

Análise microestrutural da usinagem da liga bronze de alumínio soldada pelos processos tig e fricção radial

Emerson Augusto Raymundo¹; 0000-0002-2769-3674

José Rubens Camargo¹; 0000-0002-0262-2829

Gabriel Augusto do Prado Raymundo¹; 0009-0009-9754-5392

Alexandre Honorato Muella Peixoto¹; 0009-0002-4258-1758

Luiz Gustavo Guimarães de Oliveira¹; 0009-0007-1560-1676

¹FATEC de Pindamonhangaba, Rodovia Vereador Abel Fabrício Dias, 4010, Água Preta - Pindamonhangaba/SP, 12445-010, Brasil, emersonaugustoray@gmail.com.

Resumo: A busca por processos de soldagem que minimizem os efeitos indesejados na zona termicamente afetada (ZTA) é de grande relevância tecnológica. Nesse contexto, a soldagem por fricção surge como alternativa promissora para reduzir tais impactos. O objetivo deste trabalho foi realizar uma análise comparativa entre a soldagem TIG GTAW e a soldagem por fricção radial FRW em uma liga de bronze alumínio-níquel, reconhecidamente de difícil soldabilidade e usinabilidade. Para tanto, foram confeccionados corpos de prova submetidos a ambos os processos e avaliados por meio de análises micrográficas associadas ao estudo dos cavacos gerados em operações de torneamento, utilizando processamento e análise digital de imagens. Os resultados evidenciaram alterações significativas na morfologia das fases e na evolução microestrutural dos cavacos, em função das condições de fabricação e dos parâmetros aplicados. A partir dessas observações, verificou-se que o processo FRW apresentou maior eficiência, configurando-se como a técnica mais adequada para aplicações envolvendo essa liga.

Palavras-chave: Usinagem. Bronze de Alumínio. Processamento e Análise de Imagens, cavacos, Soldagem por Fricção e GTAW.

INTRODUÇÃO

Os bronzes de alumínio apresentam baixas taxas de oxidação a altas temperaturas e excelente resistência ao ácido sulfúrico, dióxido de enxofre e outros produtos de combustão e são, portanto, utilizados na construção de itens expostos a um ou a ambos (ADS, 1981). Segundo Diniz et al. (2000) durante o processo de usinagem é necessário entender o comportamento de fenômenos ou parâmetros ligados ao processo tribológico da ferramenta, material e forças de usinagem, tais como desgaste da ferramenta, aresta postiça de corte, calor gerado, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte entre outros, e para se obter cientificamente uma explicação para o comportamento desses fatores pode ser necessário um estudo minucioso do processo de formação do cavaco. Conforme ressaltam Spring e Inoué (1997), operações em imagens digitais podem ser classificadas em simples manipulações pontuais de pixels, nas quais cada valor depende apenas de sua intensidade original, ou em operações de vizinhança. Esse princípio é fundamental para o desenvolvimento de filtros de suavização, realce de bordas e técnicas de convolução, largamente empregados no estudo metalográfico. Mais recentemente, o avanço da visão computacional e da inteligência artificial ampliou ainda mais as possibilidades do processamento de imagens na engenharia de materiais (GONZALEZ; WOODS, 2018).

MÉTODOS

O material utilizado neste estudo foi uma liga de bronze alumínio-níquel, classificada como C63020 TQ50. As amostras destinadas aos ensaios foram preparadas a partir de barras cilíndricas com diâmetro de uma polegada. Os experimentos foram realizados em um torno NARDINI NODUS. Para a execução do trabalho, foram confeccionados corpos de prova destinados aos processos GTAW e por fricção, a fim de avaliar qual deles apresentaria melhor desempenho em termos de análise microestrutural. Para o processo GTAW, foi usinado um chanfro em “V” com 12 mm de largura e 6 mm de profundidade, resultando em corpos de prova com geometria final de 25 mm de diâmetro por 80 mm de comprimento. Como consumível, utilizou-se arame para soldagem GMAW, cortado em segmentos de 300 mm, com especificação WIM285 – CuSnC, sendo o gás de proteção empregado o argônio.



O processo foi conduzido em uma fonte GTAW modelo Eutectic Master NT 2000 AC/DC. Com o intuito de otimizar a soldagem GTAW, empregou-se ainda um pré-aquecimento realizado com chama oxiacetilênica. Quanto aos parâmetros de usinagem, foram adotados valores recomendados em catálogos para ligas não ferrosas: rotação de 1000 rpm, velocidade de corte de 90 m/min, avanço de 0,25 mm/volta e profundidade de 1,5 mm. Para análise microestrutural, empregou-se o software de domínio público “ImageJ”, utilizado para calibração das imagens, convertendo as medidas em pixels para unidades micrométricas, o que possibilitou maior precisão na avaliação dos microconstituintes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado para discussão foi o processo de soldagem GTAW, representado pela imagem (a) a Figura 1. Com relação ao processo por fricção radial (FRW), representado pela imagem (b) da Figura 1, pode ser observada a boa qualidade da junção soldada, conforme prevista pela literatura, formando-se a chamada “aba” de junção e as regiões de aquecimento da operação em ambos os lados da solda.

Figura 1 - Corpos de prova soldado pelos processos GTAW(a) e FRW(b).



(a)



(b)

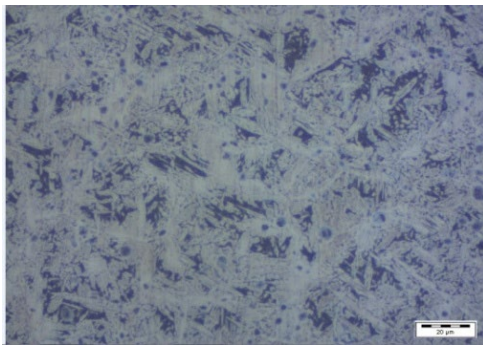
Fonte: Próprio autor.

As imagens apresentadas na Figura 2, referentes ao processo GTAW, foram obtidas das regiões correspondentes ao metal de base, zona de transição, zona fundida e zona termicamente afetada (ZTA). De acordo com Hasan et al. (1982), a micrografia ilustrada na

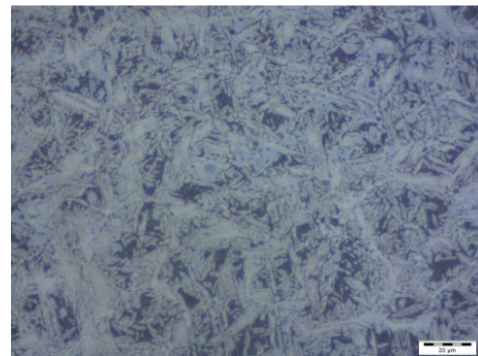


imagem (a) da Figura 3 evidencia constituintes que podem ser considerados microestruturas típicas de uma liga de bronze-alumínio, servindo como referência para a análise comparativa das amostras investigadas.

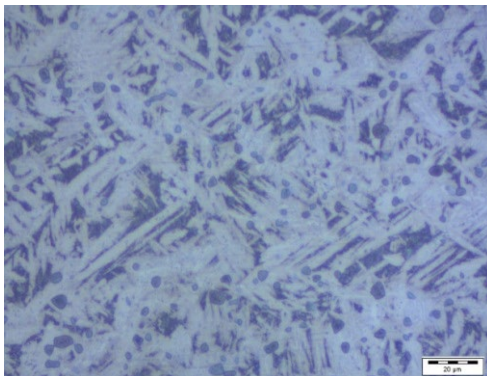
Figura 2. Imagens reveladas da amostra soldada pelo processo FRW e GTAW.



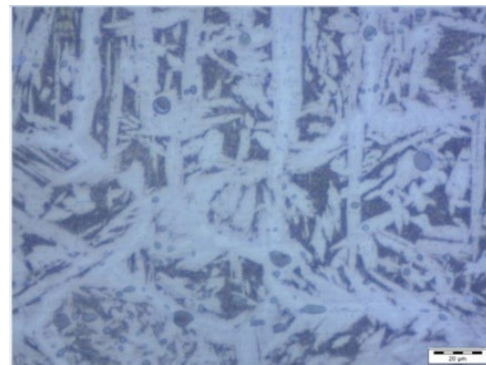
(a) Zona de fusão - FRW



(b) ZTA - FRW



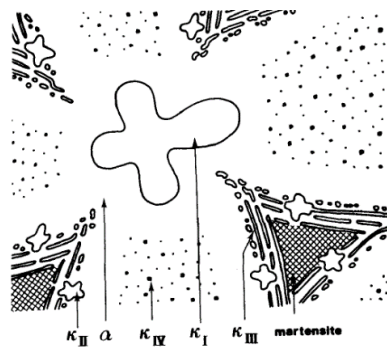
(a) ZTA - GTAW



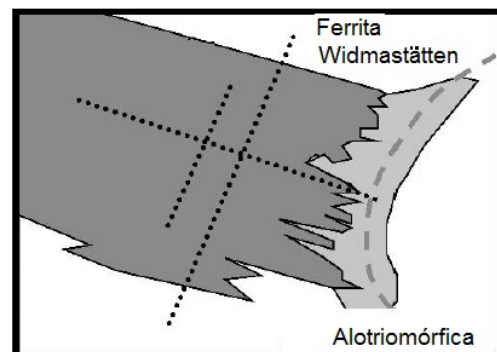
(b) Zona fundida - GTAW

Fonte: próprio autor

Figura 3 - Microconstituintes possíveis de uma liga típica de bronze de alumínio.



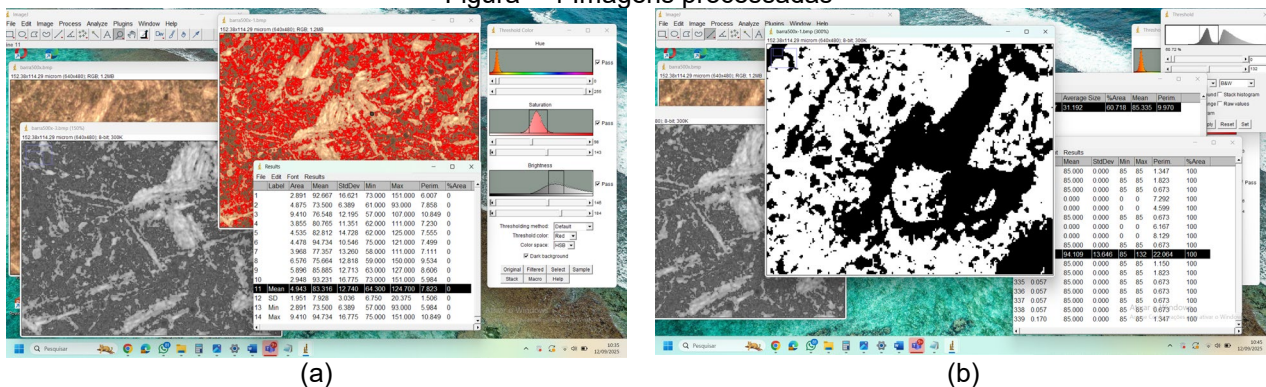
(a) Fonte: Hasan et al. (1982).

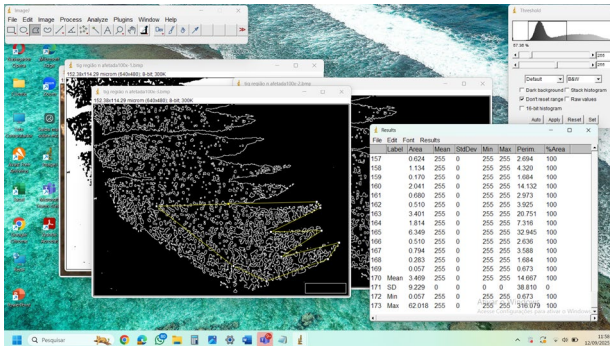


(b) Fonte: Phelan, D.; Dippenaar, R. (2004).

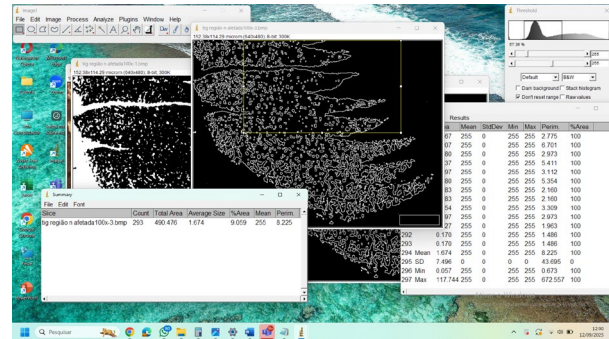
Ao analisar a imagem (a) da Figura 2 em comparação com a Figura 3(a), é possível identificar as fases α (regiões claras) e β (regiões escuras), bem como áreas martensíticas associadas à fase β' . Também se observam precipitados do tipo k_{IV} . A fase α é geralmente composta por Cu-Al com teores inferiores a 10% de alumínio, apresentando maior ductilidade, enquanto a fase β pode se transformar em fase martensítica, o que possivelmente ocorreu na liga fundida analisada. Os precipitados do tipo k_{IV} , descritos por Cook et al. (1952) como Fe_3Al , apresentam parâmetro de rede de aproximadamente $5,77 \pm 0,06 \text{ \AA}$, com morfologia equiaxial e romboédrica. Ainda nas micrografias da Figura 2, nota-se a presença da fase α Widmanstätten, resultante da transformação da fase β em planos cristalográficos durante o resfriamento, além da fase α alotriomórfica pré-existente, igualmente observada na matriz. Com base na proposta deste trabalho, foi aplicado o processamento digital de imagens em diferentes condições do material. A imagem (a) Figura 4 ilustra o metal de base antes do processo de soldagem, no qual se identificaram inclusões do tipo k_I de forma nítida, além de outras fases complementares: regiões mais claras associadas à ferrita Widmanstätten; partículas esverdeadas menores, atribuídas à fase k_{II} ; partículas verdes ainda mais finas, relacionadas à fase k_{IV} , e fases brancas de morfologia colunar e reduzida espessura, correspondentes à fase k_{III} . A coloração avermelhada foi associada à fase α da matriz da liga. Os resultados apresentaram dimensões micrométricas, com área média de aproximadamente $4,9 \mu m^2$ e perímetro médio em torno de $7,8 \mu m$.

Figura – 4 Imagens processadas

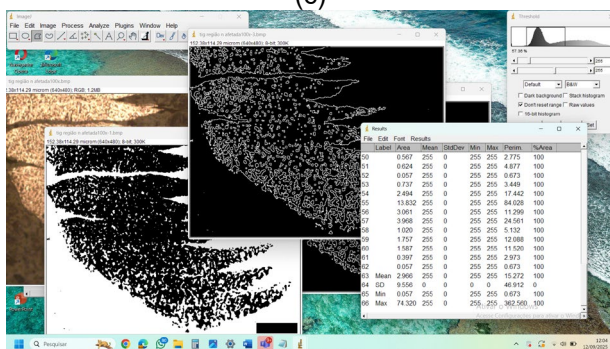




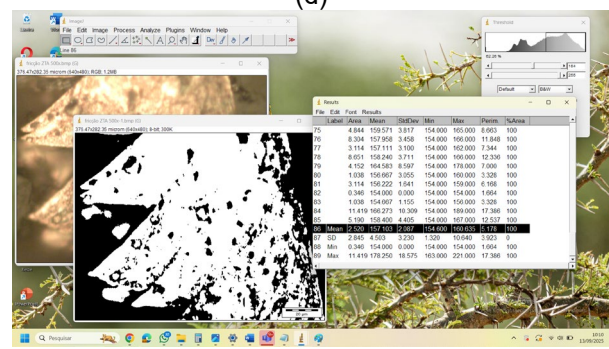
(c)



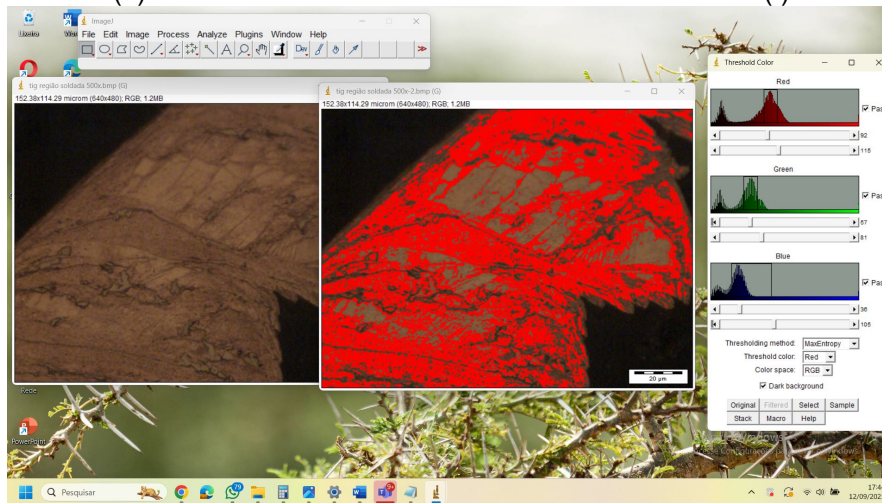
(d)



(e)



(f)



(g)

Fonte: (autores)

O processamento das imagens possibilitou a caracterização da fase ferrítica da liga, considerando suas diferentes morfologias já discutidas na imagem (a) Figura 4. A análise da imagem (b) Figura 4 indicou que a ferrita apresentou área média de aproximadamente $32 \mu\text{m}^2$ e perímetro médio de $9,9 \mu\text{m}$. Na Figura 4(c), observa-se um cavaco obtido da região do metal de base após a soldagem pelo processo TIG, no qual a análise estereológica

revelou que as fases k exibiram área média de cerca de $3,47 \mu\text{m}^2$ e perímetro médio em torno de $14,67 \mu\text{m}$. Esses valores sugerem maior fragmentação dessas fases, associada às condições térmicas e ao resfriamento característicos do processo TIG. A redução da ferrita Widmanstätten pode ser considerada benéfica, pois diminui regiões potencialmente frágeis, enquanto o aumento da fase α no interior do cavaco contribui para maior ductilidade e homogeneidade. Entretanto, a concentração localizada das fases k em regiões serrilhadas pode atuar como sítios preferenciais para nucleação de trincas, especialmente sob fadiga.

A imagem (d) da Figura 4, correspondente à região superior do cavaco, apresentou área média de $1,64 \mu\text{m}^2$ e perímetro médio de $8,22 \mu\text{m}$, valores inferiores aos observados na região posterior, evidenciando diferenças no mecanismo de formação do cavaco ao longo de sua geometria. Já a Figura 4(e), referente à região de fluxo, mostrou alterações expressivas na morfologia das fases devido às tensões de estiramento em múltiplas orientações. A análise estereológica revelou área média de aproximadamente $2,9 \mu\text{m}^2$ e perímetro médio de $15,72 \mu\text{m}$, indicando que as fases sofrem alongamento e reorientação, resultando em partículas mais alongadas e perímetros maiores, mesmo em áreas médias reduzidas. Na Figura 4(f), também referente à região de fluxo, observou-se uma concentração intermediária das fases k em relação às regiões superior e posterior do cavaco. A análise quantitativa novamente indicou área média de cerca de $2,9 \mu\text{m}^2$ e perímetro médio de $15,72 \mu\text{m}$, reforçando que o mecanismo de formação do cavaco envolve modificações morfológicas significativas das fases k e que as tensões locais desempenham papel fundamental na evolução microestrutural e no desempenho mecânico das juntas soldadas. Por fim, a Figura 4(g) ilustra o cavaco proveniente da zona fundida obtida pelo processo TIG.

A segmentação permitiu identificar a fase α (em vermelho), a austenita (em verde) e as fases k (em tonalidades mais escuras). Essas imagens evidenciam mudanças significativas na morfologia e na geometria das fases, resultantes diretamente do processo de solidificação da junta soldada.

CONCLUSÕES

O presente trabalho contribuiu para o aprofundamento do entendimento dos processos de soldagem, evidenciando a influência de cada técnica na formação de cavacos e na evolução microestrutural da liga de bronze-alumínio. As análises micrográficas e estereológicas dos cavacos indicaram distribuição mais homogênea das fases e menor variação morfológica, confirmando a eficiência do método no controle microestrutural e no desempenho final da junta. O processamento digital de imagens permitiu identificar diferenças significativas na morfologia e geometria das fases, como a redução localizada da ferrita Widmanstätten, o refinamento de partículas na região superior dos cavacos e a maior concentração das fases k em áreas serrilhadas ou de fluxo. As observações também destacaram particularidades na zona fundida, como a ausência da fase alotriomórfica na base da ferrita Widmanstätten e a migração orientada das fases k, fenômenos que reforçam a complexidade dos mecanismos de solidificação e deformação envolvidos na formação dos cavacos. Para a continuidade da pesquisa, estão em andamento análises de microdureza e de composição química das fases, tanto nos corpos de prova quanto nos cavacos, uma vez que esses parâmetros estão diretamente relacionados à resistência mecânica, à estabilidade microestrutural e à morfologia observada. Assim, a integração das análises micrográficas, estereológicas e químicas fornecerá subsídios mais robustos para validar e comparar, de forma definitiva, os sistemas de soldagem GTAW e FRW.

REFERÊNCIAS

Aluminium Bronze Alloys Corrosion Resistance Guide, **Copper Development Association**, Publication N0 80, JUL, p. 30, 1981.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Metais**, Editora artliber, São Paulo, 2000.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2018.

Spring, K., Inoué, S., **Video microscopy the fundamentals**. 2nd. ed. New York: Plenum Press, 1997. Ramos Pinto, e Renner Washington Mariano dos Santos.