

DESENVOLVIMENTO DE LIGAS Ti-6Al-4V-X%(60Nb-40Fe) DE BAIXO CUSTO A PARTIR DE RECICLAGEM VIA PROCESSAMENTO POR FUNDIÇÃO

Palavras-Chave: [[Ligas de Titânio]], [[Sustentabilidade]], [[Microestrutura]]

Autores(as):

JOSÉ HENRIQUE FURTADO BONALDI [UNICAMP]

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

INTRODUÇÃO:

O processo de extração do minério e fabricação de lingotes de titânio demanda muita energia, tendo um impacto econômico e ecológico considerável e torna fundamental a pesquisa e desenvolvimento sobre reciclagem visando a sustentabilidade ambiental e econômica. A maioria das ligas metálicas (as que possuem ferro ou cobre) sofrem com a ação da oxidação e são biodegradáveis, entretanto, as ligas de titânio, por possuírem alta resistência à corrosão, dificilmente se degradam naturalmente (2), além disso, vários processos de fabricação como de lingotes, conformação a quente e usinagem, geram subprodutos (cavaco) bem como contaminação do material (O₂, ferro), que precisa ser removida e aumenta o montante de material descartado (3)(4).

O interesse do estudo se baseia em descobrir um novo destino para refugos e subprodutos citados anteriormente, visto que o titânio e suas ligas são materiais de extrema qualidade, utilizadas em diversos campos de aplicação devido a baixa densidade, boa biocompatibilidade, alta resistência mecânica e resistência à corrosão. De maneira geral, ligas de titânio podem aguentar tensão de tração em temperatura ambiente até 1400 MPa e oferecem boa usinabilidade e capacidade de serem forjadas (1)(2)(5).

As ligas de titânio podem ser divididas em quatro categorias dependendo da composição de fases, que varia conforme a presença dos elementos de liga: vanádio, molibdênio, nióbio e ferro, chamados de estabilizadores beta - diminuem a temperatura na qual a fase beta se forma; oxigênio e alumínio são considerados estabilizadores alfa (2)(3). As ligas de titânio beta apresentam maior ductilidade e conseqüentemente, compatibilidade maior com processos de conformação mecânica e podem ser endurecidas por tratamento térmico, tendo o melhor desempenho na questão resistência mecânica, entretanto, a temperatura de trabalho necessita ser baixa, já que pode haver recozimento indesejado dependendo da aplicação (3).

Visto isso, o presente resumo destinado ao XXXII Congresso de Iniciação Científica da Unicamp trata do desenvolvimento de uma nova liga composta de Ti64 advindo de processos de fabricação nas indústrias aeronáutica e biomédica como cavaco e refugo com pequenas adições de FeNb para análise microestrutural e propriedades mecânicas como dureza, de modo a encontrar uma composição satisfatória para consolidar a reciclagem. Por fim, mesmo que de modo preliminar, apresenta-se como resultados as microestruturas/fases desenvolvidas e sua relação com comportamento do mecânico (dureza Vickers).

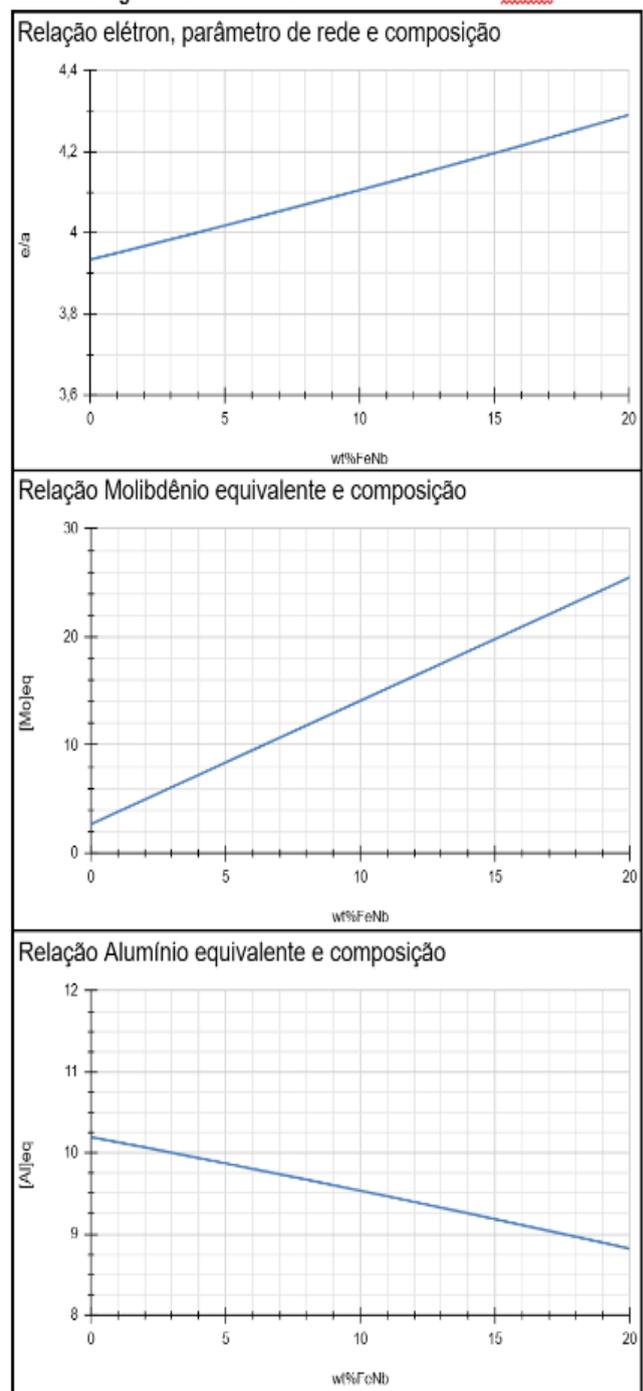
METODOLOGIA:

O modelo matemático, BoMd, foi utilizado para prever o comportamento das ligas de titânio. As características teóricas apresentadas pelas diferentes ligas com seus respectivos valores de BoMd foram utilizadas para construir gráficos de comportamentos (figura 1) - a partir dos gráficos, foram escolhidas 5 ligas para análise: Ti64-x(%wt)(FeNb) (x=0,4,8,12,16).

Na etapa seguinte, de teor prático, os passos realizados foram: limpeza do material (estado inicial, como recebido) com uso de água com detergente e álcool 90% a fim de remover contaminações por líquido lubrificante e outras fontes; compactação dos cavacos de titânio utilizando uma camisa e haste de aço a fim de prover manuseabilidade; pesagem e formulação das amostras (caráter de composição em peso); fundição em forno a arco voltaico, com eletrodo não consumível de tungstênio sob atmosfera de argônio puro (99,998 %) e cadinho de cobre refrigerado a água.

As amostras foram embutidas em baquelite e submetidas a lixamento em politriz metalográfica utilizando lixas d'água com abrasividade progressiva: 200, 400, 600, 800, 1200 mesh e subsequentemente foram polidas no mesmo equipamento com um pano e solução de alumina em suspensão de partículas de 3µm e 0,25µm.

Figura 1: Resultados do modelo matemático BoMd



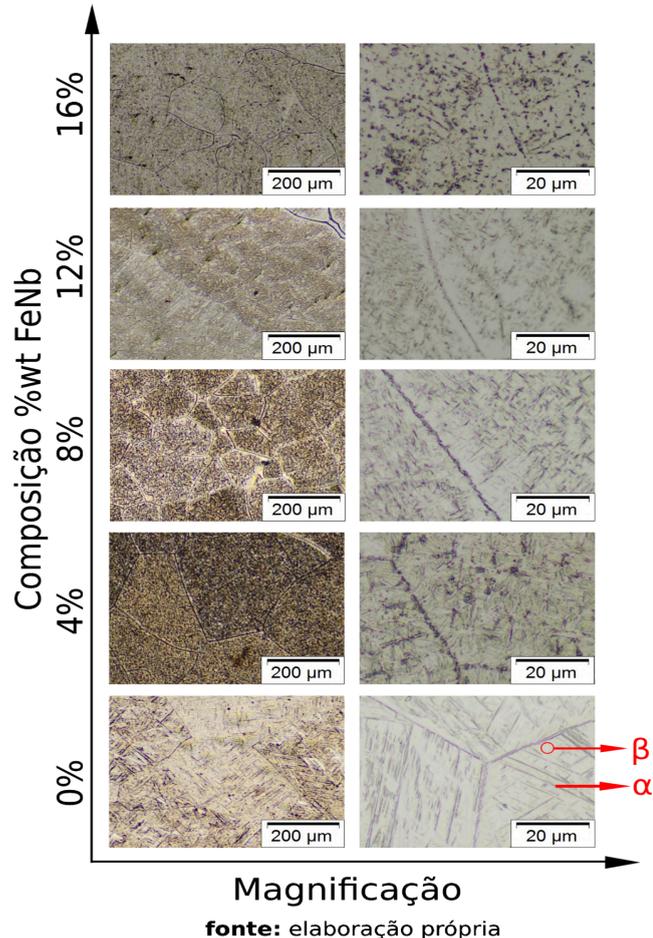
Fonte: elaboração própria

As amostras foram atacadas com solução Kroll (1.0 mL HF, 1.5 mL HNO₃ e 97 mL água) para revelar a microestrutura e possibilitar a visualização em um microscópio óptico (Eclipse LV100, NIKON) e microscópio eletrônico de varredura (FEG Tescan, modelo Mira). As amostras foram desembutidas e submetidas ao teste de microdureza vickers no aparelho Digimess modelo T1100 utilizando carga 9.8N de força por 10 segundos. Finalmente, as amostras foram submetidas a testes de difratometria de raios-x (PANalytical, modelo X'Pert³ Powder) obtendo resultados através do software Highscore Plus (desenvolvedor Malvern Panalytical)

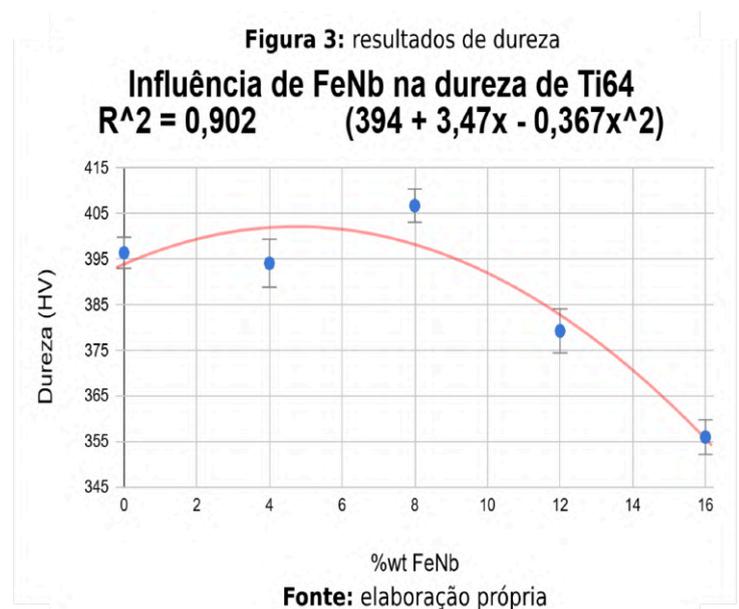
RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Através da microscopia óptica, é possível identificar dois padrões de comportamento acontecendo simultaneamente: diminuição do tamanho de grão (refinamento) e mudança morfológica da fase alfa - de lamelar para espículas para glóbulos (figura 2). Isso deve-se ao fato da introdução de elementos que estabilizam a fase beta (Ferro e Nióbio); pode-se indagar se há uma diminuição da quantidade de fase alfa presente e para tal é necessário uma análise estrutural mais robusta, já que visualmente a amostra com 16%wt de FeNb ainda apresenta uma alta densidade de “pontos pretos” (fase alfa).

figura 2: resultados microscopia óptica
Comportamento de fase e tamanho de grão



Com relação aos resultados obtidos na análise de dureza (HV), pode-se comprovar a expectativa teórica de diminuição da mesma (figura 3), entretanto, o fator tratamento térmico é importante e não deve ser descartado, apesar de não ser contemplado nesses resultados (liga de titânio majoritariamente beta produz resultados melhores de aumento de resistência quando submetidos à tratamento térmico (3)).

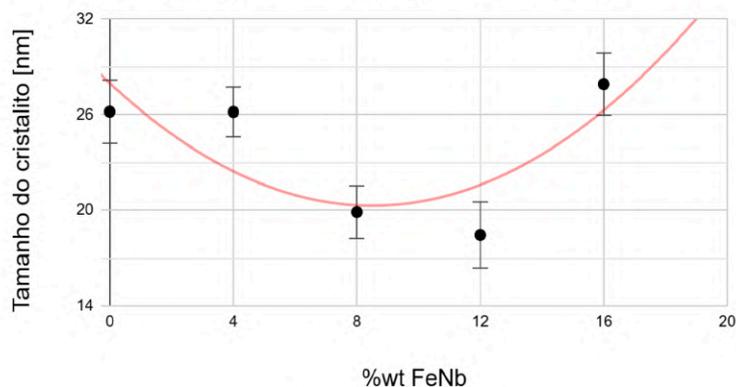


Com os resultados do teste de difratometria de raios-x foi possível obter o tamanho de cristalito e, ao compará-lo à composição, teve-se dificuldade de propor uma correlação entre ambos ($R^2 = 0,587$) (figura 4).

A comparação dos dados de tamanho de cristalito com a dureza resultou em uma análise mais interessante, com uma curva de tendência bem ajustada ($R^2 = 0,997$) (figura 5), indicando um máximo de dureza em torno de 22.5nm de tamanho de cristalito.

A análise de fases feita em sequência resultou em um gráfico de intensidade por 2θ (figura 6) e, com suporte teórico, foi possível estabelecer de maneira inicial a disposição das fases alfa e beta, bem como concluir o esperado previsto: diminuição da fase alfa e aumento da fase beta pela presença dos elementos beta estabilizadores; é necessário ir além na pesquisa para se obter mais dados quantitativos e seja possível obter uma relação mais determinística.

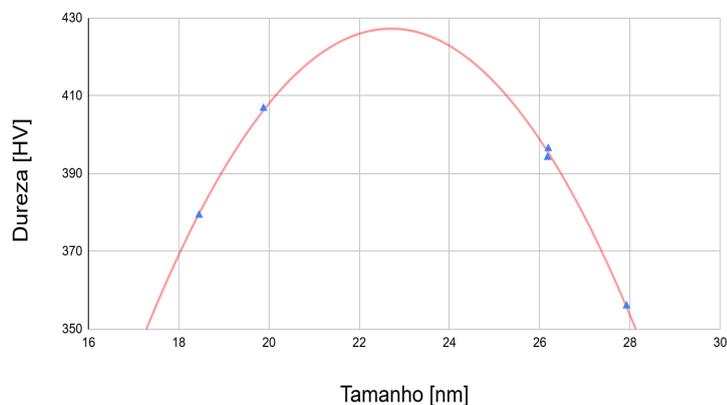
Figura 4: resultados de DRX - cristalito
Influência de FeNb no tamanho de cristalito
 $R^2 = 0,587$ $(28 - 1,81x + 0,106x^2)$



Fonte: elaboração própria

Figura 5: comparação entre dureza e tamanho de cristalito

Dureza [HV] x Tamanho de cristalito[nm]
 $R^2 = 0,997$ $(-927 + 119x - 2,63x^2)$

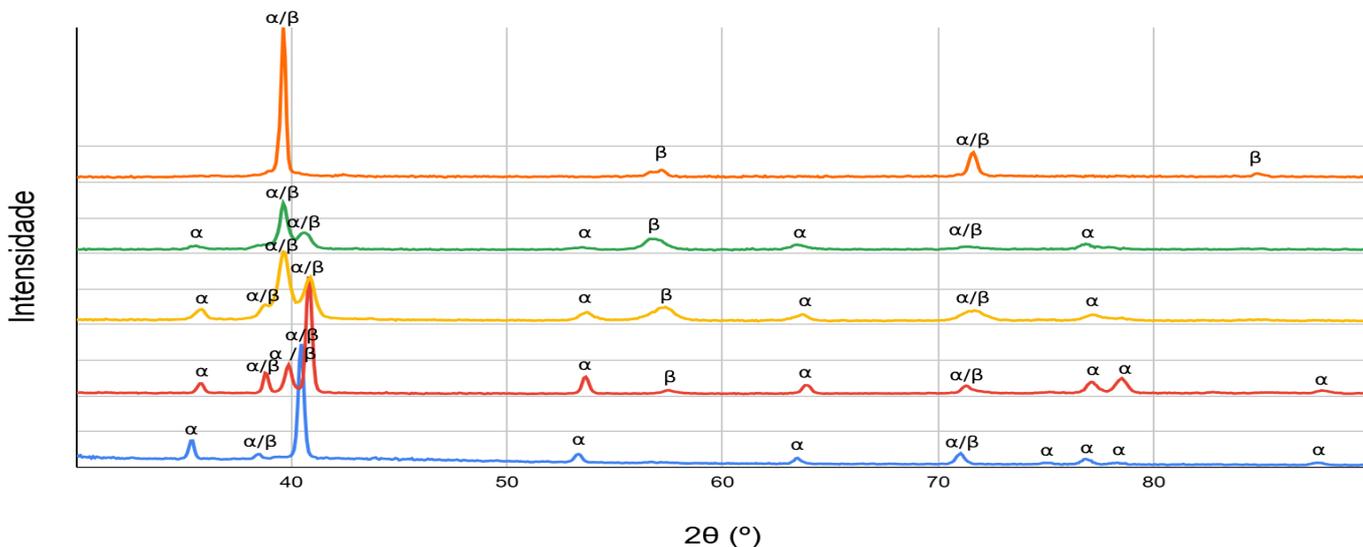


Fonte: elaboração própria

Figura 6: resultado do DRX e computação feita no software Highscore Plus

Análise de fases; DRX; Ti64_x_wt%FeNb(40-60)

Composição em peso FeNb: 0% 4% 8% 12% 16%



Fonte: elaboração própria

CONCLUSÕES:

Pode-se concluir que o modelo utilizado BoMd foi confiável na predição do comportamento dessa nova liga: diminuição da presença da fase alfa, observado na figura 6, através da comparação dos casos mais distantes dentro a escala de composição: curva 0%wt_FeNb (azul) e 16%wt_FeNb (laranja) - há uma considerável diminuição de picos de fase alfa.

A análise por microscópio óptico revelou uma mudança considerável na morfologia da fase alfa, tomando uma forma globular, e levanta perguntas sobre as propriedades interfaciais dessa nova configuração. Além disso, o valor dureza (HV) obtida pela análise das diversas ligas desenvolvidas não apresentou comportamento linear (figura 3), e, pelo contrário do resultado que se esperava ao introduzir elementos (ferro e nióbio) que tornam a liga Ti64 mais dúctil, houve um aumento da dureza até um ponto de máximo dentro da faixa de 4% a 8% em peso de FeNb, fato que se especula ter relação com o refinamento ocorrido (figura 2).

Ademais, o estudo da liga Ti64x%NbFe(60-40) necessita mais investimento e tempo, de forma a contemplar outras questões de suma importância como: capacidade de processamento (fundibilidade, usinabilidade, deformabilidade e metalurgia do pó), contaminação com oxigênio em diferentes níveis, outras propriedades mecânicas (resistência à tração e fadiga) e manipulação de estrutura cristalina através de tratamentos térmicos, para ser consolidada como uma nova liga robusta de titânio capaz de suprir necessidades do mercado ao passo que se implementa as práticas de reciclagem

BIBLIOGRAFIA

1. ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The Science and Engineering of Materials**. 6. ed. SI edition, [S.I.]: Editora Cengage Learning, 20-. p. 556-561.
2. CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering**. 9. ed. SI version [S.I.]: Editora John Wiley & Sons Inc, 2014, p. 817-820.
3. COSTA E SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. [S.I.]: Editora Blucher, 2010, p. 459-463, 466-469, 549-553.
4. TAKEDA, O.; OUCHI, T.; OKABE, T. H. Recent Progress in Titanium Extraction and Recycling. **METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B**, v. 45A, p. 1-12. ©The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2020. DOI: 10.1007/s11663-020-01898-6
5. XIA, Y.; ZHAO, J.; TIAN, Q.; GUO, X. Review of the Effect of Oxygen on Titanium and Deoxygenation Technologies for Recycling of Titanium Metal. **JOM**, 2019. v. 71, n.9, p. 1-2. ©The Minerals, Metals & Materials Society. DOI 10.1007/s11837-019-03649-8