

Caracterização Microestrutural e Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio 2198-T851 em Configuração Tailored Blank Soldada por FSW – Friction Stir Welding

(Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Aluminum Alloy 2198-T851 in Tailored Blank Configuration Welded by FSW – Friction Stir Welding)

Ivan Moroz¹, Nelson Guedes de Alcântara¹, Jorge Fernandes dos Santos²

¹Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, SP, Brasil
E-mails: ivanm@ccdm.ufscar.br; nelsong@ufscar.br

²Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Solid State Joining Processes, Geesthacht, Schleswig-Holstein, Alemanha
E-mail: jorge.dos.santos@hzg.de

Resumo

Nos setores industriais relacionados à aeronáutica e automobilística, tem-se buscado o desenvolvimento e a aplicação de ligas metálicas leves com o intuito da redução de massa dos produtos e consequente redução do consumo de combustível. Por suas dimensões e requisitos estruturais, componentes e seções de aviões e automóveis são produzidos através da união por processos de soldagem por fusão. Entretanto, processos de soldagem no estado sólido são preferíveis por evitar defeitos decorrentes da fusão, e têm sido objeto de estudo nas últimas duas décadas. Este trabalho teve por objetivo a caracterização de uma solda por FSW - Friction Stir Welding em junta de topo, da Liga de Alumínio 2198-T851 com espessuras diferentes (configuração "Tailored Blanks"). A metodologia utilizada na caracterização envolveu a determinação das propriedades mecânicas das juntas soldadas, compreendendo ensaios de tração e determinação de perfil de microdureza na seção transversal; e buscou-se compreender a relação entre as alterações microestruturais promovidas pelo processo de soldagem e as propriedades resultantes. Concluiu-se que, devido aos fenômenos metalúrgicos decorrentes do processo de soldagem utilizado, alterações microestruturais tais como refino de grão, encruamento e dissolução/formação de fases precipitadas permitiram a obtenção de uma solda cujas propriedades mecânicas de tração (salvo alongamento) igualaram-se a ou excederam aquelas do metal base, evidenciando a viabilidade de utilização dos parâmetros de soldagem por FSW utilizados neste trabalho.

Palavras-chave: FSW, Friction Stir Welding, Liga de Alumínio 2198-T851, Tailored Blanks, Soldagem.

Abstract: In both aeronautic and automobile related industries, development and application of light-weighted metallic alloys have been pursued with the intention of reducing product weight and consequent fuel consumption. Due to their dimension and structural requirements, components and sections from airplanes and automobiles are produced through fusion-based welding processes. Still, solid-state based joining processes are preferable because they avoid defects intrinsic to fusion, and have therefore been an object of study in the last couple of decades. The objective of this work was the characterization of a friction stir welded (FSW) butt-joint of aluminum alloy 2198-T851 in tailored blanks configuration (sheets with different thicknesses). The methodology in which characterization was based involved the study of mechanical properties, through tensile tests and cross-section microhardness profiles determination, and the comprehension of the relation between microstructural changes caused by the welding process and resulting properties was sought. It was concluded that, due to metallurgical phenomena induced by the welding process, microstructural changes such as grain refinement, work-hardening and dissolution/formation of second phases as precipitates granted the attainment of a weld whose mechanical properties in tension (except elongation) equaled or exceeded those of base material, showing the feasibility of using the FSW parameters considered in this work.

Key-words: FSW, Friction Stir Welding, Aluminum Alloy 2198-T851, Tailored Blanks, Welding.

1. Introdução

Uma característica marcante da evolução da sociedade humana é o conceito de globalização, decorrente principalmente da otimização dos meios de contato e trocas de informações e da

crescente facilidade de locomoção, permitindo o deslocamento de centenas de quilômetros em questão de horas.

Diretamente ligados a essa evolução, setores industriais de meios de transporte, em particular o aeroespacial e o automobilístico, têm sua pesquisa e desenvolvimento beneficiados com investimentos de alto porte com diversos intuitos, quais sejam retorno financeiro de empresas de transporte aéreo comercial ou fabricação de aeronaves/automóveis de alto desempenho.

(Recebido em 29/02/2012; Texto final em 02/03/2012).
Artigo originalmente publicado no CONSOLDA 2011

Por outro lado, a utilização das tecnologias citadas demanda energia, que na atualidade é principalmente obtida de fontes não renováveis (como combustíveis fósseis). Há, nesse sentido, interesses comercial e ecológico na melhoria da eficiência (redução de consumo de energia) de aeronaves e automóveis.

Na área de engenharia de materiais, busca-se o desenvolvimento de ligas metálicas que combinem baixa densidade e propriedades mecânicas satisfatórias, que atendam aos critérios de segurança exigidos. Ligas de alumínio, por apresentarem as características desejadas, vem sendo objeto de pesquisa [1-9], em especial ligas de alumínio-lítio [10-12], que mantém essas características mesmo em baixas temperaturas. A adição de 1% em peso de Lítio gera, aproximadamente, uma redução de 3% na densidade da liga, além de aumentar o módulo elástico em cerca de 6% [13].

Processos de soldagem mais antigos, como Plasma, TIG, MIG e eletrodo revestido, quando aplicados em ligas de alumínio, tendem a gerar defeitos decorrentes da fusão envolvida, como trinca a quente, porosidade, vazios de contração, entre outros. A busca de novos processos que operam no estado sólido levou ao desenvolvimento de um processo inovador, ocorrido na década de 90 no *The Welding Institute*, denominado *FSW – Friction Stir Welding* [14], que não envolve processo de fusão, atingindo em geral temperaturas inferiores a 500 °C [15].

A energia térmica envolvida no processo FSW é gerada a partir de energia de fricção, proveniente do movimento relativo entre as chapas (ou outras geometrias) a serem soldadas e a ferramenta de soldagem, composta por um pino (parte da ferramenta que penetra no material base) e a base da ferramenta, denominada *shoulder*. A ferramenta apresenta movimento rotacional e transversal, além de força axial pressionando-a contra as superfícies soldadas.

Durante o processo, não há fusão da ferramenta ou do material base, mas a energia gerada é suficiente para causar a formação de uma zona de metal “amolecido” (*plasticized metal*). Nessa condição, o movimento rotacional do pino leva ao arraste de material do lado de retrocesso para o lado de avanço, já que o *shoulder*, em contato com as superfícies, impede o fluxo de material para fora da região de contato. Um desenho esquemático do processo pode ser visto na Figura 1.

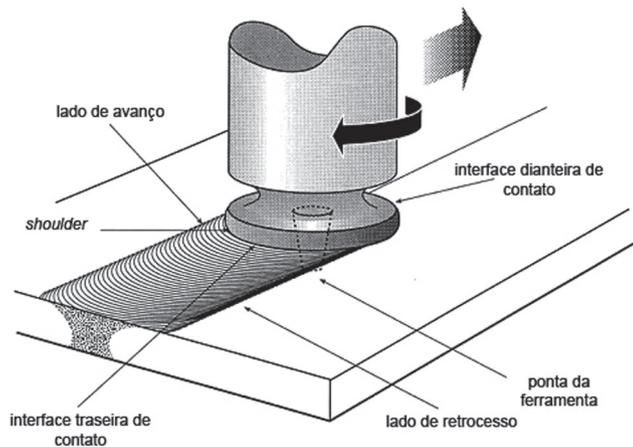


Figura 1. Ilustração do processo Friction Stir Welding – FSW [16].

Desde o desenvolvimento desse processo, a viabilidade de sua utilização foi pesquisada para diferentes ligas [3,4,10] e configurações geométricas [2,5,6,9]. Dentre essas condições, provou-se a viabilidade de sua aplicação na tecnologia *tailored blanks*, que designa a junção de chapas de diferentes espessuras (ou mesmo de materiais dissimilares) [5], tornando possível a combinação de propriedades diversas em regiões distintas de uma mesma peça. Em caso de chapas, pode-se primeiramente conformá-las mecanicamente e soldá-las em um segundo momento, mas é economicamente mais vantajoso realizar a soldagem inicialmente e então realizar uma única conformação [2].

Tão importante quanto a comprovação da qualidade das soldas obtidas (através de ensaios mecânicos) é a compreensão dos fenômenos metalúrgicos presentes durante o processo, que variam de situação para situação. A motivação deste trabalho é avaliar uma solda de ótima qualidade e, nessa condição, buscar entender, através de caracterização microestrutural, mecânica e correlação com dados da literatura, a relação que há entre os ciclos térmicos/mecânicos a que as regiões da solda são submetidas, as alterações microestruturais decorrentes do processo e as propriedades apresentadas pela junta soldada.

2. Materiais e Métodos

A solda por FSW caracterizada neste estudo foi produzida no instituto alemão GKSS (atualmente chamado HZG), utilizando um robô Neos Tricept TR 805, capaz de mover-se em cinco eixos centrais, controlado por um sistema CNC. As chapas soldadas no processo eram da liga de alumínio 2198-T851, tendo a chapa do lado de retrocesso 4,5 mm de espessura e 3,2 mm de espessura o lado de avanço, cuja chapa foi laminada.

O pino utilizado no processo tem 3,1 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro, e o rebaixo do pino (*shoulder*) tem diâmetro de 15 mm. A fixação das chapas, de modo a evitar sua separação/movimentação, foi feita através de utilização de mesa de vácuo e fixação mecânica. A composição química da liga utilizada pode ser vista na Tabela 1.

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.

A amostra metalográfica foi seccionada utilizando-se discos de corte por abrasão e resfriamento com água. O embutimento foi realizado com resina polimérica auto-curável, e o processo de lixamento envolveu *meshs* #320, #600, #800, #1000 e #1200. Para o polimento, foram utilizadas soluções de suspensão de diamante de granulometrias de 3 e 0,5 μm , além de suspensão de sílica coloidal. Todas essas etapas foram realizadas com auxílio de uma lixadeira/politriz automática. A microestrutura foi evidenciada por meio de ataque químico com reagente de Keller por 30 segundos e então a amostra foi observada ao microscópio óptico.

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

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	bal.

A solda estudada fez parte de um grupo de juntas soldadas com diferentes parâmetros, tendo sido a junta que apresentou a melhor qualidade. Os parâmetros de soldagem utilizados na sua obtenção estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de processo utilizados.

Parâmetro	Valor
Velocidade Transversal	250 mm/min
Velocidade Rotacional	600 rpm
Força axial	10 kN
Ângulo X	-3.0 °
Ângulo Y	+2.0 °
Offset do Pino	+1.5mm p/ lado de retrocesso

Nota: 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.



Figura 2. Ângulos de soldagem X e Y.

Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, de acordo com a norma DIN 50125, com velocidade de deslocamento do travessão de 0,5 mm/min. A deformação dos corpos de prova foi medida por meio de extensômetro a laser.

3. Resultados e Discussão

3.1. Metalografia

O processo de soldagem por FSW envolve grandes níveis de deformação que ocorrem em alta temperatura, devido à energia térmica gerada a partir da fricção das partes envolvidas. Em razão da alta condutividade térmica das chapas, cria-se um gradiente térmico na solda e conseqüente variação microestrutural; como resultado, tem-se a formação de zonas características em sua seção transversal, esquematizadas na Figura 3.

Visando analisar essa variação e também a possível presença de defeitos, foi construída uma macrografia da seção transversal da junta soldada estudada a partir de imagens obtidas com aumento original de 16x. Essa macrografia é mostrada na Figura 4.

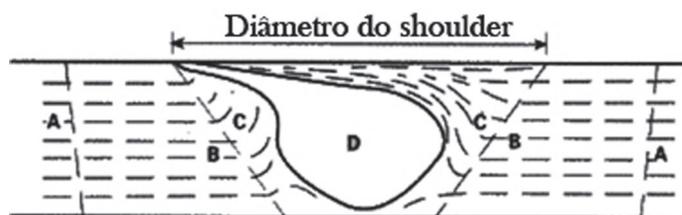


Figura 3. Representação esquemática típica de uma seção transversal soldada por FSW, mostrando quatro regiões: (A) metal base, (B) zona termicamente afetada (ZTA), (C) zona termomecânicamente afetada (ZTMA) e (D) “lente” de soldagem (*nugget*) [17].

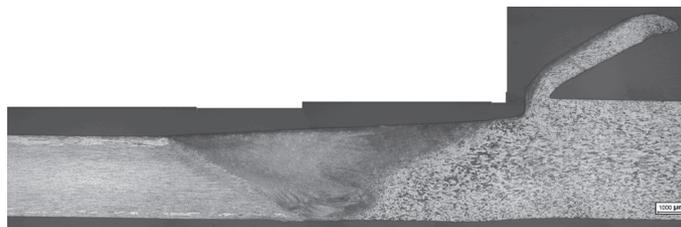
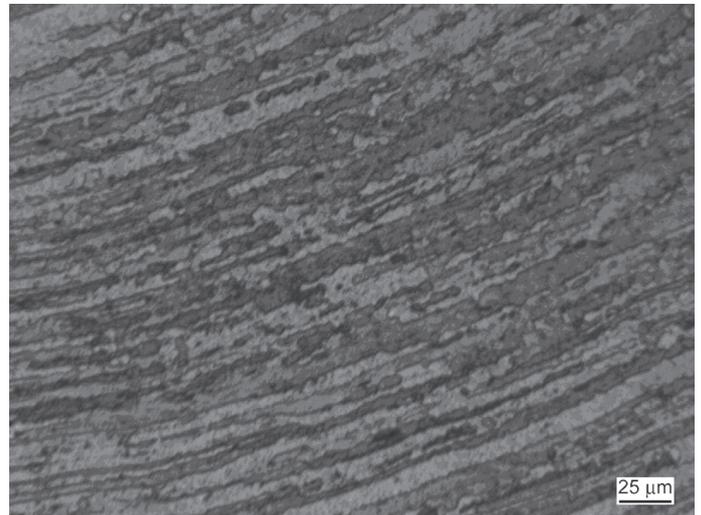


Figura 4. Aspecto macroestrutural da junta soldada, observada em seção transversal.

Não se observou presença de qualquer defeito na junta soldada analisada, indício de que o fluxo de material amolecido na região soldada foi satisfatório. De acordo com Threadgill *et al* [15], a técnica de FSW pode ser entendida como um processo onde se forma uma cavidade atrás da ferramenta de soldagem,



(A) Metal base, lado de avanço.



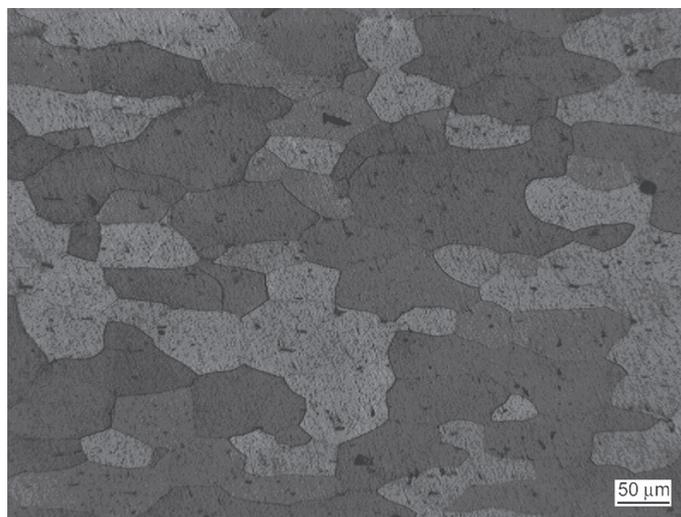
(B) ZTMA, lado de avanço.



(C) Nugget.



(D) ZTMA e ZTA, lado de retrocesso.



(E) Metal base, lado de retrocesso.

Figura 5. Micrografias obtidas nas regiões citadas na Figura 3.

que deve ser preenchida por material amolecido arrastado pela parte frontal do pino. Em caso de fluxo insuficiente, podem-se formar alguns defeitos reportados na literatura [18], como por exemplo, falta de união (*lack of bonding*), que agem como concentradores de tensões e comprometem as propriedades mecânicas das soldas.

Imagens obtidas por microscopia ótica, das regiões citadas na Figura 3, são mostradas na Figura 5.

A variação microestrutural decorrente do processo de FSW em ligas de alumínio tem sido amplamente descrita na literatura [1,4,7,8,11,15]. De forma geral, a região da lente de soldagem (*nugget*), mostrada na Figura 5C, tem microestrutura de grãos equiaxiais, de dimensões refinadas (da ordem de alguns micrômetros), formados por recristalização devido ao efeito conjunto, nessa região em particular, de altas deformações e temperaturas [15].

Jata e Semiatin [7], em estudo envolvendo outra liga de Alumínio-Lítio, feito no ano de 2000, sugerem que o processo que ocorre na lente de soldagem é a recristalização dinâmica contínua (CDRX), pois não observaram, em análises por microscopia eletrônica de transmissão, evidência de formação de núcleos recristalizados seguida de migração de contornos de grão, como requer a recristalização dinâmica descontínua. Medidas de desorientação dos grãos feitas pelos mesmos autores revelaram aumento na desorientação na lente de soldagem quando comparado com o metal base, indicando tratar-se de subgrãos de alta desorientação.

A natureza precisa dos grãos dessa região, entretanto, é alvo de pesquisa e discussão. Threadgill *et al* [15], em estudo mais recente (2009), conclui com base em diversos trabalhos tratar-se de estrutura de grãos refinados, de contornos de alto ângulo, com baixa densidade de discordâncias.

Além de mudanças na estrutura de grãos, em ligas de alumínio é importante o efeito dos ciclos térmicos na dinâmica de dissolução/formação de segundas fases, além de alteração de sua morfologia. Em especial, para a liga 2198, Cavaliere *et al* [10] detectaram a presença de precipitados dos tipos θ' (Al_2Cu) e δ' (Al_3Li) na região da lente de soldagem, em formato esférico e de dimensões mais refinadas que aqueles presentes nas outras regiões. Os precipitados do tipo T_1 (Al_2CuLi), principais endurecedores do material base (no formato de placas finas) foram dissolvidos durante o processo e não foram encontrados nessa região.

Adjacente à lente de soldagem encontra-se a zona termomecanicamente afetada (ZTMA ou TMAZ – *thermomechanically affected zone*), mostrada nas Figuras 5B e 5D, caracterizada pela alta variação (de até 90°) na orientação dos grãos do material base decorrente da influência mecânica. Essa influência, associada à térmica, pode desencadear processos de recuperação e recristalização; nessa região, Cavaliere *et al* [10] detectaram, para a liga 2198, precipitados dos tipos θ' (Al_2Cu), δ' (Al_3Li) e T_1 (Al_2CuLi), em formato alongado e presentes no interior dos grãos.

A região adjacente à ZTMA também é afetada pelo aporte térmico decorrente do processo de soldagem, mas não tem influência de natureza mecânica. Essa região, mostrada na Figura 5D, é denominada zona termicamente afetada (ZTA), e

pode apresentar, em ligas de alumínio, crescimento de grão e dissolução/alteração de morfologia de precipitados [10,12,19,20]. Para a liga 2198, Cavaliere *et al* observaram, analisando nessa região por microscopia eletrônica de transmissão, a presença dos mesmos tipos de precipitados presentes na ZTMA, mas em formato arredondado e distribuídos no interior e nos contornos dos grãos [10].

O tamanho de grão médio da junta soldada, determinado de acordo com a norma ASTM E112, variou entre ASTM 5 (diâmetro médio de 63,5 μm), no metal base, e ASTM 11 (diâmetro médio de 7,9 μm) na lente de soldagem.

3.2. Microdureza

O perfil de microdureza determinado na linha média da seção transversal da solda estudada está disposto na Figura 6.

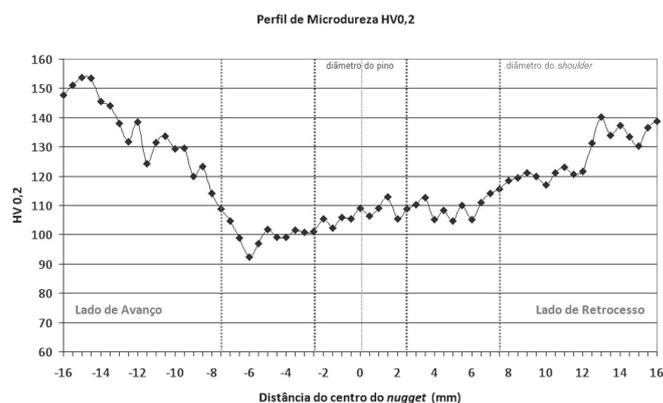


Figura 6. Perfil de microdureza obtido na linha média da seção transversal da junta soldada.

Os resultados obtidos condizem com os vistos na literatura para essa liga [12], em que se nota queda da microdureza em toda a região em contato com o *shoulder*. Wu *et al* [20], trabalhando com a liga 2219-T6 e diferentes parâmetros de soldagem, obtiveram perfis semelhantes de microdureza, mostrando também certa assimetria em relação ao centro devido ao fato de o empilhamento de material, no lado de avanço, ser mais severo que no lado de retrocesso, levando a maior deformação dos grãos e encruamento. Menores velocidades rotacionais causaram menor assimetria do perfil, explicando a pouca assimetria observada na Figura 6 (a velocidade rotacional utilizada na solda deste trabalho foi menor que a menor velocidade rotacional utilizada por Wu *et al*).

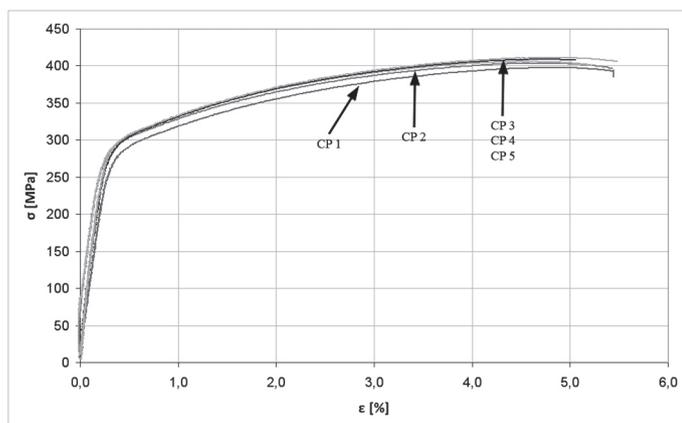
Como descrito por Cavaliere *et al* [10], utilizando a mesma liga deste trabalho, a região da lente de soldagem apresenta grãos refinados equiaxiais que aumentam a resistência, mas não apresenta os principais precipitados responsáveis pelo endurecimento do material, do tipo T_1 (Al_2CuLi); por essa razão têm queda de dureza. Na TMAZ, mesmo havendo esses precipitados, suas dimensões são mais grosseiras que no metal base. Resultados semelhantes foram observados por Steuwer *et al* [19], em estudo sobre liga de alumínio similar (AA 2199).

O menor valor de dureza foi observado na TMAZ do lado de avanço; esse fato, associado à chapa de menor espessura ser

o lado de avanço, sugere maior probabilidade de ocorrência de fratura nessa região.

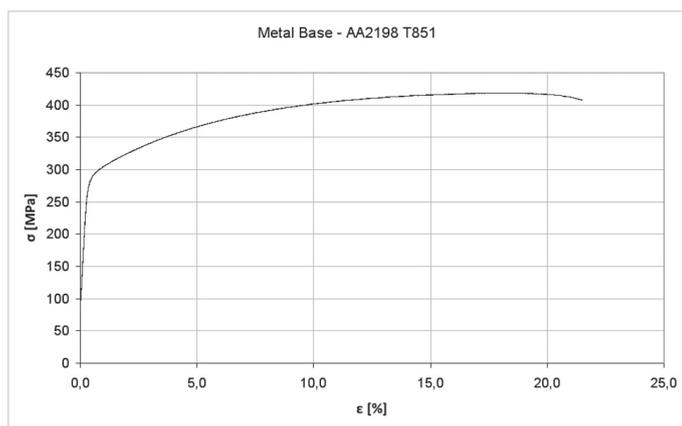
3.3. Ensaio de Tração

Foram ensaiados cinco corpos de prova em tração, usinados de forma que o carregamento uniaxial fosse perpendicular à direção transversal de soldagem. As curvas obtidas dos ensaios são mostradas na Figura 7, além de uma curva representativa das propriedades mecânicas do metal base na direção transversal ao sentido de laminação.



(A) amostra de junta soldada por FSW.

Figura 7 – continua.



(B) Metal base – direção transversal à laminação.

Figura 7. Curvas tensão *versus* alongamento dos corpos de prova da amostra e do metal base.

A partir das curvas obtidas dos ensaios de tração, foram calculados os valores de tensão de escoamento (σ_{YS}), limite de resistência à tração (σ_{US}) e alongamento percentual na ruptura (A) para cada corpo de prova. Esses valores são indicados na Tabela 3, assim como os valores médios e as propriedades do metal base.

Tabela 3. Propriedades mecânicas de tração da amostra e metal base.

CP	σ_{YS} (MPa)	σ_{US} (MPa)	A (%)
1	290,8	397,8	5,04
2	297,7	403,6	5,11
3	301,3	405,8	4,90
4	302,2	409,0	4,67
5	304,0	411,2	5,13
Média	299,2	405,5	4,97
Metal Base	288,2	416,5	19,92

As propriedades mecânicas dos corpos de prova da amostra não mostraram variação significativa. Os valores médios calculados foram considerados excelentes, atingindo 97% do limite de resistência à tração do metal base e excedendo sua tensão de escoamento. Bitondo *et al* [21], em juntas soldadas por FSW, da mesma liga, obtiveram resultados parecidos, com soldas que excederam o limite de resistência do metal base. O valor médio de alongamento atingiu quase 25% do metal base, o que pode ser considerado um bom resultado em se tratando de junta soldada.

Imagens dos corpos de prova fraturados após os ensaios são mostradas na Figura 8. As fraturas ocorreram na ZTMA do lado de avanço, corroborando as observações feitas após determinação do perfil de microdureza da seção transversal, já que nessa região foi observado o menor valor de microdureza, associado à chapa de menor espessura.



Figura 8. Corpos de prova após ensaio de tração. Fraturas localizadas na ZTMA do lado de avanço.

4. Conclusões

Analisando os resultados obtidos e correlacionando-os com informações da literatura, pode-se concluir que as alterações microestruturais causadas pela influência do processo de soldagem por FSW, quais sejam: refino do tamanho de grão na região da lente de soldagem, deformação dos grãos na ZTMA e dissolução/alteração morfológica de precipitados em todas as

regiões, embora tenham levado a uma queda de dureza na região em contato com o *shoulder*, permitiram a obtenção de solda com propriedades mecânicas de tração iguais ou superiores às do metal base, exceto alongamento.

A redução no alongamento é inerente ao processo, por ser a região da junta soldada uma interrupção da estrutura cristalina do material base, e por essa razão menos tenaz. Não obstante, demonstrou-se ser a técnica de FSW uma opção viável na soldagem de liga de alumínio 2198-T851 em configuração *tailored blanks*, desde que realizada com parâmetros satisfatórios.

5. Agradecimentos

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

6. Referências Bibliográficas

[1] BARCELLONA, A; et al. On microstructural phenomena occurring in friction stir welding of aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, v.177, p.340-343, 2006.

[2] DAVIES, R.W; et al. Characterizing Al tailor welded blanks for automotive applications. *JOM – Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, v. 51, n. 11, p.46-50, 1999.

[3] LOMBARD, H; et al. Optimising FSW process parameters to minimize defects and maximize fatigue life in 5083-H321 aluminum alloy. *Engineering Fracture Mechanics*, v.75, issue: 3-4, p.341-54, 2008.

[4] ZADPOOR, A.A; 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, Suppl 1*, p.1311-1314, 2008.

[5] BUFFA, G; et al. Friction stir welding of tailored blanks: investigation on process feasibility. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, V. 55, issue: 1, p.279-282, 2006.

[6] HATTINGH, D.G; et al. Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 203, p.46-57, 2008.

[7] JATA, K.V; SEMIATIN, S.L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. *Scripta Materialia* v.43, p.743-749, 2000.

[8] KAMP, N; et al. Modelling of heterogeneous precipitate distribution evolution during friction stir welding process. *Acta Materialia*, v. 54, p.2003-2014, 2006.

[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*, v.49, p.423-428, 2003.

[10] CAVALIERE, P; et al. 2198 Al-Li plates joined by friction stir welding: mechanical and microstructural behavior. *Materials and Design*, v.30, p.3622-3631, 2009.

[11] FONDA, R.W; BINGERT, J.F; COLLIGAN, K.J. Development of grain structure during friction stir welding. *Scripta Materialia*, v.51, p.243-248, 2008.

[12] CAVALIERE, P; et al. Effect of anisotropy on fatigue

properties of 2198 Al-Li plates joined by friction stir welding. *Engineering Failure Analysis*, v.16, p.1856-1865, 2009.

[13] PRASAD, N.E; GOKHALE, A.A; RAO, P.R. Mechanical behaviour of aluminum-lithium alloys. *Sadhana*, v.28, parts 1 & 2, p.229-246, 2003.

[14] THOMAS, W.N; et al. International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application No. 9125978.8, 1991.

[15] THREADGILL, P.L; et al. Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Review*, v.54, p.49-93, 2009.

[16] THOMAS, W.M; NICHOLAS, E.D. Friction stir welding for the transportation industries. *Materials and Design*, v.18, p.269-273, 1997.

[17] FRIGAARD, Ø; GRONG, Ø; MIDLING, O.T. A process model for friction stir welding of age hardening aluminium alloys. *Metallurgical and Material Transactions A*, v.32, p.1189-1200, 2001.

[18] KIM, Y.G; et al. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. *Materials Science and Engineering A*, v.415, issue: 1-2, p.250-254, 2006.

[19] STEUWER, A; et al. A combined approach to microstructure mapping of an Al-Li AA2199 friction stir weld. *Acta Materialia*, v.59, p.3002-3011, 2011.

[20] XU, W; et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints in 2219-T6 aluminum alloy. *Materials and Design*, v.30, issue: 9, p.3460-3467, 2009.

[21] BITONDO, C; et al. Friction-stir welding of AA 2198 butt joints: mechanical characterization of the process and of the welds through DOE analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.53, p. 505-516, 2011.