

## TRAÇÃO A QUENTE E FLUÊNCIA NO LATÃO COMERCIAL. PARTE 1: RELAÇÕES ENTRE TENSÃO, TAXA DE DEFORMAÇÃO, TEMPO DE RUPTURA E TEMPERATURA<sup>1</sup>

*Levi de Oliveira Bueno<sup>2</sup>*

### Resumo

Dados de tração a quente foram correlacionados com dados de fluência, no latão comercial, como parte de um programa visando a validação de um critério proposto recentemente para análise conjunta destes dois tipos de ensaios em alta temperatura com diversos materiais. 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 250°C a 550°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 3 MPa a 150 MPa. A conversão dos dados de tração a quente para fluência tornou possível a análise conjunta dessas duas modalidades de 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; Latão comercial; Relações de fluência.

### HOT TENSILE AND CREEP TESTING DATA IN COMERCIAL BRASS. PART 1: CORRELATION AMONG STRESS, STRAIN RATE, RUPTURE TIME AND TEMPERATURE

### Abstract

Hot tensile test data were correlated with creep data, in commercial brass, as part of a more extensive program to validate a methodology recently proposed for applying a unique process of analysis for these two kinds of tests at high temperature with different materials. 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 250°C to 550°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 3.0 MPa to 150 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; Commercial brass; Creep relations.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.

<sup>2</sup> PhD em Engenharia Materiais. Professor Associado 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 no latão comercial, buscando validar um critério proposto recentemente para análise destes dois tipos de testes, dentro de um mesmo enfoque, como proposto por Bueno.<sup>(1)</sup>

Basicamente o critério considera que:

- a taxa de deformação no ensaio de tração é equivalente à taxa mínima de fluência;
- o limite de resistência a tração é equivalente à tensão utilizada no ensaio de fluência; e
- 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 é possível estabelecer uma correlação entre os resultados destes dois tipos de ensaios também para materiais não ferrosos, tendo em vista que esta correlação foi aplicada com sucesso no caso de aços e ligas ferrosas em geral.<sup>(1-3)</sup> Um trabalho anterior confirmou a validade do procedimento para o cobre comercial puro<sup>(4)</sup> e ainda para o alumínio comercial puro, trabalho que está sendo apresentado também neste Seminário.<sup>(5)</sup> Com a presente pesquisa, explora-se a validação do critério desse equivalência para o latão comercial.

Pretende-se utilizar essa metodologia 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  $0,5 T_f$  (*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 informações sobre quais mecanismos de deformação por fluência estão operando.<sup>(6)</sup>

#### 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 Equação 2.

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

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 em volume  $Q_v$ , tanto para fluência controlada por difusão como para controlada pelo movimento de discordâncias.<sup>(6)</sup>

Porém, valores de  $Q_f$  até metade do valor de  $Q_v$  podem ser encontrados quando a difusão passa a ocorrer em temperaturas abaixo de  $0,5 T_f$ , e a deformação passa a ser dependente da movimentação das discordâncias controlada pela difusão em contornos de grão.<sup>(6)</sup>

### 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 conforme Equação 3.

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

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<sup>(7)</sup> 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 4.

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

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

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho é o latão comercial, tipo CLA C-360, proveniente da Termomecânica S/A, recebido na forma de barra com diâmetro  $5/16$ ", extrudada, com estrutura de grãos alongados pelo processamento mecânico. O material foi recozido a  $500^\circ\text{C}$  por uma hora, com resfriamento ao ar, sofrendo homogeneização e certo de crescimento de grão, exibindo finalmente estrutura granular aproximadamente equiaxial, com tamanho médio de grão  $D \approx 15 \mu\text{m}$  a  $25 \mu\text{m}$ . A resistência a tração foi testada à temperatura ambiente depois deste tratamento, com o seguinte resultado:  $\sigma_{0,2} = 189 \text{ MPa}$ ,  $LRT = 393 \text{ MPa}$ ,  $A_r = 36\%$ ,  $RA = 56\%$ . Dessa forma, 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:  $d_0 = 4,0 \text{ mm}$  e  $L_0 = 16 \text{ mm}$ , na parte útil.

## 2.1 Ensaios de Tração a Quente

Estes ensaios foram realizados nas temperaturas de 250°C, 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 teste, perfazendo um total de 18 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 Ensaios de Fluência

Os ensaios de Fluência foram realizados na modalidade carga constante, com tensão variando de 3 MPa a 150 MPa e temperaturas variando na sequência: 250°C – 300°C – 350°C – 400°C – 450°C – 500°C – 550°C. Empregou-se um conjunto de cerca de 15 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.

Um conjunto compreendendo 23 ensaios de fluência foi obtido nesta investigação. Na faixa de temperatura considerada (250°C – 550°C), a Temperatura Homóloga variou entre  $T_h = 0,45$  a 0,7.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Curvas de Tração a Quente e Fluência

A Figura 1 apresenta exemplos das curvas de tensão nominal x deformação nominal, provenientes dos ensaios de Tração a Quente e curvas de deformação nominal x tempo, provenientes dos ensaios de Fluência. A Figura 1a mostra as curvas de tração em uma mesma temperatura, no caso, 500°C, com diferentes velocidades de tração de 20 mm/min – 0,8 mm/min – 0,01 mm/min, que equivale a taxas de deformação aproximadamente de  $2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  –  $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  –  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. A Figura 1b mostra as curvas de fluência também em uma mesma temperatura, no caso, 300°C, com tensões aplicadas de 20 MPa – 30 MPa – 60 MPa – 80 MPa – 150 MPa.

De modo geral, todas as curvas de fluência geradas neste trabalho apresentaram o formato convencional, porém com estágios primários bem reduzidos e terciários moderados. Os estágios secundários se mostraram bem evidentes. Em alguns casos o material pareceu iniciar o processo de fluência já no secundário, com presença mínima do estágio primário.

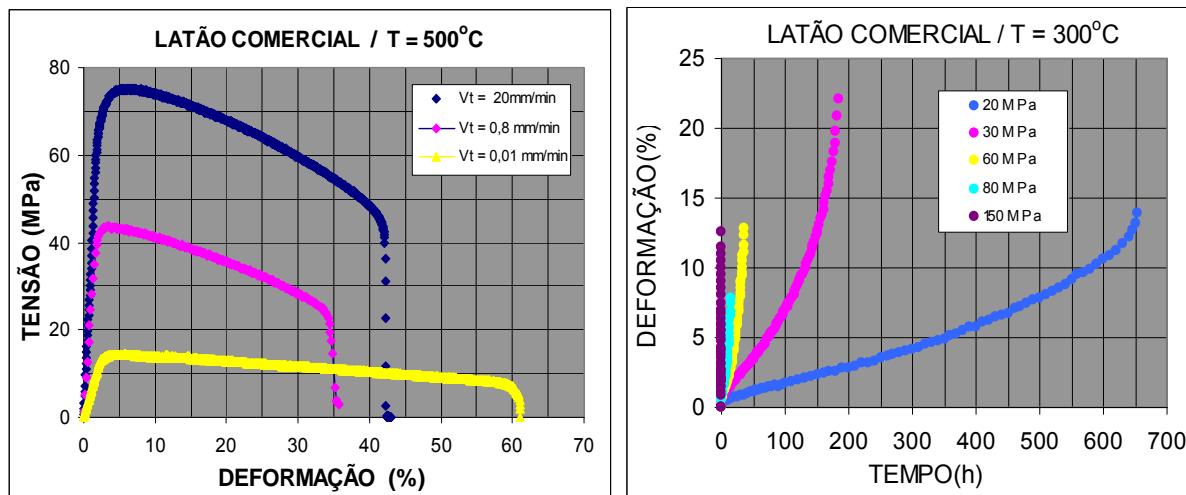


Figura 1. Exemplo de curvas de tração a quente no latão comercial: (a) efeito da velocidade de tração em ensaios a 500°C; e (b) efeito da temperatura em ensaios com  $V_t = 20 \text{ mm/min}$ .

### 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,  $\dot{\epsilon}$ , normalmente expressos em  $\text{s}^{-1}$ , foram passados para  $\%h^{-1}$ , unidade mais apropriada aos resultados de fluência. Da mesma forma, os dados de tempo de ocorrência do LRT,  $t_{LRT}$ , normalmente expressos em s, foram convertidos para h.

Na Tabela 2, para Fluência, nota-se que os ensaios de fluência apresentaram tempos de ruptura,  $t_r$ , variando entre 0,29 h e 654,63 h, e taxas mínimas,  $\dot{\epsilon}_{min}$ , variando entre  $63,091\%h^{-1}$  e  $0,0018\%h^{-1}$ , correspondentes aos ensaios mais curto e mais longo respectivamente. O ensaio a 250°C com 30 MPa ainda se encontra em andamento, com um tempo de 1.722,26 h. Um total de cerca de 4.140 horas de ensaio foram dedicadas para os ensaios de fluência até o momento.

Tabela 1. Dados dos ensaios de tração a quente organizados em séries de iso-temperatura

| CP N° | T (°C) | LRT (MPa) | $\dot{\epsilon}$ ( $\%h^{-1}$ ) | $t_{LRT}$ (h) |
|-------|--------|-----------|---------------------------------|---------------|
| 37    | 250    | 341,68    | 6379,59                         | 0,0062        |
| 38    | 250    | 311,20    | 257,65                          | 0,1325        |
| 39    | 250    | 196,29    | 3,21                            | 3,9028        |
| 7     | 300    | 284,94    | 7058,82                         | 0,0031        |
| 8     | 300    | 266,80    | 282,19                          | 0,0694        |
| 9     | 300    | 112,42    | 3,52                            | 2,6806        |
| 12    | 350    | 230,40    | 7113,22                         | 0,0026        |
| 13    | 350    | 138,33    | 282,35                          | 0,0344        |
| 17    | 350    | 60,15     | 3,53                            | 1,2278        |
| 4     | 400    | 196,97    | 7202,88                         | 0,0015        |
| 5     | 400    | 119,13    | 282,35                          | 0,0167        |
| 6     | 400    | 32,84     | 3,65                            | 1,3361        |
| 14    | 450    | 119,75    | 7281,55                         | 0,0005        |
| 15    | 450    | 54,68     | 287,25                          | 0,0239        |
| 18    | 450    | 20,40     | 3,61                            | 1,3611        |
| 10    | 500    | 75,24     | 7142,86                         | 0,0011        |
| 11    | 500    | 43,58     | 282,35                          | 0,0161        |
| 16    | 500    | 14,42     | 3,53                            | 1,6667        |



**Tabela 2.** Dados dos ensaios de fluência organizados em séries de iso-temperatura

| CP | T(°C) | $\sigma$ (MPa) | $\dot{\epsilon}_{\min}(\%h^{-1})$ | tr (h)           |
|----|-------|----------------|-----------------------------------|------------------|
| 18 | 250   | 30             | 0,0016                            | em andamento com |
| 41 | 250   | 100            | 0,0495                            | 164,24           |
| 9  | 300   | 60             | 0,1824                            | 36,06            |
| 11 | 300   | 30             | 0,0546                            | 183,89           |
| 17 | 300   | 20             | 0,0118                            | 654,63           |
| 10 | 300   | 80             | 0,254                             | 16,56            |
| 42 | 300   | 150            | 10,046                            | 0,60             |
| 8  | 350   | 40             | 0,5958                            | 16,42            |
| 16 | 350   | 10             | 0,0155                            | 629,53           |
| 12 | 350   | 20             | 0,092                             | 137,26           |
| 7  | 350   | 30             | 0,4454                            | 27,88            |
| 6  | 400   | 25             | 1,094                             | 10,92            |
| 13 | 400   | 10             | 0,1695                            | 89,55            |
| 5  | 400   | 20             | 0,6988                            | 17,75            |
| 43 | 400   | 80             | 63,091                            | 0,29             |
| 3  | 450   | 10             | 0,8847                            | 37,15            |
| 14 | 450   | 5              | 0,2537                            | 145,63           |
| 4  | 450   | 15             | 0,9799                            | 16,79            |
| 1  | 500   | 5              | 0,6537                            | 69,51            |
| 15 | 500   | 3              | 0,4698                            | 140,56           |
| 2  | 500   | 10             | 5,1308                            | 4,65             |
| 44 | 500   | 30             | 53,18                             | 0,43             |
| 45 | 550   | 5              | 1,4111                            | 20,86            |

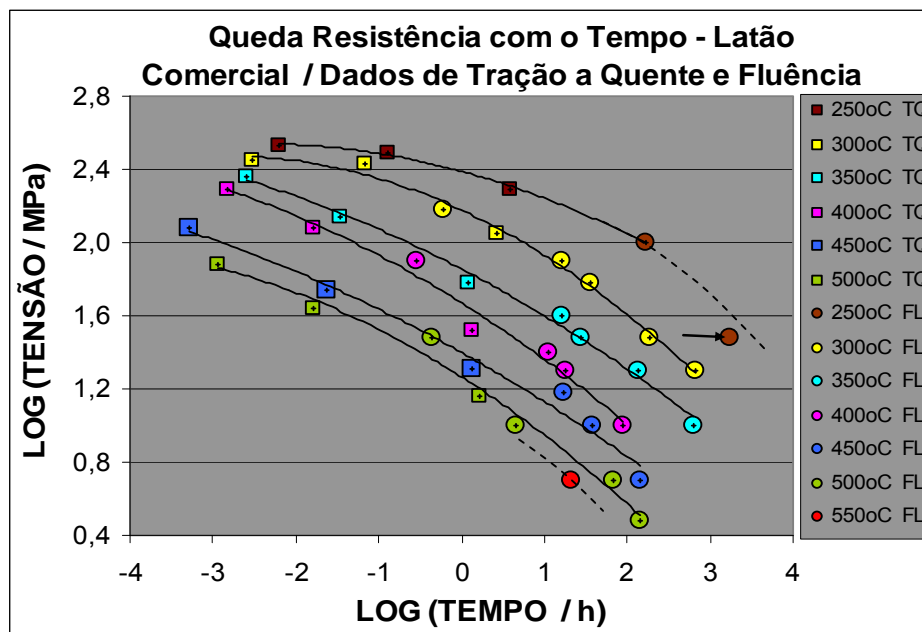
Por conveniência, neste trabalho, os dados de  $t_{LRT}$  e  $t_r$  serão apresentados com a mesma denominação simples  $t$  = tempo, de forma que quando se trata de tração a quente:  $t = t_{LRT}$ , e quando se trata de fluência:  $t = t_r$ . Da mesma maneira, será feita referência apenas à tensão  $\sigma$ , e à taxa de deformação  $\dot{\epsilon}$ , que significarão o LRT e a taxa de deformação dos ensaios de Tração a Quente e a tensão taxa mínima de deformação dos ensaios de Fluência, respectivamente.

A Figura 2 apresenta os dados de Queda de Resistência com o Tempo para os dados de Tração a Quente e os de Fluência, nos 6 níveis de temperatura investigados: 250°C–300°C–350°C–400°C–450°C–500°C–550°C. No caso da temperatura de 550°C, apenas um ensaio (a 5 MPa) foi realizado. A Figura 2 mostra também o ponto referente ao ensaio em andamento. As linhas pontilhadas ilustram prováveis segmentos de curva passando por esses pontos a 250°C e 550°C, tomando-se por base a tendência comum dos dados nas temperaturas vizinhas.

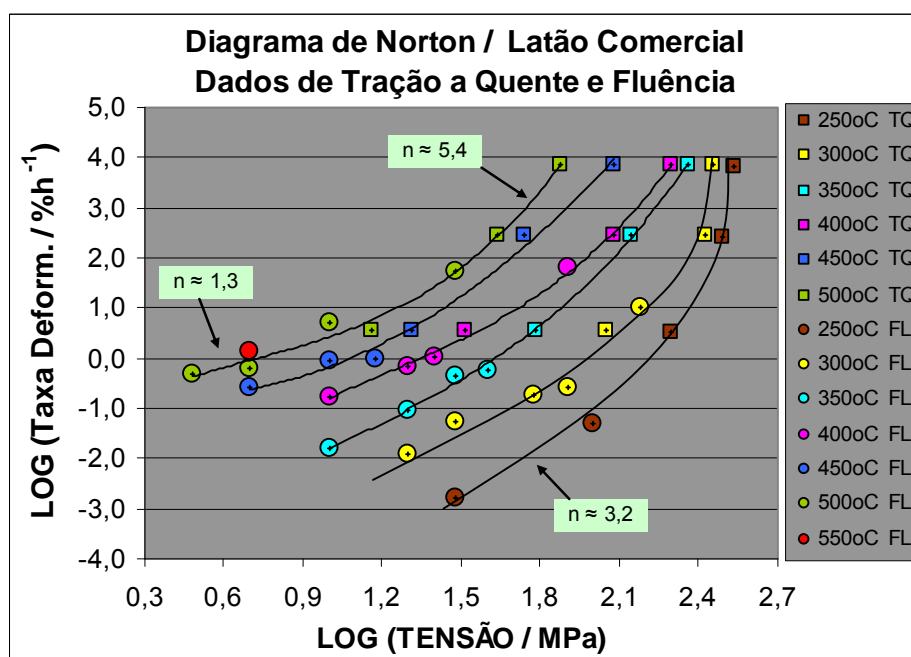
A Figura 3 apresenta os dados de Tração a Quente e Fluência plotados na forma do gráfico de Norton, nos diferentes níveis de temperatura investigados. Observa-se que em todos os níveis de temperatura, tanto na Figura 2 como na Figura 3, a sequência de dados apresenta boa compatibilidade entre os resultados de Tração a Quente e Fluência.

Nota-se que o material apresenta valores de expoente de tensão crescentes, em todos os níveis de temperatura. A 500°C o valor de  $n$  varia de aproximadamente 1,3 a 5,4 à medida que a tensão aumenta. O valor de  $n$  tende a crescer também à medida que a temperatura diminui de 500°C para 250°C. A 250°C, o valor de  $n$  é aproximadamente 3,4 nos níveis baixos de tensão, subindo vertiginosamente nos níveis mais altos de tensão.

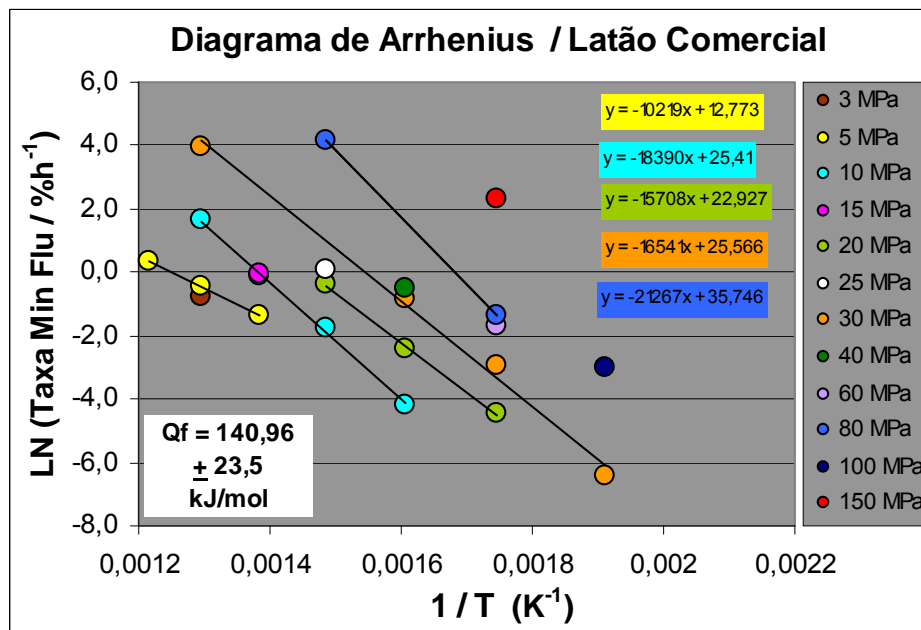
Os dados de fluência aparecem plotados na forma do diagrama de Arrhenius na Figura 4. Aqui fica impraticável se colocar os dados de Tração a Quente junto com os dados de Fluência, pois dados em iso-tensão são possíveis de serem gerados apenas com os ensaios de fluência. Observa-se que duas linhas de iso-tensão (5 MPa e 20 MPa) apresentam 3 pontos experimentais, duas linhas (10 MPa e 30 MPa) apresentam 4 pontos e uma linha (80 MPa) apresenta apenas dois pontos experimentais. Seria necessária a realização de novos ensaios para complementar essas séries e também as outras em que aparecem apenas os pontos isolados.



**Figura 2.** Queda de resistência com o tempo para os dados de fluência juntamente com os de tração a quente. A seta indica que o ponto referente ao ensaio em andamento poderá sofrer um deslocamento ate atingindo o prolongamento da curva relativa aos pontos a 250°C.



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



**Figura 4.** Relações de Arrhenius para os dados de fluência juntamente com os de tração a quente, indicando a energia de ativação aparente média de fluência do material.

Portanto, neste trabalho, apenas 5 linhas de iso-tensão puderam ser consideradas. Para cálculo da Energia de Ativação Aparente Média do material foi utilizado o método de Mínimos Quadrados, como sugerido por Manson-Mendelsohn.<sup>(8)</sup> Este procedimento considera todas as linhas de iso-tensão (mesmo as que tem apenas 2 pontos), fazendo uma ponderação entre as linhas com maior e menor quantidade de dados.

Com o valor da Energia de Ativação Aparente média para Fluência obtido:  $Q_f = 140.960 \pm 23.500$  J/mol, foi construído o gráfico de Zener-Hollomon, que é apresentado na Figura 5. Nota-se que o parâmetro correlaciona muito bem os dados da Figura 3, envolvendo as taxas de deformação, na forma de uma única curva paramétrica, produzindo um colapsamento razoavelmente satisfatório dos resultados tanto no caso dos ensaios de Tração a Quente como nos de Fluência. Essa curva paramétrica apresenta inclinação  $n \approx 1,5$  na região de baixas tensões, seguido de  $n \approx 2,4$  em uma região de intermediária de tensão em que  $\text{Log}(\sigma)$  varia entre 1,3 e 2,0 aproximadamente (20 MPa a 100 MPa), crescendo até um valor de  $n \approx 17$  nos níveis mais altos de tensão estudados.

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. A relação de Monkman-Grant aparece destacada na Figura 6.



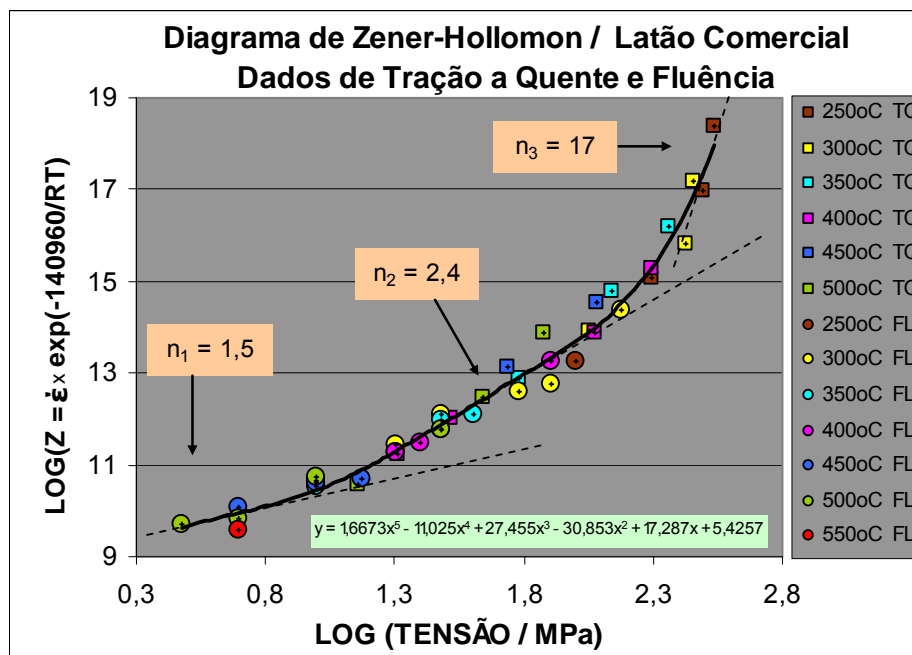


Figura 5. Racionalização entre os dados de taxa de deformação, tensão e temperatura para tração a quente e fluência, através do parâmetro de Zener-Hollomon.

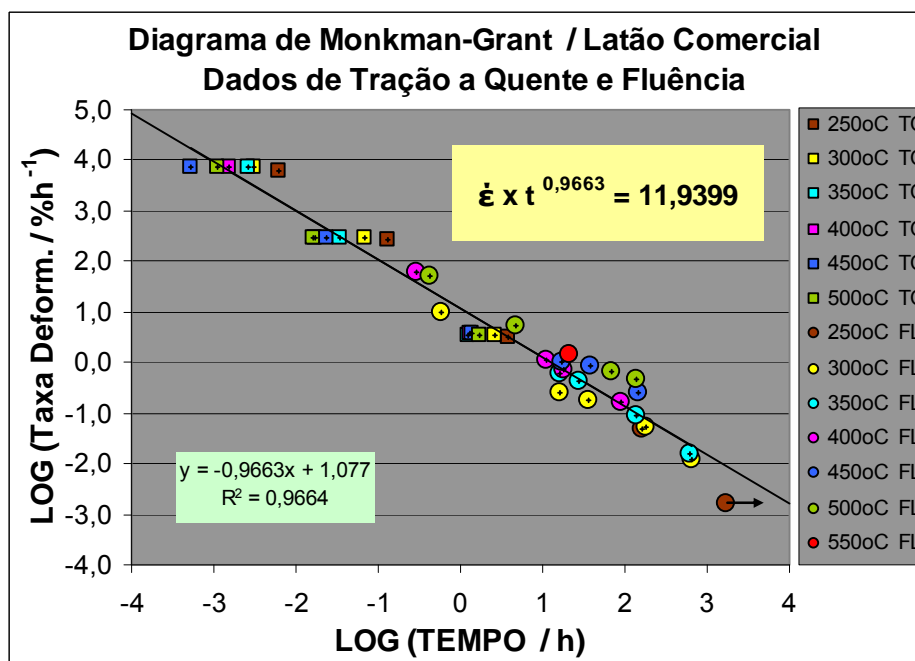
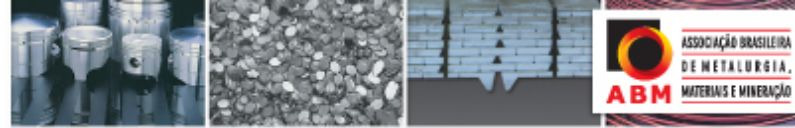


Figura 6. Variação da taxa de deformação em função do tempo, procurando-se verificar a validade de relação de Monkman-Grant.

#### 4 DISCUSSÃO

Para todas as condições de iso-temperatura no gráfico de Queda de Resistência com o Tempo (Figura 2), os dados de Tração a Quente e os de Fluência mostraram ótima concordância entre si, quando analisados conjuntamente de acordo com o critério proposto por Bueno.<sup>(1)</sup> Da mesma forma, os dados plotados na forma do diagrama de Norton (Figura 3), apresentam excelente compatibilidade entre os resultados de Tração a Quente e Fluência. Cada uma das curvas indicam que o



valor de  $n$  (expoente de Norton) na verdade não é constante, mas gradativamente crescente, à medida que a temperatura diminui, e gradativamente crescente a medida que a tensão aumenta, o que está de acordo com trabalhos reportados na área de fluência para vários materiais.<sup>(9)</sup> Os valores do expoente de tensão  $n$  nos níveis mais altos de temperatura, na região de baixa tensão apresentam valores próximos de 1, indicando possibilidade de atuação de mecanismos de fluência difusão (sem participação de movimento de discordâncias). Já para a região de baixas temperaturas e baixas tensões, o valor de  $n$  se torna próximo de 3, que é indicativo da predominância de mecanismos de fluência por movimentação viscosa de discordâncias. Nos níveis mais altos de temperatura, com altas tensões nota-se valores de  $n$  da ordem de 5, que poderiam estar associados a fluência por movimento de discordâncias controlados por algum mecanismo de recuperação como escalagem, por exemplo, enquanto que nos níveis mais baixos de temperatura e altas tensões os valores de  $n$  crescem rapidamente, indicando saída da região potencial para a região exponencial de fluência.<sup>(6,9)</sup>

Na Figura 4, o gráfico de Arrhenius parece sugerir que na região de alta temperatura (450°C – 550°C), ocorre uma mudança no valor da Energia de Ativação para Fluência do material em estudo, como indica a inclinação da reta de iso-tensão em 5 MPa. Para as outras linhas de iso-tensão (10 MPa – 20 MPa – 30 MPa – 80 MPa), o valor de  $Q_f$  varia na faixa de 130 kJ/mol a 170 kJ/mol, mas cai para cerca de 85 kJ/mol em 5 MPa, indicando uma possível mudança no processo de fluência. Valores menores de  $Q_f$ , combinados com valores de  $n$  próximos de 1 reforçam a hipótese de atuação de mecanismo de fluência difusão nessa região. O tamanho de grão relativamente baixo do material (15  $\mu\text{m}$  – 25  $\mu\text{m}$ ) certamente pode estar contribuindo para que isso ocorra.

O gráfico de Zener Hollomon (Figura 5), também mostrou boa concordância entre os dados de Tração a Quente e os de Fluência, embora com um grau de dispersão, um tanto acentuado na região de  $\text{Log}(\sigma)$  entre 1,8 e 2,2 aproximadamente. O gráfico revela um aspecto bem importante do comportamento de fluência do material, indicando que existe uma região intermediária de tensão, entre 20 MPa e 100 MPa aproximadamente, em que o processo de fluência ocorre (em todas as temperaturas investigadas) com expoente  $n \approx 2,4$ . Abaixo de 20 MPa passam a predominar certamente os mecanismos de fluência difusão (com  $n \rightarrow 1$ ), enquanto que acima de 100 MPa o material deve passar pela região de perda de validade da relação potencial (*power law breakdown*) com entrada na região de fluência exponencial. O valor de  $n$  próximo a 2 na região intermediária de tensão pode ser indicativo da participação de mecanismos de fluência com escorregamento de contornos de grão. Por outro lado, o valor de  $n \approx 2,4$  também fica próximo de 3, sugerindo processo de fluência com deslizamento viscoso de discordâncias. Para esclarecer todos esses pontos seria necessária a realização de mais ensaios, projetados especialmente para essa finalidade, não sendo este, por enquanto, o objetivo do presente trabalho. Com relação à compatibilidade entre os resultados de Tração a Quente com os de Fluência, notamos que os dados da Figura 5 são bastante expressivos quanto a isso, pois os pontos de Tração a Quente realizam a mesma trajetória dos pontos de Fluência, com boa coincidência na região tensão comum a ambos, que corresponde à faixa de tensão entre 10 MPa e 150 MPa aproximadamente. Para completar essa verificação, seria necessária a realização de ensaios de Tração a Quente em velocidades ainda mais baixas que 0,01 mm/min, e ensaios de Fluência em tensões mais altas que as aplicadas em cada nível de temperatura, de forma a termos

pontos de Tração a Quente na região em que  $n \approx 1,5$  e pontos de Fluência na região em que  $n \approx 17$ .

A Figura 6 indica que a relação de Monkman-Grant também correlacionou de maneira razoavelmente satisfatória os dados de Tração a Quente com os de 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  $\dot{\epsilon}_{\min} \times t_r^{0,9663} = 11,9399$ , 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.<sup>(9)</sup> 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 pontos relativos às maiores temperaturas em geral 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.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para a correlação entre Tração a Quente e Fluência no latão comercial se mostraram razoavelmente satisfatórios, alcançando os objetivos do trabalho. Assim como verificado anteriormente para alguns aços,<sup>(2,3)</sup> e também para o cobre comercial,<sup>(4)</sup> e o alumínio comercial,<sup>(5)</sup> o critério de conversão Tração/Fluência<sup>(1)</sup> mostrou-se eficiente para este material não ferroso.

Nas diversas situações envolvendo variáveis como taxas de deformação, tempo de ruptura, temperatura e tensão aplicada, a metodologia proposta 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, com determinação dos parâmetros envolvidos em cada caso.

## Agradecimentos

O autor agradece à empresa STM-Sistemas de Teste em Materiais Ltda / São Carlos (SP) pelo apoio financeiro recebido na obtenção do material, sua usinagem, e realização dos testes de tração a quente e fluência e ao DEMa / UFSCar pelas facilidades utilizadas durante o processamento e análise dos resultados.

## REFERÊNCIAS

- 1 BUENO, L.O. – Creep Behaviour of 2.25Cr-1Mo Steel - An equivalence between hot tensile and creep testing data. ECCO 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 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.



- 5 BUENO, L.O. Dados de Tração a Quente e Fluência no Alumínio Comercial Puro. Parte 1: Relações entre Tensão, Taxa de Deformação, Tempo de Ruptura e Temperatura. 12º Seminário de Metais Não Ferrosos/ABM, 31/10-01/11/11, São Paulo.
- 6 FROST, H.J.; ASHBY, M.F. – Deformation Mechanism Maps – The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics, Pergamon Oxford, 1982.
- 7 DIETER, G.E. Metalurgia Mecânica. 2ª edição, 1981.
- 8 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.
- 9 EVANS, R.W.; WILSHIRE, B. Creep of Metals and Alloys. The Institute of Metals, London, 1985.