

# ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDAS EM ALUMÍNIOS PELOS PROCESSOS DE ELETRODO REVESTIDO E TIG

Lucas Modena Rodrigues <sup>1</sup>; Susana Marraccini Giampietri Lebrão <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professora do Instituto Mauá de Tecnologia (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Este trabalho tem como objetivo o estudo da união de chapas de alumínio envelhecido através do processo de soldagem de eletrodo revestido e TIG, a fim de avaliar e comparar a viabilidade da utilização do eletrodo revestido para o alumínio, visando corroborar nos estudos da utilização de tal método em regiões inviáveis para realização de soldas que demandam atmosfera controlada. Para efeito comparativo, as chapas soldadas com ambas as técnicas foram submetidas a ensaios de tração, metalografia e avaliação de fratura em microscopia digital. Tal tópico merece o estudo, uma vez que visa corroborar com a facilitação do processo de soldagem realizados em zonas inóspitas. Com os resultados obtidos nos ensaios e comparações realizadas entre solda TIG e eletrodo revestido em alumínio, foi possível concluir que os cordões realizados em eletrodo revestido estão dentro das especificações de resistência mecânica mínima exigida pela AWS.*

## Introdução

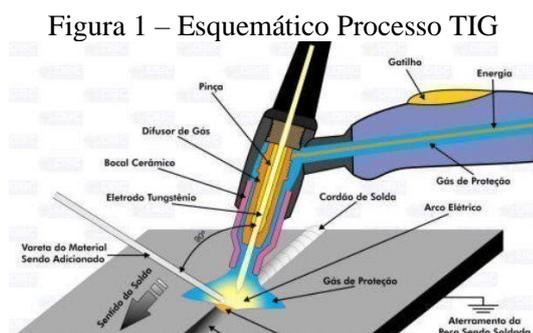
As ligas de alumínio estão sendo cada vez mais utilizadas em muitas indústrias como a aeronáutica, aeroespacial, naval, automotiva, de energia, etc., devido a sua baixa densidade, sua alta resistência mecânica e alta resistência à corrosão. (Varshney & Kuhmar, 2020)

Tendo em vista a vasta aplicação do alumínio na indústria e na engenharia, o ser humano se viu na necessidade de estudar e desenvolver variadas técnicas para sua utilização e manufatura, entre elas, a solda.

Um dos maiores problemas da soldagem de ligas de alumínio, é a formação de porosidade pela difusibilidade do gás hidrogênio durante a solidificação da solda. Isso ocorre porque gases presentes na atmosfera ficam presos na solda devido à substancial diferença na solubilidade do hidrogênio entre o alumínio no estado sólido e estado líquido, fazendo com que o hidrogênio penetre na solda durante a abertura do arco, processo conhecido como *diffusible hydrogen*. (Verma, Pandey, Andrés, Khargotra & Singh, 2023)

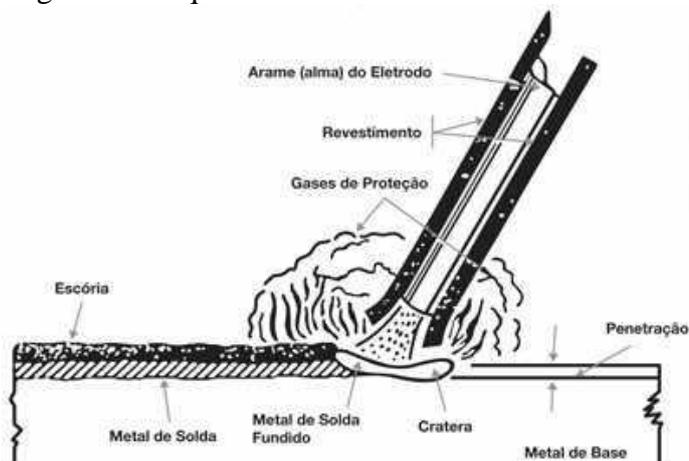
Algumas maneiras de diminuir a difusão de hidrogênio no processo de soldagem são armazenamento em locais com baixa umidade, utilização de consumíveis com baixo teor de hidrogênio e preparação das peças a serem soldadas, retirando resíduos como oxidações, óleos, água, tintas, etc. (Welding Handbook, Vol 4, 8ª edição, 1998)

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) consiste na fundição do metal de base através de um eletrodo de tungstênio não consumível enquanto um gás inerte, como o argônio ou hélio é utilizado para realizar a proteção da região soldada de contaminação de gases presentes na atmosfera, conforme pode-se observar na Figura 1



Para o processo de soldagem por eletrodo revestido, o arco elétrico é iniciado pelo próprio consumível e o seu revestimento é o responsável pela proteção da solda dos gases da atmosfera, assim fazendo-se desnecessário o uso de um cilindro pressurizado que contenha o gás de proteção, como na solda TIG. O processo se encontra ilustrado abaixo, na Figura 2.

Figura 2 – Esquemático Processo Eletrodo Revestido



Fonte: (BARBOSA, Reginaldo, 2015)

Atualmente, a solda com o eletrodo revestido de alumínio é pouco utilizada pelo seu alto grau de complexidade de execução. Isso se deve pela dificuldade na abertura de arco e pelo consumo acelerado do eletrodo, ditando uma velocidade de solda bastante elevada. Estas características fazem com que a execução deste processo seja consideravelmente distinta do eletrodo revestido em aço, assim exigindo prática para realizar a solda.

Com o objetivo principal de comparar o processo de soldagem por eletrodo revestido com o processo TIG, processo que é o mais usual para as ligas de alumínio, foram realizados diversos ensaios para a determinação de métricas de propriedades mecânicas e químicas da solda e da zona termicamente afetada (ZTA). Desta maneira, foi possível avaliar a viabilidade de substituição dos processos de soldagem que demandam atmosfera controlada, como MIG e TIG, para o eletrodo revestido. Essa substituição se faz muito importante e útil para regiões na qual o transporte de um cilindro pressurizado com o gás de proteção é inviável. Regiões que possuem alta umidade, fortes ventos e chuvas frequentes, como por exemplo em embarcações e zonas florestais, também são favorecidas pela utilização do eletrodo revestido.

### Material e Métodos

Os corpos de prova (CP's) a serem soldados são de alumínio AA 5052 e as chapas seguem a norma NBR 6834 da ABNT. Na Tabela 1 a seguir, é possível encontrar a composição química nominal do material utilizado para a realização do estudo.

Assim como a composição química, suas propriedades mecânicas também seguem os requisitos da NBR 7823 da ABNT, como ilustrado pela Tabela 2.

Tabela 1 – Composição química do alumínio AA 5052

Composição Química	
Manganês - Mn (%)	0,20 - 0,50
Silício - Si (%)	0,20 MÁX
Cobre - Cu (%)	0,15 MÁX
Titânio - Ti (%)	0,10 MÁX

Cromo - Cr (%)	0,10 MÁX
Magnésio - Mg (%)	4,0 - 5,0
Zinco - Zn (%)	0,25 MÁX
Ferro - Fe (%)	0,35 MÁX

Fonte: (ABNT NBR 6834)

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do alumínio AA 5052

Propriedades Mecânicas	
Limite de Escoamento (MPa)	160 MÍN
Resistência a Tração (MPa)	215 - 265
Alongamento (%)	7 MÍN

Fonte: (ABNT NBR 7823)

Todos os corpos de prova foram soldados no laboratório de manufatura do Instituto Mauá de Tecnologia com a utilização da máquina Lincoln Aspect 300. Para a realização da solda TIG, foi utilizado o consumível para alumínio AWS ER5356 x 2,4mm, consumível composto por 5% de magnésio, indicado para ligas de alumínio 5000. Já para a solda em eletrodo revestido, o consumível utilizado foi o DIN 1732 S- $\text{AlSi}$  12 x 2,5mm, consumível composto por 12% de silício.

Para definição dos parâmetros de soldagem a serem utilizados no processo TIG (corrente, vazão do gás de proteção, rampas de subida e descida, etc.), foram levados em conta as dimensões das chapas, consumíveis de soldas e a realização de testes prévios a soldagem dos corpos de prova, avaliando principalmente a penetração do arco nas juntas soldadas. É de suma importância a calibração correta dos parâmetros para que as soldas não apresentem, tensões residuais, baixa resistência a oxidação, penetração inadequada, bom acabamento, etc., assim garantindo boas propriedades mecânicas.

Abaixo, pode-se conferir na Tabela 3, os parâmetros utilizados para as soldas dos CP's

Tabela 3 – Parâmetros para solda dos CP's em TIG

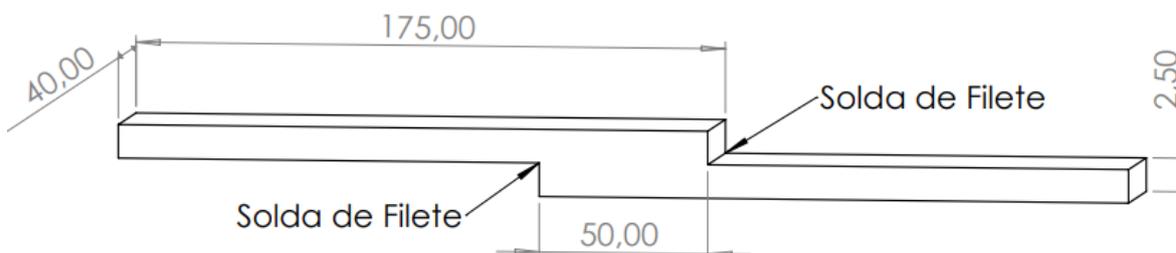
Parâmetros solda TIG	
Vazão do gás de proteção (L/min)	12
Corrente (A)	94
Abertura de Arco (%)	110
Gás pré-Solda (s)	2
Gás pós-Solda (s)	6
Fechamento de Arco (%)	10

Já para o processo de soldagem por eletrodo revestido, a corrente utilizada foi ajustada com testes de parâmetros realizados em chapas de mesma espessura dos CP's, sendo utilizado 62A. Diferentemente da solda TIG em alumínio, a solda em eletrodo revestido pode ser realizada tanto em corrente alternada (CA) quanto contínua (CC), a depender da especificação exigida pelo fabricante. A solda para os CP's em eletrodo revestido foi realizada em CC.

Após a fase de treinamento e ajuste de parâmetros, foram soldadas seis chapas de alumínio de 2,5mm de espessura e dimensões 300x175mm. As chapas foram sobrepostas em 50mm e foi realizada uma solda em filete.

A solda foi executada por toda a extensão de 300mm das chapas e posteriormente cortada para as medidas dos CP's desejadas. O principal motivo dos CP's serem soldados antes de serem ajustados na medida foi para a máxima de redução de transferência de calor para as chapas durante a solda, assim facilitando a execução dos cordões e diminuindo o grau de empenamento dos CP's. Os corpos de prova foram possuem 40mm de largura e seguem a norma ASME QW-462. Na Figura 3 a seguir, é possível observar o desenho técnico dos CP's utilizados

Figura 3 – Esquemático corpo de prova soldado



Ao todo foram produzidos 14 corpos de provas, sendo eles distribuídos em: 6 corpos de prova em TIG, 6 corpos de prova em eletrodo revestido e 2 corpos de prova de metal de base. Na Tabela 4 abaixo é possível visualizar os respectivos ensaios realizados para cada corpo de prova, sendo TIGx os corpos de prova soldados em TIG, ERx os corpos de prova soldados em eletrodo revestido e MBx, os corpos de prova em metal de base, sem nenhum tipo de solda.

Tabela 4 – CP's e respectivos ensaios.

CP	Ensaio de Tração	Análise de Fratura	Metalografia
TIG1	X		
TIG2	X		
TIG3	X		
TIG4	X		
TIG5	X	X	
TIG6			X
ER1	X	X	
ER2	X		
ER3	X		
ER4	X		
ER5	X		
ER6			X
MB1	X	X	
MB2	X		

Os ensaios de tração foram realizados no Instituto Mauá de Tecnologia utilizando a máquina universal de ensaios Instron EMIC 23-50 seguindo a norma ASTM E8/E8M. Este ensaio visou observar a curva carga (kgf) x deformação (%) e analisar as propriedades mecânicas da junta solda e da zona termicamente afetada - ZTA.

Após o ensaio de tração, foi selecionado um corpo de prova de cada categoria para análise da sessão transversal da fratura e observação de sua microestrutura. Para isso, foi utilizado o microscópio digital Olympus DSX1000.

A metalografia seguiu a norma ASTM E3-11 e teve como objetivo a observação da microestrutura dos CP's após soldados. As amostras foram embutidas em baquelite para facilitar seu manuseio e polimento. No processo de polimento das amostras, foram utilizadas duas pastas de diamante, iniciando com uma de  $6\mu m$  e finalizando com outra de  $1\mu m$ . Após o polimento, as amostras foram submetidas a um ataque químico para tornar possível a análise de sua microestrutura. O ataque químico utilizado foi o reagente Keller (95,0%  $H_2O$ , 2,5%  $HNO_3$ , 1,5%  $HCl$ , 1,0%  $HF$ ), muito comum para revelar o contorno de grão de ligas não ferrosas, como o alumínio.

### Resultados e Discussão:

Nas Figuras 4, 5 e 6 e Tabelas 5, 6 e 7, pode-se observar as curvas tensão x deformação obtidos nos ensaios de tração dos corpos de prova, assim como seu alongamento e sua carga de ruptura médios.

Figura 4 – Curva tensão x deformação CP's em metal de base

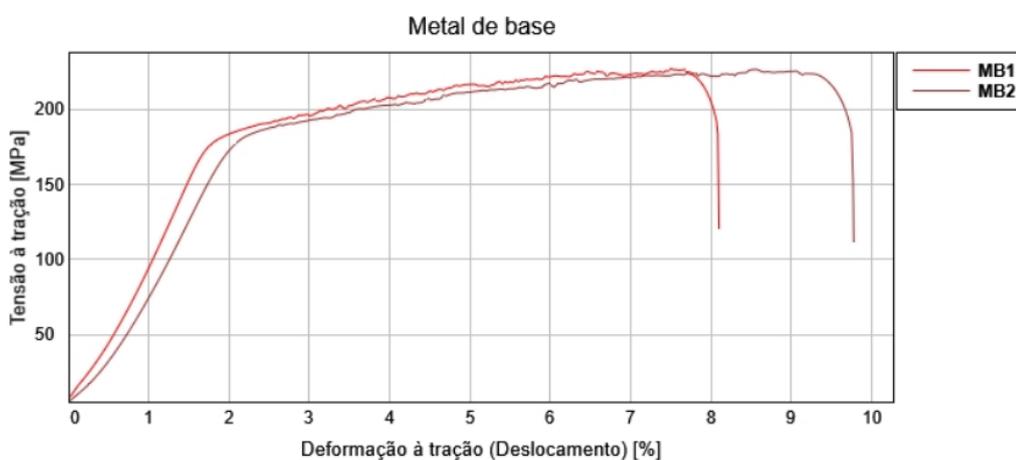


Tabela 5 – Propriedades mecânicas CP's metal de base

CP's MB	
Carga de Ruptura Média (kgf)	2493,60
Alongamento Médio (%)	8,93
Limite de Resistência a Tração Médio (MPa)	225,83
Limite de Escoamento Médio (MPa)	178,23
Desvio Padrão do Limite de Escoamento (MPa)	3,78

Pode-se observar que a tensão limite de resistência e o alongamento do alumínio estão dentro do previsto pela norma ABNT NBR 7823, conforme Tabela 2.

Figura 5 – Curva carga x alongamento CP's TIG

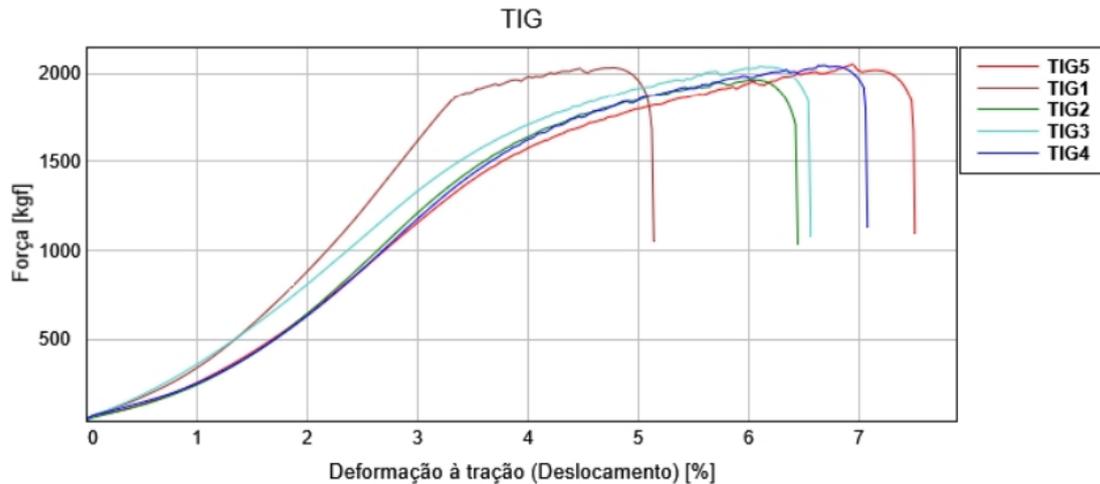


Tabela 6 – Propriedades mecânicas CP's TIG

CP's TIG	
Carga Ruptura Média (kgf)	2024,68
Alongamento Médio (%)	6,53
Limite de escoamento Médio (MPa)	70,16
Limite de Resistência a Tração Médio (MPa)	92,34
Desvio Padrão do Limite de Escoamento (MPa)	5,65

Todos os CP's de tração em TIG tiveram suas fraturas localizadas na Zona Termicamente Afetada, como esperado, validando a execução da solda e do ensaio. Realizando uma comparação, é observado uma diminuição considerável na carga de ruptura e no alongamento do CP's em TIG quando comparado aos CP's em metal de base que não possuem nenhuma solda e nenhuma área afetada pelo calor.

Esta redução significativa da carga de ruptura e sua menor zona elástica nos CP's soldados é explicado pela alteração da microestrutura do material na ZTA, assim modificando suas propriedades mecânicas e resultando em um comportamento mais frágil do corpo de prova. Como o alumínio encontrava-se envelhecido é de se esperar que durante o processo de soldagem tenha ocorrido o superenvelhecimento da liga na ZTA com diminuição de sua resistência mecânica, entre tudo era esperado um aumento no alongamento, o que não foi observado. Esse fato pode ter se dado pelo acúmulo de porosidade na solda.

Figura 6 – Curva carga x alongamento CP's eletrodo revestido

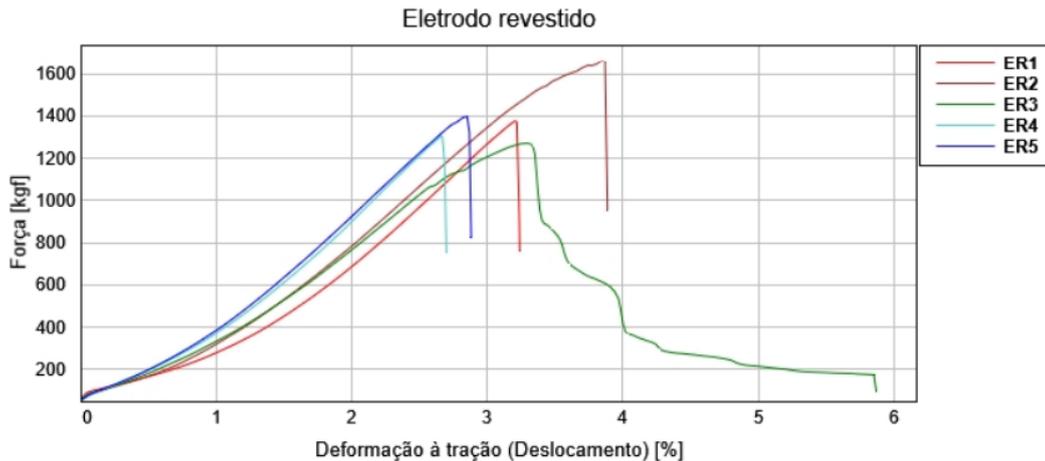


Tabela 7 – Propriedades mecânicas CP's eletrodo revestido

CP's ER	
Carga Rup. Média (kgf)	1402,74
Alongamento Médio (%)	3,7
Limite de Resistência a Tração Médio (MPa)	64,53
Desvio Pedrão do Limite de Resistência (MPa)	6,68

Nos CP's em eletrodo revestido, a carga de ruptura observada foi 30,72% menor do que nos CP's soldados em TIG, diminuição esperada, visto que as soldas em eletrodo revestido em alumínio seriam utilizadas como soldas de reparo em regiões inóspitas. Além disso, o alongamento dos CP's em eletrodo revestido foi drasticamente reduzido, justificado pela fratura ter ocorrido na junta soldada. Com isso, é observado que os CP's não apresentaram nenhuma zona plástica, demonstrando um comportamento frágil. Isto se deve ao fato da porosidade encontrada nas soldas dos CP's de eletrodo revestido serem mais presentes dos que nos CP's de TIG, como pode ser observado nas micro e macrografias abaixo.

Na Figura 8 é possível observar a microestrutura do metal de base. Na Figura 9 é possível notar o aumento do tamanho de grão ao comparar a ZTA do procedimento TIG com o metal de base. Na Figura 10 é notável a região de transição entre a ZTA da solda por eletrodo revestido e o metal de base. Na Figura 11, pode-se observar a presença de porosidade na solda em eletrodo revestido. Por fim, nas macrografia Figuras 12 e 13, é possível comparar a porosidade agregada em cada tipo de solda.

Figura 8 – metal de base 500x Keller



Figura 9 – ZTA TIG 50x Keller

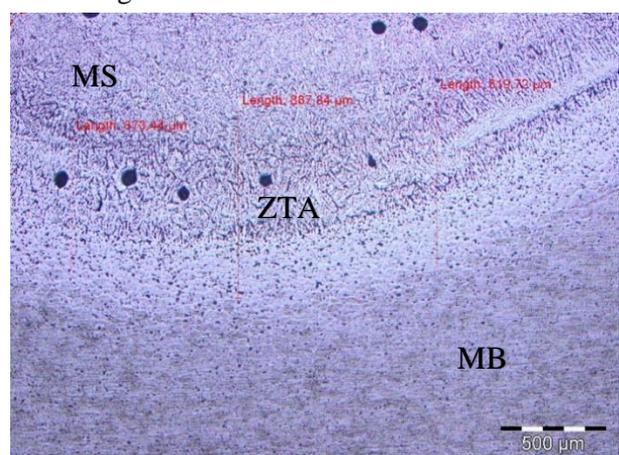


Figura 10 – ZTA eletrodo revestido 500x Keller

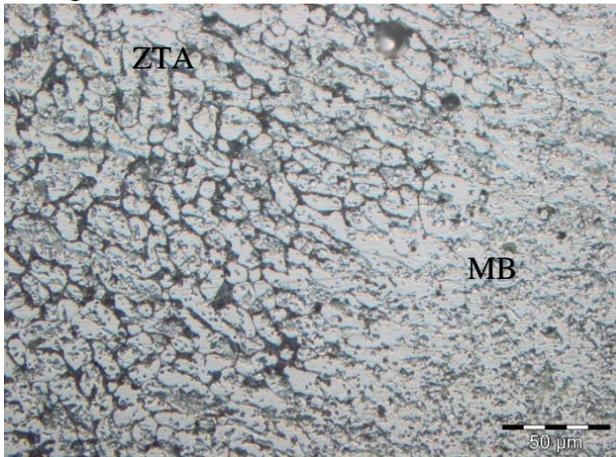


Figura 11 – Porosidade eletrodo revestido 500x Keller

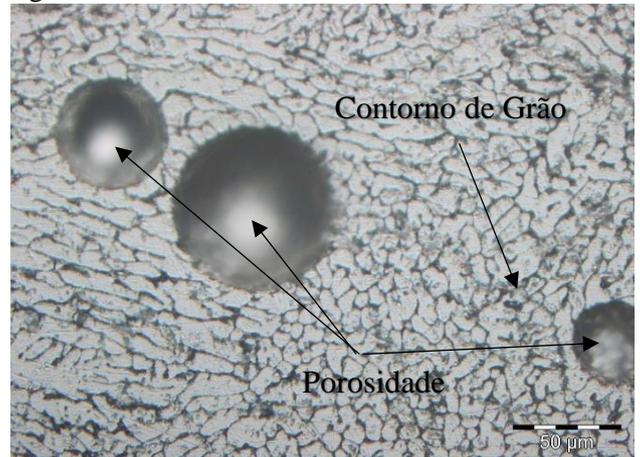


Figura 12 – Macrografia TIG 10x Keller

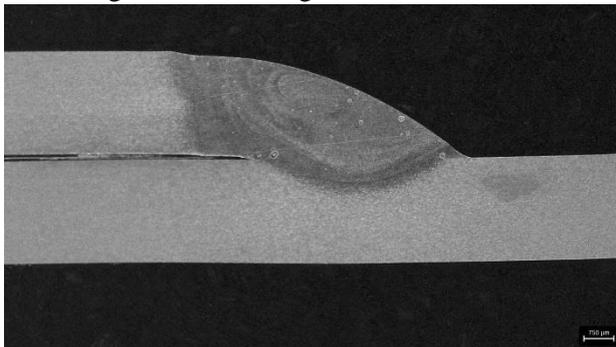
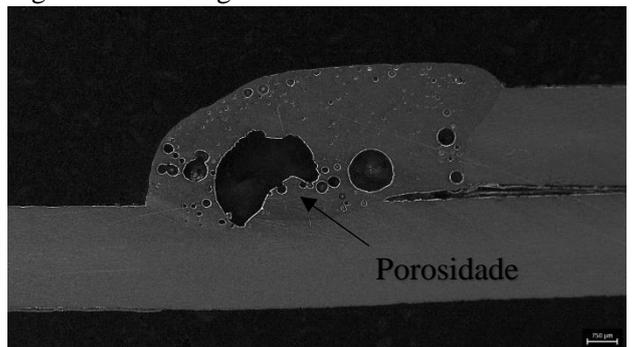


Figura 13 – Macrografia eletrodo revestido 10x Keller



Observando a macrografia das soldas, pode-se dizer que a porosidade apresentada na solda por eletrodo revestido (Figura 13) é muito maior do que na solda TIG (Figura 12). Isso se deve pela dificuldade da realização da solda para união das chapas e pela alta velocidade de execução dos cordões, como explicitado anteriormente. Sendo assim, justifica-se os resultados observados nos ensaios de tração

Na Figura 14, pode-se observar a fratura do CP de metal de base e notar a fase dúctil do material. Na Figura 15, encontra-se a fratura do CP em TIG, na qual ocorreu na zona termicamente afetada (ZTA). Por fim, na Figura 16, fratura do CP em eletrodo revestido, como esclarecido anteriormente, a fratura se deu na solda e com isso, é facilmente observável a presença de poros assim como os observado na metalografia.

Figura 14 – Fratura CP metal de base



Figura 15 – Fratura CP TIG

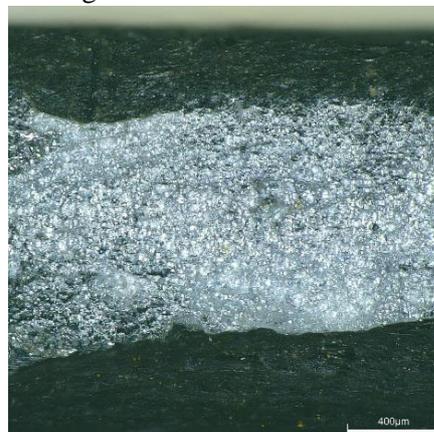
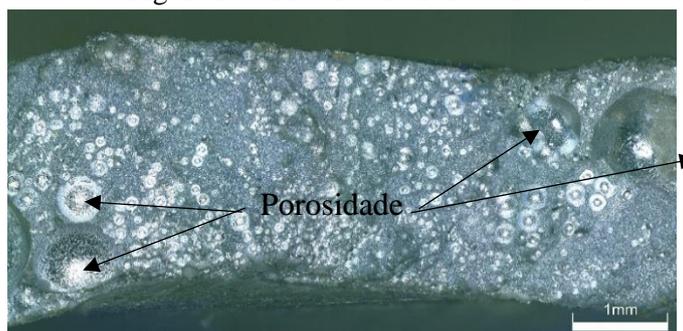
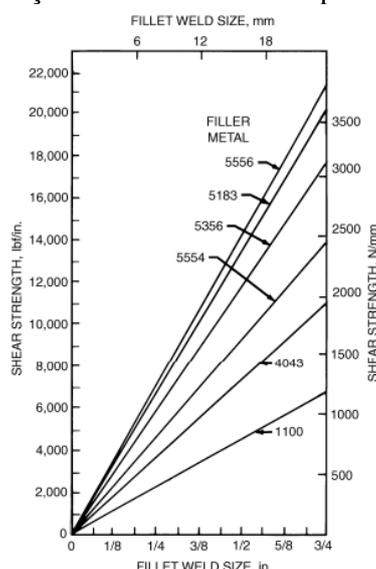


Figura 16 – Fratura CP eletrodo revestido



Na Figura 17, é possível observar a curva força de cisalhamento pela espessura do cordão de solda realizado em TIG.

Figura 17 – Força de Cisalhamento x Espessura do Cordão



Fonte: (Design for Welding – AWS, 2003)

Como explicitado anteriormente, o consumível utilizado para a realização das soldas TIG, foi o 5356 e foi observado uma espessura média do cordão de 8mm, sendo assim, foi possível determinar a mínima resistência aceitável para os corpos de prova.

De acordo com o gráfico, a mínima força de ruptura exigida para a solda dentro das especificações citadas, é de aproximadamente 9600N, sendo assim, é possível comparar com os resultados obtidos nos ensaios de tração. Como os CP's soldados em TIG romperam na zona termicamente afetada, é possível dizer que a resistência mecânica dos cordões está dentro do esperado pela norma, já os CP's em eletrodo revestido, tiveram suas fraturas observadas nos cordões, sendo assim, foi necessário analisar a resistência mecânica obtida.

A carga de ruptura média dos cordões em eletrodo revestido obtidas em ensaio foi de 13760N, o que ao ser comparado a força de cisalhamento exigida pela AWS (American Welding Society) para os consumíveis 5356, é notável que a resistência encontrada é superior a exigida.

### Conclusão:

A solda em alumínio pelo processo de eletrodo revestido é mais barata e rápida de ser realizada em relação ao processo TIG, pois dispensa a utilização de um cilindro pressurizado com gases de proteção. Sendo assim, é um processo conveniente para ser executado em regiões

onde o acesso e transporte dos equipamentos necessários para execução da TIG se tornam pouco viável e caro.

Os corpos de prova soldados em eletrodo revestido apresentaram uma porosidade maior do que as soldadas em TIG devido à complexidade agregada na execução do processo, como demonstrado pela metalografia e imagens em microscópio eletrônico. Isso resultou em uma resistência mecânica reduzida quando comparado aos corpos de prova soldados em TIG, como foi mostrado pelos ensaios de tração.

A carga de ruptura média observada nos cordões realizados em eletrodo revestido é superior ao exigido pela AWS ao comparado com os consumíveis utilizados em TIG. Deste modo, pode-se dizer que as soldas em eletrodo revestido de alumínio atendem os parâmetros mínimos exigidos pela norma.

### **Referências:**

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6834: Alumínio e suas ligas – Classificação da composição química*. ABNT Editora. Rio de Janeiro, 2010.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7823: Alumínio e suas ligas - Chapas e lâminas – Propriedades mecânicas para ligas não tratáveis termicamente*. ABNT Editora. Rio de Janeiro, 2023.

Barbosa, R. *Processos de fabricação: soldagem e fundição*. Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais, 2015. Dissertação (Aula).

Carter, J.-C., Holland V.-M., Kloiber, A.-L, Kotan M.-R, Sanders W.-W, Shaw E.-R & Thornton A.-W. (2003) *Design for Welding*. Editora AWS (American Welding Society). Livro.

DBC Oxigênio. (2014). DBC Oxigênio, disponível em <https://guias.oxigenio.com/soldagem-tig>

Oates, R.-W., O'Brien, L. & Connor, P.-L. (1998). *Welding Handbook, Vol. 4: Materials and Applications, Part 2, 8<sup>th</sup>*. Editora AWS (American Welding Society). Livro.

Varshney, D. & Kumar, K. (2020). *Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization*. Ain Shams University, Cairo. Published by Elsevier B.V., 2020. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920301295>

Verma, P.-R., Pandey, N.-K., Andrés, K., Khargotra & R., Singh, T. (2023). *Difficulties and redressal in joining of aluminium alloys by GMA and GTA welding: a review*. University of Pannonia, Veszprém. Published by Elsevier B.V., 2023. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423001850>

### **Agradecimentos:**

À orientadora deste trabalho Professora Doutora Susana Marraccini Giampietri Lebrão. Ao Professor Mestre José Agustín Castillo Lara da Fundação Santo André. À instituição: Instituto Mauá de Tecnologia (IMT). Aos técnicos dessas instituições, sendo alguns deles: Pablo Aparecido Delfino Maravelli (técnico do laboratório de ensaios mecânicos do IMT), Maurício Pereira da Silva (técnico da divisão de ensaios e análises do IMT), Adriel Antônio da Silva e Margarete Cristina Moreira Serbino (técnicos do laboratório de metalografia do IMT). A FAPESP Processo nº 2020/09163-3.