

ESTUDO DO PROCESSO DE PUNÇIONAMENTO POR PUNÇÃO COM ÂNGULO CONVEXO ASSISTIDO POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Fábio Junkes Corrêa ¹

Lírio Schaeffer ²

Resumo

Neste trabalho foram realizados punçionamentos em tarugos cilíndricos por simulação numérica, utilizando o software de simulação numérica por elementos finitos, alterando alguns parâmetros, de acordo com as diferentes metodologias estabelecidas. Com as simulações procedidas, comparam-se os resultados com o propósito de verificar qual a metodologia apresenta o menor esforço cisalhante, usando punções com ângulo convexo com diferentes gumes cisalhantes e matrizes com diferentes ângulos de saída. Os resultados da simulação são confrontados com o cálculo de esforço de cisalhamento com o objetivo de validar as simulações computacionais realizadas. Por fim, chega-se à conclusão que a utilização de um punção com menor gume cisalhante e uma matriz com maior ângulo de saída culminam em um menor esforço requerido para a execução do punçionamento.

Palavras-chaves: Punçionamento; Cisalhamento; Ângulo de saída; Simulação numérica.

STUDY OF THE PUNCHING PROCESS BY PUNCH WITH CONVEX ANGLE AIDED BY NUMERICAL SIMULATION

Abstract

In this work punching in cylindrical billets by numerical simulation were performed, using a numerical simulation software by finite element, changing some parameters, according to the different methodologies established. Simulation results are compared for the purpose to verify which the methodology has the lowest shear stress, using punch with convex angle with different shear edges and dies with different rake angles. Furthermore, the simulation results are compared with the calculation of shear stress, with the objective to validate computer simulations performed. Finally, the utilization of a punch with lower shear edge and die with greater rake angle culminates lower effort required to the execution of the punching.

Key words: Punching; Shearing; Rake angle; Numerical simulation.

¹Engenheiro Mecânico e Mestrando, Laboratório de Transformação Mecânica, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Cep 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: fabio.correa@ufrgs.br

²Engenheiro Mecânico e Prof. Dr.– Ing. Coordenador, Laboratório de Transformação Mecânica, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Cep 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: schaeffer@ufrgs.br

I INTRODUÇÃO

Na área da fabricação mecânica, os principais processos são a fundição, a usinagem e a conformação mecânica. A usinagem visa o arrancamento de material durante o processamento, enquanto que a conformação mecânica visa a deformação plástica do material até atingir uma forma desejada, de modo a reduzir o desperdício de material. Comparando a furação por broca (usinagem) com o puncionamento por punção (conformação), percebe-se que no puncionamento há uma grande vantagem na redução de desperdício de material, além de agregar melhores propriedades mecânicas.⁽¹⁾ O punção no processo de puncionamento pode apresentar formatos côncavos ou convexos (Figura 1a,b), sabendo que o punção com ângulo côncavo é usualmente empregados para chapas finas e, o punção com ângulo convexo, para chapas espessas.⁽²⁾ O estudo do puncionamento de tarugos cilíndricos, variando alguns parâmetros e assistido por simulação numérica, tem como intuito estabelecer a melhor condição de puncionamento, bem como comparar o cálculo do esforço cisalhante com os valores dos esforços resultantes da simulação.

I.1 Puncionamento por Cisalhamento

Dentre os processos de conformação mecânica, encontra-se o processo de cisalhamento, que consiste no deslizamento entre duas superfícies, separando-as. O processo de cisalhamento pode ser associado aos processos de puncionamentos, onde, a partir do esforço aplicado sobre um punção, ocorre uma penetração na peça de trabalho, de modo a separar a porção de material puncionado.

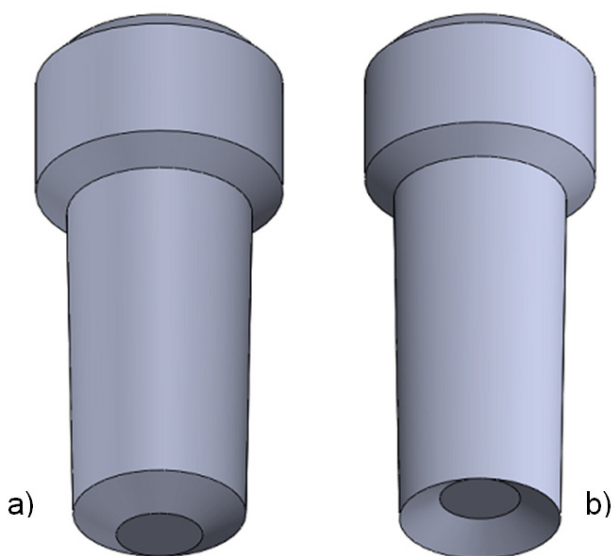


Figura 1. a) Punção com ângulo de cisalhamento convexo;⁽³⁾ b) Punção com ângulo de cisalhamento côncavo.

Estudos iniciais sobre puncionamento de tarugos cilíndricos indicam que uma folga radial, como mostrado na Figura 2, para um punção com ângulo convexo é maior que para um punção sem ângulo, considerando que ambos possuam acabamento superficial aceitável. No entanto, não são recomendados punções sem ângulo e punções com ângulo de cisalhamento significativamente pequenos (quase nulo). Além disso, o aumento da folga radial, nas mesmas condições de trabalho, pode provocar um aumento da carga máxima empregada pelo punção durante a penetração do material.⁽³⁾

A folga radial (Figura 2) entre o diâmetro do punção e a cavidade do inserto (que está alojado na cavidade da matriz) é estabelecida em função da espessura do tarugo, ou seja, a distância que o punção penetra no tarugo até a ruptura final do material. Entretanto, a folga ideal entre o punção e a cavidade da matriz, por simulação numérica,

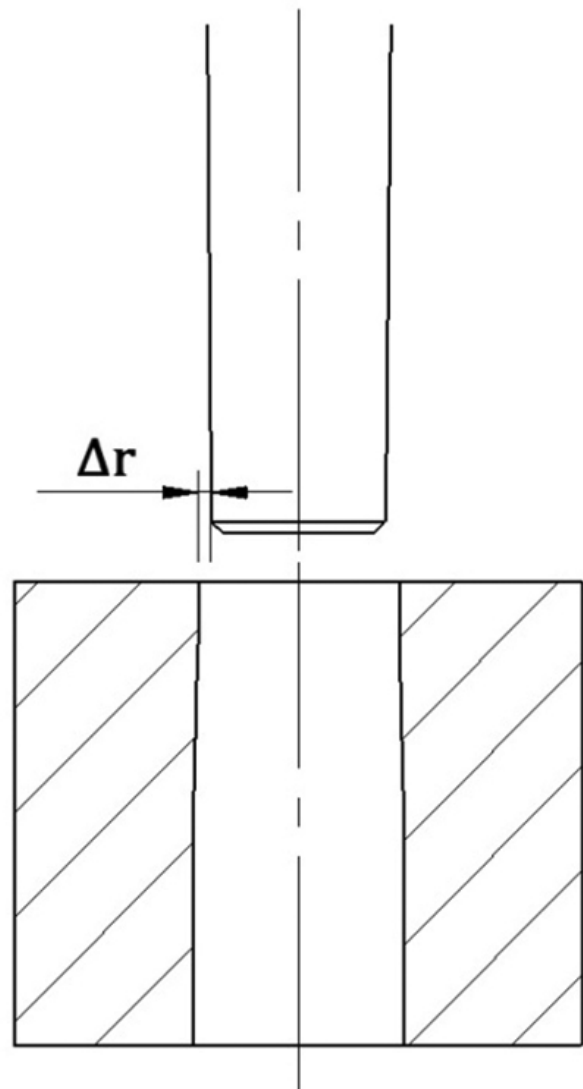


Figura 2. Representação da folga radial.

depende das deformações localizadas do material, uma vez que materiais com elevada plasticidade tendem a se deformar antes se romper, quando comparado a outro material de menor plasticidade e limite de rompimento equivalente.⁽⁴⁾

Existem métodos distintos para os diversos tipos de punções usando simulação numérica. As análises resultantes da simulação indicam que as deformações radiais do punção com cisalhamento convexo têm um valor mínimo com ângulo de cisalhamento dentro de uma faixa de 17° a 22°. Isso sugere que um ângulo de cisalhamento de 20° pode ser proposto seguramente para o objetivo prático, de modo a reduzir a tensão sobre a ferramenta ou permitir o uso de uma prensa de capacidade nominal menor. Além disso, a excentricidade devido à carga assimétrica na prensa é menor,⁽⁵⁾ quando usando um punção com cisalhamento convexo.

O comportamento do processo de puncionamento de uma placa de aço circular usando punções de diferentes diâmetros externos, ângulo convexo duplo cisalhante, comprimentos convexos e tratamentos de superfícies tem sido analisado por diferentes pesquisadores. Os resultados experimentais mostram que o puncionamento com uma pequena folga entre o punção e a matriz mostra um grande número de deslizamentos que se estendem quase até o final do puncionamento por cisalhamento.

Neste trabalho, são apresentados os resultados relativos à execução de experimentos com punções de ângulos convexos de 12,5° e 20°. Em relação ao punção com ângulo de 20°, as condições de desgaste apresentadas, durante o cisalhamento, permitem classificar em desgaste lateral, desgaste facial, lascamento, rachadura e fratura. Dentre esses desgastes, destacam-se o desgaste lateral e a fratura. Por outro lado, dentre as falhas apresentadas no punção com ângulo de 12,5°, durante o puncionamento, a principal falha é o desgaste lateral. A vida útil da ferramenta de puncionamento com ângulo convexo de 20° é maior do que uma ferramenta com 12,5° de ângulo convexo.⁽⁶⁾

De acordo com experimentos laboratoriais,⁽⁶⁾ recomenda-se o uso de um punção com ângulo convexo de 20°, pois esse tipo de punção apresenta melhor durabilidade durante o puncionamento. Partindo desse princípio, foram variados outros parâmetros ligados ao processo de puncionamento de tarugos cilíndricos, como a distância do gume cisalhante e o ângulo de saída do inserto (alojado na matriz).

O esforço de cisalhamento (F), durante o puncionamento de um tarugo cilíndrico,⁽⁷⁾ pode ser calculado pela Equação 1:

$$F = A_s \cdot \frac{k_f}{2} \quad (1)$$

onde A_s é a área superficial de contato entre o punção e o furo originado no tarugo cilíndrico e k_f é a tensão de escoamento do material. Para calcular a área superficial

(A_s), multiplica-se o perímetro (p) da cavidade circular pela espessura (e) do tarugo cilíndrico, como mostra a Equação 2:

$$A_s = e \cdot p \rightarrow A_s = e \cdot \pi \cdot d \quad (2)$$

1.2 Simulação Numérica por Elementos Finitos

A simulação numérica tem sido consideravelmente utilizada nas indústrias e com maior viabilidade desde os anos 1980, com o propósito de substituir o método de tentativa e erro, reduzindo os custos relacionados. Com isso, a simulação numérica tornou-se um método mais viável e aceitável, como ferramenta de trabalho para o desenvolvimento de novas metodologias de forjamento. Há diferentes programas de simulação disponíveis, baseados em diferentes métodos de execução e resolução. Dependendo dos resultados desejados, a escolha do programa adequado, dentre os disponíveis no mercado, é determinada conforme as necessidades específicas requisitadas, pois cada programa tem sua finalidade. Independente de qual programa estiver em estudo. Na conformação mecânica normalmente é utilizado o método dos elementos finitos (MEF). Para operar um programa de simulação numérica, é preciso conhecer as condições de trabalho.⁽⁸⁾

Existem algumas divergências entre a simulação numérica e os experimentos práticos, como problemas de contato e atrito interfacial entre a peça e a matriz, deformações severas, alterações nas propriedades mecânicas dos metais, tensões residuais, perda de massa (nos casos onde há formação de carepas), perdas térmicas da peça para as ferramentas, ganho térmico devido ao trabalho mecânico, dentre outros. Esses problemas encontrados durante o processo de forjamento não são obtidos e/ou transpostos com exatidão na resolução da modelagem matemática. Seguindo esse conceito, o método por elementos finitos tem como propósito solucionar algumas dessas divergências, dividindo a peça em elementos finitos, formando uma malha. A aplicação da carga a partir do deslocamento de uma ferramenta, que está acoplada a uma prensa, é dividida em uma série de incrementos, de forma que o processamento matemático possa ser realizado separadamente para cada estágio, resultando em uma distribuição de valores. Em cada estágio, os cálculos são realizados de maneira que seja atingido um balanço entre as forças internas e externas. Com o balanço assegurado, no estágio subsequente há um novo incremento de deslocamento. Esse procedimento se processa até a finalização da simulação.⁽⁹⁾

Na fase de projeto do processo de forjamento, a simulação numérica possibilita a verificação de deformidades, como falta de preenchimento da matriz, dobras, mordeduras, rachaduras e fraturas em seu estado inicial. Outro emprego da simulação no processo de forjamento é avaliar as variações e as alterações dos parâmetros do

processo de forjamento e, com isso, verificar a influência de cada parâmetro, averiguando as propriedades mecânicas resultantes no final do processo. As variações dos parâmetros, como temperatura, deformação e taxa de deformação, resultam em diferentes propriedades mecânicas no final do processo de forjamento. Além da verificação desses parâmetros, também é possível estudar o emprego de diferentes metodologias no processo de forjamento, como a sequência de passes e os caminhos que podem ser seguidos durante o forjamento. Assim, é possível avaliar diferentes ferramentas, estudando suas formas e geometrias, analisando quais as condições que podem apresentar maiores ou menores distribuições de deformações e tensões equivalentes, bem como os esforços máximos atingidos com o uso de cada método para avaliar a melhor forma de acordo com o pretendido.⁽⁹⁾

Na simulação numérica, durante a conformação, ocorre o remalhamento (formação de uma nova malha). Em regiões onde há deformações excessivas há maior ocorrência de remalhamento, formando uma malha mais grosseira com menos elementos, ou seja, a cada remalhamento há uma diminuição do número de elementos. Isso torna o processo mais rápido, pois, quanto menor o número de elementos, menor será a série de cálculos iterativos, diminuindo consideravelmente o tempo da simulação.⁽¹⁰⁾

1.3 Fraturas Dúctil e Frágil

Na Mecânica da Fratura, corpos metálicos rompem-se quando são submetidos a um carregamento acima da sua resistência mecânica. Há basicamente duas formas de fratura: (1) a fratura frágil, onde o corpo praticamente não

se deforma antes da ruptura e (2) a fratura dúctil, onde o corpo se deforma significativamente antes da ruptura, devido a sua ductilidade, uma vez que um material dúctil tem a capacidade de se deformar plasticamente.⁽¹¹⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da simulação numérica do processo de puncionamento, utilizou-se o software de simulação numérica pelo método dos elementos finitos (MEF). O processo de puncionamento analisado consiste na penetração de um punção em um tarugo cilíndrico, apoiado em um inserto alojado na cavidade da matriz, com o propósito de obter um tarugo cilíndrico vazado, como mostrado na Figura 3.

A Equação 3 descreve a curva de escoamento, utilizado no software para calcular a tensão de escoamento em cada elemento (kf_i):

$$kf_i = kf_0 \cdot e^{-m_i \cdot T} \cdot \phi_i^{m_2} \cdot \dot{\phi}_i^{m_3} \quad (3)$$

onde:

- kf_i [-] = tensão de escoamento;
- kf_0 [-] = tensão de escoamento inicial;
- T [°C] = temperatura da peça a ser forjada;
- ϕ [-] = deformação verdadeira;
- $\dot{\phi}$ [s⁻¹] = velocidade de deformação;

Com base na Equação 3, a tensão de escoamento calculada pelo software apresenta, dependendo das deformações e velocidades de deformações, uma variação de 82,1 a 178,3 N/mm² para uma temperatura de 1.100°C, conforme mostra a Figura 4.

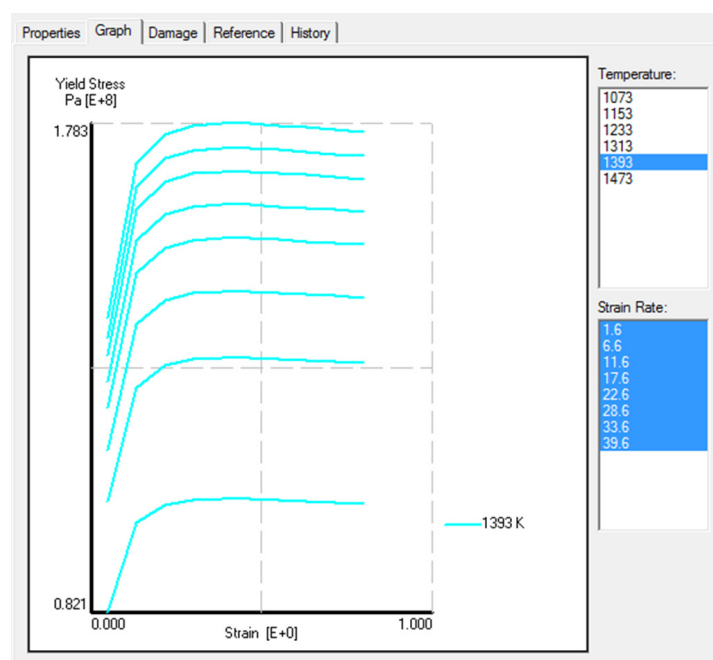


Figura 3. Tensão de escoamento para o aço AISI 4140.

As ferramentas usadas para a realização do puncionamento são consideradas como um corpo rígido (não deformável), uma vez que elas vão conferir a forma final ao tarugo que está sendo puncionado.

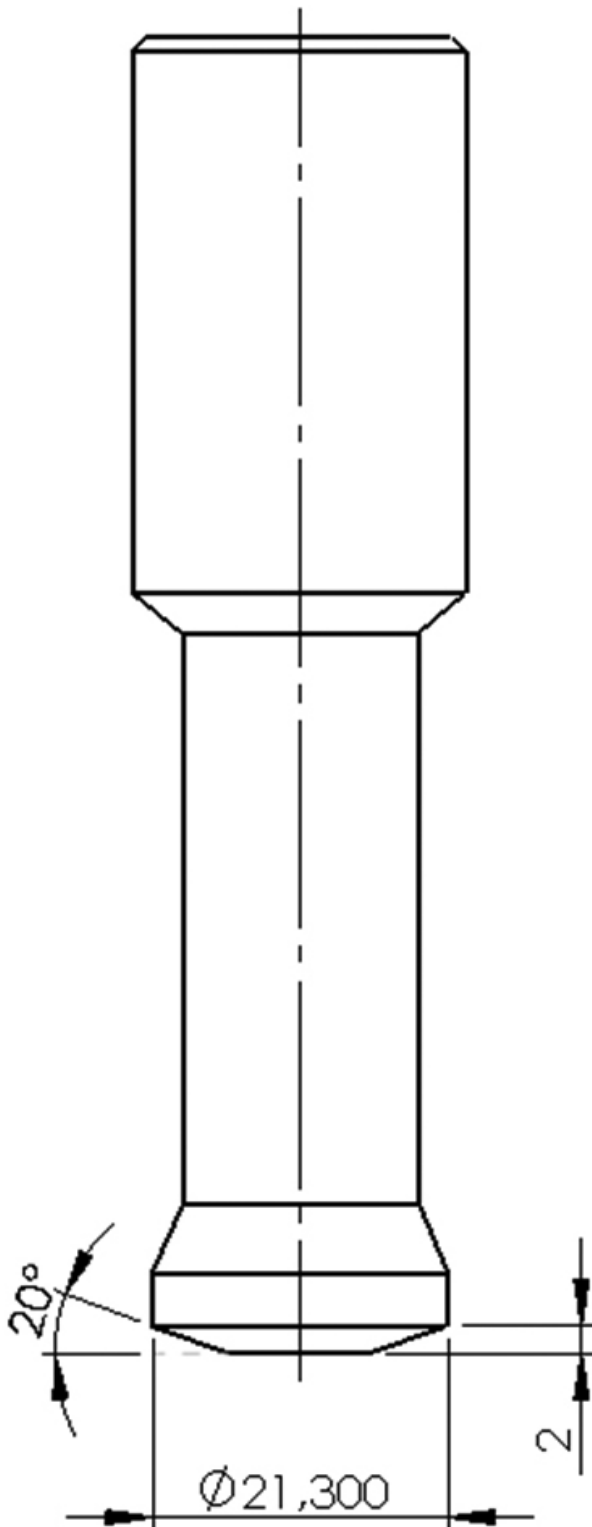


Figura 4. Punção.

Os dados de entrada para a simulação numérica estão mostrados na Tabela 1. Os parâmetros térmicos, como o coeficiente de convecção referente ao meio ambiente e à peça, são determinados conforme a indicação do software, sendo que a emissividade é alterada para 0,5 devido à porosidade existente na peça de trabalho. O material definido para o tarugo cilíndrico de 1,0 kg é o aço SAE 4140 e o material que constitui o punção, o inserto e a matriz é o aço ferramenta H13. Com o intuito de executar um puncionamento do material a quente, ou seja, acima da temperatura de recristalização, é estabelecida a temperatura de 1.100°C para o tarugo cilíndrico e, para as ferramentas, a temperatura de 30°C (temperatura ambiente).

O atrito interfacial estabelecido entre a peça de trabalho e as ferramentas, encontrado na biblioteca do software de simulação numérica para forjamento a quente de ligas metálicas, é de 0,4. Esse valor é consideravelmente elevado, em função de se tratar de um processo de conformação a quente, onde há formação de carepas, aumentando significativamente o coeficiente de atrito.

O punção modelado está representado pela Figura 5, enquanto que o inserto alojado na matriz é mostrado na Figura 6.

Para a execução da simulação computacional é criada uma malha no tarugo cilíndrico ($\varnothing 67,5 \times 40,4$ mm) com elementos finitos de 2,0 mm, formando uma malha com 2.762 elementos finitos, como mostra a Figura 7, estabelecendo-se uma folga radial de aproximadamente 5% em relação à espessura do tarugo cilíndrico ($e = 40,4$ mm). A folga representada entre o punção e a cavidade do inserto é de 2,0 mm, ou seja, a diferença entre o diâmetro da cavidade do inserto (Figura 6) e o diâmetro do gume cisalhante do punção (Figura 5).

De acordo com a representação da Figura 3, com base no software de simulação numérica, é simulado o processo de puncionamento de tarugos cilíndricos para seis metodologias diferentes, variando a distância do gume cisalhante (G) do punção e o ângulo de saída (D) do inserto, como mostra a Tabela 2.

Tabela 1. Dados de entrada

Coeficiente de transferência de calor ao meio ambiente	50	W/m ² .K
Coeficiente de transferência de calor à peça	20.000	W/m ² .K
Emissividade por radiação térmica ao meio ambiente	0,5	-
Atrito interfacial entre as ferramentas e a peça	0,4	-
Temperatura das ferramentas	30	°C
Temperatura da peça	1.100	°C
Material das ferramentas	H13	-
Material da peça	SAE 4140	-

3 RESULTADOS

Com base na simulação numérica pelo método dos elementos finitos, obtêm-se os valores dos esforços em função do deslocamento. Esses esforços são mostrados em um gráfico de dispersão, onde os pontos indicam o esforço instantâneo. O gráfico da Figura 8 mostra esses esforços para o 1º, 2º e 3º casos (Tabela 2), e o gráfico da Figura 9 mostra os esforços obtidos no 4º, 5º e 6º casos (Tabela 2).

A partir dos esforços de puncionamento obtidos pelo software, como mostrado nas Figuras 8 e 9, são

calculados os esforços médios para cada caso e também, o esforço máximo atingido durante o puncionamento. A Tabela 3 mostra os esforços médios e os esforços máximos para cada metodologia empregada.

Considerando o valor da tensão de escoamento do aço SAE 4140 e das dimensões do processo de puncionamento, é calculado o esforço máximo de puncionamento. Segundo o software de simulação numérica, para essa classificação de aço (SAE 4140) a uma temperatura de 1.100°C, o valor da tensão de escoamento máxima (k_f) é de 178,3 N/mm². Para essas condições é aplicada a Equação 1, cujo resultado apresenta um valor de 263,2 kN.

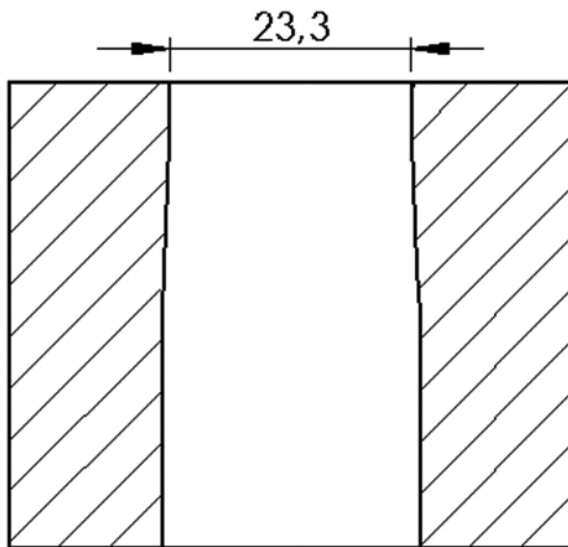


Figura 5. Inseto.

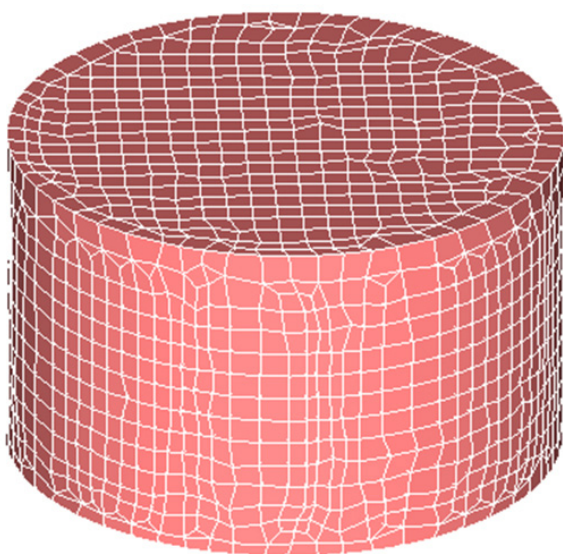


Figura 6. Tarugo cilíndrico com a definição da malha para a realização dos cálculos da simulação computacional.

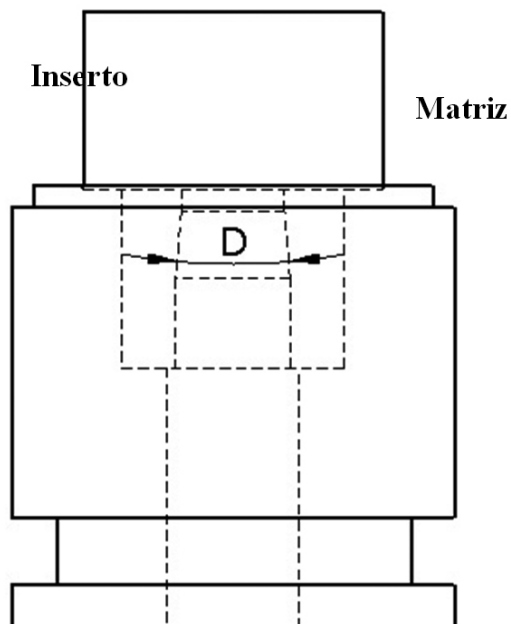
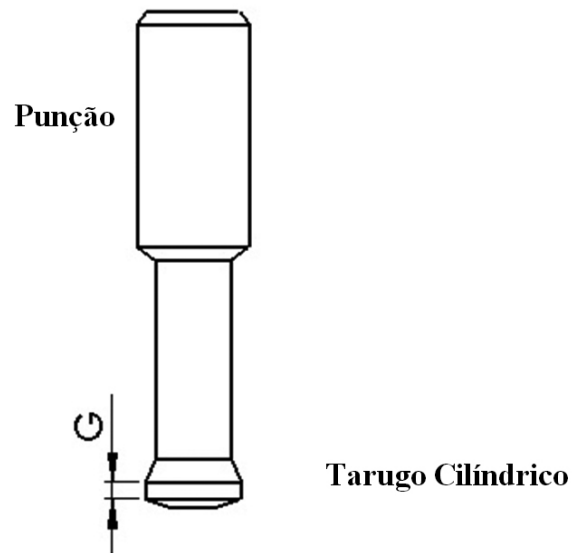


Figura 7. Montagem mostrando o processo de puncionamento do tarugo cilíndrico.

Tabela 2. Metodologias usadas nas simulações

Metodologias adotadas	1º caso	2º caso	3º caso	4º caso	5º caso	6º caso
Distância do gume cisalhante do punção (G)	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	5,0 mm	5,0 mm	5,0 mm
Valor do ângulo de saída do inserto (D)	2,5°	5°	10°	2,5°	5°	10°

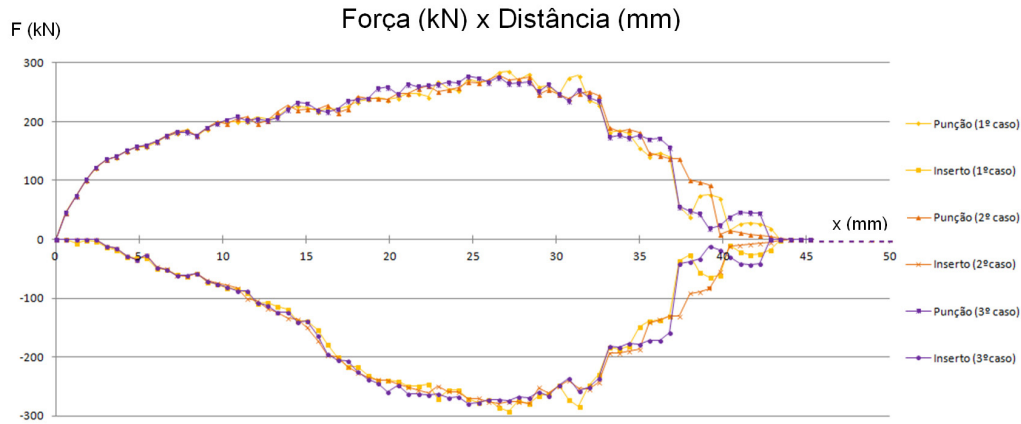


Figura 8. Gráfico contendo os valores das forças de puncionamento F em função do tempo t para punções com 2,5 mm de gume cisalhante.

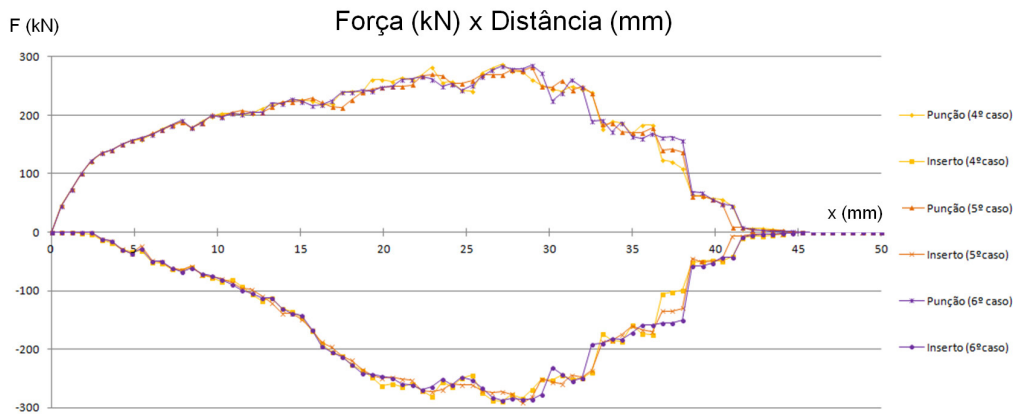


Figura 9. Gráfico mostrando os valores das forças de puncionamento F em função do tempo t para punções com 5,0 mm de gume cisalhante.

Tabela 3. Esforços resultantes da simulação numérica para o processo de puncionamento

Metodologias adotadas	1º caso	2º caso	3º caso	4º caso	5º caso	6º caso
Força média de puncionamento (kN)	173,8	172,8	171,8	177,7	176,8	174,8
Força máxima de puncionamento (kN)	277,9	274,0	271,0	281,8	276,9	274,0

A Figura 10 mostra o corpo após ser puncionado pelo software de simulação numérica. Percebe-se que, durante o puncionamento, ocorrem os deslizamentos dos planos cristalinos, provocando malhas consideravelmente bastante distorcidas, requerendo um remalhamento. As novas malhas formadas apresentam menos números de elementos finitos, culminando em uma redução do tempo de processamento da simulação numérica.

Na área de fabricação mecânica existem diversos casos onde os componentes precisam trabalhar sem a

presença de defeitos, considerando a fratura como um fenômeno não desejável. Entretanto, existem casos em que é necessário provocar a ruptura do material para a produção de um determinado componente, como o caso de tubos extrudados, tarugos cilíndricos puncionados para a produção de eixos vazados, dentre outros. Durante o puncionamento executado na simulação, o material se deforma bastante antes de apresentar os desprendimentos dos planos cristalinos, fenômeno característico de uma fratura dúctil.

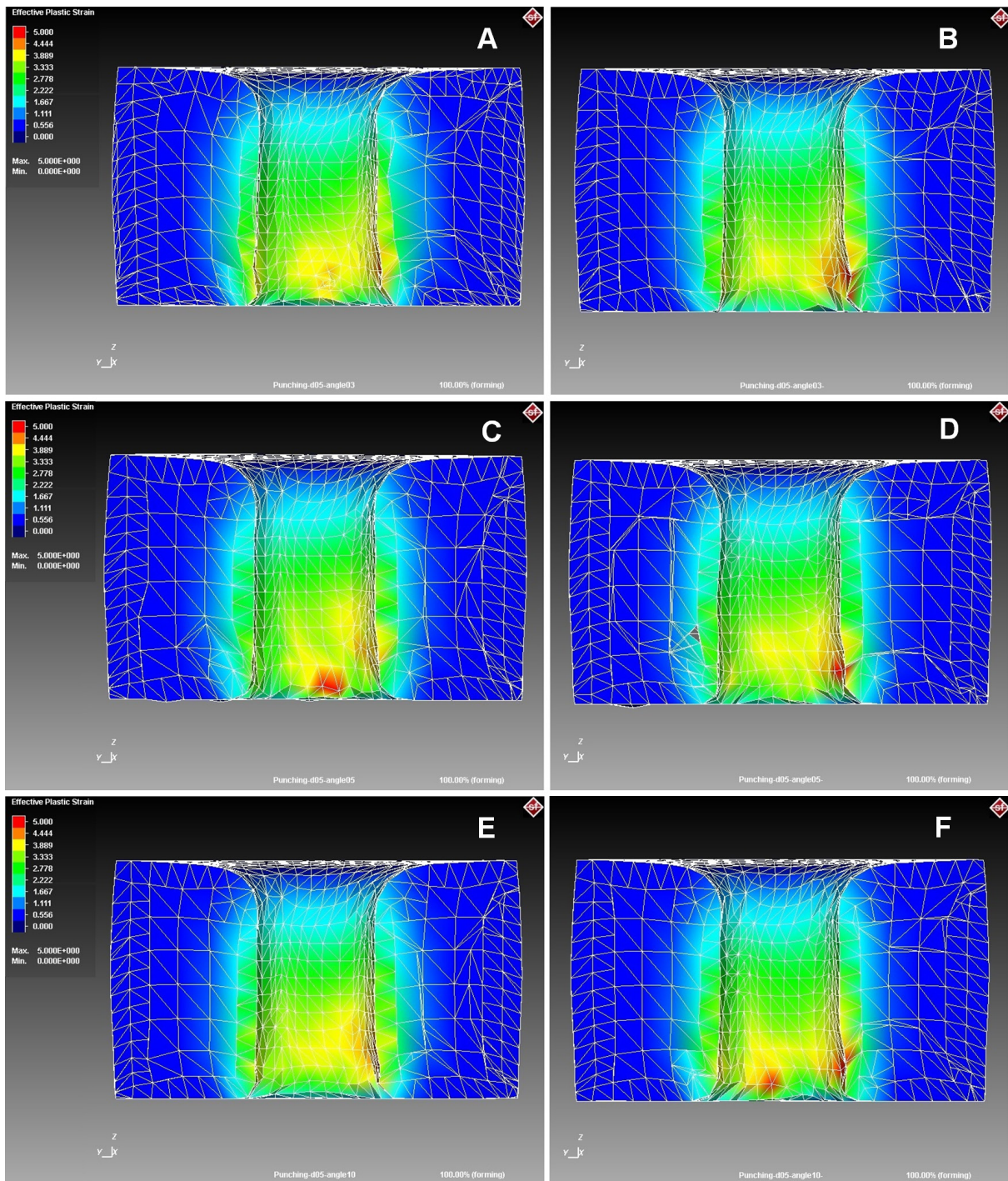


Figura 10. Resultados das simulações. a) 1° caso; b) 2° caso; c) 3° caso; d) 4° caso; e) 5° caso; f) 6° caso.

4 CONCLUSÕES

A simulação numérica realizada para o processo de puncionamento resulta em variações em função das diferentes metodologias adotadas. Os processos de puncionamento com o gume cisalhante de maior comprimento apresentam valores levemente superiores ao de menor comprimento, provavelmente devido ao maior contato existente entre a ferramenta e a peça, provocando

um aumento do esforço empregado pela ferramenta. Em relação ao ângulo de saída, observa-se que o aumento do ângulo culmina em um pequeno alívio das tensões devido à facilidade de escoamento do material. Dentre as metodologias estabelecidas, considerando a necessidade de reduzir os esforços durante o processo de puncionamento, seria mais conveniente usar punções com gumes cisalhantes menores e ângulos de saída maiores.

Em certos casos, os softwares apresentam limitações, cujos resultados não são satisfatórios. Entretanto, nesse caso, pela comparação entre o valor calculado e os valores dos esforços obtidos pelo software de simulação verifica-se que ficaram próximos. Isso indica que os esforços resultantes das simulações estão dentro dos padrões, possibilitando fazer comparações com variações e alterações na metodologia do processo.

Há uma tendência de maior emprego de programas de simulação nas indústrias de forjamento, bem como em ambientes acadêmicos, muitas vezes em parceria com as indústrias. Em certos casos, há a necessidade de mensurar o esforço de forjamento para a fabricação de um determinado componente e, com base no uso do software

de simulação numérica, é possível estimar o esforço necessário para produzir um determinado componente, estabelecendo a máquina mais adequada para executar o forjamento, evitando um desperdício de energia.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Bragecrim, por apoiar projetos conjuntos de pesquisa entre grupos brasileiros e alemães, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento das bolsas de estudo, ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

REFERÊNCIAS

- 1 Schaeffer L. Conformação mecânica. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre; 2004.
- 2 Schaeffer L. Forjamento. Porto Alegre: Imprensa Livre; 2001.
- 3 Travis FW. An investigation into the effect of punch shear and clearance in the piercing of thick steel plate. In: Proceedings of 14. International Machine Tool Design and Research Conference, 1974; London, England. London: MacMillan, 1974. p. 823-829.
- 4 Popat PB, Ghosh A, Kishore NN. Theoretical investigation of optimum clearance in blanking. Journal of Mechanical Working Technology. 1989;19:251-259. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-3804\(89\)90008-9](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3804(89)90008-9)
- 5 Singh UP, Streppe, AH, Kals HJJ. Design study of the geometry of a punching/blanking tool. Journal of Materials Processing Technology. 1992;33:331-345. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90270-3](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(92)90270-3)
- 6 Luo SY. Effect of the geometry and the surface treatment of punching tools on the tool life and wear conditions in the piercing of thick steel plate. Journal of Materials Processing Technology. 1999;88:122-133. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00375-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00375-6)
- 7 Schaeffer L, Rocha AS. Conformação mecânica: cálculos aplicados em processos de fabricação. Porto Alegre: Imprensa Livre; 2007.
- 8 Zuo X, Wei Y, Chen J, Zeng L, Ruan X. 3D FEM simulation of multi-stage forging process using solid modeling of forging tools. Journal of Materials Processing Technology. 1999;91:1-3. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00434-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00434-8)
- 9 Li G, Jinn JT, Wu WT, Oh SI. Recent development and applications of three-dimensional finite element modeling in bulk forming processes. Journal of Materials Processing Technology. 2001;113:40-45. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00590-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00590-8)
- 10 Park KS, Vantyne CJ, Moon YH. Process analysis of multistage forging by using finite element method. Journal of Materials Processing Technology. 2007;187-188:586-590. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.036>
- 11 Niclaeys C, N'Guyen TH, Marie S, Chapuliot S, Degallaix S. Non-fracture prediction of a C-Mn weld joint in the brittle-to-ductile fracture transition temperature range: Part I: Experimental results and numerical study. Engineering Fracture Mechanics. 2012;79:149-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.10.010>

Recebido em: 05/10/2012

Aceito em: 23/08/2013