

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS EM ALTA VELOCIDADE PELO PROCESSO DE FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA¹

Tiago Samuel Renck²
Telmo Roberto Strohaecker³
Jorge Fernandez dos Santos⁴

Resumo

As ligas de alumínio, em maioria desenvolvidas para uso aeronáutico, vêm ganhando espaço também na produção de automóveis de passeio, sempre visando o aumento da segurança dos passageiros, diminuição do consumo de combustível e redução de custos de produção. Um dos maiores problemas apresentados pelas ligas de alumínio é a baixa soldabilidade que dificultam assim a produção de componentes como por exemplo os conhecidos Tailor Welded Blanks (TWB). Este trabalho inova confeccionando juntas a partir de chapas de alumínio de espessuras diferentes (TWB) através de soldagem por fricção e mistura mecânica (SFMM) com velocidades de soldagem convencionais (1m/min) e em altas velocidades (5 e 10m/min). Foram utilizadas as ligas AA5754 e AA6181. Foram ensaios de tração e também levantamento de curvas limite de conformação (CLC). Os resultados mostram que este processo é adequado para construção de TWB com altas velocidades de soldagem para posterior estampagem.

Palavras-chave: Soldagem por fricção e mistura mecânica; Tailor Blanks; Alumínio; Estampabilidade

Abstract

The aluminum alloys, originally developed for aeronautic purposes, are taking place also in the passenger's vehicles production, always willing to provide safety, decrease the fuel consumption and decrease production costs. The low weldability of aluminum alloys is biggest barrier to overrun when producing tailor welded blanks (TWB) for an example. This work innovates associating aluminum TWB from different thicknesses plates welded by Friction Stir Welding (FSW) in conventional travel speed (1m/min) and high travel speed (5 and 10m/min). The AA 57454 and AA 6181 alloy were used. Tensile tests and drawability test, to build the Forming Limit Diagram (FLD), were performed. The results have shown the process is suitable for joining TWB with high welding speed for further drawing/stamping.

Key words: Friction stir welding; Tailor Blanks; Aluminum; Drawability

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² M.Sc., Eng. Mecânico, LAMEF-UFRGS

³ Prof. Dr., Eng. Metalúrgico, LAMEF-UFRGS. Av. Osvaldo Aranha 99/610, CEP:90035-190, Porto Alegre-RS

⁴ Dr., Eng. Metalúrgico, GKSS Forschungszentrum, Max Planck Strasse 1, Geesthacht, 21502, Alemanha

1 INTRODUÇÃO

Muitas pesquisas foram e estão sendo realizadas na tentativa de construir um automóvel mais seguro e menos poluente, conceito esse intimamente ligado com o peso total do veículo.⁽¹⁾ A carroceria de um automóvel de passeio representa, aproximadamente, 30% do seu peso total, desta forma é de grande importância a sua otimização. Novas tecnologias como a fabricação de painéis (laterais, portas, etc.) e também componentes estruturais a partir de chapas soldadas vem apresentando bons resultados. O intenso uso de alumínio, por exemplo, pode também reduzir o peso médio de um veículo em torno de 300kg.⁽²⁾ Pesquisas mostram que a redução de 100 kg no peso total de um automóvel representa em média uma economia de 0,6 l a cada 100 km.⁽²⁾

A técnica conhecida como “Tailor Welded Blanks” (TWB) vem apresentando ótimos resultados. Esta técnica consiste na fabricação de painéis para estampagem a partir materiais diferentes unidos por solda. Os materiais podem variar em espessura, resistência mecânica, acabamento superficial e até mesmo composição química (com restrições). O princípio básico é simples: utilização de materiais adequados para as regiões que os necessitam. Há registros na literatura mostrando que TWB fabricados a partir de ligas de aço soldados via laser apresentam tipicamente cordão de solda de maior dureza e resistência mecânica e menor ductilidade.⁽³⁾ Em geral há uma queda na estampabilidade dos TWB em relação ao metal de base. Esta queda está relacionada não somente as alterações de propriedades induzidas pelo processo de soldagem como também a razão de espessura entre as chapas.⁽⁴⁾ Existe grande motivação para a produção de TWB’s a partir de ligas de alumínio, unindo assim, todas as vantagens da técnica com as vantagens das ligas de alumínio que podem apresentar, em alguns casos, os mesmos patamares de resistência com grande redução de peso. É conhecido que as ligas de alumínio não são tão facilmente soldáveis como as ligas de aço e suas propriedades de estampabilidade depois de soldadas também não são tão dominadas como nos aços.

Inúmeras pesquisas na área de soldagem de ligas de alumínio através de uma nova tecnologia de soldagem por fricção vêm sendo realizadas. Conhecida originalmente por “Friction Stir Welding” (FSW), em português denominada como Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica (SFMM) apresenta bons resultados em ligas de alumínio, inclusive naquelas até então consideradas não soldáveis como no caso das ligas 2000 e 7000. A grande diferença é que esta técnica trabalha a baixas temperaturas não fundindo os materiais evitando assim problemas de porosidade, contração na solidificação, etc. Inicialmente esta técnica apresentava grande desvantagem em relação às técnicas convencionais em relação a velocidade de soldagem, porém hoje em dia este problema foi, na maioria dos casos, superado⁽⁵⁻⁷⁾ (como visto também neste trabalho). Os resultados em termos de resistência mecânica são comparáveis ou melhores que os apresentados pelas técnicas convencionais.^(3,8)

O objetivo deste trabalho é estudar as propriedades mecânicas de TWB fabricados em ligas de alumínio soldados pela técnica SFMM em altas velocidades de soldagem. Os materiais utilizados foram as ligas 6181 no estado T4 (tratável termicamente) e a 5754 no estado H22 (não tratável termicamente). Os TWB são soldados com velocidades normais (1 m/min) e em alta velocidade (10 m/min para a

liga 6181 T4 e 5 m/min para a liga 5754 H22) com razão de espessura igual a 2 (chapas de 2 mm com chapas de 1 mm).

Os testes realizados para caracterização destes TWB's foram inicialmente ensaios metalográficos, ensaios de microdureza, testes de tração simples para caracterização e qualificação das juntas, especialmente nas condições de alta velocidade. Posteriormente, para estudo da estampabilidade destes TWB's foram realizados ensaios de estampabilidade segundo o método proposto por Hasek⁽⁹⁾ para medição das deformações na superfície e construção das Curvas Limite de Conformação (CLC),^(10,11)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

As chapas utilizadas neste trabalho são de duas ligas distintas, sendo cada liga pertencente ao grupo das tratáveis termicamente e das não tratáveis termicamente. Suas composições químicas estão expressas na Tabela 1.

2.1 Procedimento de Soldagem

Os procedimentos de soldagem adotados neste trabalho estão divididos em quatro, sendo duas velocidades de soldagem para cada liga. Para cada material foi desenvolvido um procedimento de baixa velocidade de soldagem (convencional) e um procedimento de alta velocidade. A Tabela 0. mostra os parâmetros adotados. Os procedimentos de alta velocidade foram desenvolvidos para realização deste trabalho, como cada liga apresenta um comportamento diferente perante o processo de soldagem existem assim diferenças entre as velocidades máximas adotadas.

As juntas soldadas foram realizadas em chapas de 2 e 1 mm de espessura com 600 mm de comprimento e 150 mm de largura. As chapas foram confeccionadas de forma que o cordão de solda fosse realizado paralelo ao sentido de laminação. O lado de 1 mm de espessura corresponde ao lado de avanço (onde o sentido de rotação e sentido de translação são iguais) e conseqüentemente sendo o lado de 2 mm o lado de recuo.

2.3 Ensaios de Tração

Para obtenção dos dados de resistência mecânica foram realizados ensaios de tração nos materiais de base e nas juntas soldadas nas quatro condições.

Nos materiais de base os corpos de prova foram confeccionados no sentido de laminação (0°) seguindo a Norma DIN 10002-1⁽¹²⁾ como visto na Figura 1. Os corpos de prova soldados foram confeccionados na direção transversal a direção de soldagem, conseqüentemente transversal ao sentido de laminação, de forma que o centro da solda esteja sempre situado no centro do l_0 . Como os corpos de prova são soldados a partir de espessuras diferentes há uma diferença na seção transversal ao longo do corpo de prova. Isto implica numa diferença no estado de tensões e deformações, havendo inclusive um gradiente de tensões na região do ombro devido ao ângulo da ferramenta, visto na Figura 1

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de tração Zwick 1484 com capacidade de 200 kN e velocidade de deslocamento transversal de 1 mm/min. A medição da elongação foi realizada via sensor de deformação “clip gauge” conectado ao corpo de prova em um l_0 de 60 mm. É importante salientar que deste ensaio de tração uniaxial foram medidas também as deformações principais φ_1 e secundárias φ_2 para todas as condições. As medições das deformações na superfície dos corpos de prova foram realizadas utilizando sistema um óptico.

2.4 Ensaio de Estampabilidade

Os ensaios de estampabilidade foram realizados segundo o proposto por Hasek,⁽¹³⁾ que introduziu alterações na geometria dos corpos de prova utilizados por Nakazima⁽¹⁴⁾ evitando ruptura dos corpos de prova fora da região central.

Os corpos de prova foram construídos a partir do desenho da Figura 0., tanto para o material de base (chapas de 1 mm) como para as juntas soldadas. No caso das soldas o cordão de solda foi posicionado de forma que estivesse sempre centralizado à amostra cruzando a mesma na menor secção, entre os entalhes. Obviamente na amostra número 1 a solda apresenta-se somente centralizada.

Os testes foram realizados utilizando um ferramental construído segundo o proposto por Nakazima, composto de um punção hemisférico de raio 50 mm e duas matrizes (prensa chapas) que evita o escorregamento dos corpos de prova. O ferramental foi acoplado a uma máquina de ensaios servo assistida triaxial, como visto na Figura 2, que possibilita o controle total de força e deslocamento e também a fixação das câmeras CCD para captura das imagens que servirão para medição das deformações.

A velocidade de ensaio, caracterizada pelo deslocamento vertical do punção, foi de 1 mm/min. Em todos os testes foram utilizados lubrificante e uma lâmina de poliuretano entre o punção e a amostra a ser testada com objetivo de diminuir a influência do atrito.

Foram realizados três series de ensaios para cada condição de soldagem, sendo que cada série de ensaios necessita sete corpos de prova de geometrias diferentes nas quatro condições de soldagem e materiais de base de 1mm totalizando assim 126 testes de estampabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Ensaio de Tração

É importante citar algumas considerações antes da análise destes resultados:

Os ensaios do material de base foram realizados somente com as chapas de 1 mm, sendo que é o material menos resistente das juntas;

O cálculo da secção transversal é realizado levando em conta a espessura do material de menor espessura (1 mm) visto que em nenhum dos casos a ruptura ocorreu no lado mais espesso (2 mm) ou até mesmo na região da solda, onde há um gradiente de espessura;

Os valores entre parênteses mostrados nas tabelas indicam o decréscimo de resistência em relação ao material de base no sentido de laminação;

Em todas as condições foram testados no mínimo três corpos de prova e os resultados das tabelas são uma média dos valores obtidos.

Liga 6181 T4

Para este material é possível observar um pequeno decréscimo nos valores de σ_{max} e que quase não houve variação nos valores de σ_e . Entre as duas velocidades de soldagem não se observa grandes variações nos valores de tensão, como visto na Tabela 0..

Em termos de alongamento é possível observar um grande decréscimo nos valores obtidos das juntas soldadas. É importante observar que os corpos de prova do material de base apresentam um l_0 de espessura homogênea e as juntas soldadas apresentam um l_0 dividido em metade 2 mm e metade 1 mm. Analisando os valores de σ_e e σ_{max} fica claro que a parte mais espessa não atinge valores de deformação permanente e, estando somente no campo elástico, não contribui para a alongação total.

A ruptura dos corpos de prova soldados ocorreu sempre no lado de menor espessura (1 mm). A Figura mostra uma comparação da distância da posição da ruptura e o centro da solda. A distância média do centro da solda à ruptura foi medida e o resultado obtido nas juntas de velocidade 1 m/min é de 9,5 mm. Já nas juntas soldadas com 10 m/min esta distância média é de 6,5 mm. Este resultado comprova que o processo de soldagem não apresenta descontinuidades, uma vez que não ocorreram falhas na região CS, e também auxilia a identificação de uma zona de decréscimo das propriedades mecânicas (possivelmente ZTA).

Liga 5754 H22

A comparação dos resultados da Tabela 0. mostra neste caso uma leve redução de σ_{max} para a condição 1 m/min e uma redução mais acentuada para a condição 5 m/min. Os valores de σ_e para as duas condições apresentam um decréscimo semelhante.

Os valores de alongamento nesta liga não apresentaram um decréscimo tão acentuado como para a outra liga. A condição de soldagem 1 m/min, especialmente, apresenta um valor de alongação bem superior as outras condições atingindo 77,6% da alongação total do material de base.

As soldas de velocidade 5 m/min apresentaram uma condição especial de ruptura, como visto na Figura . Todos os corpos de prova apresentaram ruptura numa região bem distante á solda e a 45° com o eixo da força, comportamento semelhante ao apresentado pelos materiais de base.

A posição de fratura apresentada pela condição 1 m/min foi em média 7,5 mm distante do centro da solda, o que representa somente 1 mm distante da linha do ombro da ferramenta.

Mais uma vez pôde se observar a boa qualidade do processo de soldagem não apresentando ruptura na região do centro da solda, especialmente na condição de 5 m/min.

3.2 Ensaio de Estampabilidade

Os resultados dos ensaios de estampabilidade estão expressos como curvas limite de conformação (CLC) nas Figuras 3.3 e 3.4. Todos os dados foram medidos e calculados via sistema óptico.

Os resultados obtidos do material de base formam uma curva semelhante aos dados de literatura, iniciando na região de estiramento biaxial ($\varphi_1=\varphi_2$) e seguindo na

direção de deformação plana ($\varphi_1=0$), porém o estado de deformações de tração e de estampagem profunda (lado φ_2 negativo do diagrama) não foram alcançados.

Aqui é visto também uma grande diferença nos valores de φ_1 e φ_2 dos corpos de prova das juntas soldadas.

Os resultados obtidos para os corpos de prova da liga 6186 T4 mostram que há uma queda considerável nos valores de φ_1 , em alguns casos de até 50%. Adicionalmente observa-se que os valores de φ_2 estão expressos em uma faixa muito menor. De qualquer forma a curva apresenta um formato seguindo a tendência esperada.

No material 5754 H22 as mesmas características da outra liga são apresentadas em relação ao formato da curva e a faixa de valores de φ_2 . Porém os valores de φ_1 não apresentam decréscimo acentuado, de forma contrária, os valores em média são maiores que os apresentados pelo material de base.

Em ambos os materiais foi observado, também, o deslocamento da linha de solda para o lado do material mais forte. O sistema óptico permite que sejam estudados os mapas de deslocamentos mostrando esta movimentação. A Figura mostra uma comparação dos deslocamentos nos corpos de prova semelhantes com e sem a presença de solda.

Observa-se que a imagem correspondente a um corpo de prova sem solda os deslocamentos são simétricos, de mesmo valor em módulo. Já no corpo TWB não se observa a mesma simetria e os valores apresentados são em geral negativos com uma pequena região no material de 1 mm se deslocando para o lado positivo. Observa-se também que a região central apresenta valores negativos de Y, isto significa que inclusive a linha de solda move-se para o lado do material mais forte (2 mm)

4 CONCLUSÕES

As juntas soldadas produzidas nas quatro condições apresentaram resultados satisfatórios e repetitivos, esta afirmação é baseada no monitoramento dos esforços de soldagem, aspectos visuais do cordão de solda, estabilidade do equipamento e no fato de que nenhum dos ensaios mecânicos realizados apresentou ruptura na região do cordão de solda.

Os valores de propriedades mecânicas oriundos dos ensaios de tração da liga 6181 T4 mostraram excelente desempenho uma vez que comparando com o material de base todos os valores estão acima dos 90%. Em termos de alongamento os resultados também são satisfatórios pois permanecem perto dos 50% do material de base com os melhores valores sendo atingidos pelas juntas soldadas em alta velocidade (48,3%). Visto que o lado mais espesso da solda não se deforma plasticamente somente o lado de 1 mm é responsável por 50% da deformação total. Já o material 5754 H22 apresenta uma queda maior nos valores de resistência mecânica especialmente nos valores de tensão de escoamento, decrescendo para faixa dos 78% e trazendo consigo um aumento considerável nos valores de alongamento ultrapassando a faixa dos 50% nas duas condições de soldagem, especialmente no caso da condição 5754 H22 1 m/min que atingiu um valor médio de 77,6%.

Os ensaios de estampabilidade das quatro condições de soldagem apresentaram resultados semelhantes e seguindo a mesma tendência dos testes de tração simples quando comparados valores de alongamento com os valores de

deformação principal medidos. Foi observada uma queda nos valores de ϕ_1 para os corpos de prova da liga 6181 T4 e um aumento para a liga 5754 H22 assim como no teste de tração.

Os valores de deformação secundária não abrangem uma área sequer tão ampla como o material de base, apresentam-se concentrados bem próximo do zero. Isto está relacionado com a variação de espessura dos dois lados dos corpos de prova, uma vez que o material mais espesso se deforma menos e ainda tende a restringir, impedindo que a região adjacente no material menos espesso se deforme livremente.

As modificações impostas pela variação de espessura afetaram fortemente os resultados dos ensaios para levantamento da CLC. Porém, os resultados das deformações principais (ϕ_1) são satisfatórios e apresentaram uma clara tendência, que, quando relacionada com os ensaios de tração simples permite identificar a melhor condição de soldagem para estampagem.

Mesmo com a presença do fator variação de espessura os resultados mostraram que as juntas soldadas pelo processo de fricção e mistura mecânica de espessuras variadas podem satisfazer com certas restrições as solicitações impostas nos processos de estampagem freqüentemente utilizados na industria automotiva. Especialmente o material 5754 H22 que apresenta valores de ϕ_1 superiores ao material de base com destaque para as soldas em alta velocidade (5 m/min) que apresentaram o melhor resultado das quatro condições.

Quando comparados os resultados com relação as duas velocidades de soldagem pode se concluir que os procedimentos em alta velocidade não apresentaram decréscimos consideráveis podendo assim trazer grandes benefícios devido aos ganhos no tempo de operação. Desta maneira comprovando que os procedimentos em altas velocidades são adequados para construção de geratrizes para estampagem.

6 ELEMENTOS ILUSTRATIVOS

Tabelas

Tabela 1 Composição química das ligas utilizada nos testes

AA	ISO N°R209	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros Mn+Cr	Outros elementos Não especificados	
5754	AlMg3	0.4	0.4	0.1	0.5	2.6 3.6	0.3	0.2	0.15	0.1 0.6	Cada 0.05	Total 0.15
6181	AlSiMg0.8	0.8 1.2	0.45	0.1	0.15	0.6 1.0	0.1	0.2	0.1	-	Cada 0.05	Total 0.15

* valores simples indicam valores máximos

Tabela 0. Velocidades de soldagem.

Material	Baixa velocidade	Alta velocidade
	Velocidade/Rotação/Força	Velocidade/Rotação/Força
AA 5754 H22	1 m/min / 2000 RPM / 5500 kN	5 m/min / 2500 RPM / 14000kN
AA 6181 T4	1 m/min / 1600 RPM / 4500	10 m/min / 4000 RPM /

	KN	15000kN
--	----	---------

Tabela 0. Propriedades mecânicas da liga 6181 T4.

	Propriedades Mecânicas	Material de Base	Velocidade de Soldagem 1 m/min	Alta Velocidade de Soldagem	
6181 T4	σ_{max} (MPa)	252,9	233,2 (92,2%)	239,8 (94,8%)	10 m/mi
	σ_e (MPa)	138,4	136,4 (98,5%)	136,1 (90,3%)	
	Elongação Total (%)	25,3	9,8 (38,7%)	12,2 (48,3%)	
5754 H22	σ_{max} (MPa)	243,8	226,8 (93%)	215,1 (88,2%)	5 m/mi
	σ_e (MPa)	165,3	128,1 (77,5%)	129,8 (78,5%)	
	Elongação Total (%)	20,3	15,3 (77,6%)	11,4 (56,4%)	

FIGURAS

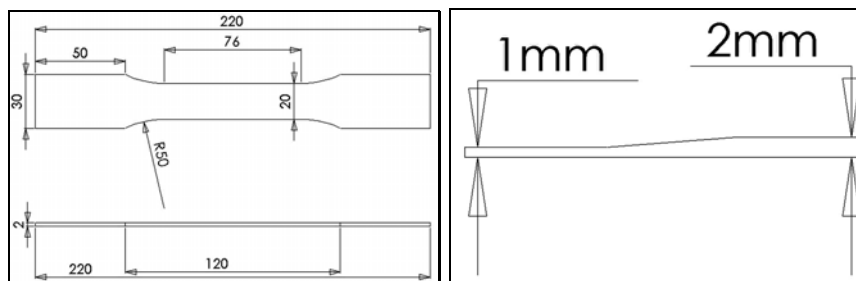


Figura 1 Geometria dos corpos de prova de tração¹². Variação de espessura da região central do corpo de prova. Dimensões em mm.

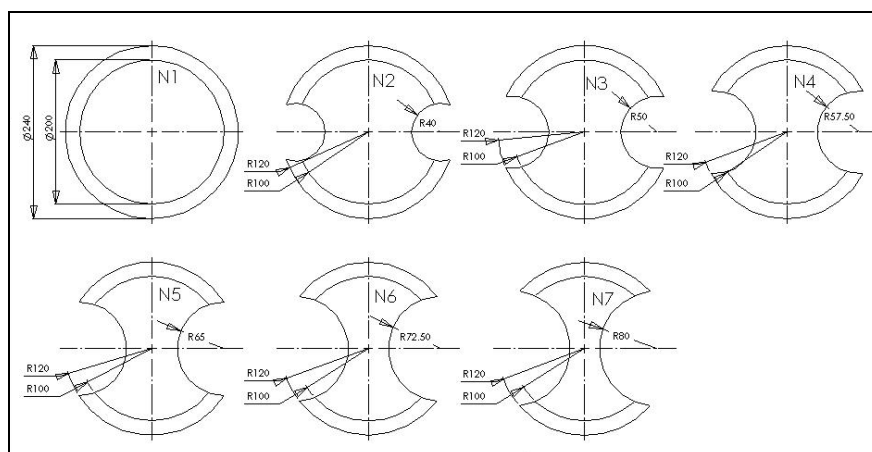


Figura 0. Desenho dos corpos de prova utilizados nos ensaios de estampabilidade propostos por Hasek. Dimensões em mm.

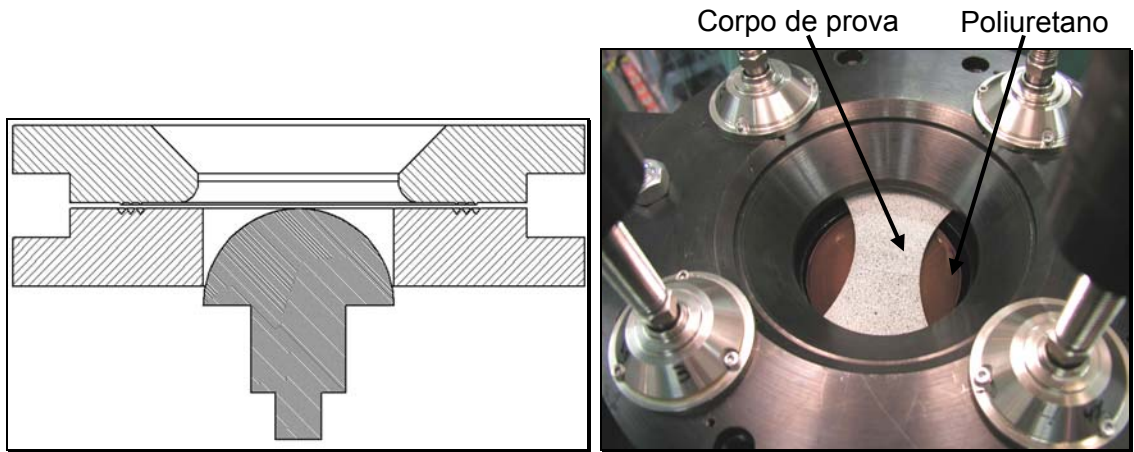


Figura 2 Desenho esquemático e, a direita uma vista de um corpo de prova pronto para o teste.



Figura 4 Posição de ruptura nas juntas da liga 6181 T4 soldadas com velocidades de 1 m/min (esquerda) e 10 m/min (direita).

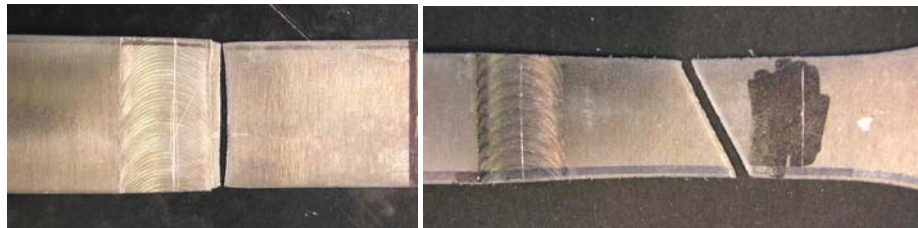
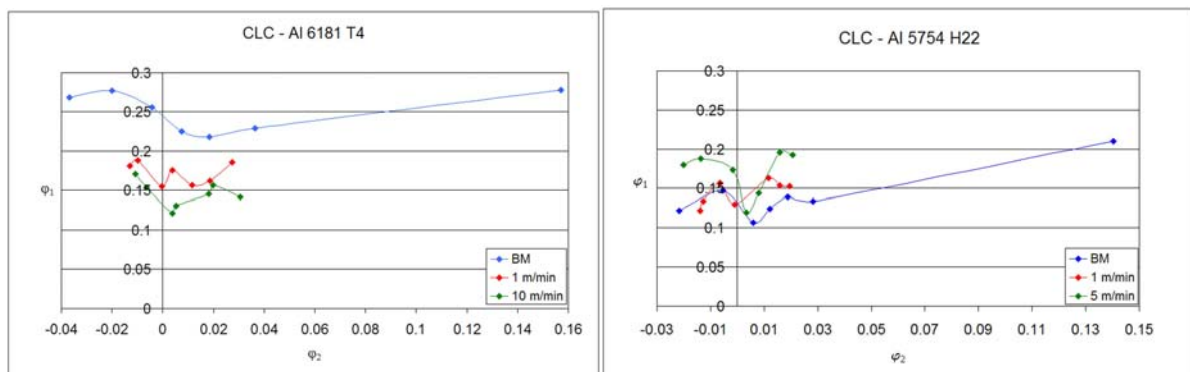


Figura 5 Local de ruptura das condições 1 m/min (esquerda) e 5 m/min (direita) da liga 5754 H22.



Figuras 6 e 7 CLC obtidas dos ensaios de estampabilidade. Liga 6181 T4 (esquerda) e Liga 5754 H22 (direita).

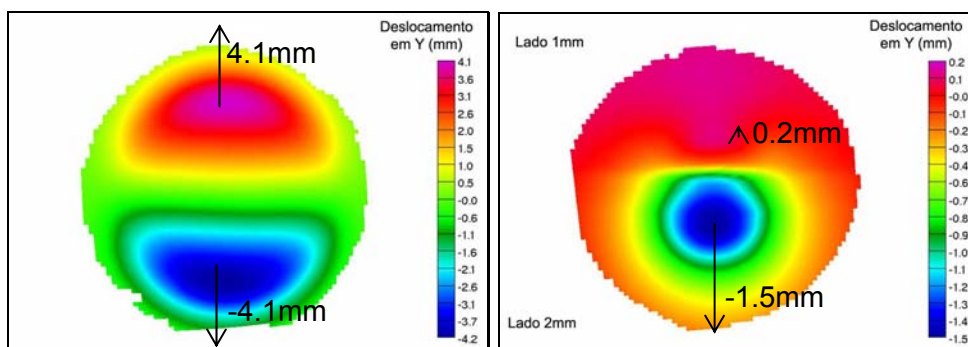


Figura 8 Comparação dos deslocamentos em Y entre um corpo de prova do material de base (esquerda) e um TWB (direita). As setas indicam aproximadamente as proporções dos deslocamentos em cada caso.

REFERÊNCIA

- ¹ Senuma, T. **Physical Metallurgy of Modern High Strength Steel**, ISIJ International, Vol. 41, No. 6, pp. 520–532. 2001
- ² European Aluminum Association: **Aluminum for Future Generations**. <http://eaa.net/> Acesso em 03.11.2004
- ³ Wagoner, R. H., Stasik, M. C. **Forming of Tailor-Welded Aluminum Blanks**. Summary report N° SR97, EWI Project N° 13/33OSF1207, The Ohio State University. 1997
- ⁴ Cayssials, F. **Specific Forming Limit Curves for Tailored Blanks**. 40TH Mechanical Working and Steel Processing-ISS, 1998
- ⁵ Strombeck, A. von. et al. **Effect of Welding Speed on the Properties of Friction Stir Welded Tailored Blanks**. 4th International Friction Stir Welding Symposium Prospector Lodge & Conference Center, Park City, Utah, USA - 14-16 May 2003
- ⁶ Threadgill, P.L. **Friction Stir Welding – the state of the art**. The Welding Institute report 678/1999. My 1999
- ⁷ ASM Handbook: **Welding, Brazing and Soldering** Vol 6. American Society of Materials, p.1337-1371, USA, 1993
- ⁸ Sato, Y. **Post-weld formability of friction stir welded Al alloy 5052**. Materials Science and Engineering A369, p 138-143, 2004
- ⁹ Banabic, D. et al. **Formability of Metallic Materials**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2000
- ¹⁰ Keeler, S. P. **Automotive Sheet Metal Formability – A State of the Art Report**. Automotive Applications Committee, American Iron and Steel Institute. 1989
- ¹¹ Goodwin, G. M. **Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop**. Society of automotive engineers, N°.680093, 380-387, 1968
- ¹² Deutsches Institut für Normung DIN 10002-1, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of testing at ambient temperature; Germany, 2001
- ¹³ Lange, K. **Bericht aus dem Institut für Umformtechnik**. Universität Stuttgart. Teil 1 p.213-291 1978
- ¹⁴ Lange, K. **Handbook of Metal Forming**. Estados Unidos , McGraw-Hill, p.18.3-18-17, 1985