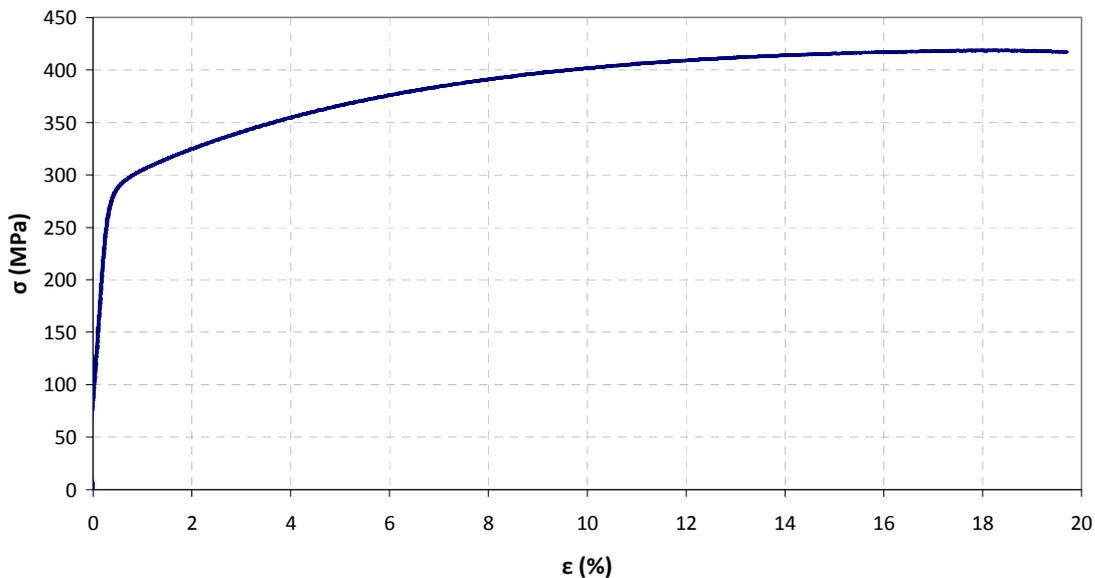
Tensão x Deformação - Amostras 05-07



(b) Amostras do grupo com chapas de 4,5 e 2,5 mm de espessura.



Metal Base AA2198 - Transversal



(c) Metal base, direção transversal ao sentido de laminação.

Figura 7. Gráficos de tensão versus deformação, obtidos dos ensaios de tração realizados nas amostras e no metal base.

Foram determinados os valores médios de tensão de escoamento (σ_{YS}), limite de resistência à tração (σ_{US}) e alongamento (**A**) para cada amostra. Esses valores, bem como as propriedades do metal base, estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios de propriedades mecânicas das amostras e metal base

Amostra	σ_{YS} [MPa]	σ_{US} [MPa]	A (%)	Região onde ocorreu a fratura
Amostra 1	—	219.9	0.04	Nugget
Amostra 2	267.7	273.0	0.49	Nugget
Amostra 3	281.0	381.6	4.57	Interface nugget/TMAZ – lado de avanço
Amostra 4	299.2	405.5	4.97	Interface nugget/TMAZ – lado de avanço
Amostra 5	315.0	411.5	4.07	Nugget
Amostra 6	312.2	396.3	3.28	Nugget
Amostra 7	307.2	376.1	2.22	Nugget
Metal Base	288.2	416.5	19.92	—

Não foram encontrados resultados de propriedades mecânicas, especificamente para essa liga e processo, na literatura. Os valores médios obtidos para as amostras foram comparados com aqueles do metal base, em termos de eficiência, e dispostos graficamente como mostra a Figura 8.

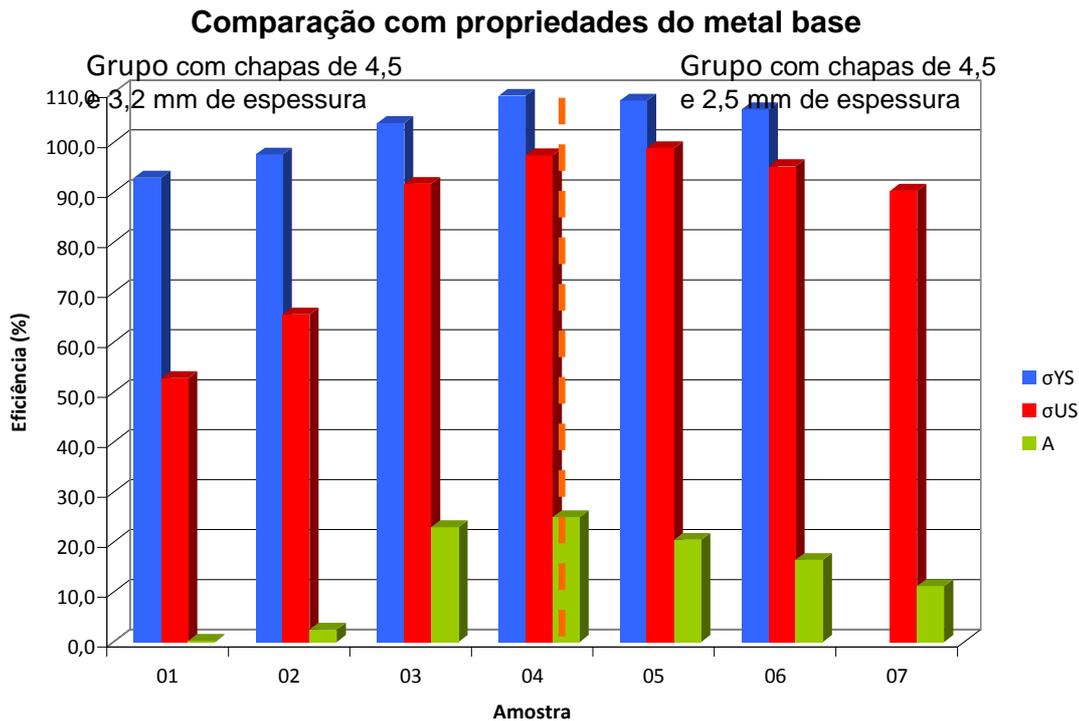


Figura 8. Valores médios das amostras em comparação com propriedades do metal base.

As amostras 04 e 05 apresentaram, à exceção do alongamento, propriedades mecânicas iguais ou superiores àsquelas do metal base, sendo consideradas as de melhor desempenho nesse estudo. Esse desempenho provavelmente tem relação com a ausência de defeitos em ambas as amostras, já que as microestruturas observadas para todas as amostras não foram significativamente diferentes.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou que a variação dos parâmetros “ângulos de soldagem” e “*offset do pino*” altera as influências mecânica / térmica sobre a junta soldada de liga de alumínio 2198 em configuração *tailored blanks*.

A correta definição desses parâmetros, com base nos resultados obtidos, permite a obtenção de soldas com propriedades mecânicas iguais ou superiores (à exceção do alongamento total na ruptura) àsquelas do metal base, indicando ser viável e satisfatória a utilização do processo nessa situação.

Agradecimentos

Aos integrantes do corpo técnico do GKSS – Forschungszentrum, Alemanha que participaram, direta ou indiretamente, da elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Barcellona A, Buffa G, Fratini L, Palmeri D. On microstructural phenomena occurring in friction stir welding of aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 177 (2006): 340-343.



- 2 Davies R. W., Oliver H. E., Smith M. T., Grant G. J. Characterizing Al Tailor Welded Blanks for Automotive Applications. JOM – Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 1999.
- 3 Lombard H, Hattingh DG, Steuwer A, James MN. Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy. Engineering Fracture Mechanics 75 (2008): 341-354.
- 4 Zadpoor AA, Sinke J, Benedictus R. The effects of friction stir welding on the mechanical properties and microstructure of 7000 series aluminium tailor-welded blanks. Int J Mater Form (2008) Suppl 1: 1311-1314.
- 5 Buffa G, Fratini L, Hua J, Shivpuri R. Friction Stir Welding of Tailored Blanks: Investigation on Process Feasibility. Annals of the CIRP, Vol. 55/1/2006.
- 6 Hattingh DG, Blignault C, van Niekerk TI, James MN. Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool. Journal of Materials Processing Technology 203 (2008): 46-57.
- 7 Jata KV, Semiatin SL. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. Scripta Materialia 43 (2000): 743-749.
- 8 Kamp N, Sullivan A, Tomasi R, Robson JD. Modelling of heterogeneous precipitate distribution evolution during friction stir welding process. Acta Materialia 54 (2006): 2003-2014.
- 9 Lee W-B, Yeon Y-M, Jung S-B. The joint properties of dissimilar formed Al alloys by friction stir welding according to the fixed location of materials. Scripta Materialia 49 (2003): 423-428.
- 10 Cavaliere P, Cabibbo M, Panella F, Squillace A. 2198 Al-Li plates joined by friction stir welding: mechanical and microstructural behavior. Materials and Design 30 (2009): 3622-3631.
- 11 Fonda RW, Bingert JF, Colligan KJ. Development of grain structure during friction stir welding. Scripta Materialia 51 (2004): 243-248.
- 12 Cavaliere P, De Santis A, Panella F, Squillace A. Effect of anisotropy on fatigue properties of 2198 Al-Li plates joined by friction stir welding. Engineering Failure Analysis 16 (2009): 1856-1865.
- 13 Thomas WN, Nicholas ED, Needham JC, Church MG, Templesmith P, Dawes CJ. International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8.
- 14 Threadgill PL, Leonard AJ, Shercliff HR, Withers PJ. Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews, vol. 54 (2009), no 2, 49-93.
- 15 Thomas WM, Nicholas ED. Friction stir welding for the transportation Industries. *Materials & Design*, Vol. 18, Nos. 4-6, 1997: 269-73.