

ANÁLISE DIMENSIONAL DO FERRAMENTAL NO FORJAMENTO A QUENTE EM MATRIZ ABERTA DE LINGOTE DE AÇO AISI 4340 PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS ¹

*Roberto Tibúrcio Canito Frota Jr ²
Eduardo Netto de Souza ³
Celso Antonio Barbosa ⁴*

Resumo

Uma das técnicas de forjamento a quente em matriz aberta mais praticada é o estiramento. Ao utilizar esta técnica é importante definir o efeito de parâmetros dimensionais como a largura e o raio de canto da matriz de forjamento. O objetivo deste trabalho é analisar quais são as melhores combinações dos parâmetros analisados para o estiramento durante a operação de desbaste de lingotes. Realizaram-se simulações através do método de elementos finitos (MEF) utilizando o software DEFORMTM 3D. As simulações foram executadas com diferentes dimensões de largura e raio de canto da matriz de forjamento durante o estiramento de um lingote de aço AISI 4340 de 33 toneladas. Para avaliar os resultados obtidos, observou-se a deformação efetiva na linha central do lingote e a força máxima necessária para realização do processo. Os resultados obtidos através das simulações mostraram que os maiores níveis de deformação efetiva e força foram obtidos com matrizes com maior largura e menores raios de canto.

Palavras-chave: Forjamento em matriz aberta; Método de elementos finitos; Estiramento.

DIE DIMENSIONAL ANALYSIS IN HOT OPEN DIE FORGING PROCESS OF AISI 4340 INGOT BY FINITE ELEMENT METHOD

Abstract

Drawing out is one the most practiced technique of hot open die forging process. In this technique, it is important define the effect of die dimensional parameters such as the die width and the die corner radius. The paper goal is analyze what are the best parameters combinations for drawing out during ingot cogging operation. Finite element simulations were performed using the software DEFORMTM3D. Simulations were carried out with different die width and die corner radius during drawing out of 33 tons AISI 4340 steel ingot. To evaluate the results, effective strain at ingot centerline and maximum hydraulic press load were reported. The simulation results showed that the highest values of effective strain and press load were reached with larger die width and smaller die corner radius.

Key words: Open die forging; Finite element method; Drawing out.

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 da Villares Metals S.A.*

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

⁴ *Gerente de Tecnologia, Centro de Pesquisa & Desenvolvimento da Villares Metals S.A.*

1 INTRODUÇÃO

O estiramento é uma técnica de forjamento a quente em matriz aberta que consiste em reduzir a largura do lingote aumentando seu comprimento,⁽¹⁾ através de vários golpes ao longo do comprimento do lingote. Em seguida o lingote é girado em relação ao eixo longitudinal e é aplicada uma nova seqüência de golpes, chamada de passe. A técnica de estiramento é muito praticada para desbastar lingotes, cujo objetivo principal é transformar um lingote com estrutura interna na forma bruta de fusão em um tarugo com estrutura interna homogênea,⁽²⁾ dando uma determinada pré-forma para seguir na rota de produção em outros processos até resultar em um produto acabado.

Dessa forma, o estiramento é capaz de quebrar a estrutura bruta de solidificação através do trabalho mecânico da deformação aplicada, eliminando defeitos internos como rechupes, porosidades e segregações que são inerentes ao processo de solidificação,⁽³⁾ que normalmente estão localizados na região central do lingote.⁽¹⁾ Portanto, é importante que o estiramento seja bem planejado para promover níveis de deformação suficiente na região central do lingote.⁽⁴⁾ Além da eliminação de defeitos internos, o estiramento durante a operação de desbaste promove o refinamento e homogeneização microestrutural e, conseqüentemente, uma melhoria nas propriedades mecânicas e na qualidade interna do forjado.⁽⁵⁾

Para o bom planejamento do estiramento, vários fatores estão envolvidos. O projeto da geometria da matriz é um dos fatores mais importantes, pois dependendo de parâmetros como a largura e o raio de canto da matriz, a deformação produzida na região central do lingote atinge um determinado valor, que é influenciada diretamente pela força necessária para a realização da operação.

O fenômeno da deformação na região central do lingote depende da superfície de contato da matriz com o lingote. Quanto maior for a superfície de contato, maior é a força de atrito produzida nesta região que restringe o fluxo de metal, de forma a induzir a deformação em regiões mais internas do lingote.

Vários estudos já foram publicados sobre o forjamento a quente em matriz aberta desde meados do século passado, com a utilização de blocos de aço furados artificialmente,^(6,7) até nos anos mais recentes através da simulação numérica por elementos finitos.^(4,8-10) Cada estudo possui alguns parâmetros investigados e uma metodologia aplicada.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o forjamento a quente em matriz aberta de um lingote com 33 toneladas de aço AISI 4340, com o intuito de analisar parâmetros da geometria da matriz como largura e raio de canto no estiramento. Para isto, foram realizadas simulação pelo método de elementos finitos da técnica de estiramento com matrizes de três larguras (600 mm, 800 mm e 1000 mm) e três raios de canto diferentes (40 mm, 80 mm e 160 mm). Os resultados de deformação efetiva na região central do lingote e força máxima aplicada foram os indicadores utilizados para a avaliação da eficácia do forjamento na qualidade interna do produto forjado.

2 METODOLOGIA

As simulações foram feitas no software DEFORMTM 3D, pacote comercial com código fechado especialmente desenvolvido para simulações de conformação mecânica. Para que a análise do forjamento seja, o mais próximo da realidade, utilizou-se a geometria real do lingote de 33 toneladas (Figura 1) e seguiu-se a

seqüência de operações normalmente aplicada a lingotes deste porte, ou seja, inicialmente são feitos três passes de recalque para depois ser realizado o estiramento. Neste trabalho foi dada ênfase nos resultados da técnica de estiramento, cujas condições iniciais são as condições finais das etapas simuladas dos processos de recalque mantendo-se, dessa maneira, a continuidade das modificações das variáveis do processo, tais como temperatura e deformação.

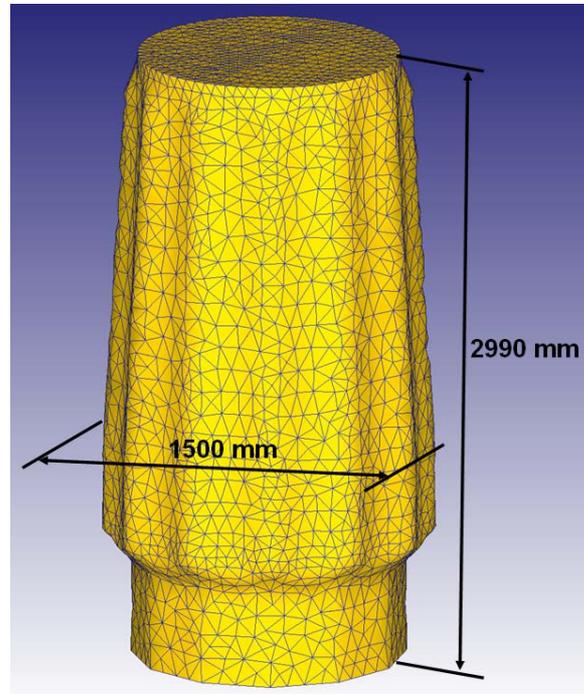


Figura 1. Geometria com as dimensões principais e a malha de elementos finitos do lingote de 33 toneladas.

Assumiram-se, nas operações de recalque, matrizes como sendo placas planas de dimensões maiores que a largura do lingote. Os três passes de recalque do lingote são realizados com giros de 90° conforme a seqüência da Figura 2.

Após as operações de recalque, o lingote se apresenta com uma forma esquadrejada (Figura 3), definindo-se assim, as condições iniciais para a simulação de estiramento.

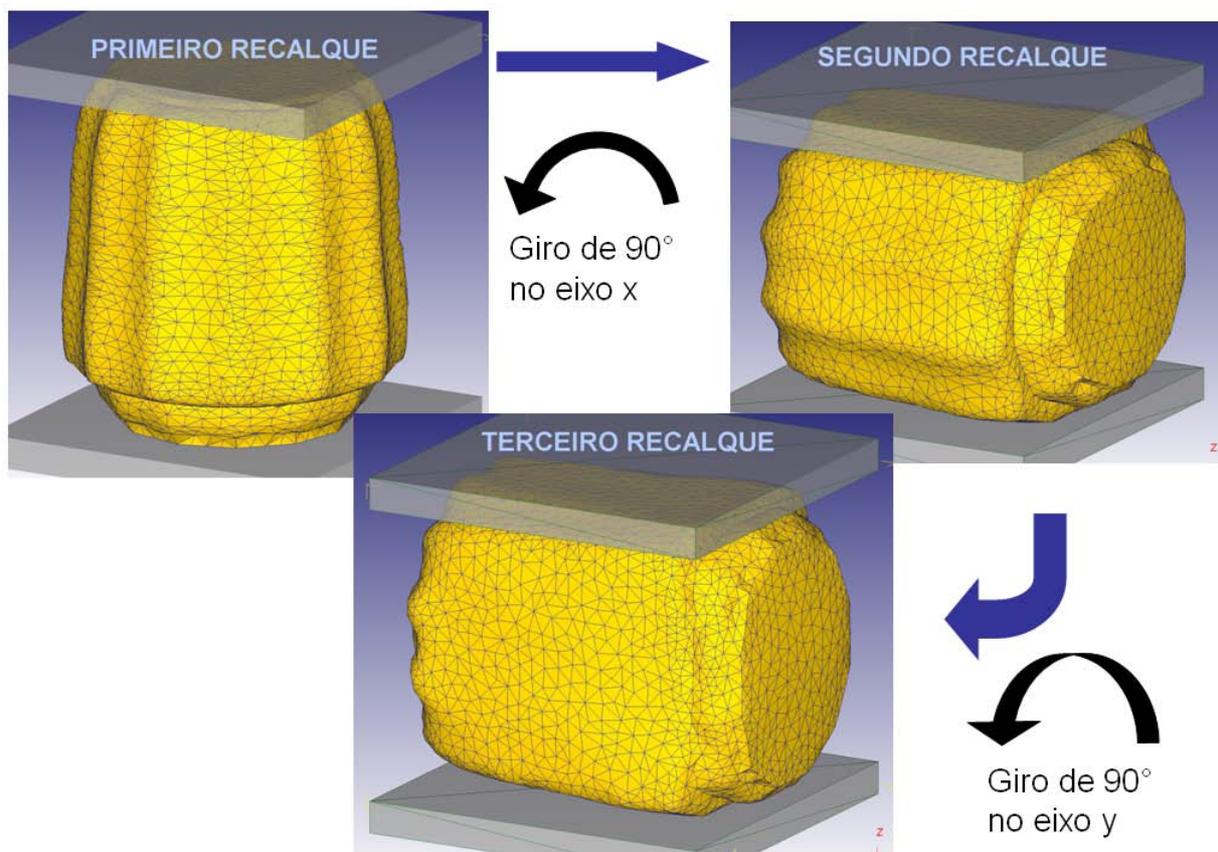


Figura 2. Seqüências de recalque com giros de 90° entre as etapas.

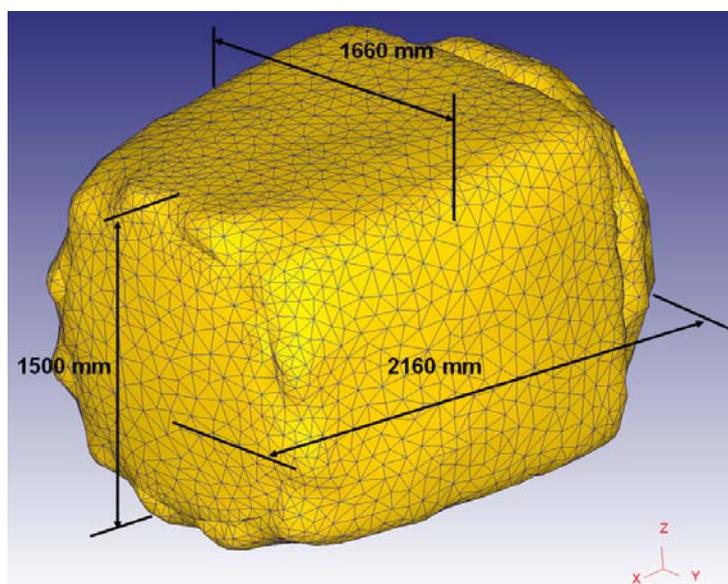


Figura 3. Dimensões do lingote após o recalque.

O material selecionado para o lingote foi o aço AISI 4340 e para as matrizes, o aço AISI H13, sendo que na simulação, o lingote apresenta comportamento rígido-plástico e as matrizes com comportamento rígido. Os parâmetros termomecânicos estão acoplados e as propriedades dos aços foram retiradas do banco de dados do DEFORM™ 3D. A Tabela 1 resume as principais propriedades térmicas e as propriedades mecânicas podem ser representadas pelas curvas de escoamento contidas no gráfico da Figura 4.

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 ² °C	2,8~7,4 N/mm ² °C
Emissividade	0,7	0,7

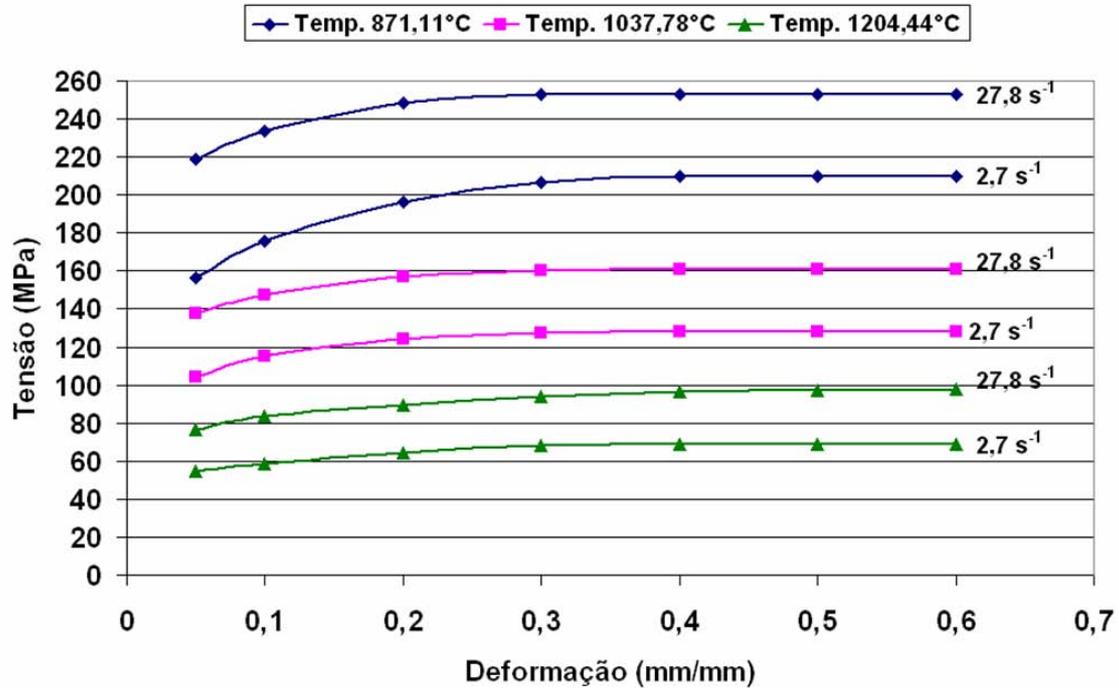


Figura 4. Curvas de escoamento do AISI 4340 extraídas do banco de dados do DEFORM.

Os principais parâmetros de entrada para as simulações de estiramento estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de entrada para as simulações.

Entrada	Valor
Temperatura inicial do Lingote (°C)	1260
Temperatura inicial das Matrizes (°C)	30
Temperatura Ambiente (°C)	30
Coef. Transf. Calor com o Ambiente (W/m ² K)	10
Coef. Transf. Calor com as Matrizes (kW/m ² K)	11
Coeficiente de Atrito de Cisalhamento	0,7

Para efeito de simplificação da análise, realizou-se a simulação apenas de um golpe com a matriz posicionada no meio do lingote, assim como mostra a Figura 5.

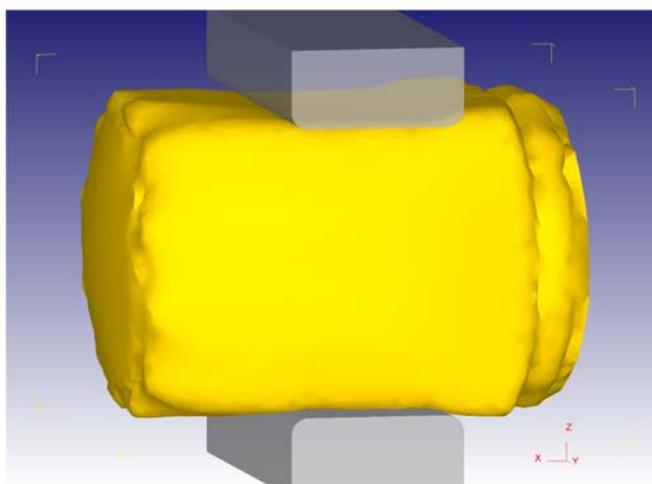


Figura 5. Detalhe do posicionamento das matrizes no estiramento.

O principal motivo da simplificação foi evitar a influência da operação de *Remesh*, que consiste no processo computacional, no qual a malha de elementos finitos do objeto em deformação é refeita durante a simulação devido a grande distorção em algum elemento particular da malha. Com a geração da nova malha, os valores das variáveis do processo no objeto são interpoladas.⁽¹¹⁾

O movimento foi definido apenas para a matriz superior com uma velocidade constante de 15 mm/s. Desta forma, assume-se que a prensa hidráulica não apresenta limitações de capacidade. Para o critério de parada da simulação foi escolhido uma distância mínima entre as matrizes de 1.250 mm. Como a largura do lingote no início do estiramento foi de 1500 mm, em todas as simulações o deslocamento da matriz superior foi de 250 mm que foi calculado em passos de 1 mm. No cálculo numérico, utilizou-se a técnica de gradiente-conjugado com o método iterativo direto para resolver o sistema de equações de elementos finitos.

No total foram realizadas nove simulações de estiramento, com a variação das dimensões dos raios do canto e da largura das matrizes. A Tabela 3 mostra a nomenclatura adotada para identificação de cada simulação com as respectivas dimensões avaliadas nas matrizes.

Tabela 3. Nomenclatura adotada.

Nº	Nome	Raio de Canto (mm)	Largura (mm)
1	R40 L600	40	600
2	R80 L600	80	600
3	R160 L600	160	600
4	R40 L800	40	800
5	R80 L800	80	800
6	R160 L800	160	800
7	R40 L1000	40	1000
8	R80 L1000	80	1000
9	R160 L1000	160	1000

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as simulações ocorreram como previsto, exceto a simulação R80 L800 que realizou uma operação de *remesh* automático no passo 156, interferindo na

comparação dos resultados. De qualquer forma, o resultado desta simulação será apresentado e poderá ser visto como um *remesh* interfere neste tipo de análise.

O primeiro resultado a ser analisado foi a deformação efetiva. Inicialmente, na forma visual com figuras (Figura 6) que mostram os resultados da deformação efetiva na região central dos lingotes. Em todos os resultados a escala para a deformação efetiva foi definida de 1,5 mm/mm a 2,0 mm/mm, de forma que as deformações na linha central ficassem evidenciadas.

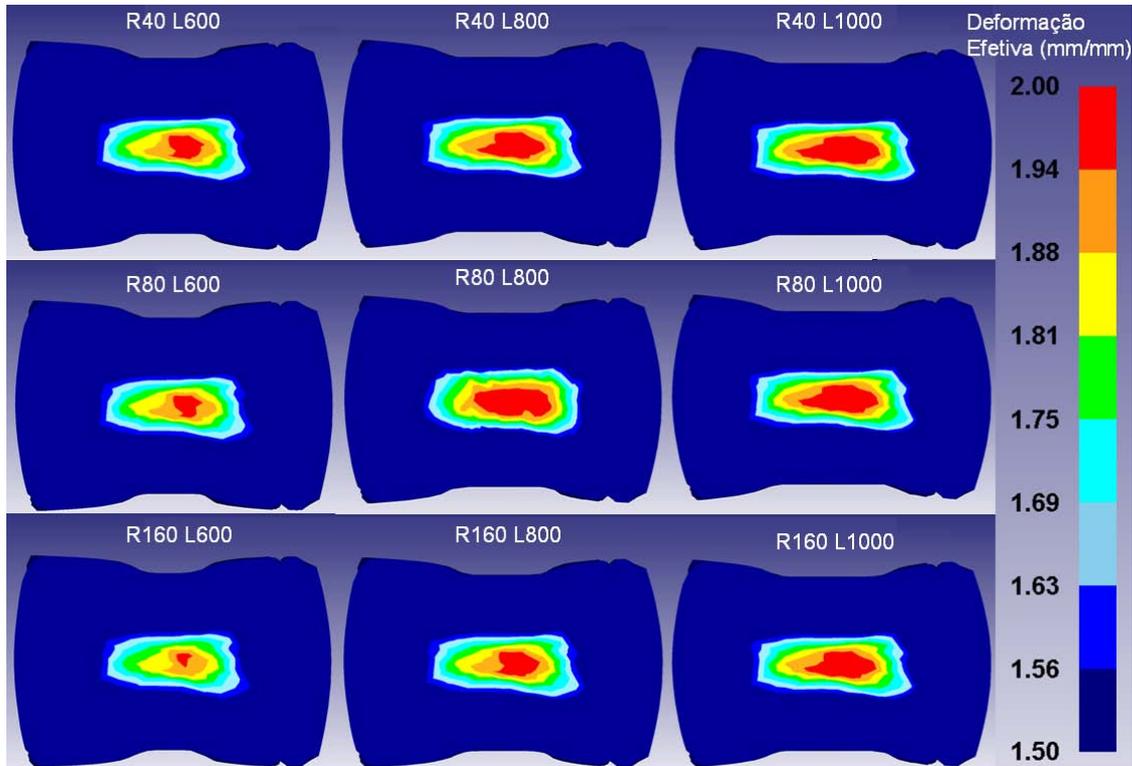


Figura 6. Deformação efetiva na região central dos lingotes.

Além da forma visual, utilizou-se o recurso “*Point Tracking*” do pós-processador do DEFORM para comparar graficamente o resultado da deformação. Este recurso mostra a evolução da deformação efetiva durante o tempo de processo. A Figura 7 ilustra a posição do ponto central e a Figura 8 mostra o gráfico obtido com a extração de dados do recurso “*Point Tracking*”.

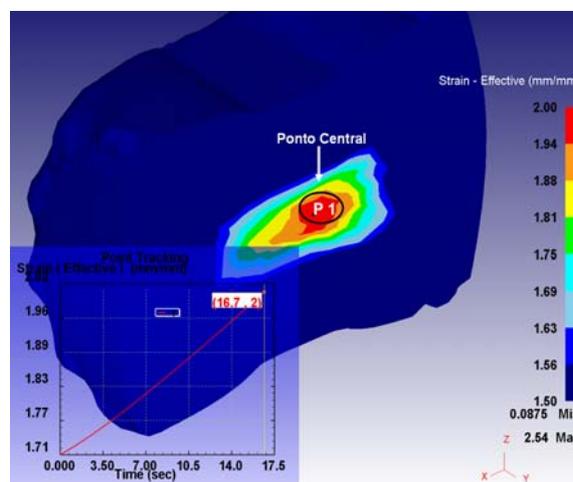


Figura 7. Posição do ponto central para o estiramento da simulação R40 L600.

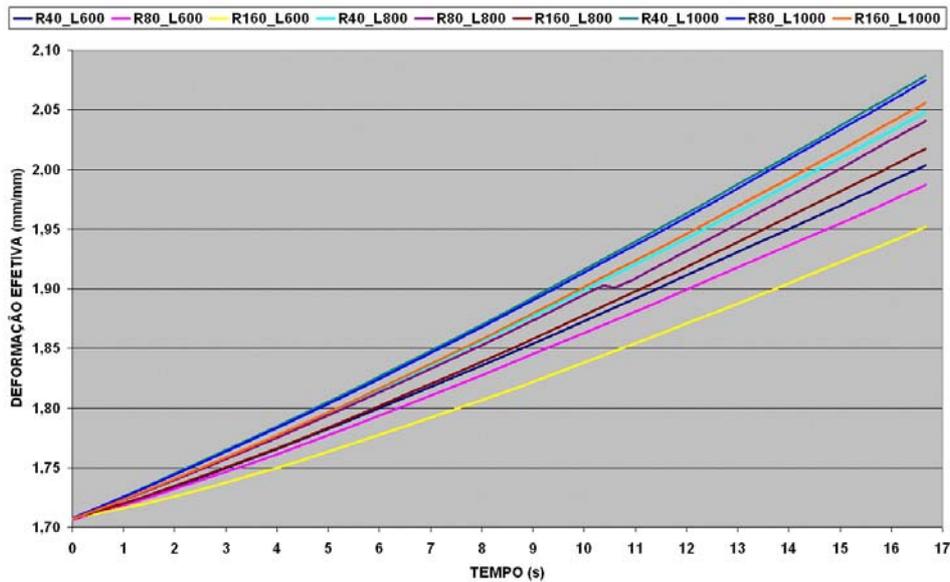


Figura 8. Gráfico com a evolução da deformação efetiva no ponto central do lingote para cada simulação.

O resultado mostra que, quanto maior a largura e menor o raio de canto da matriz, maior é a deformação efetiva resultante no ponto central do lingote.

Na Figura 8, pode-se ainda notar que na simulação R80 L800, a evolução da deformação efetiva apresentou um ponto de inflexão quando o processo passou de 10 segundos. Este ponto de inflexão é resultante da interpolação dos dados durante o *remesh* ocorrido nesta simulação.

A Figura 9 mostra o gráfico com a distribuição da deformação efetiva na linha central do lingote para todas as simulações. Nota-se que os perfis de deformação são semelhantes, exceto para a simulação R80 L800, pelo mesmo motivo anterior. Sendo que neste gráfico, torna-se mais visível como o *remesh* influencia na comparação dos resultados. Não obstante esta diferença, pode-se observar novamente que, quanto maior é a largura e menor é o raio de canto da matriz, maior é a deformação na linha central do lingote.

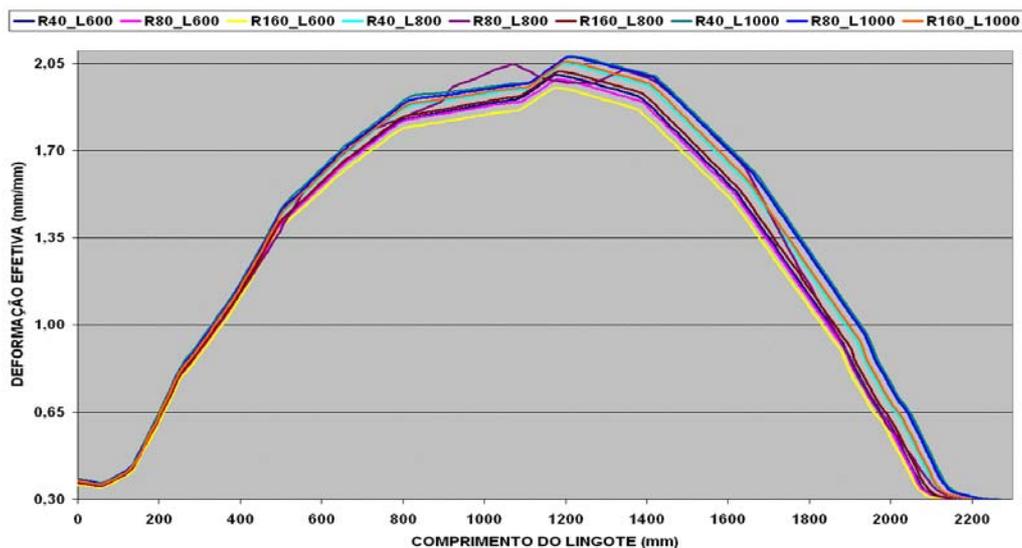


Figura 9. Deformação efetiva na linha central do lingote para todas as simulações após 250 mm de deslocamento da matriz superior.

Ainda na Figura 8, observa-se que ao se comparar as simulações de largura e raio extremos (R160 L600 e R40 L1000), a variação percentual da deformação efetiva resultante atinge o valor máximo de 6,5% no final do estiramento. Este valor aparentemente é pequeno, mas se tem que levar em conta que foi simulado apenas um golpe. Certamente, quando realizado vários golpes e passes esta diferença deverá aumentar.

Outra análise realizada foi a influência da razão L/H da largura da matriz com a altura do lingote na deformação efetiva produzida. Outros trabalhos^(4,8,10) concluíram que o valor ideal para a razão L/H deve ser em torno de 0,6. O resultado obtido neste trabalho está ilustrado na Figura 10.

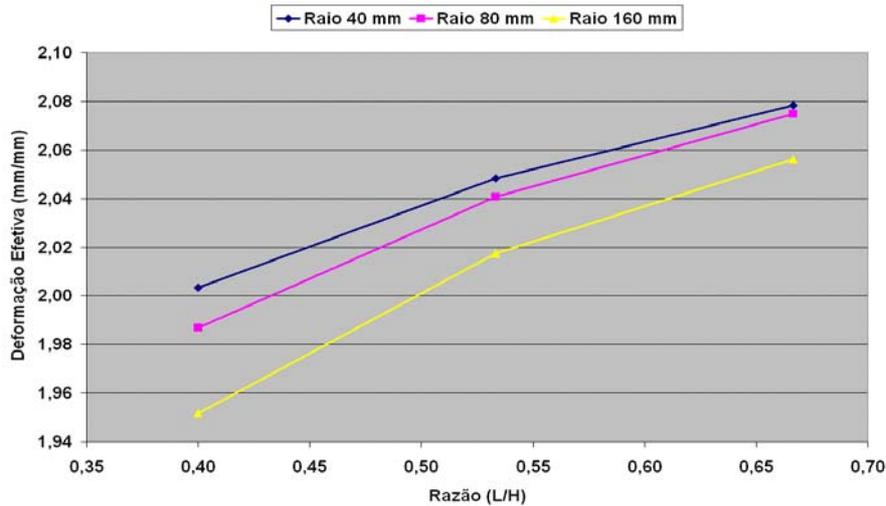


Figura 10. Deformação efetiva máxima em relação a razão L/H.

A Figura 10 comprova que quanto maior é a razão L/H, maior é a deformação efetiva no centro do lingote, mostrando que a razão de 0,67 proporcionada pelas matrizes com largura de 1000 mm é mais eficiente em produzir deformação. Seria necessário executar simulações com outras larguras de matriz para concluir qual é o valor ideal para a razão L/H na situação apresentada neste trabalho.

Com relação ao resultado da força máxima aplicada ao processo, pode-se notar que quanto maior a largura e menor o raio de canto da matriz maior é a força aplicada ao estiramento, do mesmo modo que foi observado no resultado da deformação efetiva, a Figura 11 ilustra o gráfico com o resultado.

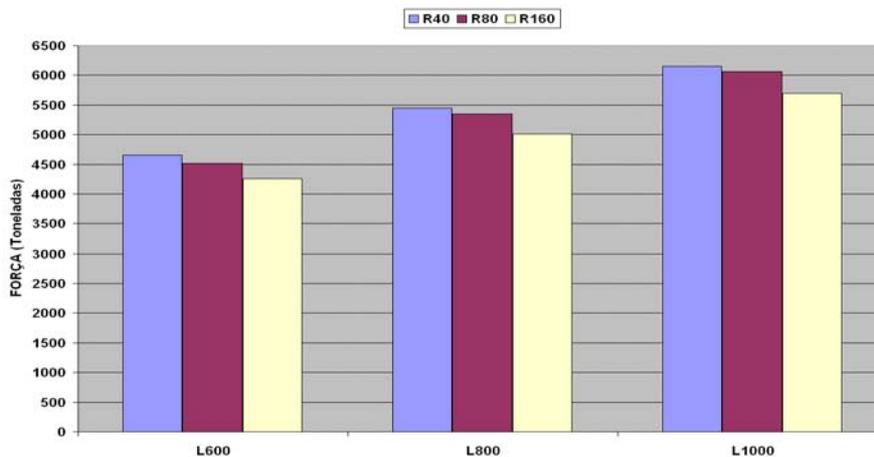


Figura 11. Força máxima aplicada em cada simulação.

É interessante observar as faixas de força máxima de acordo com a largura da matriz. Para matrizes com largura de 600 mm, a faixa de força máxima está entre 4.250 toneladas e 4.750 toneladas, enquanto para matriz com largura de 800 mm a faixa é de 5.000 toneladas a 5.500 toneladas e, para largura de 1.000 mm, a faixa está em 5.750 toneladas e 6.250 toneladas. Observando-se a correlação do raio com a variação da força máxima durante o estiramento, nota-se que a mudança de raios exerce influência conforme relatado no parágrafo anterior. Além disso, é notável que a influência dos raios seja menor que a variação de largura. Para quantificar essa influência da largura e do raio de canto da matriz, analisou-se a variação percentual média da força. Os resultados estão contidos na Tabela 4.

Tabela 4. Variação percentual média da força com mudança de parâmetros.

Mudança na largura da matriz		Mudança no raio de canto da matriz	
L600 → L800	L800 → L1000	R80 → R40	R160 → R80
17,76%	13,27%	6,30%	2,23%

Todos estes resultados são válidos para as condições já explicitadas na metodologia, ou seja, com lingote de aço AISI 4340 de 33 toneladas e o movimento da matriz superior constante com velocidade de 15 mm/s.

Para a escolha da melhor dimensão da matriz em termos de largura, a capacidade máxima da prensa hidráulica deve ser tomada como base como mostra a Figura 11, de forma que, seja sempre aproveitada a força máxima para promover maiores deformações. Em relação à escolha do raio de canto da matriz com base nos resultados obtidos, os níveis de força aplicada e deformação produzida não exercem influências significativas. Para um melhor dimensionamento do raio, outros parâmetros operacionais devem ser investigados, como por exemplo, comprimento de avanço do lingote, número de golpes por passe, escoamento do metal na superfície e acabamento superficial.

4 CONCLUSÃO

A influência da variação da largura da matriz e dos raios de canto da matriz no processo de forjamento a quente em matriz aberta de um lingote de 33 toneladas foi analisada através da simulação tridimensional pelo método de elementos finitos. Os principais pontos conclusivos são:

- Quanto maior a largura da matriz maior é a deformação efetiva no centro do lingote e maior é a força máxima aplicada.
- Quanto menor é o raio de canto da matriz maior é a deformação efetiva no centro do lingote e maior é a força máxima aplicada.
- A seleção da largura de matriz ideal deve ser realizada através da faixa de força máxima aplicada, visto que, a força está fortemente relacionada com a variação de largura.
- A seleção do raio de canto da matriz ideal depende de fatores operacionais não analisados neste trabalho, já que a variação deste parâmetro apresenta pequena influência nas variações de força máxima e deformação efetiva.

Sugere-se para trabalhos futuros que sejam investigados parâmetros operacionais como acabamento superficial, avanço do lingote, número de golpes para identificar o melhor dimensionamento do raio de canto da matriz.

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 DIETER, G. E., *Metalurgia Mecânica*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 TAMURA, K., TAJIMA, J., *Optimisation of die forging condition and tool design for ensuring both internal quality and dimensional precision by three-dimensional rigid-plastic finite element analysis*. Ironmaking and Steelmaking, vol. 30, n. 5, p. 405-411, 2003.
- 6 TOMLINSON, A., STRINGER, J. D., *The Closing of Internal Cavities in Forgings by Upsetting*. Journal of the Iron and Steel Institute, p. 209-217, 1958.
- 7 TATENO, M., SHINKANO, S., *Study on Closing of Internal Cavities in Heavy Forgings by Hot Free Forging*, Congrès de la Forge Grosse, Paris, 1962.
- 8 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 Technology, vol. 80-81, p. 161-165, 1998.
- 9 CHOI, S. K., CHUN, M. S., VAN TYNE, C. J., MOON, Y. H., *Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis*. Journal of Materials Processing Technology, vol. 172, p. 88-95, 2006.
- 10 OVERSTAM, H., JARL, M., *FEM-Simulation of Drawing Out in Open Die Forging*. Steel Research Int., vol. 75, n.12, p. 812-817, 2004.
- 11 KOBAYASHI, S., OH, S., ALTAN, T., *Metal Forming and the Finite-Element Method*. New York: Oxford University Press, 1989.