

# CORRELAÇÃO TRAÇÃO A QUENTE E FLUÊNCIA PARA O COBRE COMERCIAL PURO. PARTE 2: APLICAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE PARAMETRIZAÇÃO<sup>1</sup>

Levi de Oliveira Bueno<sup>2</sup>  
Cayo Roberto Ferreira Dias<sup>3</sup>

## Resumo

Investigou-se a possibilidade de parametrização de dados de tração a quente juntamente com dados de fluência, no cobre comercial puro, quando se faz a sua conversão segundo um critério de equivalência proposto recentemente para análise de resultados dessas duas modalidades de teste. Os dados foram analisados por 4 diferentes métodos comumente citados na literatura tradicional de parametrização de dados de fluência. Observou-se boa compatibilidade dos resultados de tração a quente com os de fluência quando analisados pelos métodos de: Orr-Sherby-Dorn, Manson-Succop e Manson-Haferd, com possibilidade de se utilizar ambos os tipos de resultados em conjunto em procedimentos de extrapolação. A melhor compatibilidade foi obtida com o procedimento de Manson-Haferd que deixa os dados dois tipos de teste praticamente indistintos, produzindo uma curva paramétrica de alta qualidade. Por outro lado, o método mais conhecido de Larson-Miller não foi eficaz na racionalização conjunta dos dados dos dois grupos de teste, utilizando-se uma única constante C de parametrização. Por esse método, no caso de tração a quente seria necessário usar uma constante  $C \approx 13$  enquanto que no caso de fluência a constante deveria ser  $C \approx 6,5$  para suas corretas parametrizações. **Palavras-chave:** Tração a quente; Fluência; Correlação; Parametrização.

## CORRELATION BETWEEN HOT TENSILE AND CREEP TESTS FOR COPPER COMMERCIALLY PURE

### Abstract

The possibility of parameterization of hot tensile data together with creep data was investigated, for commercially pure copper, according to a recent criterion that proposes an equivalence for both kinds of tests. Four different parameterization methods were considered, which are commonly mentioned in the traditional literature for data extrapolation. The hot tensile data shows good compatibility with creep data when the analysis is performed by the Orr-Sherby-Dorn, Manson-Succop and Manson-Haferd procedures. The Manson-Haferd method rationalizes the results so well that make the distinction between both kind of data almost impossible, producing a remarkably good quality reference curve. On the other hand, the more popular Larson-Miller method was not able to generate a consistent reference curve by the use of a single C constant for both data. It seems that for the hot tensile tests it should be used a constant  $C \approx 13$  whereas for the creep data the constant should be  $C \approx 6,5$ .

**Key words:** Hot tensile; Creep; Correlation; Parameterization.

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

<sup>2</sup> PhD em Engenharia de Materiais. Professor Adjunto do DEMa / UFSCar.

<sup>3</sup> Licenciado em Física. Estudante de mestrado do PPG / CEM, UFSCar.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Apresentação

Este artigo representa uma continuação do trabalho de análise de resultados apresentados na Parte 1,<sup>(1)</sup> investigando agora a possibilidade de correlação entre os dados de tração a quente com os de ruptura por fluência no cobre policristalino comercialmente puro, utilizando o critério de equivalência entre esses dois tipos de teste, proposto por Bueno.<sup>(2)</sup>

No presente trabalho, explora-se a possibilidade de parametrização conjunta dos dados, segundo diferentes procedimentos de análise, dentre as técnicas tradicionais mais importantes mencionadas na literatura.

A maneira de se aplicar o critério na conversão de dados de tração a quente para fluência está apresentada com mais detalhes na Parte 1 deste trabalho.<sup>(1)</sup>

### 1.2 Objetivo

O objetivo é verificar se também é possível estabelecer uma correlação entre os resultados destes dois tipos de ensaio para o cobre, visando extrapolação dos resultados por diferentes metodologias. Esta correlação foi verificada com sucesso em diferentes tipos de aço, como reportada em trabalhos anteriores.<sup>(3,4)</sup>

Dentre as várias possibilidades citadas na literatura, foram escolhidos apenas 4 métodos, que são considerados em geral como os mais importantes, a saber, os métodos de: Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Manson-Succop e Manson-Haferd.

### 1.3 Revisão da Literatura

#### 1.3.1 Métodos de parametrização

Existe uma série de métodos de parametrização que utilizam equações relacionando a temperatura e o tempo de ruptura para análise de dados de fluência. A definição dos parâmetros se baseia na linearidade e padrão de disposição dos pontos de iso-tensão em gráficos de LOG(Tempo de Ruptura) versus Temperatura ou LOG(Tempo de Ruptura) versus o Inverso da Temperatura. Os diferentes métodos surgem pelas hipóteses de paralelismo ou convergência dessas linhas de iso-tensão, nesses gráficos.

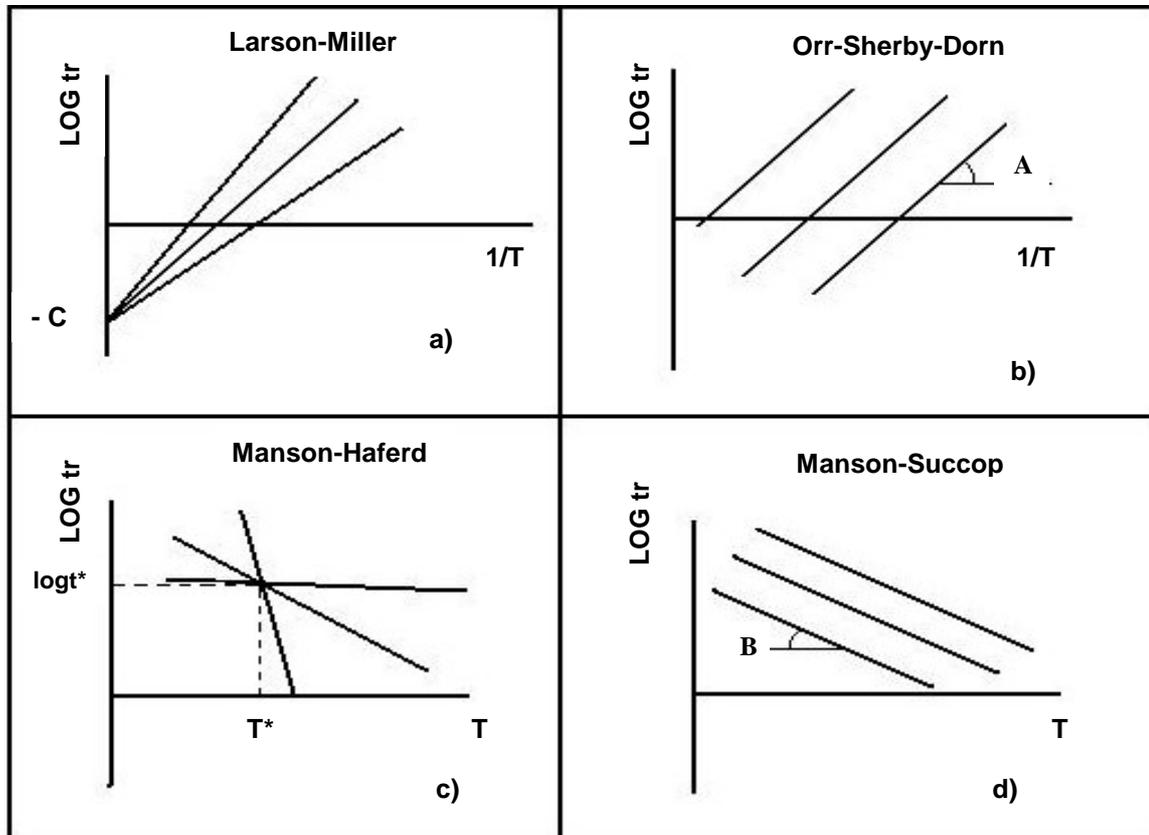
De acordo com Viswanathan<sup>(5)</sup> os métodos de parametrização mais utilizados, e que se foram considerados neste trabalho, estão esquematizados na Figura 1.

Cada método de parametrização possui uma expressão correspondente a seu parâmetro, a saber:

- a) método de Larson-Miller       $P = T( C + \text{LOG } tr )$
- b) método de Orr-Sherby-Dorn       $P = \text{LOG } tr - A/T$
- c) método de Manson-Haferd       $P = ( \text{LOG } tr - \text{LOG}t^* ) / ( T - T^* )$
- d) método de Manson-Succop       $P = \text{LOG } tr - B.T$

onde  $tr$  = tempo ruptura ( em h),  $T$  = temperatura (em K),  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $\text{LOG}t^*$  e  $T^*$  são as constantes de cada método. Os métodos de Larson-Miller e Manson-Haferd

consideram *convergência*, enquanto que os métodos de Orr-Sherby-Dorn e Manson-Succop consideram *paralelismo* das linhas de iso-tensão, respectivamente nos espaços LOG tr x 1/T e LOG tr x T, como mostram os diagramas da Figura 1 abaixo:



**Figura 1.** Métodos de parametrização, a) Larson-Miller, b) Orr-Sherby-Dorn, c) Manson-Haferd, d) Manson-Succop

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho é o mesmo apresentado no artigo da Parte 1<sup>(1)</sup> deste trabalho, ou seja, trata-se do 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 M 8x1,25 e dimensões nominais:  $d_0 = 4\text{mm}$  e  $L_0 = 16\text{mm}$ , na parte útil.

## 2.1 Ensaio 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 de 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 a 30 minutos, sendo que, este período dependia das previsões de duração de cada ensaio.

## 3 RESULTADOS

As Tabelas 1 e 2 mostram os cálculos dos parâmetros de cada método a partir dos dados dos ensaios de tração a quente e fluência, respectivamente, que deram origem aos gráficos discutidos no presente artigo.

**Tabela 1.** Dados de tração a quente

CP (Cobre)	LRT (MPa)	t <sub>LRT</sub> (h)	T (°C)	PLM C=6,584	PLM C=20	PLM C=3	POSD 5267,6	PMH 9,6877	PMS 0,01262
8	137,42	0,004849	300	2447	10134	6123	-11,507	-0,0209	4,91688
9	118,98	0,094444	300	3186	10873	6862	-10,218	-0,0187	6,20644
10	71,32	3,180556	300	4061	11748	7737	-8,691	-0,0160	7,73376
14	122,99	0,00391	350	2603	10960	6599	-10,863	-0,0194	5,45441
15	105,87	0,067778	350	3374	11732	7371	-9,624	-0,0174	6,69335
19	53,37	1,805556	350	4263	12620	8259	-8,199	-0,0151	8,11887
5	100,58	0,003104	400	2744	11772	7061	-10,335	-0,0181	5,98521
6	79,06	0,044444	400	3522	12550	7839	-9,179	-0,0164	7,14108
7	40,58	1,902776	400	4620	13648	8937	-7,548	-0,0140	8,77265
16	85,85	0,002093	450	2824	12523	7462	-9,965	-0,0171	6,44504
17	62,61	0,035556	450	3714	13412	8351	-8,735	-0,0154	7,67517
18	30,45	1,25	450	4831	14530	9469	-7,189	-0,0133	9,22117
11	65,36	0,001432	500	2892	13262	7851	-9,659	-0,0162	6,91119
12	49,12	0,025	500	3852	14222	8811	-8,417	-0,0146	8,1532
13	23,56	1,222221	500	5158	15527	10116	-6,727	-0,0124	9,84241

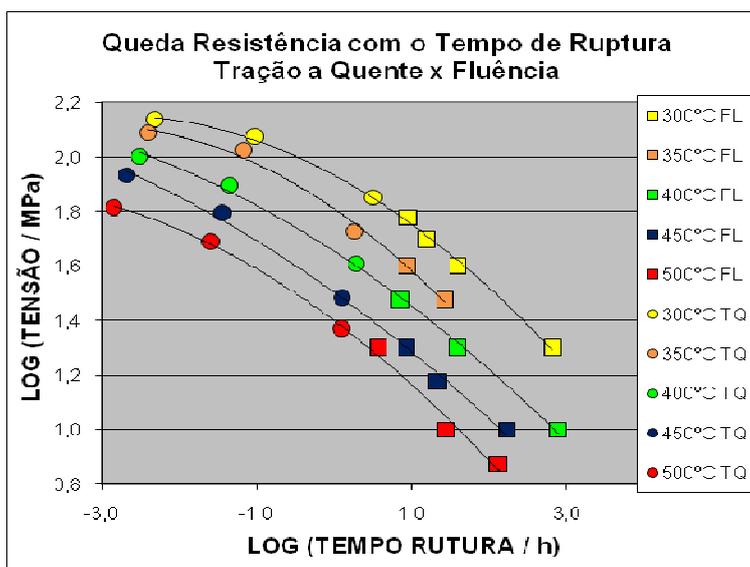


**Tabela 2.** Dados de Fluência

CP (Cobre)	$\sigma$ (MPa)	tr (h)	T (°C)	PLM C=6,584	PLM C=20	PLM C=3	POSD 5267,6	PMH 9,6877	PMS 0,01262
39	30	826,3	250	4970	11986	8325	-7,155	-0,0129	9,517398
32	50	40,53	275	4490	11841	8005	-8,005	-0,0147	8,523537
37	20	648,76	300	5385	13071	9060	-6,381	-0,0120	10,04334
25	40	39,17	300	4686	12373	8362	-7,600	-0,0141	8,824214
22	50	15,24	300	4451	12138	8127	-8,010	-0,0148	8,414245
19	60	8,92	300	4318	12005	7994	-8,243	-0,0152	8,181625
27	30	57,69	325	4991	13013	8827	-7,048	-0,0133	9,307861
26	50	7,62	325	4465	12487	8301	-7,927	-0,0147	8,428715
41	30	26,55	350	4990	13347	8986	-7,031	-0,0133	9,286325
33	40	8,63	350	4686	13043	8682	-7,519	-0,0140	8,798271
40	10	763,1	400	6372	15400	10689	-4,944	-0,0101	11,37584
23	20	38,67	400	5500	14528	9817	-6,240	-0,0120	10,08063
20	30	7,07	400	5004	14032	9321	-6,978	-0,0131	9,342679
31	10	168,68	450	6371	16070	11009	-5,059	-0,0103	11,35132
35	15	21,31	450	5722	15421	10360	-5,957	-0,0116	10,45284
29	20	8,45	450	5431	15130	10069	-6,359	-0,0121	10,05112
36	10	58,14	475	6246	16280	11044	-5,278	-0,0106	11,20424
24	7,5	129,81	500	6724	17094	11683	-4,701	-0,0098	11,86857
21	10	27,52	500	6203	16573	11162	-5,375	-0,0107	11,19491
28	20	3,68	500	5528	15897	10486	-6,249	-0,0118	10,32111
30	15	5,23	525	5829	16533	10947	-5,883	-0,0112	10,78926

Nas Tabelas 1 e 2, PLM, POSD, PMH e PMS correspondem respectivamente aos parâmetros de Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Manson-Haferd e Manson-Succop.

Na tentativa de relacionar os dados de tração a quente com os dados de fluência foi construído o gráfico do LOG (Tensão) versus LOG (Tempo de Ruptura), também conhecido como gráfico da queda de resistência com o tempo, apresentado na Figura 2.



**Figura 2.** Gráfico da queda de resistência com o tempo para os dados de tração a quente e de fluência

As Figuras 3 e 4 mostram o padrão de disposição das seis linhas de iso-tensão nos planos LOG(tr) x 1/T e LOG(tr) x T, respectivamente. Esses gráficos contêm apenas os dados de fluência, já que torna-se impossível obter linhas de iso-tensão com os dados de tração a quente.

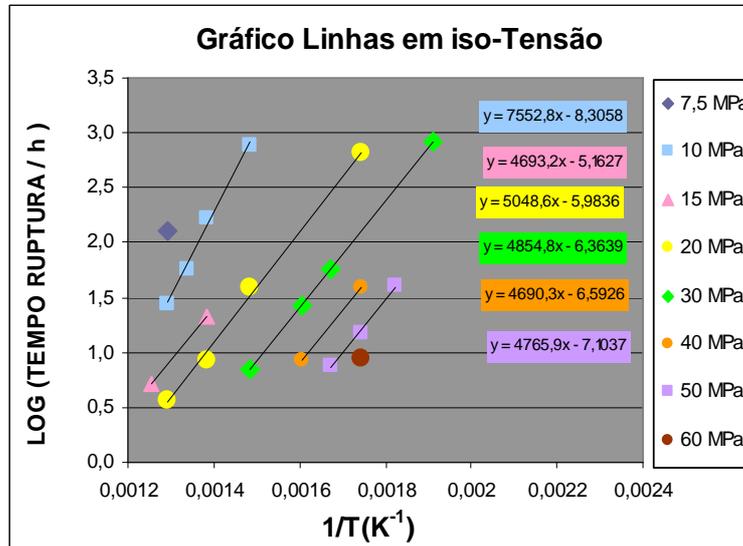


Figura 3. Linhas de iso-tensão no espaço LOG(tr) x 1/T, utilizado para a determinação das constantes dos métodos de Larson-Miller e Orr-Sherby-Dorn.

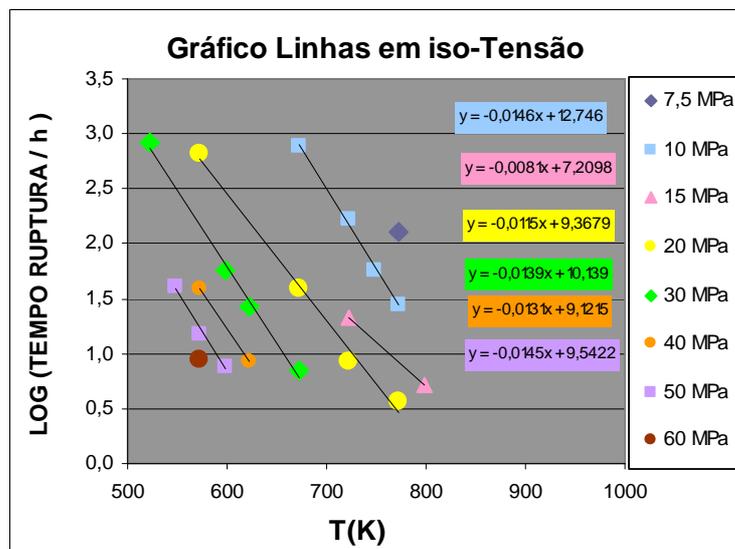


Figura 4. Linhas de iso-tensão no espaço LOG(tr) x T, utilizado para a determinação das constantes dos métodos de Manson Succop e Manson-Haferd.

A maneira correta de se calcular as constantes envolvidas em cada metodologia é por um procedimento de mínimos quadrados, como o recomendado por Manson e Mendelsohn <sup>(6)</sup>. Neste trabalho, no entanto, foram tomados apenas os valores correspondentes à media dos pontos de interseção e de inclinação das retas de iso-tensão, que fornecem valores aproximados dos reais. Como o trabalho ainda está em desenvolvimento, novos dados deverão ainda ser adicionados para análise, nos próximos meses, de modo que na análise final será feito o procedimento por mínimos quadrados. No caso da verificação do método de Manson-Haferd, notou-se que o foco das linhas pode estar bem próximo do eixo Y

[LOG(tr)]. Portanto, nesse caso, tomou-se o valor de  $T^* = 0$ . Nota-se nas Figuras 2 e 3 algumas linhas têm apenas dois ou três pontos, o que é estatisticamente pouco. O ideal é que as linhas tenham pelo menos cinco pontos cada uma.

Com a determinação das várias constantes, foram obtidas as curvas de referência, segundo cada método.

A Figura 5 corresponde à parametrização dos dados apresentados na Figura 1, segundo o método de Larson-Miller. Essa figura corresponde à utilização da constante  $C = 6,5854$ , que expressa o ponto focal do conjunto de linhas de isotensão no eixo Y. Observa-se que os dados de fluência ficam otimamente parametrizados. No entanto, os dados de tração a quente continuam dispersos, alinhados segundo as diferentes temperaturas utilizadas nos testes. O coeficiente de correlação  $R^2 = 0,9668$  também não é satisfatório. Dessa forma, a metodologia Larson-Miller não foi eficaz em correlacionar os dois grupos de dados em uma única curva de referência.

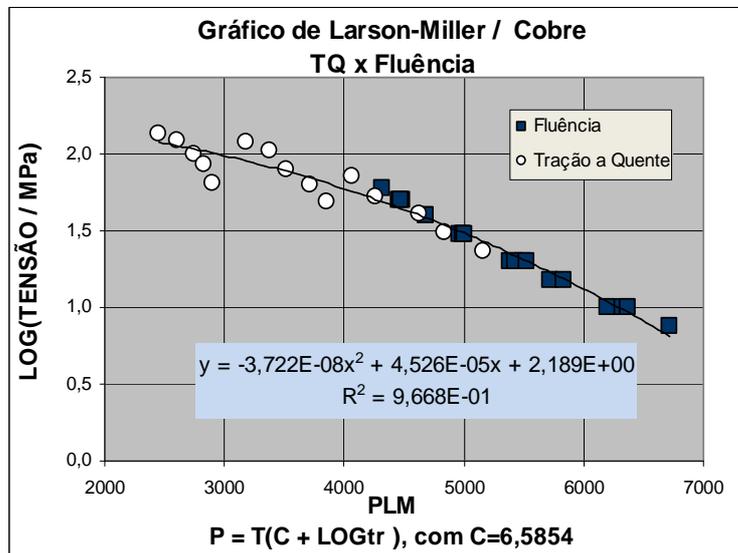


Figura 5. Curva paramétrica de Larson-Miller para  $C = 6,5854$ .

A Figura 6 mostra uma nova tentativa, ainda empregando o método de Larson-Miller, desta vez tomando-se a constante  $C=20$ , que é um valor muito difundido na literatura, para os aços em geral. Na falta de um conjunto expressivo de dados para se aplicar a metodologia corretamente, lança-se mão, em geral, desse valor de  $C$ , para se racionalizar os dados. Nota-se que o resultado ficou pior ainda, com muito espalhamento tanto nos dados de tração a quente como nos de fluência, baixando o valor do coeficiente de correlação para  $R^2 = 0,8140$ , valor considerado totalmente inaceitável.

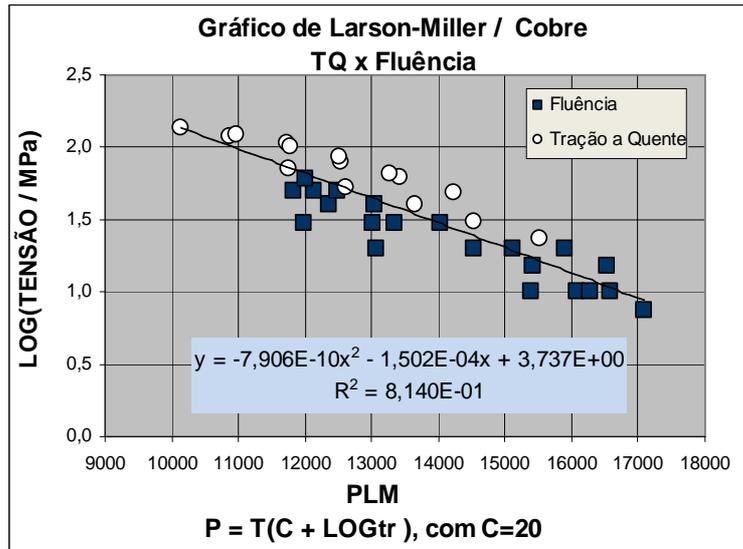


Figura 6 Curva paramétrica de Larson-Miller para C = 20.

Uma última tentativa foi feita empregando-se um valor intermediário C=13, como indica a Figura 7. Nesse caso, conseguiu-se uma razoável racionalização dos dois grupos de dados, principalmente para o caso do conjunto de tração a quente, mas o espalhamento dos dados de fluência agora é acentuado, de tal forma que o coeficiente de correlação de todos os dados fica ainda mais baixo:  $R^2 = 0,9427$ , que pode ser considerado muito insatisfatório.

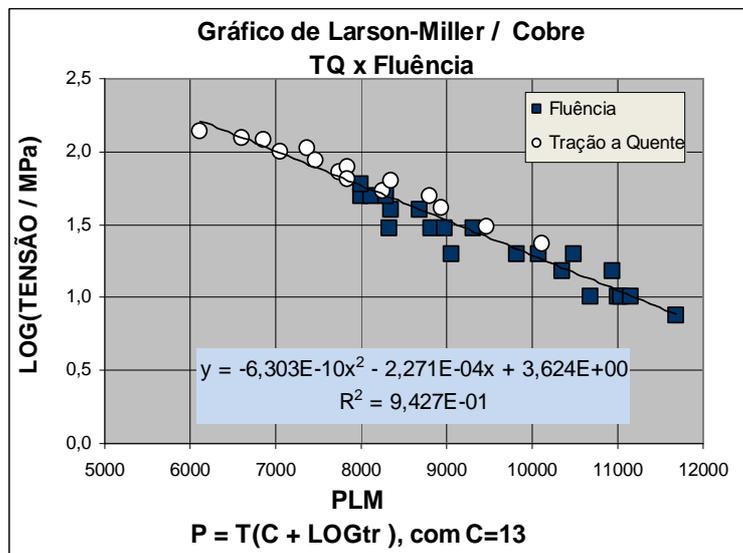


Figura 7 Curva paramétrica de Larson-Miller para C = 13.

As curvas de Larson-Miller mostradas acima, parecem indicar que o material apresenta um valor de C para tração a quente diferente do de fluência. Ou seja, para dados de tração a quente o valor de C seria em torno de 13, mas para dados de fluência, o valor de C cairia para uma cifra em torno de 6 a 7 aproximadamente.

A Figura 8 apresenta a qualidade de parametrização empregando-se o método de Orr-Sherby-Dorn. A constante utilizada foi  $A = 5267,6$ , que corresponde ao paralelismo médio das linhas de iso-tensão na Figura 3. A racionalização dos dois conjuntos de dados neste caso é bem melhor que no caso anterior, exibindo um valor de  $R^2 = 0,9859$ .

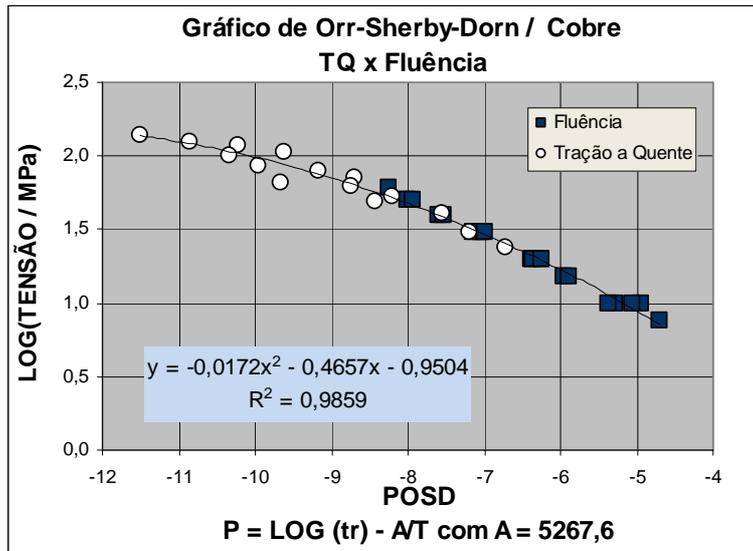


Figura 8. Curva paramétrica de Orr-Sherby-Dorn, com A = 5267,6.

A Figura 9 apresenta o resultado de parametrização com o método de Manson-Succop. A constante desse método foi tomada como B = - 0,01262, que corresponde também ao paralelismo das linhas de iso-tensão na Figura 4. A qualidade de ajuste para ambos os conjuntos de dados ( $R^2 = 0,9885$ ) também é muito boa, semelhante à obtida com o método de Orr-Sherby-Dorn.

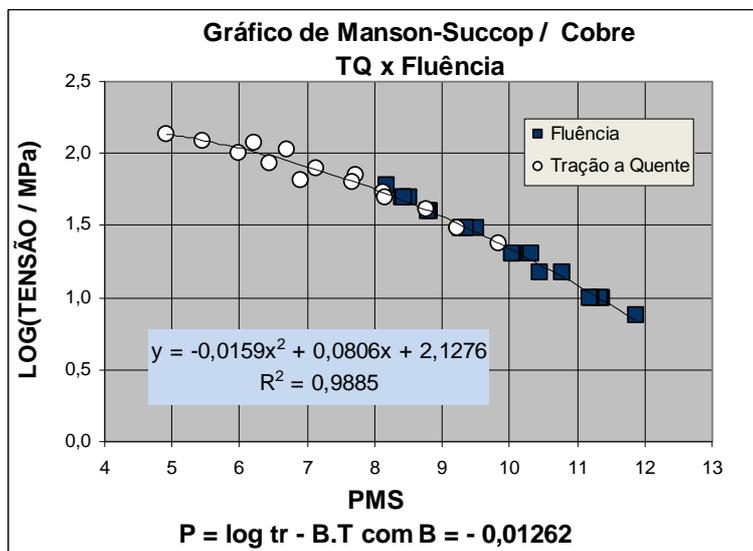


Figura 9. Curva paramétrica de Manson-Succop, com B = - 0,01262.

A última tentativa foi feita com o método de Manson-Haferd cujo resultado está representado na Figura 10. Como mencionado anteriormente, o valor de  $T^*$  foi considerado como zero. O cálculo da intersecção média com o eixo Y apresentou um valor  $LOGtr^* = 9,6877$ . Observa-se que a capacidade de racionalização de ambos os conjuntos de dados por este método foi excelente, exibindo um grau de ajuste notável:  $R^2 = 0,9949$ .

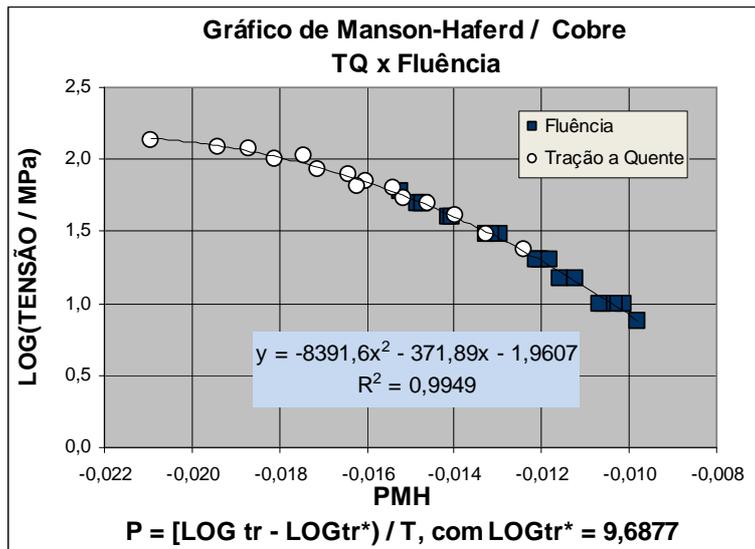


Figura 10. Curva paramétrica de Manson-Haferd, com  $T^* = 0$  e  $\text{LOGtr}^* = 9,6877$ .

#### 4 DISCUSSÃO

O gráfico da queda de resistência com o tempo mostrado na Figura 2 indica ótima concordância entre os dados de tração a quente e os dados de fluência em todos os níveis de temperatura. Este é um resultado bem importante, pois indica que os dados de tração a quente são totalmente compatíveis com os de ruptura por fluência, para o cobre policristalino comercialmente puro.

Na Parte 1 deste trabalho<sup>(1)</sup> comprovou-se que essa compatibilidade ocorre para os dados obtidos basicamente no estágio secundário de fluência, que envolvem os valores de Taxa Mínima de Deformação. Com o presente trabalho, a compatibilidade notada entre os dados de tração a quente e os dados de Tempo de Ruptura em Fluência indica que a correspondência entre os dois tipos de teste se dá também durante o estágio terciário de fluência.

Com exceção do método de Larson-Miller, todos os outros métodos de parametrização, considerados para análise neste trabalho, mostraram boa compatibilidade entre os dois grupos de testes, indicando consistência para seu futuro uso em técnicas de extrapolação de dados. Os métodos de Orr-sherby-Dorn e Manson-Succop se mostraram bastante eficazes, produzindo apenas uma certa dispersão nos dados de tração a quente, acompanhada por ótima racionalização dos dados de fluência. O método de Manson-Haferd apresentou os melhores resultados entre os quatro investigados. Tanto os grupos de dados de tração a quente como o de fluência apresentam-se com um grau mínimo de dispersão, sendo o grau de compatibilidade entre os dois tipos de dados excelente.

O método de Larson-Miller, que é o mais popular de todos e mais largamente empregado na prática, foi o menos eficaz para conciliar os dados dos dois tipos de teste. Os resultados indicam que, para o cobre policristalino comercialmente puro, a parametrização dos resultados de tração a quente exige um valor de C maior que no caso dos dados de fluência. Para tração a quente o valor seria  $C \approx 13$  e para fluência  $C \approx 6,5$ . A razão por que isso ocorre não está clara ainda.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpriu a contento o objetivo traçado inicialmente que foi o de tentar encontrar uma correlação satisfatória entre os dados de tração a quente e os dados de fluência, aplicando-se o critério de equivalência proposto para análise conjunta de ambos os tipos de dados<sup>(1)</sup>, com o cobre policristalino. Trabalhos anteriores já haviam mostraram a eficiência desse critério na conversão de dados para um aço ferrítico e um inoxidável austenítico<sup>(3,4)</sup>. Este trabalho aponta para a possibilidade de se utilizar com sucesso o critério a fim de se estabelecer a correlação entre tração a quente e fluência também para os materiais não-ferrosos.

### 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 DIAS, C.R.F; BUENO, L.O. Correlação Tração a Quente e Fluência para o Cobre Comercial Puro. Parte 1: Relações entre Tensão, Taxa de Deformação, Tempo de Ruptura e Temperatura. 65º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 26-30 Julho 2010.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 VISWANATHAM. R. Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components. ASM International, Metals Park , Ohio, 1993.
- 6 MANSON, S.S.; MENDELSON, A. Optimization of parametric constants for creep-rupture data by means of least-squares. NASA memorandum, n.3-10-59E, pp.1-34, 1959.