

# DADOS DE TRAÇÃO A QUENTE E FLUÊNCIA NO ALUMÍNIO COMERCIAL PURO. 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 alumínio comercial puro, procurando-se obter validação de um critério proposto recentemente para análise conjunta 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 150°C a 350°C, utilizando-se taxas de deformação em tração na faixa de  $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  a  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  e tensões de fluência variando de 12,5 MPa a 65 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; Alumínio comercial; Relações de fluência.

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

### Abstract

Hot tensile test data were correlated with creep data, in commercially pure aluminum, in an attempt to validate a criterion recently proposed for a single process of 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 150°C to 350°C, using tensile deformation rates varying from  $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  to  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  and creep stresses varying from 12.5 MPa to 65 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 aluminum; 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 para o alumínio comercial puro, 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> Neste trabalho, explora-se a validação do critério de equivalência entre os dois testes para o alumínio 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 seguinte equação:

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

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>(5)</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 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 em volume  $Q_v$ , tanto para fluência controlada por difusão como para controlada pelo movimento de discordâncias.<sup>(4)</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>(5)</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 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<sup>(6)</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 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 fluência;  $R$  é a constante universal dos gases; e  $T$  é a temperatura.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho é o alumínio policristalino, comercialmente puro, proveniente da CBA, recebido na forma de barra com 1/2", extrudada, com estrutura de grãos alongados pelo processamento. O material foi recozido a 400°C por uma hora, com resfriamento rápido ao ar, sofrendo recristalização e crescimento de grão, exibindo finalmente estrutura granular aproximadamente equiaxial, com tamanho médio de grão  $D \approx 100 \mu\text{m}$ . A resistência a tração foi testada à temperatura ambiente depois deste tratamento, com o seguinte resultado:  $\sigma_{0,2} = 76,2 \text{ MPa}$ ,  $LRT = 135,2 \text{ MPa}$ ,  $Ar = 27\%$ ,  $RA = 75\%$ . 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 M12x1,75 e dimensões nominais:  $d_0 = 6,25 \text{ mm}$  e  $L_0 = 25\text{mm}$ , na parte útil.

## 2.1 Ensaios de Tração a Quente

Estes ensaios foram realizados nas temperaturas de 150°C, 200°C, 250°C, 300°C e 350°C utilizando as velocidades de tração: 0,01 mm/min – 0,5 mm/min – 20 mm/min que se mantiveram constantes do início ao fim do teste, 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 Ensaios de Fluência

Os ensaios de Fluência foram realizados na modalidade carga constante, com tensão variando de 12,5 MPa a 65 MPa e temperaturas variando na seqüência: 150°C – 175°C – 200°C – 225°C – 250°C – 275°C – 300°C – 325°C – 350°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 a 30 minutos, sendo que, este período dependia das previsões de duração de cada ensaio.

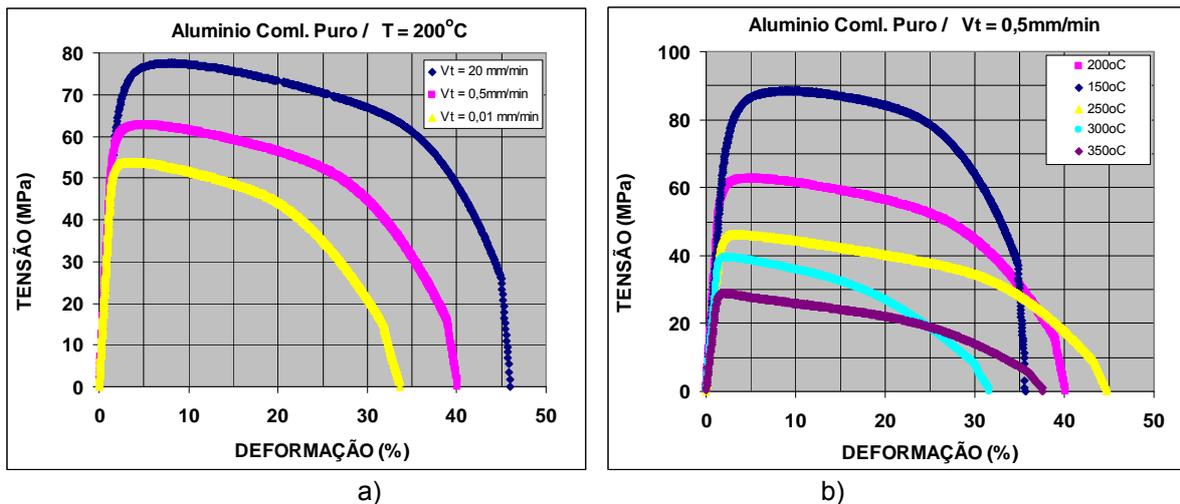
Um total de 18 ensaios de fluência foram realizados nesta investigação. Na faixa de temperatura considerada (150°C – 350°C), a Temperatura Homóloga variou entre  $T_h = 0,45$  a  $0,67$ .

## 3 RESULTADOS

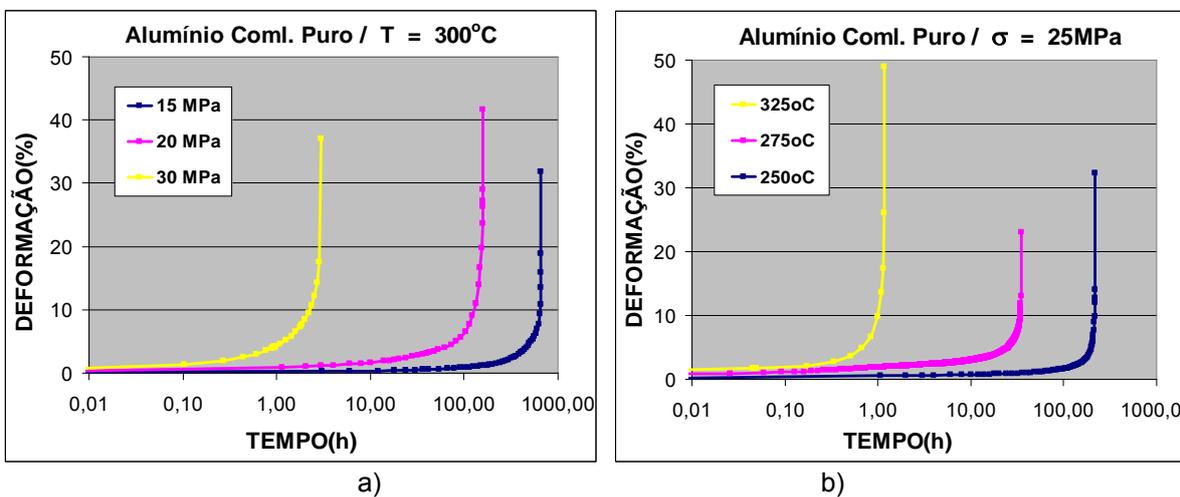
### 3.1 Curvas de Tração a Quente e Fluência

A Figura 1 apresenta exemplos das curvas de tensão nominal x deformação nominal, provenientes dos ensaios de Tração a Quente. A Figura 1a mostra as curvas em uma mesma temperatura, no caso, 200°C, com velocidades de tração de 20 mm/min – 0,5 mm/min – 0,01 mm/min, que equivale a taxas de deformação de aproximadamente de  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  –  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  –  $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. A Figura 1b mostra as curvas em uma mesma velocidade de tração,  $V_t = 0,5 \text{ mm/min}$ , com diferentes temperaturas: 150°C – 200°C – 250°C – 300°C – 350°C.

A Figura 2 apresenta exemplos de curvas provenientes dos ensaios de Fluência, na forma deformação nominal x Log (tempo). A Figura 2a mostra as curvas em uma mesma temperatura, no caso, 300°C, com tensões aplicadas de 15 MPa – 20 MPa – 30 MPa. A Figura 2b mostra as curvas em uma mesma tensão aplicada,  $\sigma = 25 \text{ MPa}$ , nas temperaturas de 250°C – 275°C – 300°C.



**Figura 1.** Exemplo de curvas de tração a quente para o alumínio comercial puro: (a) efeito da velocidade de tração em ensaios a 200°C; e (b) efeito da temperatura em ensaios com  $V_t = 0,5$  mm/min.



**Figura 2.** Exemplo de curvas de fluência para o alumínio comercial puro: (a) efeito da tensão aplicada em ensaios a 300°C; e (b) efeito da temperatura em ensaios com  $\sigma = 25$  MPa.

De modo geral, todas as curvas de fluência geradas neste trabalho apresentaram o formato convencional com os estágios primário, secundário e terciário. Notou-se também que a presença do estágio terciário foi bastante significativa na deformação acumulada por fluência, em todas as curvas, nesta versão de alumínio comercial.

### 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  $s^{-1}$ , 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 0,031 h e 654,98 h, e taxas mínimas,  $\dot{\epsilon}_{min}$ , variando entre  $310,14\%h^{-1}$  e  $0,0042\%h^{-1}$ , correspondentes a ensaios mais curtos e

mais longos respectivamente. Um total de cerca de 2.000 horas de ensaio foram dedicadas para os ensaios de fluência.

**Tabela 1.** Dados dos ensaios de Tração a Quente organizados em séries de iso-temperatura

CP N°	T (°C)	LRT (MPa)	$\dot{\epsilon}$ (%h <sup>-1</sup> )	t <sub>LRT</sub> (h)
T14	150	106,51	4088,59	0,00286
T15	150	88,66	102,04	0,098611
T16	150	75,76	2,04	4,866667
T02	200	77,59	4109,59	0,002332
T04	200	62,795	103,31	0,096389
T12	200	53,91	2,09	2,069444
T05	250	60,58	4150,81	0,001888
T03	250	46,3	103,81	0,042778
T13	250	41,1	2,09	1,397222
T06	300	50,5	4113,82	0,001263
T07	300	39,65	103,66	0,038333
T11	300	28,4	2,07	1,608333
T08	350	39,11	4092,77	0,000638
T09	350	29,11	102,70	0,026944
T10	350	17,76	2,08	2,241667

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

CP	T(°C)	$\sigma$ (MPa)	$\dot{\epsilon}_{\min}$ (%h <sup>-1</sup> )	t <sub>r</sub> (h)
F01	150	65	0,0042	388,40
F15	175	65	6,6372	0,93
F07	200	65	310,14	0,05
F02	200	50	1,0275	7,07
F03	200	40	0,0262	197,35
F16	225	40	0,3514	12,57
F08	250	40	1,7838	4,56
F04	250	30	0,0258	114,31
F10	250	25	0,0109	216,34
F18	275	25	0,1015	34,66
F09	300	30	3,1912	2,86
F05	300	20	0,0549	159,74
F11	300	15	0,0058	654,98
F17	325	35	156,33	0,031
F12	325	25	4,1672	1,17
F14	325	20	0,5641	5,74
F06	350	12,5	0,0616	40,46
F13	350	15	0,6037	9,79

Por conveniência, neste trabalho, os dados de t<sub>LRT</sub> e t<sub>r</sub> serão apresentados com a mesma denominação simples t = tempo, de forma que quando se trata de tração a quente: t = t<sub>LRT</sub>, e quando se trata de fluência: t = t<sub>r</sub>. 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 3 apresenta os dados de Queda de Resistência com o Tempo para os dados de Tração a Quente e os de Fluência, nos cinco níveis principais de temperatura investigados: 150°C – 200°C – 250°C – 300°C – 350°C. No caso das temperaturas de 175°C – 225°C – 275°C que apresentam apenas um ponto experimental de fluência, as linhas pontilhadas indicam suas prováveis curvas tomando-se por base a tendência comum dos dados nas temperaturas vizinhas.

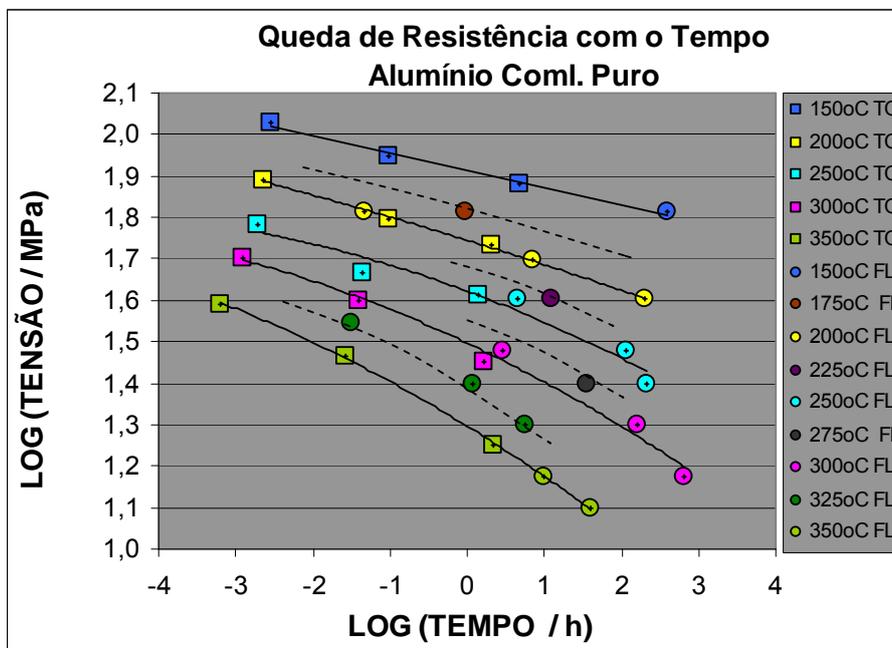


Figura 3. Queda de resistência com o tempo para os dados de fluência juntamente com os de tração a quente.

A Figura 4 apresenta os dados de Tração a Quente e Fluência plotados na forma do gráfico de Norton, nos diferentes níveis de temperatura investigados.

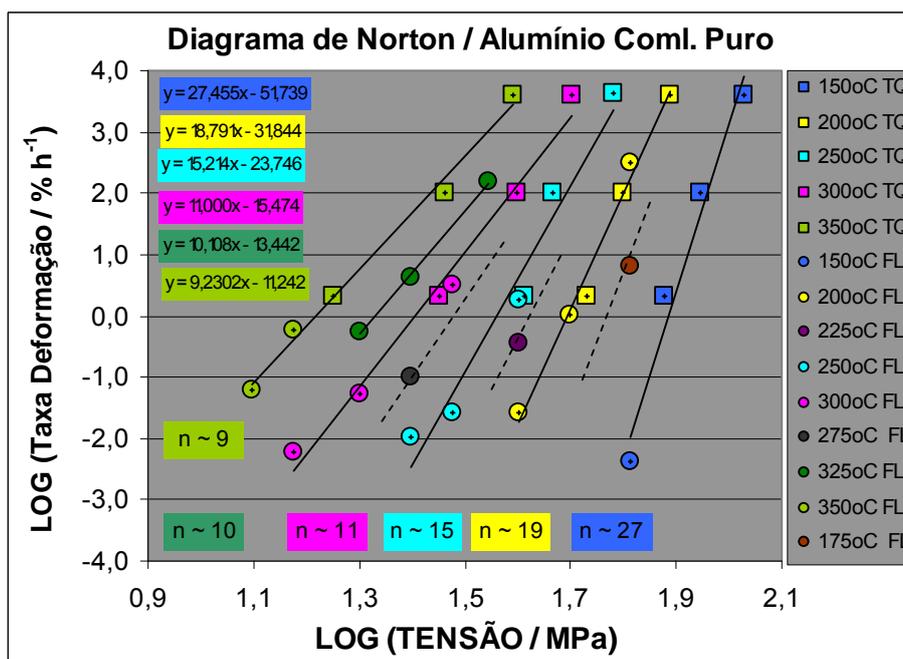
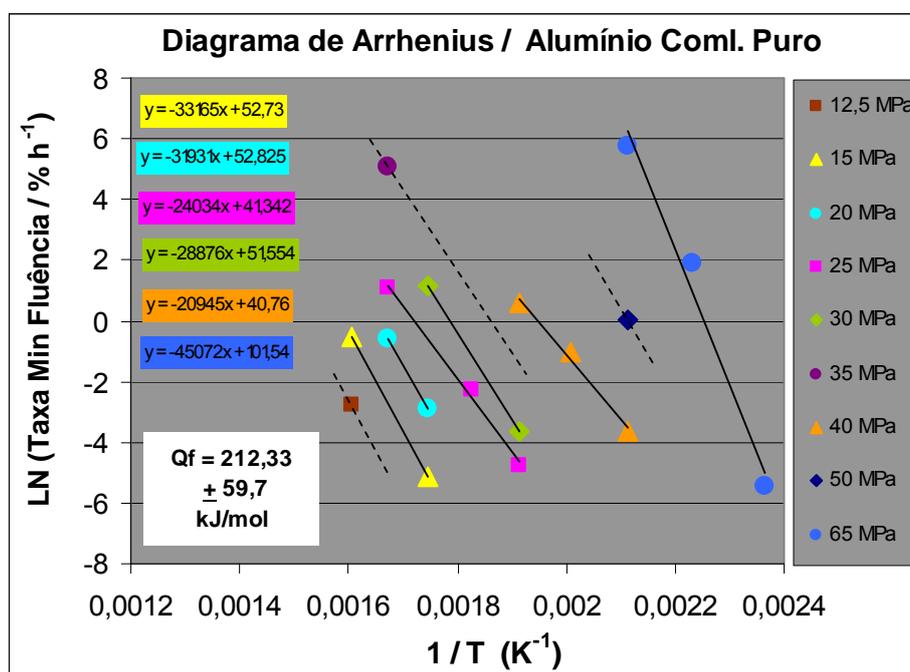


Figura 4. Relações de Norton para os dados de fluência juntamente com os de tração a quente.

Nota-se que o material apresenta valores de expoentes de tensão crescentes, variando de aproximadamente 9 a 27, à medida que a temperatura diminui, no intervalo de 350°C a 150°C.

Os dados de fluência aparecem plotados também na forma do diagrama de Arrhenius na Figura 5. Observa-se que três linhas de iso-tensão (25 MPa – 40 MPa – 65 MPa) apresentam 3 pontos experimentais e três linhas (15 MPa – 20 MPa – 30 MPa) apresentam apenas 2 pontos experimentais cada uma. Pelos pontos isolados (12,5 MPa – 35 MPa – 50 MPa) foram traçadas linhas pontilhadas com inclinações hipotéticas, próximas às dos dados vizinhos. Para cálculo da Energia de Ativação Aparente Média do material foi utilizado o método de Mínimos Quadrados, como sugerido por Manson-Mendelsohn.<sup>(7)</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.



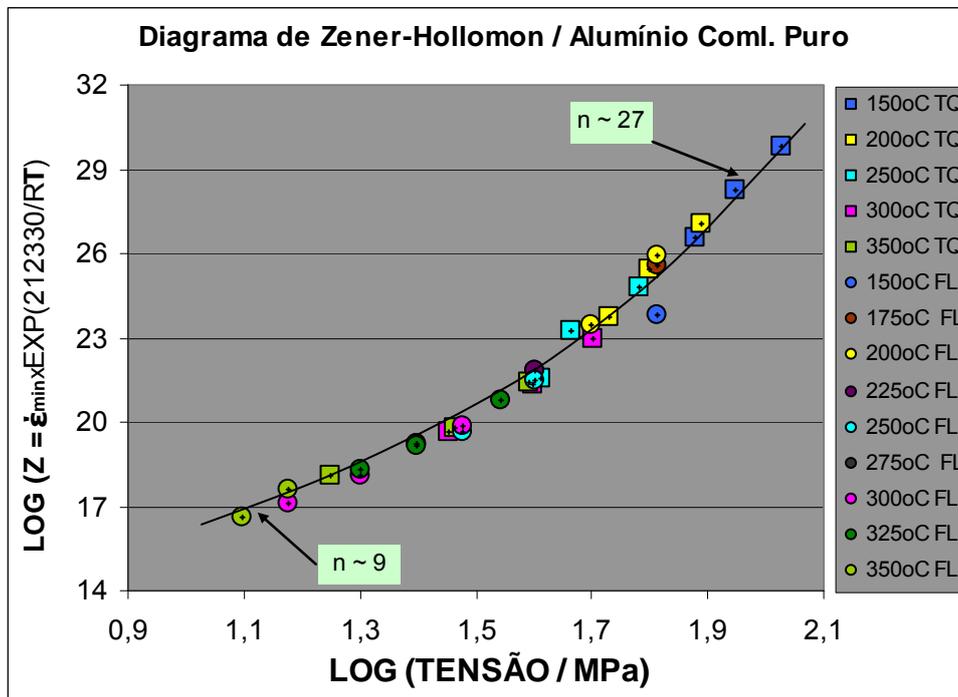
**Figura 5.** Relações de Arrhenius para os dados de fluência juntamente com os de tração a quente, indicando a energia de ativação aparente média de fluência do material.

Com o valor da energia de ativação aparente média para fluência obtido:  $Q_f = 212.330$  J/mol, foi construído o gráfico de Zener-Hollomon, que é apresentado na Figura 6. Nota-se que o parâmetro correlaciona muito bem os dados da Figura 4, envolvendo as taxas de deformação, na forma de uma única curva paramétrica, produzindo um excelente colapsamento dos resultados tanto no caso dos ensaios de Tração a Quente como nos de Fluência. Essa curva paramétrica apresenta também inclinação  $n \approx 9$  na região de baixas tensões e  $n \approx 27$  na região de altas tensões, no intervalo estudado.

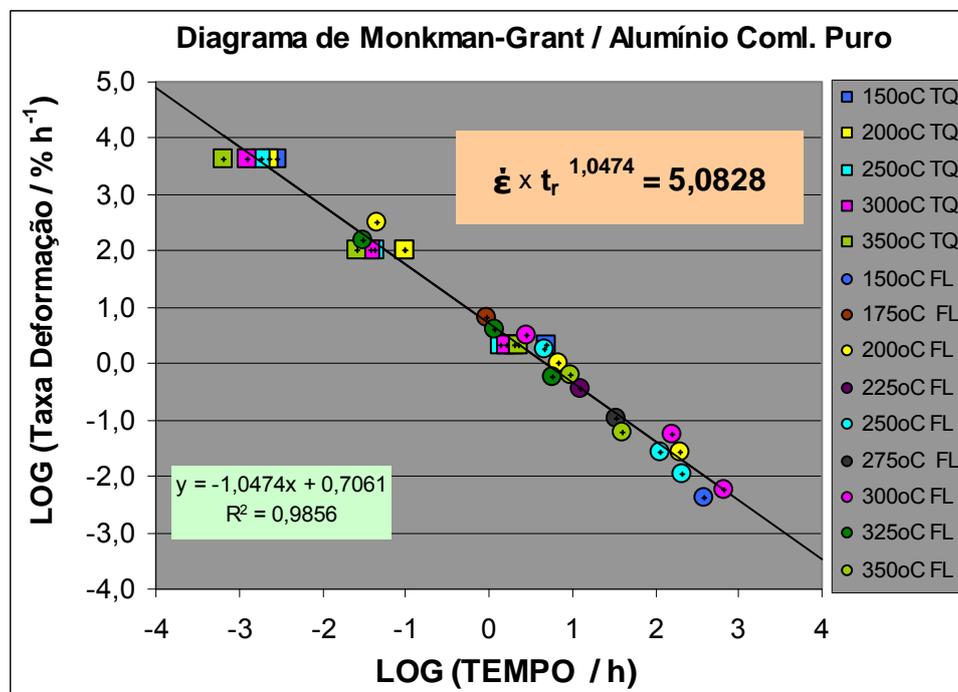
Na Figura 7 são apresentados os dados de Tração a Quente e Fluência na forma do gráfico de Monkman-Grant, indicando que a linha reta que passa na região dos dados de fluência passa também pela região dos dados de tração a quente. A relação de Monkman-Grant aparece destacada na figura.

A Figura 8 mostra ainda, que é possível conseguir uma excelente racionalização dos dados de Tração a Quente e Fluência apresentados na Figura 1, envolvendo os tempos  $t$  ( $t_{LRT}$  e  $t_f$ ), utilizando-se a combinação entre a Parâmetro de Zener-Hollomon

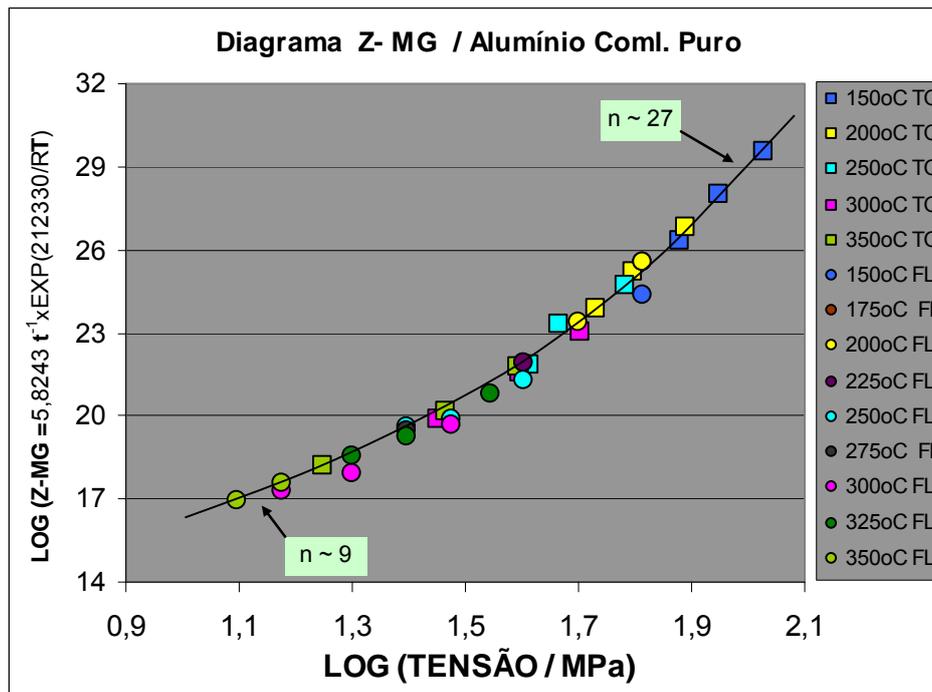
$[Z = \dot{\epsilon} \times \exp(212330 / RT)]$  e a relação de Monkman-Grant ( $\dot{\epsilon} \times t^{1,0474} = 5,0828$ ), ou seja pela introdução de um novo parâmetro derivado das duas relações:  $Z\text{-MG} = (K/t_r^m) \times \exp(Q_f/RT)$ .



**Figura 6.** Racionalização entre os dados de taxa de deformação, tensão e temperatura para tração a quente e fluência, através do parâmetro de Zener-Hollomon.



**Figura 7.** Variação da taxa de deformação em função do tempo, procurando-se verificar a validade de relação de Monkman-Grant.



**Figura 8.** Racionalização entre os dados de tempo de ruptura, tensão e temperatura para tração a quente e fluência, através do parâmetro de Zener-Hollomon combinado com a relação de Monkman-Grant.

#### 4 DISCUSSÃO

Para todas as condições de iso-temperatura no gráfico de Queda de Resistência com o Tempo (Figura 3), os dados de Tração a Quente e os de Fluência mostraram ótima concordância entre si, quando analisados conjuntamente de acordo com o critério concebido por Bueno.<sup>(1)</sup> Da mesma forma, os dados plotados na forma do diagrama de Norton (Figura 4), 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, o que está de acordo com trabalhos reportados na área de fluência para vários materiais.<sup>(8)</sup> Os valores de  $n$  encontrados ( $n \approx 9$  a 27), com o gráfico de Norton (Figura 3), são bem maiores que os valores reportados para o alumínio extra-puro,  $n = 4$  a 5, por Frost e Ashby.<sup>(5)</sup>

A Energia média de Ativação Aparente para Fluência obtido neste trabalho (212,33 kJ/mol) pelo gráfico de Arrhenius (Figura 4), também é bem maior que o valor da Energia de Ativação para Auto-Difusão em volume, mencionado em outros trabalhos no alumínio de alta pureza, como por exemplo o valor mencionado  $Q_v = 142$  kJ/mol, por Frost e Ashby.<sup>(5)</sup>

A principal razão para isso pode ser devido ao fato de que a amostra de alumínio comercial utilizada neste trabalho possa estar apresentando um elevado grau de impureza. Segundo Davis,<sup>(9)</sup> os valores de resistência mecânica, à temperatura ambiente, para o alumínio recozido, tipo AA1100 (com 99% de pureza) são da ordem de:  $\sigma_{0,2} = 34$  MPa, LRT = 90 MPa, aumentando significativamente para teores de impureza maiores que 1%. Considerando os valores de  $\sigma_{0,2} = 76,2$  MPa e LRT = 135,2 MPa determinados para o material deste estudo, é possível que o seu grau de impureza seja bem maior que 1%, justificando os maiores de  $n$  e  $Q_f$

encontrados neste trabalho, em relação aos do alumínio extra puro reportados na literatura.

O gráfico de Zener Hollomon, Figura 6, também mostrou uma ótima concordância entre os dados de Tração a Quente e os de Fluência com grau muito baixo de dispersão, a não ser pelo ponto referente ao ensaio de fluência a 150°C com 65 MPa, que exibiu valor taxa mínima de fluência um pouco abaixo do esperado. Esse gráfico tem um significado especial, pois indica a possibilidade de parametrização dos dados do diagrama de Norton (Figura 3), segundo uma única curva de referência, com um único valor de energia aparente de ativação ( $Q_f = 212,33$  kJ/mol). Os valores de inclinação da curva de Zener-Hollomon correspondem aos valores de  $n$  (expoente de Norton) do material, que varia de aproximadamente 9 a 27, na região onde há predominância dos dados de fluência a baixas tensões e onde há predominância dos dados de tração a quente a altas tensões, respectivamente. Mesmo o valor  $n = 9$  pode ser considerado como bem alto e está certamente relacionado a mecanismos de fluência por movimento de discordâncias controlados por recuperação, provavelmente por escalagem, na presença de um campo de tensões internas desenvolvidas pela sub-estrutura de alta temperatura que se estabelece no material no processo de deformação.<sup>(8)</sup> Com a determinação dos níveis de tensão interna do material e analisando-se os dados apenas com a tensão efetiva em vez da tensão aplicada, seria possível a racionalização dos dados de  $n$  e  $Q_f$  para valores mais próximos de  $n$  entre 4 a 5 e  $Q_f$  mais próximos de  $Q_v$ , como sugerido por Evans e Wilshire.<sup>(8)</sup>

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  $\dot{\epsilon}_{\min} \times t_r^{1,0474} = 5,0828$ , 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>(8)</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 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 também acentuado grau de espalhamento.

A determinação correta da composição química do material e a análise de suas microestruturas, antes e após os ensaios, tornam-se necessárias para a melhor compreensão dos parâmetros físicos encontrados. Seria necessário também a realização de ensaios de fluência com maior duração, em tensões mais baixas, abrangendo a faixa de  $\text{LOG}(t_r)$  entre 3 e 4, para verificar como ocorre o decaimento nos valores do expoente de tensão.

Um aspecto interessante explorado neste trabalho foi o da possibilidade de racionalização dos dados de tempo ( $t_{LRT}$  e  $t_r$ ) com os dados de tensão e temperatura, da mesma forma conseguida com a relação de Zener-Hollomon (Figura 6). A Figura 8 mostra que essa correlação pode ser feita de maneira notável, para o alumínio, quando se trabalha com um parâmetro misto, aqui denominado Parâmetro Z-MG que combina as relações de Zener-Hollomon e Monkman-Grant. A capacidade de colapsamento dos dados da Figura 1 em uma única curva de referência (Figura 8), é excelente, com baixíssimo grau de espalhamento.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para a correlação entre Tração a Quente e Fluência no alumínio comercial puro foram altamente satisfatórios e alcançaram o objetivo do trabalho. Assim como verificado anteriormente para alguns aços,<sup>(2,3)</sup> e também para o cobre comercial puro,<sup>(4)</sup> o critério de conversão Tração / Fluência<sup>(1)</sup> mostrou-se bastante eficiente neste 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. 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 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 FROST, H.J.; ASHBY, M.F. – Deformation Mechanism Maps – The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics, Pergamon Oxford, 1982.
- 6 DIETER, G.E. Metalurgia Mecânica. 2ª edição, 1981.
- 7 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.
- 8 EVANS, R.W.; WILSHIRE, B. Creep of Metals and Alloys. The Institute of Metals, London, 1985.
- 9 DAVIS, J.R. ASM Specialty Handbook: Aluminium and Aluminium Alloys. ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 1993.