

RELAÇÃO ENTRE DUREZA E PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA À FLUÊNCIA NO AÇO 9Cr-1Mo¹

*Heloísa Cunha Furtado²
Maurício Barreto Lisboa²
Luiz Henrique de Almeida³*

Resumo

Os aços Cr-Mo são largamente usados nas indústrias petroquímicas e nas usinas de geração elétrica, em aplicações que envolvem exposição a altas temperaturas, onde se requer resistência à fluência e resistência à corrosão. Como todos os materiais, os aços Cr-Mo se degradam ao longo do tempo em função da temperatura e tensão de serviço. O principal mecanismo de degradação destes aços, por sua aplicação em altas temperaturas, é a fluência. O presente trabalho tem como objetivo estudar a correlação entre a dureza e o Parâmetro de Larson-Miller para o aço 9Cr-1Mo. Foram realizados ensaios de fluência acelerados neste aço, sendo, posteriormente, estas amostras analisadas através de ensaios de dureza. Concluiu-se que os valores de dureza medidos nas amostras de fluência, ensaiadas sobre diversas condições, podem ser correlacionados utilizando o Parâmetro de Larson-Miller.

Palavras-chave: Materiais para aplicação em altas temperaturas; Fluência.

RELATIONSHIP BETWEEN HARDNESS AND CREEP PROPERTIES IN 9Cr-1Mo STEEL

Abstract

Cr-Mo ferritic steels are widely used in the petrochemical industry and in electrical generating power stations in applications that involve exposure to high temperature, where creep resistance and corrosion resistance are required. As with all materials, the mechanical properties Cr-Mo steels degrade over extended time as a function of the service temperature and applied stress. The principal degradation mechanism of these steels in high temperature applications is creep. The object of the present paper was to study the correlation between hardness and Larson-Miller Parameter. The study was based on the steel 9Cr-1Mo. Accelerated creep tests were made on the steel, and subsequently the test specimens were analyzed by means of hardness tests. The values of hardness measured in the creep specimens deformed under different conditions could be correlated using the Larson-Miller Parameter.

Key words: High temperature materials; Creep.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Pesquisador, DSc. – CEPTEL, Departamento de Tecnologias Especiais, heloisa@cepel.br*

³ *Pesquisador, DSc. – COPPE/UFRJ, Departamento de Metalurgia e Materiais*

1 INTRODUÇÃO

Os aços Cr-Mo são largamente usados nas indústrias petroquímicas e nas usinas de geração elétrica em aplicações que envolvem exposição a altas temperaturas, onde se requer resistência à fluência e resistência à corrosão. Como todos os materiais, os aços Cr-Mo se degradam ao longo do tempo em função da temperatura e tensão de serviço. O principal mecanismo de degradação destes aços, por sua aplicação em altas temperaturas, é a fluência, que se manifesta inicialmente pelo coalescimento e evolução dos carbonetos precipitados, e em etapa mais avançada, através de vazios e microtrincas.

A expectativa de vida dos componentes que operam em temperaturas elevadas é, na maioria dos casos, baseada na habilidade do material em manter sua resistência à fluência em altas temperaturas por um período pelo menos duas vezes a vida de projeto. Diante disto, métodos de avaliação das propriedades de fluência baseados nas mudanças físicas do material, bem como simples métodos paramétricos de extrapolação são necessários.

Completo cerca de meio século desde a introdução dos parâmetros de tempo e temperatura para correlacionar e extrapolar dados de fluência. O primeiro trabalho foi realizado por Larson e Miller,⁽¹⁾ que introduziram o conceito de uma função que incluísse em sua fórmula a tensão e a temperatura:

$$\phi = T(C + \log t)$$

onde t é o tempo necessário para se atingir a ruptura por fluência, σ é a tensão aplicada, T é a temperatura absoluta e C é uma constante. Larson e Miller desenvolveram um método para unificar uma família de curvas, mostrando o tempo de ruptura em função da temperatura sob diferentes níveis de tensão, de tal forma que uma curva única é obtida quando o $\log(\text{tempo de ruptura})$ é traçado em função do Parâmetro de Larson-Miller. Quando esta curva mestra foi obtida, pôde ser empregada para determinar o tempo de ruptura estimado em diferentes valores de tensão, tempo e temperatura cobertos pelos dados experimentais. Tal aproximação tem sido empregada para fornecer valores interpolados do tempo de ruptura, assim como valores extrapolados para tempos significativamente maiores do que aqueles em que os dados experimentais estão disponíveis.

A dureza tem sido utilizada como um método simples de ensaio mecânico não-destrutivo para estimar a perda de resistência mecânica e de resistência à fluência. Embora seja empírica, pode ser um complemento útil aos métodos metalográficos de avaliação. Entretanto, esforços têm sido feitos para relacionar as medidas de dureza com a resistência à fluência.⁽²⁾

As medidas de dureza fornecem uma indicação da resistência do material à deformação, podendo ser usadas para estimar a extensão de danos que ocorreram em um material que sofreu exposição à temperatura e tensão por um tempo longo. Desta forma, a dureza pode ser utilizada para estimar os danos por fluência, para aços baixa liga, como os usados em plantas de geração, onde ocorrem perdas de resistência, principalmente pelo coalescimento e mudanças morfológicas nos carbonetos.

A recuperação de aços pode ser descrita em termos de um parâmetro tempo-temperatura, denominado Parâmetro de Hollomon-Jaffee⁽³⁾ que é equivalente ao Parâmetro de Larson-Miller usado para fluência. Uma relação entre o parâmetro de Larson-Miller, $P = (C + \log t_f)$, e a mudança na dureza pode ser desenvolvida: se a

dureza inicial no tempo $t = 0$ é conhecida e igual a H_0 , o material pode ser envelhecido à temperatura T , e os valores de H determinados em tempos diferentes, obtendo-se a relação $H = f(P)$ para um material em particular. Para medidas de campo de dureza de componentes que estiveram em operação por muito tempo, o valor efetivo ou principal da temperatura à qual eles foram expostos pode ser estimado, desde que os parâmetros P e H_0 sejam conhecidos. Como na maioria dos casos, H_0 é desconhecido, ele pode ser estimado através de dados conhecidos de materiais similares.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a correlação entre dureza e Parâmetro de Larson-Miller para o aço 9Cr-1Mo. Foram realizados ensaios de fluência acelerados neste aço, sendo, posteriormente, estas amostras analisadas através de ensaios de dureza.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi objeto deste estudo o aço ferrítico 9Cr-1Mo, cuja análise química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço 9Cr-1Mo (% em peso).

Elemento	Nominal [4]	Análise
C	0,06-0,15	0,12
Mn	0,25-0,66	0,52
P	0,025 máx	0,008
S	0,012 máx	0,005
Cu	-	0,16
Si	0,18-0,56	0,33
Ni	0,43 máx	0,20
Cr	7,90-9,60	8,57
Mo	0,80-1,10	0,92
V	0,16-0,27	0,20*
Al	≤0,05	< 0,01
Nb	0,05-0,11	0,085*
N	0,025-0,080	0,046*

Foram realizados três ensaios de tração e 6 medições de dureza em uma chapa de aço 9Cr-1Mo na condição como recebida. Os resultados são apresentados na Tabela 2. De acordo com o fabricante, a chapa de aço foi normalizada a 1065°C e revenida a 787°C. As medições de dureza estão de acordo com a especificação nominal do material.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do aço ASTM A387 Gr91.

Propriedades Mecânicas	Especificação Nominal	Resultados
Limite de Resistência (MPa)	585-760	691±6
Limite de Escoamento em 0,2%(MPa)	415	539±9
Alongamento(%)	≥18	22,6±0,4
Redução de Área(%)	-	71±2
Dureza (HV)	Longitudinal	226±1
	Transversal	229±1

Foram realizados, ainda, ensaios de fluência acelerados em corpos de provas confeccionados de acordo com a norma ASTM E8M de 1994,⁽⁵⁾ conforme mostra a Figura 1. A Tabela 3 apresenta as condições dos ensaios de fluência da chapa de aço 9Cr-1Mo. Todos os ensaios foram do tipo ruptura por fluência, na modalidade carga constante.

Tabela 3. Condições dos ensaios de fluência realizados na chapa de aço 9Cr-1Mo.

Corpo de Prova	Temperatura de ensaio (°C)	Tensão de ensaio (MPa)
Pp/02	566	230
Pp/04	566	210
Pp/08	566	190
Pp/18	579	190
Pp/13	593	160
Pp/09	593	175
Pp/05	593	190
Pp/03	593	210
Pp/20	607	145
Pp/19	607	160
Pp/17	607	190
Pp/15	621	135
Pp/12	621	145
Pp/10	621	160
Pp/06	621	175
Pp/01	621	210
Pp/16	649	125
Pp/14	649	135
Pp/22	649	135
Pp/11	649	145
Pp/07	649	160
Pp/21	649	160

Foram realizadas seis medições de dureza Vickers em cada corpo de prova ensaiado por fluência, com o Durômetro WPM Vickers/Brinell com carga de 30kg e 40Kg. Preferiu-se realizar ensaios de dureza ao invés de ensaios de microdureza, por terem a vantagem de atuar sobre uma área maior, fazendo com que o efeito da distribuição heterogênea dos carbonetos ao longo da microestrutura fosse menos significante.

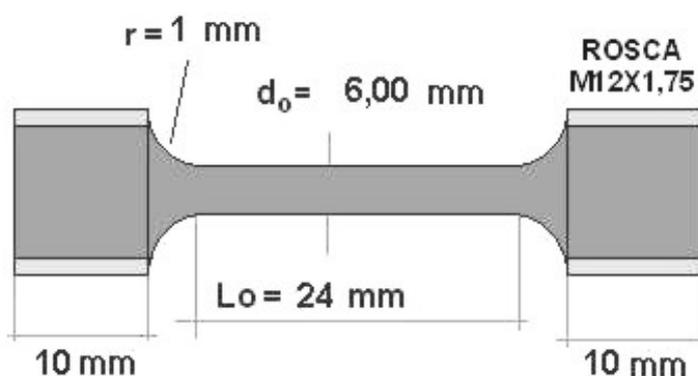


Figura 1. Corpo de prova de fluência convencional reduzido.

3 RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta os resultados de fluência e dureza.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de fluência e dureza para o aço 9Cr-1Mo.

Tensão (MPa)	Temperatura (°C)	566	579	593	607	621	649
125	Nome do C.P						Pp/16
	Tempo (h)						100,43
	Dureza(HV)						200+2
135	Nome do C.P					Pp/15	Pp/14
	Tempo (h)					744,14	45,88
	Dureza(HV)					201,3+0,6	204+1
145	Nome do C.P.				Pp/20	Pp/12	Pp/11
	Tempo (h)				961,54	177,39	18,14
	Dureza(HV)				205+2	212+2	213+2
160	Nome do C.P.			Pp/13	Pp/19	Pp/10	Pp/7
	Tempo (h)			1448,06	299,37	45,35	6,68
	Dureza(HV)			204+4	210+13	210+2	214+5
175	Nome do C.P.			Pp/09		Pp/06	
	Tempo (h)			502,94		19,31	
	Dureza(HV)			207+2		215+7	
190	Nome do C.P.	Pp/08	Pp/18	Pp/05	Pp/17		
	Tempo (h)	5.127	515,68	129,04	21,12		
	Dureza(HV)	206+3	207+4	213+3	221+3		
210	Nome do C.P.	Pp/04		Pp/03		Pp/01	
	Tempo (h)	1093,6		26,24		1,93	
	Dureza(HV)	209,7+0,6		219+10		226+4	
230	Nome do C.P.	Pp/02					
	Tempo (h)	167,09					
	Dureza(HV)	219+3					

4 DISCUSSÃO

Quando Larson e Miller desenvolveram seu parâmetro, utilizaram o valor de $C=20$, por ser este o valor que melhor se ajustava ao aço que estavam estudando. Desde então, é comum na literatura se utilizar este valor para os aços Cr-Mo, por ser uma aproximação adequada para muitos aços que trabalham em altas temperaturas. Entretanto, o valor otimizado da constante C para cada material, resulta em previsões bem mais adequadas. O valor de $C=35,73^{(6)}$ resulta da otimização obtida através do método dos mínimos quadrados de Manson e Medelson⁽⁷⁾ para os dados experimentais do presente estudo.

A Figura 2 apresenta as curvas isotérmicas logarítmicas tensão *versus* tempo de ruptura, obtidas com os dados experimentais deste estudo usando o parâmetro de Larson-Miller para $C=35,73$.

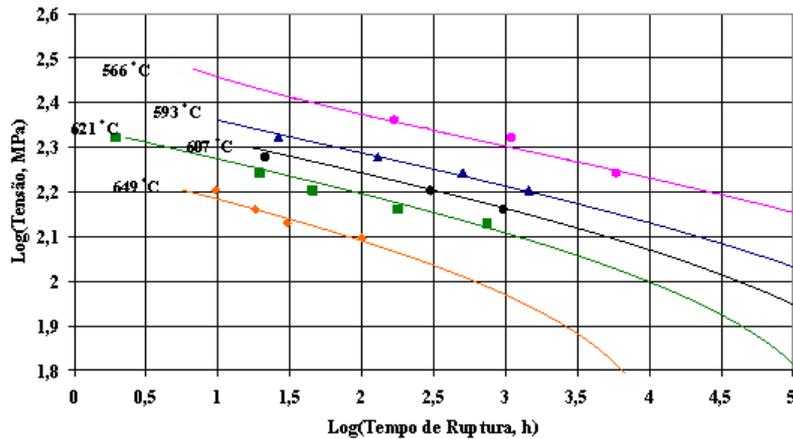


Figura 2. Curvas logarítmicas da tensão *versus* o tempo de ruptura para os dados experimentais a partir do Parâmetro de Larson-Miller com $C=35,73$.

A dureza claramente decresce à medida que aumenta a duração do ensaio de fluência e, portanto, o tempo de exposição do corpo de prova à temperatura no aço 9Cr-1Mo. A Figura 3 apresenta os resultados de dureza da Tabela 4 para os corpos de prova em função do tempo de ruptura e em função da tensão. Nestes gráficos, foram traçadas as curvas de isotensão para os ensaios realizados em temperaturas diferentes, que resultam, obviamente, em tempos de ruptura inversamente proporcionais. O gráfico mostra que para um mesmo tempo de ruptura, quanto maior a tensão aplicada maior a dureza do material. Tal comportamento é explicado pelo fato da maior tensão resultar em maior deformação do corpo de prova e, por conseguinte maior encruamento do material para uma mesma temperatura.

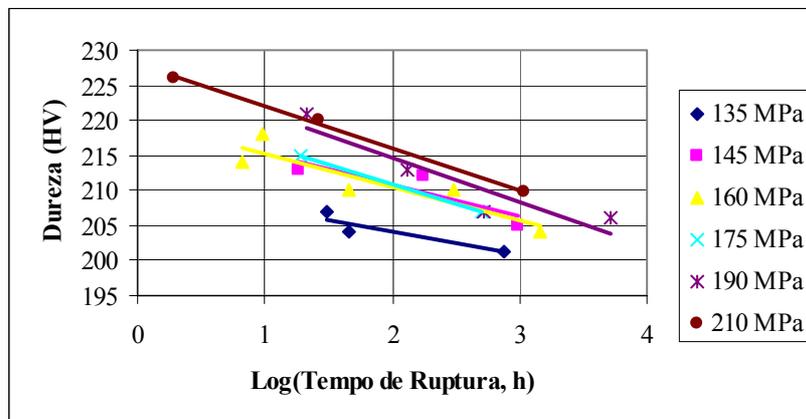


Figura 3. Linhas de isotensão para o aço 9Cr-1Mo ensaiado até a ruptura em diferentes níveis de tensão.

A Figura 4 apresenta os dados de dureza de Tabela 4 em função do tempo de ruptura e temperatura. A dureza está relacionada com três parâmetros interdependentes: tensão, tempo e temperatura.

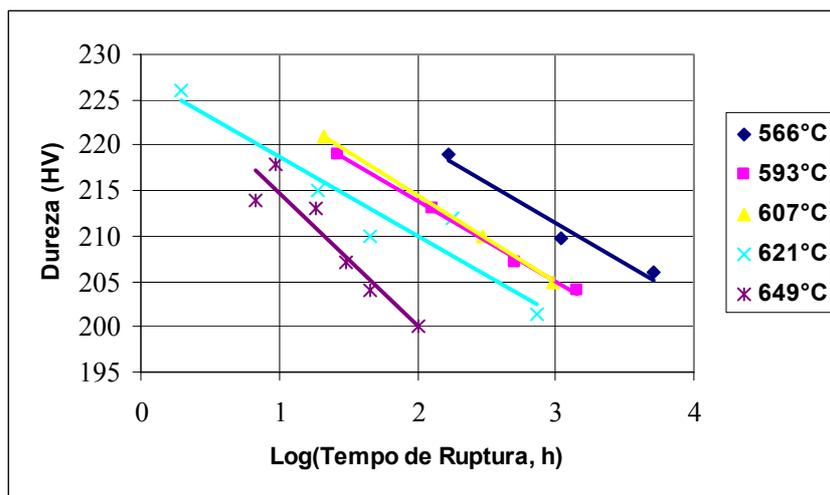


Figura 4. Linhas de isotemperatura para o aço 9Cr-1Mo ensaiado a diferentes temperaturas.

Um dos primeiros trabalhos em busca de parâmetros tempo-temperatura foi realizado em 1943 por Hollomon e Jaffee,⁽³⁾ onde estas duas variáveis foram relacionadas com a variação da dureza em aços revenidos. Portanto, uma possibilidade nos casos de fluência é relacionar a dureza com o parâmetro de Larson-Miller, conforme o gráfico da Figura 5 para os corpos convencionais reduzidos. Este gráfico corrobora a constatação anterior que a dureza decresce com o aumento do tempo e da temperatura.

A Figura 6 mostra a dependência entre o parâmetro de Larson-Miller, que engloba temperatura e tempo, *versus* a dureza e a tensão de ensaio. Esta Figura permite que todas as grandezas sejam relacionadas simultaneamente, o que corrobora a relação dureza x parâmetro de Larson-Miller apresentada na Figura 5.

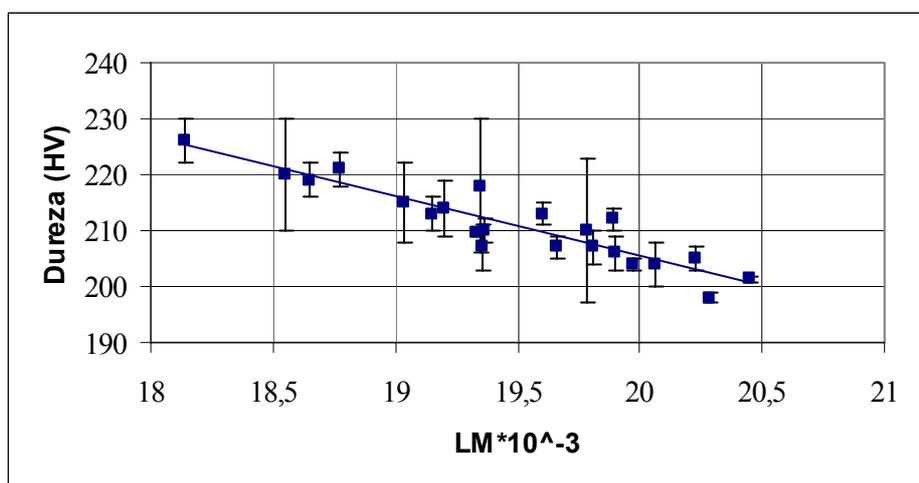


Figura 5. Gráfico de dureza *versus* Parâmetro de Larson-Miller para o aço 9Cr-1Mo ensaiado a diferentes tensões e temperaturas.

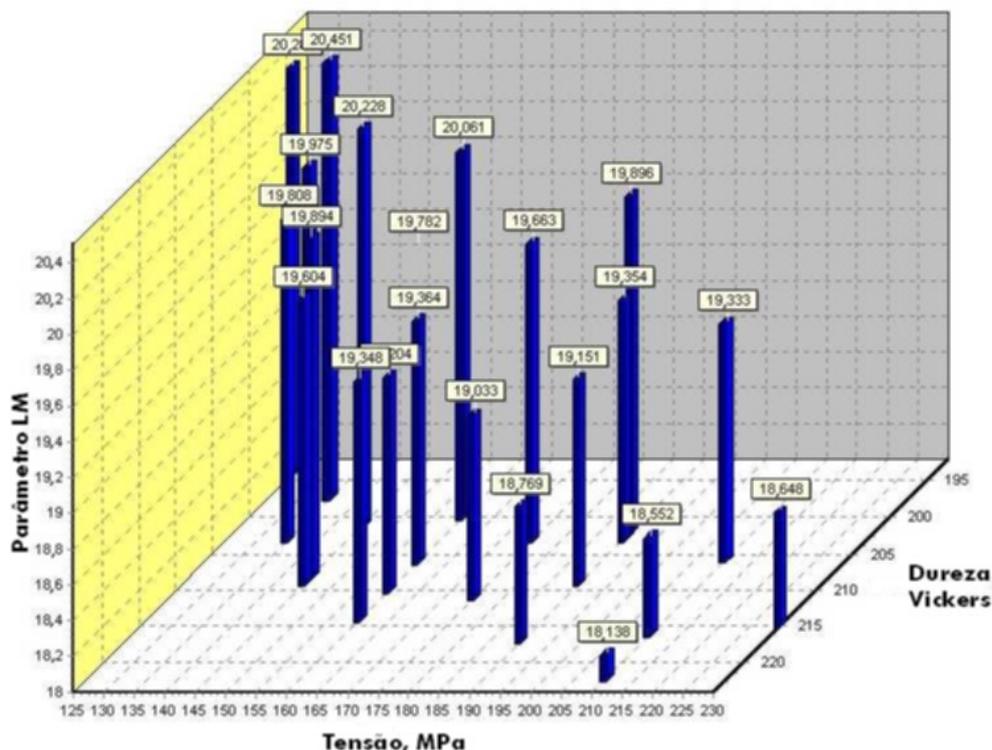


Figura 6. Gráfico do Parâmetro de Larson-Miller versus dureza e versus tensão para o aço 9Cr-1Mo.

5 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados é possível concluir que:

- A dureza mostrou se relacionar de maneira linear com o parâmetro de tempo e temperatura de Larson-Miller. Portanto, essa grandeza evidencia de maneira adequada a perda de resistência à fluência do material ao longo de sua vida em serviço. Se o Parâmetro de Larson-Miller é conhecido para uma liga Cr-Mo em particular, em conjunto com sua dureza inicial e a temperatura de operação, é possível estimar a gravidade do dano e a vida remanescente baseada em medições de dureza.
- As medidas de dureza devem ser consideradas como uma técnica recomendada para estudos de avaliação de integridade estrutural de componentes que operam em altas temperaturas.

REFERÊNCIAS

- 1 LARSON, F.R., MILLER, J., "A time-temperature relationship for rupture and creep stress". Trans ASME, v.74, pp. 765, 1952.
- 2 KOHLHÖFER, W.; PENNY, R.K., "Hardness testing as a means for creep assessment". Int. J. of Pres. Ves. and Piping, v. 66, pp.1-3, 1996.
- 3 HOLLOWOM, J.H., JAFFEE, L.D., "Time-temperature relations in tempering steel". Trans. AIME, v. 162, pp. 223-249, 1943.
- 4 ASTM A 387-92, "Pressure vessel plates, alloy steel, chromium-molybdenum", 1994.
- 5 ASTM E 8M, "Standard test methods for tension testing of metallic materials", 1994.

- 6 FURTADO, H.C., DE ALMEIDA, L.H., LE MAY, I, PEACE, R., "Correlation and extrapolation of creep rupture data: a case study using 9Cr-1Mo steel data". Trans. Canadian Soc. for Mech. Eng., v.29, nº 1, pp.1-.21, 2005.
- 7 MANS ON, S.S., MENDELSON, A. "Optimization of parametric constants for creep-rupture data by means of least squares". NASA Memorandum 3-10-59E, pp 1-34, 1959.