

EQUIVALÊNCIA ENTRE DADOS DE TRAÇÃO A QUENTE E FLUÊNCIA NO AÇO 2,25Cr-1Mo. Parte 2 – RUPTURA POR FLUÊNCIA À TEMPERATURA AMBIENTE ? UMA POSSIBILIDADE: NAS VIZINHANÇAS DO LRT¹

Levi de Oliveira Bueno²
 Noeli Bragalda dos Santos³

Resumo

É senso comum considerar que aços e ligas de alta resistência não têm a menor possibilidade de exibir o fenômeno de ruptura por fluência à temperatura ambiente, já que esse comportamento costuma ser observado, geralmente, para temperaturas equivalentes a $T_h > 0,3$. No entanto, utilizando um critério recentemente proposto para equivalência entre dados de tração a quente e fluência, foi possível vislumbrar essa possibilidade em um aço 2,25Cr-1Mo. Dados de ensaios de tração realizados a 25°C foram convertidos para fluência, apontando para a existência desse fenômeno de maneira evidente, porém na região de tensões bem altas, nas vizinhanças do Limite de Resistência a Tração do material (LRT). Ensaios de fluência realizados gradativamente abaixo do LRT confirmaram o aparecimento de curvas de fluência, contendo nitidamente os estágios: primário, secundário e terciário seguido de ruptura. Observou-se que pequenas alterações na tensão, nessa região, levam os ensaios abruptamente à ruptura em tempos muito curtos ou extremamente longos.

Palavras-chave: Aço 2,25Cr-1Mo; Tração; Fluência; Temperatura ambiente.

EQUIVALENCE BETWEEN HOT TENSILE AND CREEP DATA IN 2.25Cr-1Mo STEEL. Part 2 – CREEP RUPTURE AT ROOM TEMPERATURE? A POSSIBILITY: ON THE NEIGHBORHOOD OF ULTIMATE TENSILE STRESS

Abstract

It is common sense to consider that steels and high strength alloys do not show any possibility of exhibiting creep rupture phenomenon at room temperature, considering that this behavior is usually observed for homologous temperatures $T_h > 0,3$. However, by using a criterion of equivalence proposed for correlation between hot tensile and creep data, it was possible to envisage this possibility in 2,25Cr-1Mo steel. Tensile results at 25°C were transposed to creep and pointed out to the existence of the phenomenon in a remarkable manner, yet in the high stress region, on the neighborhood of the Ultimate Tensile Stress (UTS). Creep tests carried out gradually below the UTS confirmed the manifestation of creep curves clearly containing the stages: primary, secondary and tertiary followed by rupture. It was observed that small variations in stress in this region imply in tests exhibiting abruptly very short or extremely long rupture times.

Keywords: 2,25Cr-1Mo steel; Tensile test; Creep test; Room temperature.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² PhD. Professor Associado do DEMa/UFSCar.

³ MSc em Engenharia de Materiais pelo PPG/CEM – UFSCar.

1 INTRODUÇÃO

O estudo da deformação por fluência em baixas temperaturas homólogas, principalmente para $T_h < 0,1$, não tem recebido tanta atenção por parte dos pesquisadores. Diferentemente da área de fluência em alta temperatura, em que $T_h > 0,3$, o fenômeno de fluência em baixa temperatura não tem sido considerado como de grande importância técnica, pois as deformações envolvidas são pequenas e falhas por fluência nessas condições tidas como improváveis. Mesmo assim, como apontado por Oehlert e Atrens,⁽¹⁾ o estudo de fluência à temperatura ambiente recebeu certa consideração no passado, como tema de estudo relativo a mecanismos fundamentais de deformação, tendo sido descritos vários casos de fluência ambiente em níquel, cobalto, ouro, cobre, alumínio, aços inoxidáveis austeníticos e aços baixo carbono.

Mais recentemente, o tema de fluência à temperatura ambiente voltou a apresentar interesse e diversos autores tem relatados estudos sobre esse comportamento em diferentes metais, ligas e aços de vários tipos, incluindo aços de alta resistência.⁽¹⁻⁶⁾ Investigações, nessa área, tem apresentado importância, pela interação que pode ocorrer do fenômeno de fluência com o processo de propagação de trinca em fadiga e também com o processo de corrosão sob tensão, à temperatura ambiente.^(4,5) Muitas vezes, esse tipo de deformação acumulada pode interferir no bom desempenho de componentes de precisão que tem que operar sob carga em tempos prolongados. No entanto, todos esses estudos focalizam invariavelmente o comportamento de fluência sob tensões abaixo do limite de escoamento, ou seja, numa região onde ocorre predominantemente fluência de estágio primário, associada a baixos níveis de deformação, apresentando, em geral, exaustão num certo nível de deformação.⁽¹⁻³⁾ Nenhum desses trabalhos descreve a possibilidade de ocorrência do fenômeno de fluência à temperatura ambiente, constituído pelos 3 estágios convencionais de alta temperatura, ou seja: primário, secundário e terciário, seguido de fratura do material.

O objetivo do presente trabalho é verificar a possibilidade de existência do fenômeno de fluência consistindo dos 3 estágios de deformação seguido de ruptura, no aço 2,25 Cr-1Mo. Este artigo representa uma continuação do trabalho apresentado na Parte 1⁽⁷⁾ em que foi focalizado o comportamento de tração a quente e fluência do mesmo material, na faixa de 500 a 700°C. Utilizando o mesmo enfoque de correlação entre resultados de tração a quente e os de fluência, realizou-se inicialmente um conjunto de testes de tração com diferentes velocidades à temperatura ambiente, no sentido de estabelecer melhor as condições de realização dos ensaios de fluência à temperatura ambiente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Informações sobre o material e técnicas experimentais utilizadas na condução dos ensaios de tração a quente e fluência na faixa de 500 a 700°C foram detalhadas na Parte 1 deste trabalho⁽⁷⁾.

Para realização dos ensaios de tração e fluência à temperatura ambiente foram utilizados corpos de prova com os mesmos formato e dimensões relatados no trabalho citado anteriormente.⁽⁷⁾ Também foram empregados os mesmos equipamentos e acessórios de ensaio neste trabalho: a máquina universal INSTRON 8802, para os ensaios de tração e máquinas STM MF-1000 para os ensaios de fluência. A taxa de coleta de dados de fluência com o Data Logger

variou bastante de ensaio para ensaio, na faixa de 1 leitura a cada 5 segundos a 1 leitura a cada 5 horas.

No total, foram realizados apenas 6 ensaios de tração e 6 ensaios de fluência à temperatura ambiente. No caso dos ensaios de tração foram empregadas as velocidades de: 20 – 5 – 1 – 0,25 – 0,01 – 0,0025 mm/min (equivalentes a taxas nominais de deformação variando entre $1,33 \times 10^{-2}$ a $1,67 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), e no caso dos ensaios de fluência, as tensões aplicadas de: 558 – 548 – 530 – 520 – 510 – 505 MPa.

No período de realização dos ensaios nos laboratórios, a temperatura ambiente apresentou uma variação da ordem de $25 \pm 5^\circ\text{C}$, em função dos efeitos naturais de variação climática.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1a apresenta o efeito da variação da velocidade de ensaio na curva de tração à temperatura ambiente. Nota-se a queda sistemática da resistência do material em todos os níveis de deformação com a diminuição da velocidade de tração, em um faixa de cerca de 4 ordens de grandeza de variação. A Figura 1b indica que os dados do Limite de Resistência a Tração (LRT) podem ser expresso pela relação: $\sigma = C \cdot \dot{\epsilon}^m$, com o valor de $m \approx 1$. A evidência dessa equação indica a validade de uma relação de fluência equivalente: $\dot{\epsilon}_s = A \cdot \sigma^n$, conhecida como relação de Norton,⁽⁷⁾ em que $n \approx 1/m'$.

Considerando essa possibilidade, realizou-se a transposição desses resultados de tração para resultados de fluência, de acordo com o critério de equivalência proposto por Bueno⁽⁸⁾ que também foi utilizado na Parte 1 deste trabalho.⁽⁷⁾ Os dados de tração na temperatura ambiente aparecem plotados na Figura 2, segundo três principais gráficos de análise do comportamento de fluência em metais, a saber, Figura 2a: variação da taxa mínima de fluência com a tensão (diagrama de Norton), Figura 2b: variação da taxa mínima de fluência com o tempo de ruptura e Figura 2c: queda de resistência com a tensão. É importante ressaltar que a localização dos pontos de tração ambiente, nas Figuras 2a e 2c, é absolutamente compatível com o efeito que a temperatura provoca na sequência de curvas obtidas em alta temperatura. É surpreendente como os dados de tração à temperatura ambiente apresentam o mesmo comportamento que os dados de tração e fluência em alta temperatura indicados na Figura 2b, em que a relação de Monkman-Grant é verificada ($\dot{\epsilon}_s \times t_r^m = K$, como citado na Parte 1 deste trabalho⁽⁷⁾).

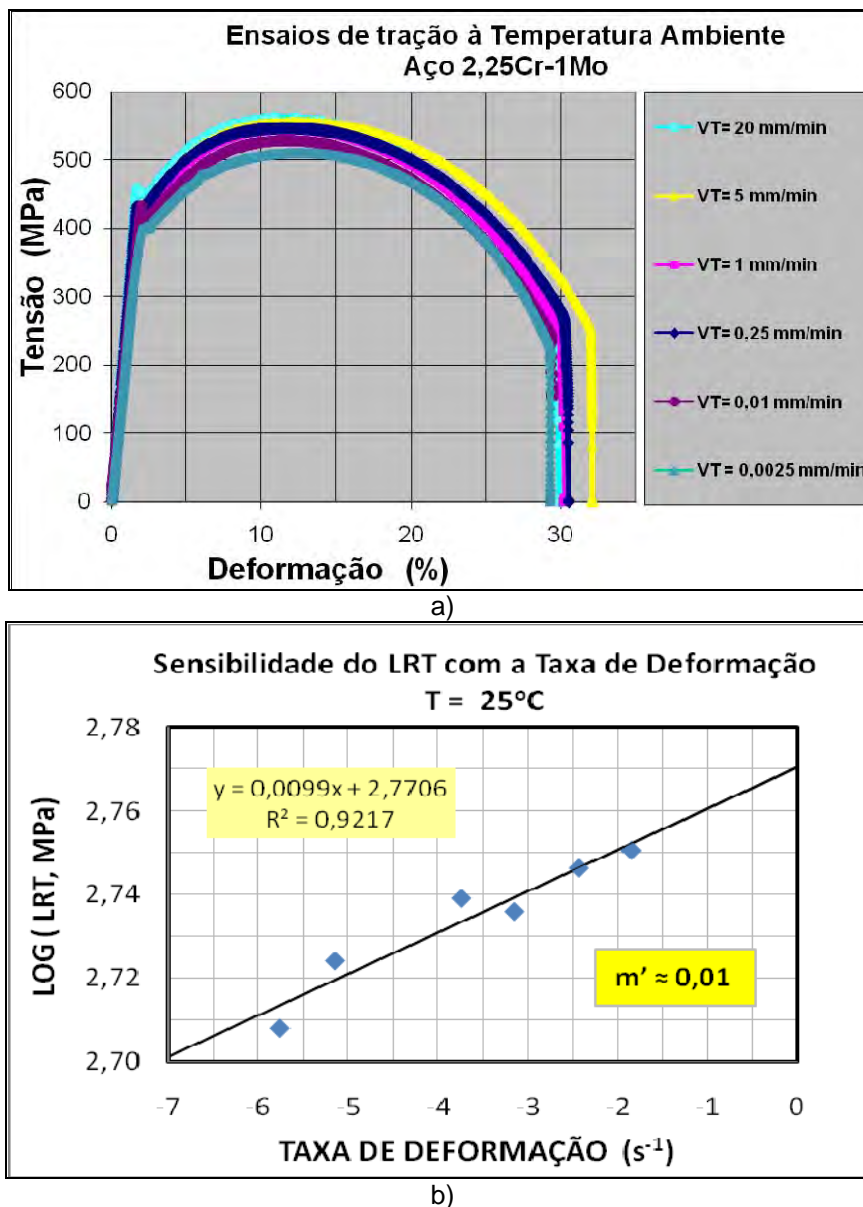


Figura 1 – Ensaio de tração à temperatura ambiente, em diferentes velocidades de tração, no aço 2,25Cr-1Mo: a) Efeito nas curvas $\sigma \times \varepsilon$; b) Sensibilidade do Limite de Resistência a Tração com a Taxa de Deformação.

Dada a excelente compatibilidade que os ensaios de tração sempre apresentaram com os de fluência em alta temperatura, vislumbrou-se a possibilidade da obtenção de resultados de fluência com ruptura, também à temperatura ambiente.

A Figura 3 apresenta o conjunto de resultados provenientes dos 6 ensaios de fluência realizados nessa condição, com diferentes tensões aplicadas. Dentre esses 6 testes, cinco indicaram a presença de curva de fluência completa com os três estágios seguida de ruptura, como indicam as Figuras 3a a 3e, e apenas um com curva de fluência incompleta sem ruptura, como indica a Figura 3f. O início do tempo de fluência foi estabelecido a partir do momento em que se completou o carregamento da amostra. Em vários testes preliminares, com tensões superiores a 558 MPa, ocorreu a ruptura instantânea do corpo de prova durante a operação de carregamento. As deformações totais observadas no carregamento nesses 6 testes

de fluência se situaram na faixa de 5 a 10%, concordando com as deformações que se obtém na mesma faixa de tensão nos ensaios de tração, como indica a Figura 1a.

Por outro lado, a medida final de deformação do corpo de prova (correspondente ao tempo de ruptura do material) foi obtida pela medição direta do alongamento sofrido pelo corpo de prova, após o ensaio.

O ensaio de fluência realizado com 505 MPa foi interrompido após cerca de 900 horas, por dois motivos: a) ao longo desse período o nível de deformação acumulada foi de apenas 0,7% aproximadamente.; b) a análise dos dados dos outros 5 ensaios indicaram tendência de um tempo de ruptura extremamente longo para esse ensaio, considerado inviável para os objetivos do presente trabalho. Diferentemente das outras figuras em que o eixo de deformação varia de 5 a 30%, na Figura 3f o mesmo eixo com escala ampliada, variando de 5 a 7% para ser possível uma visualização mais adequada da curva de fluência correspondente.

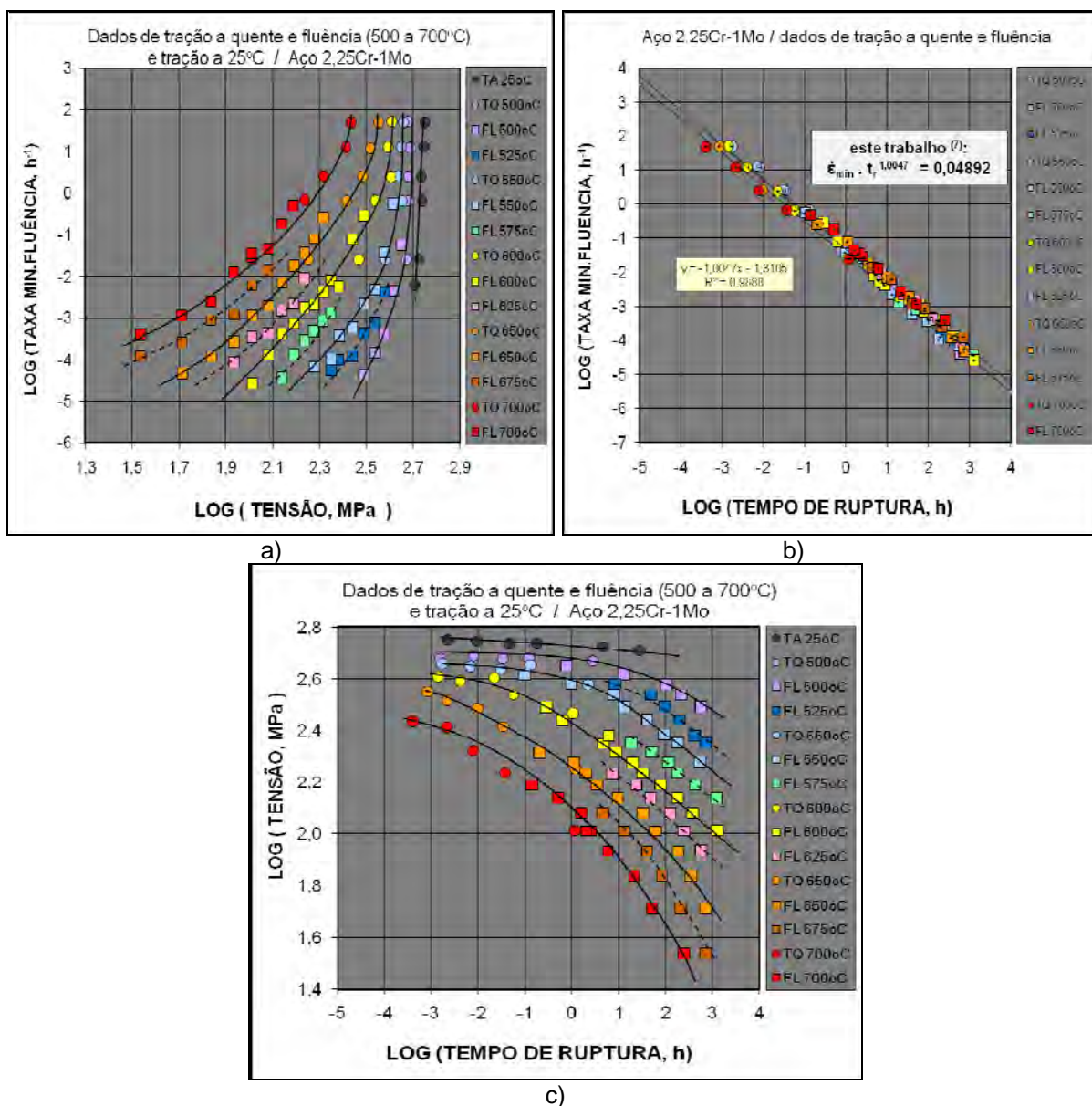
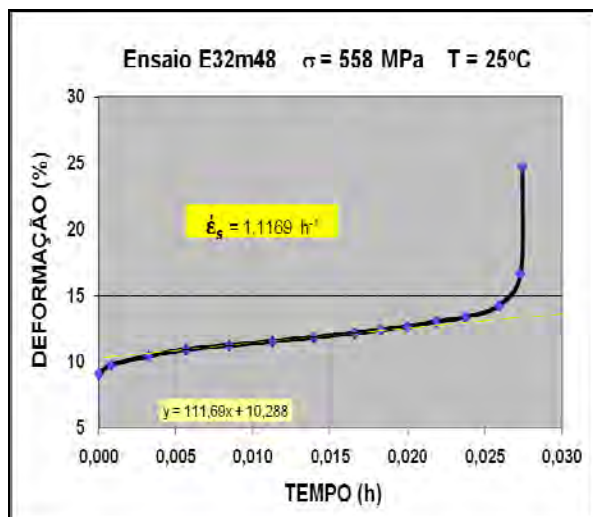
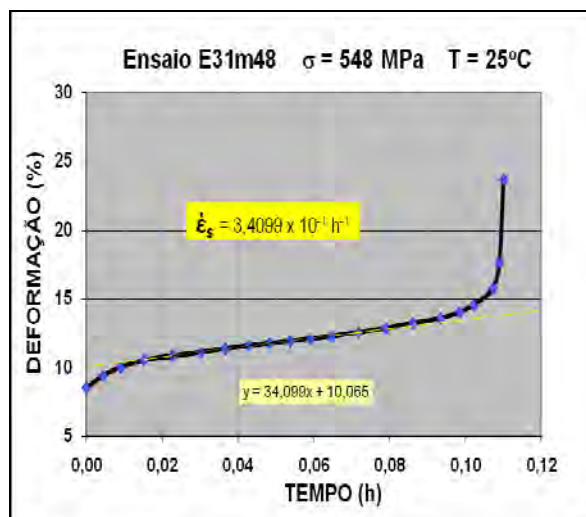


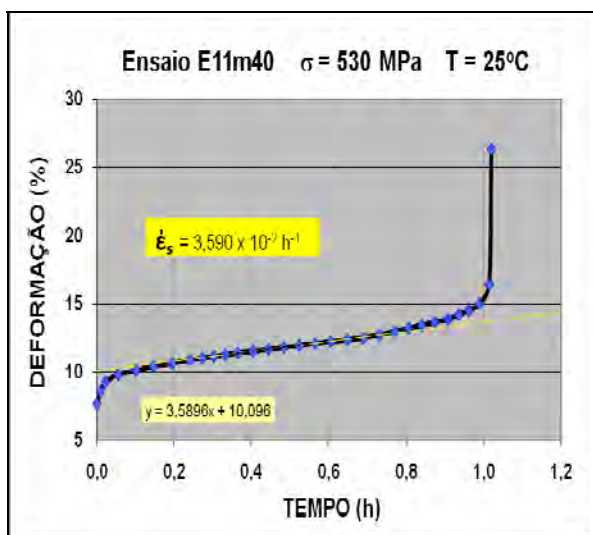
Figura 2 – Dados de tração à temperatura ambiente plotados com dados de tração a quente e fluência na faixa de 500 a 700°C: a) Curvas de variação da taxa mínima de fluência com a tensão; b) Variação da taxa mínima de fluência com o tempo de ruptura, obedecendo a relação de Monkman-Grant; c) Curvas de variação da tensão com o tempo de ruptura.



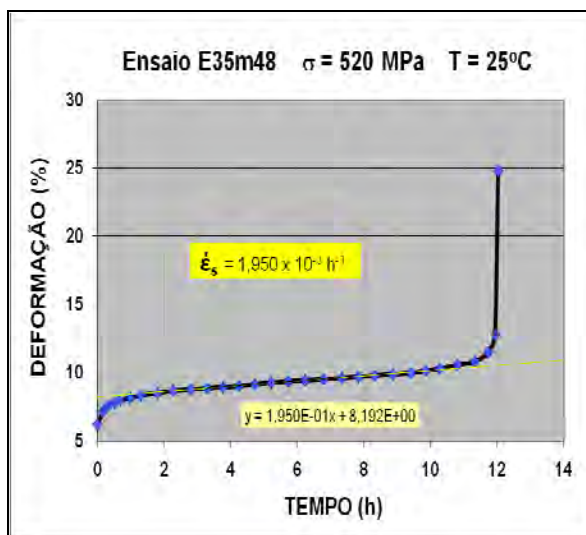
a)



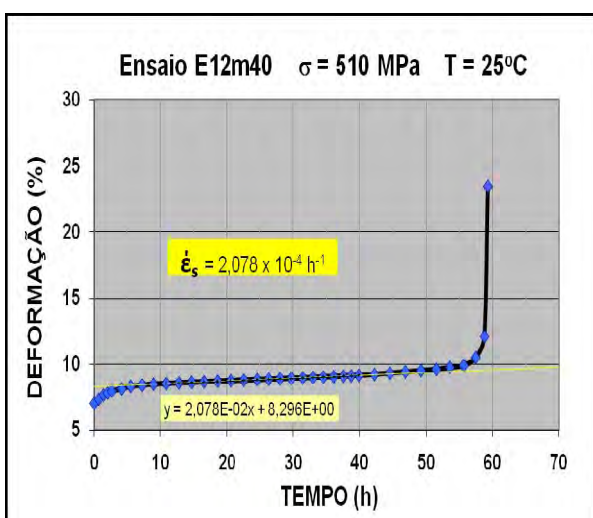
b)



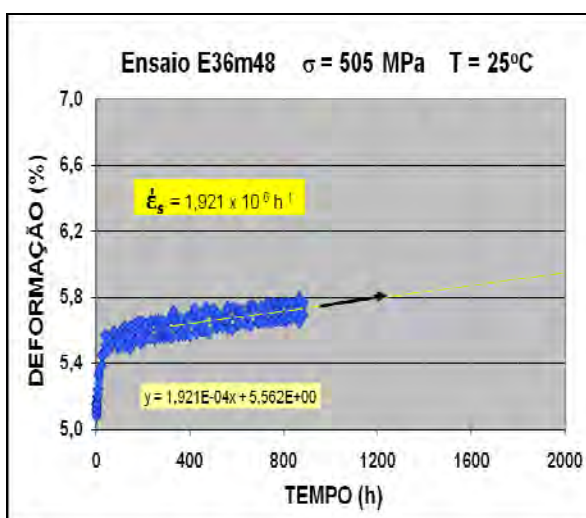
c)



d)



e)



f)

Figura 3 – Curvas de fluência no aço 2,25Cr-1Mo, à temperatura ambiente com as seguintes tensões aplicadas: a) 558 MPa; b) 548 MPa; c) 530 MPa; d) 520 MPa; e) 510 MPa; f) 505 MPa.

Com a ampliação, no entanto, tornam-se também visíveis o efeito de oscilação nas leituras de deformação decorrentes da instabilidade na temperatura ambiente com a variação climática natural.

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios de fluência à temperatura ambiente, segundo três gráficos tradicionais de análise desse comportamento nos metais, ou seja, Figura 4a: variação da taxa mínima de fluência com a tensão (diagrama de Norton), Figura 4b: variação da taxa mínima de fluência com o tempo de ruptura e Figura 4c: queda de resistência com a tensão. Nessas figuras, os dados referentes aos ensaios concluídos com ruptura estão representados pelos quadrados azuis escuro, enquanto que o ensaio interrompido é representado pelo quadrado azul claro.

A Figura 4a mostra a reta referente à regressão linear feita com os 5 pontos dos ensaios que apresentaram ruptura, denotando um valor bem alto para o expoente de Norton, $n = 119$. O sexto ponto da figura, referente ao teste interrompido, encontra-se deslocado para baixo da linha de regressão mencionada e tudo indica que o valor da taxa de deformação encontrada tenha tendência a diminuir quando o estágio secundário nesse teste estiver completamente definido, como indica a Figura 3f.

A Figura 4b indica que os dados dos testes de fluência com ruptura na temperatura ambiente obedecem a relação de Monkman-Grant, com expoente $m = 1,15$. O sexto ponto, relativo ao ensaio interrompido, encontra-se abaixo da linha de regressão e considerando que a taxa de fluência no secundário possa decrescer um pouco mais do que a calculada, é possível que o tempo de ruptura desse ensaio (se ocorrer) alcance valores da ordem de 10.000 horas (~ 1 ano de teste).

A Figura 4c indica que a curva de queda de resistência a fluência com o tempo de ruptura à temperatura ambiente tende a apresentar concavidade para cima, ao invés de concavidade para baixo como ocorre para os ensaios em alta temperatura, como mostram as curvas na Figura 2c. Nesse caso o sexto ponto pode se deslocar ainda mais para a direita acentuando a concavidade já citada da curva. Isso indica que a tensão utilizada nesse teste (505 MPa) esteja próxima de um nível onde ocorra uma tensão de corte (threshold stress) para fluência a temperatura ambiente no material.

A Figura 5 apresenta os dados combinados de tração e fluência à temperatura ambiente, segundo os mesmos três gráficos tradicionais de análise desse comportamento nos metais, como mostrado na Figura 4. Nota-se pela Figura 5a que os dados de tração apresentam boa correspondência com os de fluência, da mesma maneira como tem sido observado quando se associam esses dois tipos de resultado em alta temperatura.⁽⁷⁾ Os dois tipos de dados estão representados na figura por uma mesma reta, revelando um expoente de Norton do conjunto, $n = 118$, praticamente idêntico ao apontado na Figura 4a. Esse valor de n corresponde a um valor de m' bem baixo para o material na temperatura ambiente, $m' = 0,0085$, como era de se esperar, de acordo com a Figura 1b.

Na Figura 5b os dados de tração apresentam correspondência satisfatória com os dados de fluência. Nesse caso também foi adotada uma única linha de regressão para expressar os dois conjuntos de dados, com $m = 1,09$, próximo do valor indicado na Figura 4b. Com relação ao ponto referente ao ensaio de fluência interrompido, a predição de um tempo de ruptura levando em conta essa nova reta de referência indica um tempo $t_r \approx 17$ meses, superior ao mencionado na Figura 4b.

Com a adição dos dados de tração aos de fluência, a Figura 5c revela o aparecimento da tendência de formação de um patamar do lado esquerdo da curva,

que anteriormente, com os dados de fluência, mostrava concavidade apenas para cima (Figura 4c). Na verdade, a curva da Figura 5c revela um comportamento do tipo sigmoidal, com concavidade para baixo do lado esquerdo e concavidade para cima do lado direito.

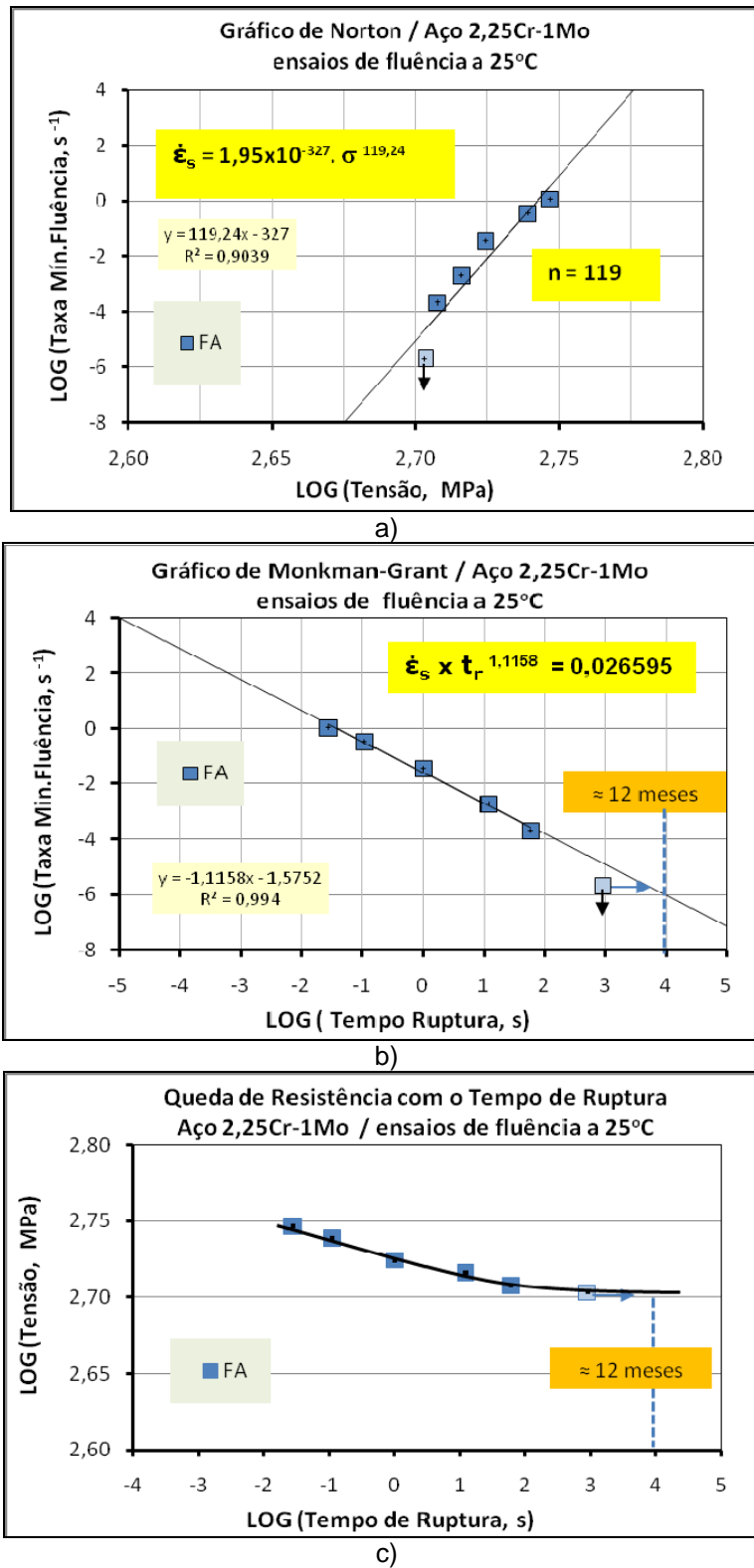


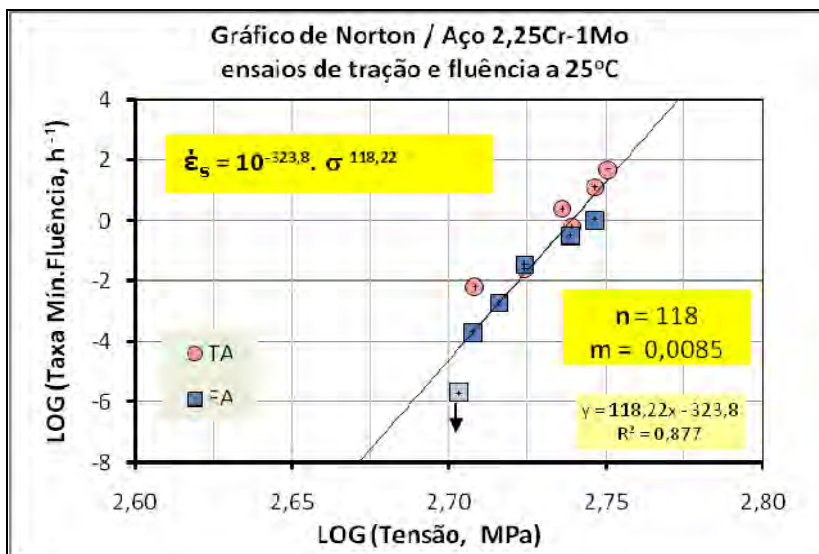
Figura 4 – Dados de fluência à temperatura ambiente: a) gráfico de Norton; b) gráfico de Monkman-Grant; c) gráfico de Queda de Resistência com o Tempo de Ruptura.

Finalmente, os dados de fluência foram acrescentados aos gráficos das Figuras 2a, 2b e 2c, que são representados agora pelas Figuras 6a, 6b e 6c, respectivamente. Os dados de tração e fluência à temperatura ambiente ocorrem em uma faixa bem estreita de tensão, logo abaixo do Limite de Resistência a Tração do material. Nas Figuras 6a e 6c, esses dados revelam grande sensibilidade à variação de tensão nessa região, que produz mudanças muito abruptas na taxa de fluência do estágio secundário e no tempo de ruptura, respectivamente. Por outro lado, é surpreendente mais uma vez que os dados de tração e fluência à temperatura ambiente se localizem tão bem na mesma região dos dados de tração e fluência em alta temperatura, segundo o diagrama de Monkman-Grant indicado na Figura 6b.

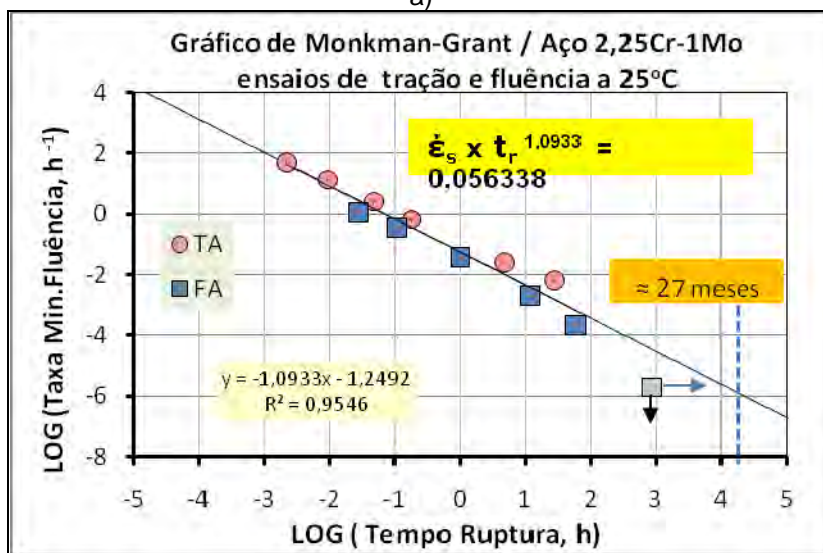
É altamente significativa a verificação de um comportamento do tipo sigmoidal para os dados de tração e fluência na temperatura ambiente, como indicado na Figura 5c, quando comparado com o comportamento das outras curvas em alta temperatura, como mostra a Figura 6c. O comportamento sigmoidal para dados da variação da resistência a fluência com o tempo de ruptura, em alta temperatura, tem sido sugerido na literatura por Wilshire e co-autores, para o aço 1Cr-1/2Mo e o cobre policristalino.^(9,10) Esses autores conseguem racionalizar dados de longa duração (até 150.000 h), em diferentes temperaturas, no aço 1Cr-1/2Mo, na forma de uma curva sigmoidal de referência, expressa por um tempo de ruptura compensado pelo efeito da temperatura ($t^* = t_r \cdot \exp(-Q_c / RT)$), considerando uma energia de ativação de fluência $Q_c = 300$ kJ/mol para o material.⁽⁹⁾ O mesmo tipo de racionalização é conseguida para o cobre policristalino, considerando uma energia de ativação de fluência $Q_c = 110$ kJ/mol.⁽¹⁰⁾

Dessa forma, é possível imaginar que o mesmo esteja ocorrendo com o aço 2,25Cr-1Mo no presente estudo. Na realidade, para os níveis de temperatura, que variam entre 500 e 700°C, só é possível detectar experimentalmente o lado esquerdo das curvas sigmoidais, com concavidade para baixo, em cada caso. A detecção do lado direito dessas curvas, com concavidade para cima, dependeria de resultados de ensaios de fluência que teriam que se prolongar por dezenas ou centenas de anos.

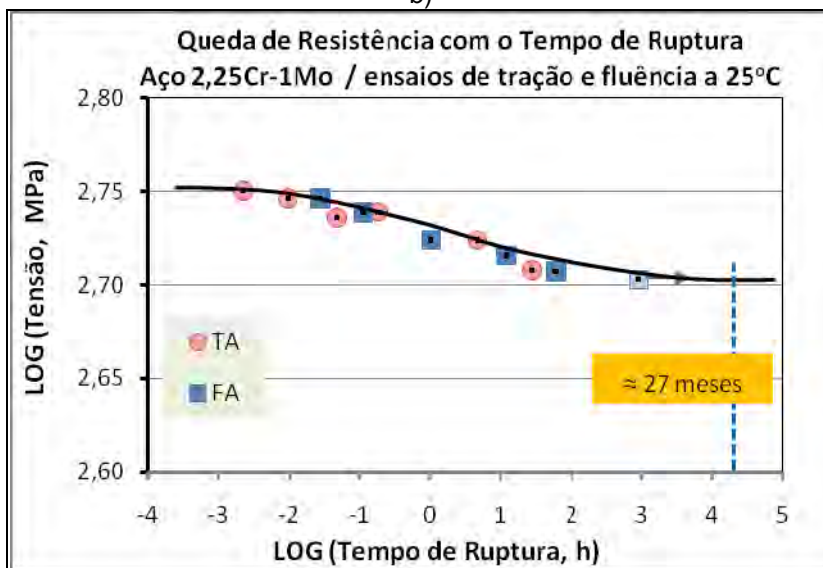
Torna-se necessária a realização de mais testes com o aço 2,25Cr-1Mo, envolvendo temperaturas abaixo de $T_r < 0,3$, utilizando-se a mesma metodologia empregada neste trabalho, para se compreender melhor o fenômeno e mecanismos de tração e fluência em baixas temperaturas.



a)



b)



c)

Figura 5 – Dados de tração e fluência à temperatura ambiente: a) gráfico de Norton; b) gráfico de Monkman-Grant; c) gráfico de Queda de Resistência com o Tempo de Ruptura.

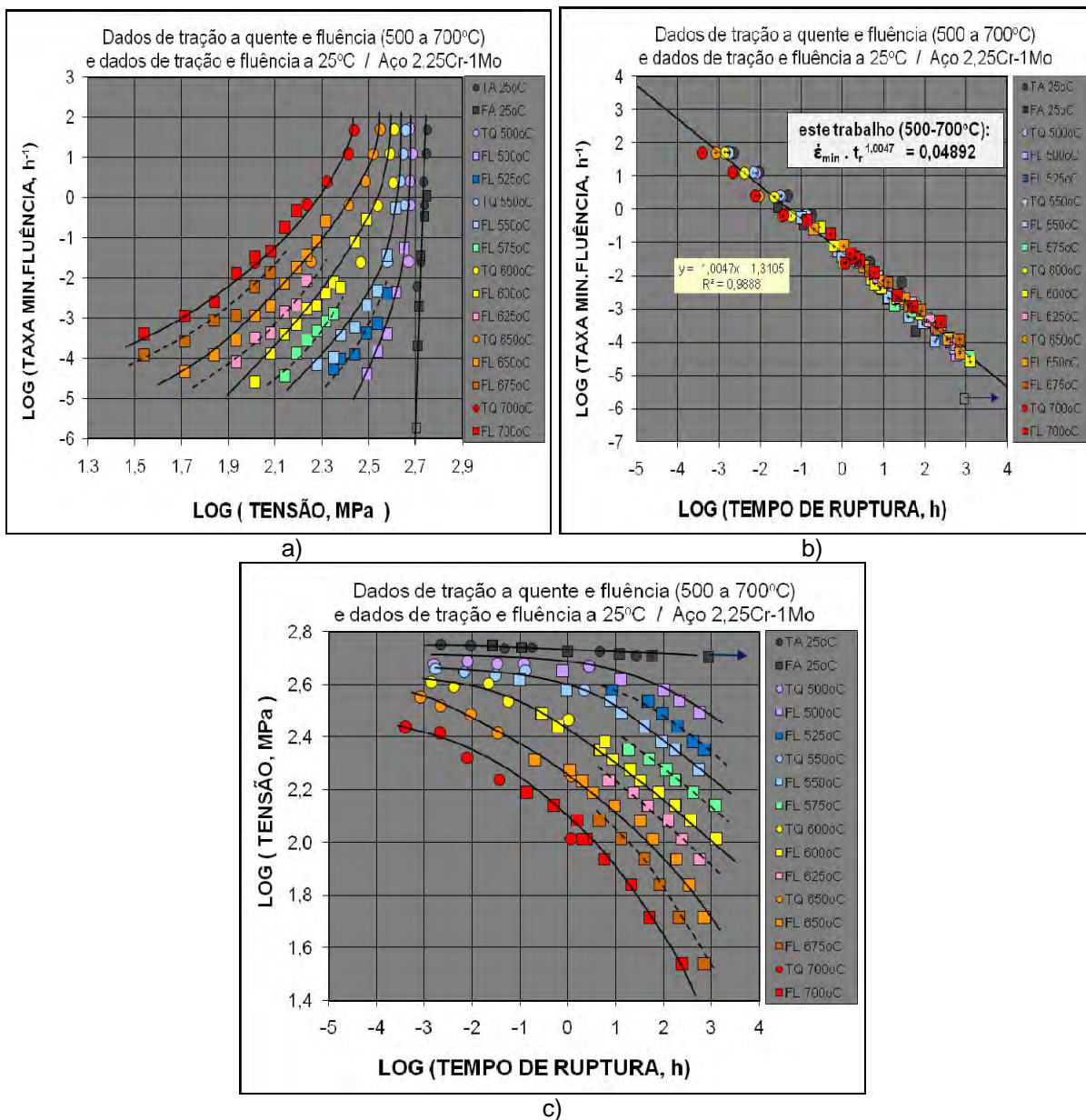


Figura 6 - Dados de tração e fluência à temperatura ambiente plotados com dados de tração a quente e fluência na faixa de 500 a 700°C: a) Curvas de variação da taxa mínima de fluência com a tensão; b) Variação da taxa mínima de fluência com o tempo de ruptura, obedecendo a relação de Monkman-Grant; c) Curvas de variação da tensão com o tempo de ruptura.

Sugere-se a também a continuidade dos estudos de fluência à temperatura ambiente empregando-se outros materiais, e acompanhados de testes de tração em diferentes velocidades, da maneira como foi realizada neste trabalho, no sentido de se compreender mais profundamente o fenômeno e sua relação com os mecanismos de fluência de alta temperatura.

4 CONCLUSÕES

- a) Fica comprovado, com este estudo, a ocorrência do fenômeno de fluência com os três estágios de deformação seguido de ruptura, no aço 2,25Cr-1Mo,

- à temperatura ambiente, numa faixa de tensões nas vizinhanças do Limite de Resistência a Tração do material.
- b) Os ensaios de tração em variadas taxas de deformação na temperatura ambiente tiveram um papel importante como coadjuvantes na análise dos dados de fluência, segundo três principais gráficos empregados tradicionalmente na análise desse comportamento em metais, quando associados através do critério de equivalência proposto para transposição dos dados entre si.
 - c) Os dois tipos de resultados, à temperatura ambiente, quando analisados em um diagrama de Norton, revelam um expoente de tensão elevado $n \approx 118$, associado a um baixo expoente de sensibilidade da tensão com a taxa de deformação $m' \approx 0,085$.
 - d) Ambos resultados apresentam também excelente concordância com a relação de Monkman-Grant proveniente dos dados de tração a quente e fluência na faixa de 500 a 700°C, com valor de m próximo de 1.
 - e) A variação dos dados de LOG(tensão) com o LOG(tempo de ruptura), à temperatura ambiente, considerando a participação dos dois tipos de ensaio na análise, demonstra comportamento do tipo sigmoidal. Esta pode ser uma característica geral do aço em estudo, também em níveis altos de temperatura.
 - f) Observou-se que pequenas alterações na tensão, nessa região de transição sigmoidal, podem levar os ensaios de fluência à temperatura ambiente a apresentarem, abruptamente, tempos de ruptura muito curtos ou extremamente longos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à STM-Sistemas de Teste em Materiais Ltda pela preparação e ensaios realizados nos corpos de prova de tração e fluência à temperatura ambiente, e ao Sr. Flávio A.S.Serra da Replan / Petrobrás pela doação do material utilizado na pesquisa. A Engenheira Noeli Bragalda dos Santos agradece ao CNPq/Capes pela concessão de sua bolsa de mestrado no programa PPG/CEM do DEMa/UFSCar.

REFERÊNCIAS

- 1 OEHLERT, A.; ATRENS, A. A. Room temperature creep of high strength steels. Acta Metallurgica, v. 42, N^o. 5, p. 1493-1508, 1994.
- 2 CHENG LIU,U. et al. Room temperature creep of a high strength steel . Materials and Design, v. 22, p.325-328, 2001.
- 3 YAMADA, T. Presences of primary creep in various phase metals and alloys at ambient temperature. Materials Science and Engineering A, v. 387–389, p. 719–722, 2004.
- 4 MO, T.; NIE, D.; ZHAO, J. Time-dependent deformation in cracked SUS304 steel at room temperature and its effects on fatigue crack growth. Journal of Pressure Equipment and Systems , v. 3, p.113-117, 2005.
- 5 ZHAO, J.; MO, T.; NIE, D. The occurrence of room-temperature creep in cracked 304 stainless steel specimens and its effect on crack growth behavior. Materials Science and Engineering A, v. 483–484, p.572–575, 2008.
- 6 NIE, D.; ZHAO, J.; MO, T.; CHEN, W.X. Room temperature creep and its effect on flow stress in a X70 pipeline steel. Materials Letters, v.62, p. 51–53, 2008.

- 7 SANTOS, N.; REIS SOBRINHO, J.F.; BUENO, L.O. Equivalência entre dados de tração a quente e fluência no aço 2,25Cr-1Mo. Parte 1 – Ampliação da base de dados na faixa de 500 a 700°C. A ser apresentado no 68^o Congresso da ABM, Belo Horizonte (MG), Julho/Agosto 2013.
- 8 BUENO, L.O. – Creep Behaviour of 2.25Cr-1Mo Steel - An equivalence between hot tensile and creep testing data. ECCC Creep Conference, 12-14, September 2005, Londres – Proc. Creep & Fracture in High Temperature Components – Design and Life Assessment Issues – Edited by I.A. Shibli, S.R. Holdsworth, G. Merckling. DEStech Publ., USA., p.969-980, 2005.
- 9 WILSHIRE, B.; SCHARNING, P.J. Extrapolation of creep life data for 1Cr– 0.5Mo steel. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v.85, p.739–743, 2008.
- 10 WILSHIRE, B.; BATTENBOUGH, A.J. Creep and creep fracture of polycrystalline copper. Materials Science and Engineering A, v. 443, p.156-166, 2007.