



# PREVISÃO DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DO AÇO 42CrMo4 EM ALTAS TEMPERATURAS - UMA REVISÃO<sup>1</sup>

Vinícius Martins<sup>2</sup>  
 Daiana Mello Margutti<sup>3</sup>  
 Paulo Ricardo Böesch Júnior<sup>3</sup>  
 Estela Knopp Kerstner<sup>3</sup>  
 Lirio Schaeffer<sup>4</sup>

## Resumo

O conhecimento das curvas de escoamento é de fundamental importância para o cálculo de esforços e para a simulação numérica de processos de deformação a quente. Assim, se faz necessário determinar o comportamento da curva tensão – deformação para conhecer os melhores parâmetros de processo para o forjamento a quente do aço DIN 42CrMo4 (AISI 4140). Os métodos para a construção da curva de escoamento podem ser o de ensaio de compressão, ensaio de tração ou ensaio de torção, onde cada um apresenta suas vantagens e desvantagens. Neste trabalho serão analisados modelos matemáticos criados para prever a curva de escoamento em diferentes temperaturas e velocidades de deformação além de relacionar os modelos com resultados experimentais obtidos por diversos autores. Busca-se também avaliar as vantagens e desvantagens dos principais métodos práticos de construção das curvas de escoamento.

**Palavras-chave:** DIN 42CrMo4; Curva de escoamento; Deformação a quente; Equações construtivas.

## PREDICTION OF FLOW STRESS 42CrMo4 STEEL IN HIGH TEMPERATURES - A REVIEW

### Abstract

The knowledge of flow curves is of fundamental importance for the calculation of effort and for the numerical simulation of hot deformation processes. Thus, it is necessary to determine the behavior of the curve stress - strain to know the best process parameters for hot forging of steel DIN 42CrMo4 (AISI 4140). The methods for construction of the flow curve can be of the compression test, tensile test and torsion test, where each one has its advantages and disadvantages. This work will be analyzed mathematical models created to predict the flow curve at different temperatures and strain rates also relate the models with experimental results obtained by various authors. Search also evaluate the advantages and disadvantages of the main practical methods of construction of the flow curves.

**Key words:** DIN 42CrMo4; Flow curve; Hot deformation; Constructive equations.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Professor do Instituto Federal Sul-rio-grandense – IFSul – Campus Sapucaia do Sul. Doutorando do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. [viniciushiper@yahoo.com.br](mailto:viniciushiper@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Mestrandos do PPGEM. Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil. [daiana.margutti@ufrgs.br](mailto:daiana.margutti@ufrgs.br) [paulo.boesch@ufrgs.br](mailto:paulo.boesch@ufrgs.br) [estelakerstner@yahoo.com.br](mailto:estelakerstner@yahoo.com.br)

<sup>4</sup> Prof. Dr. -Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil. [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br)

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a geração de energia elétrica através da utilização dos ventos tem avançado substancialmente. As turbinas eólicas captam uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia mecânica de rotação. O eixo do rotor acionando o gerador elétrico transforma parte dessa energia mecânica de rotação em energia elétrica. A necessidade de transmissão da energia mecânica produz uma demanda de peças conformadas como, por exemplo, eixos e engrenagens. Tais peças, pelo porte avantajado, são normalmente produzidas por forjamento em matriz aberta e demandam cada vez maiores exigências, tanto em relação ao material quanto ao processo de fabricação.

A Figura 1 mostra esquematicamente um aerogerador, sendo dado destaque ao eixo principal forjado e aos anéis, que podem ser laminados ou forjados e que servirão para produção de engrenagens. Os principais aços utilizados na produção desses componentes são 42 CrMo4, 50 CrMo4, 34 CrNiMo6 ou 30 CrNiMo8 para eixos, 18 CrNiMo7-6 ou 15 CrMoV5-10 para engrenagens e 42 CrMo4, 50 CrMo4 ou 30 CrMoV9 para acoplamentos e rolamentos.

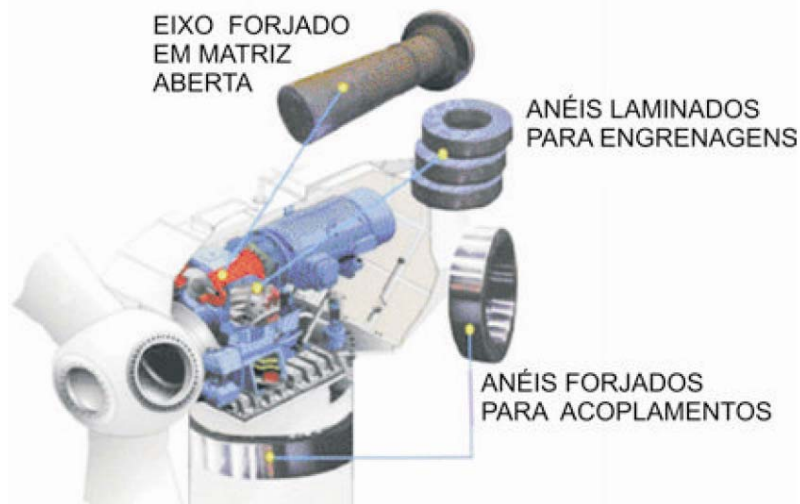


Figura 1. Eixo e anéis de um aerogerador.<sup>(1)</sup>

Dentro desse contexto, é necessário determinar parâmetros para o processo de forjamento a quente em matriz aberta. E, inicialmente devem-se conhecer as propriedades do material que determinam significativamente a resistência e durabilidade destes componentes. Assim, neste estudo será descrito os métodos de determinação das curvas de escoamento do material 42 CrMo4 (AISI 4140).

## 2 AÇO DIN 42CrMo4 (AISI 4140)

Este material a base de cromo-molibdênio tem a característica de endurecimento relativamente elevado e é entre os aços versáteis o mais extensamente utilizado em elementos de máquinas. O índice de cromo e o molibdênio fornecem resistência elevada e melhoram as propriedades mecânicas como dureza. Esta classe é especialmente apropriada para forjamento.

Possui boa ductilidade e resistência ao choque sendo resistente a fluência até temperaturas de 540°C, mantendo estas propriedades mesmo após longa exposição. A resistência ao desgaste pode consideravelmente ser aumentada

através de tratamentos térmicos superficiais por chama ou indução. O tratamento térmico superficial pode ser atingido através da combinação de tempera por indução e nitretação acarretando ganhos reais a superfície. A Tabela 1 apresenta a composição química do Aço DIN 42CrMo4 (AISI 4140).

**Tabela 1:** Composição química do aço DIN 42CrMo4<sup>(2)</sup>

Aço	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%P
<b>DIN 42CrMo4</b>	0,38-0,43	Max 0,04	0,75-1,00	0,8-1,10	0,15-0,35	Max 0,035

### 3 FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA

O forjamento em matriz aberta ou forjamento livre é caracterizado pelo fato de o material ser comprimido entre a matriz superior e a matriz inferior, movimentando-se livremente nas direções de alargamento e alongamento. O material a ser forjado é segurado por um manipulador cujo movimento é combinado com o movimento da prensa.

Através do forjamento livre, objetiva-se obter uma determinada forma e também a destruição da estrutura bruta de fusão, a fim de conseguir boa qualidade do produto final. A qualidade da peça em matriz aberta depende do controle de alguns fatores, por exemplo, largura, configuração, sobreposição da matriz, geometria do lingote, temperatura, variação de temperatura, deformação, geometria da peça final.



**Figura 2.** Forjamento em matriz aberta.<sup>(3)</sup>

As principais peças forjadas em matriz aberta são: eixos de navios e de turbinas, virabrequins, anéis de grande porte, ganchos, correntes, âncoras, alavancas, excêntricos, ferramentas agrícolas. A Figura 3 apresenta algumas dessas peças.



**Figura 3.** Eixos e anéis forjados em matriz aberta.<sup>(4)</sup>

## 4 IMPORTÂNCIA DA CURVA DE ESCOAMENTO NO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE

O conhecimento das tensões que ocorrem durante a deformação plástica e das forças resultantes é essencial para o projeto de ferramentas e máquinas de conformação mecânica. Estas tensões são dependentes da resistência do material à deformação, atrito na interface peça/matriz e da geometria do sistema e podem ser calculada usando métodos como teoria das tiras ou elementos finitos.

Qualquer que seja o método de cálculo escolhido, o conhecimento da resistência ao escoamento do material é indispensável para alimentar o cálculo. A resistência ao escoamento pode ser descrita em termos de uma curva relacionando o grau de deformação com tensão correspondente a esta deformação.

## 5 MÉTODOS EXPERIMENTAIS DE OBTENÇÃO DAS CURVAS DE ESCOAMENTO

As curvas de escoamento são normalmente obtidas através do ensaio de tração, compressão ou torção. A seguir descrevem-se as características de cada método.

### 5.1 Ensaio de Compressão

O ensaio de compressão é um processo que necessita de boa lubrificação para determinar curvas de escoamento com precisão confiável, mantendo um estado de tensão uniaxial, ou seja, evitando a forma de barril do corpo de prova.

Este ensaio justifica-se pela possibilidade de testar o material até altos valores de deformação, simplicidade de confecção dos corpos de prova e execução em máquinas de ensaio convencionais. Porém, como desvantagem tem-se a deformação elástica das placas de compressão e o atrito que causa um estado triaxial de tensões levando a erros na medição da força a partir de  $\varphi=0,7$ .

### 5.2 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é o mais simples para a determinação das curvas de escoamento além da vantagem de ser um ensaio normalizado. Mas, a aplicabilidade deste ensaio é limitada pelo grau de deformação ser relativamente pequeno ( $\varphi=0,2-0,3$ ) devido ao corpo de prova iniciar a estricção e não se tem mais o estado uniaxial de tensões.

### 5.3 Ensaio de Torção

A vantagem da obtenção das curvas de escoamento pelo ensaio de torção são as grandes deformações atingidas com velocidades similares às aplicadas em escala industrial e a evolução microestrutural do material ao longo das etapas de conformação mecânica, sendo possível um rápido resfriamento da amostra em qualquer etapa do ensaio. Porém, na realização destes ensaios com a temperatura elevada surge o problema onde o modelo matemático supõe que a tensão de escoamento seja independente da velocidade de deformação, o que não ocorre neste ensaio.<sup>(5)</sup>

## 6 MÉTODOS PARA PREDIZER AS CURVAS DE ESCOAMENTO

Os métodos para prever a tensão de escoamento, desenvolvidos por diferentes autores são apresentados para o aço DIN 42CrMo4 (AISI 4140) em diferentes condições de deformação.

### 6.1 Método de Misaka

Misaka e Yoshimoto<sup>(6)</sup> desenvolveram a seguinte equação constitutiva para determinar a tensão de escoamento associada ao processamento de aços.

$$\sigma_{Misaka} = 9,8 \exp(0,126 - 1,75[C] + 0,597[C]^2 + \frac{2861 + 2968[C] - 1120[C]^2}{T + 273}) \dot{\epsilon}^n \dot{\epsilon}^m \quad \text{Eq. (1)}$$

A Equação 1 é aplicada para as seguintes condições: Teor de carbono (C):  $\approx 1,2\%$ ; Temperatura (T): 750 a 1200°C; Deformação ( $\epsilon$ ):  $\approx 50\%$ ; Velocidade de deformação ( $\dot{\epsilon}$ ): 30-200s<sup>-1</sup>. A sensibilidade à velocidade de deformação ( $m$ ) e o coeficiente de encruamento ( $n$ ) estão descritos na Tabela 2 para os casos de torção e compressão.

**Tabela 2.** Parâmetros do material DIN 42CrMo4<sup>(6)</sup>

Método testado	$m$	$n$
Torção	0.112	0.468
Compressão	0.171	0.968

A equação de Misaka foi atualizada levando em consideração os efeitos dos elementos de liga e da recristalização dinâmica.<sup>(7)</sup> A equação constitutiva atualizada é demonstrada na Equação 2, e apresentado um fator de correção na Equação 3:

$$\sigma_{(Misaka)updated} = (f\sigma_{Misaka})(1 - X_{dym}) + k\sigma_{SS}X_{dym} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$f = 0,835 + 0,51[Nb] + 0,098[Mn] + 0,128[Cr]^{0,8} + 0,144[Mo]^{0,3} + 0,175[V] + 0,01[N] \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde  $\sigma_{(Misaka)updated}$  indica a tensão de escoamento do aço contendo elementos de liga,  $\sigma_{SS}$  é a tensão em estado estacionário,  $k=1,14$  é um parâmetro que converte a tensão de escoamento em tensão de escoamento média,  $X_{dym}$  é a fração do volume de recristalização dinâmica.

Segundo Devadas<sup>(8)</sup> os resultados preditos para a tensão de escoamento de um aço baixa liga foram superestimados com o uso desta equação.

### 6.2 Método de Shida

A Equação 4 foi obtida através de dados de um ensaio de compressão para altas taxas de deformação.

$$\sigma = \sigma_d(C, T) f_w(\dot{\epsilon}) f_r(\dot{\epsilon}) \quad \text{Eq. (4)}$$

A partir dos ensaios, Shida<sup>(9)</sup> expressou a tensão de escoamento dos aços em função do teor de carbono (C), da deformação ( $\epsilon$ ), da taxa de deformação ( $\dot{\epsilon}$ ) e temperatura (T), conforme foi apresentado nas Equações 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

$$\sigma_d = 0,28 \exp\left(\frac{5,0}{T} - \frac{0,01}{C+0,05}\right) \quad \text{Eq. (5)}$$

$$T[K] = \frac{T[^\circ C] + 273}{1000} \quad \text{Eq. (6)}$$

$$f_w(\epsilon) = 1,3 \left(\frac{\epsilon}{0,2}\right)^n - 0,3 \left(\frac{\epsilon}{0,2}\right) \quad \text{Eq. (7)}$$

$$n = 0,41 - 0,07C \quad \text{Eq. (8)}$$

$$f_r(\dot{\epsilon}) = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10}\right)^m \quad \text{Eq. (9)}$$

$$m = (-0,019C + 0,126)T + (0,076C - 0,05) \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde  $f_w(\epsilon)$  e  $f_r(\dot{\epsilon})$  são funções da deformação e da taxa de deformação respectivamente. A equação é aplicável na seguinte faixa: teor de carbono: 0,07-1,2%; temperatura: 700-1200°C; deformação:  $\approx 70\%$  e taxa de deformação:  $\approx 100\text{s}^{-1}$ .

### 6.3 Método de Kim/Voce

A equação desenvolvida por Voce pode descrever a tensão de escoamento para uma faixa de deformações e taxas de deformações. Kim,<sup>(10)</sup> desenvolveu uma equação baseada no modelo matemático de Voce, porém considerando a recuperação e a recristalização dinâmica. Durante o processo termomecânico os fenômenos metalúrgicos mais significativos são: encruamento (WH), recuperação dinâmica (DRV) e recristalização dinâmica (DRX), conforme mostra a Figura 4.

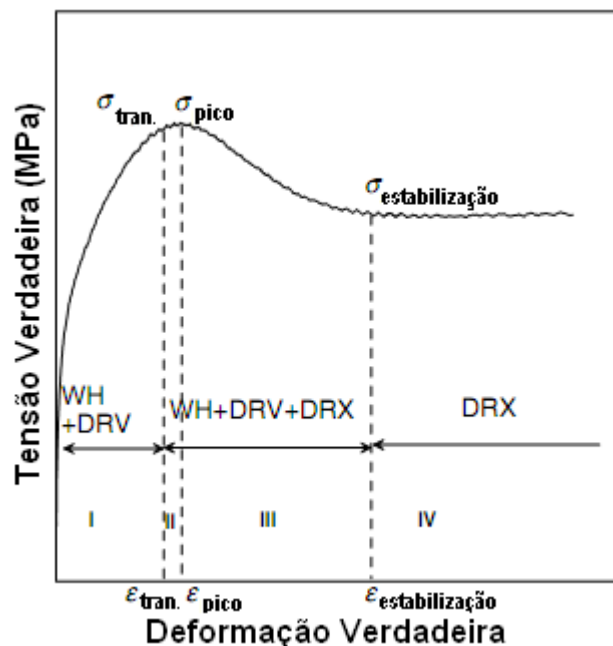


Figura 4. Curva de escoamento em temperatura elevada.<sup>(11)</sup>

Assim, a curva de escoamento pode ser dividida nas três regiões. Para a avaliação da primeira região utilizou-se a Equação 11.

$$\sigma_{(WH+DRV)} = \sigma_p [1 - \exp(-Ca)]^m \quad \text{Eq. (11)}$$

O coeficiente de carbono ( $C$ ) e o expoente de encruamento ( $m$ ) são dependentes das condições de deformação. Os parâmetros  $C$  e  $m$  são considerados constantes, porém, estes são função das condições de deformação (taxa de deformação e temperatura). Assim, estes parâmetros são considerados uma função do parâmetro adimensional,  $Z/A$  (Tabela 3).

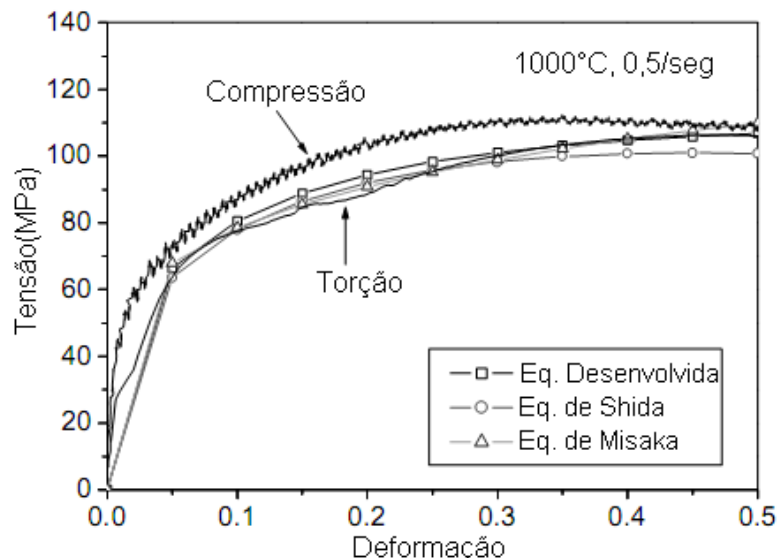
Além disso, os valores críticos, tais como  $\epsilon_c$ ,  $\sigma_p$  e  $\sigma_{ss}$ , são função de  $Z/A$ , descritos na Tabela 3. Estes são obtidos pela análise das curvas de escoamento em diferentes condições de deformação.

**Tabela 3.** Parâmetros para a liga DIN 42CrMo4<sup>(10)</sup>

Método Testado	Expressão
Torção	$C = 6.45(Z/A)^{-0.13}$ $m = 0.26 (Z/A)^{0.148}$ $m' = 1.578 (Z/A)^{-0.02}$ $\epsilon_c = 0.252 (Z/A)^{0.158}$ $\epsilon^* = 0.528 (Z/A)^{0.1675}$ $\sigma_p = 82.74 + 15.24 \ln (Z/A)$ $\sigma_{ss} = 72.6 + 12.07 \ln (Z/A)$

A Figura 5 mostra as curvas de escoamento previstas e experimentais para a região WH+DRV. Os resultados mostram que as curvas previstas através das equações de Shida e Misaka possuem concordância com as curvas obtidas experimentalmente.

Algumas variações são observadas quando a deformação ultrapassa 0,3 para a equação de Shida.



**Figura 5.** Comparação entre as curvas de escoamento previstas e experimentais para o DIN 42CrMo4 na região WH+DRV.<sup>(10)</sup>

Para a região DRX, a curva de escoamento pode ser descrita pelas Equações 12 e 13.

$$\sigma > \sigma_p \quad \sigma_{DRX} = (\sigma_p - \sigma_{SS}) \left[ \frac{X_{DRX} - X_{DRX}^*}{1 - X_{DRX}^*} \right] \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\sigma < \sigma_p \quad \sigma_{DRX} = 0 \quad \text{Eq. (13)}$$

Onde  $\sigma_{SS}$  é a tensão em estado estacionário,  $X_{ep}$  é a fração de volume de DRX na tensão de pico e  $X_{DRX}$  é a fração de volume de DRX em qualquer deformação. A Equação 14 é aplicada para a fração de grãos recristalizados dinamicamente.

$$X_{DRX} = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon - \epsilon_c}{\epsilon^*} \right)^m \right] \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde  $m$  é a constante de Avami's,  $\epsilon_c$  representa a deformação crítica para o início da recristalização dinâmica e  $\epsilon^*$  é a deformação para a máxima taxa de amolecimento. A alteração na curva de escoamento é atribuída a evolução da microestrutura como a recristalização dinâmica. Assim, a evolução DRX pode ser analisada a partir da inclinação da curva de escoamento. O início e o término da região DRX e a deformação para a máxima taxa de encruamento, pode ser analisada pelos pontos de inflexão das curvas na região do encruamento e na região de recuperação dinâmica.

A Figura 6 mostra a fração de volume calculado para a região DRX em diferentes temperaturas. A fração de volume aumenta com a temperatura porque a região DRX é termicamente ativa. Nesta região ocorre um processo contínuo de deformação, nucleação de grãos com posterior migração para os contornos de grão o que ocasiona um aumento da fração de volume com a elevação da deformação. Com o



aumento da deformação a  $X_{DRX}$  chega a um valor limite de 100% onde a tensão de escoamento atinge o estado estacionário.

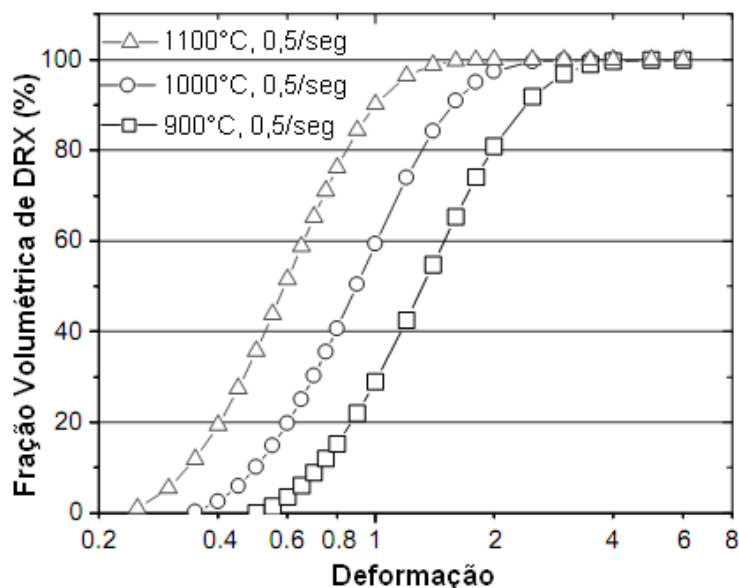


Figura 6. Fração de volume calculado na região DRX para diferentes condições de deformação.<sup>(10)</sup>

Na região DRX da curva de escoamento observa-se uma queda de tensão. Assim, a  $\sigma_{DRX}$  é proporcional a fração de volume DRX que é corrigido com  $X_{ep}$ . A curva de escoamento total pode ser expressa pela equação 15.

$$\sigma_{total} = \sigma_{(WH+DRV)} - \sigma_{DRX} \quad \text{Eq. (15)}$$

A Figura 7 mostra a curva tensão-deformação experimental e predita para o aço DIN 42CrMo4 em diferentes condições de deformação onde se observa que as curvas de tensão-deformação preditas através da equação modificada por Kim estão em concordância com as curvas experimentais.

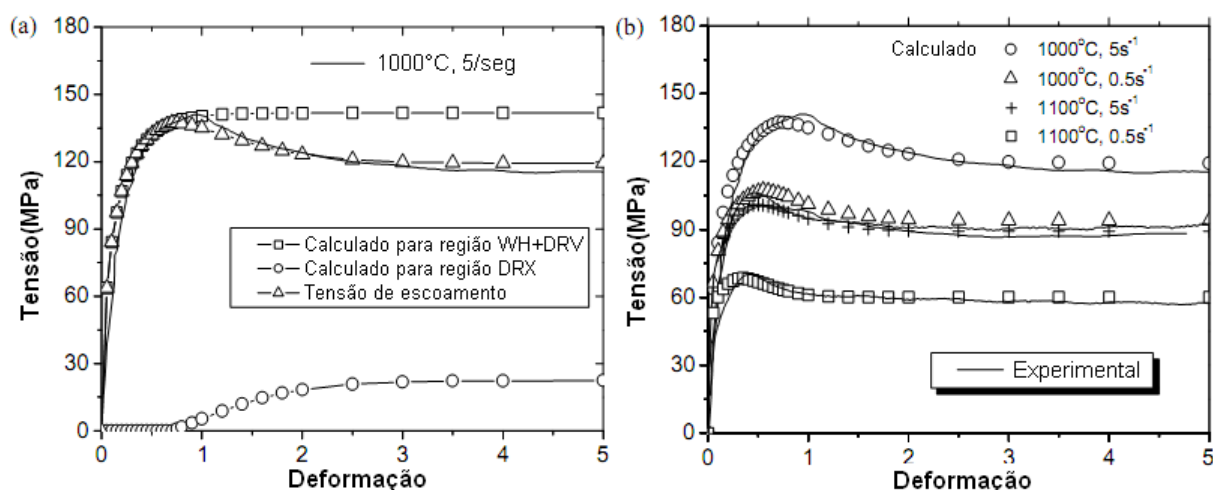


Figura 7. Comparação entre a curva tensão-deformação experimental e predita para o aço DIN 42CrMo4 em diferentes condições de deformação.<sup>(10)</sup>

## 6.4 Método de Lin

Para estabelecer parâmetros de processamento a quente para o aço DIN 42CrMo4, Lin<sup>(12)</sup> realizou ensaios de compressão a temperaturas de 850°C a 1.150°C e taxas de deformação de 0,01 a 50s<sup>-1</sup>. O corpo de prova foi usinado com 10 mm de diâmetro e 12 mm de altura.

A partir dos dados de tensão-deformação, a taxa de encruamento pode ser calculada. A diminuição da taxa de encruamento pode estar associado a nucleação de novos grãos e ao início da recristalização dinâmica. As tensões críticas são determinadas com base nos pontos de inflexão.

Assim, a taxa de encruamento  $\theta$  pode ser formulada como função linear da tensão de escoamento apresentada na Equação 16.

$$\theta = \frac{\partial \sigma}{\partial s} = L\sigma + B \quad \text{Eq. (16)}$$

Onde  $L$  é um parâmetro do material sensível a temperatura e a taxa de deformação.  $B$  é uma constante do material para uma dada temperatura e taxa de deformação. A partir da equação observa-se que  $\theta$  é zero para a tensão de pico. O valor de  $B$  pode ser avaliado considerando as condições de contorno:

$$\sigma = \sigma_p \quad s = s_p \quad \text{Eq. (17)}$$

A equação 16 pode ser transformada na equação 18:

$$\sigma = \sigma_p \left[ 1 - \left( \frac{s_p - s}{s_p} \right) e^{L\sigma} \right] \quad \text{Eq. (18)}$$

Onde a  $\sigma_p$  é a tensão de pico e  $s_p$  é deformação correspondente. O parâmetro  $L$  é definido como o coeficiente de atenuação antes da tensão de pico. Para fazer uso da equação é necessário determinar o parâmetro  $L$  e a tensão de pico para as diferentes condições de deformação.

Segundo Lin, as equações 19 a 22 para o aço DIN 42CrMo4 são as seguintes:

$$L = s^{-0.0666} \dot{\epsilon}^{0.0027} \quad \text{Eq. (19)}$$

$$s_p = 7,28 \times 10^{-4} d_0^{0.81} \dot{\epsilon}^{0.2106} \exp\left(\frac{51915}{RT}\right) \quad \text{Eq. (20)}$$

$$\sigma_p = 122,0 \ln \left\{ \left[ \frac{Z}{A} \right]^{1/8,1434} + \left\{ \left[ \frac{Z}{A} \right]^{2/8,1434} + 1 \right\}^{1/2} \right\} \quad \text{Eq. (21)}$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{469,34}{RT}\right) = A [\sinh(0,0082\sigma)]^{8,1434} \quad \text{Eq. (22)}$$

$$A_1 = 1,297 \times 10^{21} \quad (850^\circ\text{C})$$

$$A_1 = 3,757 \times 10^{19} \quad (950^\circ\text{C})$$

$$A_1 = 1,819 \times 10^{19} \quad (1050^\circ\text{C})$$

$$A_1 = 1,359 \times 10^{17} \quad (1150^\circ\text{C})$$

A fim de validar este conjunto de equações para o aço DIN 42CrMo4, Lin realizou ensaios experimentais e traçou as curvas comparativas com os resultados preditos para diferentes taxas de deformação e diferentes temperaturas. Pode-se observar que o modelo desenvolvido fornece uma estimativa precisa para a tensão de escoamento da liga DIN 42CrMo4. No entanto, as limitações deste modelo constitutivo é a sua incapacidade de prever a curva de escoamento para deformações muito baixas (por exemplo, menos de 0,05), porque os valores da taxa de encruamento são elevados quando a deformação é muito pequena. A Figura 8 apresenta a comparação entre as tensões de escoamento preditas e experimentais para o aço DIN 42CrMo4 para diferentes taxas de deformação e temperaturas de 850°C; 950°C; 1.050°C e 1.150°C.

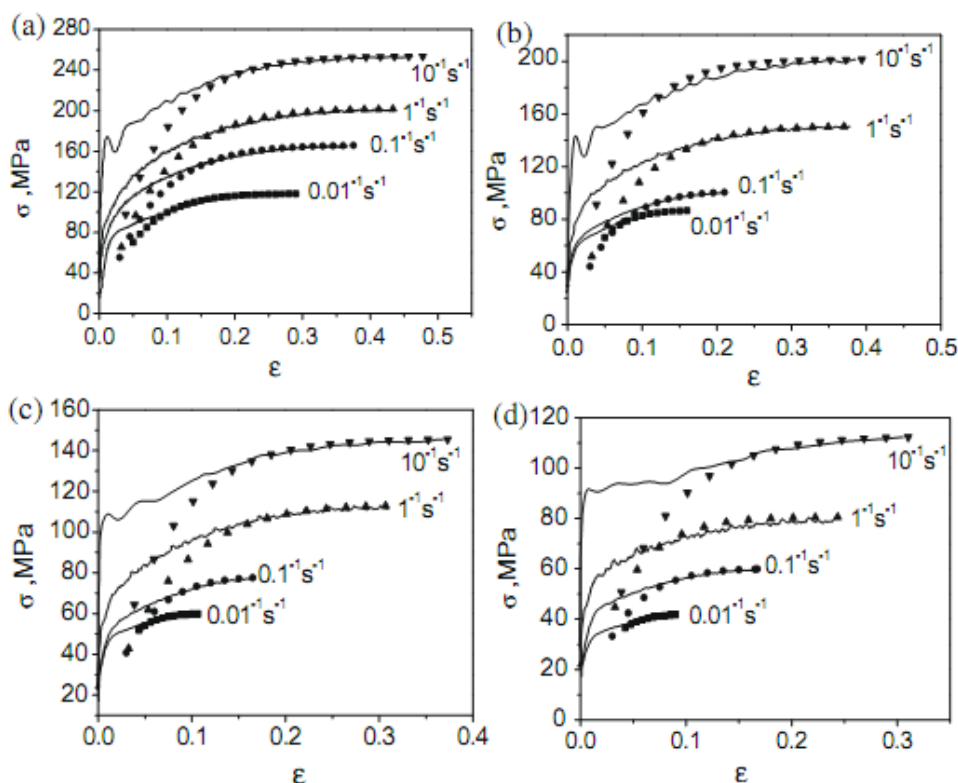


Figura 8. Comparação entre as tensões de escoamento preditas e experimentais.

## 7 CONCLUSÃO

As características de deformação do aço DIN 42CrMo4 foram investigadas através de ensaios de compressão e torção para diferentes temperaturas e taxas de deformação. Baseando-se em dados experimentais, diferentes autores, que descreveram equações constitutivas para prever a curva de escoamento, sendo que alguns incorporam os efeitos de encruamento, recuperação e recristalização dinâmica.

Misaka e Yoshimoto desenvolveram a equação constitutiva para determinar a tensão de escoamento associada ao processamento de aços. Enquanto Shida expressou a tensão de escoamento dos aços em função do teor de carbono, da deformação, da taxa de deformação e da temperatura. Durante a evolução dos métodos matemáticos, Kim desenvolveu uma equação com base no modelo matemático de Você considerando a recuperação e a recristalização dinâmica. Posteriormente Lin realizou ensaios de compressão a temperaturas de 850 a 1150°C e taxas de



deformação de  $0,01 \text{ s}^{-1}$  a  $50 \text{ s}^{-1}$  para estabelecer parâmetros de processamento à quente do aço DIN 42CrMo4.

De maneira geral, a comparação entre as curvas preditas e os resultados experimentais confirma que as equações desenvolvidas podem ser usadas para modelar a resposta de forjamento de aço DIN 42CrMo4 conforme mostram os trabalhos referenciados.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e as instituições de apoio financeiro como CNPq e CAPES pelo projeto “Brazilian German Collaborative Reserch Initiative in Manufacturing Technology” (BRAGECRIM).

## REFERÊNCIAS

- 1 ADOLF, W. W.; Windkraftenergie: Ohne geschmiedete Anlagenteile nicht denkbar. Schmiede-Journal, März, 2002.
- 2 CATÁLAGO VILLARES METALS. Disponível em <http://www.villaresmetals.com.br> Acesso em 20 julho 2010.
- 3 FORJAMENTO. Disponível em: <http://www.easthamforge.com/efpg2.htm>. Acesso em 13 agosto 2010.
- 4 EIXO FORJADO. Disponível em <http://www.euskalforging.com/ingles/2proceso6.html>. Acesso em 10 setembro 2010.
- 5 JARRETA, D. D.; SOUZA E N; BALANCIN, O; BARBOSA, C. A. Análise crítica da base de dados de software de simulação numérica para conformação a quente da liga vat® 718. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.5, n.1, p. 28-34, jul.-set. 2008
- 6 MISAKA, Y., YOSHIMOTO, T. Formulation of mean resistance of deformation of plain carbon steel at elevated temperature. J. Jpn. Soc. Technol. Plast. 8 p. 414-422, 1967-1968.
- 7 SICILIANO, F. Jr., JONAS, J. J. Mathematical modeling of hot strip rolling of Microalloyed Nb, multiply-alloyed Cr-Mo, and plain C-Mn steels. Metall. Mater. Trans. A 31A, p. 511-530, 2000.
- 8 DEVADAS, C., SAMARASEKERA, I.V., HAWBOLT, E.B. The thermal and metallurgical state of steel strip during hot rolling. Part III. Microstructural evolution, Metall. Trans. A 22, p. 335-349, 1991.
- 9 SHIDA, S. Empirical formula of flow stress of carbon steels at elevated temperature. 2nd Report, J. JSTP 10, p 610-617, 1969.
- 10 KIM, S.I., LEE, Y., BYON, S.M. Study on constitutive relation of AISI 4140 steel subject to large strain at elevated temperatures. Journal of Materials Processing Technology 140, p. 84-89, 2003.
- 11 LIN, Y. C., MING-SONG, C., ZHONG, J. Prediction of 42CrMo steel flow stress at high temperature and strain rate. Mechanics Research Communications 35, p. 142-150, 2008.
- 12 LIN, Y. C., LIU, G. A new mathematical model for predicting flow stress of typical high-strength alloy steel at elevated high temperature. Computational Materials Science 48, p. 54-58, 2010.