



CORRELAÇÃO TRAÇÃO A QUENTE E FLUÊNCIA PARA O COBRE COMERCIAL PURO. PARTE 1: RELAÇÕES ENTRE TENSÃO, TAXA DE DEFORMAÇÃO, TEMPO DE RUPTURA E TEMPERATURA¹

Cayo Roberto Ferreira Dias²
Levi de Oliveira Bueno³

Resumo

Dados de tração a quente foram correlacionados com dados de fluência, no cobre comercialmente puro, utilizando-se um critério proposto recentemente para análise destes dois tipos de ensaios em alta temperatura. O critério propõe uma equivalência entre os seguintes parâmetros de cada teste: taxa de deformação, limite de resistência, tempo necessário para atingir o limite de resistência, nos ensaios de tração, respectivamente com: a taxa mínima, a tensão aplicada, o tempo de ruptura, nos ensaios de fluência, a uma dada temperatura de ensaio. O material foi ensaiado na faixa de temperatura de 300°C a 500°C, utilizando-se taxas de deformação em tração na faixa de $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ e tensões de fluência variando de 7,5 a 60 MPa. A conversão dos dados de tração a quente para fluência tornou possível a análise de todos os resultados segundo relações propostas por diversos autores na literatura de fluência, a saber: Norton, Arrhenius, Zener-Hollomon e Monkman-Grant, com determinação dos parâmetros correspondentes em cada caso.

Palavras-chave: Tração a quente; Fluência; Cobre policristalino; Relações de fluência.

CORRELATION BETWEEN HOT TENSILE AND CREEP TESTS FOR COMMERCIALLY PURE COPPER. PART 1: RELATIONSHIPS INVOLVING STRESS, STRAIN RATE, RUPTURE TIME AND TEMPERATURE

Abstract

Hot tensile test data were correlated with creep data, in commercially pure copper, using a criterion recently proposed for the analysis of these two kinds of tests at high temperature. The criterion considers the equivalence between the following parameters in each case: deformation rate, ultimate tensile stress, time taken to reach the ultimate tensile stress, in tensile tests respectively with: minimum creep rate, applied stress, rupture time, in creep tests, at a certain test temperature. The material was tested in the temperature range from 300°C to 500°C, using tensile deformation rates varying from $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ to $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ and creep stresses varying from 7.5 to 60 MPa. The conversion of the hot tensile data to creep data made possible the common analysis of all the results according to typical relations proposed by several authors in creep literature: Norton, Arrhenius, Zener-Hollomon and Monkman-Grant, with determination of the corresponding parameters in each case.

Key words: Hot tensile test; Creep test; Polycrystalline copper; Creep relations.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Licenciado em Física. Estudante de mestrado do PPG / CEM, UFSCar.

³ PhD em Engenharia de Materiais. Professor Adjunto do DEMa / UFSCar.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Trabalho

Este trabalho considera os resultados de uma série de ensaios de tração a quente e de fluência para o cobre comercialmente puro, buscando validar um critério proposto recentemente para análise destes dois tipos de testes, dentro de um mesmo enfoque, como proposto por Bueno.⁽¹⁾

Basicamente o critério considera que:

- a) a taxa de deformação no ensaio de tração é equivalente à taxa mínima de fluência.
- b) o limite de resistência a tração é equivalente à tensão utilizada no ensaio de fluência.
- c) o tempo necessário para atingir o limite de resistência a tração é equivalente ao tempo de ruptura do ensaio de fluência, a uma dada temperatura de ensaio.

1.2 Objetivo

O objetivo é verificar se também é possível estabelecer uma correlação entre os resultados destes dois tipos de ensaios para um material não ferroso (no caso, o cobre policristalino comercialmente puro), tendo em vista que esta correlação foi aplicada com sucesso no caso de aços e ligas ferrosas em geral.^(2,3)

Pretende-se utilizar esse critério para fazer a conversão dos dados de tração a quente para dados de fluência, tornando possível a análise comum de ambos os tipos de dados segundo diversas relações propostas por vários autores da área de fluência, a saber: Norton, Arrhenius, Zener-Hollomon e Monkman-Grant.

1.3 Revisão da Literatura

1.3.1 Relação de Norton

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 seguinte equação:

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

onde A é uma constante dependente da temperatura e da estrutura do material, σ é a tensão aplicada e n é conhecido como expoente de tensão, fornecendo informações sobre quais mecanismos de deformação por fluência estão operando⁽⁴⁾.

1.3.2 Relação de Arrhenius

A dependência da taxa mínima de fluência ($\dot{\epsilon}_{\min}$) com a temperatura (T) é normalmente bem representada pela relação de Arrhenius, expressa pela seguinte equação:

$$\dot{\epsilon}_{\min} = B \times \exp\left(\frac{-Q_f}{RT}\right) \quad (2)$$



onde B é uma constante dependente da estrutura do material e da tensão aplicada, R é a constante universal dos gases e Q_f é a energia de ativação aparente para a fluência

Para metais puros têm se notado a proximidade entre Q_f e a energia de ativação para a auto difusão Q_{ad} , tanto para fluência controlada por difusão como para controlada pelo movimento de discordâncias.⁽⁴⁾

Porém, valores de Q_f até metade do valor de Q_{ad} podem ser encontrados quando a difusão passa a ocorrer em temperaturas abaixo de $0,5T_f$, e a deformação passa a ser dependente da movimentação das discordâncias controlada pela difusão em contornos de grão.⁽⁴⁾

1.3.3 Relação de Monkman- Grant

A relação de Monkman-Grant considera que a taxa mínima de fluência e o tempo de ruptura (t_r) se correlacionam da seguinte maneira:

$$\dot{\epsilon}_{\min} \times t_r^m = K \quad (3)$$

onde m é um expoente de valor próximo a 1 e K é a constante de Monkman-Grant.

1.3.4 Parâmetro de Zener-Hollomon

Segundo Dieter⁽⁵⁾ o valor de Z , conhecido como parâmetro de Zener-Hollomon pode ser denominado como taxa de deformação compensada pela temperatura. Este parâmetro analisa o efeito combinado da taxa de deformação com a temperatura de acordo com a equação abaixo:

$$Z = \dot{\epsilon}_{\min} \times \exp(Q_f / RT) \quad (4)$$

onde $\dot{\epsilon}_{\min}$ é a taxa de deformação, Q_f é a energia de ativação aparente para a fluência, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho é o cobre policristalino, comercialmente puro, recebido na forma trefilada, com estrutura de grãos alongados por encruamento. O material foi recozido a 600°C por uma hora, com resfriamento rápido ao ar, sofrendo recristalização e crescimento de grão, exibindo finalmente estrutura granular equiaxial, com tamanho médio de grão $D = 50 \mu\text{m}$. A resistência a tração também foi testada à temperatura ambiente antes e depois deste processo. Finalmente o material foi considerado adequado para ser submetido aos ensaios de tração a quente e de fluência.

Os corpos de prova utilizados tanto nos ensaios de tração como nos de fluência possuíam as mesmas medidas, sendo de formato cilíndrico com rosca nas extremidades tipo M8x1,25 e dimensões nominais: $d_0 = 4\text{mm}$ e $L_0 = 16\text{mm}$, na parte útil.

2.1 Ensaios de Tração

Estes ensaios foram realizados nas temperaturas de 300°C, 350°C, 400°C, 450°C e 500°C utilizando as velocidades de tração: 0,01 mm/min – 0,8 mm/min – 20 mm/min que se mantiveram constantes do início ao fim do ensaio, perfazendo um

total de 15 ensaios. O equipamento utilizado foi uma máquina marca TIME modelo WDW-100, com um forno elétrico tubular adaptado à máquina. Tanto para o controle da temperatura do forno, como para a medida da temperatura do corpo de prova foram utilizados termopares tipo Chromel-Alumel, sendo um colocado junto às resistências do aparelho, e o outro na superfície do corpo de prova, respectivamente.

2.2 Ensaio de Fluência

Os ensaios de fluência foram realizados na modalidade carga constante, com tensão variando de 7,5 a 60 MPa e temperaturas variando na seqüência: 250°C – 275°C – 300°C – 325°C – 350°C – 400°C – 450°C – 475 °C – 500°C – 525°C. Empregou-se um conjunto de cerca de 10 máquinas marca STM modelo MF-1000. O sistema de extensometria nos corpos de prova utilizou sensores tipo LVDT associado a uma armazenadora automática de dados marca Fluke (Data Logger).

As medidas da variação do alongamento em função do tempo foram armazenadas em intervalos de tempo que variaram de aproximadamente 5 minutos a 30 minutos, sendo que, este período dependia das previsões de duração de cada ensaio.

3 RESULTADOS

3.1 Curvas de Tração a Quente e Fluência

A Figura 1 apresenta um exemplo de uma curva de tensão-deformação, proveniente de um ensaio de tração a 350°C, com velocidade de tração de 0,01 mm/min, que equivale a uma taxa de deformação de $9,8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} = 0,035 \text{ h}^{-1}$.

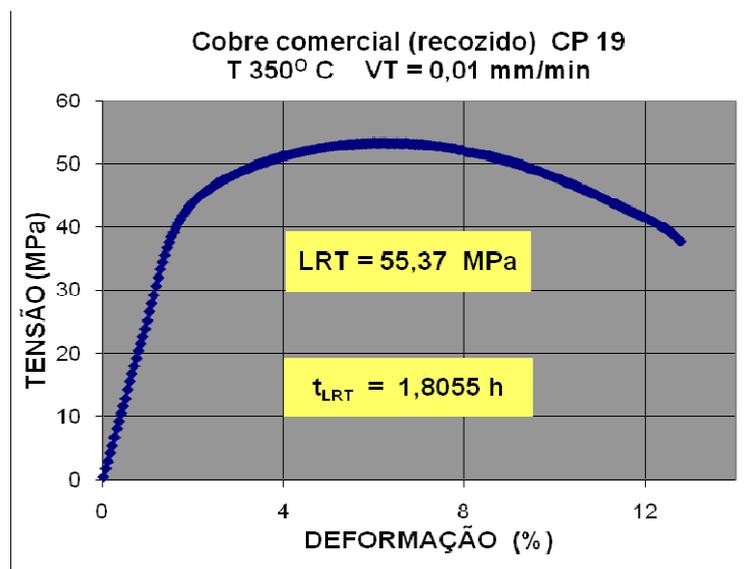


Figura 1. Curva de tração a quente do Cobre policristalino, comercialmente puro, a 350°C e taxa de deformação de $0,035 \text{ h}^{-1}$.

À medida que a temperatura do ensaio aumentou e para velocidades de tração de 0,8 mm/min e 20 mm/min algumas curvas de tensão-deformação apresentaram oscilações com presença de outros picos após o limite de resistência

a tração, decrescentes, com menores níveis de tensão, caracterizando, possivelmente, ocorrência de processos de amaciamento dinâmico neste material.

A Figura 2 apresenta um exemplo de curva de fluência do material, no caso referente à aplicação de tensão de 40 MPa com temperatura de 300°C.

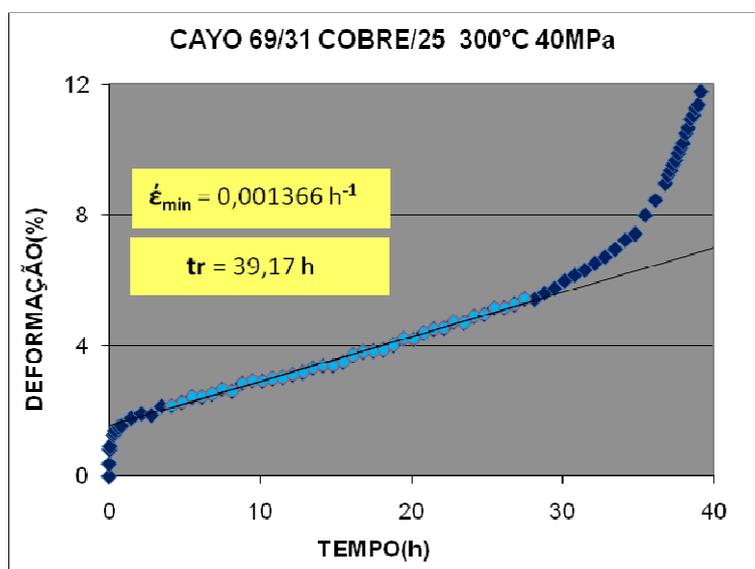


Figura 2. Curva de fluência do Cobre policristalino, comercialmente puro, a 300°C e 40 MPa.

Embora possa ser notado com clareza nesta curva de fluência os regimes primário, secundário e terciário, em alguns ensaios com tensões mais baixas (menores que 30 MPa) não foi possível verificar-se os regimes primário e terciário bem definidos. Em certos casos, o regime terciário parece ocorrer em linha reta, na forma de um novo estágio secundário, em taxa de deformação mais alta. De qualquer maneira, o valor da taxa mínima de fluência neste trabalho foi considerada sempre como sendo a da reta de menor inclinação referente ao estágio secundário inicial.

3.2 Correlação entre Tração a Quente e Fluência

As Tabelas 1 e 2 mostram os dados experimentais mais importantes extraídos dos ensaios de tração a quente e de fluência, respectivamente.

Na Tabela 1, para Tração a Quente, os dados de Taxa de Deformação, normalmente expressos em s^{-1} , foram passados para h^{-1} , unidade mais apropriada aos resultados de fluência. Da mesma forma, os dados de Tempo de ocorrência do LRT, normalmente expressos em s, foram convertidos para h.

Na Tabela 2, para Fluência, nota-se que os ensaios de fluência apresentaram tempos de ruptura variando entre 3,68 h e 826,3 h, e taxas mínimas variando entre $5,7 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1}$ e $1,4 \times 10^{-2} \text{ h}^{-1}$, correspondentes ao ensaio mais curto e mais longo respectivamente. Um total de cerca de 3000 horas de ensaio foram dedicadas para os ensaios de fluência.

Tabela 1. Dados gerados pelos ensaios de Tração a Quente, já convertidos para Fluência

CP	T(°C)	σ (MPa)	$\dot{\epsilon}_{\min}(\text{h}^{-1})$	tr (h)
8	300	137,42	69,645	0,00484
9	300	118,98	2,777	0,09444
10	300	71,32	0,0351	3,18055
14	350	122,99	71,813	0,00390
15	350	105,87	2,852	0,06777
19	350	53,37	0,0352	1,80555
5	400	100,58	68,337	0,00310
6	400	79,06	2,798	0,04444
7	400	40,58	0,0345	1,90277
16	450	85,85	69,848	0,00209
17	450	62,61	2,784	0,03555
18	450	30,45	0,0352	1,2500
11	500	65,36	71,556	0,00143
12	500	49,12	2,831	0,0250
13	500	23,56	0,03517	1,22222

Tabela 2. Dados gerados pelos ensaios de Fluência

CP	T(°C)	σ (MPa)	$\dot{\epsilon}_{\min}(\text{h}^{-1})$	tr (h)
39	250	30	0,000057	826,3
32	275	50	0,00093	40,53
37	300	20	0,000067	648,76
25	300	40	0,001366	39,17
22	300	50	0,003652	15,24
19	300	60	0,005946	8,92
27	325	30	0,000897	57,69
26	325	50	0,006829	7,62
41	350	30	0,001003	26,55
33	350	40	0,005577	8,63
40	400	10	0,00021	763,1
23	400	20	0,001062	38,67
20	400	30	0,004038	7,07
31	450	10	0,000572	168,68
35	450	15	0,001572	21,31
29	450	20	0,003845	8,45
36	475	10	0,000932	58,14
24	500	7,5	0,000408	129,81
21	500	10	0,001734	27,52
28	500	20	0,014417	3,68
30	525	15	0,010723	5,23

A Figura 3 apresenta os dados de Tração a Quente e Fluência plotados na forma do gráfico de Norton, para as 5 temperaturas de ensaio em que os dados puderam ser correlacionados.

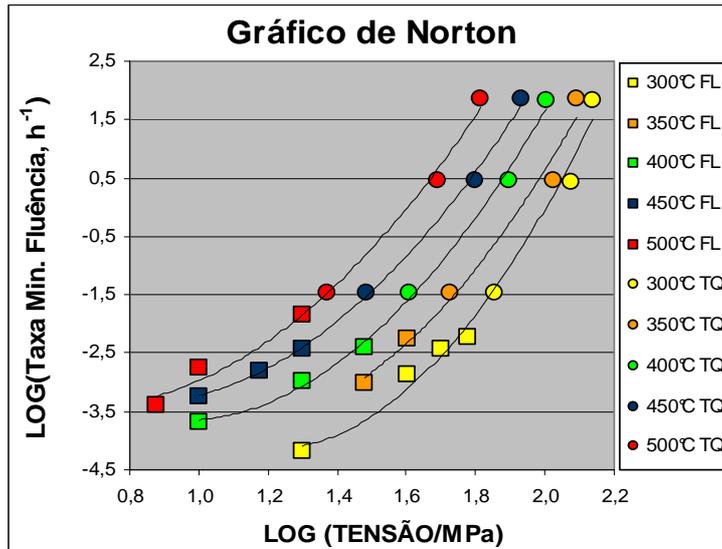


Figura 3. Relação de Norton para os dados de fluência juntamente com os de tração a quente.

Os dados de fluência aparecem plotados na forma do diagrama de Arrhenius na Figura 4. Para seis níveis de iso-tensão foi possível ajustar-se linhas retas que permitiram o cálculo da energia de ativação aparente de fluência do material, em cada caso, como indica a Tabela 3.

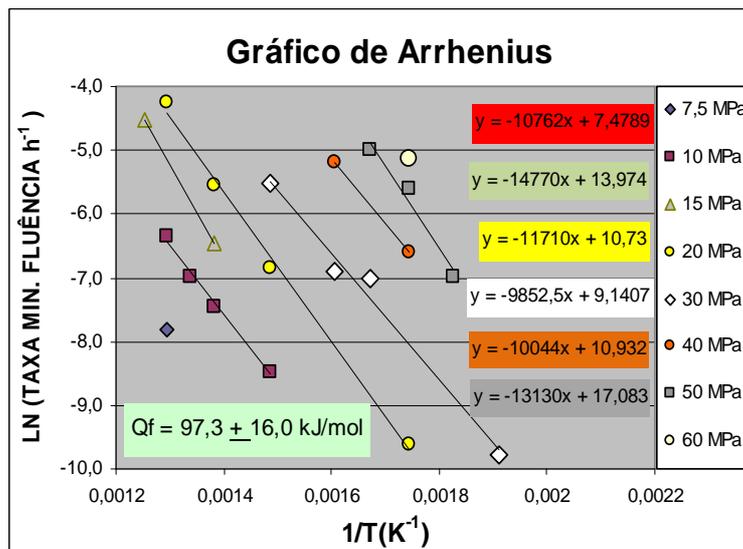


Figura 4. Gráfico de Arrhenius para as diversas linhas de iso-tensão em fluência.

Tabela 3. Valores da Energia de Ativação Aparente de Fluência em cada nível de iso-tensão

Tensão (MPa)	Coefficiente angular	Qf (kJ/mol)
10	10762	89,4
15	14770	122,7
20	11710	97,3
30	9852,5	81,9
40	10044	83,5
50	13130	109,1
	Média	Qf = 97,3
	Desvio padrão	ΔQf = 16,0

Com a obtenção da energia de ativação aparente média para a fluência ($Q_f = 97322 \text{ J/mol}$) foi construído o gráfico de Zener Hollomon, que é apresentado a seguir na Figura 5. Nota-se que o parâmetro Z correlaciona muito bem os dados da Figura 3, na forma de uma única curva paramétrica, tanto no caso de tração a quente como fluência.

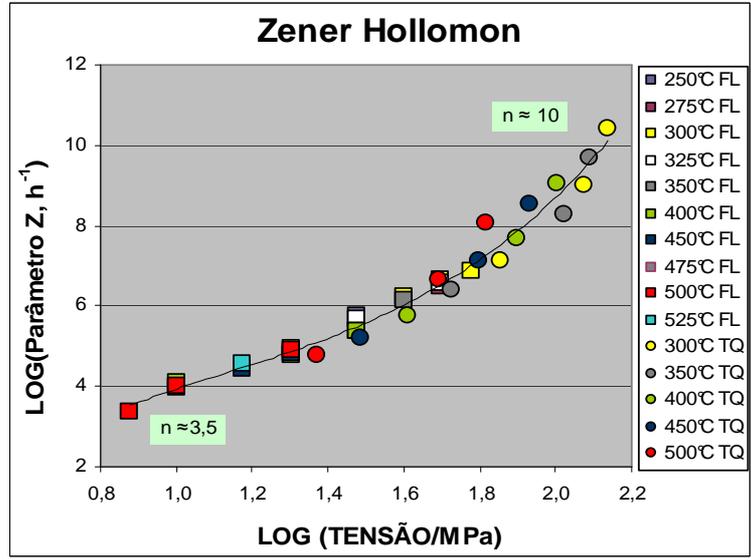


Figura 5. Gráfico de Zener Hollomon contendo dados de fluência juntamente com os de tração a quente. No caso, $Z = \dot{\epsilon}_{\min} \times \exp (97300 / R T)$.

Por último, na Figura 6, são apresentados os dados de tração a quente e fluência na forma do gráfico de Monkman-Grant, indicando que a linha reta que passa na região dos dados de fluência passa também pela região dos dados de tração a quente.

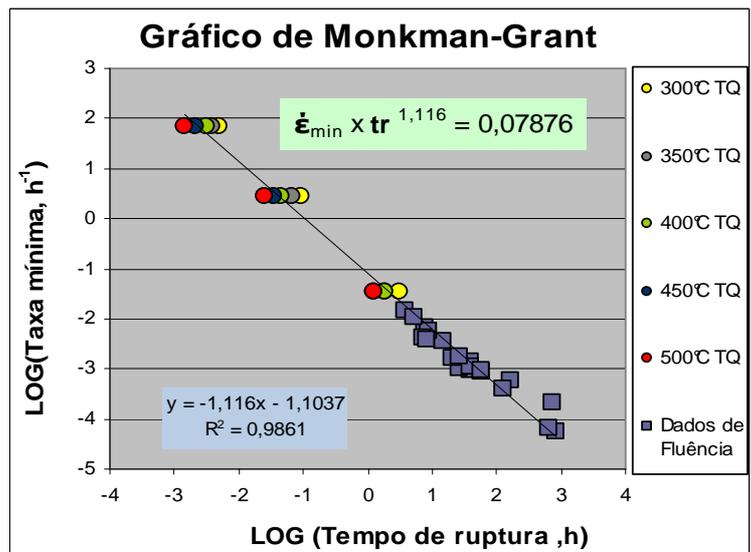


Figura 6. Gráfico de Monkman-Grant para os dados de fluência e de tração a quente.

4 DISCUSSÃO

Para todas as condições de iso-temperatura do gráfico de Norton, figura 3, os dados de tração a quente e de fluência mostraram ótima concordância entre si, quando analisados conjuntamente de acordo com o critério estabelecido. Cada uma dessas curvas indica que o valor de n (expoente de Norton) na verdade não é constante, mas gradativamente crescente, à medida que a tensão aumenta, o que está de acordo com trabalhos reportados na área de fluência para vários materiais⁽⁶⁾.

A energia média de ativação aparente para a fluência encontrada no trabalho (97,3 kJ/mol) pelo gráfico de Arrhenius (Figura 4), está em concordância com valores encontrados em outros trabalhos no cobre policristalino, como por exemplo o valor mencionado de $Q_f = 110$ kJ/mol por Wilshire and Battenbough.⁽⁷⁾

O gráfico de Zener Hollomon (Figura 5), também mostrou uma boa concordância entre os dados de tração a quente e os de fluência com pouca dispersão. Esse gráfico tem um significado especial, pois indica a possibilidade de parametrização dos dados do gráfico de Norton (Figura 3), segundo uma única curva de referência, com um único valor de energia aparente de ativação ($Q_f = 97300$ kJ/mol). Na verdade, o produto $\dot{\epsilon}_{\min} \times \exp(97300 / R T)$ teria uma correlação linear com o tempo de ruptura t_r , se na relação de Monkman-Grant o valor de m fosse exatamente $m = 1$. A inclinação da curva de Zener-Hollomon corresponde ao valor de n (expoente de Norton) do material, que varia de aproximadamente 3,5 a 10, na região onde há predominância dos dados de fluência (baixas tensões) e onde há predominância dos dados de tração a quente (altas tensões), respectivamente.

A relação de Monkman-Grant também correlacionou satisfatoriamente os dados de tração a quente e fluência. Normalmente essa relação, (como a de Norton) é aplicada apenas para dados de fluência. No entanto, nota-se que uma única reta, correspondente à relação $\dot{\epsilon}_{\min} \times t_r^{1,116} = 0,07876$, se ajusta adequadamente aos dois tipos de teste. O valor da constante m da equação de Monkman-Grant é bem próximo da unidade, como reportado em geral para vários materiais metálicos.⁽⁶⁾ Os dados de tração a quente apresentaram uma tendência sistemática de espalhamento em torno da linha reta, em cada nível de taxa de deformação, ficando os dados de maior temperatura à esquerda e os de mais baixa temperatura à direita da linha. Em geral, os gráficos de Monkman-Grant para dados de fluência são conhecidos por apresentarem acentuado grau de espalhamento também.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para a correlação entre tração a quente e fluência no cobre foram bastante satisfatórios e alcançaram o objetivo do trabalho. Assim como verificado anteriormente para alguns aços,^(2,3) o critério de conversão tração / fluência⁽¹⁾ mostrou-se bastante eficiente neste material que não possui ferro na composição.

Nas diversas situações envolvendo variáveis como taxas de deformação, tempo de ruptura, temperatura e tensão aplicada, o critério de conversão de dados tornou possível a análise comum dos dados de tração a quente com os de fluência segundo as principais relações propostas na literatura de fluência, ou seja: Norton, Arrhenius, Zener-Hollomon e Monkman-Grant.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa STM - Sistemas de Teste em Materiais Ltda pelo apoio financeiro oferecido na obtenção do material, sua usinagem, e realização dos testes de tração a quente e fluência. Cayo Roberto Ferreira Dias agradece ao CNPQ pela concessão da bolsa de Mestrado e aos técnicos Gustavo Pelissari e Heber P.Cardoso pelo apoio durante a execução dos ensaios mecânicos.

REFERÊNCIAS

- 1 BUENO, L.O. – *Creep Behaviour of 2.25Cr-1Mo Steel - An equivalence between hot tensile and creep testing data*. ECCC Creep Conference, 12-14 Setembro 2005, Londres – Proc.Creep & Fracture in High Temperature Components – Design and Life Assessment Issues – Editores: I.A.Shibli, S.R.Holdsworth, G.Merckling. DEStech Publ., USA., 2005, p.969-980.
- 2 REIS SOBRINHO, J.F. Tese de doutorado: Correlação entre os Comportamentos de Tração a Quente e Fluência do Aço 2,25Cr-1Mo na Faixa de Temperatura de 500°C a 700°C. PPG/CEM, UFSCar, 2004.
- 3 SANTOS, N.B. Dissertação de Mestrado: Avaliação de um critério de equivalência entre dados de tração a quente e fluência em aços. PPG/CEM, UFSCar, 2007.
- 4 FROST, H.J. ; ASHBY, M.F. – *Deformation Mechanism Maps – The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*, Pergamon Oxford, 1982.
- 5 DIETER, G.E. *Metalurgia Mecânica*. 2^a edição, 1981.
- 6 EVANS, R.W.; WILSHIRE, B. *Creep of Metals and Alloys*. The Institute of Metals, London, 1985.
- 7 WILSHIRE, B.; BATTENBOUGH, A.J. *Creep and creep fracture in polycrystalline copper*. *Materials Science Engineering*, vol. 443, N°1-2, Janeiro / 2007.