

UMA ABORDAGEM HÍBRIDA NA ESTIMAÇÃO DA FORÇA DE RETENÇÃO EM FREIOS DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS METÁLICAS

Duarte, E. N.

UFU Universidade Federal de Uberlândia Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Sta. Mônica, Bloco 1M,
Uberlândia/MG - CEP: 38400-912
endumarte@mecanica.ufu.br

Oliveira, S. A. G.

UFU
sgoulart@mecanica.ufu.br

Neamtu, L.

Quantech ATZ, Gran Capitán 2-4 Barcelona, España
laur@quantech.es

Weyler, R.

Quantech ATZ, Gran Capitán 2-4 Barcelona, España
rafael.weyley@upc

Resumo: Há uma estreita dependência entre a qualidade das peças produzidas em um processo de estampagem de chapas metálicas e o controle do fluxo de material conformado para dentro da matriz. Controle este que se faz utilizando a Força de Retenção (FR) produzida pelo prensa-chapas, pelos freios de estampagem ou por ambos. Ao se necessitar de uma magnitude muito grande para esta força, geralmente utilizam-se os freios de estampagem. Para se reduzir a quantidade de tentativas de ajustes da força oriunda destes freios, conceitos mais precisos sobre eles se tornam muito importantes para os projetistas. Este estudo se baseou em uma metodologia que combina similitude em engenharia com bases de dados numéricas obtidas via simulação em Elementos Finitos (EF). Na validação dos modelos em EF e nos testes dos resultados foram utilizados os resultados experimentais de Nine (1978) e os resultados analíticos de Stoughton (1988). A média dos erros absolutos com respeito aos dados experimentais foi de cerca de 6% e, para os casos estudados, o maior erro encontrado foi de 11%. A precisão dos resultados obtidos nesta pesquisa foi considerada satisfatória e por isto aceita como contribuição na forma de um módulo de cálculo rápido da força de retenção de freio de estampagem no STAMPACK®, um programa de solução explícita para as simulações dos processos de estampagem.

Palavras-chave: Freios de estampagem, força de retenção, elementos finitos, estampagem de chapas metálicas.

1. INTRODUÇÃO

Um freio de estampagem é composto de uma saliência que penetra em uma ranhura posicionada sobre a matriz de estampagem. A geometria da seção transversal dos freios mais usual é a circular, ainda que outras geometrias também possam ser utilizadas, como a retangular, trapezoidal, triangular e assimétrica. Neste estudo, somente a forma circular será investigada, (ver Fig. 1).

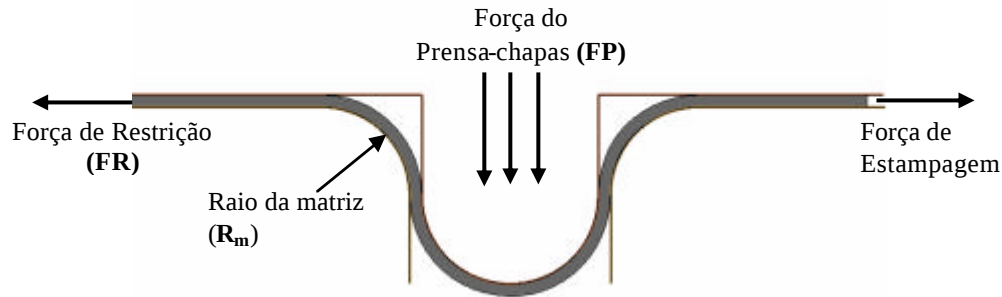


Figura 1: Freio de estampagem de seção circular

Nos últimos trinta anos, vários autores estudaram os processos de estampagem. Abordagens analíticas, numéricas e empíricas foram desenvolvidas. O primeiro estudo analítico do tema foi de Swift (1948). Nine (1978) fez experimentos para estudar a influência da deformação por flexão da chapa e do atrito no valor da Força de Retenção (FR). Seu trabalho considerou a sucessão de flexão e flexão inversa enquanto a chapa está sob a ação do freio. As forças do prensa-chapas (FP) e a FR foram medidas para chapas em aço e em alumínio. Os dados experimentais de Nine (1978) foram utilizados nas etapas de ajuste dos modelos em EF, na validação e nos testes com a equação obtida a partir deste estudo. Ressalte-se, entretanto, que dados utilizados em uma etapa não foram utilizados novamente em outra.

Levy (1983) fez um estudo parcialmente empírico para estimar a FR com uma equação fechada para tal. Nesta equação, parâmetros de materiais, de geometria da chapa e dos freios foram considerados. Stoughton (1988) partiu deste modelo de Levy para desenvolver uma formulação analítica para a predição da FR. As hipóteses de Stoughton incluem a Lei de Atrito de Coulomb e o critério anisotrópico de escoamento de Hill. A equação de Stoughton foi obtida através da integração do trabalho de deformação ao longo de todo o freio e através da espessura da chapa. Seu modelo pode ser aplicado a freios circulares, no entanto tem potencial para estimar a FR em freios com outras geometrias.

Utilizando-se simulações 2D, Carleer et al. (1995) estabeleceram uma abordagem com a qual as distribuições da FR na chapa estampada são calibradas com funções que serão aplicadas como condições de contorno para produzir efeitos similares no modelo 3D do mesmo problema. Esta metodologia é definida como o “método do freio equivalente”.

A solução numérica em EF para a estampagem de chapas metálicas tem crescido muito nos últimos anos. Não há mais dúvidas com respeito ao potencial das técnicas numéricas. No entanto, a simulação 3D em EF da estampagem de peças complexas ainda tem um custo computacional alto, em termos de tempo de simulação. Por este motivo, têm sido feitos estudos com o objetivo de se investigar o problema da estimação da FR e redução destas limitações para um nível mais aceitável.

Para se alcançar este objetivo, necessita-se de uma redução da quantidade de memória utilizada nas simulações e do tempo de processamento das mesmas. Por este motivo, muitos estudos sobre simulações 2D em EF vêm sendo feitos nos últimos anos. O objetivo desta pesquisa é conseguir uma melhor compreensão da influência dos parâmetros mais importantes na FR e a elaboração de uma equação empírica fechada para a predição da FR. Para esta finalidade, uma metodologia híbrida foi desenvolvida para a obtenção desta equação, através da utilização de similitude em engenharia, porém com dados obtidos em simulações numéricas.

Este procedimento foi adotado depois da análise dos bons resultados das simulações 2D em EF da FR para freios circulares desenvolvidas no código STAMPACK, quando comparados com os resultados experimentais de Nine (1978) e em congressos do tipo “benchmark”, onde se fazem testes experimentais com os resultados simulados. Os resultados do NUMISHHET 2005, ocorrido em Detroit, EUA, estão apresentados na Fig. 2.

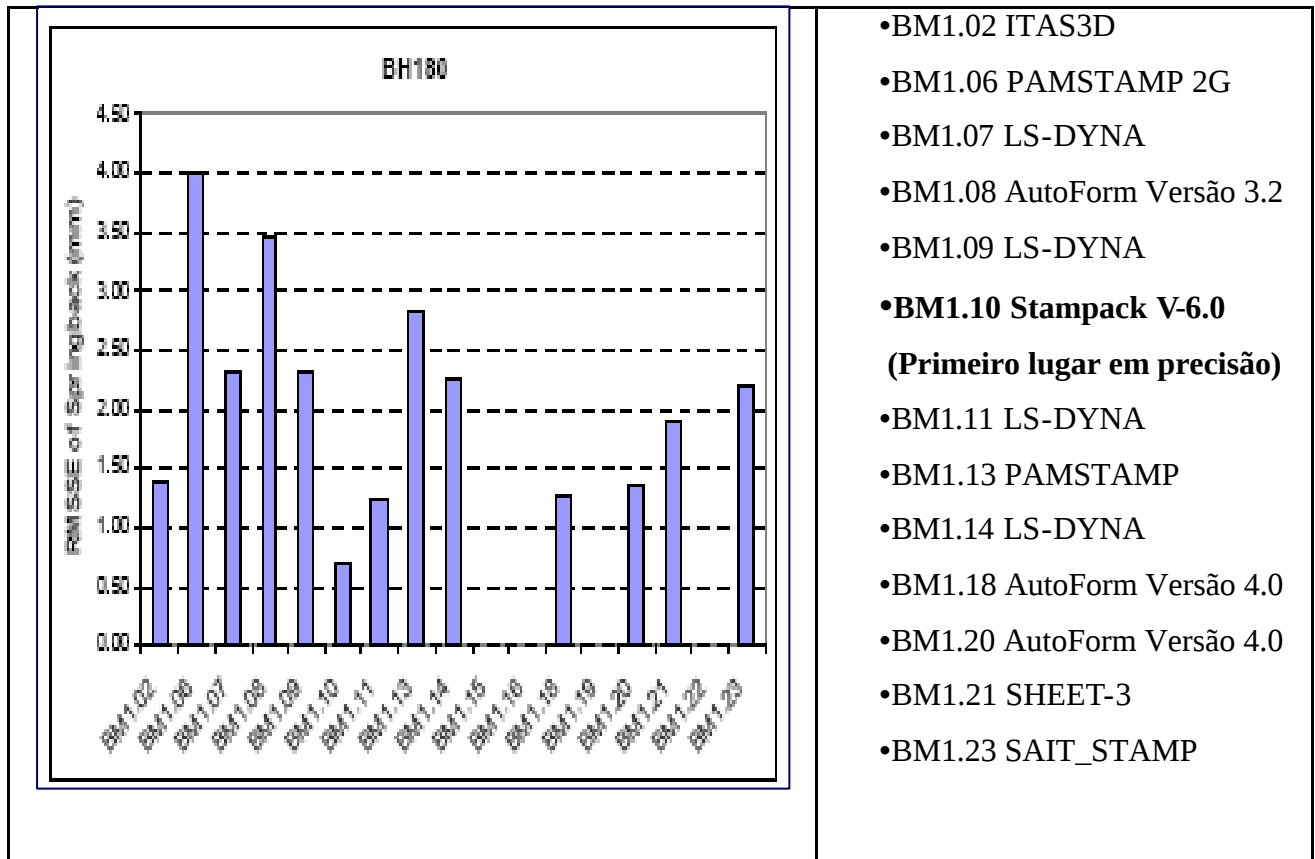


Fig.2: Raiz quadrada da soma das médias dos erros ao quadrado para recuperação elástica em mm, das simulações feitas por diferentes códigos no Numisheet 2005, em Detroit – EUA

Os dados descritos na Figura 2 representam a raiz quadrada da soma das médias dos erros ao quadrado para a recuperação elástica em milímetros, dos resultados simulados em EF para uma peça real obtida pelo processo de estampagem, conforme Figura 3. Pode-se verificar ainda na mesma figura, a melhor precisão dos resultados obtidos pelo STAMPACK, ao serem contrastados com os programas de simulação numérica que estão elencados na parte direita da Figura 2.

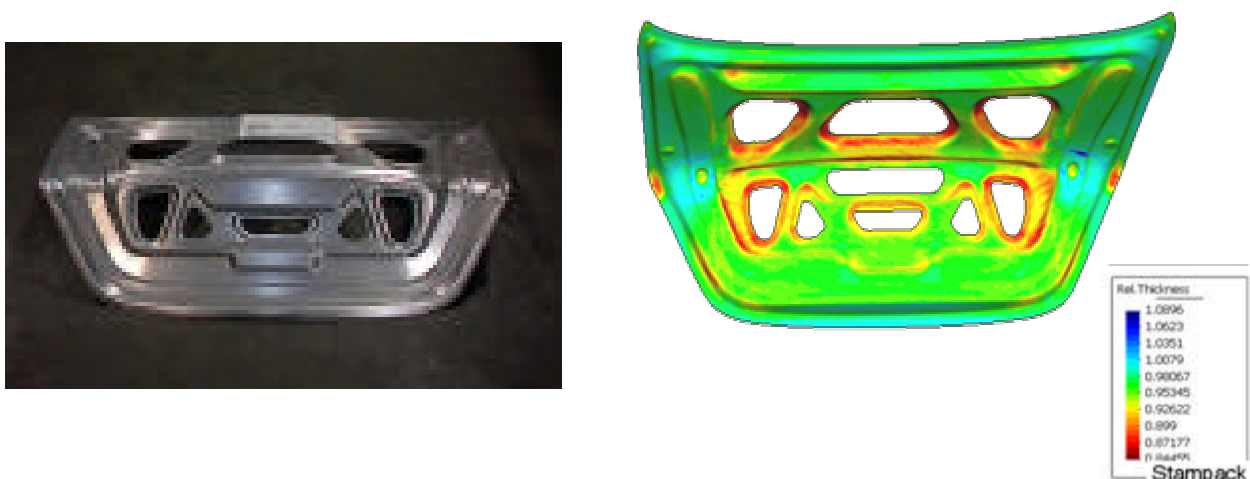


Fig.3: Peça real estampada (à esquerda) para comparação com os resultados simulados (à direita) em EF pelo STAMPACK no Numisheet 2005, em Detroit – EUA.

2. A EQUAÇÃO DE PREDIÇÃO E A SIMILITUDE

A teoria da similitude se desenvolve sob uma análise dimensional na qual se consideram as dimensões envolvidas no fenômeno físico em estudo. Além disto, a teoria da Similitude se preocupa com as condições que permitiriam considerar dois sistemas físicos separados como se fossem similares.

Baseando-se nesta análise dimensional, pode-se determinar com uma boa precisão uma Equação de Predição Geral (EPG) que inclua uma função desconhecida de grupos adimensionais – os π termos – quando combinada com procedimentos experimentais. Genericamente, pode-se escrevê-la da seguinte maneira:

$$p_1 = F(p_2, p_3, p_4, \dots, p_s) \quad (1)$$

onde s é o número de grupos adimensionais do fenômeno em estudo, obtidos do Teorema π de Buckingham –ver Murphy, (1950).

2.1 Ajustando e combinando funções

O tipo de função que tem os melhores resultados no ajuste de um fenômeno físico é, *a priori*, desconhecido. Por este motivo, esta função de calibração deve ser escolhida antes da formulação da EPG. Uma análise das bases de dados para a calibração deve ser conduzida cuidadosamente, objetivando-se uma melhor escolha da natureza da função com a qual se fará o referido ajuste de dados. Para este fim, os grupos adimensionais devem ser arranjados de forma que todos eles se mantenham constantes, exceto aquele que está momentaneamente sob investigação para, em seguida, encontrar-se uma equação componente para cada π termo. Este procedimento deve ser repetido para os outros grupos adimensionais e as relações obtidas para cada π termo se combinarão em uma equação geral que governa o problema. Frequentemente, esta combinação não é muito simples. No entanto, podem-se conseguir resultados precisos com esta metodologia, se a configuração das equações componentes da EPG for adequada.

A determinação da EPG se faz através da combinação por soma ou produto das equações componentes de cada π termo como função de π . Neste trabalho, as equações componentes forma combinadas por multiplicação. Mas, deve-se fazer um procedimento de validação de cada equação componente usando-se novos grupos de dados, a cada teste. A seguir, a validação deve ser realizada para cada π termo com a finalidade de verificar se é possível obter-se a EPG como um produto das equações componentes. Quando o teste for positivo em todos os casos – ver Murphy (1950) – a EPG é composta por uma série de equações componentes ordenadas na forma de um produto entre as mesmas.

3. A SOLUÇÃO EXPLÍCITA NAS SIMULAÇÕES EM ELEMENTOS FINITOS

A equação diferencial que governa o problema objeto desta investigação pode ter dois métodos de solução: implícita ou explícita. A solução implícita tem frequentemente o menor custo de tempo computacional quando comparado à solução explícita. Em contrapartida, quando o objetivo for uma análise sobre a possibilidade de uma falha na estampagem – como rugas, por exemplo – ou quando se busca o histórico da saída dos resultados da simulação, a solução explícita costuma ser a mais adequada.

Os requisitos de memória para as duas soluções – implícita ou explícita – são diferentes: a solução explícita – que usa o algoritmo das diferenças finitas – requer menos memória no disco rígido do computador, de acordo com NAFEMS (1992).

Geralmente as informações disponíveis para as propriedades de materiais são insuficientes e inadequadas, de forma que dados experimentais confiáveis são muito importantes para se checar os resultados das simulações e os procedimentos relacionados à validação do modelo em EF. Uma simulação em EF requer que a estrutura sob investigação esteja virtualmente descrita na forma de uma malha composta por elementos finitos. A arte de se obter bons resultados em EF está vinculada à equação do elemento mais adequado que se associa a esta malha.

Não se deve esquecer que o MEF é uma solução por aproximação e por este motivo deve-se ter uma boa idéia da solução que se espera do problema sob investigação. Por este motivo, uma boa compreensão das conseqüências das hipóteses associadas ao elemento escolhido é muito importante, já que isto permite a minimização dos efeitos indesejáveis da natureza do MEF. Na escolha do elemento, quatro grupos de informações são especificados:

- As coordenadas dos nós;
- A topologia nodal, isto é, a interconexão dos elementos;
- As propriedades geométricas dos elementos – de barra, de lâmina, etc.
- Propriedades de materiais – módulo de elasticidade, densidade, encruamento, etc. De acordo com NAFEMS (1992).

Esta compreensão requer certa experiência do tipo de problema em estudo, de maneira a se encontrar um compromisso entre a precisão dos resultados e o custo computacional. No entanto, antes da especificação da malha, o problema deve ser identificado através de quatro blocos:

- Geometria;
- Condições de contorno;
- Cargas;
- Resultados requeridos.

Os tipos de esforços e as condições de contorno têm efeito sobre a escolha do tipo de elemento ou sobre nós, ainda que não sejam especialmente críticos para a definição da malha mais adequada.

Pode-se verificar na Figura 4 um exemplo de malha com EF triangulares de lâmina. Cada elemento possui três nós e a malha é utilizada em uma simulação dos pára-lamas de um automóvel, utilizando-se um código incremental explícito. É uma prática prudente considerar que os resultados estão equivocados até que se faça uma validação analítica ou experimental dos mesmos. Muitas vezes, leva-se mais tempo, aliás, nos testes dos resultados que propriamente na etapa prévia de geração da malha. Isto, portanto, é suficiente para se justificar uma pesquisa que consiga uma solução para o cálculo da FR que seja mais rápida e que, além disto, tenha resultados precisos e confiáveis.

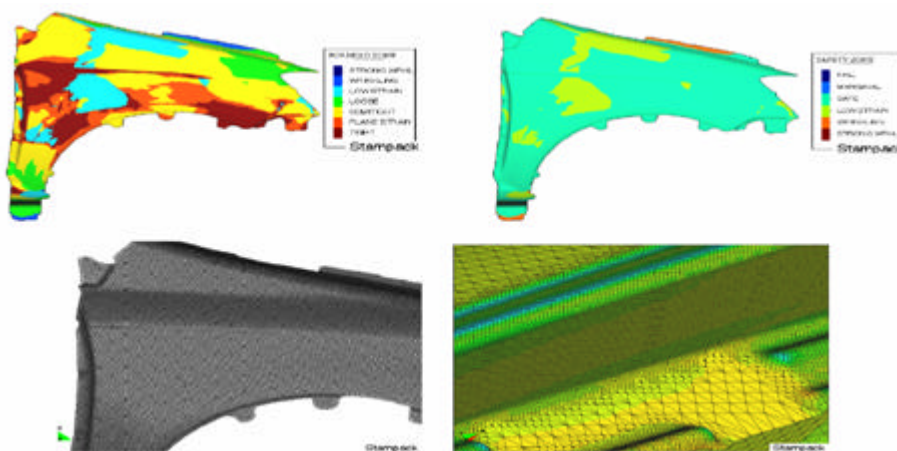


Figura 4: Resultados da simulação da estampagem de pára-choques de um código incremental explícito (Cortesia STAMPACK®).

4. METODOLOGIA

A principal vantagem da análise dimensional, e conseqüentemente da similitude, está relacionada com o fato da redução do número de variáveis que têm influência sobre o fenômeno em estudo. O tema mais importante é, portanto, o arranjo dos parâmetros em grupos adimensionais apropriados. Em estudos prévios, onde se utiliza a similitude, usualmente se tem utilizado bases de dados experimentais. No entanto, neste estudo, não somente bases de dados experimentais foram utilizadas como parte dos procedimentos de validação do modelo proposto, mas também bases de dados obtidas de simulações numéricas. Estas últimas fizeram parte do ajuste das equações componentes, as quais são o resultado de ajuste de curvas aos dados numéricos, ora a partir de uma função exponencial ora a partir de uma função de potência. Conforme mencionado, a presente metodologia foi desenvolvida com o objetivo de tirar vantagem dos bons resultados de simulações 2D obtidos com um programa em EF de solução explícita para a estimação da FR, o STAMPACK[®]. Outro objetivo seria o de se eliminar a principal desvantagem da solução explícita, isto é, o alto custo computacional com as simulações dos casos em que se desejam resultados com alta precisão. Para este propósito, necessita-se uma equação fechada que estime a FR, onde se possa avaliar este problema quase instantaneamente em comparação às simulações com alto custo de tempo computacional.

4.1 O modelo do problema investigado

Quando uma chapa passa por um freio de estampagem, uma complexa combinação de fatores geométricos e de materiais resulta das forças de deformações. Sua deformação é complexa porque o sentido de flexão da chapa se inverte quatro vezes em cada estampagem. Deformações por tração e por compressão ocorrem simultaneamente em ambos os lados da chapa, variando esses valores desde zero na linha neutra até os máximos valores na superfície da chapa. Segundo Nine (1978) [1], um dos fatores que afetam preponderantemente nas forças de deformações é a magnitude das deformações locais. Isto é determinado pela geometria dos freios e pela espessura da chapa – ver Figura 5. As forças de deformações são também afetadas pelo encruamento, o qual é definido por uma equação constitutiva. Além disto, a folga tem uma influência muito importante no raio efetivo de flexão da chapa observado, pois se o raio observado é maior que o valor utilizado na forma de referência da chapa, as deformações reais serão menores que os valores calculados.

Dois modelos em EF foram projetados e seus resultados foram comparados com os dados experimentais a fim de se estudar a importância de cada parâmetro na FR. O objetivo foi avaliar o valor mais efetivo da FR. No primeiro modelo em EF – ver Figura 5 – uma chapa passa por freio circular entre o prensa-chapas e a matriz. Sua malha está estruturada com elementos quadriláteros. Ao longo da espessura da chapa, há três elementos enquanto em seu comprimento se dispõem 90 elementos. Na mesma Figura também se pode ver a direção da Força do Prensa-chapas (FP), a direção em que se move o punção e o freio que penetra na ranhura posicionada na matriz.

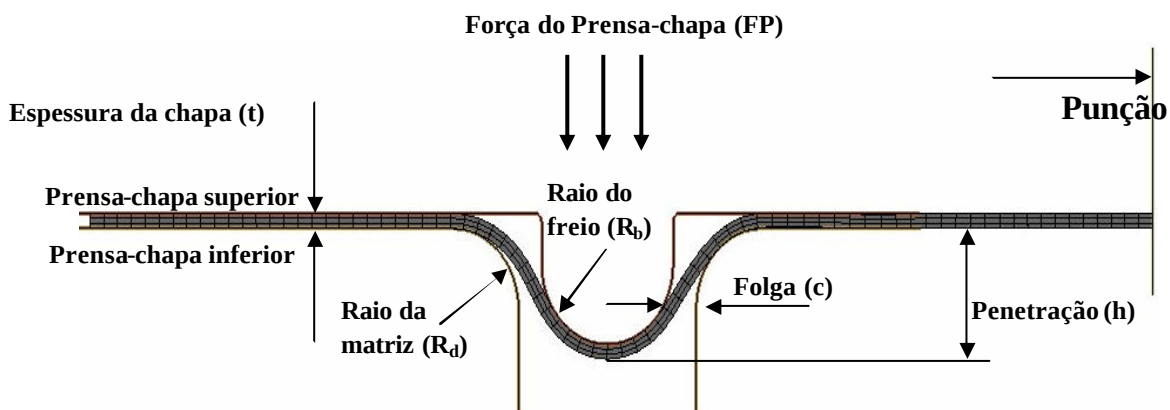


Figura 5: Modelo 1 com a malha adequada de um freio circular.

O segundo modelo em EF foi projetado similarmente ao primeiro, porém sem freio e de acordo com a Figura 6. O objetivo deste procedimento foi o de se avaliar somente a contribuição do freio na FR, descontando-se o efeito do atrito ao longo de toda a extensão da chapa. Esta contribuição está simulada no Modelo 2 para, em seguida, fazer-se a diminuição do valor da FR calculado no Modelo 1.

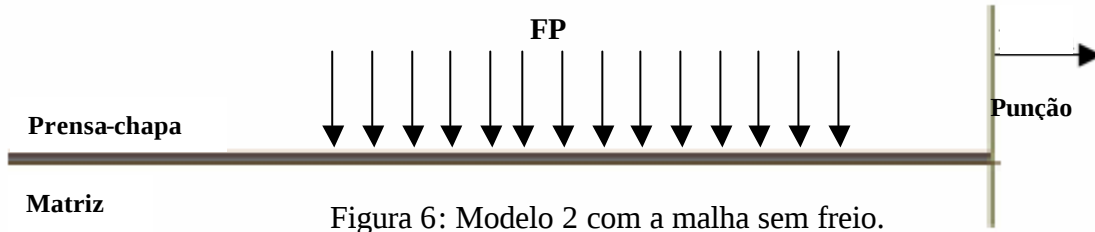


Figura 6: Modelo 2 com a malha sem freio.

Os raios de arredondamento da matriz e do freio circular foram projetados com o valor de 4,75 mm, como nos experimentos de Nine (1978). Os valores para a velocidade e a extensão do deslocamento do punção foram fixados em 85 mm/s e 38 mm, respectivamente. O deslocamento do punção foi calculado de maneira a assegurar-se que um elemento da malha, posicionado antes do freio, percorra toda a extensão do mesmo, resultando em uma simulação completa de flexão, deslizamento e flexão inversa.

4.2 Obtenção da Equação de Predição Geral (EPG)

Para se estipular a Equação de Predição Geral, doze variáveis independentes foram escolhidas para fazer parte de nove grupos adimensionais – ver Equação (1). Nesta Fig. 1 podem-se ver duas destas variáveis, isto é, FR e FP. As outras variáveis geométricas estão disponíveis na Figura 3: espessura da chapa (t), raio da matriz (R_d), raio do freio (R_b), folga (c) e a penetração (h). As propriedades de materiais escolhidas foram: módulo de elasticidade (E), limite de escoamento (S_y), constante de encruamento (K) e o expoente de encruamento (n), além do coeficiente de atrito (μ). A seguir, nove π termos foram arranjados de acordo com o Teorema π de Buckingham. O primeiro π termo foi definido como $\pi_1 = FR / FP$, isto é, a razão entre a força de restrição devida ao freio e a força do prensa chapas, ambas em KN. Este π termo é a variável dependente na seguinte equação:

$$p_1 = C \cdot f_2(p_2) \cdot f_3(p_3) \cdot f_4(p_4) \cdot f_5(p_5) \cdot f_6(p_6) \cdot f_7(p_7) \cdot f_8(p_8) \cdot f_9(p_9) \quad (2)$$

Na Equação (2), f_i , $i=2, 3, \dots, 9$, são as funções utilizadas no ajuste dos dados obtidos nas simulações em EF. Os outros π termos foram definidos como: $p_2 = t/R_b$; $p_3 = m$; $p_4 = n$; $p_5 = E/K$; $p_6 = S_y/K$; $p_7 = h/R_b$; $p_8 = c/R_b$; $p_9 = R_d/R_b$, cujas variáveis estão definidas no início desta seção. Obviamente, os valores de cada parâmetro estão estipulados dentro dos intervalos de valores mais usuais na prática, em estampagem de chapas metálicas, incluindo-se aqueles valores dos dados experimentais utilizados na validação deste estudo.

O valor da constante C da Eq. (2), para nove π termos, segundo Murphy (1950) é o que se segue:

$$C = \frac{1}{\left[F(\bar{p}_2, \bar{p}_3, \bar{p}_4, \dots, \bar{p}_9) \right]^7} \quad (3)$$

Seguindo-se com as simulações, podem-se obter as equações componentes. Deve-se avaliar, por tanto, a contribuição de cada parâmetro – ou grupo adimensional – sobre a FR. Para isto, devem-se calibrar os dados simulados para todos os π termos ou com uma função potencial do tipo $p_1 = c_1 \cdot (p_i)^{c_2}$ ou com uma função exponencial do tipo $p_1 = c_3 \cdot e^{(c_4 \cdot p_i)}$.

No mínimo sete pontos para cada π termo devem ser obtidos via simulação para cada grupo adimensional. Para se garantir que somente a contribuição do parâmetro simulado está sendo avaliada, todas as demais simulações devem ser conduzidas mantendo-se constantes os outros parâmetros em valores previamente estipulados.

Não se deve perder de vista, entretanto, que as equações componentes foram combinadas por produto e, por isso, é aconselhável que se faça um teste de validade da combinação por produto das equações componentes. Utilizando-se esta abordagem fez-se possível a obtenção de uma equação fechada para a estimativa da FR.

Nas Figuras 7 e 8 podem-se ver dois exemplos de calibração das equações componentes:

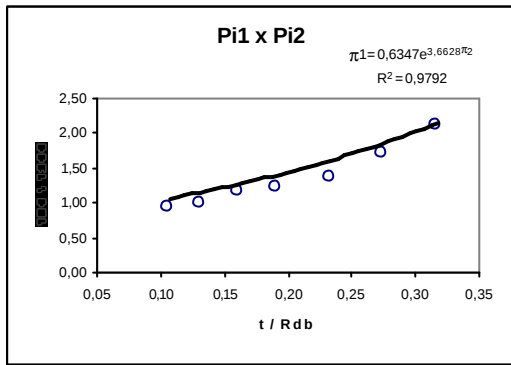


Fig. 7: Equação componente da espessura.

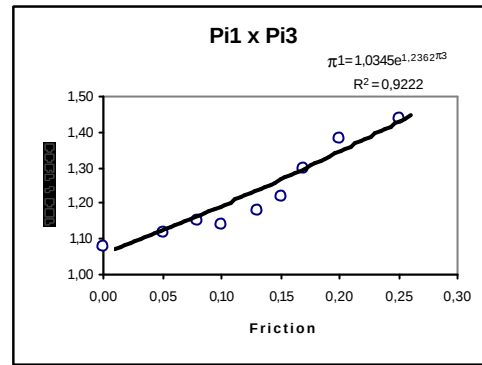


Fig. 8: Equação componente do atrito.

Ressalte-se, entretanto, que a precisão de uma estimativa depende da qualidade dos dados simulados. Por sua vez, a precisão destes dados depende, entre outras coisas, do custo computacional de cada simulação. Desta forma, dentro de certos limites, teoricamente se poderia acrescentar precisão nas estimativas feitas pela EPG, mas com aumento do esforço computacional dependido em cada simulação para se obter os dados numéricos. Por isto, deve-se considerar a conveniência – ou não – de um grande custo computacional na obtenção das bases de dados utilizadas nos ajustes das equações componentes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente estudo, a EPG obtida de uma combinação por produto das equações componentes tem a seguinte forma:

$$DBRF = C \cdot BHF \cdot a_2 \cdot e^{b_2 \left(\frac{t}{R_b} \right)} \cdot a_3 \cdot e^{b_3 \cdot \mu} \cdot a_4 \cdot e^{b_4 \cdot n} \cdot a_5 \cdot \left(\frac{E}{K} \right)^{b_5} \cdot a_6 \cdot e^{b_6 \left(\frac{S_y}{K} \right)} \cdot a_7 \cdot \left(\frac{h}{R_b} \right)^{b_7} \cdot a_8 \cdot e^{b_8 \left(\frac{c}{R_b} \right)} \cdot a_9 \cdot e^{b_9 \left(\frac{R_m}{R_b} \right)} \quad (4)$$

Ao se utilizar as condições estipuladas nesta pesquisa, obteve-se para a constante C o valor de 1,1738, o que conclui o processo de obtenção da EPG. Evidentemente, tal valor poderia ser diferente, mesmo utilizando-se esta mesma metodologia, caso as simulações fossem feitas com uma malha de EF mais refinada, por exemplo. Os valores das constantes C , a_i e b_i na Eq. (4) são retirados das funções ajustadas aos dados das simulações numéricas.

Além dos procedimentos de validação do modelo em EF, três tipos diferentes de testes foram feitos com a EPG, isto é, com dados experimentais, com os resultados analíticos de Stoughton e com simulações numéricas diferentes daquelas utilizadas na obtenção das equações componentes. Maiores detalhes sobre os parâmetros empregados nos testes, consultar Nine (1978) e Guo (2000). Estes mesmos casos foram avaliados com a EPG aqui desenvolvida.

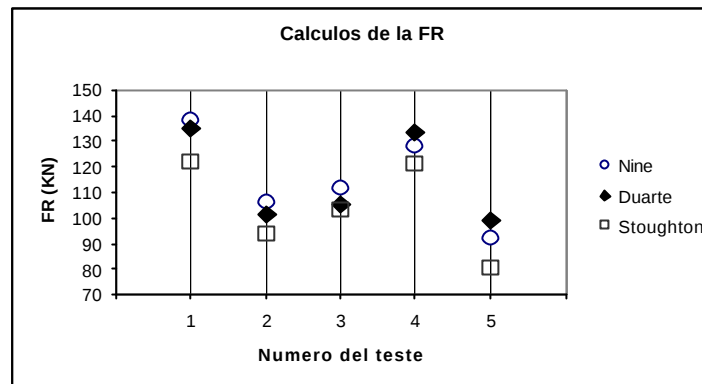


Figura 7: Testes com os resultados experimentais de Nine (1978) e com os analíticos de Stoughton (1988), disponíveis em Guo et al. (2000).

É possível se verificar que os cálculos feitos com a EPG são muito precisos quando comparados com os resultados analíticos e experimentais. Pôde-se confirmar ainda que o erro médio é de cerca de 5%, para os casos aqui investigados e o erro máximo em torno de 7%. Estes resultados podem ser visualizados na Figura 7. As previsões feitas com a EPG foram também comparadas aos resultados obtidos de simulações 2D em EF e o erro médio foi de 6%. Em todos os casos simulados, o erro máximo foi de 10%.

5. CONCLUSÕES

Dois modelos em EF foram projetados para simular o processo de estampagem de uma chapa metálica que passa por um freio de estampagem, considerando-se a contribuição de oito grupos adimensionais no cálculo da FR. Para cada caso, uma equação é calibrada e utilizada como equação componente na metodologia proposta, isto é, o uso da similitude em engenharia, aplicada a dados obtidos através de simulações numéricas em EF com a finalidade de se obter uma equação fechada para se estimar a FR.

Estimativas como a Equação de Predição Geral (EPG) foram testadas com resultados experimentais, analíticos e numéricos e o erro médio esteve próximo de 6%, o que posiciona esta metodologia em um âmbito dentro do qual se pode considerar que os resultados têm uma boa precisão para a natureza e complexidade do tema. Por este motivo, este estudo foi aceito como uma contribuição ao STAMPACK[®], um programa comercial de solução explícita para a simulação de estampagem de chapas metálicas.

Uma programação em FORTRAN[®] 90 também se fez para a metodologia aqui estabelecida na determinação da EPG e implementada no referido código comercial. Isso permitiria a obtenção de uma EPG, teoricamente, com melhores resultados no futuro, já que se podem realizar simulações com custos computacionais mais elevados para a obtenção de uma EPG com melhores resultados ainda.

Esta metodologia ainda permitiria a obtenção da equação de predição da FR para freios com outras geometrias da seção transversal do freio, o que já se está investigando.

6. AGRADECIMENTOS

Como aluno de doutorado, um dos autores, Écio Naves Duarte, deseja expressar seu reconhecimento ao suporte do Ministério de Educação do Brasil – CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior – da UNIMINAS – União Educacional Minas Geras S/C. Os autores também agradecem à Quantech ATZ pelo apoio nestas investigações e à rede de aulas CIMNE – Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia da Universidade Politécnica de Catalunha, ao Instituto Fábrica do Milênio - IFM e à Universidade Federal de Uberlândia.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carleer, B.D.; P.T. Vreede, P. Drent, M.F.M. Louwes and J. Huetink. (1995) Modeling Drawbeads with Finite Elements and Verification, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 45, pp. 63-68.
- H Guo, Y.Q., Batoz, J.L., Naceur, H., Bouabdallah, S., Mercier, F., Barlet, O. (2000) Recent Developments on the Analysis and Optimum Design of Sheet Metal Forming Parts Using a Simplified Inverse Approach, *J. Computers and Structures*, 78, 133-148.
- Levy, B.S. (1983) Development of a Predictive Model for Draw Bead Restraining Force Utilizing Work of Nine and Wang, *J. Applied Metalworking*, 3(1), pp. 38-44.
- Murphy, G. (1950) *Similitude in Engineering*, The Ronald Press Co., N.Y., USA, pp.17-47.
- NAFEMS (1992) *Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*, 1st ed., E. Hinton, East Kilbride, Glasgow.
- Nine, H. D. (1978) Drawbead Forces in Sheet Metal Forming, in: D. P. Koistinen, N. M. Wang (Eds.). *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Plenum Press, N. York, pp.179-211.
- STAMPACK® (2003) *Theory Manual*, v. 54. Quantech ATZ S.A. Barcelona, Spain.
- Stoughton, T. B. (1988) *Model of Drawbead Forces in Sheet Metal Forming*, Proc. 15th Biennial Congress of IDDRG, May 18-21, Dearborn, MI, pp. 205-215.
- Swift, M. A. (1948), *Engineering*, 166, 333.

A SIMILITUDE BASED APPROACH ON THE ESTIMATING OF THE DRAWBEAD RESTRAINING FORCE IN SHEET METAL FORMING

Duarte, E. N.

Universidade Federal de Uberlândia
endumarte@mecanica.ufu.br

Oliveira, S. A. G.

Universidade Federal de Uberlândia
sgoulart@mecanica.ufu.br

Neamtu, L.

Quantech ATZ – Gran Capitán 2-4 – Barcelona, España
laur@quantech.es

Weyler, R.

Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona, Espanha
rafael.weyler@upc

Abstract: *In order to achieve a better part quality in sheet metal forming, the rate of the material flow into the die cavity must be efficiently controlled. This control is obtained using a restraining force supplied either by the blankholder, the drawbeads or both. When the restraining force required is too high, the use of drawbeads is necessary, although excessive deformations may be produced. Some others disadvantages, such as difficulties of adjustment during die try-outs in order to determine the actual Drawbead Restraining Force (DBRF), may also be noted. To solve these problems and to reduce the number of die try-outs, which are very time consuming, sufficiently accurate drawbeads concepts are necessary. In the interest of understanding the influence of the most important parameters on the DBRF and to establish a pre-estimate DBRF theory, the present study will make use of a method that has been developed using similitude. The data bases were achieved by Finite Element (FE) simulations done with an explicit code. The results are compared with experimental databases of Nine (1978) and with the analytical model of Stoughton (1988). The average of absolute error with respect to experimental data bases was about 6 % and, for the cases studied, the maximum discrepancy was found to be less than 11%. Predictions derived from this approach are adequate, in terms of precision, when compared with analytical and experimental results. For this reason, the approach was accepted as a contribution by STAMPACK[®], an explicit finite element code used to simulate the forming process.*

Keywords: Drawbead, restraining force, finite element method, sheet metal forming.