

# EFEITO DA FORMA DA BIGORNA NO ESTIRAMENTO DE CILINDROS

## **Diego Ignácio Buteler**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brasil. Tel. +55 (11) 3091-9865. E-mail: [diego.buteler@poli.usp.br](mailto:diego.buteler@poli.usp.br)

## **Pedro Caetano Utida Neves**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brasil. Tel. +55 (11) 3091-9862. E-mail: [pedro.neves@poli.usp.br](mailto:pedro.neves@poli.usp.br)

## **Leonardo Villabón Ramos**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brasil. Tel. +55 (11) 3091-9865. Fax 3091-9861. E-mail: [villabon@usp.br](mailto:villabon@usp.br)

## **Roberto Martins de Souza**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brasil. Tel. +55 (11) 3091-9860. Fax 3091-9860. E-mail: [roberto.souza@poli.usp.br](mailto:roberto.souza@poli.usp.br)

## **Amilton Sinatora**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brasil. E-mail: [sinatora@usp.br](mailto:sinatora@usp.br)

**Resumo.** Neste trabalho, estuda-se o processo de forjamento a quente, em matriz aberta, no sentido radial de um cilindro, em um processo conhecido como estiramento. Resultados obtidos através do software de elementos finitos MSC.SuperForm 2004 foram comparados com resultados obtidos com corpos-de-prova em plasticina. Foram estudados estiramentos com bigornas planas e em V com ângulo de 135°. A distribuição de tensões obtida numericamente foi comparada com o corpo de plasticina após o ensaio. A bigorna plana causou tensões trativas suficientes para abrir trincas no corpo de plasticina. No modelo numérico, com bigornas em V, foram verificadas tensões compressivas no interior do cilindro. O alongamento do cilindro foi maior ao se usarem bigornas em V, tanto para o modelo numérico como para o de plasticina, resultado ligado à redução mais rápida da seção transversal neste caso. Ainda no modelo numérico, o critério das tensões principais do software indicou maior propensão à falha no modelo em V.

**Palavras-chave:** estiramento, método dos elementos finitos, plasticina, forjamento, bigorna.

## **1. INTRODUÇÃO**

Estiramento é um processo de forjamento no sentido radial de um cilindro, que age por esforços de compressão, visando reduzir a seção transversal de uma peça com simultâneo aumento do seu comprimento. O estiramento pode ser em matriz aberta, quando são utilizadas matrizes planas ou de geometria simples; ou em matriz fechada, quando a peça é deformada entre duas metades de matriz que portam, gravadas em baixo-relevo, as impressões do formato desejado<sup>[1]</sup>.

A temperatura de trabalho da peça pode caracterizar o processo como forjamento a frio, sendo este realizado a temperatura ambiente e normalmente utilizado apenas em peças pequenas; ou como forjamento a quente, que emprega altas temperaturas, aumentando assim a ductilidade do material e conseqüentemente diminuindo a energia necessária à deformação, possibilitando a conformação de peças maiores<sup>[1, 2]</sup>.

Em corpos forjados, podem surgir defeitos como propagação de trincas ou abertura de vazios e estas falhas têm sua origem nos estados de deformações e de tensões gerados no forjamento<sup>[3]</sup>.

A aplicação do método dos elementos finitos (MEF) está se tornando cada vez mais popular entre os profissionais da área, entre outros motivos, graças ao avanço da capacidade de processamento dos computadores. Porém, alguns resultados obtidos a partir destas simulações numéricas têm sido questionados e geralmente são de difícil interpretação, como, por exemplo, a análise da influência do estado de tensões e deformações na qualidade das peças estiradas<sup>[4]</sup>.

Alguns trabalhos têm sido publicados utilizando plasticina para simular estiramentos, dada a semelhança do comportamento dos aços em temperatura elevada e da plasticina em temperatura ambiente<sup>[5]</sup>. Outros artigos com plasticina vêm confirmando resultados de simulações numéricas usando MEF<sup>[6]</sup>.

Estudos sobre a configuração de tensões e deformações no cilindro usando diferentes tipos de bigorna, diferentes taxas de deformação ou outras variáveis<sup>[4]</sup>, podem trazer uma economia de tempo e energia para a indústria, além de evitar vazios e trincas, melhorando as características do produto final. Logo, torna-se importante obter um modelo numérico de análise do problema capaz de corroborar resultados práticos experimentais, a fim de otimizar o processo de estiramento.

## 2. OBJETIVOS

Verificar a adequabilidade do modelo da simulação numérica, comparando os resultados experimentais em plasticina com a distribuição de tensões e deformações equivalentes de seções transversais da face e do centro de cilindros de aço ABNT 1045, submetidos a processos de estiramento a quente tanto com bigornas planas como em V.

Introduzir o conceito do Critério C; critério este que relaciona a área final com a área inicial da seção transversal do cilindro. Com base no Critério C, avaliar qual tipo de bigorna reduz mais rápido a seção do cilindro e, conseqüentemente, tem melhor eficiência no processo de alongamento do cilindro.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. Modelo Numérico

O modelo numérico teve como objeto de análise um cilindro de aço ABNT 1045 de comprimento de 3200 mm e diâmetro de 1896 mm. Para reduzir o tempo de processamento, foi feito um modelo com apenas um quarto da geometria do cilindro, aproveitando a simetria do mesmo e das bigornas, como mostra a Figura 1.

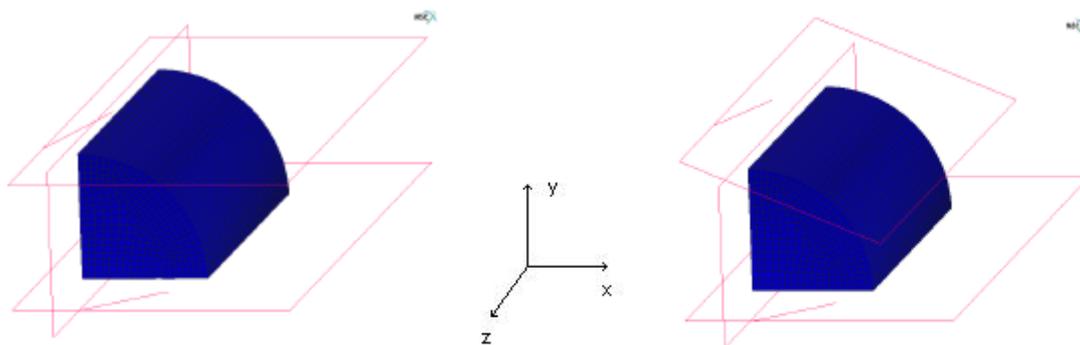


Figura 1. Modelo para bigornas planas (esquerda). Modelo para bigornas em V (direita).

Foram feitas análises elasto-plásticas, considerando os dois tipos de bigornas e usando o elemento 7 do software MSC.SuperForm, hexaedro com oito nós<sup>[7]</sup>. Os parâmetros mais importantes utilizados no modelo estão mostrados na Tabela 1. O comportamento elasto-plástico do material escolhido – ABNT 1045 – foi definido, em função da temperatura, segundo banco de dados do software.

Tabela 1. Parâmetros da simulação numérica tridimensional

Número de elementos	20416
Material escolhido	ABNT 1045
Redução no diâmetro	20 %
Coefficiente de atrito	0,30
Velocidade da prensa	15 mm/s
Temperatura inicial do cilindro	1100 °C
Temperatura das bigornas	153 °C

Os resultados numéricos de tensão no cilindro foram comparados com a situação do corpo-de-prova de plasticina após o ensaio. O estiramento efetivo, ou alongamento do cilindro, também foi comparado.

Adicionalmente, foi feita uma análise sobre a possibilidade do aparecimento de trincas no cilindro, para fazer uma comparação mais completa com os resultados do ensaio com plasticina. Para esta análise foi usado o critério das tensões principais<sup>[7]</sup>, mostrado na Equação 1. Os resultados são obtidos diretamente do software de elementos finitos.

$$d=0, \text{ se } \frac{s_T}{s_{vM}} < 0,5 \quad d = \frac{s_T}{s_{vM}}, \text{ se } \frac{s_T}{s_{vM}} = 0,5 \quad (1)$$

onde  $d$  é dano,  $s_T$  é a tensão principal máxima e  $s_{vM}$  é a tensão de von Mises.

O valor de  $d$  dá uma idéia da possibilidade de ocorrência de fratura no material, sendo que a possibilidade é alta sempre que  $d = 0,5$ <sup>[7]</sup>.

Foram comparadas as reduções de área da seção transversal do cilindro, ao se usarem os dois tipos de bigornas, utilizando a relação  $C$ , mostrada na Equação 2. Os dois processos geravam uma mesma redução de área se o seu valor de  $C$  fosse igual.

$$C = \left( \frac{\text{Área}_{inicial}}{\text{Área}_{final}} \right)^2 \quad (2)$$

A área da seção transversal foi calculada com base nas imagens das malhas deformadas obtidas no software SuperForm. O software ScionImage [<http://www.scioncorp.com>], de domínio público, foi utilizado para obter o valor da área a partir destas imagens.

### 3.2. Modelo em Plasticina

Os corpos-de-prova de plasticina foram confeccionados com 118 mm de comprimento e 70 mm de diâmetro, estando assim em escala de, aproximadamente, 1:27 em relação ao modelo numérico. Os corpos-de-prova possuíam sete camadas cilíndricas concêntricas de plasticina, uma de cada cor, como mostrado na Figura 2. O objetivo destas camadas foi visualizar com maior facilidade o comportamento do material.



Figura 2. Corpos-de-prova de plasticina

Foi confeccionado um dispositivo capaz de simular uma prensa, usando blocos de madeira e guias de alumínio para manter a perpendicularidade dos blocos. Uma barra rosqueada, presa na parte superior do equipamento, quando girada, permitia o movimento do bloco superior, que por sua vez empurrava as bigornas contra o cilindro, deformando o corpo. Foram feitas duas bigornas planas e duas em V com 135°. Estas bigornas foram construídas de madeira e tiveram suas superfícies revestidas em fórmica, com o objetivo de diminuir a sua rugosidade. A Figura 3 mostra o equipamento pronto para ser operado.



Figura 3. Dispositivo com bigornas planas (esquerda). Dispositivo com bigornas em V (direita)

Os cilindros de plasticina foram analisados após uma redução de 20 % na sua altura inicial, para comparação com os resultados numéricos.

Foi estudado um único passe do estiramento, ou seja, o cilindro não foi rotacionado durante o processo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Simulação Numérica Para Bigornas Planas e em V

#### 4.1.1. Análise de Tensões no Cilindro

As Figuras 4 e 5 mostram a distribuição de tensões normais  $s_x$  ao longo de um corte transversal no meio do comprimento do cilindro ( $Z = 1600$  mm), e na face do cilindro ( $Z = 0$ ), respectivamente. O modelo de 1/4 foi expandido após a simulação, de forma a facilitar a visualização dos resultados.

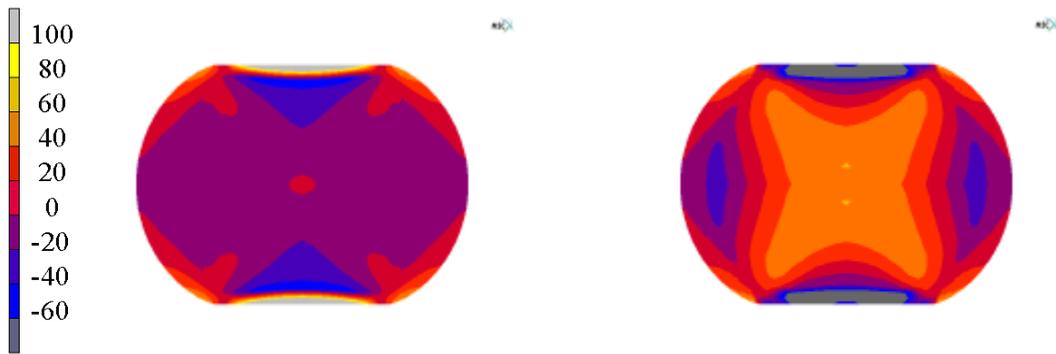


Figura 4.  $s_x$  na seção transversal no meio (esquerda) e na face do cilindro (direita). Ambas para Bigornas planas [MPa]

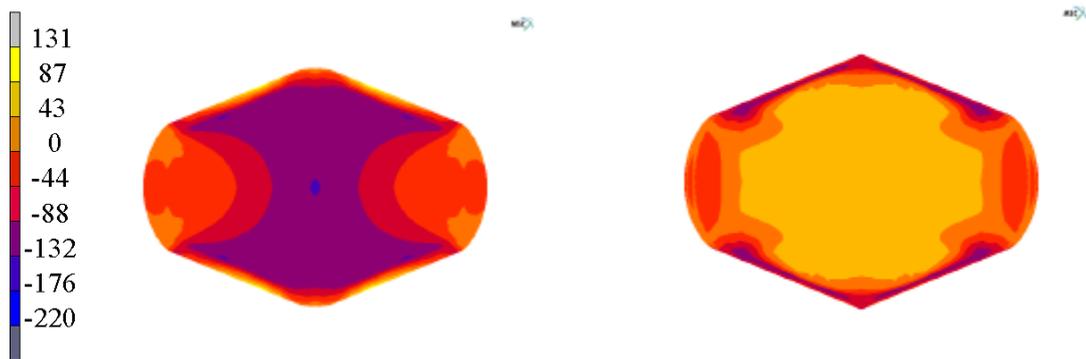


Figura 5.  $s_x$  na seção transversal no meio (esquerda) e na face do cilindro (direita). Ambas para Bigornas em V [Valores de tensão em MPa]

Gráficos mostrando as tensões normais  $s_x$  e  $s_z$  ao longo eixo central do cilindro (eixo Z) estão mostrados na Figura 6. As coordenadas Z referem-se a cada elemento na malha original, não levando em conta o estiramento do cilindro e, por conseqüência, o deslocamento de cada elemento no eixo Z.

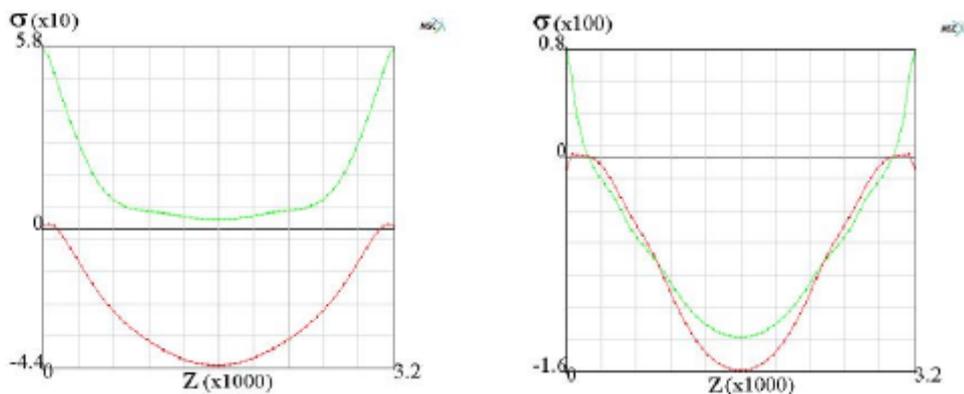


Figura 6.  $s_z$  (curvas vermelhas) e  $s_x$  (curvas verdes) ao longo do eixo Z do cilindro. Bigornas planas (esquerda). Bigornas em V (direita) [MPa]

Os resultados mostram tensões  $s_x$  trativas no cilindro ao se usarem bigornas planas, o que gera uma propensão ao surgimento de defeitos internos. Estas tensões trativas são mais acentuadas na face do mesmo.

Considerando-se as diferenças nas escalas dos gráficos da Figura 6, nota-se que nas faces  $s_x$  tem maior magnitude no caso das bigornas em V, fato que indicaria uma maior probabilidade de trincas. Isso não foi confirmado pelos ensaios, como pode se ver na seção Resultados com Plasticina. Por outro lado, o gráfico obtido com bigornas em V indica um decréscimo abrupto de  $s_x$  em função de Z, o que está mais de acordo com os resultados experimentais. Estes resultados como um todo

levantam dúvidas quanto a possibilidade de comparar as metodologias usadas neste trabalho em regiões de interface com o meio ou em regiões com condições de contorno peculiares.

As tensões  $s_z$  compressivas verificadas no interior do cilindro conformado com bigornas em V são superiores à tensão de escoamento do aço ABNT 1045 nesta temperatura<sup>[8]</sup>, o que pode evidenciar a vantagem do uso deste tipo de bigornas para o fechamento de vazios no cilindro.

#### 4.1.2. Critério de Fratura

Os resultados do valor do dano  $d$  (Equação 1), obtidos a partir do software, estão mostrados na Figura 7 para a face do cilindro ( $Z=0$ ).

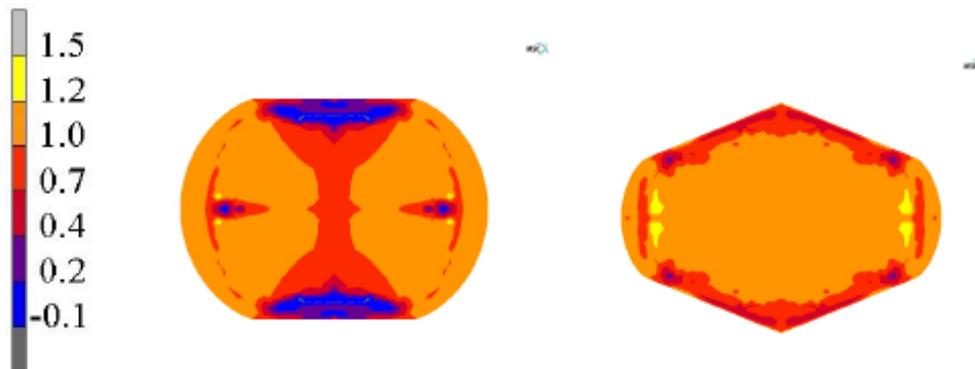


Figura 7. Valores do dano  $d$  para os dois tipos de bigorna. Faces dos cilindros.

Os valores de  $d$  para os dois casos são próximos. Para a bigorna em V há maior possibilidade de aparecimento de trincas na região central, o que está coerente com os resultados da Figura 6 e em desacordo com os resultados experimentais para esta região.

#### 4.1.3. Análise Sobre o Estiramento Efetivo do Cilindro

A Figura 8 mostra o tempo de processo necessário para alcançar o mesmo valor de redução de área,  $C$  (relação das áreas da seção transversal  $(A_{inicial}/A_{final})^2$ ), usando os dois tipos de bigorna.

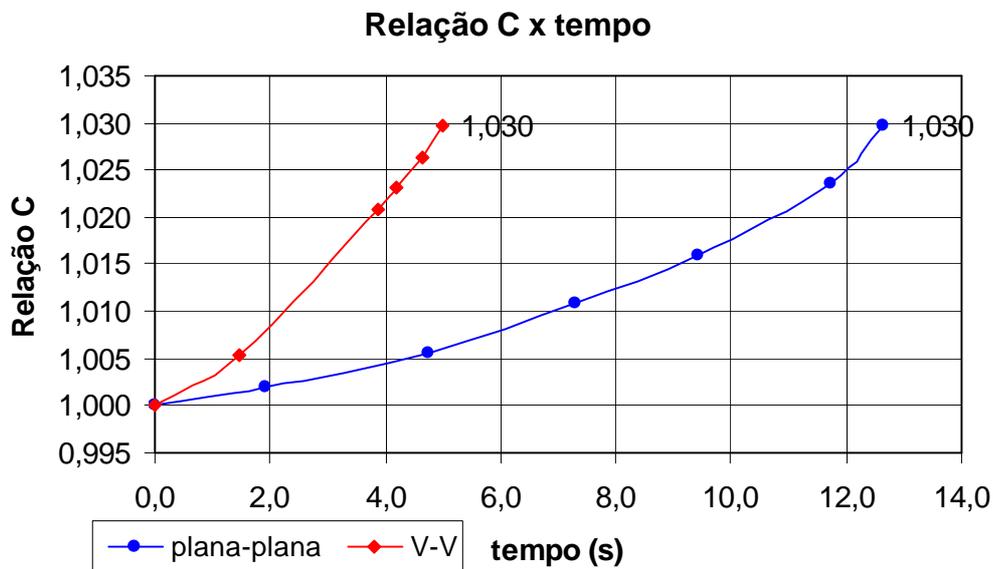


Figura 8. Variação de  $C$  com o tempo de conformação

A Tabela 2 apresenta o valor de  $C$  após 12,64 s de processo usando as bigornas planas, e o tempo necessário para obter esse mesmo  $C$  usando as bigornas V.

Tabela 2. Tempo até atingir o mesmo C	
tipo de bigornas	tempo até C (s)
Plana	12,64
V	5,00

Nota-se que a redução de área durante o processo ocorre mais rapidamente ao se usarem bigornas tipo V. O estiramento do cilindro para cada tipo de bigorna está mostrado na Figura 9.

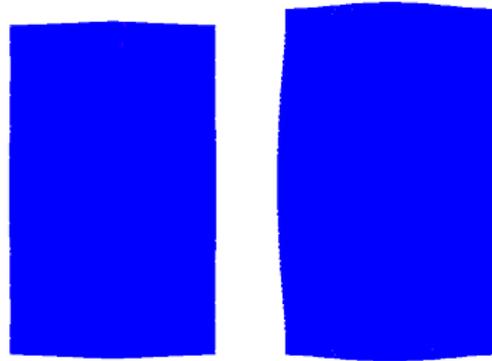


Figura 9. Comparação dos estiramentos para bigornas planas (esquerda) e bigornas em V (direita).

Para as bigornas planas obteve-se um acréscimo de 3,5 % no comprimento inicial do cilindro, enquanto que ao se usarem bigornas em V o aumento foi de 10,9 %.

#### 4.1.4. Análise das deformações

A Figura 10 mostra a distribuição das deformações equivalentes na seção transversal no meio do comprimento do cilindro, para o mesmo deslocamento da prensa. A deformação equivalente é calculada conforme a Equação 3.

$$e_{eq} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[ (e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

onde  $e_i$  são as deformações principais.

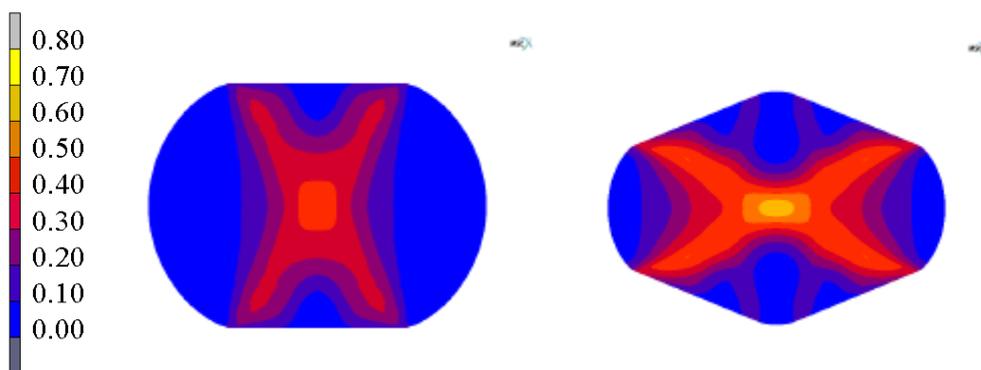


Figura 10. Comparação das deformações equivalentes para os dois tipos de bigornas

Pode-se notar deformações equivalentes mais concentradas no centro da seção, para bigornas planas, e deformações mais intensas e mais distribuídas para bigornas em V. O estudo feito por Fukui<sup>[4]</sup> mostra que, para a mesma redução de altura, a deformação equivalente no centro é maior para bigornas em V, o que é coerente com os resultados obtidos. Diferente de Fukui<sup>[4]</sup>, os dados aqui apresentados permitem observar que a deformação para este tipo de bigornas é maior por toda a seção transversal, e está mais homogeneamente distribuída.

## 4.2. Resultados com Plasticina

A Figura 11 mostra os cilindros de plasticina após uma redução de altura de 20 %, usando os dois tipos de bigornas.



Figura 11. Configuração da face dos cilindros após redução de 20 % na altura

Pode-se perceber o aparecimento de trincas na face do cilindro, na direção perpendicular ao eixo  $x$ , no ensaio com bigornas planas. Estas trincas podem ser associadas à tensão  $s_x$  trativa de alta intensidade. Comparando com os resultados numéricos para bigornas planas (Figura 6), pode-se perceber que há picos de tensões trativas  $s_x$  na face do cilindro, o que explica as trincas verificadas no corpo-de-prova em plasticina. O critério de fratura da Equação 1 também mostrou propensão ao aparecimento de trincas.

Para o ensaio com bigornas em V não foram verificadas trincas na face do cilindro. Os resultados numéricos também mostram picos de tensões trativas na face do cilindro, apesar das tensões serem predominantemente compressivas no interior do mesmo. O critério de fratura utilizado também mostrou propensão ao aparecimento de trincas na face. Pode-se afirmar que os resultados do ensaio com plasticina não foram coerentes com os resultados numéricos, para a face do cilindro, no modelo com bigornas em V.

### 4.2.1. Análise sobre o estiramento efetivo do cilindro

A Figura 12 mostra o estiramento obtido no ensaio com plasticina. O comprimento do eixo do cilindro aumentou 2,3 % para as bigornas planas, e 10,0 % para as bigornas em V. No modelo numérico os valores foram 3,5 e 10,9 %, respectivamente, mostrando coerência entre os resultados.



Figura 12. Estiramento para o modelo em plasticina. Prensados entre bigornas planas (esquerda) e bigornas em V (direita)

## 5. CONCLUSÕES

Sobre os resultados numéricos:

- É mais rápida a redução da área transversal do cilindro ao se usarem bigornas em V do que ao se usarem bigornas planas.

- As bigornas planas causam deformações equivalentes mais concentradas no centro da peça, enquanto que as bigornas em V causam deformações equivalentes mais distribuídas e mais intensas sobre toda a seção transversal do cilindro, para o mesmo curso da bigorna.
- No âmbito das tensões na face do cilindro, nas bigornas em V,  $\sigma_x$  foi maior que no modelo de bigornas planas;

Sobre os resultados com plasticina:

- A bigorna de 135° não resultou no aparecimento de trincas; falhas estas que foram observadas na prensagem com bigornas planas;

Sobre a comparação dos resultados obtidos numericamente e com ensaios com plasticina:

- As trincas verificadas no modelo de plasticina, usando bigornas planas, ocorrem em função das tensões trativas perpendiculares ao estiramento. Estas ocorreram muito próximas do máximo de  $\sigma_x$ ;
- O modelo numérico, simulando aço ABNT 1045, e o modelo em plasticina não apresentaram resultados coerentes em relação às tensões na face do cilindro prensado em bigornas V;
- Houve coerência entre os resultados sobre o estiramento efetivo dos cilindros para os dois modelos;

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão das Bolsas de Iniciação Científica, ao Prof. Dr. João Paulo Pereira Marcicano, da EPUSP, pela relevante colaboração envolvendo critérios de falha e aos pesquisadores do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP pela oportunidade de desenvolver este projeto e pelo apoio prestado durante o desenvolvimento deste.

## REFERÊNCIAS

1. COSTA, H. B.; MIRA, F. M. **Apostila: Disciplina: Processos de Fabricação II**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1985.
2. CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. Mc Graw-Hill, 1977. vol. 1.
3. KRONEIS, M.; SKAMLETZ, T. **Contribuição Para o Conhecimento dos Processos de Deformação no Forjamento**. Separata do Ano 109, Caderno 1, 1964. Aços Villares.
4. FUKUI, Y.; YONEZAWA, J.; MIZUTA, A.; TSUDA, O. **Analysis of forging effects in free forging by the rigid-plastic finite element method**.
5. PERTENCE, A. E. M.; CETLIN, P. R. **Analysis of a new model material for the physical simulation of metal forming**. Journal of Materials Processing Technology 84 (1998). 1997. pp. 261-267.
6. Bressan, J. D. **Numerical Simulation of Hot Forging of Steel Lozenge Closed Dies**. 2° Congresso Brasileiro de engenharia de fabricação, Uberlândia Brasil, 2003
7. Manual do software. MSC.SuperForm2002. Command Reference.
8. PRASAD; SASIDHARA. *Hot Working Guide*. ASM International. 1997.

# EFFECT OF THE SHAPE OF THE ANVIL IN STRETCHING OF CYLINDERS

## **Diego Ignácio Buteler**

Polytechnic School of University of São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brazil. Tel. +55 (11) 3091-9865. E-mail: [diego.buteler@poli.usp.br](mailto:diego.buteler@poli.usp.br)

## **Pedro Caetano Utida Neves**

Polytechnic School of University of São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brazil. Tel. +55 (11) 3091-9862. E-mail: [pedro.neves@poli.usp.br](mailto:pedro.neves@poli.usp.br)

## **Leonardo Villabón Ramos**

Polytechnic School of University of São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brasil. Tel. +55 (11) 3091-9865. E-mail: [villabon@usp.br](mailto:villabon@usp.br)

## **Roberto Martins de Souza**

Polytechnic School of University of São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brazil. Tel. +55 (11) 3091-9860. E-mail: [roberto.souza@poli.usp.br](mailto:roberto.souza@poli.usp.br)

## **Amilton Sinatora**

Polytechnic School of University of São Paulo. Av. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária 05508-900, São Paulo-SP, Brazil. E-mail: [asinatora@usp.br](mailto:asinatora@usp.br)

**Abstract.** *This work presents a study on the hot forging of cylinders, in open die, and applying radial loads; a process known as stretching. Results obtained from the finite element analysis software MSC.SuperForm 2004 were compared with those obtained from experiments conducted in plasticine specimens. Stretching processes with flat and 135° V anvil, were analysed. The stress distribution, numerically calculated, was compared with the configuration of the plasticine body after the experiment. The flat anvil resulted in tensile stresses enough to open cracks in the plasticine body. In the numerical model with V anvils, compressive stresses inside the cylinder were observed. Both the numerical and experimental studies showed a larger increase in cylinder length by using the V anvil, associated with a faster reduction in cross-section. Once again in numerical model, the principal stress criterion showed that V anvils were more prone to crack propagation.*

**Keywords.** *stretching, finite element method, plasticine, forging, anvil.*