



# AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA DEFORMAÇÃO E TRATAMENTOS TÉRMICOS SOBRE A MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LIGAS Ti- $\beta$ METAESTÁVEIS

Palavras-Chave: [[Ligas de Titânio]], [[Propriedades Mecânicas]], [[Aeroespacial]]

Autores:

MARCELO DE AQUINO PAIVA [UNICAMP]

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

## INTRODUÇÃO:

As ligas de titânio exibem um melhor desempenho entre resistência mecânica e densidade com o aumento da temperatura de trabalho [1]. A resistência mecânica das ligas de titânio apresenta valores semelhantes à de aços de alta resistência. Com a necessidade de materiais com elevada resistência mecânica aliada a reduzido peso surgiu o desenvolvimento de ligas de diversas composições, dentre elas, a liga TIMETAL 21S, de composição Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si (% em peso), que oferece, além das características inerentes as ligas de titânio, boa conformabilidade a frio, melhor resistência à oxidação, resistência a temperaturas elevadas e alta estabilidade térmica.

Uma distribuição fina e uniforme da fase  $\alpha$  melhora as propriedades mecânicas e a estabilidade térmica das ligas de titânio. Assim, um fator chave para o desenvolvimento de ligas de titânio de alta resistência mecânica é o controle da fração volumétrica da fase  $\alpha$ . Comumente a precipitação da fase  $\alpha$  ocorre de forma fina e homogênea dispersa na matriz de fase  $\beta$ , possivelmente como consequência da intensa precipitação da fase  $\omega$  uma vez que essa fase é sítio nucleador da fase  $\alpha$ .

A transformação  $\beta \rightarrow \omega$  em ligas de titânio ocorre por colapso de planos dos pares (111)  $\beta$ . O colapso total resulta em uma fase  $\omega$  com estrutura hexagonal, enquanto o colapso parcial gera uma simetria trigonal. Resfriamentos bruscos ou deformações plásticas podem induzir a fase  $\omega$ , tornando esses parâmetros de processo essenciais. Adições de Al e Cr estabilizam a fase  $\beta$  e conseqüentemente  $\omega$ , assim facilitando a deformação plástica. Ligas de titânio apresentam grande diversidade de microestruturas e propriedades devido à sua alotropia, semelhante ao sistema Fe-C. A transição da fase  $\alpha$  para  $\beta$  ocorre a 882,5°C, mas adições de elementos de ligas deslocam essa transformação, proporcionando diferentes combinações de fases estáveis e metaestáveis. [2][3]

Visto isso, o presente resumo destinado ao XXXI Congresso de Iniciação Científica da Unicamp, trata-se do desenvolvimento da liga TIMETAL 21S com pequenas adições de cromo. Por fim, mesmo

que de modo preliminar, apresenta-se resultados do comportamento mecânico e uma análise dos mecanismos de deformação plástica das amostras.

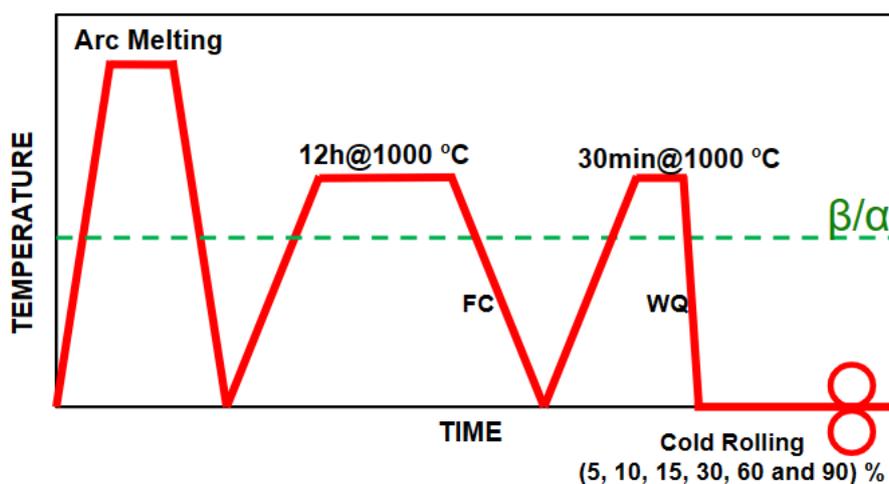
## METODOLOGIA:

A preparação das ligas de titânio do tipo  $\beta$  feita em um forno de fusão a arco-voltaico, com atmosfera controlada por vácuo e gás inerte a partir de amostras com massa de até 100 g, com os teores apresentados, os quais foram definidos pelo efeito  $\beta$  estabilizador do Nb e do Cr, em termos de Mo equivalente. A verificação da composição química das amostras foi executada por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X em equipamento da marca Rigaku, modelo RIX 3100. Na sequência, as amostras foram submetidas a tratamentos térmicos de homogeneização química e microestrutural a 1000° C durante 12 h, em atmosfera inerte. Após a etapa de tratamentos térmicos de homogeneização, as amostras foram solubilizadas a 1.000°C por 30 minutos e temperadas em água.

Tabela 1 - Composição nominal das ligas  $\beta$  metaestáveis.

Liga	Mo	Nb	Al	Cr	Si
TIMETAL 21S	15	3	3	0	0,2
TIMETAL 21S_mod1	13	3	3	1,6	0,2
TIMETAL 21S_mod2	11	3	3	3,2	0,2

Figura 1 – Processamento amostras



A partir do resfriamento em água, as amostras foram conformadas plasticamente a frio por meio de laminação com reduções de (5, 10, 15, 30, 60 e 90) %. Análises de difração de raios-X (Panalytical, modelo X'Pert Pro, com detector ultrarrápido) foram realizadas a fim de investigar as fases existentes e induzidas por deformação.

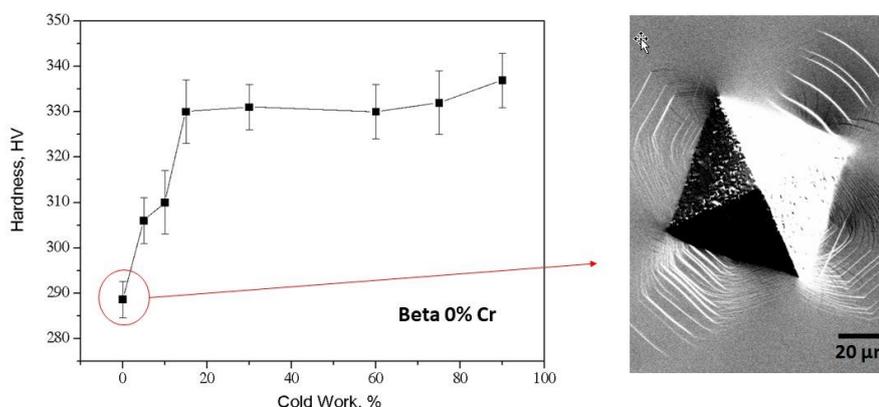
## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

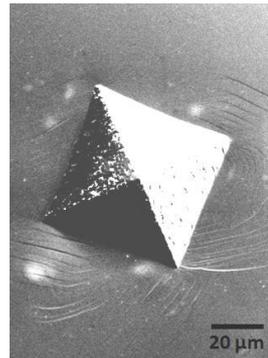
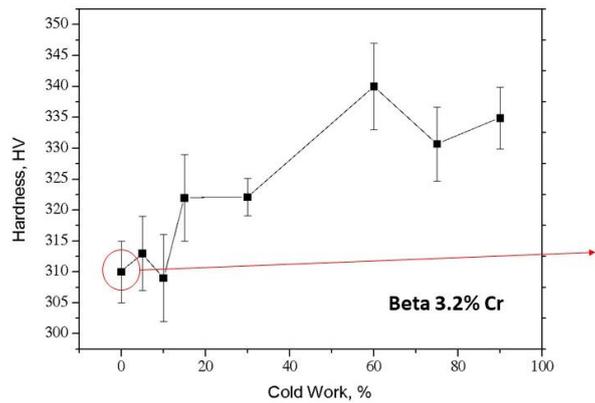
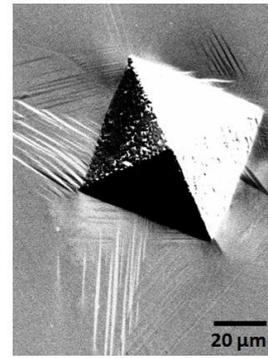
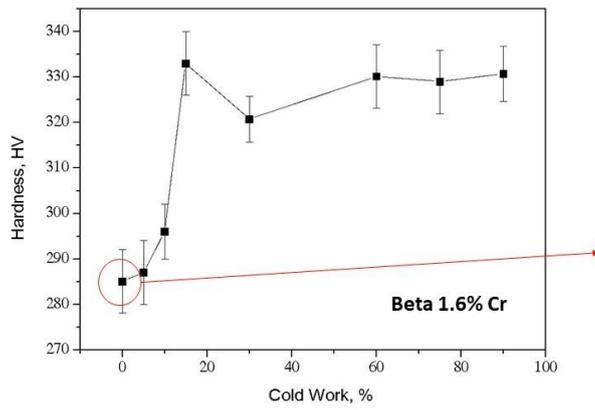
As amostras passaram por difratometria de raios-X no qual verificou-se a presença da fase  $\beta$  conforme esperado para uma liga de titânio com presença de molibdênio. A fim de observar o comportamento mecânico em função da deformação e formação de fases, medidas de microdureza Vickers foram empregadas nas amostras em diferentes percentuais de laminação. Constata-se que a dureza das amostras é bastante superior ao titânio puro, certamente pelos elementos de liga (endurecimento por solução sólida), mas possivelmente também pela formação de fase ômega que tipicamente ocorre em ligas Ti-Mo que passam pelo processo de solubilização e têmpera.

O propósito da deformação a frio foi alcançar uma microestrutura metaestável, favorecendo uma resposta mais rápida a futuros tratamentos térmicos. Já que é conhecido que as amostras submetidas à deformação a frio e envelhecidas exibem uma fração volumétrica significativamente superior da fase  $\omega$  em comparação àquelas resfriadas em água antes de serem envelhecidas.

Conforme mostrado nos gráficos dos testes de dureza (Figura 3) é notável um crescimento e posterior estabilização dos valores de dureza para as três ligas, tal incremento é esperado pelo efeito do encruamento. Mas, percebe-se que com a aplicação da carga de 1 kgf para os ensaios a presença de mecanismos de deformação plástica que também tem impacto nos valores de dureza. Dessa forma existindo uma competição entre os efeitos de tais mecanismos e do encruamento em si nas propriedades mecânicas do material. Entres os mecanismos observados destacam-se o deslizamento de discordâncias na liga Beta21s; a martensita induzida por deformação na liga Beta21s+1,6Cr; e deslizamento de discordâncias e um segundo mecanismo por *twinning* na amostra Beta21s+3,2Cr.

Figura 3 – Resultados Microdureza





## CONCLUSÕES:

A partir dos resultados e análises preliminares elaboradas até aqui, dentro de um escopo maior de pesquisa, podemos concluir que: 1 - O desenvolvimento de ligas TIMETAL 21S com diferentes proporções de Cromo é possível via processo de fundição a arco voltaico; 2 - Pequenas adições de Cr com foram suficientes para impactar nos mecanismos de deformação plásticas 3 – De maneira geral, um aumento da deformação a frio causa um aumento nos valores de dureza.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] CONTIERI, R. J. ; ZANOTELLO, M. ; CARAM, R., Recrystallization and Grain Growth in Highly Cold Worked CP-Titanium. Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: properties, microstructure and processing, p. 1, 2010.
- [2] NAG, S.; BANERJEE, R.; SRINIVASAN, R.; HWANG, J.Y.; HARPER, M.; FRASER, H. L.,  $\omega$ -Assisted Nucleation and Growth of  $\alpha$  Precipitates in the Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0,5Fe  $\beta$  Titanium Alloy. ActaMaterialia57 (2009) 2136.
- [3] SUKEDAI, E.; LIU, W.;AWAJI, M.; HORIUCHI, T., Investigation of atomic structure of m-phase crystals in Ti-Mo alloys using high-resolution electron microscopy, Ultramicroscopy 54 (1994) 192-200