

# OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADE DE UMA PRENSA HIDRÁULICA DURANTE O PROCESSO DE RECALQUE DE LINGOTES DE AÇO AISI 4340 ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS <sup>1</sup>

Eduardo Netto de Souza <sup>2</sup>  
Roberto Tibúrcio Canito Frota Jr <sup>3</sup>  
Otávio Menegueço Neto <sup>4</sup>  
Isael Aparecido da Silva <sup>5</sup>  
Gerson Graciano <sup>6</sup>  
Celso Antonio Barbosa <sup>7</sup>

## Resumo

Uma prensa hidráulica para forjamento em matriz aberta de lingotes de aço contém partes e componentes que são muito solicitados fazendo com que sua vida útil seja abreviada em função dos parâmetros dos processos aplicados. Com o intuito de limitar os esforços nessas partes e componentes diminuindo as manutenções, e ainda objetivando diminuir o tempo no processo de processamento nas deformações, estudou-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 através do método de elementos finitos (MEF) utilizando o software DEFORM<sup>TM</sup> 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. O resultado obtido na simulação com a velocidade otimizada foi validado com a realização prática do processo proposto. Atingiu-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:** Simulação por elementos finitos; Forjaria; Modelagem numérica; Trabalho de deformação.

## OPTIMIZATION OF THE SPEED PROFILE OF AN HYDRAULIC FORGING PRESS DURING UPSETTING PROCESS OF AISI 4340 STEEL INGOTS BY FINITE ELEMENT SIMULATION

### Abstract

A hydraulic press to forging steel ingots contains parts and components that are much requested, thus its useful life become shorter due to processes parameters applied. In order to limit the efforts in these parts and components, and also to decrease maintenance, it was studied ways to optimize parameters of hydraulic press speed in function of maximum load available. In this optimization study, finite element simulations were performed using a commercial software called DEFORM<sup>TM</sup> 3D. These simulations were carried out with different speed curves during upsetting process of AISI 4340 steel ingot assuring same deformation work between processes. Results obtained with optimized speed were validated by real forging practice. 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:** Finite element simulation; Forging shop; Numerical modeling; Deformation work.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Pesquisador, Dr., Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.

<sup>3</sup> Mestrando em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.

<sup>4</sup> Técnico em Processo, Forjaria da Villares Metals S.A.

<sup>5</sup> Supervisor Operacional, Forjaria da Villares Metals S.A.

<sup>6</sup> Supervisor Técnico, Forjaria da Villares Metals S.A.

<sup>7</sup> Gerente de Tecnologia, Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.

## INTRODUÇÃO

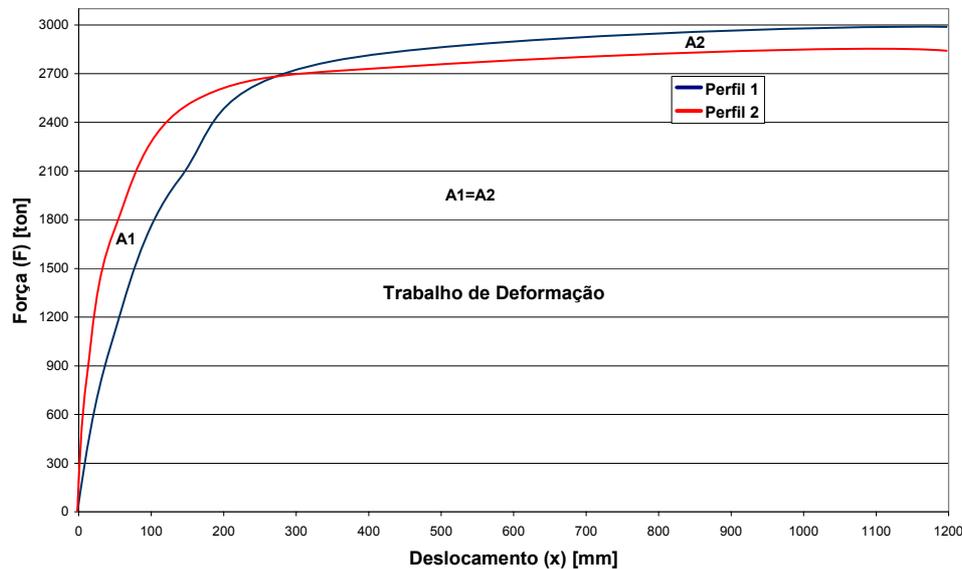
Num processo de forjamento em matriz aberta, existem diversas variáveis atuantes no sistema que interferem e atuam no comportamento estrutural do equipamento em função dos mecanismos de ação e reação. Entre estas variáveis estão o material a ser deformado, dimensões das matrizes, condições e interação 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 se traduzem em fenômenos físicos que interagem durante a conformação mecânica tornando difícil o seu correlacionamento quantitativo. 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 através de seus cálculos estruturais.<sup>(2)</sup> Periodicamente, todos os componentes devem ser inspecionados através de 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.

### Parâmetros de Conformação Mecânica

A Figura 1 mostra um esquema dos perfis com otimização das forças aplicadas. O perfil 1 mostra o comportamento normal de uma força aplicada em um recalque de um lingote. O perfil 2 mostra o perfil de força otimizada, de modo que a força 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, se utiliza 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. Ou seja, 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.



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

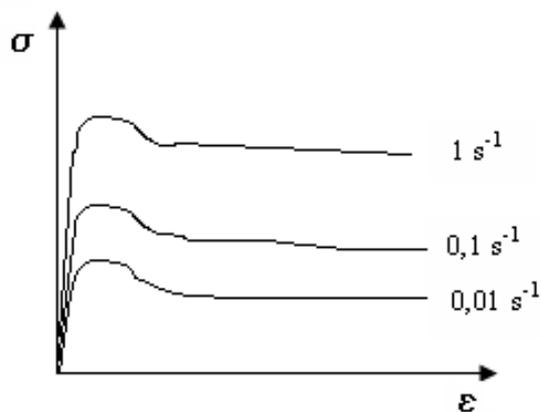
O propósito deste estudo é alteração do perfil da força sem despender maiores energias para o processo de deformação, alterando-se apenas o perfil de velocidade da prensa, de modo a aproveitar melhor as condições do equipamento durante o processo de recalque. O propósito é realizar o mesmo trabalho de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

$$W = \int_0^d F dx = A_1 = A_2$$

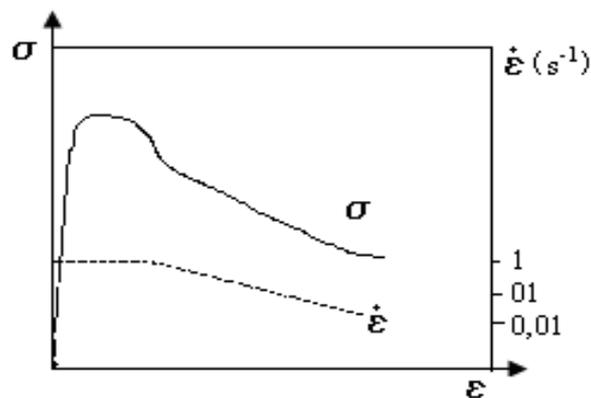
Onde:

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

O mecanismo de modificações do comportamento das forças está implicitamente colocado dentro das propriedades dos materiais em forma de curvas de escoamento. À medida que se aumenta a velocidade de deformação, maiores são as tensões de escoamento, como mostra a Figura 2. Assim, quando se coloca 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, deformação e temperatura. Ao se modificar o comportamento das taxas de deformação e, conseqüentemente, a velocidade da prensa durante um recalque, está se alterando o comportamento das tensões durante o processo de conformação mecânica, mudando os níveis de tensão, à medida que o material vai se deformando com taxas de deformação diferentes,<sup>(3-5)</sup> como mostra a Figura 3.

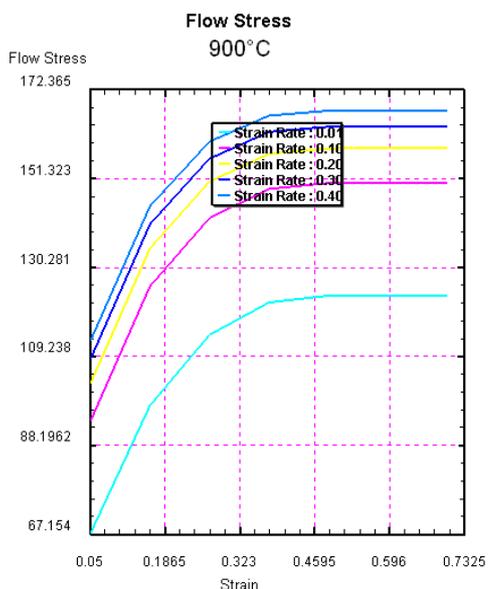


**Figura 2** – Esquema de curvas de escoamento para diversas taxas de deformações.

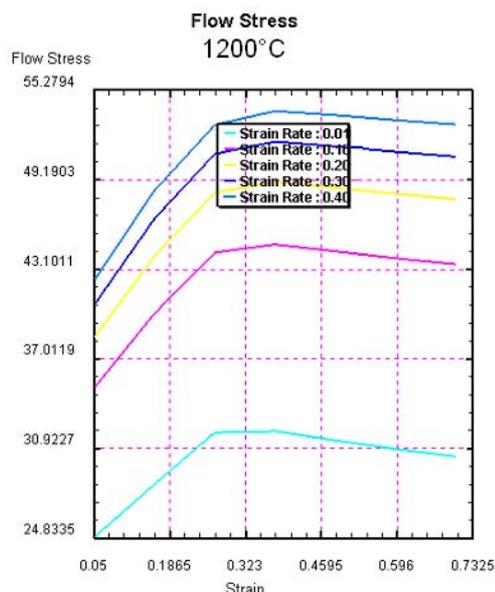


**Figura 3** – Esquema comparativo do comportamento de uma curva de tensão para várias taxas de escoamento impostas a um processo de conformação mecânica.

Segundo Kobayashi,<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 *flow stress* do aço 4340 do banco de dados do DEFORM 3D. (Figura 4 e Figura 5). 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.



**Figura 4** – Curvas de escoamento do aço 4340. Temperatura de 900°C.



**Figura 5** – Curvas de escoamento do aço 4340. Temperatura de 1200°C.

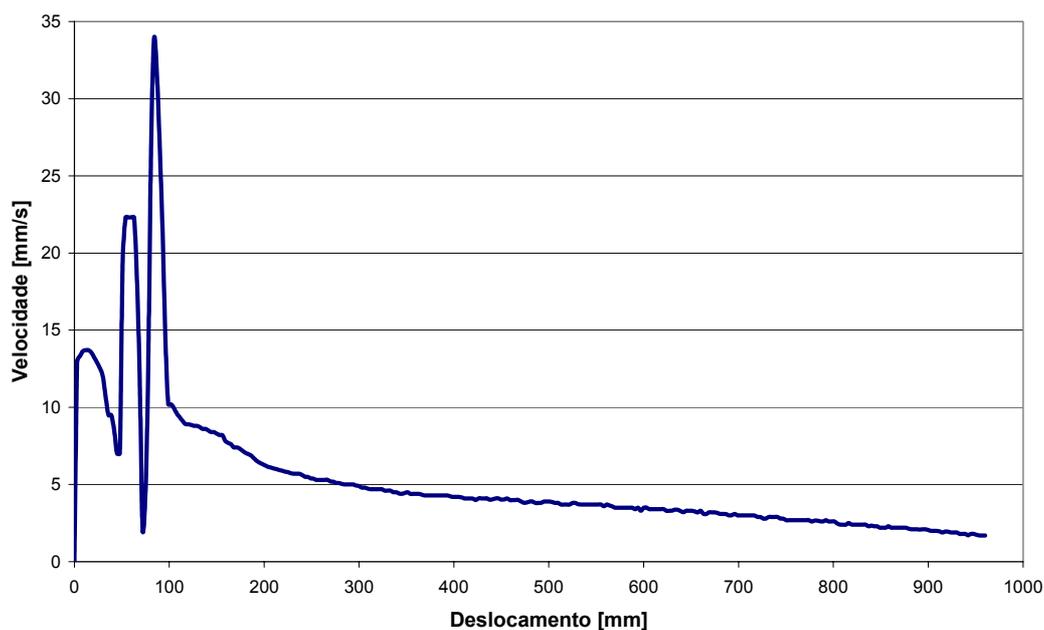
## METODOLOGIA

Na análise da velocidade da matriz superior de recalque, comparou-se o perfil de força aplicada no lingote experimentalmente com o perfil simulado. Para se obter o perfil de força simulado, fez-se uma aquisição de dados, através do supervisor, do perfil 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 do processo de elementos finitos, conforme mostra a Figura 6. Posteriormente, fez-se uma otimização da velocidade de forma teórica, alterando-se o perfil de forma a aumentar a taxa de deformação nos instantes iniciais resultando em um perfil de força diferenciado.

Como objeto do estudo, utilizou-se um lingote 1360 mm de diâmetro, que passará por um processo de recalque com as propriedades do aço AISI 4340 do banco de dados do DEFORM, conforme mostram as Figuras 3 e 4.

Na simulação, as temperaturas iniciais foram de 1260 °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.

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.

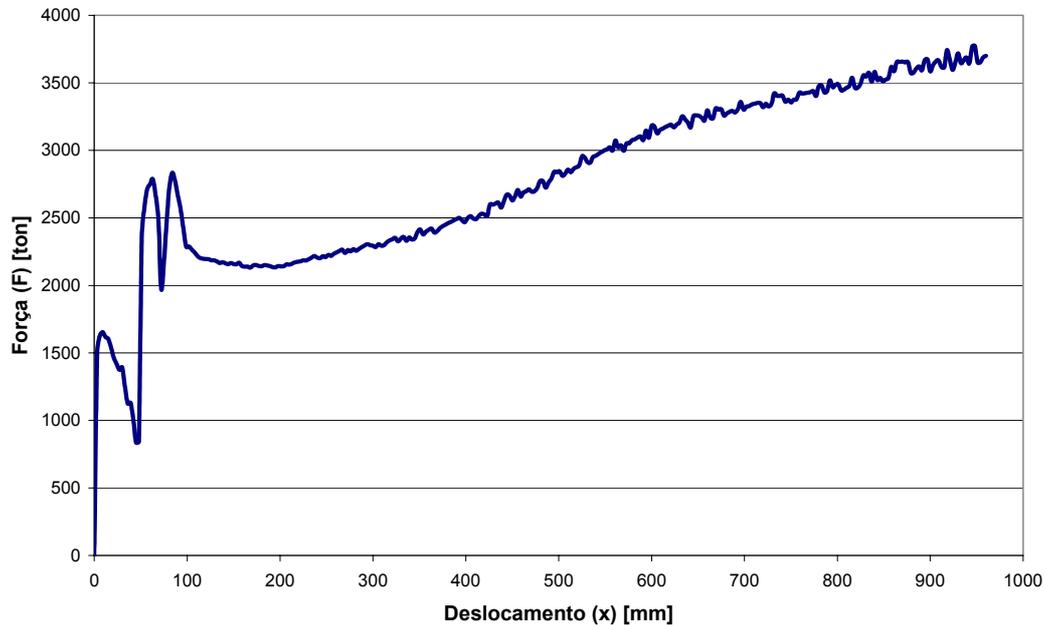


**Figura 6** – Perfil de velocidades adquiridos experimentalmente da prensa durante o recalque.

O perfil de velocidade real da prensa mostra picos inerentes ao processo em função dos deslizamentos dos planos cristalográficos. O deslocamento total foi de 1000 mm para a matriz superior. O controle dos passes nas simulações foram definidos como 200 passos com 5 mm de incremento.

## Simulações por Elementos Finitos

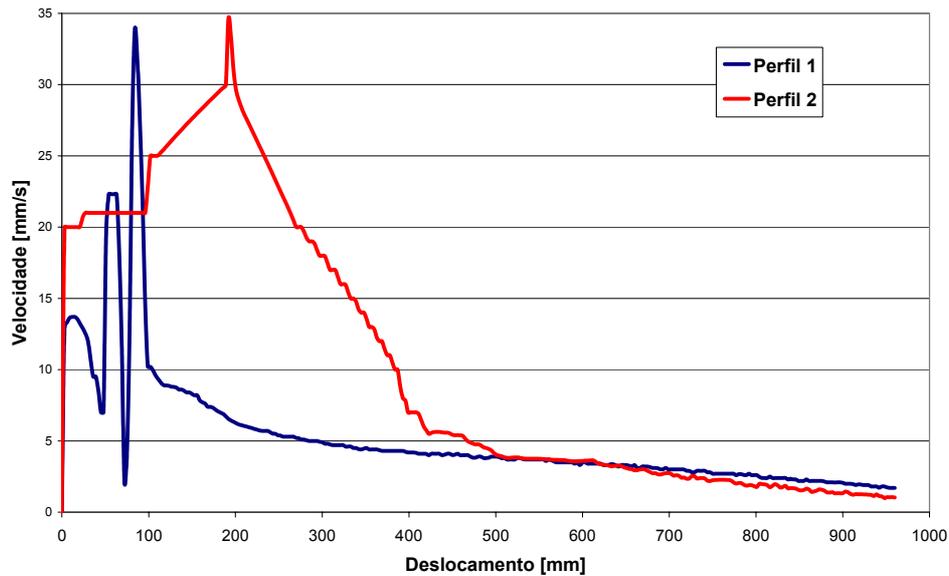
Utilizando-se o perfil de velocidades adquiridos pelo supervisor e implementando as variáveis de acordo com a metodologia proposta, obteve-se o perfil de força, conforme mostra a Figura 7.



**Figura 7** - Simulação do perfil de força com aplicação da velocidade adquirida no supervisor de um recalque experimental na prensa de 3000 toneladas.

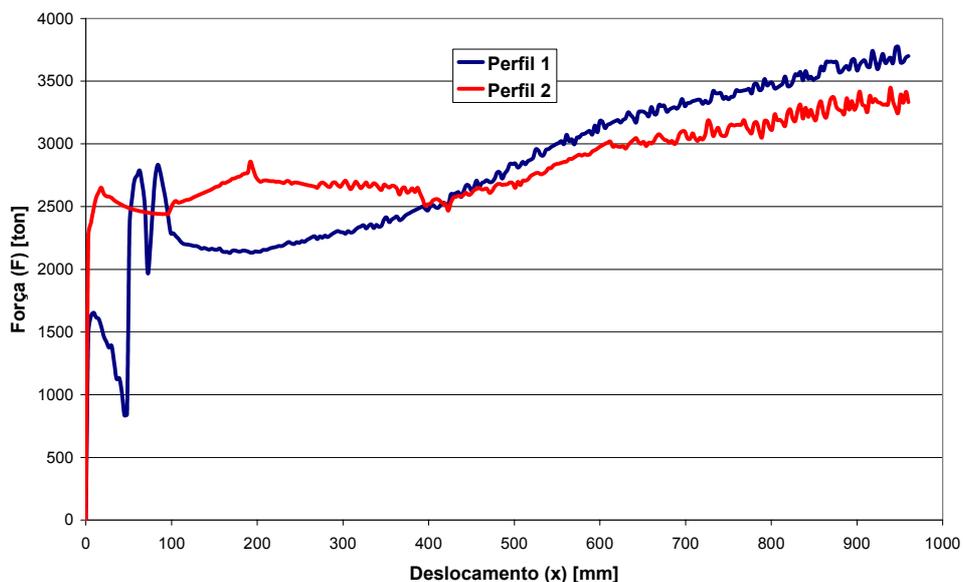
Analisando-se o perfil de força resultante da simulação, nota-se facilmente uma discordância com a realidade. Na simulação a força máxima atinge quase 3800 t, enquanto no processo real a prensa atinge a força máxima de 3000 t. Esta discordância ocorre por alguns fatores, sendo o principal a utilização dos dados do material AISI 4340 disponíveis na biblioteca do DEFORM. Foram utilizados os dados deste material por ser o mais próximo em composição química dos aços especiais de construção mecânica conformados na Villares Metals, além de possuir propriedades mecânicas semelhantes. Contudo isto não impede de se realizar um estudo qualitativo do processo, analisando-se as variações de força através de simulações numéricas com o intuito de manter o mesmo trabalho de deformação, conforme proposto. De acordo com o perfil simulado, nota-se que a partir de certo instante existe uma imposição 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 mostra a Figura 8. 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.



**Figura 8** - Comparação entre o perfil experimental e perfil teórico otimizado.

Simulando-se com o novo perfil de velocidade da prensa, obteve-se um perfil, que qualitativamente se aproximou muito da proposta inicial do trabalho, conforme mostra a Figura 9 com a comparação das duas curvas de força durante o recalque de um lingote.

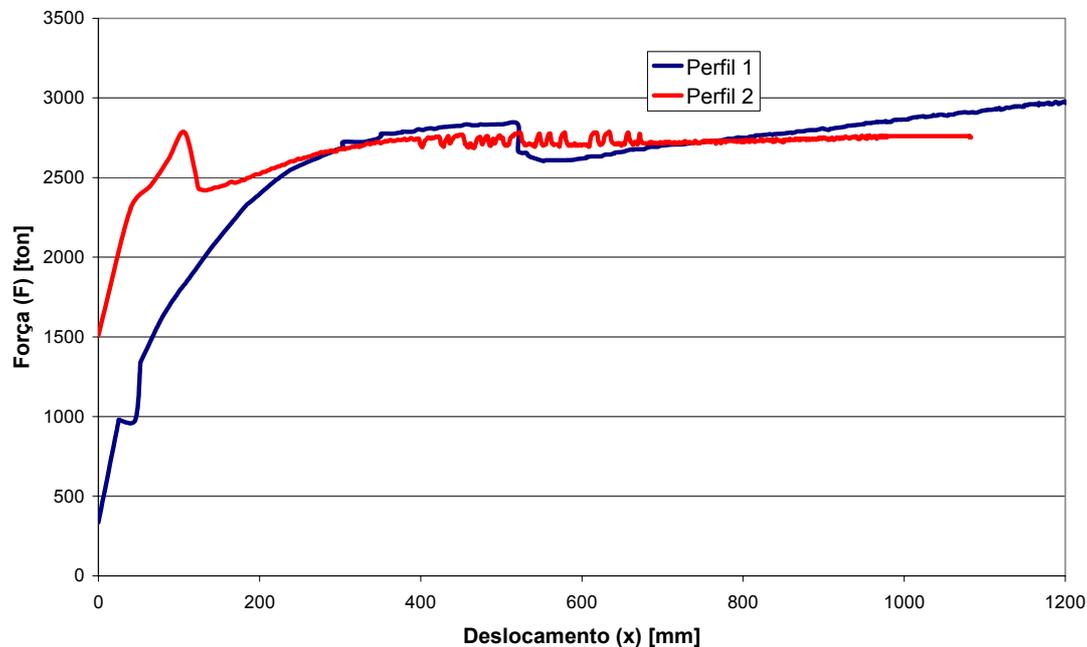


**Figura 9** – Resultados dos perfis de esforços por MEF. 1) Velocidade otimizada 2) não otimizada.

O gráfico da Figura 9 mostra 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 como a otimização de velocidade pode ser aplicada na prática, são ilustrados na Figura 10. Neste gráfico, nota-se um patamar na força otimizada, como se estivesse em 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 devido ao encruamento. Este tipo de característica do perfil pode ser

considerado como ideal em termos de qualidade do processo, não necessitando, desta forma, diminuir a velocidade apesar de realizar maior trabalho de deformação. 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.



**Figura 10** – Perfil de esforços aplicados na prensa 3000 toneladas com dois perfis de velocidades diferenciados para um mesmo material.

Outro efeito interessante, relacionado com o aumento da velocidade de deformação, seria o aumento da geração de calor por 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 mostra o comportamento das curvas de escoamento.

## CONCLUSÕES

As simulações por MEF mostraram-se como uma excelente ferramenta para a análise do comportamento das tensões de escoamento em função de diversas variáveis, permitindo dessa forma, que se obtivesse 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 temperatura que podem influir diretamente na qualidade final do produto, de modo que se possa obter uma microestrutura uniforme e isento 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, Oxford University Press, inc., New York, 1989.
- 2 ASM Metals Handbook, Forming and Forging Process, In: Open-Die Forging, Vol 14, 9ed, 1988.
- 3 ALTAN, T.; OH, S; GEGEL, H. Conformação de Metais, Fundamentos e Aplicações, EESC- USP, São Carlos, 1983.
- 4 HELMAN, H.; CETLIN, P.R. Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1983.
- 5 PADILHA A. F.; SICILIANO JR, F. Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura, Associação Brasileira dos Metais- ABM, 3ed., São Paulo, 2005.