



AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE PUNÇONAMENTO DE CHAPA GROSSA COM DIFERENTES FORMATOS DE PUNÇÃO

Sérgio Fernando Lajarin, espanhol@ufpr.br
Rosalvo da Cunha Barreto Neto, rosalvo.barreto@gmail.com
Paulo Victor Prestes Marcondes*, marcondes@ufpr.br

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba, Pr –Brasil

Resumo: *O punçonnemento de chapas metálicas é um importante processo de fabricação usado para conformação de componentes na indústria mecânica. O punçonnemento de chapas grossas tem aplicação na produção de chassis e carrocerias pra indústria de caminhões, carros e tratores. A escolha correta dos parâmetros de processo e de ferramenta tem influência direta na qualidade do furo. É comum a escolha do formato do punção ser feita baseado na experiência do operador, na disponibilidade, no custo, ou por meio de uma série de procedimentos empíricos no chão de fábrica. A simulação numérica tem se tornado uma poderosa ferramenta que auxilia engenheiros na escolha mais adequada desses parâmetros. Este trabalho avalia por meio de Método de Elementos Finitos (MEF) a influência do formato do punção na qualidade de furos punçonnados em chapa de aço LNE38 (NBR 6656) com 8 milímetros de espessura. Foram analisados quatro formatos diferentes de punção, sendo eles os punções de formato: reto, cônico interno, degrau e dentado. Foi possível observar a influência do formato do punção na geração de força para o corte, na energia consumida e na característica da parede do furo.*

Palavras-chave: *punçonnemento, chapa grossa, formato de punção, aço LNE38.*

1. INTRODUÇÃO

O processo de estampagem de chapas metálicas é amplamente usado na indústria, principalmente no segmento automotivo e na fabricação de componentes pequenos e leves. Identificar os parâmetros de processos adequados é importante para a eficiência do processo, porém, a identificação desses parâmetros é, normalmente, resultado de uma série de experimentos práticos que consomem grande tempo e custo (Al-Momani and Rawabdeh, 2008). No entanto, nos últimos anos a indústria metal mecânica tem usado simulação numérica computacional para aperfeiçoar processos e para descrever o comportamento elasto-plástico de material durante a conformação de chapas. Ela é uma poderosa ferramenta que ajuda engenheiros à manter a qualidade dos produtos, evitando ou reduzindo defeitos tradicionais da conformação de chapas, tais como, enrugamento, redução da espessura, trinca e o fenômeno do retorno elástico. Em Hatanaka et al. (2003ab) fica evidente que simulações numéricas podem conduzir a um melhor entendimento do comportamento mecânico, permitindo que parâmetros de processo, tais como, força de prensa-chapas, condição de atrito; e parâmetros de ferramenta, tais como, folga de matriz, geometria de ferramenta entre outros, possam ser escolhidos de forma mais eficientes.

Li et al. (2002) utilizaram a simulação numérica para simular o processo de punçonnemento obtendo resultados bastante próximos do experimental. A operação de punçonnemento consiste, basicamente, em cortar a chapa metálica aplicando tensões cisalhantes por meio da ação de punção e uma matriz rígida. O cisalhamento se desenvolve a partir de trincas superficiais na chapa que se iniciam nas regiões em contato com as arestas do punção e da matriz. A progressão na penetração do punção através da espessura da chapa promove o crescimento da trinca resultando na ruptura total do material (HUSSON et al., 2008). Na Figura 1 podem ser vistas algumas características básicas de um furo punçonnado.

A parede lateral de um furo punçonnado é geralmente reta apenas até uma parte da espessura, conhecida como região espelhada, resultante do cisalhamento do material. O restante da parede do furo é geralmente, cônico e irregular, resultante do rompimento do material após a propagação e encontro das trincas. Além disso, na parede do furo podem aparecer rebarbas na borda de saída e arredondamento na borda de entrada do furo. A profundidade do arredondamento da borda e da parte cisalhada indica a profundidade de penetração do punção. Está é a etapa na qual a força de corte é exercida antes que o material fracture por completo e o furo seja produzido. A profundidade de penetração afeta o consumo de energia e a força de corte. Segundo a ASM (2004) o percentual de penetração depende fortemente do material punçonnado e da folga de matriz. Husson et al. (2008) afirmam que a folga entre punção e matriz é um

parâmetro de processo que causa significativa influência na qualidade do furo puncionado. De acordo com Hambli (2002) folgas por lado, maiores que 10% da espessura são desejadas para minimizar as forças de corte aumentando a vida da ferramenta, porém, folgas em torno de 5% são desejadas para minimizar a profundidade e o ângulo de fratura, resultando em uma região cisalhada maior. A ASM (2004) afirma que para aços de baixo teor de carbono, a folga de 5% é desejada para produzir furos puncionados com uma maior profundidade cisalhada (35 à 55% da espessura), menor ângulo de fratura (6 à 11°), pequeno arredondamento na borda de entrada (4 à 7% da espessura) e pequena ou nenhuma rebarba.

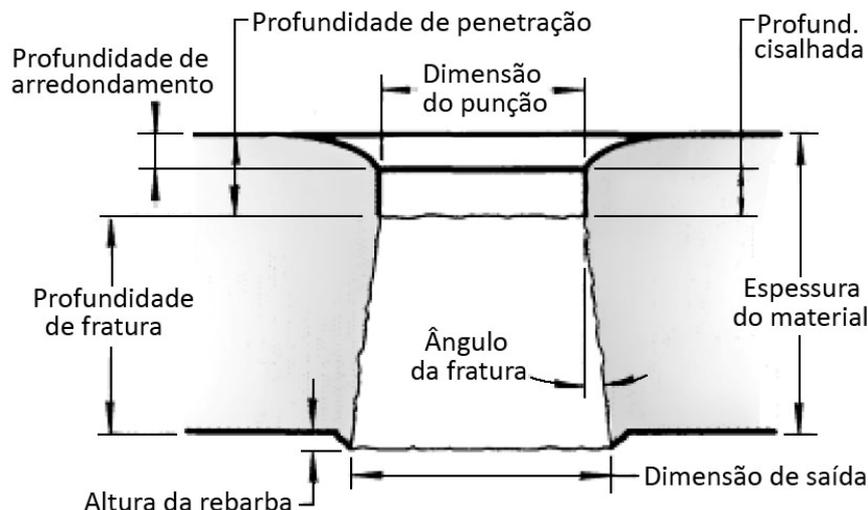


Figura 1 - Características de um furo puncionado em chapa grossa

A conicidade do furo, o arredondamento na borda de entrada e as rebarbas, são defeitos indesejáveis que podem ser minimizados por meio da escolha adequada dos parâmetros de processo, da utilização de ferramenta afiada e da geometria de ferramenta adequada. Neste trabalho será utilizado o método de elementos finitos, por meio do aplicativo ABAQUS® para analisar a influência da geometria do punção na qualidade de furos puncionados em chapa grossa de 8 mm de espessura e na aplicação de força. O material da chapa caracterizado na simulação foi o aço de alta resistência LNE38 (NBR 6656). Para simular o processo de puncionamento indicando o início e a propagação da trinca no material foi usado um critério de dano dúctil. Goijaerts et al. (2001) avaliou o modelo de fratura dúctil em diferentes materiais e comprovou sua eficiência. Söderberg (2006) realizou simulações usando esse critério de dano no ABAQUS e produziu resultados bastante coerentes com o experimental. Analisar computacionalmente parâmetros de processo ou de ferramenta garante redução de custos e de tempo no desenvolvimento do ferramental.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todas as simulações foram feitas utilizando o aplicativo ABAQUS/EXPLICIT 6.9. Este modelo usa uma condição de ponto de integração direta nas equações de estrutura dinâmica. A condição de ponto de integração direta é adequada para problemas altamente dinâmicos com comportamento não linear, tais como simulações de fratura de metais.

O processo de puncionamento foi simulado com quatro corpos modelados em modo axisimétrico. O punção, o prensa-chapas e a matriz foram modeladas como elementos estruturais sólidos/rígidos. A chapa foi modelada com elementos quadriláteros axisimétricos com 4 nós e integração reduzida (CAX4R) e triangulares com três nós (CAX3) (ABAQUS, 2009).

Marcondes et al. (2008) enfatizam que o refinamento da malha afeta de maneira significativa os resultados das tensões nas simulações. Devido ao elevado gradiente de deformações plásticas na área puncionada, uma malha suficientemente refinada deve ser aplicada próxima à área de corte. Söderberg (2008) mostrou a influência do refinamento da malha na geometria e nas forças de corte pelo processo de puncionamento de chapas finas.

Neste trabalho foram aplicados 178 elementos na espessura da chapa apenas na região de propagação da trinca, i.e., onde as deformações plásticas estão concentradas. Nas outras regiões foi aplicada uma malha mais grosseira a fim de diminuir o tempo consumido pelas simulações. Conforme sugerido por Hambli (2002) e ASM (2004) foi usado folga por lado de 5% da espessura entre punção e matriz. Quatro diferentes formatos de punção foram analisados, são eles: (a) reto, (b) cônico, (c) de grau e (d) dentado escalonado (Fig. 2).

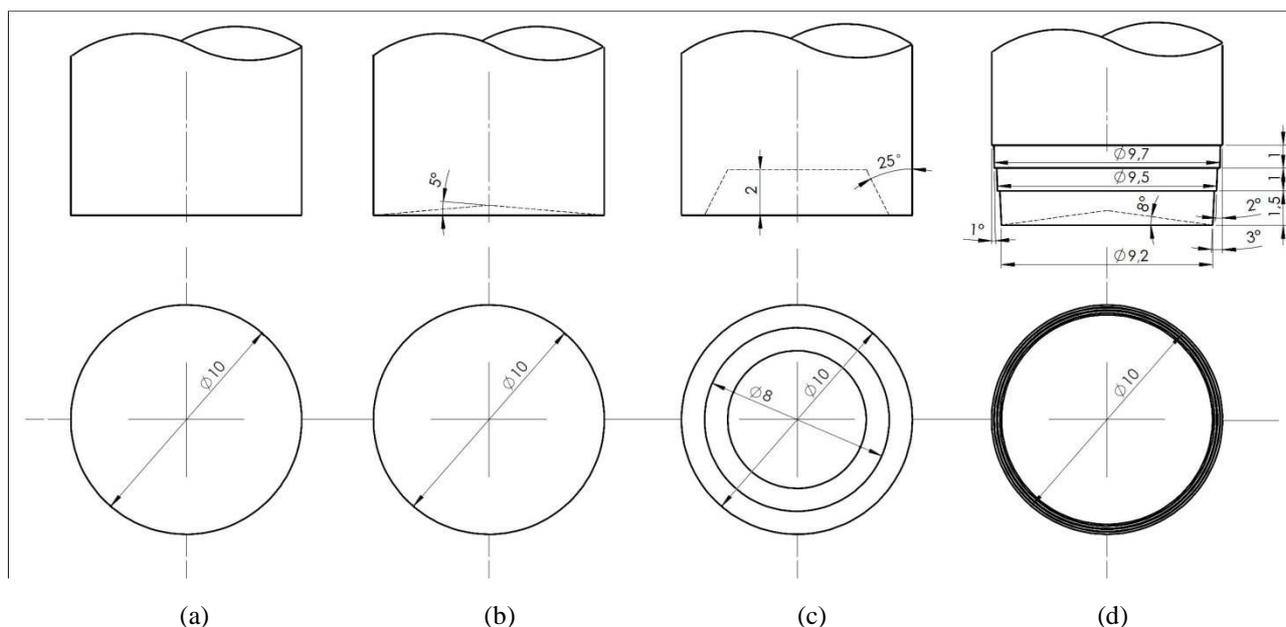


Figura 2 - Formatos de topo de punção: (a) reto, (b) cônico interno, (c) degrau e (d) dentado cônico.

Os contatos entre os corpos rígidos (punção, prensa-chapas e matriz) e as superfícies da chapa foram definidos pelo método de penalidade de contato (*penalty contact method*) com coeficiente de atrito de 0.1 (modelo de Coulomb) entre as superfícies. A força aplicada no prensa-chapas foi de 10000N. O material da chapa modelada foi o aço de alta resistência LNE38 (NBR 6656) com 8 mm de espessura. As propriedades mecânicas do material são sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades mecânicas do LNE38

Material	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão Limite de resistência (MPa)	Along. (%)	K (MPa)	n	Densidade (Kg/mm ³)	Coef. de Poisson	Módulo de Elasticidad e (MPa)
LNE 38 NBR 6656	439	521	29	1012	0,20	7,8E-9	0,3	210000

Foi utilizado o critério de escoamento de von Mises com encruamento isotrópico que assume que as propriedades do material são similares em todas as direções. Devido ao fato de que os dados obtidos no ensaio de tração convencional não representam totalmente a plasticidade do material, foi aplicada a “*power law*” para descrever a parte plástica no aplicativo de simulação (Fig. 3).

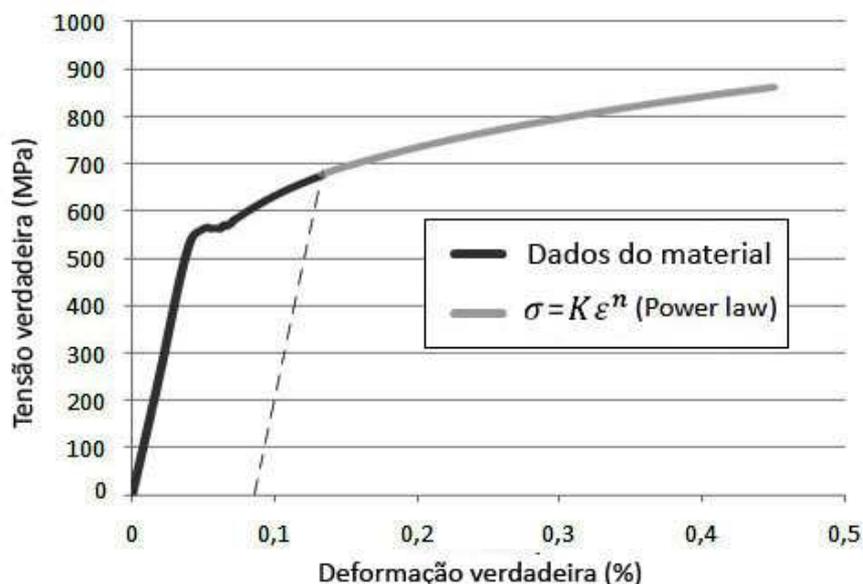


Figura 3. Curva tensão-deformação do aço LNE38 usada para caracterizar o material no aplicativo de simulação.

A determinação do critério de início de dano após a tensão limite de resistência foi obtida da seguinte maneira: Foi escolhido o critério de início de dano dúctil que prevê o início do dano causado pela nucleação, crescimento e coalescência de vazios em materiais dúcteis. O critério assume que a deformação plástica equivalente no início do dano $\dot{\epsilon}_D^{pl}$ é uma função da tensão triaxial e da taxa de deformação $\dot{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl})$. Neste caso $\eta = -p/q$ é a tensão triaxial. A variável p é a tensão compressiva, q é a tensão equivalente de Mises e $\dot{\epsilon}^{pl}$ é a taxa de deformação plástica equivalente. A tensão compressiva p e a tensão equivalente de Mises q são representados pelas equações 1 e 2 respectivamente.

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

O critério para o início do dano é alcançado quando a seguinte condição é satisfeita a condição da (eq. 3), onde ω_D é um estado variável que aumenta monotonicamente com a deformação plástica. A cada passo durante a análise, o aumento incremental em ω_D é calculado conforme a (eq. 4).

$$\omega_D = \int \frac{d\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl})} = 1 \quad (3)$$

$$\Delta\omega_D = \frac{\Delta\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon}^{pl})} \geq 0 \quad (4)$$

Nas simulações, é assumido que a degradação da rigidez é associada com cada mecanismo de dano dúctil e pode ser modelada aplicando uma variável de dano escalar. Os dados considerados para definir o mecanismo de dano dúctil podem ser obtidos da seguinte maneira: para a tensão uniaxial, $\sigma_2 \neq 0$, $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$ o valor do fator de tensão triaxial é obtido substituindo os valores $\sigma_2 \neq 0$, $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$ nas equações 1 e 2. Assim sendo $\eta = 0.272$ é obtido. Para a tensão biaxial, é assumido que $\sigma_1 = \sigma_2$ e $\sigma_3 = 0$ e $\eta = 0.667$ é calculado. Para cisalhamento, $\sigma_1 = -\sigma_2$ e $\sigma_3 = 0$ e $\eta = 0$ é obtido. Desta forma, é determinado o critério de evolução do dano, i.e., parâmetro que define como o material degrada após o critério de início do dano é atingido.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para simular a influência dos diferentes formatos de punção (Fig. 2) na parede do furo puncionado, todas as simulações foram realizadas com os mesmos parâmetros, alterando apenas o formato do punção. O punção, matriz e o prensa-chapas foram definidos como corpos rígidos não deformáveis. Porém, a chapa foi considerada como corpo deformável e foi espacialmente descrita por meio da sua divisão em uma malha de elementos finitos. A descrição espacial em uma malha é uma aproximação da geometria do problema, além disso, é uma fonte de erro em potencial. Para descrever com maior precisão uma geometria complexa, geralmente, é usada uma maior quantidade de elementos. Devido a isso, a região de maior deformação plástica do modelo construído nesse trabalho (região do cisalhamento e fratura) foi refinada com 178 elementos distribuídos na espessura, sendo esse valor superior ao sugerido na literatura (SÖDERBERG, 2008).

Para avaliar o comportamento do dano produzido pelas forças exercidas pelo punção na espessura da chapa, foi definido o critério de início de dano dúctil (DUCTCRT). Esse critério indica que o elemento que ultrapassa $\omega_D > 1$ (eq. 3) foi deformado plasticamente além de sua capacidade. Dessa forma, os elementos da malha que atingem a degradação, são eliminados, dando origem às trincas e posteriormente à fratura total do material.

Na Figura 4 podem ser comparadas as curvas da força exercida pelo punção versus a sua penetração na chapa. Os perfis, reto (a) e cônico (b) atingiram o pico de força (164 e 151 kN, respectivamente) entre 1 e 1.5 mm de penetração na chapa, indicando o instante da iniciação da trinca inferior. Posteriormente, as curvas tiveram um decréscimo de força, indicando a propagação das trincas superior e inferior. Por volta de 1/3 da espessura da chapa (2.6 mm), ocorreu o encontro das trincas produzido pela fratura do material, ocorrido próximo de 30 kN. O local da fratura em torno de 1/3 da espessura da chapa está de acordo com resultados experimentais publicados por Marcondes et al. (2008) para o aço LNE38 com 8mm de espessura.

O perfil cônico interno (b) apresentou a curva com menor inclinação inicial e mais homogênea, ou seja, sem abruptas variações na força. Essa característica da curva revela uma operação de cisalhamento suave, produzida pelo ângulo agudo na aresta de corte e aponta para uma condição prática de ruído também bastante homogêneo. Além disso, o perfil cônico apresentou a menor área sob a curva, 12% menor que o perfil reto, indicando menor energia de trabalho consumida.

A curva de força versus penetração do punção para o formato degrau (c), apresentou o menor patamar de forças, com pico de 136 kN ocorrido por volta de 1.4 mm de penetração do punção. A menor aplicação de força exercida por esse punção é creditada à sua menor área de contato com a chapa até o momento da fratura, ocorrida por volta de 3.5 mm de penetração. Porém, a maior profundidade de penetração do punção até produzir o rompimento total do material, conduziu a uma maior energia de trabalho (cerca de 29% maior do que o perfil cônico).

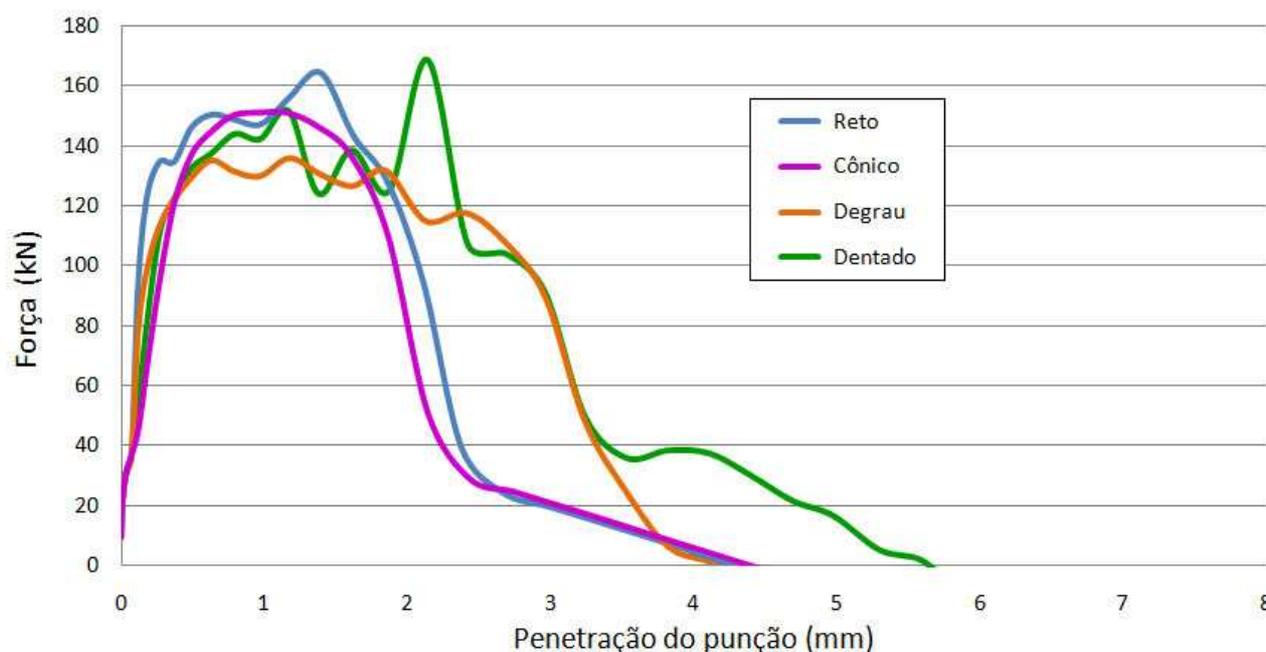


Figura 4 – Curva de força versus penetração para cada formato de punção

O perfil de punção dentado (d) apresentou uma curva de força versus penetração do punção bastante irregular. Essa irregularidade no comportamento da curva, é justificada pela maior complexidade do formato do punção, que penetra na chapa com 3 dentes (degraus) atuando gradualmente na parede do furo. O início da trinca inferior é indicado pelo pico de força de 168 kN, registrado à 2.15 mm de penetração. No resultado do perfil dentado (d) ilustrado na Figura 5 pode ser observado um grande arredondamento na superfície inferior do refugo puncionado. Isso indica o atraso na iniciação da trinca inferior. A conicidade da ponta do punção, fez com que a sua aresta principal de corte tivesse um diâmetro menor (\varnothing 9.2 mm), e consequentemente, produzisse uma folga entre punção e matriz maior nessa região (10% por lado). Essa folga maior prorrogou o início da trinca inferior e produziu também um maior ângulo de fratura. No entanto, mesmo após a fratura total do material, que ocorreu em torno de 3.2 mm de penetração, os demais dentes do punção continuaram atuando gradualmente, usinando a parede do furo e produzindo a maior região cisalhada entre os perfis simulados. Essa atuação pode ser observada na curva do perfil dentado (d) ilustrada na Figura 4, onde a curva tem um acréscimo na força (próximo de 3.6 mm), ocorrida logo após o momento de fratura total. Devido a isso, o perfil dentado consumiu uma energia 50% maior do que a consumida pelo perfil cônico.

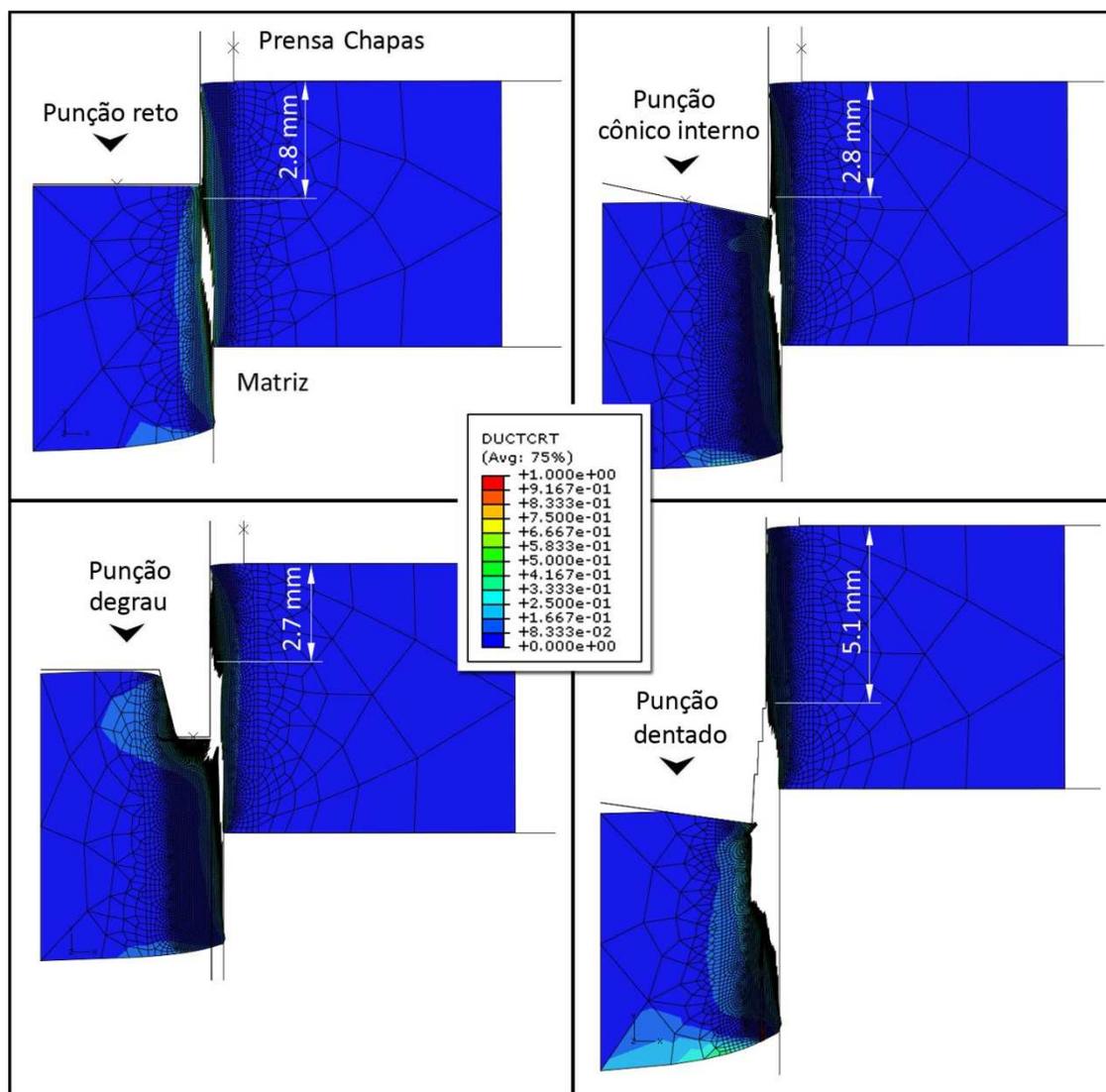


Figura 5 – Resultado da simulação numérica com os perfis de furos puncionados com diferentes formatos de punção.

4. CONCLUSÃO

Sendo o puncionamento de chapas metálicas um importante processo de fabricação, amplamente utilizado na fabricação de chassis e carrocerias, a escolha adequada dos parâmetros de processo e de ferramenta são fundamentais para a qualidade do furo produzido. Uma ferramenta que tem se tornado essencial na escolha desses parâmetros é a simulação numérica computacional, pois ela permite que uma vasta quantidade de variáveis sejam avaliadas antes que o ferramental seja construído. Neste estudo, uma análise por elementos finitos foi aplicada na operação de puncionamento de chapas de aço de alta resistência LNE38 com espessura de 8 mm. O processo foi simulado avaliando a influência de quatro diferentes formatos de punção na parede do furo. As conclusões obtidas dos resultados são as seguintes:

- O formato do punção influencia na aplicação de força durante o processo. O formato reto (a) tem o maior patamar de forças, o formato degrau (c) o menor, o formato com conicidade interna (b) aplica a força de forma mais homogênea, enquanto o formato dentado (d) tem aplicação de força por mais tempo e de maneira mais irregular.
- Devido à conicidade na ponta do punção e a ação gradativa dos demais dentes o formato de punção dentado (d) produziu a parede do furo com maior profundidade de área espelhada (cisalhada). Porém, aplicou cerca de 50% a mais de energia em relação as demais condições abordadas nesse trabalho.
- A conicidade interna no topo dos punções com formatos (a) e (d) produziram uma menor inclinação na curva de força, suavizando o início do processo.
- A utilização de folga por lado de 5% da espessura, não apresentou a ocorrência de arredondamentos na borda de entrada do furo e nem rebarbas na borda de saída.

5. REFERÊNCIAS

- ABAQUS/CAE, 2009, "User's Manual", Version 6.9.
- Al-momani E., Rawabdeh I., 2008, "An Application of Finite Element Method and Design of Experiments in the Optimization of Sheet Metal Blanking Process". *Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2, pp 53-63, ISSN 1995-6665.
- ASM Handbook Committee, 2004, "Forming and Forging" ASM Handbook Vol.14, ASM International.
- Goijaerts A. M., Govaert L. E., Baaijens F. P. T., 2001, "Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking". *Journal of Materials Processing Technology*, 110, pp 312-323.
- Hambli R., 2002, "Design of experiment based analysis for sheet metal blanking processes optimization". *Int. J. Manufact. Technol.* 19, pp 403-410.
- Hatanaka N., Yamaguchi K., Takakura N., 2003, "Finite element simulations of the shearing mechanism in the blanking of sheet metal". *J. Mater. Process. Technol.* 139, pp 64-70.
- Hatanaka N., Yamaguchi K., Takakura N., Iizuka T., 2003b, "Simulation of sheared edge formation blanking of sheet metals". *J. Mater. Process. Technol.*, 140, pp 628-634.
- Husson C., Correia J.P.M., Daridon L., Ahzi S., 2008, "Finite elements simulations of thin copper sheets blanking: Study of blanking parameters on sheared edge quality". *Journal of materials processing technology*, 199, pp 74-83.
- Li J.H., Du H., Niu Y.S., Fu X.L., 2002, "Research of the plastic status parameter and instantaneous clearance of a punching without burr". *Journal of Materials Processing Technology*, 129, pp 305-309.
- Marcondes P. V. P., Eto A. M., Beltrão P. A. C., Borges P. C., 2008, "A smart stamping tool for punching and broaching combination". *Journal of Materials Processing Technology* 206, pp 188-193.
- Marcondes P. V. P., Lajarin S. F., Magalhães J. F. S., 2007, "Influence of the mesh format, refinement and way of application on sheet forming simulation", 19th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2007, Brasília/DF.
- Söderberg M., 2006, "Finite Element Simulation of Punching", Dissertation, Luleå University of Technology, ISSN. 1402-1617.

6. 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

NUMERICAL EVALUATION OF THE PUNCHING PROCESS OF THICK SHEETS WITH DIFFERENT PUNCH FORMATS

Sérgio Fernando Lajarin, espanhol@ufpr.br
Rosalvo da Cunha Barreto Neto, rosalvo.barreto@gmail.com
Paulo Victor Prestes Marcondes*, marcondes@ufpr.br

Universidade Federal do Paraná, DEMEC, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210 CEP 81531-990, Curitiba, Pr –Brasil

Abstract: *Punching is an important manufacturing process in the mechanical industry. The punching of thick sheets has application in the production of industrial trucks, cars and tractors. The correct choice of process parameters and tool design has a direct influence on the quality of the hole. It is common to choose the format of the punch based on the operator's experience, availability, cost, or through a series of procedures of trial and error on the shop floor. The numerical simulation has become a powerful tool that helps engineers in the most appropriate choice of these parameters. This study evaluates by means of Finite Element Method (FEM) the influence of the punch shape on punched holes in steel LNE38 (thickness of 8 mm). Were analyzed four different punch formats: straight, tapered internal, scaled and toothed. It was possible to observe the influence of the punch shape in the generation of force for cutting, in the energy consumed and in the wall quality of the hole.*

Keywords: *punching, thick sheet, punch shape, LNE38 steel.*