

TRAÇÃO A QUENTE E FLUÊNCIA NO LATÃO COMERCIAL. PARTE 2: APLICAÇÃO DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE PARAMETRIZAÇÃO¹

Levi de Oliveira Bueno²

Resumo

Investigou-se a possibilidade de parametrização de dados de tração a quente juntamente com dados de fluência, no latão comercial, como parte de um programa em que se procura validar um critério de equivalência proposto recentemente para análise conjunta de resultados dessas duas modalidades de teste utilizando diversos materiais. Os dados foram analisados segundo 6 diferentes métodos comumente citados na literatura tradicional de parametrização e dados de fluência. Observou-se a compatibilidade dos resultados de Tração a Quente com os de Fluência quando analisados pelos métodos de: Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Goldhoff-Sherby, White-Le-May, Manson-Succop e Manson-Haferd, a fim de testar a possibilidade de se utilizar ambas modalidades de resultados em conjunto em procedimentos de extrapolação. Para o latão comercial, nas presentes condições de teste, o método que apresentou melhor desempenho foram os de White-Le May.

Palavras-chave: Tração a quente; Fluência; Latão comercial; Parametrização; Extrapolação.

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

Abstract

The possibility of parameterization of hot tensile data together with creep data was investigated, for commercial brass, in an attempt to validate for various materials a recent criterion that proposes an equivalence between both kinds of tests. Six different parameterization methods were considered, which are commonly mentioned in the traditional literature for data extrapolation. The compatibility of the hot tensile data with creep data was observed when the analysis are performed by the Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Goldhoff-Sherby, White-Le-May, Manson-Succop e Manson-Haferd procedures, to test the possibility of using both kind of data together in extrapolation procedures. For commercial brass, under the present testing conditions, the White-Le-May methodology produced the best performance.

Key words: Hot tensile test; Creep test; Commercial brass; Parameterization; Data extrapolation.

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

² *PhD em Engenharia Materiais. Professor Associado do DEMa / UFSCar.*



1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Este artigo representa uma continuação do trabalho de análise de resultados apresentados em sua Parte 1,⁽¹⁾ também neste Seminário, investigando agora a possibilidade de correlação entre os dados de Tração a Quente com os de Fluência no latão comercial, utilizando o critério de equivalência entre esses dois tipos de teste, proposto por Bueno.⁽²⁾

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.⁽¹⁾

1.2 Objetivo

O objetivo é verificar se também é possível estabelecer uma correlação entre os resultados destes dois tipos de ensaio para o alumínio comercial puro, visando extrapolação dos resultados por diferentes metodologias. Esta correlação foi verificada com sucesso em diferentes tipos de aço, como reportada em trabalhos anteriores,^(3,4) e também para alguns materiais não ferrosos como: o cobre comercial puro,⁽⁵⁾ e o alumínio comercial puro.⁽⁶⁾

Dentre as várias possibilidades citadas na literatura,⁽⁷⁾ foram escolhidos apenas 6 métodos, que são considerados em geral como os mais importantes, a saber, os métodos de: Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Goldhoff-Sherby, White-Le May, Manson-Succop e Manson-Haferd.

1.3 Revisão da Literatura

1.3.1 Métodos de parametrização

Existe uma série de procedimentos 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⁽⁷⁾ 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:

- método de Larson-Miller $P = T(C + \text{LOG } t_r)$
- método de Orr-Sherby-Dorn $P = \text{LOG } t_r - A/T$
- método de Goldhoff-Sherby $P = (\text{LOG } t_r - \text{LOG } t_r^*) / (1/T - 1/T^*)$
- método de White-Le May $P = (\text{LOG } t_r - \text{LOG } t_r^*) / (1/T - 1/T^*)$
- método de Manson-Haferd $P = (\text{LOG } t_r - \text{LOG } t_r^*) / (T - T^*)$
- método de Manson-Succop $P = \text{LOG } t_r - B.T$

Onde t_r = tempo ruptura (em h); T = temperatura (em K), A, B, C, LOG t_r^* ; e T^* (ou $1/T^*$) são as constantes de cada método. Os métodos de Larson-Miller, Goldhoff-Sherby, White-Le-May 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 t_r x $1/T$ e LOG t_r x T, como mostram os diagramas da Figura 1.

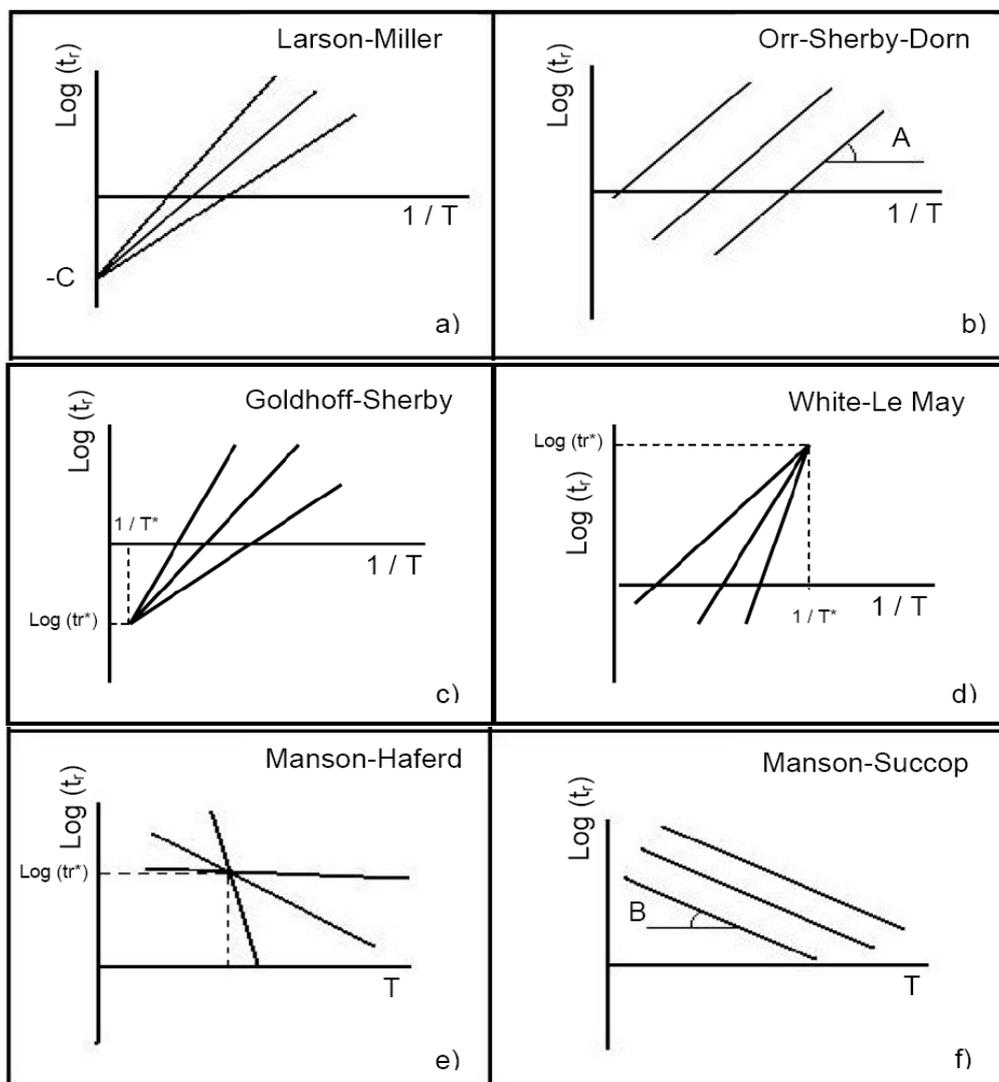


Figura 1. Métodos de parametrização, (a) Larson-Miller; (b) Orr-Sherby-Dorn; (c) Goldhoff-Sherby; (d) White-Le May; (e) Manson-Haferd; e (f) Manson-Succop.

Observa-se que o parâmetro de White-Le May é idêntico ao de Goldhoff-Sherby. A diferença entre os dois métodos consta apenas do posicionamento do ponto focal, que para Goldhoff-Sherby fica no 4º quadrante, enquanto que para White-Le May pode se situar, para alguns materiais, no 1º quadrante, acima da região dos dados experimentais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho é o mesmo apresentado no artigo da Parte 1⁽¹⁾ deste Seminário, ou seja, trata-se de um latão comercial do tipo CLA-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°C por uma hora, com resfriamento ao ar, sofrendo certo de crescimento de grão, exibindo finalmente estrutura granular aproximadamente equiaxial, com tamanho médio de grão $D \approx 20 \mu\text{m}$. A resistência a tração foi testada à temperatura ambiente depois deste tratamento, com o seguinte resultado: $\sigma_{0,2} = 189 \text{ MPa}$, $\text{LRT} = 393 \text{ MPa}$, $\text{Ar} = 36\%$, $\text{RA} = 56\%$. 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: $d_o = 4,0 \text{ mm}$ e $L_o = 16 \text{ mm}$, 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

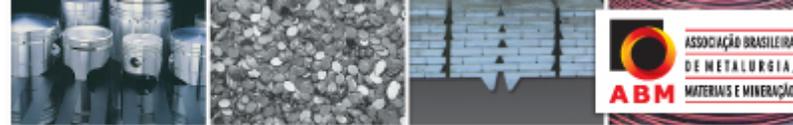
Os ensaios de Fluência foram realizados na modalidade carga constante, com tensão variando de 3 MPa a 150 MPa e temperaturas variando na sequência: 250°C – 300°C – 350°C – 400°C – 450°C – 500°C – 550°C. Empregou-se um conjunto de cerca de 15 máquinas marca STM modelo MF-1000. O sistema de extensometria 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 foram 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

As Tabelas 1 e 2 mostram os dados de Tração a Quente e Fluência, respectivamente, com os valores dos parâmetros de cada método que deram origem aos gráficos de parametrização que serão discutidos no presente artigo. Na Tabela 1, para Tração a Quente, os dados de tempo de ocorrência do LRT, t_{LRT} , normalmente expressos em s, foram convertidos para h.

Nessas tabelas, as siglas PLM, POSD, PWLM, PMH e PMS correspondem respectivamente aos parâmetros de Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, White-Le May, Manson-Haferd e Manson-Succop, calculados a partir das constantes que foram



determinadas a partir de cada metodologia, segundo os esquemas de análise mencionados na Sessão 1.3 deste trabalho, ou seja mediante a inspeção do comportamento das linhas de iso-tensão nos planos LOG (t_r) x $1/T$ e LOG (t_r) x T . Observa-se que o ensaio de fluência a 250°C com 30 MPa encontra-se ainda em andamento, com um tempo de 1.722,26 h.

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

CP N°	T(°C)	LRT (MPa)	t_{LRT} (h)	PLM	POSD	PWLM	PMH	PMS
37	250	341,68	0,0062	2964	-13,840	-13292	-0,0518	4,786
38	250	311,20	0,1325	3658	-12,511	-11688	-0,0426	6,115
39	250	196,29	3,9028	4427	-11,042	-9913	-0,0325	7,584
7	300	284,94	0,0031	3070	-13,133	-11373	-0,040	5,146
8	300	266,80	0,0694	3847	-11,776	-10009	-0,033	6,503
9	300	112,42	2,6806	4757	-10,190	-8415	-0,025	8,089
12	350	230,40	0,0026	3294	-12,352	-10032	-0,032	5,743
13	350	138,33	0,0344	3994	-11,229	-9042	-0,028	6,867
17	350	60,15	1,2278	4960	-9,677	-7675	-0,021	8,419
4	400	196,97	0,0015	3403	-11,857	-9262	-0,028	6,182
5	400	119,13	0,0167	4102	-10,818	-8434	-0,024	7,220
6	400	32,84	1,3361	5383	-8,914	-6916	-0,018	9,124
14	450	119,75	0,0005	3318	-11,698	-8905	-0,025	6,383
15	450	54,68	0,0239	4520	-10,037	-7680	-0,020	8,045
18	450	20,40	1,3611	5789	-8,281	-6386	-0,015	9,800
10	500	75,24	0,0011	3808	-10,817	-8121	-0,021	7,389
11	500	43,58	0,0161	4700	-9,664	-7323	-0,018	8,542
16	500	14,42	1,6667	6257	-7,649	-5930	-0,013	10,557

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

CP N°	T(°C)	σ (MPa)	t_r (h)	PLM	POSD	PWLM	PMH	PMS
18	250	30	1.722,26 em andamento	5810	-8,397	-6719	- 0,0142	10,229
41	250	100	164,24	5276	-9,418	-7952	-	9,208
9	300	60	36,06	5403	-9,061	-7280	-	9,218
11	300	30	183,89	5809	-8,353	-6569	-	9,926
17	300	20	654,63	6125	-7,802	-6014	-	10,477
10	300	80	16,56	5210	-9,399	-7620	-	8,880
42	300	150	0,60	4384	-10,840	-9068	-	7,439
8	350	40	16,42	5662	-8,550	-6682	-	9,545
16	350	10	629,53	6649	-6,967	-5287	-	11,129
12	350	20	137,26	6237	-7,628	-5870	-	10,467
7	350	30	27,88	5805	-8,321	-6480	-	9,775
6	400	25	10,92	5997	-8,002	-6188	-	10,036
13	400	10	89,55	6612	-7,088	-5460	-	10,950
5	400	20	17,75	6139	-7,791	-6020	-	10,247
43	400	80	0,29	4936	-9,579	-7446	-	8,459
3	450	10	37,15	6827	-6,845	-5328	-	11,236
14	450	5	145,63	7256	-6,252	-4890	-	11,830
4	450	15	16,79	6578	-7,190	-5582	-	10,892
1	500	5	69,51	7510	-6,029	-4810	-	12,177
15	500	3	140,56	7746	-5,723	-4599	-	12,483
2	500	10	4,65	6602	-7,203	-5622	-	11,002
44	500	30	0,43	5803	-8,236	-6336	-	9,969
45	550	5	20,86	7565	-6,073	-4905	-	12,323

Por conveniência, daqui em diante 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 σ , que significará o LRT dos ensaios de tração a quente e a tensão nos 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 mostra também o ponto referente ao ensaio em andamento. As linhas pontilhadas ilustram os 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.

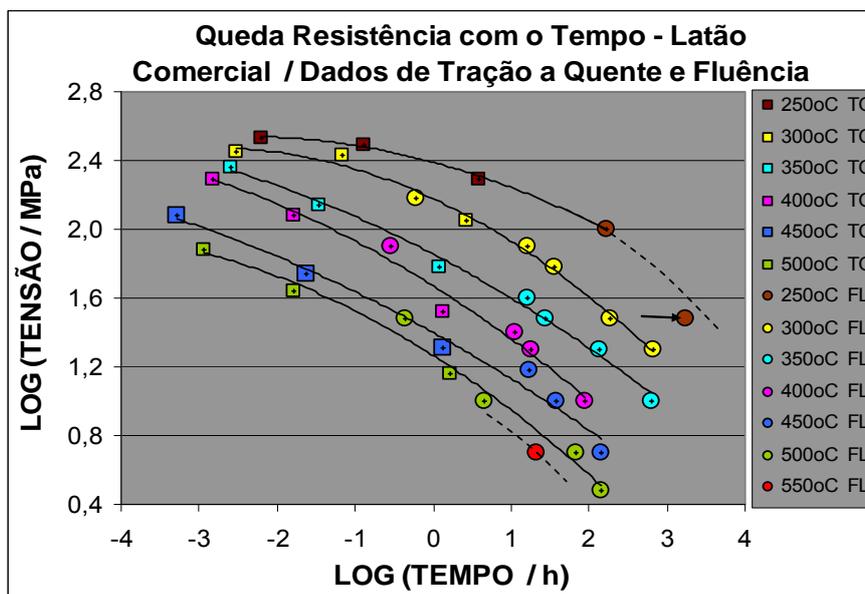


Figura 2. Queda de resistência com o tempo para os dados de fluência juntamente com os de tração a quente.

As Figuras 3a e 3b mostram o padrão de disposição das 5 linhas de iso-tensão nos planos $\text{LOG}(t_r) \times 1/T$ e $\text{LOG}(t_r) \times T$, respectivamente. Esses gráficos contêm apenas os dados de fluência, já que se torna impossível obter linhas de iso-tensão com os dados de tração a quente.

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.⁽⁸⁾ A análise baseada apenas na inspeção visual das linhas de iso-tensão, ou mesmo no uso de seus valores de inclinação e intersecção não é apropriado. O método de Manson-Mendelsohn⁽⁸⁾ estabelece uma série de algoritmos que fazem uma ponderação entre as linhas com maior e menor quantidade de dados. Mesmo as linhas com 2 pontos podem ser consideradas, prevalecendo no final o cálculo da tendência mais provável para paralelismo ou convergência, de acordo com cada método de extrapolação. É importante mencionar que o dado referente ao ensaio em andamento não foi utilizado no processamento de Manson-Mendelsohn.⁽⁸⁾

Nota-se nas Figuras 3a e 3b que duas linhas de iso-tensão (5 MPa e 20 MPa) apresentam 3 pontos experimentais e duas linhas (10 MPa e 30 MPa) 4 pontos experimentais cada uma. A linha referente a 80 MPa apresenta apenas 2 pontos. O

ideal seria a realização de uma quantidade bem maior de ensaios de fluência (principalmente com mais altas durações), de modo a se ter cerca de 4 a 6 pontos em cada linha de iso-tensão, incluindo os níveis em que aparecem os pontos isolados nas Figuras 3a e 3b, para uma maior representatividade estatística. Com o presente conjunto de dados, no entanto, já foi possível se ter uma boa noção do comportamento do material, no sentido da validação da equivalência entre os dados de Tração a Quente e Fluência.

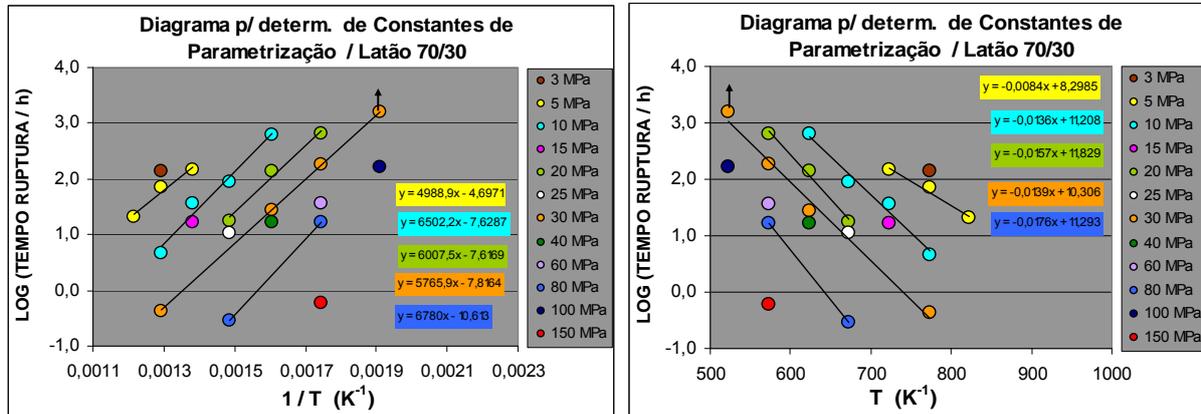


Figura 3. Linhas de Iso-tensão no espaço: (a) LOG(t_r) em função de $1/T$, para determinação das constantes pelos métodos de Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn, Goldhoff-Sherby e White-Le May; e (b) LOG(t_r) em função de T , para determinação das constantes pelos métodos de Manson-Haferd e Manson-Succop.

As Figuras 4a e 4b apresentam as projeções das 5 linhas de iso-tensão nos planos LOG(t_r) x $1/T$ e LOG(t_r) x T , respectivamente, com escalas maiores em cada eixo, de forma a ilustrar melhor as possíveis situações de convergência ou paralelismo dessas linhas. As figuras indicam a posição dos pontos focais calculados a partir da utilização do procedimento de Manson-Mendelsohn,⁽⁸⁾ no sentido de se verificar a coerência dos resultados.

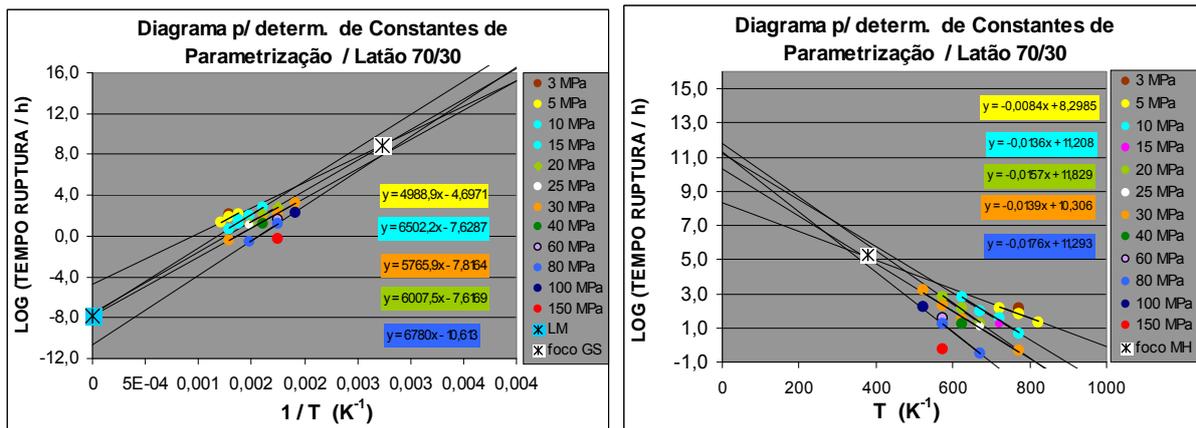


Figura 4. Projeções das linhas de Iso-Tensão no espaço: (a) LOG (t_r) em função de $1/T$; e (b) LOG(t_r) em função de T , ilustrando posicionamento dos pontos focais pelos métodos de Larson-Miller, Goldhoff-Sherby e White-Le May.

Com relação à possibilidade de convergência das linhas de iso-tensão no plano LOG(t_r) x $1/T$ (Figura 4a), o procedimento encontrou um ponto focal no 1º quadrante, com coordenadas $1/T^* = 0,00274$ e $LOG(t_r^*) = 8,799$, acima da região dos pontos experimentais, indicando a aplicação da metodologia de White-Le May, em vez da

de Goldhoff-Sherby. O programa indicou também a possibilidade de utilização do ponto focal situado no eixo $\text{LOG}(t_r)$, de acordo com a metodologia de Larson-Miller, com o valor $C = 7,873$. Para a condição de paralelismo o processamento dos dados indicou um valor de $B = 6.084,1$, conforme prevê a metodologia de Orr-Sherby-Dorn. Com relação à possibilidade de convergência das linhas de iso-tensão no plano $\text{LOG}(t_r) \times T$ (Figura 4b), o procedimento encontrou um ponto focal no 1º quadrante, com coordenadas $T^* = 378,514$ e $\text{LOG}(t_r^*) = 5,283$, de acordo com a metodologia de Manson-Haferd. Já para a condição de paralelismo, os cálculos indicaram um valor de $B = -0,01337$, como sugere a metodologia de Manson-Succop.

Verifica-se que os pontos focais calculados pelo procedimento de Manson-Mendelsohn⁽⁷⁾ fazem sentido com o foco verificado visualmente nos gráficos das Figuras 4a e 4b. Os valores da condição de paralelismo também estão em concordância com os valores médios das inclinações das linhas de iso-tensão mostrados nas Figuras 3a e 3b.

Com a determinação das várias constantes, foram obtidas as curvas de parametrização, segundo cada método. A Figura 5a corresponde à parametrização dos dados apresentados na Figura 2, segundo o método de Larson-Miller, com o valor de $C = 7,873$ comentado anteriormente. Observa-se que os dados Fluência ficam satisfatoriamente alinhados, indicando boa possibilidade de parametrização ao longo de uma única curva. No entanto, os dados de Tração a Quente encontram-se muito espalhados, divergindo totalmente desse eixo dos resultados de Fluência, tornando a aplicação da metodologia de Larson-Miller inadequada para racionalizar os conjuntos de dados. De qualquer forma, um polinômio de 3º grau foi ajustado ao conjunto de dados, indicando um coeficiente de correlação $R^2 = 0,93344$. Outros valores de C foram tentados para correlacionar os dados, inclusive o valor $C = 20$ popularmente utilizado para os metais em geral, mas os resultados foram ainda piores que os indicados na Figura 5a.

A Figura 5b apresenta a qualidade de parametrização empregando-se o método de Orr-Sherby-Dorn, com a constante encontrada $A = 6.084,1$ mencionada anteriormente. A racionalização dos dois conjuntos de dados em torno de uma única linha já é um pouco melhor que no caso anterior, mas ainda insatisfatória. Um polinômio de 3º grau ajustado aos dados exibiu um valor $R^2 = 0,96748$. Essa metodologia apresenta basicamente a mesma deficiência encontrada com a de Larson-Miller, ou seja: realiza a parametrização adequada dos dados de Fluência, mas não consegue colocar os dados de Tração a Quente próximos da mesma curva, provocando exagerado espalhamento desses dados.

A Figura 6 corresponde a parametrização dos dados de acordo com a metodologia de White-Le May, utilizando o ponto focal $(0,00274 - 8,799)$. Verifica-se que o resultado agora é bem melhor que o dos métodos anteriores. Tanto os pontos de Tração a Quente como os de Fluência situam-se em torno de uma mesma curva de referência, com baixo espalhamento. O polinômio de 3º grau ajustado aos dados indicou um valor de $R^2 = 0,98553$.

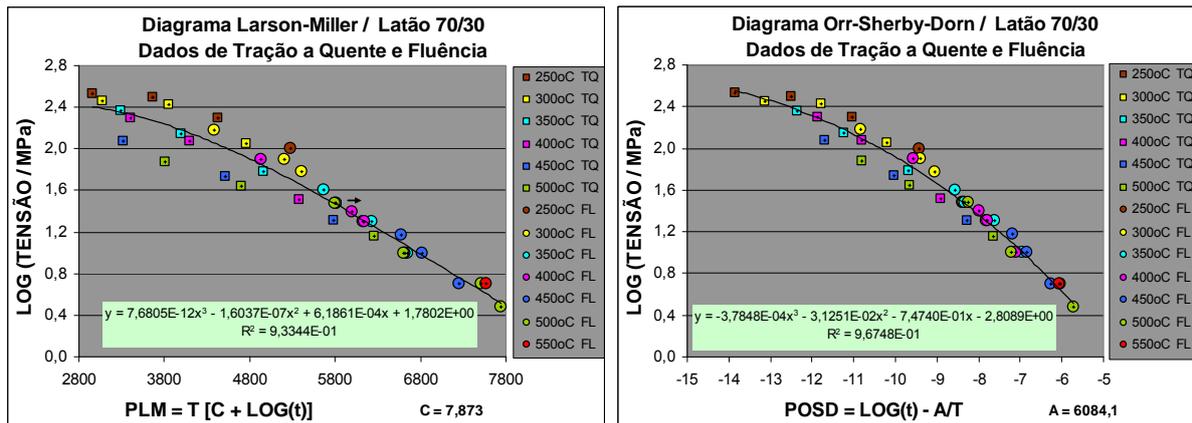


Figura 5. Curva paramétricas de: (a) Larson-Miller; e (b) Orr-Sherby-Dorn.

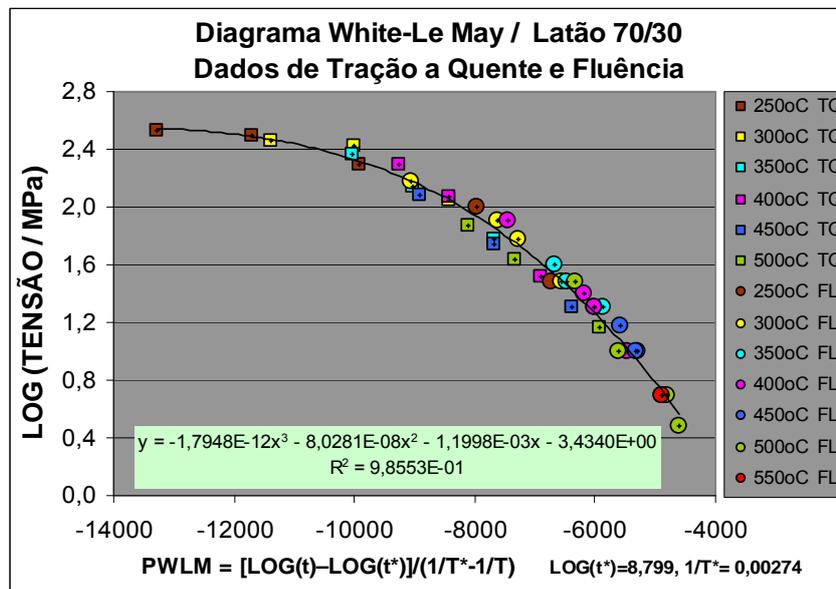


Figura 6. Curva paramétrica de White-Le May.

A Figura 7a foi elaborada a partir da análise pelo método de Manson-Haferd. Como mencionado anteriormente, utilizaram-se as constantes referentes ao foco (378,514 – 5,283). Observa-se que a capacidade de racionalização de ambos os conjuntos de dados em torno de uma única linha de referência por este método foi também bastante satisfatória, exibindo o polinômio de 3º grau ajustado aos dados um coeficiente de correlação: $R^2 = 0,98505$.

A Figura 7b apresenta o resultado de parametrização pelo método de Manson-Succop. A constante utilizada nesse método foi $B = -0,01337$. Verifica-se que a qualidade de ajuste para os dois conjuntos de dados também é insatisfatória, exibindo a mesma inconsistência notada com os métodos de Larson-Miller e Orr-Sherby-Dorn, ou seja, bom ajuste aos dados de Fluência mas provocando espalhamento exagerado nos dados de Tração a Quente. O polinômio de 3º grau ajustado aos dados mostrou um valor $R^2 = 0,9513$.

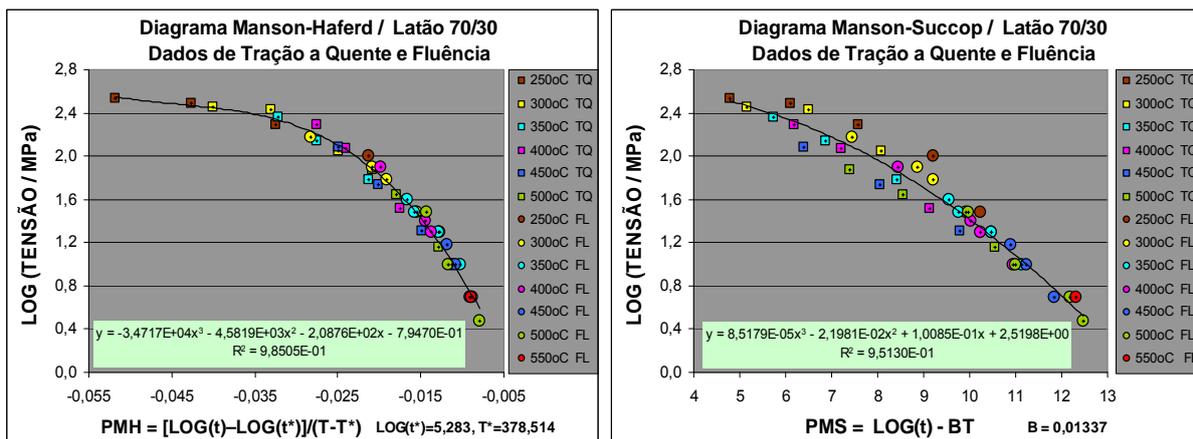


Figura 7. Curva paramétricas de: (a) Manson-Haferd; e (b) Manson-Succop.

4 DISCUSSÃO

O gráfico da Queda de Resistência com o Tempo mostrado na Figura 2 indica em geral ótima concordância entre os dados de Tração a Quente e os dados de Fluência em todos os níveis de temperatura. Nota-se que apenas dois ou três pontos situam-se fora das linhas ajustadas em cada temperatura. A disposição relativa entre cada série de dados com a variação da temperatura mostra-se também consistente. Este é um resultado bem importante, pois evidencia que os dados de Tração a Quente são totalmente compatíveis com os de ruptura por Fluência para o latão comercial.

Na Parte 1 deste trabalho⁽¹⁾ comprovou-se que essa compatibilidade ocorre para os dados obtidos basicamente no estágio secundário de fluência, que envolvem os valores de Taxa 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 indicando que a correspondência entre os dois tipos de teste se dá também após o estágio terciário de fluência.

De modo geral, todas as 5 metodologias de parametrização investigadas mostraram boa capacidade de racionalização dos dados de Fluência. Quando se trata de juntar resultados de Tração a Quente aos de Fluência, no entanto, nem todas as metodologias se mostram adequadas, no caso do latão. Os métodos de Larson-Miller, Orr-Sherby-Dorn e Manson-Succop, mostraram-se incapazes de conciliar os dois grupos de dados.

Os métodos de White-Le May e Manson-Haferd, que prevêm ambos convergência das linhas de iso-tensão no 1º quadrante se mostraram mais adequados em reunir os dois grupos de resultados em uma mesma curva de referência. Os coeficientes de correlação dos polinômios ajustados em cada caso são praticamente coincidentes. É interessante verificar a boa capacidade de racionalização apresentada pelo método de White-Le May no caso do latão, uma vez que muito raramente dados de fluência nos metais e ligas metálicas em geral apresentam foco sobre a região dos pontos experimentais no diagrama $\text{LOG}(t_r) \times 1/T$, como prevê a metodologia. A metodologia de Manson-Haferd já é bem mais conhecida e em geral fornece excelentes resultados na parametrização de dados de fluência, principalmente em temperaturas mais elevadas.^(7,9)

As Figuras 8a e 8b apresentam um teste da capacidade preditiva dos dados de tempo em Tração a Quente e Fluência gerados neste trabalho, a partir das curvas de parametrização pelas metodologias de Manson-Haferd e White-Le May,

respectivamente. Observa-se que a eficiência de predição dos dados experimentais é bem semelhante de um método para outro, com um ligeira superioridade do método de White-Le May sobre o de Manson-Haferd. Na Figura 8a, de acordo com Manson-Haferd, a linha a 250°C apresenta um desvio exagerado para cima para valores baixos de tempo, o que não ocorre com a previsão de White-Le May (Figura 8b).

É importante mencionar novamente que, embora o ponto experimental referente ao ensaio em andamento compareça em geral em todos os gráficos, o seus dados não foram considerados no cálculo das constantes de parametrização pelo procedimento de Manson-Mendelsohn,⁽⁸⁾ nem no ajuste dos polinômios derivados a partir de cada esquema de parametrização. De acordo com a Figura 8a, esse ensaio já deveria ter sido concluído o que não é verdade. Por outro lado, a Figura 8b indica que esse ensaio deveria chegar à ruptura para um tempo $t_r \approx 2500$ h correspondente a $\text{LOG}(t_r) \approx 3,4$, o que parece mais plausível (Figura 2).

Para concluir, nota-se que tanto na Figura 8a como na Figura 8b alguns pontos experimentais encontram-se mal posicionados em relação às linhas de predição, principalmente os referentes a três ensaios de Tração a Quente nas temperaturas de 350°C, 400°C e 450°C realizados na velocidade de 0,01 mm/min e dois ensaios de Fluência a 500°C no maior e no menor nível de tensão. Dessa forma, torna-se necessário realizar novos testes tanto de Tração a Quente como de Fluência nessas e em outras condições, para confirmar os presentes resultados.

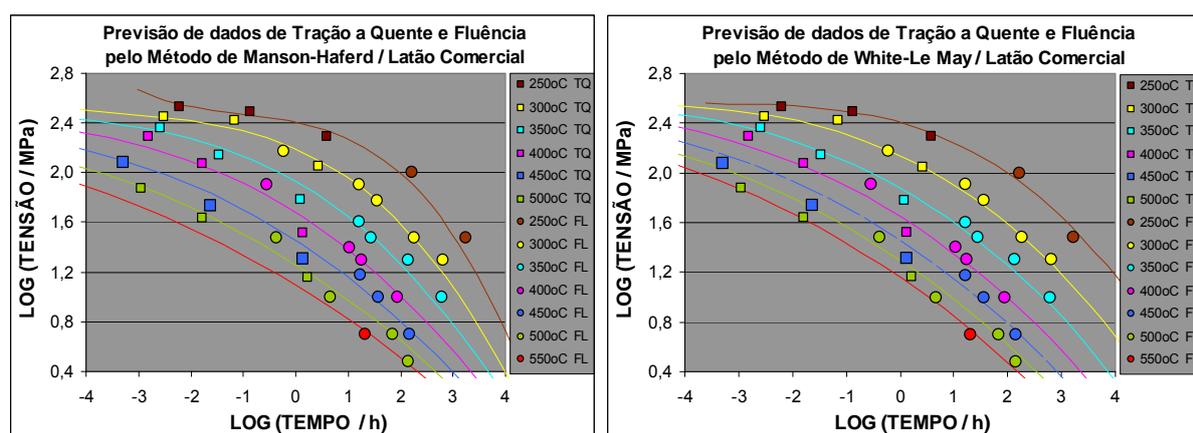


Figura 8. Teste de eficiência de parametrização pelos métodos de: (a) Manson-Haferd; e (b) White-Le em prever os dados de Tempo (t_{LRT} em Tração a Quente e t_r em Fluência).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho cumpriu a contento o objetivo traçado inicialmente que foi o de tentar encontrar uma correlação satisfatória para os dados de Tração a Quente e os dados de Fluência, aplicando-se o critério de equivalência proposto anteriormente,⁽¹⁾ para análise conjunta de ambos os tipos de resultado no caso do latão comercial. Trabalhos anteriores já haviam mostrado a eficiência desse critério na conversão de dados de Tração a Quente para Fluência para um aço ferrítico, um inoxidável austenítico,⁽¹⁻⁴⁾ para o cobre comercial puro⁽⁵⁾ e o alumínio comercial puro.⁽⁶⁾ Este trabalho aponta para a possibilidade de se utilizar com sucesso o critério a fim de se estabelecer esse tipo de equivalência entre Tração a Quente e Fluência, em esquemas de parametrização de dados, também para os materiais não-ferrosos. No caso do latão, com os resultados disponíveis até o momento, o método de

parametrização de White-Le May, apresenta melhor consistência na racionalização de ambos os tipos de resultados.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

- 1 BUENO, L.O. Tração a Quente e Fluência no Latão Comercial. Parte 1: Relações entre Tensão, Taxa de Deformação, Tempo de Ruptura e Temperatura. 12º Seminário de Metais Não Ferrosos da ABM, São Paulo, 31/10 –01/11 de 2011.
- 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 BUENO, L.O; DIAS, C.R.F. Equivalência entre dados de Tração a Quente e Fluência para o Cobre Comercial Puro. Parte 2: Análise por Diferentes Metodologias de Parametrização. Tecnol. Metal. Mater. Miner., vol.8, no.2, p.80-85, abr-jun 2011.
- 6 BUENO, L.O; Dados de Tração a Quente e Fluência no Alumínio comercial puro. Parte 2: Aplicação de diferentes Metodologias de Parametrização. 12º Seminário de Metais Não Ferrosos da ABM, São Paulo, 31/10 –01/11 de 2011.
- 7 VISWANATHAN. R. Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components. ASM International, Metals Park , Ohio, 1993.
- 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.