

ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UM PROCESSO DE EXTRUSÃO A FRIO

Mariano Eduardo Moreno

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos – SP. e-mail: mmoreno@sc.usp.br

Sérgio Henrique Evangelista

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos – SP. e-mail: toddy@sc.usp.br

Alexandre Tácito Malavolta

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos – SP. e-mail: alexandr@sc.usp.br

João Lirani

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos – SP. e-mail: lirani@sc.usp.br

Hazim Ali Al-Qureshi

Universidade Federal de Santa Catarina. Depto. de Engenharia Mecânica. LabMAT.
88040-900 Florianópolis – SC. e-mail: hazim@materiais.ufsc.br

Resumo: *O processo de extrusão à frio tem entre suas qualidades a economia de material em relação à processos à quente, a boa qualidade superficial, podendo eliminar operações posteriores de usinagem e as boas propriedades mecânicas nestas peças que muitas vezes podem substituir tratamentos térmicos. Um melhor conhecimento do comportamento do material durante o processo poderia uma otimização do processo de extrusão. O principal objetivo deste trabalho é a obtenção de uma simulação numérica mais adequada do processo de extrusão, uma vez que o material sofre grandes distorções, o que leva a dificuldades de convergência na análise numérica. É apresentada a simulação de uma peça com simetria de revolução em aço baixo carbono onde são variadas as condições de atrito com a matriz. São discutidos aspectos relativos à distorção de malha e condições de contato entre peça e ferramenta. Os resultados são comparados com teorias analíticas e resultados provenientes da literatura.*

Palavras-chave: *extrusão, método dos elementos finitos, atrito.*

1. INTRODUÇÃO

Os processos de extrusão à frio em comparação aos processos à quente apresentam maior economia, possibilidade de combinação com outros processos, uma boa qualidade tanto dimensional como superficial da peça final, permite a fabricação de peças mais complexas e com melhores propriedades mecânicas. Este trabalho analisa a influência do parâmetro de atrito na distribuição de esforços na matriz, e na força necessária para se realizar o processo de extrusão de uma peça axissimétrica. As análises numéricas foram realizadas utilizando-se o programa LS-DYNA® e os resultados de carregamento necessário para a extrusão foram comparados com teorias analíticas. Uma vez adquirida confiança nos resultados numéricos, são feitas considerações sobre o

histórico de carregamentos na matriz de extrusão de modo a obter-se uma estimativa da região que sofre maior esforço. Este maior esforço é diretamente relacionado com o desgaste sofrido na matriz, e o seu conhecimento torna-se útil no projeto de tais matrizes.

2. MODELAGEM DO PROBLEMA

Foi feita a modelagem da extrusão de uma peça com simetria de revolução, onde o diâmetro desta peça foi reduzido de 16 para 8 mm. A Figura 1 apresenta as principais dimensões envolvidas no processo, relativas às dimensões do tarugo e detalhes geométricos da matriz. Os valores adotados estão dentro das faixas de aplicação indicadas pela American Society for Metals⁽¹⁾.

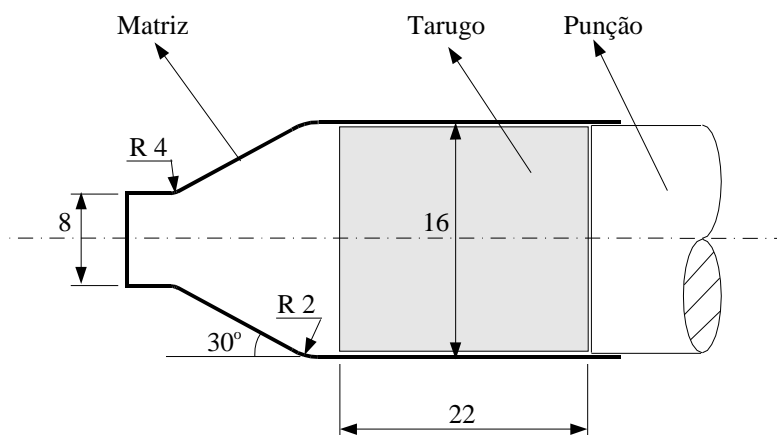


Figura 1. Dimensões do processo.

As propriedades do material do tarugo são mostradas na Tabela 1, correspondentes a uma aproximação de um aço baixo carbono, tipicamente 1010. A curva tensão-deformação foi considerada bilinear e o material foi considerado quase perfeitamente plástico. Esta consideração deve-se ao fato de o material durante o processo de extrusão chegar a níveis de deformação muito maiores que aqueles obtidos através de um simples ensaio de tração, e para tais valores a curva chega a ter um aspecto similar ao perfeitamente plástico, podendo até mesmo passar por um comportamento onde a tensão diminui com o aumento da deformação (*softening*). A obtenção de curvas de comportamento de material utilizados para a extrusão é feita a partir de ensaios de torção, que permitem a obtenção de resultados para valores maiores de deformação.

Tabela 1: Propriedades do material extrudado

<i>Mod. Young</i> [MPa]	<i>Coef. Poisson</i>	<i>Densidade</i> [kg / m ³]	<i>Tensão Escoamento</i> [MPa]	<i>Mod. Tangente</i> [MPa]
2,1 10 ⁵	0,3	7850	100,0	1,0

A Figura 2 mostra o modelo EF gerado, com o tarugo modelado em elemento do tipo sólido de 8 nós, e a matriz em elemento tipo casca (*shell*) de 4 nós. Foi feita a modelagem de apenas um quarto do modelo e aplicadas as condições de contorno de simetria, de modo a diminuir-se o número de elementos nas simulações. Na Figura 2 (a) apresenta-se o modelo inicial e na Figura 2 (b) a malha em uma configuração deformada. Para melhor visualização foi retirado da figura o modelo do punção.

Foram modeladas condições de contato entre a o tarugo e a matriz e entre o punção e o tarugo. Foram analisadas 5 condições de atrito, sendo a mais suave com um atrito estático de 0,05 e a mais severa com atrito estático de 0,25. Detalhes dos casos estudados serão mostrados com os resultados apresentados. O atrito dinâmico foi considerado como sendo metade do valor da atrito estático, e a evolução do comportamento estático para o dinâmico foi modelada por meio de uma curva com decaimento exponencial.

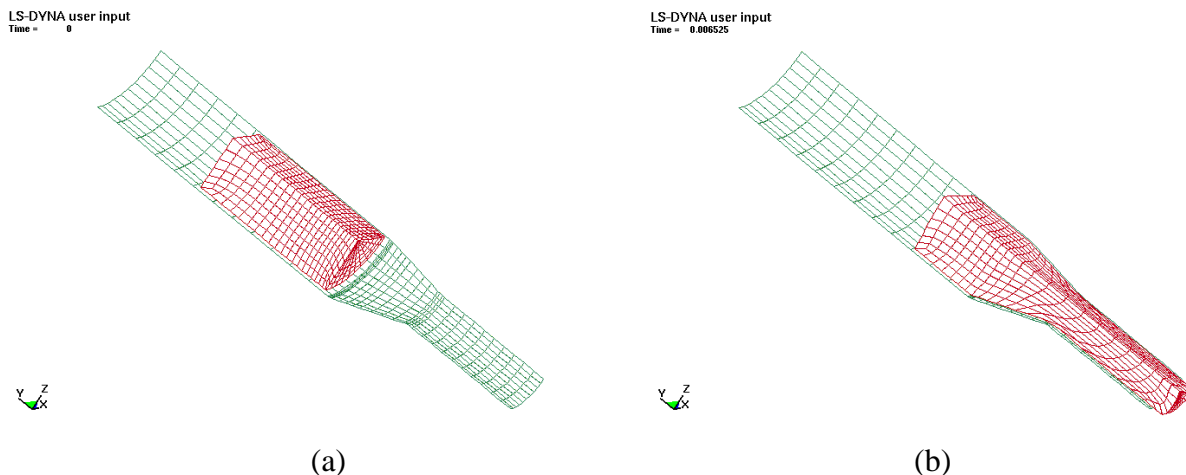


Figura 2. Malha gerada: (a) malha inicial; (b) malha em uma configuração deformada

Devido a simetria da geometria e do carregamento aplicado, o modelo pode ser considerado axissimétrico, podendo-se utilizar elementos planos na modelagem. No entanto, quando esta abordagem foi testada, o algoritmo de contato mostrou-se instável e ocorreram dificuldades de convergência, justificando o uso de um modelo tridimensional.

A obtenção dos esforços na matriz foi feita em uma linha de nós ao longo do contorno da curvatura da matriz. Os pontos cujos dados foram analisados são indicados na Figura 3. Dessa forma encontrou-se o ponto mais crítico para a questão de desgaste na matriz.

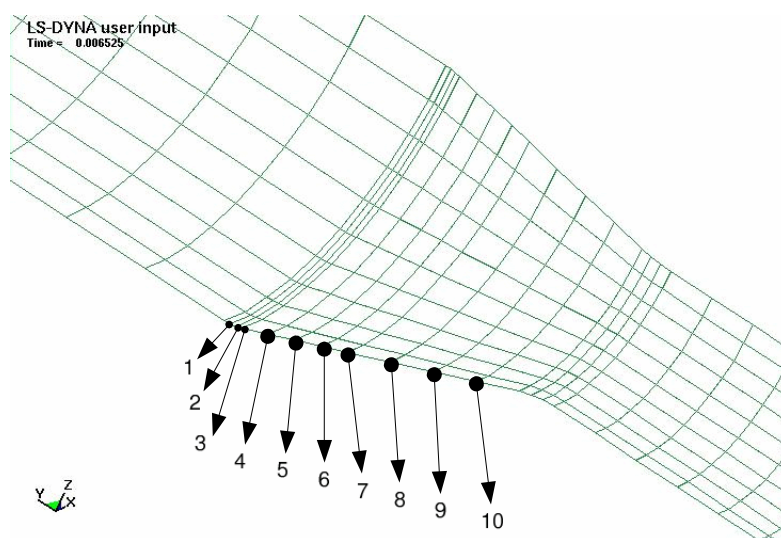


Figura 3. Pontos da matriz analisados.

Segundo Hallquist⁽²⁾ é comum em análises por elementos finitos via intergração explícita no tempo a utilização de velocidades de conformação até cem vezes maior que as velocidades reais. Este recurso, dentro destes limites, não altera significativamente os resultados e permite um ganho de tempo no processamento. Além deste limite, efeitos de forças de inércia artificiais acrescentados passam a ter efeitos que podem comprometer os resultados. Nas simulações apresentadas foi utilizada uma velocidade de 2 m/s para o punção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Carregamento no Punção ao Longo do Processo

A Figura 4 apresenta o comportamento do estado de tensões em um instante inicial (Figura 4a), um intermediário (Figura 4b) e no final da simulação (Figura 4c). O comportamento do estado de tensões é variável até o instante mostrado na Figura 4 (b), a partir do qual passa-se a ter um

comportamento aproximado de regime permanente, com os níveis mais altos de tensões concentrados em torno da região de mudança de diâmetro enquanto o material flui através da matriz.

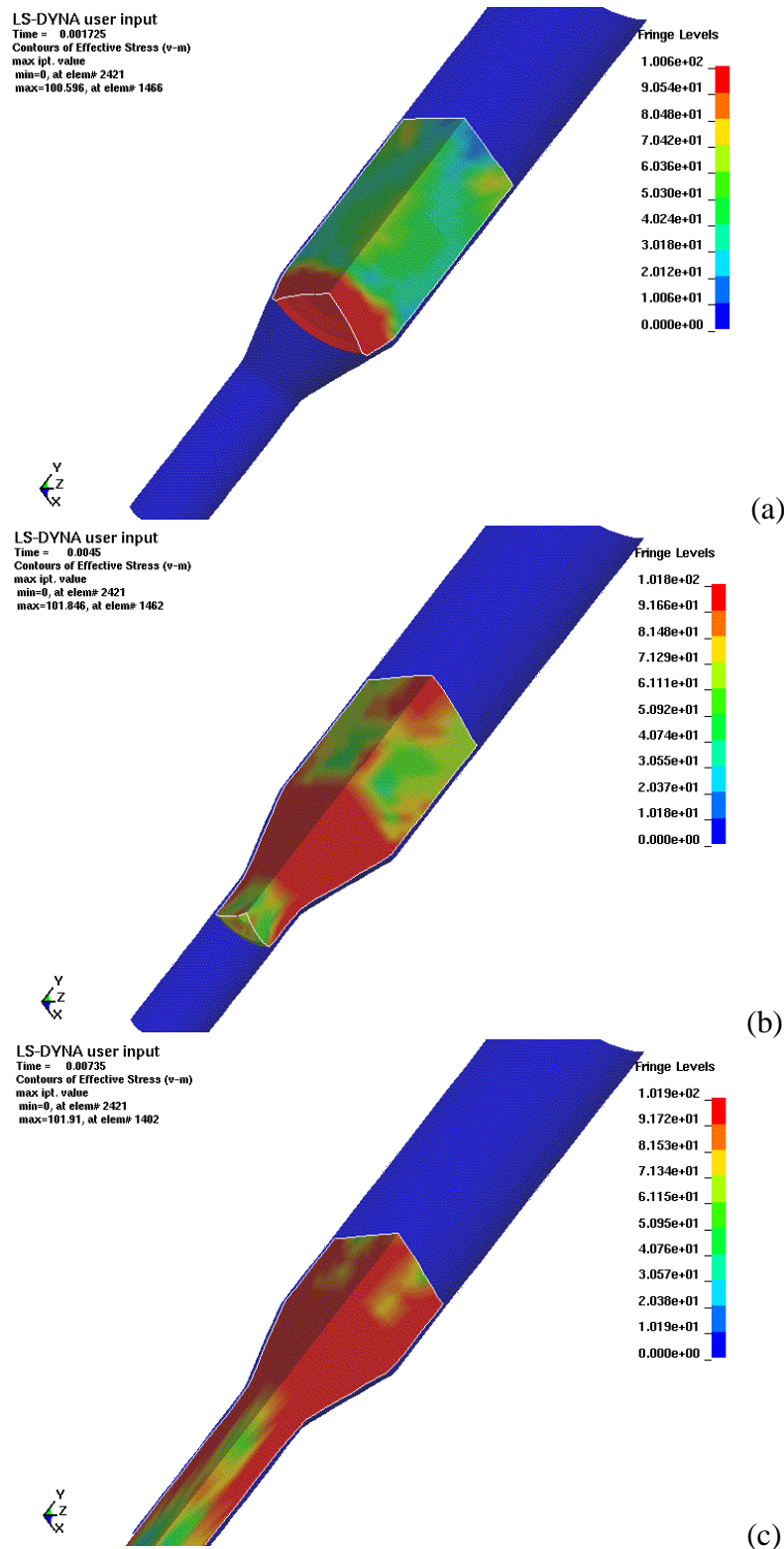


Figura 4. Estado de tensões (a) no início do processo; (b) Instante intermediário; (c) final do processo.

O carregamento do punção para as cinco condições de atrito analisadas é mostrado na Figura 5. A Tabela 2 apresenta os valores médios de força em regime para os 5 casos analisados, bem como estimativas analíticas realizadas por meio do método das tiras (*slab method*), apresentado em

referências como Al-Qureshi⁽³⁾ e Altan et al⁽⁴⁾. Adaptando-se as equações apresentadas por Al-Qureshi⁽³⁾, acrescentando um termo que considera a força de resistência devido ao atrito com a parede da matriz na região da câmara de extrusão e uma parcela devido à deformação por cisalhamento, a força de extrusão pode ser estimada através de:

$$F_{extr} = F_d + F_c + F_k \quad (1)$$

Onde F_{extr} é a força total de extrusão, F_c é a força devido ao atrito com a porção reta da matriz, F_d é a força na região cônica da matriz e F_k é a força devido à deformação por cisalhamento. Assim, cada componente é dado por:

$$F_d = \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) \sigma_Y \frac{1 + \mu / \operatorname{tg}(\alpha)}{\mu / \operatorname{tg}(\alpha)} \left(1 - \left(\frac{D_i}{D_f} \right)^{\frac{2\mu}{\operatorname{tg}(\alpha)}} \right) \quad (2)$$

$$F_c = \pi D_i l \mu \frac{\sigma_{ef}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

A deformação por cisalhamento, segundo Altan et al⁽⁴⁾ é dada por:

$$F_k = \frac{\pi D_i^2}{2} \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\operatorname{sen}^2(\alpha)} - \cot(\alpha) \right) \quad (4)$$

Onde μ é o coeficiente de atrito, α é a inclinação da porção cônica da matriz, D_i é o diâmetro de entrada da matriz, D_f é o diâmetro de saída da matriz, σ_Y é a tensão de escoamento do material, σ_{ef} é a tensão efetiva média na área de contato do material com a porção reta da matriz de entrada e l é o comprimento do contato entre a material e a porção reta da matriz.

A Equação 2 refere-se à tensão necessária para realizar o trabalho de redução no diâmetro causada pela porção cônica da matriz, e a Equação 3 considera o aumento no esforço devido ao atrito com a parede da porção reta da matriz de entrada para um comprimento de contato l . A Equação 4 considera a deformação por cisalhamento na entrada e saída da zona cônica

Para o cálculo analítico foram utilizados alguns dados vindos da simulação numérica. Outros modos de se estimar analiticamente a força necessária para a extrusão podem ser encontrados em referências como Altan et al⁽⁴⁾ e Al-Qureshi⁽³⁾.

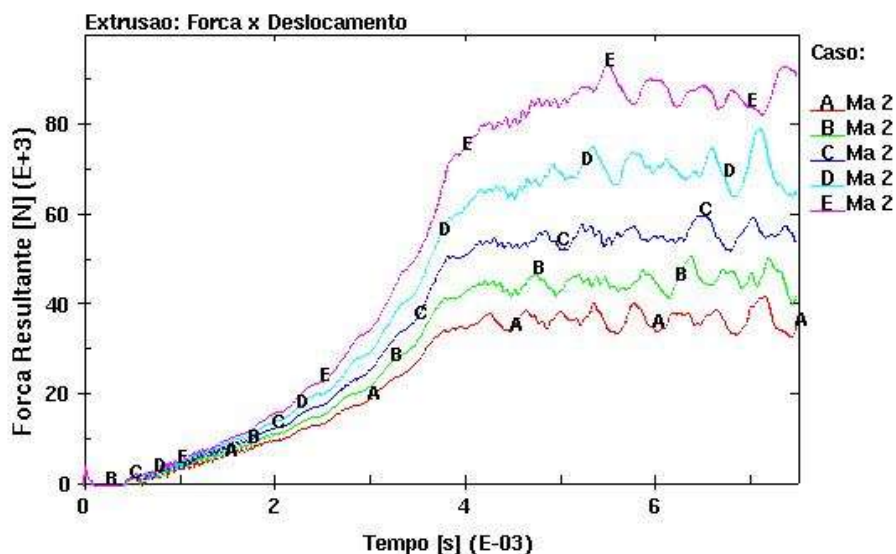


Figura 5. Forças de reação no punção para os casos A, B, C, D e E

Tabela 2. Carregamento no punção para os casos estudados

<i>Caso</i>	<i>Coefficiente de atrito</i>	<i>Força [kN] (simulação)</i>	<i>Força [kN] (slab method)</i>	<i>Erro [%]</i>
Caso A	0,05	35	41	-17
Caso B	0,10	45	48	-6
Caso C	0,15	55	55	0
Caso D	0,20	70	63	10
Caso E	0,25	85	71	16

3.2 Comportamento dos Esforços na Matriz

Para a consideração dos efeitos na matriz de extrusão, foi tomado o carregamento em vários pontos ao longo do perfil da matriz na região onde ocorre a mudança de seção da peça.

Assume-se que para se considerar a questão do desgaste da matriz, deve-se considerar os esforços normais à superfície da matriz. Desta forma, o carregamento tomado foi a pressão ao longo do tempo. Os gráficos de pressão contra tempo sofreram uma instabilidade devido ao comportamento da simulação numérica, portanto foram tomados valores médios calculados a partir de uma interpolação dos resultados. A Figura 6 apresenta um exemplo de carregamento obtido em uma porção intermediária da matriz e a curva média utilizada. O mesmo procedimento foi utilizado nos demais pontos analisados.

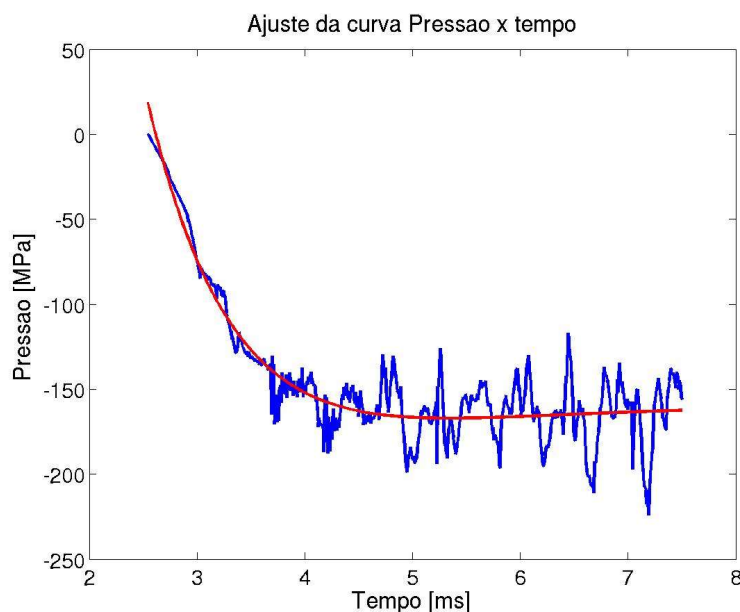


Figura 6. Exemplo de curva média aproximada para os resultados numéricos.

As Figuras 7 a 11 apresentam o histórico de pressão nos 10 pontos da matriz indicados na Figura 3 para cada um dos cinco casos estudados, com os resultados já suavizados pela interpolação.

Em todos os casos, o ponto de maior pressão normal à superfície foi em uma posição próxima ao raio de entrada da matriz. Para os casos onde o coeficiente de atrito é mais baixo, a maior pressão aparece em um ponto mais interno (ponto 4), conforme mostrado pelas Figuras 7 e 8, relativas aos casos de atrito 0,05 e 0,10. Os valores, no entanto, são bastante próximos aos valores encontrados na região próxima a este ponto.

Para os casos de coeficiente de atrito mais alto, mostrados nas Figuras 9 a 11, o valor mais alto passa para o ponto 3 e, conforme aumenta-se o atrito, o valor de pressão neste ponto passa a ter um comportamento um pouco mais diferenciado, distanciando-se dos pontos próximos. Este comportamento fica claro acompanhando-se o comportamento do ponto 3 nas Figuras 10 e 11.

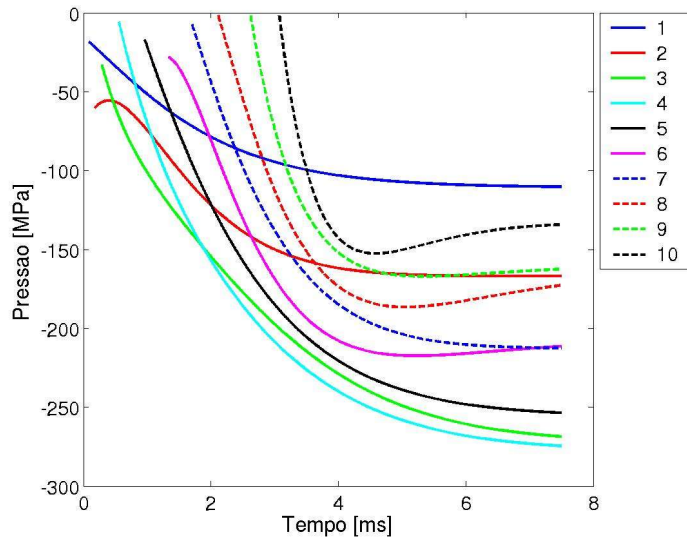


Figura 7. Pressão nos pontos 1 a 10 da matriz ao longo do tempo para o caso A

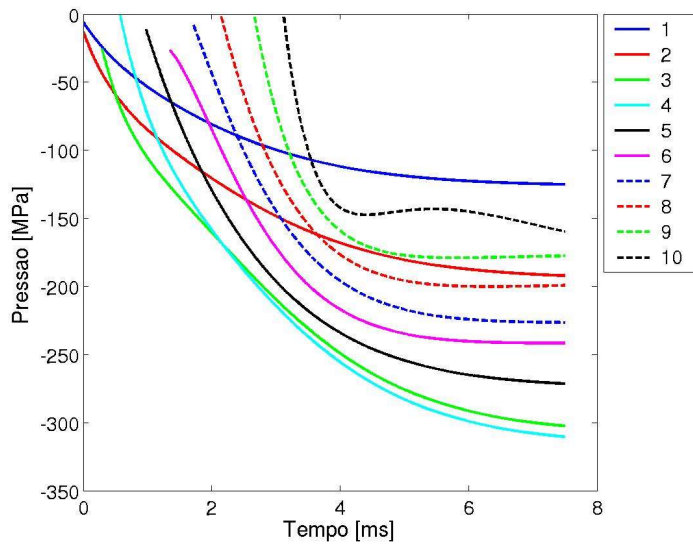


Figura 8. Pressão nos pontos 1 a 10 da matriz ao longo do tempo para o caso B

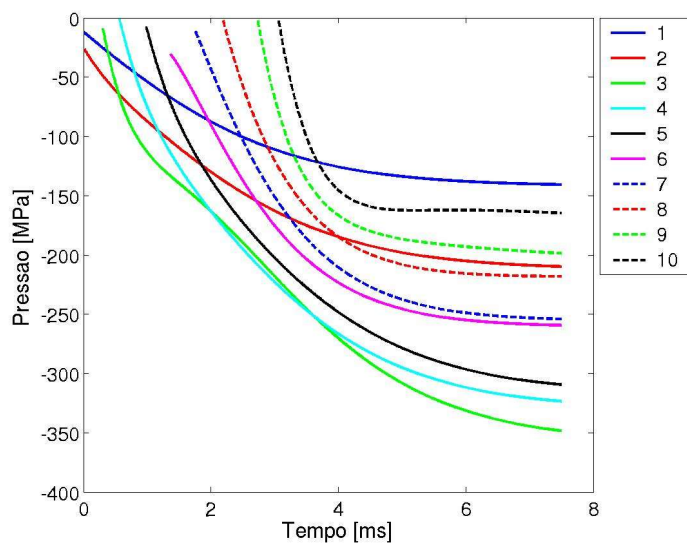


Figura 9. Pressão nos pontos 1 a 10 da matriz ao longo do tempo para o caso C

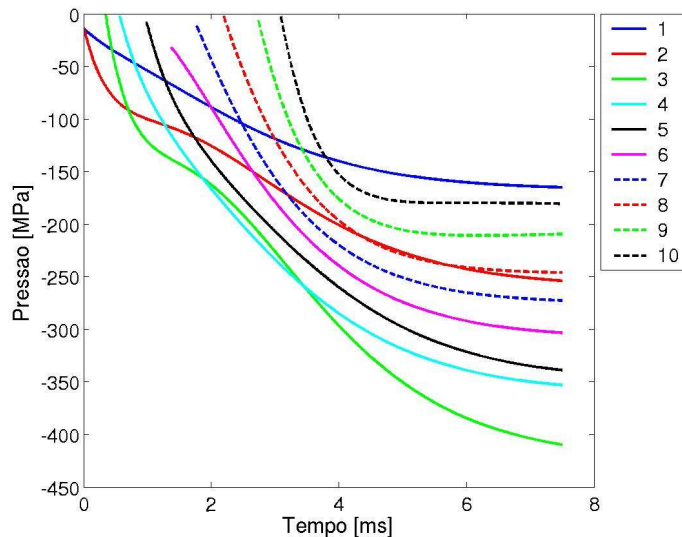


Figura 10. Pressão nos pontos 1 a 10 da matriz ao longo do tempo para o caso D

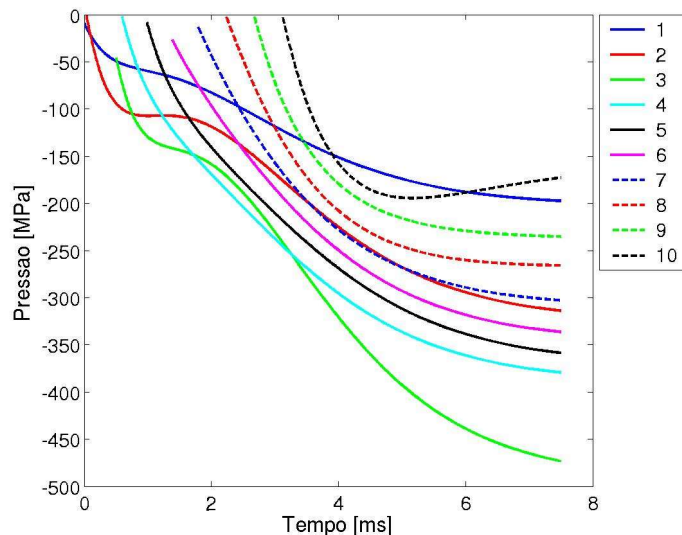


Figura 11. Pressão nos pontos 1 a 10 da matriz ao longo do tempo para o caso E

3.3 Discussões

O atrito tem uma grande influência no processo de extrusão. O aumento da força de conformação com a variação do coeficiente foi significativa. A previsão feita para a matriz indicou uma estimativa de uma região a ser considerada durante o projeto da matriz de extrusão. Estudos da influência na variação de alguns parâmetros geométricos na matriz podem conduzir a uma otimização deste tipo de processo.

No trabalho aqui apresentado a matriz e o punção foram considerados como sendo rígidos. De modo a se considerarem os efeitos do processo na matriz de maneira apropriada, sua deformação, embora pequena, deve ser tomada em conta.

As análises foram feitas de maneira simplificada, e outras variáveis podem ser consideradas de modo a melhorar os resultados obtidos. Trabalhos como os de CHANDA et al^(5,6) consideram como variáveis de análise além do atrito, a geração de calor durante o processo devido à velocidade do punção e taxa de extrusão, alterando o comportamento do material ao longo do processo.

Estudos sobre os efeitos do atrito na formação da região de plastificação em outros tipos de extrusão é objeto de análise em trabalhos como o de LI et al⁽⁷⁾, onde são utilizados outros tipos de comportamento de material, além do modelo elasto – plástico perfeito.

Soluções como as citadas acima serão incorporadas ao modelo apresentado de modo a se obter

simulações mais confiáveis do processo de extrusão em trabalhos futuros.

4. CONCLUSÕES

A simulação numérica de um processo cuja solução analítica é conhecida chegou a valores próximos para a estimativa de carregamento de extrusão. Baseado nestes resultados foi feita uma análise para a localização de pontos mais críticos do ponto de vista do projeto da matriz. Resultados coerentes foram obtidos, mas novas alternativas estão sendo consideradas, de modo a melhorar a qualidade dos resultados, uma vez que dentre as diversas variáveis envolvidas no processo, apenas o atrito foi tomado como significativo. Trabalhos futuros pretendem considerar o comportamento da matriz como não sendo de corpo rígido, avaliando as deformações sofridas por ela, bem como a consideração de outras variáveis, em especial o modelo de comportamento de material em processos que sofrem grandes deformações.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP pela utilização dos recursos do LaMAC – Laboratório de Mecânica Aplicada e Computacional, à FAPESP e ao aluno de Doutorado Cesar Antonio Aparício Sanchez pelas contribuições dadas.

6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook**: forming and forging. 9. ed. Metals Park: ASM International Handbook Committee, 1988. v.14, p.299-323.
- HALLQUIST, J.O. **LS-DYNA Theoretical Manual**. Livermore: Livermore Software Technology Corp., 1998. 498p.
- AL-QURESHI, H.A. **Processos e Mecanismos da Conformação dos Metais**. São José dos Campos: ITA, v.2 . 1991.
- ALTAN, T.; OH, S.I.; GEGEL, H.L. **Conformação de Metais**: fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC-USP, 1999. 350p.
- CHANDA, T.; ZHOU, J.; DUSZCZYK, J. FEM analysis of aluminium extrusion through square and round dies. **Materials & Design**, v.21, p.323-335. 2000.
- CHANDA, T.; ZHOU, J.; DUSZCZYK, J. A comparative study on iso-speed extrusion of 6061 Al alloy using 3D FEM simulation. **Journal of Materials Processing Technology**, v.114, p.145-153. 2001.
- LI, S.; BOURKA, M.A.M.; BEYERLEIN, I.J.; ALEXANDER, D.J.; CLAUSEN, B. Finite element analysis of plastic deformation zone and working load in equal channel angular extrusion. **Materials Science & Engineering A**, v.382, n.1-2, p.217-236, Sep. 2004.

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A COLD EXTRUSION PROCESS

Mariano Eduardo Moreno

University of São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. Mechanical Engineering Dept.
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos – SP. e-mail: mmoreno@sc.usp.br

Sérgio Henrique Evangelista

University of São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.

Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos – SP. e-mail: toddy@sc.usp.br

Alexandre Tácito Malavolta

University of São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.

Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos – SP. e-mail: alexandr@sc.usp.br

João Lirani

University of São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.

Av. Trabalhador São-Carlense, 400 – 13566-590 São Carlos – SP. e-mail: lirani@sc.usp.br

Hazim Ali Al-Qureshi

Federal University of Santa Catarina. Mechanical Engineering Dept. LabMAT.

88040-900 Florianópolis – SC. e-mail: hazim@materiais.ufsc.br

***Abstract:** The cold extrusion process has among its advantages the low material waste in relation to hot processes, the good superficial finish, some times eliminating posterior machining operations, and the good mechanical properties in these parts, which many times can substitute thermal treatments. A better knowledge of the material behavior during the process can lead to an optimization of the extrusion process. The main objective of this work is to get more reliability numerical simulations for the extrusion process, once the material is subjected to large distortions which conduces to convergence difficulties in the numerical analysis. It is presented the extrusion of a low carbon steel part with revolution symmetry where are changed the friction conditions with the die. Aspects related to the mesh distortion and tool-part contact are analyzed. The results are compared with analytical theories and results from the literature.*

***Keywords:** extrusion, finite element method, friction.*