



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL NA PRODUÇÃO DE UM CABO DO FREIO EM PRENSA HIDRÁULICA

Erlano Campos dos Reis, erlano@comamindustrial.com.br¹

Gilmar Cordeiro da Silva, gilmarcord@gmail.com¹

José Rubens Gonçalves Carneiro, joserub@pucminas.br¹

Larissa Vilela Costa, lavilela_engmec@yahoo.com.br¹

¹ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Rua Dom José Gaspar, 500, Bairro Coração Eucarístico, CEP: 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais - Brasil

Resumo: A extrusão é um dos processos de conformação mais utilizados e se classifica em lateral, a frente e à ré. A extrusão é feita em prensas hidráulicas ou mecânicas, resultando em peças de excelente controle dimensional, acabamento superficial com vantagens econômicas sobre a usinagem. Atualmente, apresenta-se desafio a análise por elementos finitos e simulações de processo de conformar materiais e suas propriedades mecânicas do ponto de vista teórico e prático. Tem sido possível com relativo sucesso, a análise do processo de extrusão a frio bem como sua otimização ainda na fase de projeto. O forjamento é o termo genérico usado para descrever a aplicação prática da deformação plástica de diversos metais dentro de uma enorme variedade de formas controladas tecnicamente. Dependendo da forma desejada, sua conformação requer vários estágios, sendo que cada estágio é responsável por pequena deformação. A constante busca da diminuição do tempo de produção associado ao avanço tecnológico, fez com que se chegasse às máquinas multiestágios de forjamento a frio, produzindo, numa cadeia muito elevada, diversos componentes. No entanto, a obtenção da seqüência de produção ideal é complicada e, muitas vezes, obtida através de métodos empíricos, o que leva à realização de muitos testes e ajustes, que encarecem o projeto. Este trabalho avaliou as variáveis de processo bem como suas restrições no forjamento em matriz fechada de um terminal do cabo de freio de mão utilizado na indústria automobilística. Concluiu-se que a matéria-prima adequada para conformar o produto é o ABNT 1010 diferentemente do ABNT 12L14 e DIN 9SMn36, e, também, conseguiu-se reduzir a fabricação para 4 estágios em prensa hidráulica com economia de material.

Palavras-chave: Método de Elementos Finitos, Usinagem, Estampagem (metal)

1. INTRODUÇÃO

Conformação de metal é um processo amplamente usado em fabricação em razão do mínimo desperdício, precisão dimensional e propriedades mecânicas ajustadas. Extrusão é o processo pelo qual um bloco de material é reduzido na seção transversal por forçá-lo através de um orifício sob alta pressão. Em razão das elevadas forças envolvidas, a maioria dos materiais são extrudados a quente onde a resistência à deformação é baixa. O processo de extrusão a frio (direto e indireto), é possível para muitos materiais e constitui importante alternativa de processo comercial.

A extrusão é feita em prensas hidráulicas ou mecânicas. As prensas mecânicas são de alta produtividade e elevado custo inicial em comparação às prensas hidráulicas. Conformação a frio resulta em alta produção de peças de material de baixo custo com excelente controle dimensional e acabamento superficial. Os aços mais utilizados na conformação a frio de elementos de fixação são os aços de baixo carbono tais como ABNT 1010, em substituição aos aços usinados (ABNT 12L14 e DIN 9SMn36) e de baixa liga tratados termicamente (ABNT 10B22). Todos esses aços (com exceção do ABNT1010 e ABNT 10B22) são usualmente empregados para fabricação dos terminais elétricos em processo de usinagem. Alguns parâmetros que influenciam a conformabilidade de arames foram analisados tais como a composição química, desoxidação, microestrutura, qualidade da superfície, revestimento superficial e velocidade do recalque (Weidig et al, 1995; Ochiai et al, 1994). A fabricação da matéria-prima conformada a frio deve propiciar ausência de defeitos antes da operação através do controle de processo e recondicionamento por escarrafagem. Os principais defeitos que podem ocorrer na conformação são de forma, dobras, defeitos de preenchimento, trincas e marcas em decorrência da matriz que prejudica o desempenho da peça em serviço.

A modelagem computacional de cada estágio do processo de conformação pelo método de elementos finitos pode tornar o projeto da seqüência mais rápido e eficiente, decrescendo o uso dos métodos convencionais de “tentativa e erro”, Lima et al (2000). A existência de um banco de dados obtido experimentalmente e em combinação com

“software” específico de simulação de forjamento potencializa o valor da simulação, e, mais importante, a velocidade de desenvolvimento do processo. Justifica-se, portanto, este trabalho pela possibilidade que a simulação por elementos finitos proporciona em termos de se analisar as restrições do forjamento do terminal do freio de mão feito em prensa hidráulica em detrimento à prensa mecânica de alta velocidade de deformação em aços utilizados, na condição de conformado a frio ou submetido à operação de tratamento térmico. A conformação a frio apresenta vantagens econômicas sobre a usinagem, tais como: economia de material, produtividade e custo operacional.

O presente estudo empregou a modelagem numérica via elementos finitos (software comercial Deform 2D) e métodos experimentais na fabricação de terminal extrudado a frio em prensa hidráulica, para viabilizar a substituição da usinagem pela conformação a frio com otimização do número de estágios de operação.

2. METODOLOGIA

2.1. Análise Química/Metalográfica e propriedades mecânicas da matéria-prima

A Figura (1) mostra as dimensões do terminal após extrusão a frio. Esse terminal pode ser feito através de usinagem, utilizando-se as matérias-primas ABNT12L14, DIN9SMn36, ABNT 1010 (trefilado) ou ABNT 10B22 (esferoidizado ou temperado e revenido).

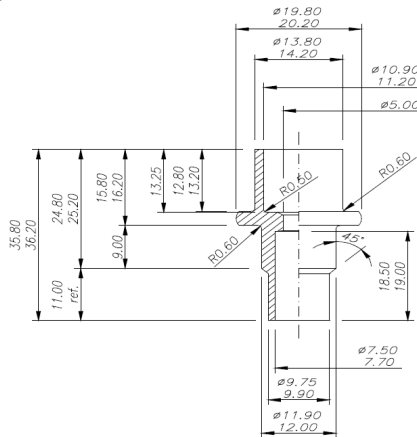


Figura 1. Dimensões em mm dos terminais obtidos após operação de usinagem.

A matéria-prima utilizada neste trabalho foi um fio-máquina produzido através de lingotamento contínuo, laminação de barra e, em seguida, trefilação, recozimento e fosfatização para a dimensão de 11,3mm de diâmetro. As análises químicas das ligas foram obtidas em espectrômetro óptico de emissão e Leco. Os elementos químicos, carbono e enxofre foram analisados no Leco a partir de limalhas obtidas com brocas de 3/16” retiradas no fio-máquina de 11,3mm.

As amostras para análise metalográfica foram cortadas no sentido perpendicular à direção da laminação. Essas amostras foram fresadas e, posteriormente, polidas em lixas com granulometrias de 180, 240, 320, 400, 500, 600 e 1000mesh. Em seguida, foi feito polimento de acabamento em feltro impregnado com pasta de diamante com dimensões 7, 3 e 1 μm . Após o polimento de acabamento, as amostras foram analisadas sem ataque em microscópio óptico, marca Leitz, com aumento de 200X e microscópio eletrônico de varredura, marca Jeol e tensão de 20kV. Para observação da microestrutura, essas amostras foram atacadas com nital 5%.

Foi feito ensaio de microdureza Vickers em microdurômetro, marca Leitz, carga de 100gf para verificação das propriedades mecânicas. Os corpos-de-prova do fio-máquina de diâmetro de 11,3mm para os ensaios mecânicos de tração foram cortados e usinados para as dimensões finais, conforme mostrado na Fig. (2), ASTM E-8M (1995).

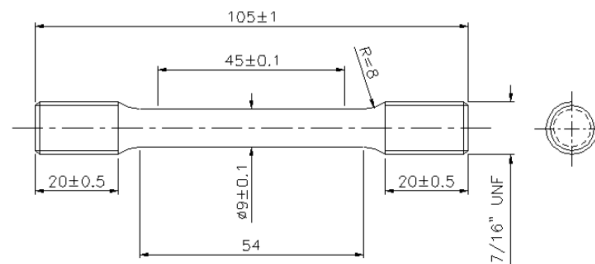


Figura 2. Dimensões em mm dos corpos-de-prova utilizados no ensaio de tração retirados no fio-máquina na direção de laminação.

Foram retirados três corpos-de-prova na direção paralela à laminação. O equipamento utilizado para o ensaio de tração foi uma máquina universal Instron TTDML, com acionamento servo-hidráulico e célula de carga de 10t. A velocidade de deformação foi de 0,2cm/min. O valor do limite de escoamento foi obtido do gráfico tensão *versus* deformação, a partir da deformação de 0,2%. Um extensômetro foi utilizado para a determinação da deformação na direção do comprimento do corpo-de-prova de 50mm. Após esta deformação, retirou-se o corpo-de-prova da máquina e mediu-se, respectivamente, o comprimento e diâmetro finais.

O limite de resistência foi calculado através da Eq. (1):

$$\sigma_R = \frac{Q_{\max}}{S_0} \quad (1)$$

O valor da carga máxima foi obtido no ponto máximo da curva carga em função da variação do comprimento inicial. O alongamento foi calculado pela Eq. (2):

$$\Delta l = \frac{l_{ff} - l_0}{l_0} \quad (2)$$

onde l_0 e l_{ff} são, respectivamente, os comprimentos inicial e final.

A deformação e tensão reais são dadas pelas Eq. (3) e (4):

$$\bar{\epsilon} = \ln(1 + \epsilon) \quad (3)$$

$$\sigma_r = \sigma(1 + \epsilon) \quad (4)$$

onde ϵ é a deformação convencional, e é dada pela razão entre a variação do comprimento e o comprimento inicial.

O coeficiente de resistência k e o coeficiente de encruamento n foram calculados pela disposição de 4 pontos da região plástica em um gráfico da Eq. (5) linearizada, Garcia et al (2000).

$$\sigma_r = k * \bar{\epsilon}^n \quad (5)$$

onde, σ_r e $\bar{\epsilon}$ são, respectivamente, as tensões e deformações reais.

2.2. Simulação Numérica

O software utilizado na simulação numérica (software comercial DEFORM V-8 2D[®]) é formado por três módulos, sendo eles o pré-processador, o processador e o pós-processador, estando o primeiro e o terceiro módulo no mesmo ambiente gráfico.

A seqüência de eventos para a simulação consistiu da entrada das variáveis de materiais tais como a curva de Hollomon, coeficiente de atrito, velocidade do punção e definição do pré-projeto inicial referente a geometria inicial das matrizes e dos punções de cada estágio do processo.

O pré-projeto inicial simulado envolveu o corte do tarugo inicial e cinco estágios sendo eles: calibração; primeira extrusão à frente; segunda extrusão à frente; extrusão invertida e recalque Fig. (3).

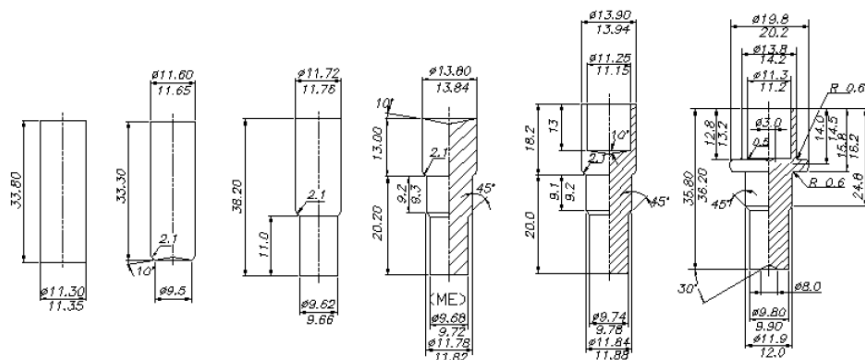


Figura 3. Desenho inicial das seis etapas consideradas necessárias para produção do terminal.

Os desenhos das matrizes e punções foram inseridos no programa submetidos às condições de contorno e geração de malha seguida de simulação. A peça foi considerada rígido-plástica, enquanto a ferramenta foi considerada rígida, Schünemann et al (1996). A Tabela 1 mostra os parâmetros de processo utilizados nas simulações da extrusão.

Tabela 1. Valores dos parâmetros utilizados na simulação das operações de extrusão.

Material	ABNT 1010
Velocidade do Punção (v)	11mm/s
Coefficiente de Atrito (μ)	0,1
Temperatura	25°C
Curva Tensão versus Deformação	obtida experimentalmente

A velocidade de deslocamento do punção foi mensurada a partir do deslocamento do cilindro da prensa em função do tempo. O intervalo de tempo de cada passo de simulação foi obtido pela divisão entre a velocidade de deslocamento do punção e o número de passos iniciais de 50. Para esse número de passe inicial de 50, verificou-se a convergência dos resultados para números de elementos de malha entre 400 a 2000 elementos. As malhas foram geradas através do procedimento padrão do programa, sendo utilizado elementos isoparamétricos bi-lineares de 4 nós. O coeficiente de atrito utilizado foi estabelecido de acordo com a literatura e constante durante toda a simulação, Schünemann et al (1996).

Para simulação numérica do pré-projeto utilizou-se o ABNT10B22 na condição de esferoidizado. Constatou-se que foi possível a produção do produto nas dimensões do projeto, utilizando-se ou não o primeiro estágio que é a etapa de calibração. Sendo, assim, foi eliminado esse primeiro estágio nas etapas posteriores de experimentação em razão do valor de carga encontrado e obtenção do produto sem este estágio. Houve, também, o aparecimento de dobra na sexta etapa de simulação do material ABNT 10B22. Verificou-se na simulação numérica que essa dobra ocorria em razão da profundidade da extrusão invertida com o recalque para a obtenção da flange. Para a correção desta anomalia, foi reduzida a profundidade da extrusão invertida do quarto estágio e alterado o projeto. O dimensional da altura de 13mm do diâmetro de (\varnothing 11)mm foi alterado para a altura de 10,5mm, Machado (2006). Com isto, na operação posterior, houve a formação da flange através do recalque sendo esta nova seqüência utilizada para a simulação física dos materiais ABNT 1010.

Baseado nos resultados obtidos, o projeto final reduziu o número de etapas Fig. (4).

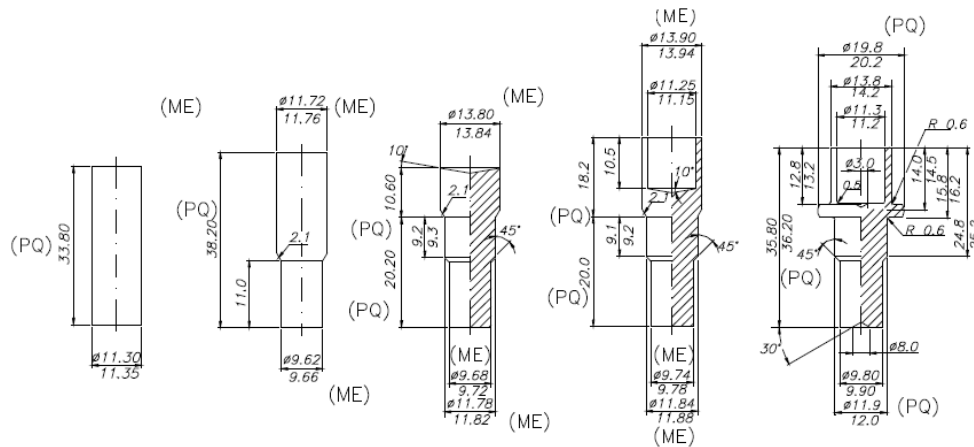


Figura 4. Desenho definitivo das etapas consideradas necessárias para produção do terminal.

A seqüência final envolveu o corte do tarugo inicial e os estágios primeira extrusão a frente, segunda extrusão a frente, extrusão invertida, recalque e término da extrusão.

Para o projeto final foram realizadas simulações numéricas e experimentais com o aço ABNT1010. Os resultados obtidos no pós-processador foram as cargas de simulação para os diferentes estágios do projeto que, posteriormente, foram comparadas às cargas experimentais obtidas por simulação física.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultados Análise Experimental

A Tabela 2 mostra a análise química do material da pesquisa, em porcentagem em peso.

Tabela 2. Composições químicas em porcentagem em peso dos aços ABNT 1010, DIN9SMn36, ABNT12L14 e ABNT 10B22 utilizados nos experimentos.

AÇO	C	Mn	Si	P	S	Pb	Ti	Al	N(ppm)
ABNT 1010	0,10	0,43	0,10	0,021	0,009	0,00	0,001	0,032	33
DIN9SMn36	0,05	1,11	0,03	0,066	0,598	0,00	0,001	0,004	64
ABNT 12L14	0,08	1,01	0,02	0,058	0,542	0,47	0,001	0,000	47
ABNT10B22	0,20	1,09	0,13	0,016	0,0024	0,00	0,0398	0,025	70

Observa-se que o aço ABNT 1010 foi desoxidado com alumínio, enquanto os aços DIN 9SMn36 e ABNT 12L14 foram desoxidados por silício. Como o projeto desses aços é para melhorar a usinabilidade não se pode ter inclusões de partículas duras de óxidos e, sim, a presença de inclusões de chumbo e enxofre para refrigerar a ferramenta de corte. Os níveis de outros elementos desoxidantes, tais como, Ti foi também baixo. No aço ABNT 10B22, a presença do Ti= 0,0398 se justifica pela fixação do nitrogênio em detrimento do boro. A efetividade do boro na temperabilidade se faz quando ele se encontra na condição de solução sólida e não combinado com o nitrogênio.

Evidenciou-se a presença de ferrita e perlita, nas amostras obtidas segundo as direções de laminação nos aços ABNT 1010, DIN 9SMn36 e ABNT 12L14 e esferoidita no ABNT 10B22 Fig. (5a) ,(5b), (5c) e(5d).

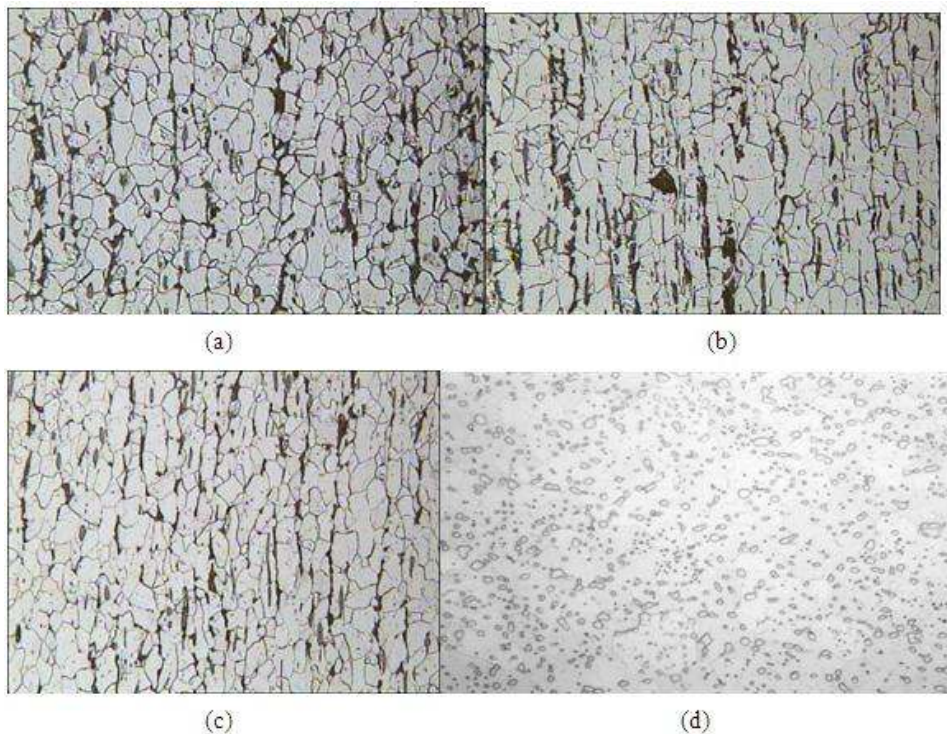


Figura 5. Amostras do aço ABNT 1010 (a) Din 9SMn36 (b), ABNT12L14 (c) ABNT 10B22 evidenciando a presença de ferrita, perlita, microinclusões e esferoidita (d). Ataque Nital 5% e picrato de sódio; Aumento 200X.

As Figuras (6a) e (6b) e Figuras (7a) e (7b), mostram as curvas log σ versus log ϵ para os corpos-de-prova dos aços ABNT 1010, 12L14, 10B22 e DIN 9SMn36.

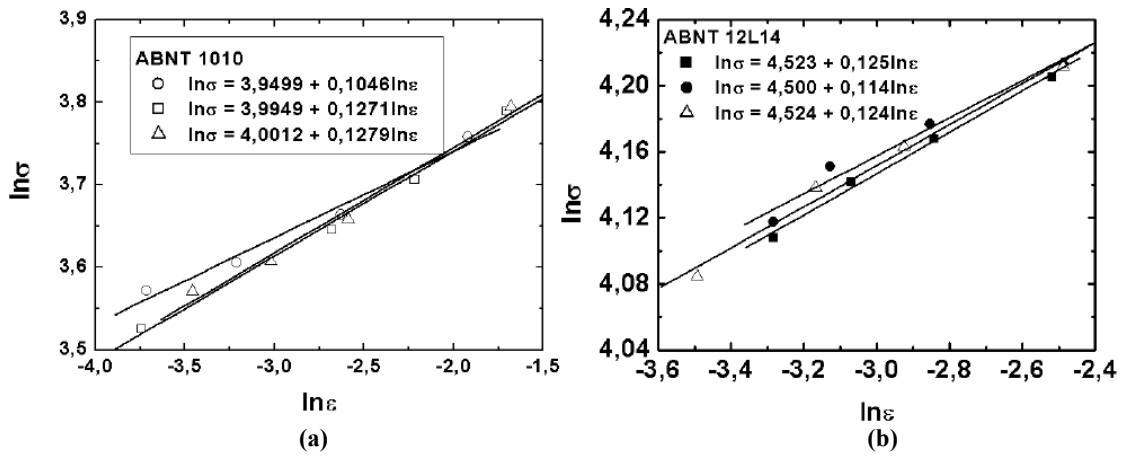


Figura 6. Evolução da tensão de fluxo com a deformação para os aços ABNT 1010 (a) e ABNT12L14 (b) obtida no ensaio de tração em uma velocidade de deformação de 0,2cm/min.

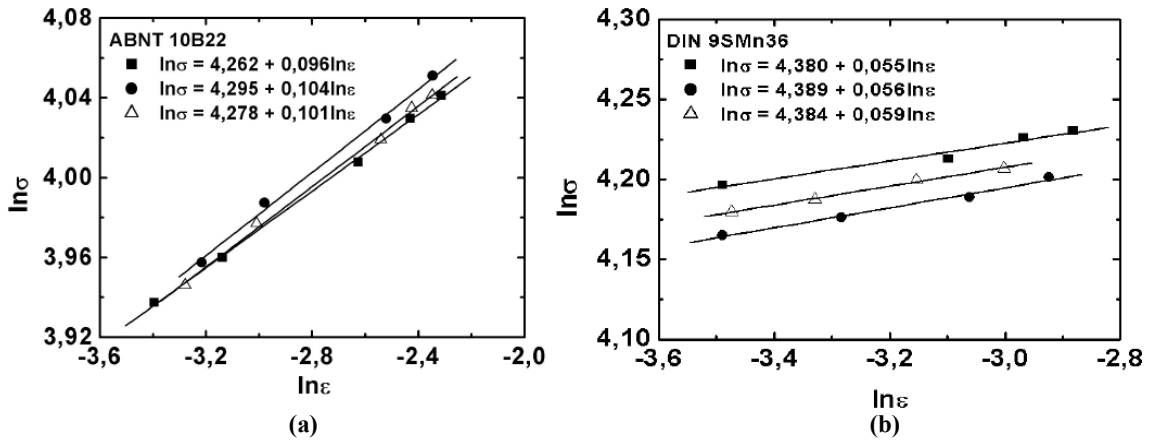


Figura 7. Evolução da tensão de fluxo com a deformação para o aço ABNT 10B22 (a) esferoidizado e fosfatizado e DIN9SMn36 (b) obtida no ensaio de tração em uma velocidade de deformação de 0,2cm/min.

A Figura (8) mostra a evolução da carga em função dos estágios. Observa-se que a elevação de carga foi mais acentuada no terceiro e quarto estágios. No terceiro estágio ocorreu a fratura das ligas DIN9SMn36, ABNT12L14.

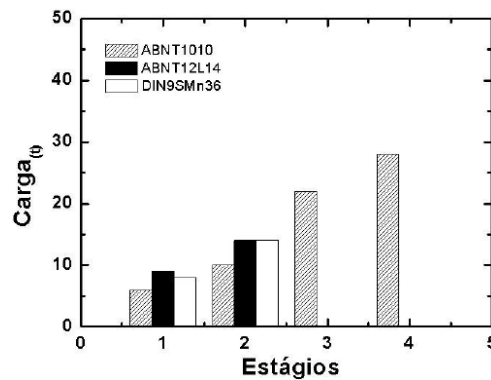


Figura 8. Evolução da carga em função dos estágios de fabricação.

A partir dos dados obtidos deu-se início a simulação experimental e numérica somente para o material ABNT1010. A Figura (9a) mostra a curva carga versus deslocamento para a primeira etapa extrusão a frente do material ABNT 1010 e a Fig. (9b) mostra o início e término da simulação para o primeiro estágio. Observa-se que a carga evolui até 1000 Kgf, estabiliza-se neste valor e, em seguida, cresce até 9000kgf. Esta estabilização em 1000kgf ocorreu devido a

compressão do material para a formação do diâmetro 9,62mm. A elevação da carga para 9000 Kgf foi devido o escoamento do material na região de mudança do diâmetro de 11mm para o diâmetro de 9,62mm. Nota-se que a carga permaneceu constante após o escoamento do material com a formação do diâmetro de 9,62mm.

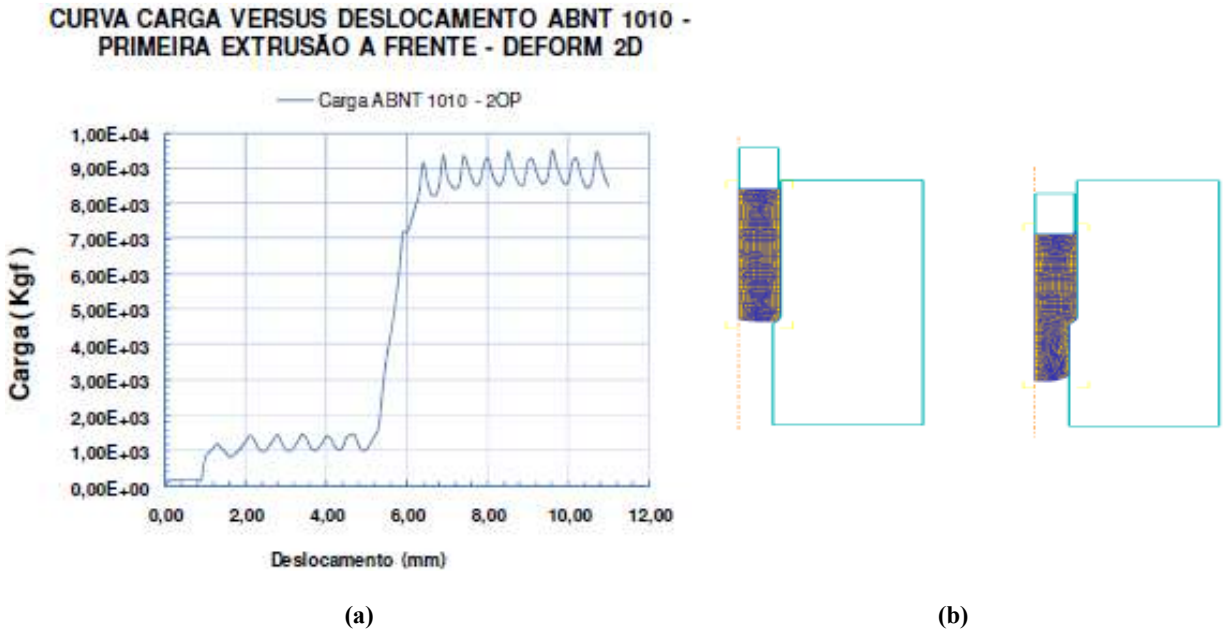


Figura 9. Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e término da simulação para o primeiro estágio (b)

A Figura (10a) e (10b) mostra a curva carga versus deslocamento para a segunda etapa da extrusão a frente e o início e término da simulação do material ABNT 1010. Verifica-se que o deslocamento inicial foi de 11mm em razão da conformação da primeira operação ter sido a base para o segundo estágio. Nos diferentes estágios da simulação, foram obtidas as novas propriedades mecânicas no programa Deform 2D a partir da curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira inicial. No intervalo de deslocamento de 11 a 15mm houve acréscimo na carga de 0 a 1000kgf devido a deformação por compressão para a calibração dos diâmetros de 9,72 mm e 11,68 mm. Em seguida, a carga elevou-se de 1000 a 6750kgf para a formação do diâmetro de 13,84mm.

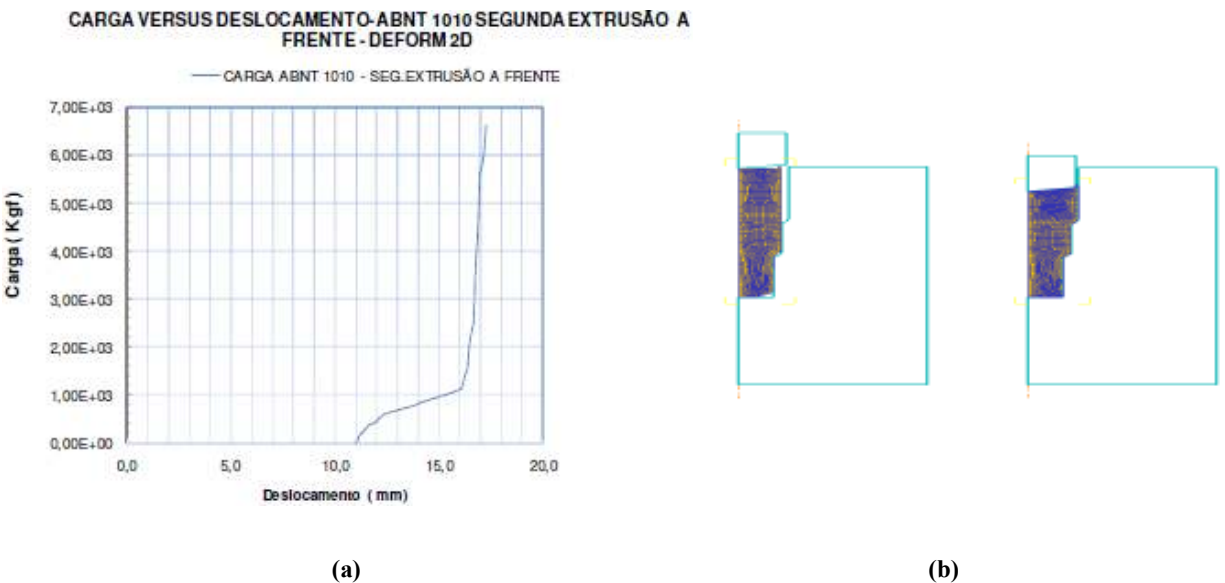


Figura 10. Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e término da simulação para o segundo estágio (b)

A Figura (11a) e (11b) mostra a curva carga versus deslocamento para a terceira etapa de extrusão a frente e o início e término da simulação do material ABNT 1010. Verifica-se que a carga necessária para a ascensão e formação do anel circular ($\varnothing 13,90 \times \varnothing 11,25 \times 10,5$)mm foi de 28000 Kgf.

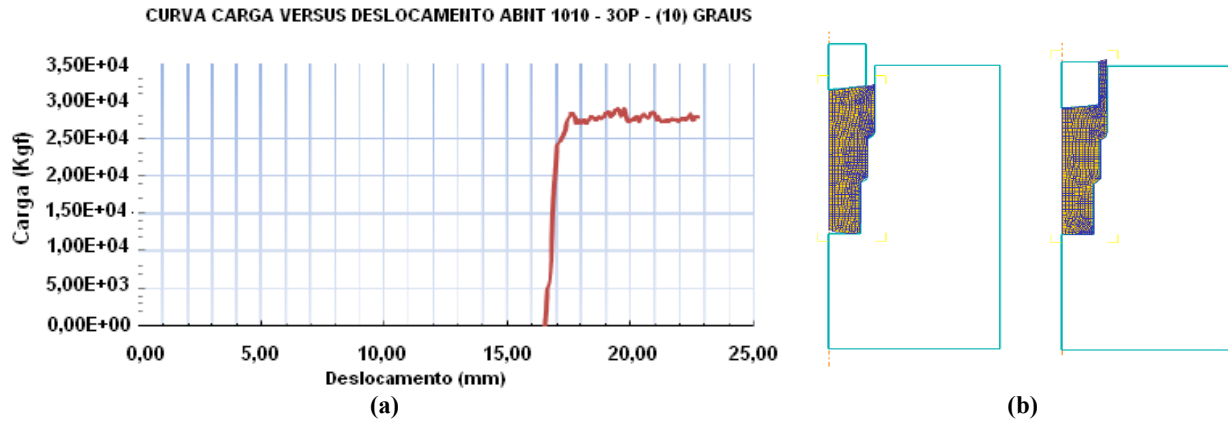


Figura 11. Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e término da simulação para o terceiro estágio (b)

A Figura (12a) e (12b) mostra a curva carga versus deslocamento para a quarta estágio (recalque para a formação do flange) e o início e término da simulação. Verifica-se que a carga necessária para a formação do flange foi de 35000kgf.

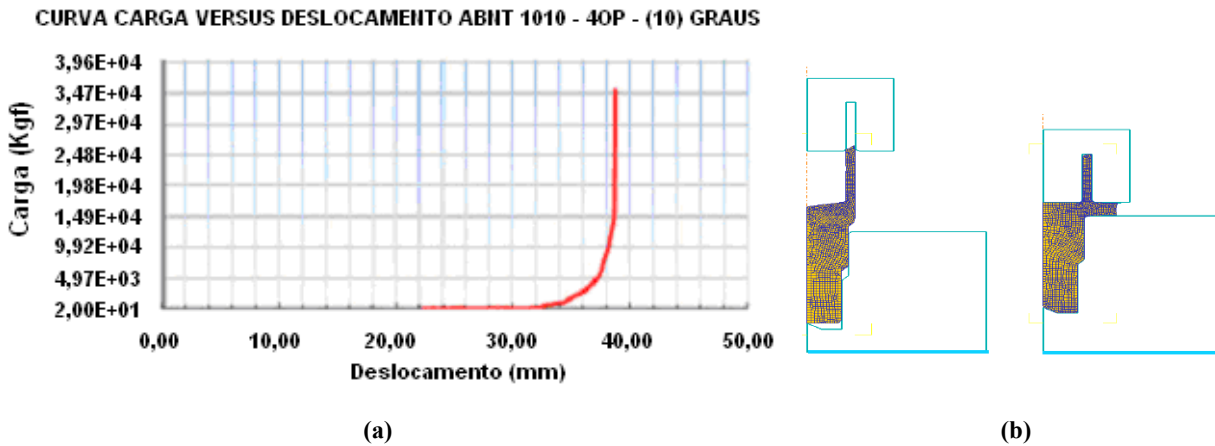


Figura 12. Curva de evolução da carga em função do deslocamento (a) e início e término da simulação para o quarto estágio (b).

4. CONCLUSÃO

O método de conformação mecânica a frio proposto para a fabricação do terminal do cabo de freio de mão não apresentou problemas superficiais e as dimensões obtidas do produto final atenderam a especificação de projeto. Foi possível reduzir o número de etapas de fabricação com eliminação de dobra sob o punção na etapa de extrusão à ré.

5. AGRADECIMENTOS

À Antônio Alves Machado e a Acument Global Technologies pelo apoio prestado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM E 8M-95a., 1995, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials." Philadelphia, p.77-97.
- Garcia, A., Spim, J.A., Santos, C.A. Ensaios dos Materiais, 1ª ed., Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2000.
- Lima Roque, C.M.O, and Button, S.T., 2000, "Application of the Finite Element Method In Cold Forging Processes" , Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences, v XXII,nº 2, pp 189-200.
- Machado, A. A., 2006, "Simulação Computacional para Fabricação Terminal Elétrico." Monografia Final de Curso Engenharia Mecânica.
- Mackerle, J., 2004, "Finite Element Analyses and Simulations of Manufacturing Processes of Composites and Their Mechanical Properties: a bibliography (1985-2003)", Computational Materials Science, v.31, pág. 187-219.
- Ochiai, I. Hiroshi, O. Kawama, A., 1994, "Effect of Titanium Addition on Strain Aging of Low Carbon Steel Wire Rod." Wire Journal International, p. 74-83.
- Schünemann, M., Ahmetoglu, M.A. Altan, T., 1996, "Prediction of Process Conditions in Drawing and Ironing of Cans", Journal of Materials Processing Technology, v 59, p 1-9.
- Weidig, C. Espídola, M. M. Gonzáles, B. M., Rodrigues, P. C. M., Andrade, M. S., 1995, "Dynamic Strain Aging in Low Carbon Steel Wire Rods", Wire Journal International, v.28, p.82-85.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL SIMULATION AT BRAKE CABLE PRODUCTION IN HYDRAULIC PRESS

Erlano Campos dos Reis, erlano@comamindustrial.com.br¹
Gilmar Cordeiro da Silva, gilmarcord@gmail.com¹
José Rubens Gonçalves Carneiro, joserub@pucminas.br¹
Larissa Vilela Costa, lavilela_engmec@yahoo.com.br¹

¹ Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Rua Dom José Gaspar, 500, Bairro Coração Eucarístico, CEP: 30535-901, Belo Horizonte, Minas Gerais - Brasil

***Abstract.** The extrusion is one of the forming processes most used and is classified in forward extrusion, backward extrusion and radial extrusion. The extrusion is done in hydraulic or mechanical presses, resulting in parts of excellent dimensional control, superficial finishing with economical advantages over machining. Currently, challenge is presented by the finite elements analysis and the simulations of materials forming process and its mechanical properties from the theoretical and practical points of view (MACKERLE, 2004). It has been possible with relative success, the analyses of the cold extrusion process as well as its optimization still in the project phase. The forging is the general term used to describe the practical applying of the deformation plastic of many metals into a great variety of shapes technically controlled. Depending on the desired shape, the forming requires multistages, and each stage is responsible for a small deformation. The constant search for time reduction of associated production to the technological advance, made possibly reaching to the multistage cold forging machines, producing in a very high chain, diverse components. By the way, obtaining the ideal production sequence is complicated and, many times, is obtained through empirical methods, which takes it to many tests and adjustments, making the project more expensive. This paper evaluates process variables as well as its restrictions in the forging in closed matrix of a handbrake cable terminal used in the automobile industry. It was concluded that, the adequate raw material to form the product is the ABNT 1010 steel differently from the ABNT 12L14 steel and DIN 9SMn36 steel, made in 4 stages in hydraulic press an economy of material 72,5% with cost reduction of 62,54%..*

Keywords: Machining, Technological innovations, Metal stamping.