

Avaliação da Soldabilidade de Perfis de Alumínio 6082-T6 usando os processos TIG e MIG

Mateus Barancelli Schwedersky¹, Régis Henrique Gonçalves e Silva¹, Jair Carlos Dutra¹, Leonardo da Paixão Carvalho²

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, m.barancelli@ufsc.br

²Petrobras, CENPES/PDDP/TFCM-SEQUI, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, leo_paixao@petrobras.com.br

Resumo

A liga de alumínio 6082-T6 se apresenta como alternativa para a construção de estruturas que operam em ambiente marítimo, pois possui resistência que supera os 300MPa, e apresenta ainda taxa de corrosão e peso específico muito mais baixos em comparação com os aços. Por outro lado, é fato conhecido que a soldagem degrada parcialmente suas propriedades fazendo com que a resistência mecânica caia significativamente, principalmente na ZTA. É possível encontrar na literatura alguns trabalhos avaliando a soldabilidade desta liga, porém, não são encontradas comparações entre diferentes processos. Neste contexto, o presente trabalho apresenta resultados de avaliações experimentais onde a soldabilidade de perfis com 3 mm de espessura foi comparada usando os processos de maior disponibilidade na indústria, como o MIG e TIG em suas versões convencionais, incluindo ainda comparações com as variantes do MIG Pulsado e CMT. Para caracterizar o desempenho de cada processo foi usado inspeção radiográfica, ensaios de tração, dobramento, análise de parâmetros elétricos e termografia. Os resultados mostraram que todos os processos testados apresentaram soldas satisfatórias, porém, a resistência mecânica obtida com os diferentes processos variou na faixa entre 54-71% do valor original, sendo que para o mesmo processo foram obtidos resultados consideravelmente diferentes de acordo com a metodologia de soldagem empregada. A monitoração via termografia mostrou que o método de fixação e o tipo de processo afetaram o tempo de resfriamento do corpo de prova.

Palavras-chave: Comparação de processos de soldagem; Super-envelhecimento; Ligas endurecidas por precipitação, termografia.

Abstract

The 6082-T6 aluminum alloy has potential to be used for construction of structures that operate in maritime environment, since it has ultimate tensile strength that exceeds 300MPa, presents much lower corrosion rate than steels and have less specific weight. On the other hand, the welding procedure promotes partial degradation of its properties, causing considerable strength reduction, especially in the HAZ. In the literature, it is possible to find some works evaluating the weldability of this alloy, however, no comparisons between different processes were found. In this context, the present work showcases results of experimental evaluations where the weldability of extruded profiles with 3 mm of thickness was compared using the most available industrial welding processes: MIG and TIG in their conventional versions, also including the MIG variants Pulsed and CMT. Weld procedures were successfully developed using all the aforementioned welding processes and the results were evaluated using radiographic inspection, tensile tests, bending, analysis of electrical parameters and thermography. All the selected process provided suitable welds, however, the results showed that the ultimate tensile strength obtained with the different processes varied in the range of 54-71% of the original base metal value. The plate temperature measurement using thermography indicated that the plate fixation method and the type of process might affect the cooling time of the material.

Keywords: Welding Process Comparison, Over-aging; Precipitation-Hardening Materials; Welding Thermography.

1 Introdução

A liga de alumínio 6082-T6 apresenta grande potencial para aplicações na construção de estruturas metálicas de elevado desempenho, como por exemplo, componentes de embarcações e estruturas off-shore, equipamentos rodoviários e ferroviários, e outros componentes onde o peso da estrutura acaba sendo importante ou representando economia durante a sua utilização.

A principal característica que torna essa liga interessante é seu elevado limite de escoamento, que supera os 300 MPa. Em combinação com o baixo peso específico inerente às ligas de alumínio faz com que o peso total seja significativamente menor do que os componentes em aço.

Como vantagem adicional é possível citar que a liga pode ser facilmente extrudada em perfis de geometrias funcionais complexas, facilitando a montagem do componente final. Além disso, apesar de existirem outras ligas de alumínio conhecidas como de melhor resistência a corrosão (como as ligas da família 5xxx), ainda assim, a resistência da liga 6082 em ambiente marítimo tende a ser muito superior do que aos aços. Isso traz vantagens consideráveis, reduzindo os custos com pintura e tratamentos específicos contra corrosão, além dos próprios custos com manutenção ao longo da vida útil do componente.

Por outro lado, para construção de estruturas metálicas se deseja que o material tenha boa soldabilidade, e essa é a principal dificuldade inerente às ligas de alumínio endurecidas por precipitação, pois o ciclo térmico imposto pelo processo de soldagem tende a degradar a resistência mecânica na região da solda. Apesar de ser possível encontrar na literatura algumas publicações com dados que descrevem a influência da soldagem na degradação das propriedades da liga 6082-T6, notou-se a necessidade de realizar um estudo mais focado na aplicação para união de perfis, pois a maioria dos trabalhos trata da soldagem de chapas de maior espessura, e não são encontrados trabalhos onde o desempenho de diferentes processos – como o TIG e MIG – são comparados. Além disso, dentro da denominação MIG temos variantes do processo que proporcionam resultados bastante distintos, e não são encontrados trabalhos mostrando se a utilização de uma variante específica pode influenciar na perda de propriedades. Dessa forma, no presente trabalho avaliou-se a soldabilidade de perfis extrudados com 3 mm de espessura da liga 6082-T6, comparando o desempenho do processo TIG com algumas variantes do processo MIG que estão disponíveis para a indústria.

2. Aspectos relevantes na soldagem da liga 6082-T6

A liga 6082 faz parte da família de ligas AlMgSi (série 6xxx), sendo que o teor de Mg está entre 0,6-1,2%, e o teor de Si 0,7-1,3%. É uma das ligas de alumínio tratáveis termicamente, ou seja, é possível realizar tratamentos de envelhecimento artificial para melhorar as propriedades mecânicas.

O mecanismo de endurecimento por precipitação nos metais é amplamente conhecido, e para o caso das ligas de alumínio, é possível destacar o trabalho de Ambriz e Jaramillo [1], onde esse mecanismo é explicado de forma bastante completa e didática. Descrevendo de maneira resumida, o aumento de dureza e do limite de escoamento na liga 6082-T6 depende da formação de precipitados com características adequadas, obtidos com uma sequência de tratamento térmico constituído de duas etapas principais. Primeiramente, é necessário realizar a etapa de solubilização, onde a chapa (ou perfil extrudado) é aquecida em forno até temperaturas da ordem de 500°C, possibilitando que os elementos de liga sejam solubilizados na matriz. Na sequência, o material é rapidamente resfriado, formando assim uma solução supersaturada. Como o material se encontra em uma condição de instabilidade, a tendência é que os elementos de liga deixem a matriz e formem precipitados. Esse processo da formação de precipitados é denominado envelhecimento e pode ocorrer até certo nível de forma natural (em temperatura ambiente). Porém, a condição que proporciona os maiores níveis de dureza e resistência mecânica é quando se realiza um novo tratamento térmico específico para esse fim (denominado envelhecimento artificial) em temperaturas da ordem de 170°C. Esse ciclo de tratamento garante a formação dos precipitados com as características adequadas para otimizar a resistência mecânica. Caso a liga seja submetida em temperaturas superiores à temperatura do tratamento de envelhecimento artificial, a tendência é que os precipitados cresçam, percam coerência com a matriz, deixando assim de ser eficientes no endurecimento do material. Essa perda de propriedades devido ao coalescimento dos precipitados é denominado de super-envelhecimento, formando uma região com baixa resistência mecânica. Esse é o principal problema ao realizar as operações de soldagem, pois existe a tendência de formação de uma região super-envelhecida em uma considerável porção da zona afetada pelo calor como mostrado na Figura 1.

A região da ZTA (Zona Termicamente Afetada) que experimentou aquecimento entre a temperatura de solubilização e temperatura de fusão, ainda consegue recuperar parte da resistência pela formação natural de novos precipitados. Por outro lado, para recuperar as propriedades na região super-envelhecida seria

necessário realizar uma nova sequência de tratamento de solubilização e envelhecimento artificial, porém, isso só é possível em componentes de dimensões bastante reduzidas, não sendo uma alternativa viável no caso da construção de estruturas de grandes dimensões.

O percentual da perda de resistência mecânica – e também de dureza – devido a soldagem dessas ligas de alumínio da série 6xxx pode ser verificada pela análise dos dados da literatura, mostrados na Tabela 1. Para facilitar a comparação, os níveis de resistência e dureza após soldagem são mostrados como uma fração relativa aos valores originais de cada material de base. É possível notar que os valores de resistência mecânica obtidos são próximos de 0,6 do valor original da liga, sendo que a maioria dos corpos de prova de ensaio de tração rompem na ZTA. No trabalho de Ambriz e Jaramillo [1] foram usinados corpos de prova de tração de dimensões reduzidas, possibilitando assim a avaliação isolada da resistência na ZF (Zona Fundida) e na ZTA, deixando evidente que os menores valores do limite de resistência são obtidos na ZTA. Os trabalhos de Missori e Sili [2] e Martins[3] também mostram a forte diminuição do limite de resistência e também do alongamento em relação ao metal original. A dureza também diminuiu consideravelmente na região da solda, sendo que na maioria dos casos os menores níveis de dureza foram obtidos na região da ZTA que experimentou super-envelhecimento.

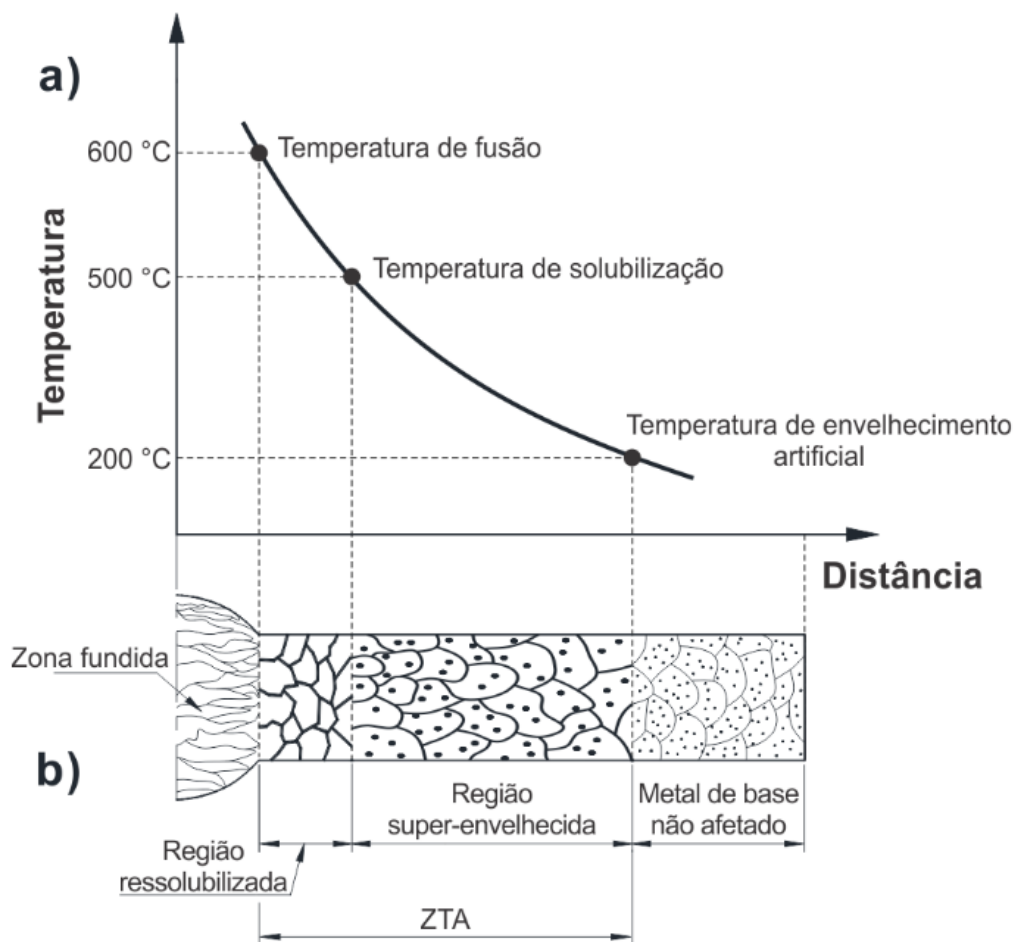


Figura 1 – Esquema mostrando a formação da região super-envelhecida na ZTA de ligas de alumínio.
Adaptado de [1]

Tabela 1. Informações obtidas na literatura a respeito da degradação de propriedades mecânicas na soldagem das ligas de alumínio da série 6xxx.

Referência	Ambriz e Jaramillo [1]	Missori e Sili [2]	Martins [3]
Metal de base	6061-T6	6082-T6	6082-T6
Espessura da chapa	9,5 mm	10 mm	6 mm
Metal de adição	4043	4043	5183
Processo utilizado para soldagem	MIG	MIG, 200A	MIG, 105 A
Fração do limite de resistência após soldado em comparação com o limite de resistência (LR) do metal de base original (MB)	ZF: 0,69 do LR ZTA: 0,58 do LR	0,61 do LR	0,56 do LR
Fração da dureza após soldado em comparação com o metal de base original	0,71 na ZF 0,57 na ZTA	0,6 na ZF 0,6 na ZTA	0,66 na ZF 0,52 na ZTA

Outra característica que interfere diretamente na soldabilidade das ligas da série AlMgSi (6xxx) diz respeito à necessidade de utilização de metal de adição da família AlSi (4xxx) para que não ocorram problemas de trincas de solidificação, sendo que a liga 4043 (5% de Si) é a mais recomendada pela literatura técnica [4] e por normas (como a AWS D1.2 [5] e AWS D17.1 [6]). A utilização do metal de adição com menor resistência tende a diminuir as propriedades da zona fundida dependendo da intensidade de mudança da composição química. Além disso, o trabalho de Ambriz e Jaramillo [1] destaca problemas como redução de ductilidade da ZF que é atribuída a formação de porosidade durante a solidificação e devido ao elevado teor de silício do metal de adição (ER4043) que quando misturado ao metal de base leva à formação de eutético com silício. O trabalho de Missori e Sili [2] também mostra que a utilização da liga 4043 como metal de adição pode levar a diminuição de tenacidade do metal de solda, sendo que os ensaios de impacto Charpy com entalhe em V mostraram uma considerável redução da energia absorvida na amostra soldada. Para o metal de base, a energia foi de 10,6 J, enquanto para as amostras com o entalhe no metal de solda a energia foi de aproximadamente 6,9 J. Para as amostras com entalhe na ZTA, a média dos valores foi de cerca de 13,0 J, que são inclusive maiores do que o material de base.

Como exposto, a perda de resistência mecânica é esperada e inclusive as próprias normas, como a AWS D1.2 [5], por exemplo, especifica que para a estrutura soldada deve ter um limite de resistência de no mínimo 165 MPa, que é aproximadamente metade do valor do metal de base original na condição T6.

3. Materiais e Métodos

O perfil de alumínio 6082-T6 utilizado foi do tipo barra chata, sendo usadas placas com dimensões 130 x 300 x 3,0 mm que foram soldados em junta de topo buscando soldagem unilateral com penetração completa.

Um dos aspectos notados logo no início dos testes foi que o material soldado sofreu forte empenamento, e também desalinhamento das placas, mesmo quando estava preso por grampos em suas extremidades. Esse empenamento é indesejado, pois prejudicaria tanto a retirada dos corpos de prova para ensaios (principalmente quando uma chapa fica mais elevada do que a outra), e também interfere na própria soldagem, uma vez que modifica a distância entre a tocha de soldagem e a peça durante a soldagem. Dessa forma, foi necessário construir um dispositivo para fixar os perfis em determinada posição, conforme mostrado na Figura 2. Usando o dispositivo para fixação dos perfis de alumínio foi possível realizar as soldas de forma que as distorções dos corpos de prova fossem bastante reduzidos.



Figura 2 – Imagens do suporte construído para manter a posição dos corpos de prova durante a soldagem.

Neste trabalho, o objetivo foi testar os processos de soldagem que estão mais prontamente disponíveis industrialmente que são o MIG e TIG em suas modalidades convencionais (ensaios denominados MIG Conv. e TIG Conv.). Adicionalmente, também foram testadas outras duas variantes do processo MIG, o Pulsado, que é cada vez mais comum mesmo em fontes de soldagem de baixo custo e também o processo MIG CMT (*Cold Metal Transfer*) [7], escolhido por ser considerada uma variante moderna e que apresentou desempenho diferenciado para soldagem de alumínio em outros trabalhos realizados no Labsolda-UFSC [8,9].

A motivação principal do trabalho tinha como foco as aplicações onde normalmente o procedimento de soldagem é executado de forma manual. Porém, optou-se por realizar os testes de forma mecanizada - utilizando um robô antropomórfico - para que os corpos de prova e suas réplicas fossem executados com velocidade constante e sem a possível influência das variações impostas pelo soldador. Apesar disso, a escolha dos parâmetros foi realizada buscando respeitar a faixa operacional típica de execução da soldagem manual.

Durante a realização do trabalho, foi notado que os corpos de prova soldados usando o dispositivo para fixação das chapas (mostrado na Figura 2), imediatamente após soldagem, apresentavam menor temperatura do que aqueles que haviam sido soldados usando fixação somente com sargentos (ensaios preliminares realizados para obtenção dos parâmetros de soldagem). Buscando verificar se esse aspecto poderia influenciar nos resultados da resistência da junta soldada (já que a liga tende a ser sensível ao ciclo térmico imposto), decidiu-se realizar ensaios adicionais com os processos MIG e TIG convencionais, variando somente o método de fixação. Apesar da determinação inicial em realizar todos os ensaios de forma mecanizada, foi considerado que para esses ensaios adicionais seria melhor a soldagem manual, pois o grande empenamento do corpo de prova fixado somente com os sargentos iria dificultar a soldagem mecanizada. Dessa forma, os ensaios conduzidos com auxílio de um soldador profissional foram denominados “MIG Manual” e “TIG Manual” para os casos onde foi usado o dispositivo de fixação e “MIG Manual SD” e “TIG Manual SD” na situação onde os testes foram realizados sem o dispositivo de fixação. Os corpos de prova produzidos também foram submetidos aos ensaios de tração. Adicionalmente, nesses ensaios adicionais também foram realizadas filmagens termográficas buscando quantificar a diferença de temperatura em cada condição (com e sem a utilização do dispositivo de fixação).

Para a avaliação usando termografia foi utilizada a câmera FLIR SC7200 F/3 que foi posicionada a uma distância de 840 mm do corpo de prova em cada situação. A câmera oferece três faixas de medição, sendo que foi escolhida a faixa que engloba as menores temperaturas e vai de 0°C até 360 °C, pois essa foi considerada a mais adequada para verificar a taxa de resfriamento do corpos de prova de alumínio. A metodologia consistiu em posicionar a câmera na porção final do corpo de prova e filmar a superfície do corpo de prova logo após o arco ser apagado (quando a tocha de soldagem era rapidamente afastada do corpo de prova). Depois de realizada as filmagens, os dados obtidos foram analisados e para cada condição foi traçado um gráfico exibindo o valor do ponto de maior temperatura da imagem ao longo do tempo, sendo que o instante de início (tempo zero) foi padronizado como o momento que o arco foi apagado. Dessa forma, foi possível obter o tempo necessário para o resfriamento em cada situação, possibilitando também determinar o tempo de resfriamento até determinada temperatura.

A ocorrência de porosidade foi avaliada por meio de ensaios radiográficos, utilizando os critérios de aceitação da norma AWS D1.2[5]. Posteriormente, os perfis soldados foram cortados para que fossem retirados os corpos de prova. Para cada condição foram retirados dois corpos de prova de dobramento (um para dobramento da face e outro para raiz) e dois corpos de prova de tração. Também foram retiradas amostras do material de base para servir de parâmetro de comparação. As dimensões dos corpos de prova e o local de retirada dos mesmos seguiu as recomendações da norma AWS D1.2 [5].

Em todos os ensaios foi utilizado argônio puro como gás de proteção, com vazão de 15 l/min nas variantes MIG e 12 l/min no caso dos ensaios com o processo TIG. O metal de adição utilizado foi o ER4043 com diâmetro de 1,2 mm, com exceção da soldagem TIG manual que usou a mesma liga, porém em vareta de 2,4 mm de diâmetro. No caso do processo TIG, foi utilizada corrente alternada de onda retangular fornecida por uma fonte IMC Digiplus A7, sempre com mesmo valor de corrente regulado para as duas polaridades, porém, o tempo na polaridade negativa foi de 7,0 ms e o tempo na polaridade positiva foi de 3,0 ms. Nos ensaios com o MIG convencional foi utilizada a Fonte IMC Digiplus A7, e nos ensaios com os processos MIG Pulsado e MIG CMT foi utilizada a fonte de soldagem Fronius TPS 3200 CMT MV. Para o cálculo dos valores médios, os sinais de corrente e tensão foram registrados durante os ensaios utilizando o sistema SAP V4 da empresa IMC-Soldagem[10], que realiza medição em 5 kHz.

4. Resultados e Discussões

A primeira observação importante ao realizar o presente trabalho diz respeito à dificuldade de obtenção de soldas com penetração total no perfil de 3 mm de espessura em uma junta de topo, sem chanfro e sem afastamento entre as chapas. Após uma série de testes preliminares para definição dos parâmetros mais adequados, foi possível obter procedimentos com penetração completa em passe único com todos os processos testados. Apesar disso, foi notado maior dificuldade em realizar a soldagem sem que houvesse risco de ocorrer pontos de perfuração da chapa (*burn-trough*) nos casos dos processos MIG convencional e MIG pulsado. Diante desse problema, foi adotada a utilização de um *backing* metálico fabricado em aço inoxidável com canal em forma de U de 7 mm de largura e 2 mm de profundidade, evitando que ocorressem perfurações no caso dessas variantes do processo MIG. A necessidade de utilizar *backing* metálico para garantir que não ocorra perfuração já havia sido evidenciado no trabalho de Marques [9]. Logicamente, a chance de ocorrer perfuração é maior quando se deseja a soldagem unilateral com penetração completa em uma chapa de espessura relativamente elevada como 3 mm, ou no caso de um passe de raiz de uma chapa mais espessa, que são situações onde é necessário utilizar uma energia de soldagem relativamente elevada para que não ocorram pontos de falta de fusão. Por outro lado, é possível assumir que em grande parte das juntas soldadas em estruturas feitas a partir de perfis de alumínio seriam usadas juntas em T, juntas sobrepostas ou situações onde não é requisito penetração total, de forma que o risco de *burn-trough* seria praticamente inexistente para grande parte dos casos.

Para cada variante de processo foram então estabelecidos os parâmetros de soldagem que proporcionaram a união com penetração completa. Os dados da Tabela 2 mostram quais foram esses parâmetros, e também os valores de corrente e tensão médios que foram adquiridos durante a soldagem dos corpos de prova para realização dos ensaios mecânicos.

Tabela 2. Parâmetros de soldagem utilizados em cada condição testada.

Processo	Parâmetro regulado	Va (m/min)	Vs (cm/min)	Tensão média adquirida (V)	Corrente média adquirida (A)	Energia de soldagem calculada (kJ/cm)
MIG Conv.	U=18,2 V	6,4	40	16,0	111	2,6
TIG Conv.	Ip=In=150 A	1,9	25	11,7	136	3,8
MIG Pulsado	Va=5,0 m/min	5,0	40	18,4	96	2,6
MIG CMT	Va=5,8 m/min	5,4	40	14,1	122	2,5
MIG Manual	U=17,4V	7,4	36	16,8	122	3,4
MIG Manual SD	U=17,4V	7,4	56	16,8	131	2,3
TIG Manual	I(p/n)=150 A	n/a	23	11,1	152	4,4
TIG Manual SD	I(p/n)=150 A	n/a	27	12,2	152	4,1

A primeira avaliação realizada nos corpos de prova soldados com os diferentes processos foi o ensaio radiográfico, onde verificou-se que todos os processos proporcionaram soldas aprovadas pelo critério de aceitação da norma AWS D1.2. De todas as modalidades avaliadas, somente o MIG pulsado apresentou

alguns poros visíveis nos ensaios radiográficos, mas que eram de pequenas dimensões e bastante espaçados ao longo da junta, de forma que seriam plenamente aceitos de acordo com a referida norma.

Após passar pela inspeção radiográfica, as placas soldadas foram cortadas para retirada dos corpos de prova dos ensaios de tração e dobramento. A Figura 3 mostra algumas imagens do ensaio de dobramento, sendo que após esse teste, os corpos de prova também foram analisados usando ensaio de líquido penetrante. Nenhuma amostra apresentou qualquer descontinuidade no ensaio de dobramento.



Figura 3 – Imagens mostrando o dispositivo e as etapas da avaliação dos resultados dos ensaios de dobramento.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração estão mostrados na Tabela 3. Com relação à resistência do metal de base original, é possível notar que o resultado está de acordo com o que era esperado para a liga 6082 na condição T6 e também com os valores do relatório que constavam no certificado emitido pelo fabricante do material. Com relação aos resultados dos corpos de prova que foram soldados, houve considerável variação na tensão máxima obtida nas diferentes situações. A maioria dos corpos de prova romperam na ZTA, a uma distância de aproximadamente 5 mm da linha de fusão. Apesar disso, ambos corpos de prova de tração do processo MIG Convencional e com o MIG CMT, e também um dos corpos de prova soldados com o MIG Pulsado romperam na zona de interface da zona fundida. Uma explicação proposta para esse comportamento, é que nesses casos, a energia de soldagem é relativamente baixa, e em combinação com a utilização do dispositivo para fixação que possui uma massa de metal relativamente grande, faria com que o tempo de aquecimento na ZTA fosse relativamente pequeno, fazendo com que o surgimento da região superenvelhecida seja menos intensa. É importante considerar que o processo de crescimento dos precipitados é ativado por difusão, que depende do tempo e da temperatura. Nesse caso, o elo mais fraco acaba sendo a zona fundida que tem grande quantidade do metal de adição (AlSi liga ER4043), que por natureza não possui resistência mecânica muito elevada.

Considerando a média dos dois resultados do ensaio de tração, na melhor situação (TIG Conv.) a tensão máxima foi de 71% e no pior caso (TIG Manual SD) a tensão máxima foi de 54% em relação com a resistência do metal de base original. É interessante notar ainda que o melhor e o pior resultado foram obtidos com o processo TIG, deixando claro que mesmo considerando um único processo, o desempenho poderá ser significativamente diferente de acordo com a forma que o processo é aplicado. Fazendo analogia com o chão de fábrica onde a soldagem de estruturas é feita manualmente, também é esperado que os resultados possam apresentar diferenças de acordo com a técnica empregada pelo soldador. Em todos os casos, a resistência máxima obtida superou os 165 MPa citados pela norma AWS D1.2, indicando que a liga pode ser soldada com os processos MIG e TIG, que são aqueles que apresentam maior disponibilidade na indústria. Apesar disso, os resultados mostram claramente que existe uma perda considerável de propriedades mecânicas com relação a liga original e que é fundamental que o cálculo estrutural considere esse fato. A primeira vista, esse fator pode ser visto como um limitante para a utilização da liga 6082-T6, uma vez que está se selecionando um material com elevada resistência (principalmente elevado limite de escoamento), mas que devido ao processo de soldagem será necessário considerar uma resistência muito menor. Por outro lado, muitas vezes é possível estabelecer uma configuração de junta onde o elemento

estrutural tire proveito da resistência mecânica original do metal de base apesar da diminuição da resistência no local da solda (ZTA e ZF).

Tabela 3. Resultados dos ensaios de tração.

	CP	Tensão Máxima [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Local da Ruptura
Material de Base	01	318	295	-
	02	326	301	-
MIG Conv.	01	213	190	Solda
	02	220	190	Solda
TIG Conv.	01	232	197	ZTA
	02	229	194	ZTA
MIG Pulsado	01	182	172	Solda
	02	201	176	ZTA
MIG CMT	01	218	190	Solda
	02	216	187	Solda
MIG Manual	01	200	184	ZTA
	02	189	179	ZTA
MIG Manual SD	01	190	179	ZTA
	02	189	177	ZTA
TIG Manual	01	208	184	ZTA
	02	194	180	ZTA
TIG Manual SD	01	179	167	ZTA
	02	172	164	ZTA

É interessante notar também que os menores valores de resistência foram obtidos quando a soldagem foi realizada sem utilizar o dispositivo de fixação da chapa (MIG Manual SD e TIG Manual SD). Os dados da medição das temperaturas e tempos de resfriamento obtidos com a filmagem termográfica estão mostrados na Figura 4. Esses resultados indicam que de fato a taxa de resfriamento foi significativamente maior com o uso do dispositivo de fixação nos dois casos.

No canto direito superior da Figura 4 estão exibidos os tempos necessários para o resfriamento até 200°C. Essa temperatura foi escolhida pois tipicamente o super-envelhecimento inicia a partir dessa faixa de temperatura. Nesses dados, o TIG Manual SD foi aquele com o maior tempo de resfriamento até 200°C, fato que ajudaria a explicar o pior desempenho obtido nos ensaios de tração. Outra informação importante é que o processo MIG apresentou tempos de resfriamento consideravelmente menores do que o processo TIG, mesmo no caso da soldagem sem o dispositivo de fixação. Isso se deve, provavelmente, ao fato que a velocidade de soldagem é mais elevada para o processo MIG. Além disso, no processo MIG a quantidade de material de adição utilizado é consideravelmente maior do que no caso do TIG. É importante ressaltar ainda que a metodologia de fixação do corpo de prova fez com que o soldador tivesse que intuitivamente modificar a velocidade de soldagem a fim de não perfurar a chapa, como pode ser visualizado nos dados da Tabela 2. Acredita-se que a diferença da velocidade de resfriamento só não foi maior, pois no caso das soldas sem o dispositivo, o soldador executou o procedimento com maior velocidade.

Diante desses resultados, é possível inferir que essa situação também tende a ocorrer na prática, onde ao invés do dispositivo de fixação, teríamos a influência da massa do componente que está sendo soldado, que afetaria a condução de calor e a velocidade de resfriamento, podendo gerar diferenças na resistência mecânica obtida. Da mesma forma, é esperado que a utilização de processos com aporte térmico exagerado também diminua a velocidade de resfriamento e cause maior degradação das propriedades mecânicas da junta.

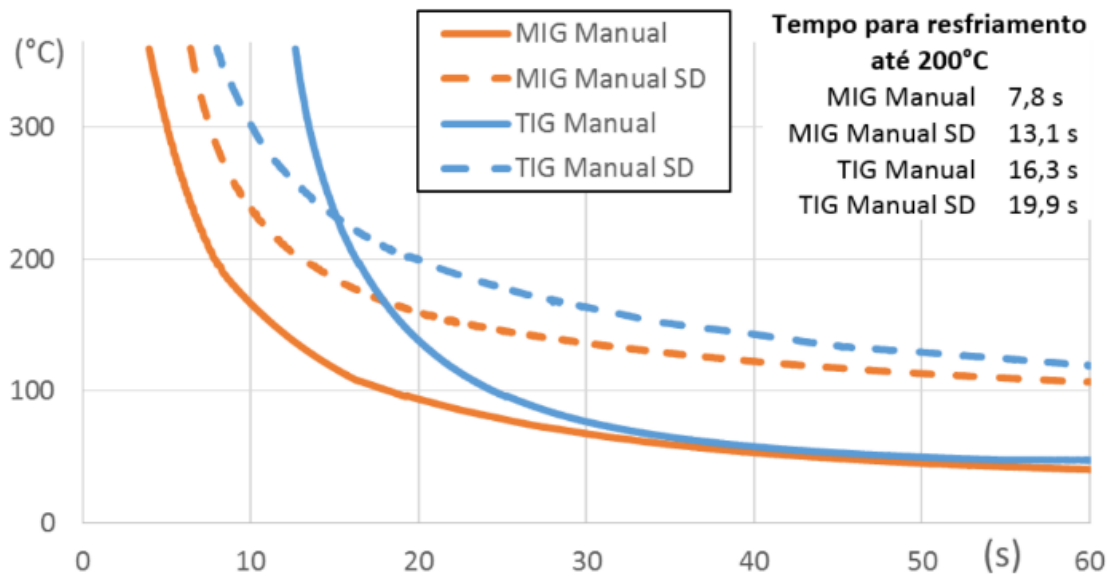


Figura 4 – Curvas de resfriamento dos corpos de prova soldados com e sem o suporte de fixação. Os dados foram obtidos por termografia.

5. Conclusões

A principal conclusão que pode ser elencada com o presente trabalho, é que todos os diferentes processos testados - os quais representam as técnicas de soldagem de maior disponibilidade na indústria atualmente - são capazes de produzirem soldas livres de defeitos com a liga 6082-T6.

Os resultados também deixaram claro que mesmo para um único processo de soldagem, o procedimento adotado pode representar mudanças nos resultados da resistência mecânica da junta soldada. O melhor exemplo é o processo TIG, que na condição de soldagem Mecanizada apresentou os maiores valores de resistência máxima, e na condição de soldagem Manual SD apresentou os piores valores medidos nos ensaios de tração.

O trabalho procurou avaliar uma gama variada de condições que pudessem representar os processos mais comumente encontrados na indústria para soldagem de alumínio visando construção de uma embarcação ou mesmo de algumas partes acessórias (casario, escadas, guarda corpos). Os valores de resistência máxima obtidos seguiram o encontrado em outros trabalhos da literatura, ficando evidente a necessidade de considerar a perda de propriedades mecânicas decorrente dos processos de soldagem. Considerando todos os processos avaliados no presente trabalho, o limite de resistência variou entre 54-71% dos valores do metal de base original. Apesar disso, em todos os casos foram obtidos valores de resistência superiores ao requisito mínimo da norma AWS D 1.2.

Também foi possível verificar que a metodologia de fixação do corpo de prova pode influenciar significativamente na taxa de resfriamento do material e nos parâmetros que devem ser regulados. Essas mudanças podem causar variação na resistência mecânica da junta soldada, sendo que os piores resultados ocorreram nas situações de menor velocidade de resfriamento, indicando que é recomendável limitar o aporte térmico para os procedimentos de soldagem da liga 6082-T6.

6. Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem a Petrobras (CENPES/PDDP/TFCM-SEQUI) que financiou o trabalho de pesquisa (Processo: 2015/00299-1), dentro do qual foram realizados os testes que deram origem ao presente trabalho.

7. Referências

- [1] Ambriz, R.R., Jaramillo, D., Light Metal Alloys Applications, Cap. 2: Mechanical Behavior of Precipitation Hardened Aluminum Alloys Welds, Edited by Waldemar A. Monteiro, ISBN 978-953-51-1588-5, 250 pages, Publisher: InTech, <http://dx.doi.org/10.5772/58418>
- [2] Missori, S., Sili, A., Mechanical Behaviour of 6082-T6 Aluminium alloy welds, Metallurgical Science and Technology, vol. 18 (1) (2000), pg 12-18.
- [3] Soldadura de ligas de alumínio de construção naval, Autor: Natacha Catarina da Eira Martins, Professor Doutor Braz Fernandes, Direção de Navios – Marinha Portuguesa, Lisboa 2008. Faculdade de ciências e tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- [4] KOU, S. Welding Metallurgy. 2ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002, 461p.
- [5] Norma AWS – American Welding Society, D1.2/D1.2M:2003 STRUCTURAL WELDING CODE ALUMINUM. ISBN 0-87171-704-2; 550 N.W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126.
- [6] Norma AWS – American Welding Society, D17.1:2010 Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications; 550 N.W. LeJeune Road, Miami, Florida 33126.
- [7] Prospecto de divulgação do processo de Soldagem CMT. Acessado eletronicamente em <http://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt>
- [8] SAVI, B. M. Desenvolvimento Tecnológico para Soldagem MIG de Ligas de Alumínio 5083 H116. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- [9] MARQUES, C. Prospecções da Natureza Física da Soldagem MIG Automática de Ligas de Alumínio. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- [10] Prospecto do equipamento SAP V4, acessado eletronicamente em: <https://www.imc-soldagem.com.br/pt-br/equipamentos/sistemas-de-monitoramento/sap-v4>