



ANAIS
4º. Congresso Brasileiro
de Engenharia e
Ciência dos Materiais



Deptº. de Engenharia Mecânica - UFSC

Dezembro de 1980

Trabalho/Paper Nº...B-13... PP. 355-364...

Patrocínio

ABCM - ABM - CNEN - CNPq. - SESU/MEC - UFSC

COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA MONEL 400 A ALTAS
TEMPERATURAS

H. Ichise e I. Ferreira

Centro de Metalurgia Nuclear

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

RESUMO - Ensaio de tração foram realizados em amostras de Monel 400 nas temperaturas de 600°, 700° e 800°C sob velocidades de deformação compreendidas entre $1,82 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e $4,56 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Os resultados experimentais evidenciaram que o limite de escoamento é fortemente dependente da temperatura e sensível à velocidade de deformação. Para velocidade de deformação e altas temperaturas os resultados podem ser descritos por uma lei empírica de potência. Para velocidade de deformação altas e temperaturas baixas a lei de potência deixa de se aplicar e os resultados são melhor ajustados por uma lei exponencial.

ABSTRACT - Polycrystalline samples of Monel 400 were tensile tested in the temperatures 600°, 700° and 800°C at strain rates between $1,82 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ and $4,56 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. The data showed that the yield stress is strongly temperature and strain rate sensitive. At lower strain rates and higher temperatures the data can be described by a power law equation. At higher strain rates and lower temperatures the power law breaks down and the results are better described by an exponential law.

A - Introdução

Os metais níquel e cobre, mutuamente solúveis em todas as proporções, formam uma série de ligas amplamente utilizadas na indústria. A liga Monel 400 é uma dessas ligas e contém aproximadamente 66% de Níquel 32% de Cobre e uma porcentagem menor de outros elementos. É uma liga monofásica de solução sólida somente endurecível por trabalho a frio(1).

Devido à sua alta resistência à corrosão, alta resistência mecânica e excelente condutividade térmica, essa liga tem sido empregada em geradores de vapor de reatores nucleares de potência(2). Na indústria nuclear essa liga tem sido também utilizada nas usinas de produção de hexafluoreto de urânio por apresentar excelente resistência à corrosão por ácido fluorídrico.

Apesar da vasta aplicação industrial da liga Monel 400 poucos são os estudos existentes do comportamento mecânico dessa liga em temperaturas superiores à 500°C. Além disso, pouco se sabe sobre o comportamento em corrosão sob tensão dessa liga em presença de altas temperaturas e hexafluoreto de urânio, condições existentes em algumas etapas do processo de obtenção do UF₆. Em geral as reações envolvidas na preparação do hexafluoreto de urânio(4,5) assim como a reação do hexafluoreto por hidrogênio quando da obtenção do urânio após enriquecimento(3) são realizadas a altas temperaturas. Iniciou-se, no IPEN, um estudo dessa liga cujo objetivo final será o de conhecer esses aspectos da liga Monel 400. No presente trabalho, os resultados preliminares do comportamento mecânico dessa liga em temperaturas compreendidas entre 600° e 800°C são apresentados.

B - Materiais e Métodos Experimentais.

A liga Monel 400, na composição nominal dada na tabela 1, foi preparada no IPEN a partir de metais de pureza 99,9%. A liga foi obtida por fusão em forno elétrico a vácuo utilizando-se cadinhos de alumina. Uma vez fundindo o metal líquido foi vasado, sob vácuo, em lingoteiras de cobre.

Tabela 1 - Composição Nominal da liga Monel 400
(% peso)

Ni	Cu	Si	Fe	Mn
66,0	31,5	0,15	1,35	1,0

Os lingotes cilíndricos obtidos, de comprimento 150mm e diâmetro 25,4mm, foram inicialmente forjados a uma temperatura de 1000°C por passos sucessivos até um diâmetro de 12,7mm. O tarugo foi posteriormente

laminado a 1000°C num laminador de perfis cilíndricos até um diâmetro final de 8mm. O tarugo cilíndrico obtido foi cortado e corpos de prova para ensaios de tração foram usinados tendo um comprimento útil de 19,05 mm e diâmetro da seção útil 3,1 mm.

Os corpos de prova usinados foram submetidos a um tratamento térmico a 900°C por uma hora em presença de argônio e em seguida resfriadas ao forno, para o alívio das tensões internas e recristalização. Os ensaios de tração foram realizados numa máquina universal de ensaios Instron (modelo 1125) com acessórios para ensaios a altas temperaturas. Todos os ensaios foram realizados em presença de argônio U.

Amostras do material forjado a quente e do material tratado a 900°C/1 hora foram selecionadas para a análise microestrutural. As amostras para metalografia ótica foram preparadas pelos métodos convencionais. A estrutura granular foi revelada através de ataque químico por uma solução composta de uma parte de ácido nítrico e uma parte de ácido acético por aproximadamente 30 segundos. Amostras para microscopia eletrônica de transmissão foram preparadas por jato eletrolítico duplo utilizando-se uma solução de composição 25% de Metanol e 75% de ácido nítrico (% em volume) a 10°C e densidade de corrente de 14 mA/mm². A microestrutura da liga forjada a quente é mostrada na figura 1. Observa-se a presença de subgrãos uniformes de diâmetro médio igual a 0,5 µm. A microestrutura ótica da liga tratada a 900°C é mostrada na figura 2 evidenciando uma estrutura de grãos uniformes de tamanho médio $22 \pm 2\mu\text{m}$.

C - Resultados e Discussão.

A figura 3 apresenta as curvas da tensão convencional versus deformação convencional obtidas em ensaios de tração realizados a 700°C sob várias velocidades de deformação. As seguintes observações de caráter geral são tiradas dessas curvas:

- a) Na parte inicial das curvas (pequenas deformações) pode ser visto que a tensão cresce de modo aproximadamente linear com a deformação. As inclinações das curvas, entretanto, são dependentes da velocidade de deformação. No intervalo de medidas utilizado observa-se que as maiores inclinações ocorrem em velocidades de deformação altas e temperaturas baixas e as menores inclinações ocorrem em velocidades de deformação baixas e temperaturas altas.
- b) Para deformações superiores ao limite de escoamento convencional,

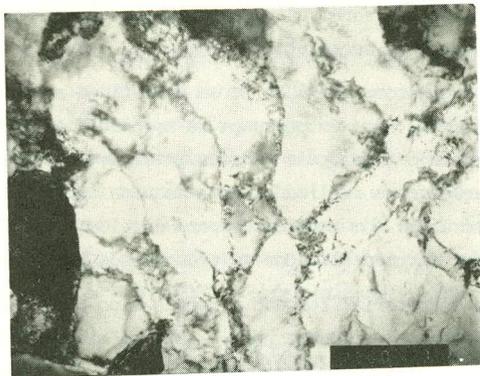


Figura 1 - Micrografia eletrônica da liga Monel 400 trabalhada a 1000°C. (Mag = 20.000 X)

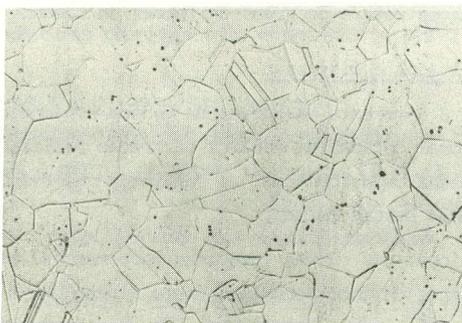


Figura 2 - Micrografia ótica da liga Monel 400 recozida a 900°C por uma hora. (Mag = 500 X)

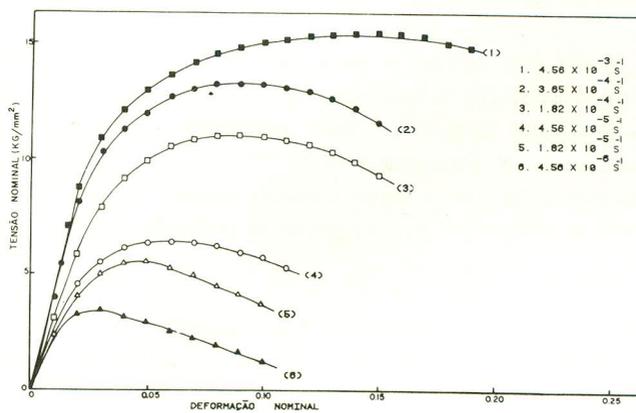


Figura 3 - Curvas da tensão nominal versus deformação nominal para a liga Monel 400 ilustrando a dependência da tensão de escoamento com a velocidade de deformação a 700°C.

σ_y , (0,2% offset yield), a taxa de aumento da tensão com a deformação decresce continuamente até ser atingido o limite de resistência e mantendo-se aproximadamente constante até a ruptura do material.

Resultados semelhantes, na região de pequenas deformações, foram observados por Lutton e Jonas (6) em ensaios de compressão de Zircônio a altas temperaturas. Esses autores sugerem que essa pequena diferença na inclinação pode ser associada à microdeformação plástica que antecede ao escoamento macroscópico, de modo equivalente à deformação plástica instantânea que ocorre em ensaios de fluência durante a aplicação da carga.

Na figura 4 os valores da velocidade de deformação são apresentados em função do limite de escoamento em escala log-log, na maneira utilizada em estudos de fluência. Esses resultados correspondem aos ensaios realizados nas temperaturas 600^o, 700^o e 800^oC. Observa-se que:

- Para tensões inferiores a aproximadamente 6 kg/mm² os resultados obtidos podem ser descritos por uma função de potência da forma:

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \cdot \sigma_y^n \quad (1)$$

onde $\dot{\epsilon}$ é a velocidade de deformação, T a temperatura, σ_y o limite de escoamento convencional, Q a energia de ativação aparente para o processo A e n são constantes e R é a constante dos gases. Através do ajuste dos pontos experimentais obtém-se o valor $n = 4,1 \pm 0,1$.

Um comportamento similar ao expresso pela equação 1 é, em geral, observado no estado estacionário de fluência no intervalo intermediário de tensões (power law creep). Nesse intervalo, Monma e outros (7) obtiveram para a liga Monel 400 um valor de $n = 4,5$.

- para tensões superiores a aproximadamente 6 kg/mm², as curvas experimentais se desviam marcadamente da dependência expressa em (1) e são mais apropriadamente descritas pela expressão:

$$\dot{\epsilon} = B \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \exp(\beta \sigma_y) \quad (2)$$

onde B e β são constantes. Através do ajuste dos pontos experimentais obtém-se $\beta = 1,85 \text{ (kg/mm}^2\text{)}^{-1}$.

A energia de ativação aparente para o processo, Q, pode ser obtida utilizando-se os dados da figura 4 e tomando-se os valores da velocidade de deformação em função da temperatura a uma dada tensão. O resultado desse procedimento é mostrado na figura 5. Através da inclinação das retas da figura 5 obtém-se uma energia de ativação para o processo

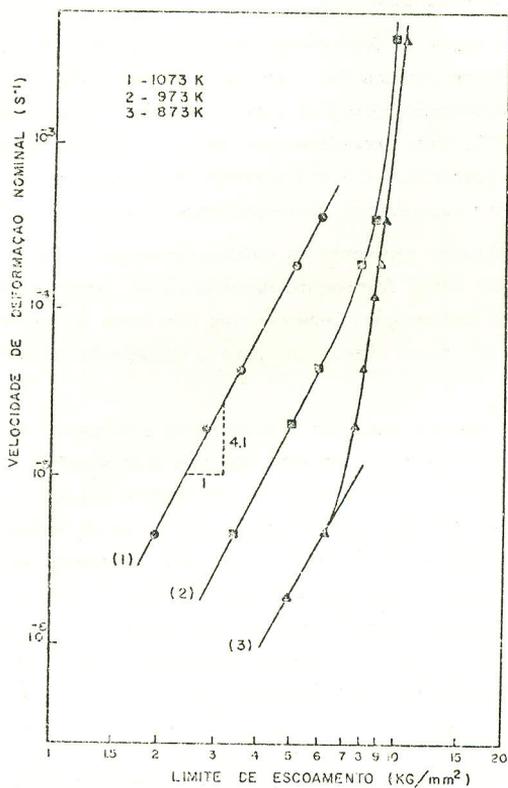


Figura 4 - Dependência da velocidade de deformação com o limite de escoamento para a liga Monel 400 às temperaturas! de 600°, 700° e 800°C.

$Q = 42,7 \pm 2,5$ kcal/mole (179 kJ/mole). O valor obtido para a energia de ativação é bem inferior ao valor $Q_{Ni} = 59,6$ kcal/mole obtido para a energia de ativação associada à auto difusão do Ni na liga Monel 400 (8) mas é comparável com o valor obtido para a difusão do Cobre em níquel puro $Q_{Cu} = 35,5$ kcal/mole (9).

Os dois tipos de dependência observados podem ser melhor distinguidos se os dados obtidos são combinados e graficados em termos da velocidade de deformação corrigida para a dependência em temperatura, $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$. Este procedimento é feito no gráfico da figura 6, no qual a lei de potência ($\dot{\epsilon} \propto \sigma^n$) correspondente à curva AB e a região de comportamento exponencial correspondente à região linear BC.

Os resultados apresentados evidenciaram que o limite de escoamento da liga Monel 400 é fortemente dependente da temperatura e sensível à velocidade de deformação. Dependências similares às expressas pelas equações (1) e (2) foram observadas para o escoamento de metais puros (6, 10).

O mecanismo que controla o escoamento a temperaturas elevadas não está ainda firmemente estabelecido, mas tem sido sugerido que o processo é controlado pelo desprendimento termicamente ativado de nós de discordâncias (11). Embora o comportamento do limite de escoamento em termos da temperatura e velocidade de deformação apresente algumas semelhanças com o comportamento em potência da fluência estacionária os mecanismos estabelecidos para a fluência não devem, em geral, ser aplicados ao escoamento a alta temperatura devido à inexistência, nesse último caso, de uma subestrutura estacionária.

D - Conclusões:

Ensaio de tração foram realizados em amostras cilíndricas de Monel 400 nas temperaturas de 600° , 700° e 800°C sob velocidades de deformação compreendidas entre $1,82 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e $4,56 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ e levam as seguintes conclusões:

1. Para pequenas deformações, a tensão cresce de modo aproximadamente linear com a deformação. As inclinações ($d\sigma / d\epsilon$) são entretanto dependentes da temperatura e da velocidade de deformação.

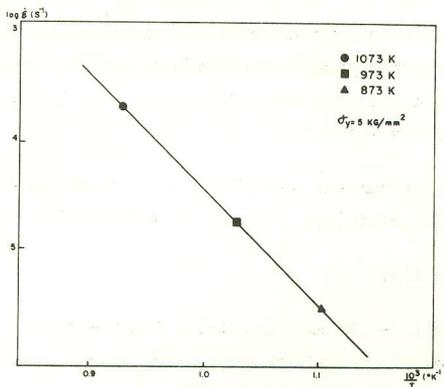


Figura 5 - Dependência da velocidade de deformação com a temperatura para o limite de escoamento igual a 5 kg/mm^2 .

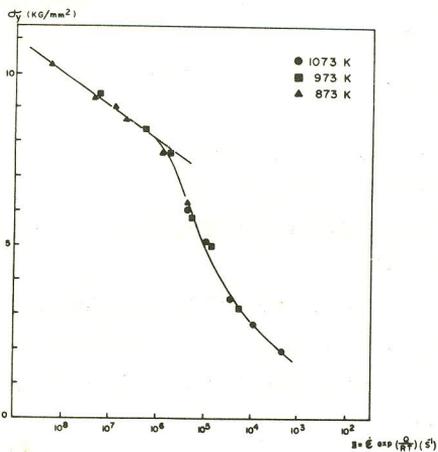


Figura 6 - Curva do limite de escoamento em função do parâmetro $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ evidenciando o comportamento em potência e o comportamento exponencial.

2. O limite de escoamento é fortemente dependente da temperatura e sensível à velocidade de deformação.
3. Para tensões de escoamento inferiores a aproximadamente 6 kg/mm^2 os resultados experimentais podem ser descritos por uma lei de potência similar à "power law creep" com expoente $n = 4,1 \pm 0,1$ e energia de ativação $Q = 42,7 \pm 2,5 \text{ kcal/mole}$.
4. Para tensões de escoamento superiores a $\sim 6 \text{ kg/mm}^2$ os resultados experimentais são melhor descritos por uma lei exponencial na tensão.

E - Bibliografia.

- (1) Lemke, T.F. - "Nickel and Monel Nickel-Copper Alloys" trabalho apresentado no Seminário sobre Níquel e suas ligas Inco- -Essen, São Paulo, maio de 1980.
- (2) Taylor, G.F. - Can. Chem. Process. 61, nº 6 (1977), 25.
- (3) Langlois, G. - Relatório AEC-tr-6504, (TID-4500, 34TH Ed.) USAEC, 1963.
- (4) Scott, C.D. - Adams J.B., Bresce, J.C. - Relatório ORNL, 2797, outubro 1960.
- (5) Labaton, V.Y. e Johnson, K.D.B. - J. Inorg. Nuclear Chem., 10 (1959) 74-85.
- (6) Luton, M.J. e Jonas, J.J. - Canadian Metal. Quart. 11 (1972) 79.
- (7) Monma, K., Suto, H. e Oikawa, M. - J. Japan Inst. of Metals, 28 (1964) 253.
- (8) Paul, A.R., Naik, M.C. e Kaimal, K.N. - Journal of Nucl. Mat. 58 (1975) 205.
- (9) Matano, C. - Proc. Phys. Math. Soc. Japan, 15 (1933) 405.
- (10) McQueen, H.J. e Jonas, J.J. em "Treatise on Mat. Sci. and Tech." - Editado por Arsenault, R.J. - Vol.6, Academic Press 1975, pg.393.
- (11) Sastry, D.H., Luton, M.J. e Jonas, J.J. - Phil. Mag. 30 (1974) 115.