



EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS EM TI- β METAESTÁVEIS

Palavras-Chave: [[Ligas de titânio]], [[Microdureza]], [[Biomateriais]]

Autores:

JULYA GARCIA ECLES [UNICAMP]

Prof. Dr. RODRIGO JOSÉ CONTIERI (orientador) [UNICAMP]

INTRODUÇÃO:

As ligas de titânio foram desenvolvidas originalmente com o propósito de serem aplicadas no setor aeronáutico, devido à sua combinação única de baixa densidade e alta resistência mecânica, mesmo em temperaturas elevadas. A corrida armamentista durante a Segunda Guerra Mundial impulsionou significativamente o uso dessas ligas em diversos componentes de aeronaves. Um exemplo notável é a primeira liga de titânio do tipo α , que incorporou alumínio como elemento de liga (Ti-5Al-2,5Sn), buscando alcançar elevada resistência mecânica em temperaturas elevadas.

Posteriormente, com a introdução de elementos de liga β estabilizadores, como o molibdênio, surgiu a liga Ti-7Al-4Mo, classificada como $\alpha + \beta$, com alta resistência mecânica mesmo sob grandes cargas (LÜTJERING e WILLIAMS, 2003). Em virtude disso, as ligas de titânio tornaram-se materiais indispensáveis na indústria aeroespacial, desempenhando papéis essenciais em diversas aplicações na construção de aeronaves. A partir dos anos 60, a ampla aplicação do titânio e suas ligas no campo aeronáutico ganhou uma nova dimensão com a expansão para o setor biomédico, especialmente na fabricação de implantes metálicos. Esses implantes têm sido amplamente utilizados na reconstrução de tecidos duros devido às suas propriedades biomecânicas excepcionais, como alta resistência mecânica, boa resistência à fadiga e grande durabilidade contra desgaste. Além disso, é crucial que esses materiais sejam leves, não tóxicos e altamente resistentes à corrosão (LEYENS e PETERS, 2003). Essa diversificação de aplicação destaca a versatilidade e o valor do titânio e suas ligas em diferentes setores, demonstrando seu potencial para contribuir significativamente tanto na indústria aeroespacial quanto na área médica.

Atualmente, no mercado de implantes ortopédicos, o titânio (Ti) e a liga Ti-6Al-4V competem com o aço inoxidável 316L e as ligas cobalto-cromo-molibdênio (Co-Cr-Mo) (MANMEET et al., 2019). O titânio e suas ligas têm sido amplamente considerados como materiais inertes e seguros para uso no corpo humano, graças à formação espontânea de um filme de óxido passivo em sua superfície. Essa característica tem sido um dos principais fatores que impulsionam a utilização do titânio em implantes. No entanto, é importante ressaltar que nenhum material metálico é totalmente inerte no ambiente do corpo humano e, ao longo de um longo período de tempo, pode ocorrer corrosão desses materiais (MANMEET et al., 2019). Portanto, apesar das vantagens do titânio e suas ligas em relação à biocompatibilidade, é essencial monitorar cuidadosamente a resposta do corpo ao implante e considerar a possível degradação ao longo do tempo. O contínuo avanço na pesquisa e na tecnologia é fundamental para aprimorar a durabilidade e o desempenho dos implantes metálicos utilizados na medicina ortopédica.

Nos últimos anos, diversos estudos têm se dedicado ao desenvolvimento de ligas de titânio com um baixo módulo de elasticidade, alcançado por meio da adição de elementos de liga preferencialmente não tóxicos, como Ta, Nb, Mo e Zr, em substituição aos elementos V (vanádio) e Al (alumínio), que possuem alto grau de toxicidade (NIINOMI et al., 2002). Entre essas ligas, as ligas de titânio β -metaestáveis têm se destacado nas pesquisas de biomateriais. São conhecidas como a segunda geração de ligas de titânio e apresentam um baixo módulo de elasticidade, evitando o efeito de blindagem, além de outras vantagens, como alta resistência à corrosão e superior resistência mecânica alcançada por meio de tratamentos térmicos de envelhecimento (ZHANG et al., 2015).

Manter uma boa resistência mecânica e excelente resistência à corrosão ao mesmo tempo que se reduz o módulo de elasticidade representa um avanço significativo, uma vez que obter materiais com essas propriedades ainda é um desafio para aplicações biomédicas (AZEVEDO et al., 2017). Com o objetivo de alcançar alta resistência mecânica sem comprometer a ductilidade, alguns estudos têm incorporado o elemento de liga Sn (estanho) (MELLO et al., 2015). Essas pesquisas promissoras podem abrir novas possibilidades na área de biomateriais e contribuir para aprimorar os implantes utilizados na medicina, proporcionando materiais mais seguros e eficientes para a saúde humana. Logo, de modo a avançar sobre o estado da arte, a presente pesquisa correlaciona os efeitos das rotas de processamento sobre as transformações de fases e microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas.

METODOLOGIA:

A liga de titânio do tipo β metaestável, Ti-10Mo-3Sn em porcentagem de peso, foi preparada utilizando um forno de fusão a arco-voltáico com atmosfera controlada em um cadinho de cobre refrigerado. As amostras foram cuidadosamente pesadas para garantir a composição exata da liga. O processo de preparação incluiu a colocação de placas de titânio no cadinho, seguido pelos pós de Mo e Sn, e novamente placas de titânio para evitar perda de partículas durante a fusão. A atmosfera do forno foi purgada e preenchida com argônio para evitar a presença de gases indesejados.

Após a obtenção das ligas, elas foram refundidas cinco vezes para garantir a homogeneidade composicional. Em seguida, as ligas foram submetidas a tratamentos térmicos de homogeneização composicional a 1000 °C durante 24 horas em um forno com atmosfera controlada. Esse tratamento eliminou as heterogeneidades resultantes da fusão a arco. Os lingotes homogeneizados foram então submetidos ao processo de Forjamento Rotativo, que reduziu o tamanho de grão e alongou os lingotes para facilitar a confecção de corpos de prova para ensaios mecânicos.

Após essas etapas, as amostras foram tratadas termicamente a 1000 °C por 12 horas, sendo algumas resfriadas em forno e outras rapidamente em água para temperá-las. A preparação das amostras para análise microestrutural seguiu as diretrizes da norma ASTM E3 (2001). As amostras foram embutidas em resina de cura fria e passaram por lixamento metalográfico com lixas d'água de diferentes granulometrias. Em seguida, foram polidas com pasta de diamante e solução abrasiva. Esse processo garantiu superfícies adequadas para análise microestrutural, permitindo investigar as características e propriedades dos materiais em estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O método utilizado para aferir a composição química das ligas foi a fluorescência de raios X, revelando que as composições obtidas foram muito próximas das nominais, com Ti em equilíbrio junto a 9,8% em peso de Mo e 3,3% em peso de Sn. No entanto, a presença de 10% de Mo na liga Ti-10Mo-3Sn não foi suficiente para torná-la completamente β -estabilizada, conforme indicado pela formulação da Equação de Molibdênio Equivalente utilizada para o desenvolvimento das ligas.

No estudo das amostras submetidas a tratamento térmico e resfriamento lento em forno, observou-se a formação de distintas frações volumétricas e tamanhos de precipitados da fase

α . Em contraste, na condição de resfriamento rápido em água, a microestrutura predominante foi da fase β . Esses resultados são similares aos encontrados por Wang et al. (2016), que investigaram ligas de Ti-xMo ($x = 10, 15$ e 20% em peso), onde também foi constatada a presença da fase α em matriz β para as ligas Ti-10Mo resfriadas em água. Apesar de não ter sido detectada a presença da fase omega por difração de raios X, é possível que essa fase esteja presente em baixa fração volumétrica e dispersa na fase beta em escala nanométrica, o que torna improvável sua detecção por essa técnica. Estudos recentes em outras ligas de titânio detectaram a fase omega apenas por microscopia eletrônica de transmissão.

As propriedades mecânicas das ligas de titânio são diretamente afetadas pela fração volumétrica, distribuição, tamanho e morfologia das fases presentes na liga, as quais, por sua vez, são influenciadas pelo processamento termomecânico aplicado e pelos parâmetros do processo, como temperatura, tempo de permanência, taxa de aquecimento e resfriamento. As medidas de dureza Vickers e módulo de elasticidade foram realizadas para avaliar a influência das fases e suas frações volumétricas, tamanho e morfologia nessas propriedades. Na amostra tratada termicamente e resfriada em forno, a dureza foi de aproximadamente 305 HV e o módulo de elasticidade de 115,7 GPa. Já na condição de resfriamento rápido, a dureza foi maior, com valor médio de 324 HV e módulo de elasticidade de 98,2 GPa. Acredita-se que o maior valor de dureza esteja relacionado à existência da fase omega, que não foi detectada pelas técnicas utilizadas. Embora pequenas frações volumétricas de fase α possam levar a uma grande redução do módulo de elasticidade, como observado em outros estudos, o alto módulo de elasticidade observado na liga Ti-10Mo-3Sn em comparação com a liga Ti-13Mo-6Sn de outro trabalho sugere a presença da fase omega.

CONCLUSÕES:

As propriedades mecânicas das ligas foram influenciadas pelas características das fases presentes, e a dureza Vickers e o módulo de elasticidade foram utilizados para avaliar essas propriedades. A possível presença da fase omega, não detectada pelas técnicas utilizadas, pode estar relacionada ao alto valor de dureza encontrado na liga. Apesar das pequenas frações de fase α reduzirem o módulo de elasticidade, o alto módulo observado na liga Ti-10Mo-3Sn sugere a relevância da fase omega para futuras aplicações dessas ligas.

Esses resultados fornecem importantes insights sobre o desenvolvimento de ligas de titânio com propriedades mecânicas e microestruturais otimizadas. A compreensão das relações entre composição, processamento e propriedades abre caminho para o avanço de

aplicações em setores como aeroespacial e biomédico, onde essas ligas podem desempenhar um papel fundamental em produtos de alto desempenho e seguros.

BIBLIOGRAFIA

AZEVEDO, T.F.; LIMA, T.N.; GARCIA DE BLAS, J.; PEREIRA, L.C.; GRIZA, S. The mechanical behavior of TiNbSn alloys according to alloying contents, cold rolling and aging, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical materials*, v.75, p. 33–40, 2017.

LEYENS, C.; PETERS, M. *Titanium and Titanium Alloys – Fundamentals and Applications*. DLR – German Aerospace Center – Institute of Materials Research, WileyVCH, Köln, Germany, 513p, 2003.

LOPES E.S.N., CREMASCO A., CONTIERI R., CARAM R. Effects of aging heat treatment on the microstructure of Ti-Nb and Ti-Nb-Sn alloys employed as biomaterials, *Advanced Materials Research*, v. 324, p. 61-64, 2011.

LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J.C. *Titanium*. Springer –Verlag, Germany, 379p, 2003.

MANMEET KAUR, K. SINGH. Review on titanium and titanium based alloys as biomaterials for orthopedic applications. *Materials Science and Engineering C*, v. 102 p.844–862, 2019.

MELLO M.G., SALVADOR C.A.F., FANTON L., CARAM R. High strength biomedical Ti–13Mo–6Sn alloy: Processing routes, microstructural evolution and mechanical behavior, *Materials Science and Engineering A*, v.764, p. 138-190, 2019.

NIINOMI, M.; NAKAI, M.; HIEDA, J. Development of new metallic alloys for biomedical applications, *Acta Biomaterialia*, v. 8, n. 11, p. 3888–3903, 2012.

ZHANG W.D., LIU Y., WU H., SONG M., ZHANG T.Y., LAN X.D., YAO X.T.H. Elastic modulus of phases in Ti–Mo alloys, *Materials Characterization*, v. 106, p. 302–307, 2015.