

# OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADE DE UMA PRENSA HIDRÁULICA DE FORJAMENTO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

Eduardo Netto de Souza <sup>1</sup>

Roberto Tibúrcio Canito Frota Jr <sup>2</sup>

Otávio Meneguêço Neto <sup>3</sup>

Isael Aparecido da Silva <sup>4</sup>

Gerson Graciano <sup>5</sup>

Celso Antonio Barbosa <sup>6</sup>

## Resumo

Uma prensa hidráulica para forjamento em matriz aberta de lingotes de aço contém partes e componentes que são muito solicitados. Com o intuito de limitar os esforços nessas partes e componentes diminuindo as manutenções, e ainda objetivando diminuir o tempo de processamento, estuda-se um modo de otimização dos parâmetros de velocidade da prensa hidráulica em função da força máxima disponível. Para este estudo de otimização, foram realizadas simulações com o método de elementos finitos (MEF) utilizando o software DEFORM™ 3D. As simulações foram realizadas com diferentes perfis de velocidades durante o processo de recalque de um lingote de aço AISI 4340 de forma a garantir o mesmo trabalho de deformação entre os processos. Os resultados obtidos na simulação com a velocidade otimizada são validados com a realização prática do processo proposto. Atingiram-se os mesmos níveis de trabalho de deformação e a força máxima aplicada diminuiu, de forma que as partes e os componentes críticos da prensa hidráulica foram menos solicitados.

**Palavras-chave:** Forjaria; Deformação; Método de elementos finitos.

## OPTIMIZATION OF THE SPEED PROFILE OF A HYDRAULIC FORGING PRESS BY FINITE ELEMENT SIMULATION

### Abstract

A hydraulic press to forging steel ingots contains parts and components that are much requested. In order to limit the efforts in these parts and components, and also to decrease maintenance, it is studied ways to optimize parameters of hydraulic press speed in function of maximum load available. In this optimization study, finite element simulations using commercial software called DEFORM™ 3D are performed. These simulations are carried out with different speed curves during upsetting process of AISI 4340 steel ingot assuring same deformation work between processes. Optimized speed is validated by real performed forging. It was achieved equivalent deforming work levels and the maximum load applied was decreased. Therefore, critical parts and components of hydraulic press were less requested.

**Key words:** Forging shop; Deformation; Finite element simulation method.

<sup>1</sup>Engenheiro Pesquisador, Dr.; Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A. Rua Alfredo Dumont Villares, 155 - Jardim Santa Carolina - 13178-902 - Sumaré - SP. [eduardo.souza@villaresmetals.com.br](mailto:eduardo.souza@villaresmetals.com.br)

<sup>2</sup>Mestrando em Engenharia Aeronáutica e Mecânica; Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. Rua Alfredo Dumont Villares, 155 - Jardim Santa Carolina - 13178-902 - Sumaré - SP. [roberto.junior@villaresmetals.com.br](mailto:roberto.junior@villaresmetals.com.br)

<sup>3</sup>Técnico em Processo; Forjaria da Villares Metals S.A. Rua Alfredo Dumont Villares, 155 - Jardim Santa Carolina - 13178-902 - Sumaré - SP. [otavio.menegueco@villaresmetals.com.br](mailto:otavio.menegueco@villaresmetals.com.br)

<sup>4</sup>Supervisor Operacional; Forjaria da Villares Metals S.A. Rua Alfredo Dumont Villares, 155 - Jardim Santa Carolina - 13178-902 - Sumaré - SP. [isael.silva@villaresmetals.com.br](mailto:isael.silva@villaresmetals.com.br)

<sup>5</sup>Supervisor Técnico; Forjaria da Villares Metals S.A. Rua Alfredo Dumont Villares, 155 - Jardim Santa Carolina - 13178-902 - Sumaré - SP. [gerson.graciano@villaresmetals.com.br](mailto:gerson.graciano@villaresmetals.com.br)

<sup>6</sup>Gerente de Tecnologia; Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A. Rua Alfredo Dumont Villares, 155 - Jardim Santa Carolina - 13178-902 - Sumaré - SP. [celso.barbosa@villaresmetals.com.br](mailto:celso.barbosa@villaresmetals.com.br)

## I INTRODUÇÃO

Num processo de forjamento em matriz aberta, existem diversas variáveis atuantes no sistema que interferem e atuam no comportamento estrutural do equipamento em função dos mecanismos de ação e reação. Entre estas variáveis estão o material a ser deformado, dimensões das matrizes, condições e interação entre metal e matriz, os mecanismos de deformação plástica, as características do produto final, as condições de transferência de calor lingote/ambiente e, finalmente, o tipo de equipamento usado para o processo.<sup>(1)</sup> Estas variáveis traduzem-se em fenômenos físicos que interagem durante a conformação mecânica tornando difícil a sua correlação quantitativa. Para realizar o trabalho de conformação, algumas variáveis tornam-se limitantes como é o caso do equipamento utilizado. Numa prensa, por exemplo, as características estão relacionadas com a capacidade de impor força-energia ao sistema, que depende muito do seu dimensionamento.

Num projeto de uma prensa, seu dimensionamento não fica apenas restrito na capacidade estipulada em projeto do seu sistema hidráulico, mas também em relação aos outros componentes estruturais, muitas vezes, projetados em função de seu limite operacional. Diversos componentes, como vigas, cruzetas móveis, colunas, cilindros, guias, porta-matriz apresentam uma determinada resistência para suportar os esforços cíclicos e ficam sujeitas aos limites de tensão estipulados pelo fabricante com o emprego de seus cálculos estruturais. Periodicamente, todos os componentes devem ser inspecionados por uma manutenção programada. Durante um processo de forjamento em matriz aberta, é sempre desejável que os lingotes advindos do lingotamento convencional tenham seus defeitos eliminados com imposição de uma força que se traduz em um grau de deformação, tornando o forjado de boa qualidade com uma microestrutura mais homogênea e com propriedades mecânicas mais uniformes.<sup>(2)</sup> A eliminação destes defeitos depende de diversos fatores como temperatura, grau de deformação, tipo de matriz, o próprio procedimento ou seqüência operacional e da força. Dentro dessa premissa, objetivando a limitação dos esforços aplicados durante um recalque, no sentido de se aumentar a vida útil dos componentes da prensa, fez-se uma análise do comportamento das tensões aplicadas em conjunto com os perfis de velocidade. Nesse contexto, fizeram-se estudos para melhorar o perfil de velocidades de forma a reduzir as tensões máximas impostas ao equipamento. Para esta análise, utilizou-se simulação numérica por elementos finitos, avaliando-se o comportamento do perfil da força aplicada no lingote ao longo de seu deslocamento sem comprometer sua qualidade interna.

## 2 PARÂMETROS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A Figura 1 apresenta um esquema dos perfis com otimização das forças aplicadas. O perfil convencional, ilustrado na cor azul, apresenta o comportamento normal de uma força aplicada em um recalque de um lingote; já o perfil ilustrado em vermelho apresenta o perfil de força otimizada, de modo que a força

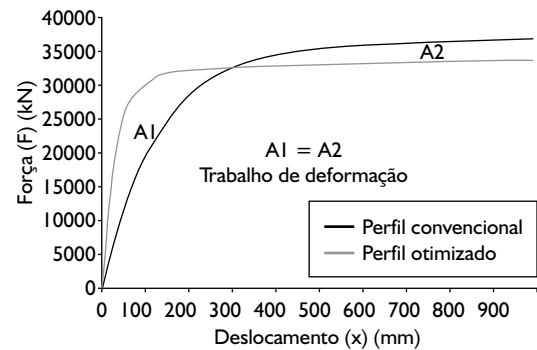


Figura 1. Esquema de perfis de forças aplicadas durante o recalque de um lingote.

máxima diminua ao longo do processo. Para a efetivação deste trabalho, é necessário que a prensa possa aumentar imposição da velocidade nos instantes iniciais para que a força também aumente. Normalmente, num processo utiliza-se um mecanismo de imposição de velocidades baseado na capacidade dos acumuladores de uma prensa e de seus cilindros hidráulicos, podendo-se impor diferentes tipos de velocidades de acordo com o acionamento destes dispositivos. A variação da velocidade fica restrita apenas ao grau de encruamento ou de resistência do lingote, à medida que vai se deformando. Com isso, a prensa pode impor velocidades maiores no início do processo, com uma diminuição progressiva durante a deformação do material sem ultrapassar uma determinada força limite, aproveitando as condições iniciais do lingote.

O propósito deste estudo é alteração do perfil da força sem depender maiores energias para o processo de deformação, alterando-se apenas o perfil de velocidade da prensa, de modo a aproveitar melhor as condições do equipamento durante o processo de recalque e realizar o mesmo trabalho de deformação, segundo a Equação 1:

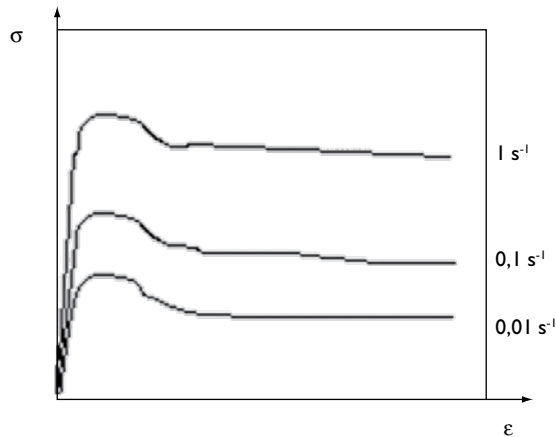
$$W = \int_0^d F dx = A_1 = A_2 \quad (1)$$

em que: W: trabalho de deformação ou energia; F: força aplicada; e x: redução de altura do lingote.

A aplicação de diferentes forças pela prensa no lingote traduz-se em diferentes níveis de tensões efetivas no material. O mecanismo de modificações do comportamento das tensões está implicitamente colocado dentro das propriedades dos materiais em forma tabelada de curvas de escoamento. À medida que se aumenta a velocidade de deformação, maiores são as tensões de escoamento, como está apre-

sentado no gráfico esquemático da Figura 2, baseado em dados da literatura.<sup>(3-6)</sup>

Assim, quando se colocam as propriedades das curvas de escoamento de um determinado material no banco de dados de um software de elementos finitos, está-se colocando o comportamento das tensões do material em função da taxa de deformação, da deformação e da temperatura. Ao se modificar a velocidade da prensa durante o recalque, está-se alterando o comportamento das taxas de deformação e, conseqüentemente, altera-se o comportamento das tensões atuantes no material, à medida que o material vai se deformando.



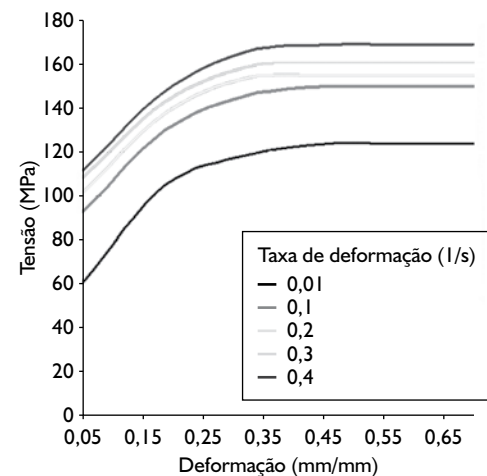
**Figura 2.** Esquema de curvas de escoamento para diversas taxas de deformações para uma dada temperatura.

Evidentemente, os diferentes níveis de tensão e, por conseguinte, os diferentes perfis de temperatura aplicados ao material podem acarretar em modificações microestruturais durante o processo de deformação, tais como a recuperação e recristalização dinâmica.<sup>(5)</sup>

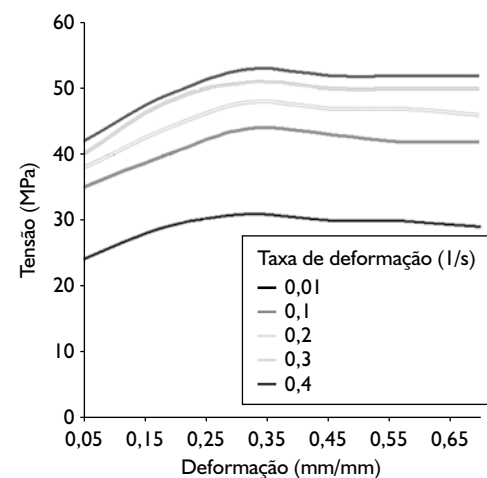
Segundo Kobayashi, Oh e Altan<sup>(1)</sup> numa conformação a quente acima da temperatura de recristalização, a influência da deformação nas tensões de escoamento é insignificante e a influência da taxa de deformação torna-se muito importante. Isto pode ser analisado, quando um processo entra em recristalização dinâmica, onde o material passa a sofrer deformações com a mesma tensão de escoamento caracterizando um regime estacionário. No entanto, a influência da temperatura no comportamento das tensões de escoamento é muito preponderante, como se pode observar comparando as curvas de escoamento do aço 4340 do banco de dados do DEFORM<sup>TM</sup> 3D (Figura 3). Com uma elevação de 300°C, as tensões de escoamento caem abruptamente para níveis abaixo de qualquer condição de taxa de deformação com temperaturas a 900°C.

### 3 METODOLOGIA

Na análise da velocidade da matriz superior de recalque, comparou-se o perfil de força aplicada no lingote experimentalmente com o perfil simulado no DEFORM<sup>TM</sup> 3D. Para se obter o perfil de força simulado, fez-se uma aquisição de dados, por



(a)

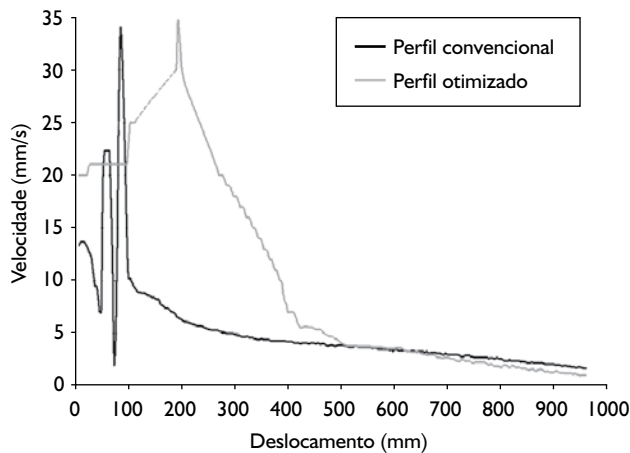


(b)

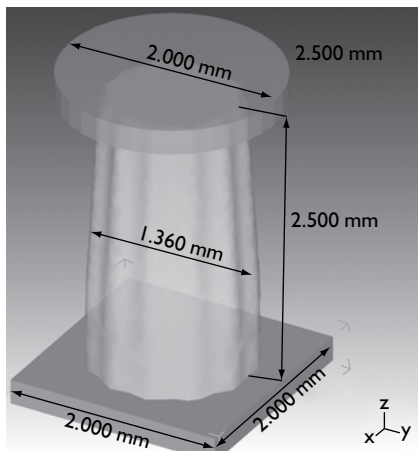
**Figura 3.** Curvas de escoamento do aço 4340. a) Temperatura de 900°C.<sup>(7)</sup>; e b) temperatura de 1.200°C.<sup>(7)</sup>

meio do supervisor do perfil convencional de velocidade da matriz superior da prensa de 3000 t durante o recalque do lingote. O perfil foi utilizado como entrada de dados e como determinante no comportamento da atuação da prensa sobre o lingote na simulação por elementos finitos. Posteriormente, fez-se uma otimização da velocidade de forma teórica para o perfil otimizado, alterando-se o perfil de forma a aumentar a taxa de deformação nos instantes iniciais resultando em um perfil de força diferenciado. Os perfis de velocidade estão ilustrados na Figura 4.

Como objeto do estudo, utilizou-se um lingote 1.360 mm de diâmetro, que passará por um processo de recalque com as propriedades do aço AISI 4340 do banco de dados do DEFORM<sup>TM</sup>. A Figura 5 ilustra detalhes da geometria do lingote e das matrizes utilizadas na simulação numérica.



**Figura 4.** Perfil de velocidade convencional experimental e perfil teórico otimizado.



**Figura 5.** Geometria inicial do lingote e das matrizes.

Na simulação, procurou-se entrar com os parâmetros mais próximos da realidade, com isso, os valores de temperatura são iguais aos do processo real, sendo as temperaturas iniciais foram de 1.260°C para o lingote e 60°C para as matrizes. Foram definidas trocas de calor com o ambiente com temperatura de 40°C e coeficiente de convecção de 10 W/m<sup>2</sup>K determinados por confronto teórico-experimental. Na interação das matrizes com o lingote foram assumidos valores sugeridos pelo DEFORM™ para o coeficiente de troca de calor de 11 kW/m<sup>2</sup>.K e coeficiente de atrito de cisalhamento de 0,7.<sup>(7)</sup>

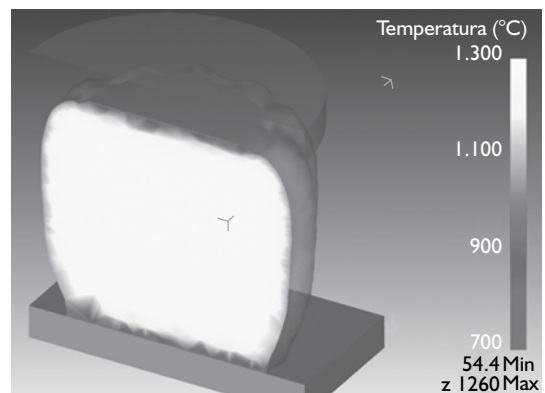
O perfil de velocidade real da prensa mostra, nos instantes iniciais, picos inerentes à acomodação do material em relação ao sistema mecânico. O deslocamento total foi de 1.000 mm para a matriz superior. Para o controle dos passes nas simulações definiu-se o valor de 200 passos com 5 mm de incremento. É importante lembrar que, para a realização das simulações, utilizou-se apenas a modelagem numérica oferecida no DEFORM™ 3D. Sendo assim, não houve desenvolvimento de modelo numérico realizado pelos autores.

### 3.1 Simulações por Elementos Finitos

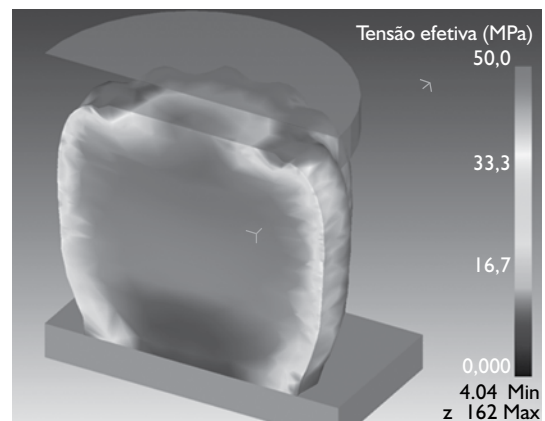
A Figura 6a ilustra o resultado da simulação por elementos finitos, em termos de temperatura e tensão efetiva Figura 6b para o processo convencional. Para facilitar a visualização efetuou-se um corte transversal no lingote.

Utilizando-se o perfil de velocidades adquiridos pelo supervisor e implementando as variáveis de acordo com a metodologia proposta, obteve-se o perfil convencional simulado de força, conforme evidencia a Figura 7.

De acordo com o perfil simulado, nota-se que a partir de certo instante existe uma imo-

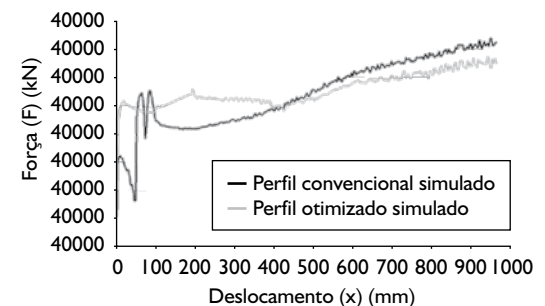


(a)



(b)

**Figura 6.** a) Temperatura no final do processo convencional; e b) tensão efetiva no final do processo convencional.



**Figura 7.** Resultados dos perfis de esforços por MEF.

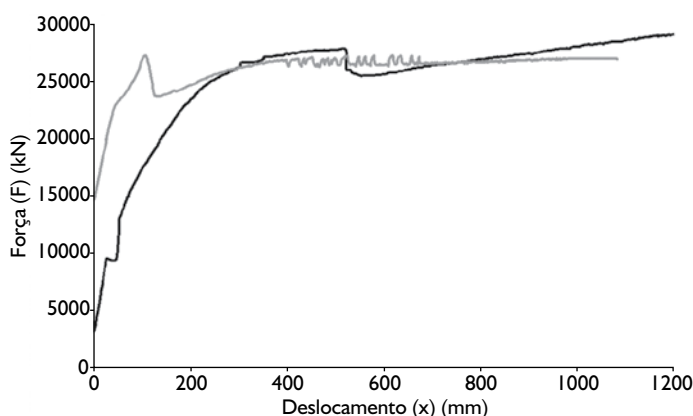
sição de força crescente para a realização do deslocamento da ferramenta durante o recalque. Isto indica um grau cada vez maior de encruamento do material que oferece uma resistência cada vez maior.

Para otimizar a velocidade da prensa com o mesmo trabalho de deformação, deve-se aumentar a velocidade da prensa nos instantes iniciais com uma posterior queda desta velocidade nos instantes finais do processo em relação ao perfil que deve ser otimizado, como foi mostrado na Figura 4. Este aumento e diminuição da velocidade durante o recalque traduz-se como um aumento e diminuição da força imposta ao sistema, respectivamente. A diminuição da força nos instantes finais é o objetivo da otimização do processo de modo a se evitar imposição de esforços em material excessivamente encruado. A idéia da otimização é gastar, em termos de energia, no início do processo para que se possa poupar no final do processo com menos esforços.

Simulando-se com o novo perfil de velocidade da prensa, obteve-se um perfil otimizado simulado de força que qualitativamente se aproximou muito da proposta inicial do trabalho, conforme foi ilustrado na Figura 7, com a comparação das duas curvas de força durante o recalque de um lingote.

O gráfico da Figura 7 mostra também que a idéia contida no pensamento físico foi realizada, observando-se o aumento de força no início e redução na força máxima no final do processo. Os perfis de força experimentais, de como a otimização de velocidade pode ser aplicada na prática, são ilustrados na Figura 8. Neste gráfico, nota-se um patamar na força otimizada evidenciando um regime estacionário. Este fato é possível em função do processo de recristalização dinâmica, que pode ter dado início em função do maior grau de deformação imposto no lingote nos instantes iniciais do processo, gerando maior energia com uma estabilização da tensão à medida que o material se deforma. Um estado estacionário significa que não está ocorrendo encruamento excessivo. Aplicações de esforços excessivos podem ter efeito indesejado de aumentar a incidência de defeitos em vez de caldeá-los.

Outro efeito interessante, relacionado com o aumento da velocidade de deformação, seria o aumento da geração de calor por



**Figura 8.** Perfil de esforços aplicados na prensa 3000 toneladas com dois perfis de velocidades diferenciados para um mesmo material.

unidade de volume de deformação. Dentro destas características, o comportamento dos materiais em relação à variável temperatura também se torna preponderante. O processo de deformação plástica é irreversível. A energia mecânica consumida durante a deformação é transformada principalmente em calor. O calor pode ser transferido para as ferramentas que mantêm contato com o lingote que está se deformando, mas também encontra outra fronteira que é próprio ambiente. A transferência de calor do lingote para o ar se dá por meio de convecção e radiação, porém em um estado transiente, que varia com o tempo de deformação. Nos processos em que se impõe maior velocidade de deformação, menor será o tempo de recalque e assim menor é o tempo de transferência de calor, ficando o calor retido ou adiabático por mais tempo no processo, ou seja, o lingote terá mais energia em forma de calor nas etapas finais do processo de recalque. Isto pode significar uma diminuição das tensões necessárias para a conformação mecânica, conforme evidencia o comportamento das curvas de escoamento.

## 4 CONCLUSÕES

As simulações por MEF mostram-se como uma excelente ferramenta para a análise do comportamento das tensões de escoamento em função de diversas variáveis, permitindo dessa forma, que se obtenha uma otimização do perfil de velocidade com sua implementação no processo. Atingiram-se os mesmos níveis de trabalho de deformação e a força máxima aplicada diminuiu, de forma que as partes e os componentes críticos da prensa hidráulica foram menos solicitados. As variáveis importantes para a melhoria no processo estão relacionadas com as taxas de deformação e de temperatura, que podem influir diretamente na qualidade final do produto, de modo que se possa obter uma microestrutura uniforme e isenta de defeitos internos indesejáveis provenientes do processo de solidificação como rechupes, porosidades e segregações, devido ao resfriamento lento de lingotes de grandes dimensões. Porém, antes de se implementar modificações nos processos de conformação mecânica, é interessante estudar as características dos materiais e o comportamento das curvas de escoamento em função das variáveis de processo.

## REFERÊNCIAS

- 1 KOBAYASHI, S.; OH, S.; ALTAN, T. **Metal forming and the finite-element method**. New York: Oxford University Press, 1989.
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Forming and forging process. In: \_\_\_\_\_. **Open-die forging**. 9. ed. Metals Park, Oh, 1988. (ASM Metals Handbook, 14)
- 3 ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. **Conformação de metais: fundamentos e aplicações**. São Carlos: EESC- USP, 1983.
- 4 HELMAN, H.; CETLIN, P.R. Fundamentos da conformação mecânica dos metais. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.
- 5 PADILHA A.F.; SICILIANO Jr., F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. 3. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 6 EBRAHIMI, R.; ZAHIRI, S.H.; NAJAFIZADEH, A. Mathematical modelling of the stress-strain curves of Ti-IF steel at high temperature. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 171, n. 2, p.301-5, 2006.
- 7 FLUHRER, J. **Deform™ 3D Version 5.1: user´s manual**. Columbus: Scientific Forming Technologies Corporation, 2005.

Recebido em: 22/11/08

Aceito em: 26/03/08

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM - INTERNACIONAL, 62., 2006, Vitória, ES. São Paulo: ABM, 2007.