

## Correlação de dados de tração a quente e fluência para a liga Kanthal A1

### *Equivalence between hot tensile and creep testing data for Kanthal A1 alloy*

#### **Jéferson Aparecido Moreto**

Doutorando em Engenharia de Materiais  
Departamento de Engenharia de Materiais,  
Aeronáutica e Automobilística,  
Universidade de São Paulo.  
[jeferson\\_moreto@yahoo.com.br](mailto:jeferson_moreto@yahoo.com.br)

#### **Danilo Borges Villarino de Castro**

Doutorando em Engenharia de Materiais  
Departamento de Engenharia de Materiais,  
Aeronáutica e Automobilística,  
Universidade de São Paulo.  
[daniobvc@yahoo.com.br](mailto:daniobvc@yahoo.com.br)

#### **Levi de Oliveira Bueno**

Professor do Departamento de Engenharia de  
Materiais, Universidade Federal de São Carlos.  
[levi@ufscar.br](mailto:levi@ufscar.br)

#### **Haroldo de Araújo Ponte**

Professor do Departamento de Engenharia  
Química, Universidade Federal do Paraná.  
[hponte@ufpr.br](mailto:hponte@ufpr.br)

#### **Resumo**

Ensaio de tração a quente e fluência foram realizados na liga Kanthal A1 na faixa de temperatura de 600° a 800°C. Cada um desses conjuntos de dados foram analisados separadamente de acordo com suas próprias metodologias, mas, neste trabalho, uma tentativa foi realizada para se estabelecer uma correlação entre os mesmos. Um novo critério proposto para converter dados de tração para fluência torna possível a análise conjunta desses dois grupos de resultados de acordo com relações usuais de fluência como: Norton, Monkman-Grant, Larson-Miller e outros. A notável compatibilidade entre os dois conjuntos por esse procedimento sugere que dados de tração a quente podem ser convertidos para dados de fluência para a liga Kanthal A1, como verificado anteriormente para outros materiais metálicos.

**Palavras-chave:** Liga Kanthal A1, tração a quente, fluência, Norton, Monkman-Grant, Larson-Miller.

#### **Abstract**

*Hot tensile and creep tests were carried out on Kanthal A1 alloy in the temperature range from 600 to 800°C. Each of these sets of data were analyzed separately according to their own methodologies, but an attempt was made to find a correlation between them. A new criterion proposed for converting hot tensile data to creep data, makes possible the analysis of the two kinds of results according to usual creep relations like: Norton, Monkman-Grant, Larson-Miller and others. The remarkable compatibility verified between both sets of data by this procedure strongly suggests that hot tensile data can be converted to creep data and vice-versa for Kanthal A1 alloy, as verified previously for other metallic materials.*

**Keywords:** Kanthal A1 alloy, hot tensile, creep, Norton, Monkman-Grant.

#### **1. Introdução**

Uma analogia entre um teste de tração a quente e fluência pode ser estabelecida considerando que, durante um ensaio de tração, a temperatura e a taxa de deformação são arbitrariamente fixadas para obter a história da tensão do material, enquanto que, durante um teste de fluência, a temperatura e a

tensão são arbitrariamente fixadas para obter a história da taxa de deformação do material. Bueno (2005a, 2005b), Reis Sobrinho e Bueno (2005).

No ensaio de tração, a capacidade de resistência mecânica é atenuada no ponto de instabilidade de carga, com o começo do empescoamento (onset of

necking), e, da mesma maneira, durante um ensaio de fluência, a resistência mecânica do material é mantida até o início do empescoamento, isto é, muito próximo do tempo de ruptura do corpo-de-prova.

O objetivo desse trabalho foi verificar a possibilidade de uma correlação entre os ensaios de tração a quente e fluência para a liga Kanthal A1, buscando validar um critério proposto recentemente por Bueno (Bueno, 2005).

Segundo Bueno (2005), a equivalência entre ambos os ensaios pode ser estabelecida de acordo com os seguintes

critérios:

a) A taxa de deformação no ensaio de tração é equivalente à taxa mínima de fluência.

b) O limite de resistência à tração é equivalente à tensão utilizada no ensaio de fluência.

c) O tempo necessário, para se atingir o limite de resistência à tração, é equivalente ao tempo de ruptura do ensaio de fluência, a uma dada temperatura de ensaio.

Pretende-se utilizar essa metodologia para fazer uma correlação entre

os ensaios de tração a quente e fluência para a liga Kanthal, tornando possível a análise comum de ambos os tipos de dados segundo as relações de Norton-Monkman-Grant e Larson-Miller.

A relação de Norton expressa a dependência da taxa mínima de deformação em fluência com a tensão imposta no ensaio.

Desde que as tensões sejam relativamente baixas e a temperatura alta [acima de  $0,5T_f$  (temperatura de fusão)], a relação de Norton se torna bem descrita pela Equação 1:

$$\dot{\epsilon}_{min} = A \times \sigma^n \quad (1)$$

onde A é uma constante dependente da temperatura e da estrutura do material,  $\sigma$  é a tensão aplicada e n é conhecido como expoente de tensão, fornecendo informa-

ções sobre mecanismos de deformação por fluência (Evans, 1985).

A relação de Monkman-Grant considera que a taxa mínima de fluência e o

tempo de ruptura ( $t_R$ ) se correlacionam de acordo com a Equação 2:

$$\dot{\epsilon}_{min} \times t_R^m = C_{MG} \quad (2)$$

onde m é um expoente de valor próximo a 1 e  $C_{MG}$  é a constante de Monkman-Grant.

Vários métodos de parametrização utilizando expressões que relacionam tensão, temperatura e tempo de ruptura são

apresentados para interpolação e extrapolação de dados de fluência. Alguns desses métodos têm, como base, a linearidade dos dados de isotensão num plano determinado pelo tempo em escala logarítmica e pelo inverso da temperatura absoluta.

O método utilizado, no presente trabalho, foi o de Larson-Miller. Esse método considera a convergência das retas de isotensão em um ponto do eixo das ordenadas e tem, como base, o parâmetro dado pela Equação 3:

$$(\log t_R + C) T = P \quad (3)$$

O valor de C é obtido com diferen-

tes conjuntos de ensaios a uma mesma

tensão e diferentes temperaturas.

## 2. Materiais e métodos

### Material

O material utilizado, no presente trabalho, foi a liga Kanthal A1. Esse material, normalmente, é utilizado em fornos de altas temperaturas e tem grande aplicação em sistemas de gera-

ção de vapor em indústrias químicas e petroquímicas.

A amostra do tubo utilizado apresentou as seguintes características: segmento de tubo Kanthal A1 com com-

primento de 400 mm, diâmetro externo de 88,9 mm e espessura de 6,3 mm. A composição química nominal do material estudado é: 0,08%C, 0,40%Mn, 0,70%Si, 0,70%Ni e 23,5%Cr.

### Ensaio mecânicos

Ensaio de tração a quente foram realizados de acordo com a norma ASTM E-21. Para esses testes, utilizou-se uma máquina universal de ensaios marca Time Group, modelo WDW – 100 com capacidade de 10 toneladas, do Laboratório de Ensaio da STM – Sistema de Testes de Materiais Ltda., vide Figura 1(a). Os corpos-de-prova, para os ensaios

de tração a quente, foram extraídos da posição longitudinal dos tubos enviados para teste, tendo as seguintes dimensões nominais: parte útil com comprimento útil de 14 mm, diâmetro útil de 3,5 mm e cabeças com rosca M5x0,8.

Os ensaios de tração a quente foram realizados utilizando um forno elétrico de 2 KW de potência, com 3

zonas de aquecimento, construídas com resistência de Kanthal A1, juntamente com controladores de temperatura do tipo proporcional-integral-diferencial (PID) microprocessados. As medidas de temperatura foram feitas por meio de termopares Cromel-Alumel (tipo K) para  $T < 700$  °C e termopar (tipo S) Pt – 10% Pt Rh para  $T \geq 700$  °C. Todos os ensaios

de Tração a Quente foram realizados propositalmente em velocidades de tração diferentes das recomendadas pela norma ASTM E-21.

Os ensaios de fluência foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos tirados no sentido longitudinal dos tubos na modalidade carga constante em equipamentos marca STM, modelo MF-1000, seguindo recomendações da norma ASTM E-139. A Figura 1(b) apresenta os equipamentos utilizados nos ensaios de

fluência. Os equipamentos utilizados são dotados de indicadores que permitem o contínuo acompanhamento da temperatura durante o ensaio. O material foi ensaiado na faixa de temperatura de 600 a 800°C.

As formas e dimensões dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de fluência foram iguais aos utilizados nos ensaios de tração a quente. Em cada corpo-de-prova foram feitas marcas com punção nas extremidades da parte útil, para se

definir o comprimento inicial,  $L_0$ , antes dos ensaios. Após a conclusão de cada ensaio, as partes fraturadas dos corpos-de-prova foram unidas para se medirem o comprimento final,  $L_f$ , e o diâmetro final,  $D_f$ , na região de fratura, com a finalidade de se determinar o alongamento percentual final,  $A_f$  (%) e redução percentual de área RA (%). As medidas de temperatura foram realizadas da mesma maneira dos ensaios de tração a quente.

Figura 1

(a) Equipamento utilizado nos ensaios de tração a quente: Máquina Universal de Ensaios Time Group Inc, modelo WDW-100, com capacidade de 10 toneladas e (b) vista de uma fileira com 10 máquinas de ensaio de fluência a carga constante, modelo STM-MF1000, utilizadas nos testes de isotensão (a 40,5 MPa).



### 3. Resultados e discussão

#### Tração

As propriedades de tração dos materiais metálicos ensaiados em altas temperaturas são, em geral, afetadas pela taxa de deformação. Assim, torna-se importante o controle da especificação das taxas empregadas durante os ensaios. A norma ASTM E-21 especifica que, no início do ensaio e durante o escoamento, a taxa de deformação seja de  $(0,005 \pm 0,002)$   $\text{min}^{-1}$  e que, após o escoamento, seja aumentada para  $(0,05 \pm 0,01)$   $\text{min}^{-1}$ . No entanto, dependendo da sensibilidade que

a resistência do material apresente com a temperatura e a taxa de deformação, o simples cumprimento dessas recomendações pode levar a uma avaliação bastante limitada do desempenho do material. Desta forma, procurou-se chegar a um conhecimento mais detalhado da variação dos principais parâmetros de resistência mecânica e ductilidade que a liga Kanthal A1 apresentou em altas temperaturas, levando-se em conta, especialmente, o aspecto de sua sensibilidade com taxa de

deformação na temperatura 600°C.

Os ensaios de tração a quente foram realizados com velocidades ( $V_T$ ) de 0,01, 0,14, e 5,0 mm/min, para a temperatura de 600°C, e 0,14 e 5,0 mm/min, para a temperatura de 800°C. Os resultados obtidos, nesses ensaios, estão resumidos na Tabela 1, onde  $S_R$  é o limite de resistência à tração,  $S_e$  é o limite de escoamento (offset 0,2%),  $A_f$  é o alongamento total percentual em 4D e  $U_T$  é a tenacidade do material.

Tabela 1

Dados relativos aos ensaios de tração a quente da liga Kanthal A1.

$v_T$ (mm/min)	$S_R$ (MPa)	$S_e$ (MPa)	$A_f$ (%)	$U_T$ (MPa)
0,01-600°C	108,5	103,7	123	59,6
0,14-600°C	164,9	160,9	118	82,8
5,00-600°C	282,2	271,1	84	90,6
0,14-800°C	50,1	47,1	167	42,2
5,00-800°C	88,6	86,0	157	78,8

De acordo com a Tabela 1, as

amostras apresentaram significativo aumento nos valores de  $S_R$  e  $S_e$ , em

função da velocidade do ensaio. Esse aumento está relacionado com o fenômeno de sensibilidade da tensão com a taxa de deformação. Todas as amostras apresentaram ruptura do tipo cinzel, tornando-se indefinida a determinação do parâmetro de redução de área (RA). É possível verificar que, quanto maior a velocidade de tração, menor é a variação dimensional do corpo-de-prova.

### Ensaio de fluência

Os tempos de rupturas obtidos nos ensaios de fluência estão na faixa de 10 a 1700 h, aproximadamente. O valor da constante característica do material (C),

Comparando as velocidades na Tabela 1, é possível verificar que uma variação na velocidade de tração (taxa de deformação) com que o material foi solicitado, durante o ensaio, acarretou modificação no nível de resistência do material, alterando a curva tensão nominal versus deformação nominal. O material apresentou sensibilidade com a taxa de deformação, exibindo níveis

para os materiais, foi adotado como 20, que representa uma média para o comportamento dos aços ferríticos baixa liga em geral (Dieter, 1976).

mais altos de resistência com o aumento na velocidade de tração.

Os ensaios foram realizados em diferentes velocidades para que se pudesse determinar a sensibilidade da tensão com a taxa de deformação do material com o intuito de uma correlação entre os dados de tração a quente e fluência (Ferreira Dias e Bueno, 2006).

A Figura 2 apresenta a curva paramétrica de Larson-Miller (L-M), reunindo os dados de ruptura por fluência para a liga Kanthal A1, na faixa de 600°C a 800°C.

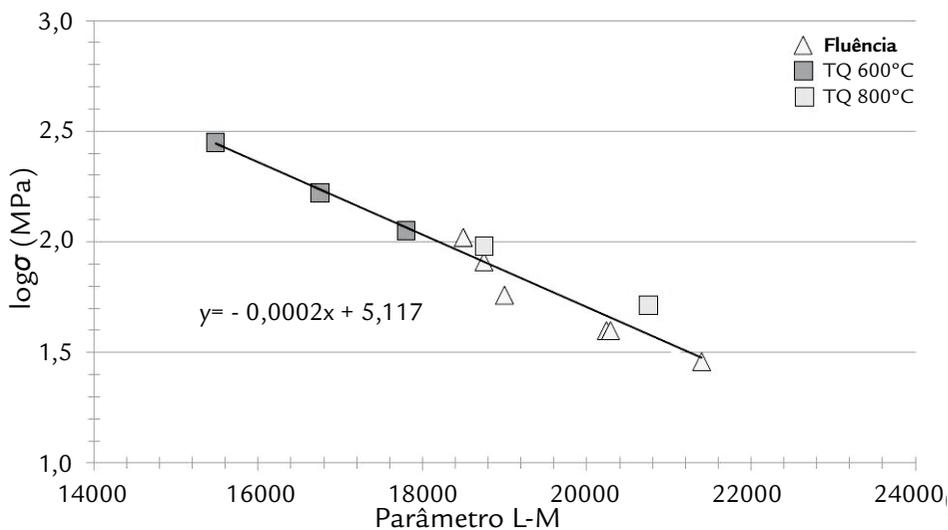


Figura 2 Curva paramétrica de Larson-Miller (L-M), reunindo os dados de ruptura por fluência para a liga Kanthal A1.

Após a análise separada de cada um desses conjuntos de dados, segundo suas próprias metodologias, procurou-se estabelecer uma correlação entre os resultados nas duas modalidades de ensaio segundo Reis Sobrinho, Marino e Bueno (2003), considerando-se os fenômenos de encruamento:  $\sigma = K \times \epsilon^n$ ,

sensibilidade com a taxa de deformação:  $\sigma = C \times \dot{\epsilon}_{min}^m$  e os parâmetros de fluência derivados das relações de Norton  $\dot{\epsilon}_{min} = A \times \sigma^n$  e Monkman-Grant  $\dot{\epsilon}_{min} \times t_r^m = C_{MG}$  (Reis Sobrinho e Bueno, 2005).

Os resultados mostram notável compatibilidade, indicando uma consistente transição do comportamento da

região da lei de potência (fluência) para a lei exponencial (tração a quente).

A Figura 3 apresenta os valores da taxa mínima de fluência em função dos tempos de ruptura em escala logarítmica para os ensaios realizados em várias tensões e temperaturas para a liga Kanthal A1.

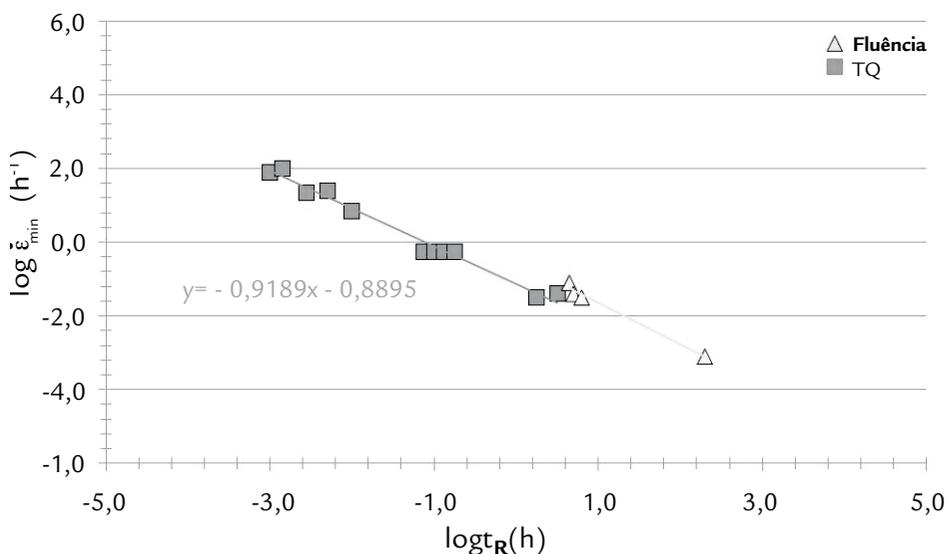


Figura 3 Gráfico log ε̇<sub>min</sub> versus log t<sub>R</sub> para a liga Kanthal A1.

Pode-se verificar que todos os dados apresentaram uma boa e única correlação linear podendo ser representados por uma única reta.

Essa característica indica a validade da expressão proposta por Monkman e Grant, que expressa a linearidade dos valores da taxa mínima de deformação em função do tempo de ruptura num plano em escala logarítmica. Para os dados obtidos, no presente trabalho, os valores das constantes  $m$  e  $C_{MG}$  são 0,9189 e 0,1290 respectivamente (sendo  $\dot{\epsilon}_{\min}$  em  $h^{-1}$  e  $t_r$  em  $h$ ). O valor da constante  $m$  na equação de Monkman e Grant é bem próximo

da unidade, como reportado, em geral, para vários materiais metálicos. (Viswanathan, 1993). Os dados de tração a quente apresentaram uma tendência sistemática de espalhamento em torno da linha reta, em cada nível da taxa de deformação. Os gráficos de Monkman e Grant são conhecidos por apresentarem acentuado grau de espalhamento.

A relação de Monkman e Grant se torna válida quando o deslizamento dos contornos de grãos não tem uma contribuição significativa na deformação total, sendo a taxa de deformação controlada pela matriz. Segundo a

literatura, o parâmetro  $C_{MG}$  depende da precipitação que ocorre, principalmente, em contornos de grão e está relacionado com a variação de ductilidade devido a esse fenômeno. (Sordi & Bueno, 2010).

A Figura 4 apresenta os valores da taxa mínima de deformação em função da tensão aplicada em escala logarítmica para a liga kanthal A1. O valor de  $n = 5,56$  fica bem próximo de 5, indicando que o processo de fluência deve estar sendo controlado por mecanismos de recuperação via escalagem de discordâncias (Kassner, 2005).

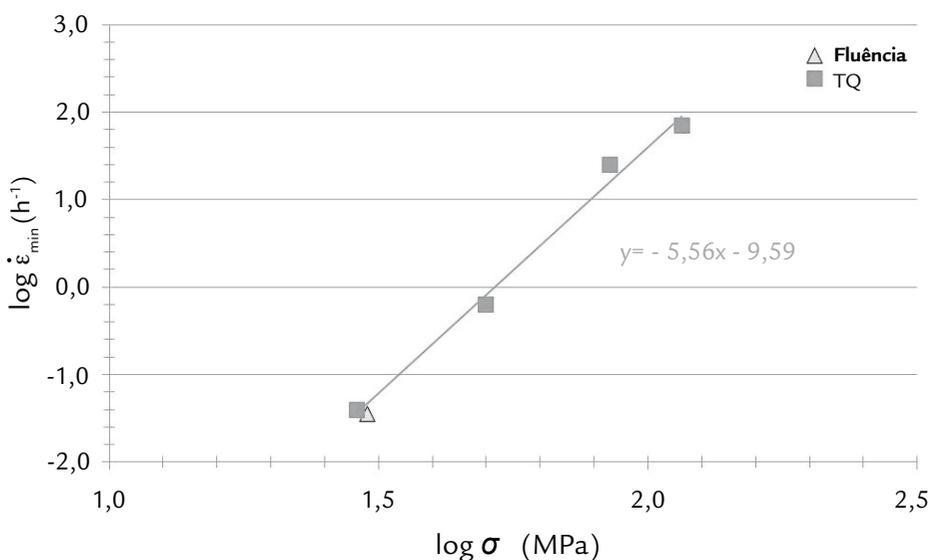


Figura 4  
Gráfico  $\log \dot{\epsilon}_{\min}$  versus  $\log t_r$   
para a liga Kanthal A1 a 800° C.

#### 4. Conclusões

O critério de equivalência entre os ensaios de tração a quente e fluência utilizados, no presente trabalho, apresentou resultados consistentes e significativos para a Liga Kanthal A1, como verificado anteriormente para outros materiais metálicos pelo autor da metodologia e colaboradores.

A conversão de dados de tração a quente para fluência, produziu resultados

satisfatórios, considerando a metodologia preconizada por Larson-Miller.

Foi possível mostrar que os dados de tração a quente se correspondem bem com os dados de fluência quando plotados em um mesmo diagrama do tipo Monkman-Grant. O valor do expoente  $m$  da relação de Monkman-Grant pode ser praticamente substituído por 1, simplificando assim a relação. Verificou-se

uma correspondência entre os dados de tração a quente e fluência plotados na forma diagrama de Norton.

Os diagramas de Norton permitiram determinar os mecanismos de fluência para o material estudado.

#### 5. Agradecimentos

Os autores expressam os seus sinceros agradecimentos ao Laboratório de Eletroquímica de Superfície e Corrosão

(LESC) da Universidade Federal do Paraná - UFPR, à Petrobras, ao Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em

Engenharia-PIPE da UFPR e à empresa STM - Sistemas de Teste em Materiais Ltda. de São Carlos/SP.

#### 6. Referências bibliográficas

BUENO, L.O. Creep Behavior of 2.25Cr-1Mo steel – an equivalence between hot tensile e creep testing data. In: ECCO 2005 CREEP CONFERENCE, 12-14 Sept. 2005. SHIBLI, I. A., HOLDSWORTH, S. R., MERCKLING, G (Ed.) *Proceeding...* London, USA: DEStech Publ., 2005, p.969-980.

BUENO, L.O. A simple criterion for converting hot tensile data to creep data and vice-versa. *Intl. Colloquium on Ageing of Materials and Methods for the Assessment of Lifetimes of*

- Engineering Plants. Gordon's Bay*, South Africa: Emas Publish. Ltd., 7-11 March 2005, p.103-117.
- BUENO, L.O. On the equivalence between hot tensile and creep data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF ABM, July 24-27, 2006. *Proceeding...* Rio de Janeiro, 2006. p. 2245-2258. (CD ROM).
- FERREIRA DIAS, C.R., BUENO, L.O. Correlação tração a quente e fluência para o cobre comercial puro. Parte 1: correlações entre tensão, taxa de deformação, tempo de ruptura e temperatura. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA ABM, 65. *Anais...* Rio de Janeiro, 2010. p.1246-1255 (CD ROM).
- BUENO, L.O., FERREIRA DIAS, C.R. Correlação tração a quente e fluência para o cobre comercial puro. Parte 2: aplicação de diferentes metodologias de parametrização. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA ABM, 65. *Anais...* Rio de Janeiro, 2010. p. 1264-1274 (CD ROM).
- DIETER, G.E. *Mechanical Metallurgy*. Ed. Mc Graw Hill Book Co. 3a. Edição , 1988.
- REIS SOBRINHO, J.F., MARINO, L., BUENO, L.O. Comportamento do aço 2,25Cr-1Mo na faixa de 500 a 700°C. Parte 2: Avaliação dos parâmetros de encruamento e sensibilidade à taxa de derormação. *Anais da 7ª. COTEQ – Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos / IBP*, Florianópolis (SC), Artigo 289/03 (em CD ROM), 2003.
- KASSNER, M.E. Recent developments in understanding the mechanism of five-power-law creep. *Materials Science and Engineering*, v.410-411, p.20-23, 2005.
- REIS SOBRINHO, J. F., BUENO, L.O. Correlation between creep and hot tensile behaviour for 2.25Cr-1Mo Steel from 500°C to 700°C - an assessment according to different parameterization methodologies. *Revista Materia*, v.10, n.3, p.463-471, 2005.
- SORDI, V. L., BUENO, L. O. Tensile strength and creep behaviour of austenitic stainless steel type 18Cr – 12Ni with niobium additions at 700°C. *Journal of Physics – Conference series on line*, v. 240, n.1, p. 012088, 2010.
- VISWANATHAN, R. Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components. *ASM International, Metals Park*, Ohio, 1993.

---

Artigo recebido em 21 de setembro de 2010. Aprovado em 08 de fevereiro de 2011.