

SIMULAÇÃO FÍSICA DA LAMINAÇÃO A QUENTE DA SUPERLIGA SAE HEV8¹

*David Delagostini Jarreta²
Douglas Strini Magro³
Eduardo Netto de Souza⁴
Oscar Balancin⁵
Celso Antonio Barbosa⁶*

Resumo

A simulação numérica dos processos de conformação plástica de materiais metálicos demanda a existência de uma base de dados confiável das ligas envolvidas. Neste sentido, torna-se necessária a realização de simulações físicas dos processos. No presente estudo, esta determinação foi realizada para a liga SAE HEV8. As simulações físicas foram realizadas através de ensaios de torção a quente, sendo que os dados obtidos evidenciaram os mecanismos de endurecimento e de amaciamento envolvidos na conformação a quente da liga. Os resultados experimentais desta simulação estão sendo utilizados para o planejamento da simulação numérica e elaboração da base de dados do software de simulação numérica por elementos finitos.

Palavras-chave: Simulação física; Superligas de níquel; Válvula; SAE HEV8; Laminação.

HOT ROLLING PHYSICAL SIMULATION OF ALLOY SAE HEV8

Abstract

Numerical simulation of metal forming processes needs a reliable database of the materials involved. Therefore, it becomes necessary to simulate physically the processes. In the present study, such determination was done for SAE HEV8 alloy. The physical simulations were performed by hot torsion test and data obtained evidenced hardening and softening mechanisms involved in the hot forming of the alloy. The experimental results of this simulation are being used to design the numerical simulation and for the database of the finite elements numerical simulation software.

Key words: Physical simulation; Nickel base superalloys; Valves; SAE HEV8; Rolling.

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

² *Engenheiro Pesquisador, Centro de Pesquisa & Desenvolvimento - Villares Metals S.A.*

³ *Engenheiro de Produto, Departamento de Engenharia - Villares Metals S.A.*

⁴ *Engenheiro Pesquisador, Dr ; Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.*

⁵ *Prof. Dr. DEMa – UFSCar - Universidade Federal de São Carlos.*

⁶ *Gerente de Tecnologia – Centro de Pesquisa & Desenvolvimento - Villares Metals S.A.*

1 INTRODUÇÃO

Vários projetos recentes na área de simulação numérica de processos termomecânicos têm sido focados no estudo do comportamento de ligas a base de níquel,⁽¹⁻³⁾ devido a suas características estruturais de difícil conformabilidade. As ligas a base de níquel apresentam variações microestruturais particularmente sensíveis às condições da deformação a quente. Essas ligas possuem baixa energia de falha de empilhamento, de modo que a recristalização é o mecanismo de amaciamento dominante durante a deformação a quente.⁽⁴⁾ Novos grãos são nucleados, quando o material adquire, localmente, níveis suficientes de deformação (densidade de discordâncias) e temperatura. Deste modo, a tendência é a microestrutura apresentar grãos de diferentes tamanhos e níveis de deformação. Após certa quantidade de deformação a quente, quando a taxa de geração de discordâncias torna-se equivalente à taxa de eliminação de discordância pela recristalização, tem-se um estado estacionário com a tensão não variando mais com a deformação em deformações isotérmicas.

O amaciamento durante e entre os passes de laminação desempenha um papel fundamental na deformação a quente. A difícil trabalhabilidade a quente das superligas de níquel é compensada pelo amaciamento da liga por recristalização, o qual é também de suma importância para o refinamento de grão no produto final. O controle eficiente do processamento a quente requer um acurado modelamento do comportamento do material em deformação, incluindo um modelo para o amaciamento e suas variações com a temperatura, heterogeneidades de deformação da barra, quantidade e taxa de deformação.⁽⁵⁾

Em temperaturas elevadas, a recristalização estática (SRX) e meta-dinâmica (MDRX) podem ocorrer simultaneamente em porções diferentes do material, se a deformação anterior tiver sido suficiente para iniciar a recristalização dinâmica (DRX), enquanto que em regiões que não sofreram DRX, ocorre apenas SRX. Durante os primeiros passes da laminação de barras, a deformação geralmente é suficiente para iniciar DRX. No entanto, os passes finais normalmente apresentam deformação nominal abaixo da deformação crítica para DRX.⁽⁶⁻⁸⁾

Assim, existem procedimentos que descrevem o processo de deformação e o desenvolvimento microestrutural, possibilitando a previsão do tamanho de grão do material conformado, bem como a otimização dos parâmetros de processo. A implementação das simulações do processo de laminação em um software de simulação numérica por elementos finitos, assim como suas análises, exigem a ciência dos fenômenos metalúrgicos envolvidos no processo e das corretas propriedades mecânicas do material envolvido.^(9,10)

Dentro deste contexto, torna-se muito importante para a otimização de processo e controle microestrutural de uma determinada liga, conhecer como atuam os mecanismos de amaciamento e de endurecimento desta liga durante processamento a quente. Um laminador da Villares Metals foi modelado a partir da reprodução da conformação a quente da liga SAE HEV8 em barras de seção redonda. Esse estudo é o objeto deste modelamento e da simulação física do processo industrial em escala de laboratório.

A liga SAE HEV8 (nomenclatura Villares Metals: VAT 31-V) é uma liga a base de níquel (Tabela 1) resistente à altas temperaturas, possuindo elevada resistência à sulfetação, boa resistência à corrosão e resistência mecânica elevada até 815°C. Essa liga é largamente utilizada para válvulas de exaustão de motores de alto desempenho, como motores diesel de alta potência.

Tabela 1: Composição química da liga SAE HEV8 (VAT 31-V).

Elemento	Ni	Cr	Nb	Ti	Al	Mo	Fe
% (massa)	56,50	22,50	0,85	2,20	1,20	2,00	Rest.

2 MODELO

A simulação física foi realizada a partir de ensaios conduzidos em uma máquina de torção a quente no Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. O ensaio de torção a quente necessita de determinados parâmetros de processo para simular a conformação. Assim, a laminação da liga SAE HEV8 teve que ser modelada em termos de quantidade de deformação, taxa de deformação e temperatura de cada passe do processamento no laminador Multiline da Villares Metals S.A.

Com base nos dados reais de laminação da liga provenientes da instrumentação do equipamento e do controle supervisorio, foram calculados a deformação média em cada passe, a taxa de deformação em cada passe e o tempo entre passes. A temperatura do material em cada instante da laminação foi obtida pelo software centralizador de dados de processo. O equacionamento dos cálculos para os parâmetros deformação e taxa de deformação (dispostos na Tabela 2) foram feitos com base nas fórmulas de deformação verdadeira ($\varepsilon_v = -\ln(l_f/l_0)$) e taxa de deformação ($\delta\varepsilon/\delta t$). Onde: ε_v é a deformação média, $\delta\varepsilon/\delta t$ a taxa de deformação,

As condições de contorno para simplificações dos cálculos foram: ferramental rígido, raio do cilindro de laminação muito maior que a redução a ser aplicada no material. A laminação iniciou com um tarugo de secção transversal quadrada e a dimensão final foi uma barra de secção transversal circular com 22 mm de diâmetro. Visando simular os parâmetros de processo a Tabela 2 apresenta as condições do ensaio, onde: Δs é a distância entre cadeiras e Δt o intervalo entre passes.

Tabela 2: Condições do ensaio de simulação da laminação do SAE HEV 8.

Cadeira	ε_v	$\delta\varepsilon/\delta t$ (s ⁻¹)	Δs (m)	Δt (s)
1	0,26	2	2,2	5,4
2	0,19	2	3,2	6,5
3	0,30	4	2	3,0
4	0,21	3	7,6	9,3
5	0,29	7	2	1,8
6	0,19	5	3	2,3
7	0,22	9	2	1,2
8	0,18	8	7,3	3,7
9	0,21	16	2	0,8
10	0,17	14	3,3	1,1

3 SIMULAÇÃO FÍSICA EM ESCALA DE LABORATÓRIO

Foram realizados ensaios de torção a quente em resfriamento contínuo utilizando uma seqüência de dez carregamentos, intercalados pelo tempo de espera entre passes, com as quantidades de deformação e nas temperaturas características de cada etapa da laminação da liga SAE HEV8 na Villares Metals S.A.

O corpo de prova era reaquecido até 1.180°C por dez minutos e submetido a um resfriamento contínuo igual ao da planta industrial. Assim que a temperatura de início de laminação era alcançada, o corpo de prova era ensaiado por torção com uma deformação equivalente a do primeiro passe de laminação. Em seguida, ocorria o descarregamento e a espera até o término do tempo entre passes previsto para o início do segundo passe. Neste instante, o corpo de prova era ensaiado por torção até a deformação real do segundo passe. Desta forma, o ensaio se processava até o décimo e último passe, gerando uma série de curvas tensão vs. deformação característica da seqüência de passes na laminação.

Outros ensaios também foram realizados, com o intuito de conhecer a influência da taxa de deformação e da temperatura nos mecanismos de amaciamento e de encruamento da liga. Foram realizados ensaios isotérmicos e contínuos com taxas de deformação fixas de $2s^{-1}$ e $15s^{-1}$ a 1100°C e 1150°C, após encharque a 1180°C. Simulou-se a laminação da liga com a mesma seqüência de passes proposta, mas aplicando todos os carregamentos e deformações do plano de passe em uma taxa de deformação fixa.

4 RESULTADOS

A Figura 1 apresenta o resultado do ensaio de carregamentos múltiplos seqüenciais aplicado na liga SAE HEV8 para simulação do processo de laminação a quente. Observando a forma das curvas de escoamento plástico, pode-se afirmar que ocorre o amaciamento entre deformações durante toda a seqüência de passes de laminação do material, ou seja, há recristalização entre todos os passes da laminação. A determinação da deformação crítica para início da recristalização dinâmica se faz necessária para a caracterização do amaciamento. Assim, esse resultado já é suficiente para motivar um estudo mais profundo da cinética de amaciamento da liga por recristalização, o que será conduzido no futuro.

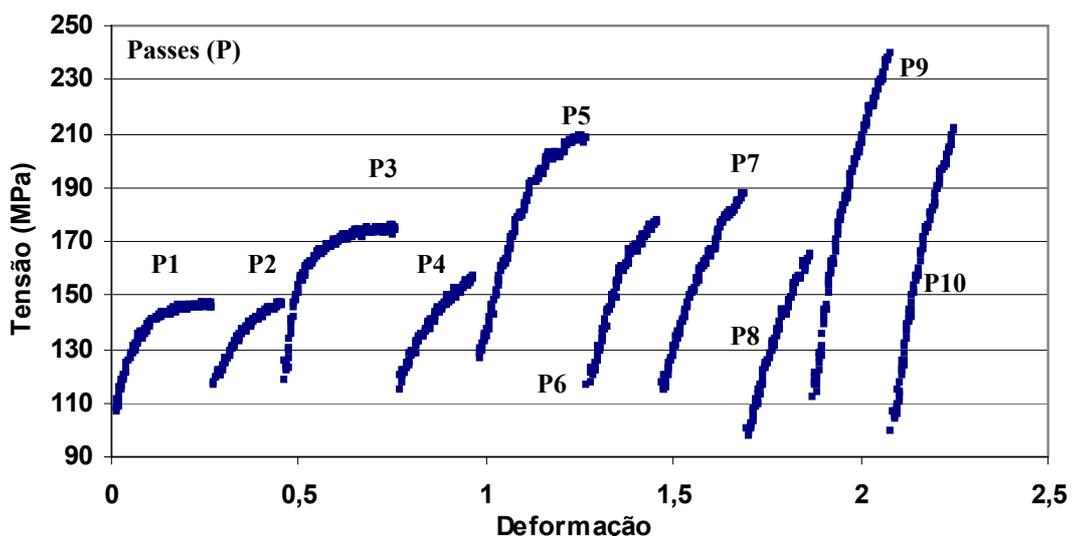


Figura 1: Simulação da laminação do SAE HEV8 por ensaio de torção.

A partir do quinto carregamento, pode-se notar claramente a influência do aumento de taxa e queda da temperatura de deformação no encruamento da liga,

observando o aumento abrupto no nível de tensões exigido para a deformação do material e no formato das curvas. Os dois últimos carregamentos mostram claramente os fenômenos de encruamento e recristalização estática (SRX) entre os passes 9 e 10, como mostrado na Figura 1.

A Figura 2 mostra as curvas de escoamento plástico dessa liga realizadas através de ensaios isotérmicos contínuos em duas taxas e temperaturas diferentes: A) na temperatura de 1.100°C com taxa 15s^{-1} , representando os passes finais do processo de laminação; e B) na temperatura de 1.150°C com taxa 2s^{-1} , representando os passes iniciais.

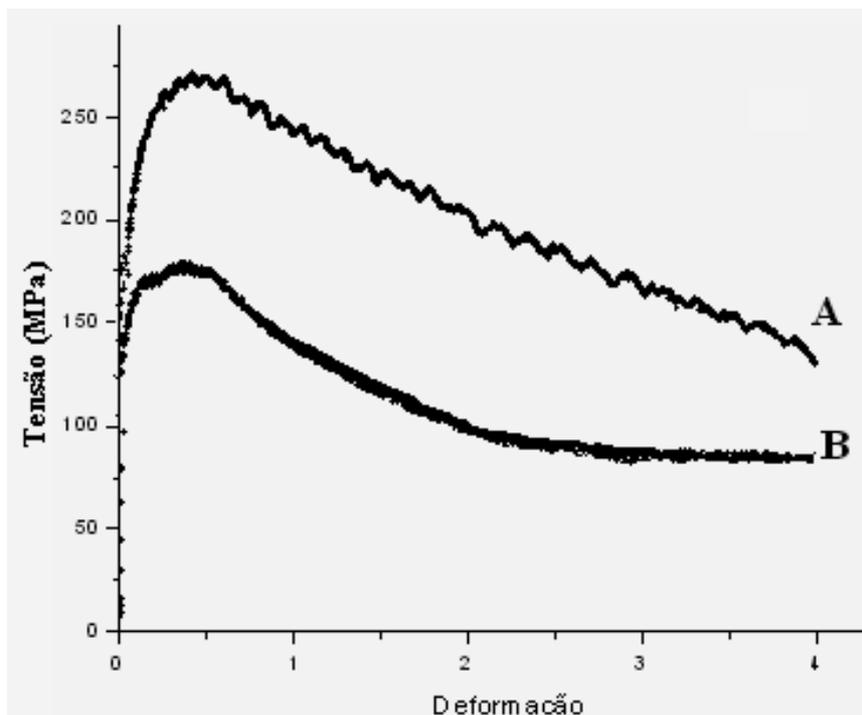


Figura 2: Curvas tensão vs. deformação da liga SAE HEV8 para **A)** $T = 1.100^{\circ}\text{C}$ e taxa de deformação 15s^{-1} e **B)** 1.150°C e taxa de deformação 2s^{-1} .

Pode-se observar na Figura 2 que o nível de tensões (observar tensão de pico) é mais elevado para a curva A. Além disso, observa-se o início do estado estacionário na curva B a partir da deformação de três. Para a curva A, de taxa de 15s^{-1} e 1.100°C , o material não atinge o regime estacionário antes da ruptura do corpo de prova, mostrando indícios da ocorrência de fluxo localizado e alteração no mecanismo de deformação. Nesta faixa de temperatura, acima de 1.000°C , não é esperada a precipitação de fases endurecedoras na matriz austenítica, de modo que essa alteração no comportamento plástico pode ser associado às distorções reticulares devido à solução sólida de átomos, os quais restringem a deformação plástica de modo mais acentuado para taxas de deformação mais elevadas e temperaturas mais baixas.

No sentido de conhecer mais sobre a influência da taxa na deformação a quente por laminação de barras da liga SAE HEV8, ensaios de carregamentos múltiplos sequenciais foram conduzidos para taxas de deformação fixas. A Figura 3 mostra ensaios de dez passes de deformação, ou seja, dez carregamentos em torção a quente, intercalados pelo tempo de espera entre passes e nas temperaturas (em resfriamento contínuo) características de cada etapa da

laminação da liga SAE HEV8 na Villares Metals S.A., para as taxas fixas de deformação $2s^{-1}$ e $7s^{-1}$.

Observa-se que a taxa de deformação influencia decisivamente o nível de esforço necessário para a conformação da barra, de modo que os ensaios a $7s^{-1}$ apresentam tensões claramente mais elevadas que o ensaio a $2s^{-1}$. Outra característica notável na Figura 3 é o formato das quatro primeiras curvas. Observa-se a partir dessa diferença geométrica nessas curvas que a cinética do amaciamento é notavelmente mais lenta para taxas de deformação mais elevadas.

Assim, para temperaturas de conformação acima da temperatura na qual a recristalização é ativada para a liga SAE HEV8, como são as temperaturas de laminação a quente desta liga na Villares Metals S.A., um parâmetro a ser dominado para o controle do processo e do tamanho de grão final do material é a taxa de deformação.

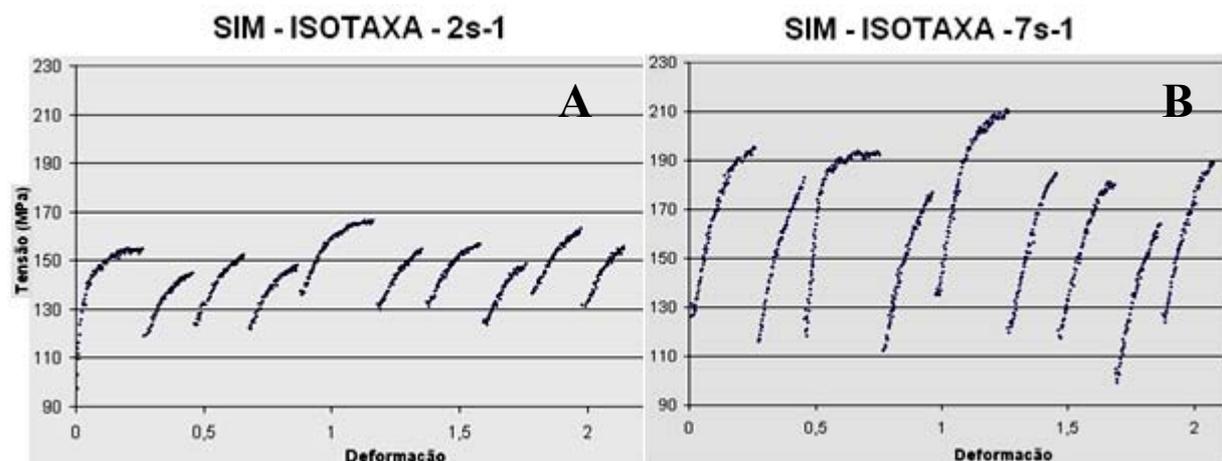


Figura 3: Simulação da laminação do SAE HEV8 por ensaio de torção em taxas constantes A) $2s^{-1}$ e B) $7s^{-1}$.

5 CONCLUSÕES

Para as condições experimentais empregadas neste trabalho, pode-se concluir que:

- 1 Ocorre o amaciamento entre todos os passes durante a seqüência de passes de laminação do material;
- 2 Há recristalização entre todos os passes da laminação;
- 3 A taxa de deformação é muito importante para a definição do mecanismo de deformação;
- 4 Para temperaturas de conformação acima da temperatura na qual a recristalização é ativada para a liga SAE HEV8, como são as temperaturas de laminação a quente desta liga na Villares Metals S.A., um parâmetro a ser dominado para o controle do processo é a taxa de deformação;
- 5 A simulação de processos termomecânicos tem grande relevância na caracterização mecânica e metalúrgica de uma liga durante processamento. A compreensão dos fenômenos envolvidos na recristalização dinâmica, meta-dinâmica e estática do material, bem como precipitação de novas fases durante processamento a quente (e suas correlações com o comportamento da evolução das curvas de escoamento) é a chave para a determinação dos melhores parâmetros de processo para a conformação dos metais.

REFERÊNCIAS

- 1 HARRER O., WALLNER S., SOMMITSCH C., WEISER V. "Micoestructure Simulation in Radial Forging of Nickel Base Alloys". Proceedings of the 8th International ESAFORM Conference on Material Forming, April 27-29, 2005, Cluj-Napoca, Romania, D. Banabic (Ed.), The Romanian Academy. Publishing House Bucharest, Volume I, p. 515-518.
- 2 HARRER O., WALLNER S., WEISER V. "Numerical Simulation of Forging the Alloy 718". Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity, October 9 – 13, Verona, Italy, 2005.
- 3 ZHAO X., GUEST R. P., TIN S., COLE D., BROOKS J. W., PEERS M. "Modelling Hot Deformation of Inconel 718 Using State Variables". Materials Science and Technology, Vol. 20, November 2004.
- 4 PADILHA A.F., SICILIANO Jr. F. "Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura". 3^a ed. rev. e ampl.- São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 5 POLIAK E.I., JONAS J.J. "Prediction of Interpass Softening from the Strain Hardening Rate Prior to Unloading". ISIJ International, Vol. 44, n° 11, pp. 1874-1881 - 2004.
- 6 MACCAGNO T.M., JONAS J.J., HODGSON P.D. "Spreadsheet Modelling of Grain Size Evolution During Rod Rolling". ISIJ International, Vol. 36, n° 06, pp. 720 – 728, 1996.
- 7 POLIAK E.I., JONAS J.J. "The Critical Strain for Dynamic Recrystallization in Rolling Mills". Materials Science Forum, Vols. 426-432, pp. 57-66, 2003.
- 8 POLIAK E.I., JONAS J.J. "Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation". ISIJ International, Vol. 43, n° 5, pp. 684-691, 2003.
- 9 DEFORMTM 3D Version 5.1 User's Manual - Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, Ohio – 2006.
- 10 JARRETA D. D., BALANCIN O., BARBOSA C. A., SOUZA E. N. "Simulação Física da Conformação a Quente da Liga Inconel 718 para Base de Dados de Software de Simulação Numérica". ABM – 62º Congresso Intenacional - Vitória - ES, 2007.