

# ESTUDO DA SEQÜÊNCIA DO PROCESSO DE FORJAMENTO DE LINGOTES DE AÇO EM MATRIZ ABERTA PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS <sup>1</sup>

*Roberto Tibúrcio Canito Frota Junior* <sup>2</sup>

*Eduardo Netto de Souza* <sup>3</sup>

*Otávio Menegueço Neto* <sup>4</sup>

*Isael Aparecido da Silva* <sup>5</sup>

*Rafael Agnelli Mesquita* <sup>6</sup>

*Gerson Graciano* <sup>7</sup>

*Celso Antonio Barbosa* <sup>8</sup>

## Resumo

Com o aumento da demanda de aços nos últimos anos, surgiu a necessidade do fornecimento de blocos com maiores dimensões. Dentro deste enfoque, este trabalho tem como objetivo analisar a alteração da seqüência do processo de forjamento com o aumento da dimensão do lingote sem a perda da qualidade, evitando-se desta forma, defeitos internos no produto final. Para a análise da seqüência operacional, foram realizadas simulações através do método de elementos finitos (FEM) utilizando-se o software DEFORM<sup>TM</sup>3D. Foram simuladas duas seqüências do processo de forjamento, sendo uma com recalque simples seguido de desbaste praticado com lingotes menores, e posteriormente, com duplo recalque que é a nova seqüência proposta. Os resultados obtidos através das simulações mostraram-se válidos com experimentos práticos, de forma que a deformação no núcleo dos blocos é maior após a realização do duplo recalque do que no recalque seguido de desbaste.

**Palavras-chave:** Método de elementos finitos; Forjamento em matriz aberta; Recalque; Desbaste.

## STUDY OF OPEN DIE FORGING PROCESS SEQUENCE IN STEEL INGOTS BY FINITE ELEMENT METHOD

### Abstract

In the last years, the increasing demand of steel created the necessity to grow the production, as well as to attend customer's requirements with larger steel blocks. In this scenario, this paper aims to analyze the modification of forging process sequence with larger steel ingots without quality loss, avoiding internal defects in final product. For analysis of operational sequence, it was performed finite element simulations using DEFORM 3D. Two forging processes sequences were simulated, first an upsetting followed by cogging that was the former process, and then it was simulated a double upsetting that is the new sequence suggested. Simulation results were validated by practical experiments; deformation at ingot centerline after the double upsetting is larger than the upsetting followed by cogging.

**Key words:** Finite element method; Open die forging; Upsetting; Cogging.

<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> *Mestrando em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Pesquisador, Dr ; Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.*

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

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

<sup>6</sup> *Engenheiro Pesquisador; Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.*

<sup>7</sup> *Supervisor Técnico, Forjaria da Villares Metals S.A.*

<sup>8</sup> *Gerente de Tecnologia, Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.*

## INTRODUÇÃO

O processo de forjamento de grandes lingotes se tornou uma prática constante na Villares Metals S.A., seja para a produção de blocos de aço usados em moldes ou para produção de grandes peças forjadas a indústria de geração de energia. Com o aumento das dimensões dos lingotes, devido à demanda do mercado, torna-se necessário aumentar a confiabilidade no processo para obtenção do produto forjado com qualidade. Desse modo, é extremamente importante garantir certo grau de deformação e, conseqüentemente, obter-se um forjado com propriedades mecânicas homogêneas. A homogeneização das propriedades mecânicas envolve a quebra da microestrutura bruta de solidificação e a caldeamento de vazios localizados na linha central dos lingotes,<sup>(1)</sup> sendo isto realizado principalmente através do processo de forjamento.<sup>(2)</sup>

Diversas técnicas podem ser aplicadas no processo de forjamento, dividindo-o em várias etapas. No caso de forjamento de grandes lingotes, as técnicas de recalque e desbaste são as mais importantes. O recalque é o processo que reduz a altura do lingote aumentando o diâmetro e o desbaste consiste na redução do diâmetro com o aumento no comprimento do lingote. Segundo Allen et al.<sup>(3)</sup>, a definição do processo, utilizando estas duas técnicas, depende do tamanho do lingote e, para o lingote utilizado em seu estudo, uma seqüência de desbastes seria melhor que o recalque duplo ou que o recalque simples seguido de desbaste. No entanto, Allen et al.<sup>(3)</sup> não detalharam parâmetros importantes como, por exemplo, a razão de largura da matriz (B/H), que corresponde a razão entre B, a largura da ferramenta, e H, altura do lingote. Este parâmetro determina o estado de tensões e a distribuição da deformação no lingote e é considerado importante para a consolidação do núcleo do lingote,<sup>(1,2,4-6)</sup> estando diretamente relacionado ao fluxo de material no interior do lingote em função do atrito imposto pela matriz.

Chaaban,<sup>(4)</sup> utilizando técnica de modelagem física com plasticina e diferentes geometrias para ferramentas, concluiu que a razão B/H deve ser maior que 0,476. Bodnar et al.<sup>(1)</sup> também utilizaram a plasticina para seus experimentos e afirmaram que a razão B/H igual a 0,625 foi a mais eficiente. Utilizando a modelagem numérica pelo método de elementos finitos (MEF), Cho et al.,<sup>(5)</sup> Shah et al.<sup>(2)</sup> e Overstam et al.<sup>(6)</sup> chegaram a resultados próximos com o valor ideal para a razão B/H em torno de 0,6. Shah et al.<sup>(2)</sup> ainda afirmaram que ao aumentar esta razão a consolidação do núcleo foi ainda maior, porém o aumento na força necessária para o processo não justificou o ganho com a consolidação do núcleo.

A forjaria da Villares Metals S.A. realizava forjamento de lingotes com secção oitavada de 1214 mm (Figura 1A) com 19 toneladas. Com modernização de sua prensa hidráulica de 3.000 toneladas de capacidade e de acordo com a demanda dos clientes, propôs-se a fabricar blocos de aço para atender dimensões acabadas com secções de 900 x 1000 mm e 750 x 1250 mm. Este processo implicaria em um aumento de 28% na área do forjado. Para isto, a produção destes blocos seria feita através de lingotes de secção redonda de 1360 mm e 25 toneladas em peso (Figura 1B); além disso, o processo teria a seqüência inicial de um recalque simples entre placas, seguido de desbaste com bigornas com 600 mm de largura.

No entanto, após a realização dos primeiros forjamentos com o lingote de 25 toneladas, através da seqüência citada anteriormente, percebeu-se que a qualidade do produto em relação às porosidades estaria comprometida. Então, uma modificação no processo se fez necessária, para que os blocos produzidos estivessem dentro dos requisitos de qualidade.

Dentro deste escopo, fez-se uma avaliação da alteração da seqüência operacional do processo de forjamento do lingote de 25 toneladas, utilizando-se o método de elementos finitos através do software DEFORM™ 3D.

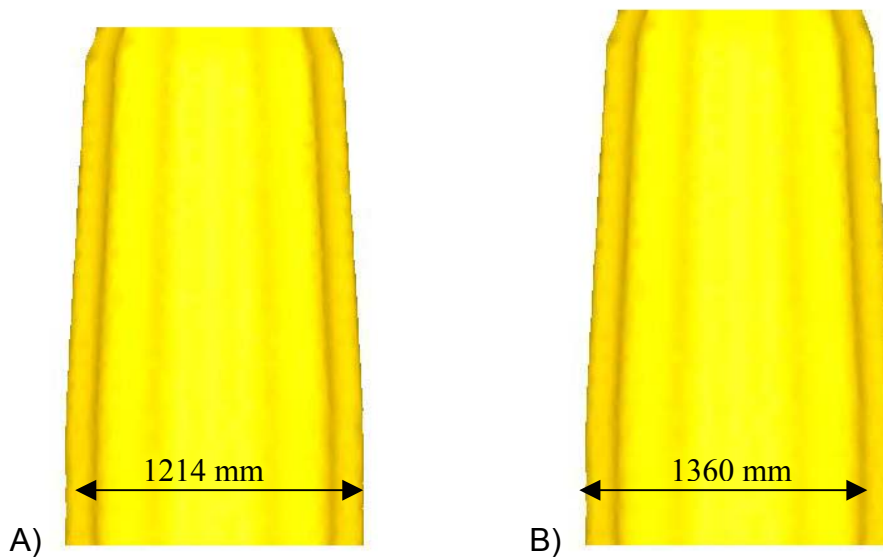


Figura 1 - Dimensões dos lingotes de 19 ton e 25 ton.

## METODOLOGIA

A Villares Metals S.A. utiliza simulação de conformação mecânica para avaliar processos como estes, objetivando dimensionar peças e blocos solicitados de forma a aperfeiçoar os processos e otimizar os investimentos na área de produção. Para este estudo, utilizou-se a formulação de elementos finitos 3D rígido-viscoplástica com parâmetros termomecânicos acoplados para haver mais proximidade da realidade.

A proposta de realização do estudo da seqüência operacional está dividida em três simulações (Figura 2), consistindo em realizar inicialmente uma simulação com o recalque entre placas, comum às duas seqüências do processo, em seguida fazer a simulação com o desbaste com bigornas de 600 mm de largura e, na terceira simulação, o segundo recalque entre placas.

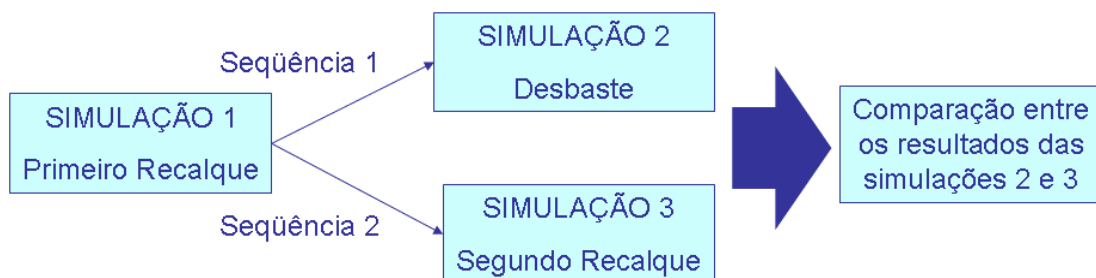


Figura 2 – Esquema das simulações aplicadas neste trabalho.

Vale ressaltar que, para a realização da simulação do desbaste, utilizou-se o módulo “Cogging” do DEFORM 3D, ferramenta específica para este tipo de técnica de forjamento. Este módulo permite que se faça uma seqüência de desbastes com a ação de manipuladores, de forma que o lingote não se desloque no espaço.

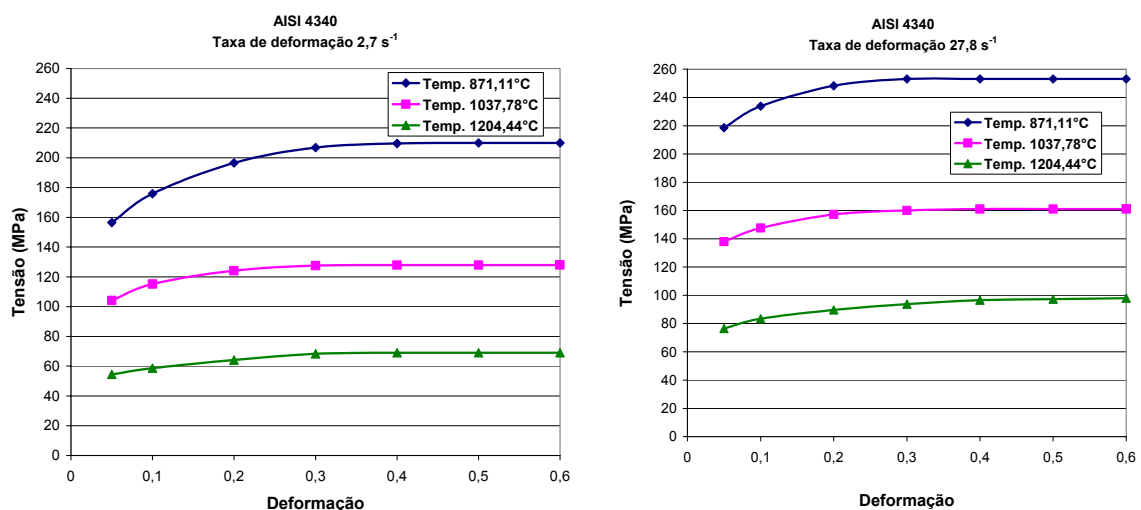
As condições operacionais de simulação seguiram os parâmetros de processo atual de produção. Com isso, a temperatura inicial do lingote foi de 1260 °C e das ferramentas de 60 °C; a temperatura ambiente foi de 30 °C e coeficiente de transferência de calor por convecção de 10 W/m<sup>2</sup>K.

As propriedades termomecânicas dos materiais utilizados nas simulações são fornecidas pelo software DEFORM 3D em sua biblioteca. O material selecionado foi AISI 4340 para lingote e para as matrizes o AISI H13. A Tabela 1 fornece um resumo das principais propriedades térmicas.

**Tabela 1** – Propriedades térmicas do AISI 4340 e AISI H13.

Propriedades	AISI 4340	AISI H13
Condutividade térmica	24,8~32,9 W/m°C	24,2~24,7 W/m°C
Capacidade térmica	4,3 N/mm <sup>2</sup> °C	2,8~7,4 N/mm <sup>2</sup> °C
Emissividade	0,7	0,7

A Figura 3 apresenta as curvas de escoamento do material AISI 4340, para duas taxas de deformação e três temperaturas diferentes. Estas curvas foram extraídas do banco de dados do DEFORM e utilizadas na simulação.



**Figura 3** – Curvas de escoamento do AISI 4340 extraídas do banco de dados do DEFORM.

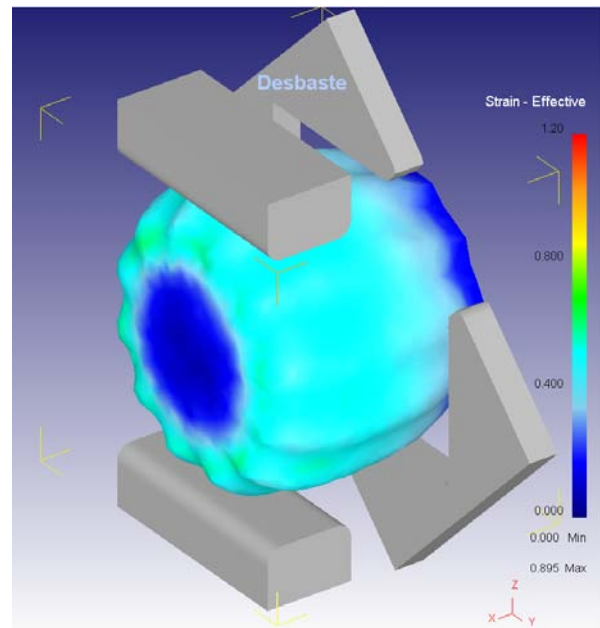
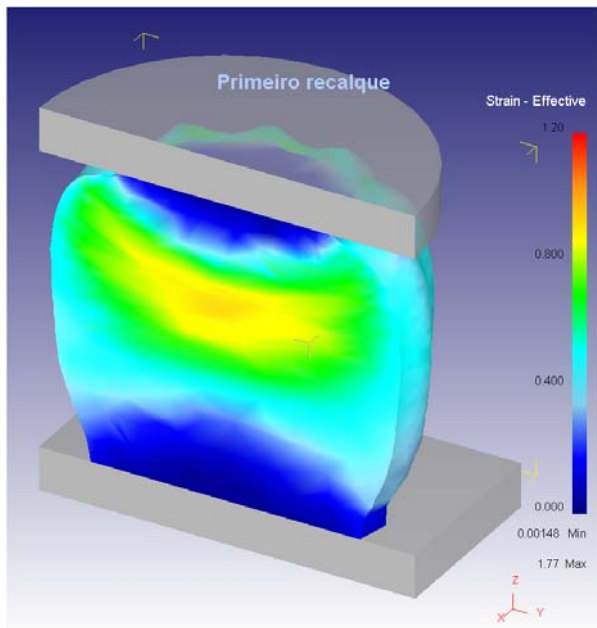
Para as condições de contorno, no que diz respeito à interface lingote ferramenta, utilizaram-se os valores sugeridos pelo DEFORM: 0,7 para o atrito de cisalhamento ( $\mu$ ) e 11 kW/m<sup>2</sup>K para o coeficiente de troca de calor.

Na primeira simulação, o movimento da matriz superior foi definido como igual à velocidade registrada no sistema de aquisição de dados da prensa hidráulica, com o deslocamento total de 1000 mm para a matriz superior. Na simulação seguinte, no processo de desbaste, utilizou-se uma velocidade constante para a matriz superior de 20 mm/s e deslocamento total de 400 mm. Já para o segundo recalque, utilizou-se o mesmo procedimento do primeiro recalque, aplicando na simulação o perfil de velocidade resultante da prensa durante o processo real, com o deslocamento total de 400 mm.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra o mapa de deformação após o primeiro passe de recalque na secção longitudinal do lingote. Observa-se maior deformação na região da metade superior. Na base do lingote, existe uma maior zona de fluxo restringido, decorrente do maior atrito devido a maior área de contato entre o lingote e a ferramenta.

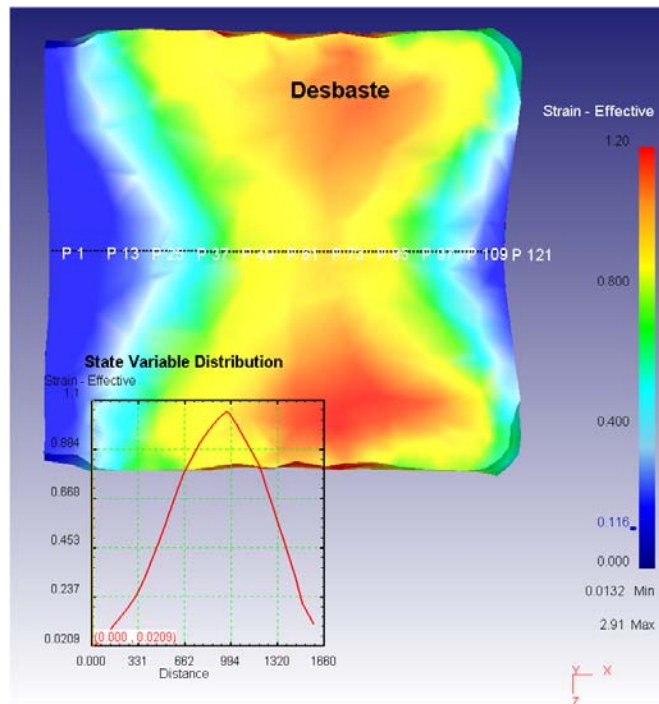
A Figura 5 ilustra o início do processo de desbaste na simulação. Observa-se o cuidado em manter as características do lingote resultante do processo do primeiro recalque. Este procedimento foi possível porque o software DEFORM 3D permite a simulação de uma seqüência de operações conservando as características do lingote, tais como, temperatura e estado de deformação.



**Figura 4** - Mapa de deformação efetiva após o primeiro passe de recalque. **Figura 5** - Lingote posicionado para o desbaste.

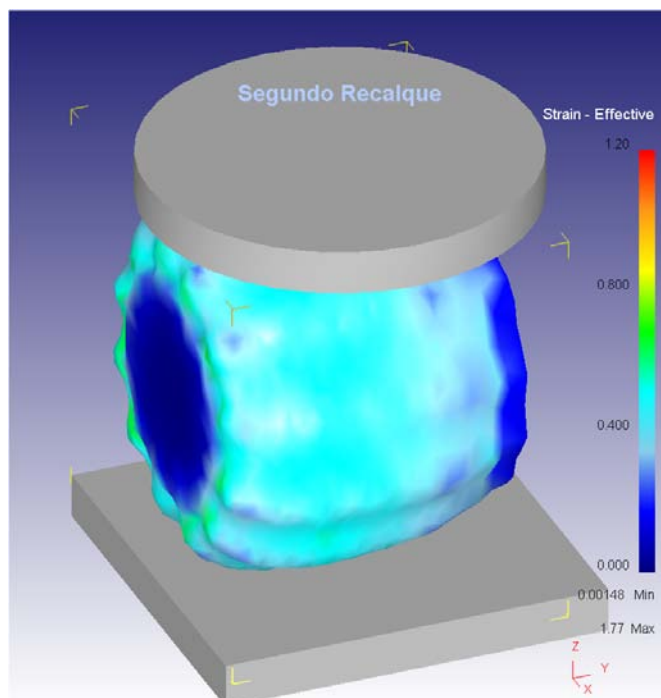
Lembrando que para a simulação de desbaste, utilizaram-se bigornas com 600 mm de largura, correspondendo uma relação B/H aproximadamente 0,33, já que o parâmetro H resultante da primeira simulação corresponde a 1800 mm.

Utilizando-se da ferramenta “*State Variable between Two Points*” disponível no DEFORM 3D, traçou-se o perfil de deformação efetiva ao longo da linha central do lingote em no final do processo de desbaste (Figura 6). Esta ferramenta permitiu a análise da deformação efetiva e, conseqüentemente, a capacidade do lingote fechar vazios e porosidades devido a intensidade de fluxo local de material. A Figura 6 mostra também que a região com as maiores deformações, representada pela cor vermelha, está localizada fora da linha central do lingote.



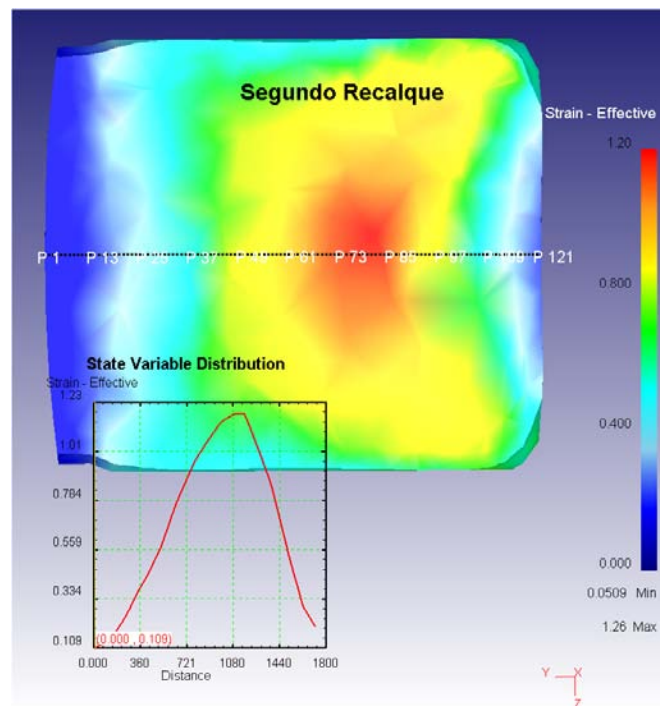
**Figura 6** - Perfil de deformação na linha central do lingote após o processo de desbaste.

A simulação do segundo recalque corresponde ao mesmo processo realizado no primeiro recalque. Foi utilizado o lingote com as propriedades resultantes da primeira simulação com detalhe que o lingote foi posicionado girando em 90 graus, conforme mostra a Figura 7.



**Figura 7** - Lingote posicionado para o segundo passe de recalque.

A Figura 8 mostra o final do segundo passe de recalque realizado com as mesmas matrizes do primeiro recalque e o seu respectivo perfil de deformação efetiva ao longo da linha central do lingote. Observa-se uma maior deformação no núcleo na região direita resultante do processo realizado no primeiro passe.



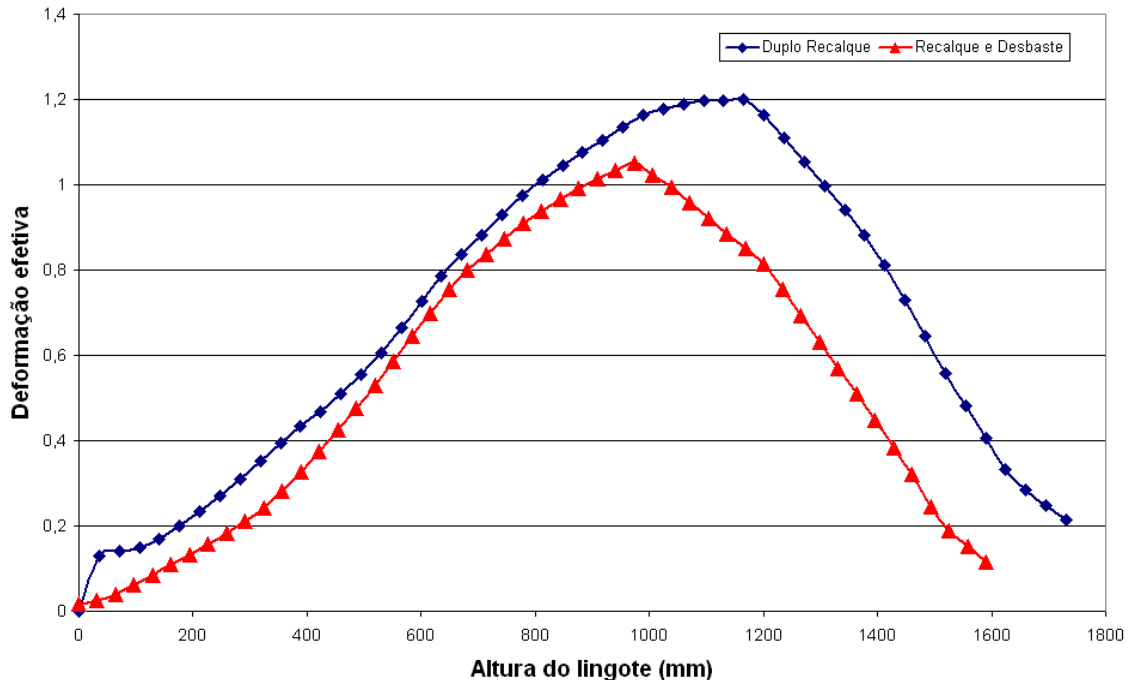
**Figura 8** - Perfil de deformação na linha central do lingote após o segundo recalque.

Ao fazer a comparação dos resultados através das Figuras 6 e 8, percebe-se que o processo que melhor produz maior deformação na linha central é o segundo passe de recalque (com as matrizes de largura maior). Para melhor visualização, a Figura 9 mostra o perfil de deformação efetiva na linha central do lingote para as duas seqüências operacionais. Em ambas, o fenômeno de deformação da região central do lingote ocorre devido à região de fluxo restringido de metal, que se localiza próxima a interface do lingote com a ferramenta. Este fluxo restringido surge devido ao atrito entre a ferramenta e o lingote. Quanto maior é a área de contato, maior será a região de fluxo restringido, em contra partida será necessária maior força para a realização do processo. A região à direita do lingote (Figura 8) corresponde à base do lingote (denominada pé), que possui menor área que o topo (cabeça). Assim, a deformação é maior, devido ao menor atrito e a maior tensão aplicada com a mesma força.

Com a Figura 9, observa-se que em toda linha central do lingote, os níveis de deformação efetiva para o processo de duplo recalque é maior que na seqüência operacional de recalque simples seguido de desbaste. E esta deformação é importante, pois a linha central possui a maior probabilidade de apresentar defeitos, como porosidades e rechupes.

Este resultado pode ser facilmente explicado pelo que foi comentado na introdução sobre o parâmetro da razão B/H. Ao se realizar o desbaste como segunda etapa do processo, o lingote possui a dimensão H igual a aproximadamente 1800 mm; como a largura da bigorna é de 600 mm, tem-se a razão B/H igual a 0,33, ou seja, quase a metade do que se recomenda por estudos anteriores que é de 0,6. Com o processo de recalque na segunda etapa do

processo, a razão B/H é maior que 1, acima do ideal, garantindo maior deformação na linha central do lingote. Assim, no processo de desbaste ocorre uma baixa penetração de deformação na região do defeito, mostrando que esta operação, diretamente após o primeiro recalque, é menos indicada que o segundo recalque.



**Figura 9** – Perfis de deformação efetiva na linha central do lingote para as duas seqüências operacionais.

Contudo, dependendo da posição do defeito, esta deformação ainda pode ser insuficiente, necessitando alterar outros parâmetros de processo em função da capacidade de deformação da prensa, já que o processo de recalque exige maior força para a sua realização.

O forjamento de lingotes de aço através de duplo recalque, sugerido pelo resultado da simulação numérica, foi aplicado na Villares Metals S.A. Produziram-se blocos de aço com secção transversal de 900 x 1000 mm e 750 x 1250 mm, isentos de defeitos internos, garantindo-se a qualidade do produto final para os clientes.

Para a seqüência deste trabalho será analisado o processo de desbaste com uma bigorna com largura que atenda a recomendação para relação B/H igual a 0,6. Este será comparado com o segundo recalque buscando uma deformação no núcleo do lingote equivalente, porém com a aplicação de força menor, diminuindo os esforços nas partes estruturais da prensa, desta forma tornando o processo mais eficiente.

## CONCLUSÃO

A simulação pelo método de elementos finitos se mostrou eficaz no estudo da alteração da seqüência do processo de forjamento de lingotes de aço em matriz aberta. Com os resultados das simulações, observou-se que a deformação no núcleo dos blocos é maior após duplo recalque que no recalque seguido de desbaste.



A melhoria obtida com o duplo recalque ocorre devido a uma relação B/H pequena no processo de desbaste, mas com valor satisfatório no processo do segundo recalque, promovendo maior deformação no núcleo do lingote. Este resultado se mostrou coerente com o obtido na prática.

A continuidade do trabalho, estudando outros valores da relação B/H, trará mais resultados, principalmente em termos da força aplicada pela prensa e da produtividade obtida no processo.

## Agradecimentos

À Villares Metals S.A. pelo apoio para a realização deste trabalho.

## Referências

- 1 BODNAR, R. L., BRAMFITT, B. L., *Physical Modeling of Centerline Consolidation in Heavy Forgings Using Plasticine*. Transactions of the ISS, p. 51-66, September 1987.
- 2 SHAH, K. N., KIEFER, B. V., GAVIGAN, J. J., *Finite Element Simulation of Internal Void Closure in Open-Die Press Forging*. Advanced Manufacturing Process, 1(3&4), p. 501-516, 1986.
- 3 ALLEN, G. B., JOSLING, J. K.; *Special Techniques for Heavy Forging Manufacture*. International Forging Conference, p. 1-21, 1981.
- 4 CHAABAN, M.; *The Effect of Die Shape on the Closure of Internal Cavities within the Forged Billet During Drawing*. Congrès de la Forge Grosse, p. 501-519, Paris, 1975.
- 5 CHO, J. R., BAE, W. B., KIM, Y. H., CHOI, S.S., KIM, D. K., *Analysis of the Cogging Process for Heavy Ingots by Finite Element Method and Physical Modelling Method*. Journal of Materials Processing Thecnology, vol. 80-81, p. 161-165, 1998.
- 6 OVERSTAM, H., JARL, M., *FEM-Simulation of Drawing Out in Open Die Forging*. Steel Research Int., vol. 75, n.12, p. 812-817, 2004.