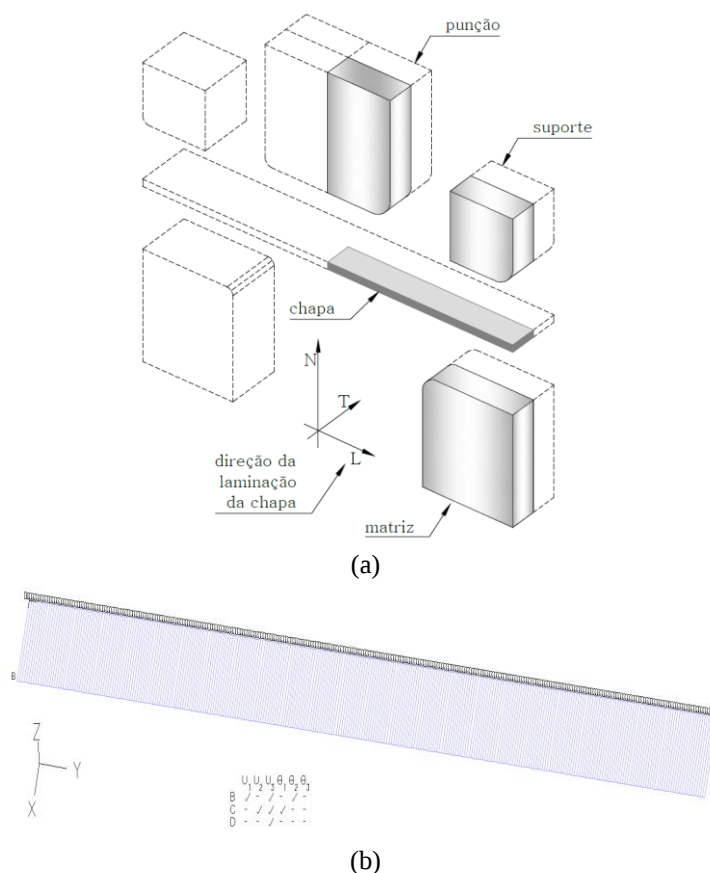


Figura 1. Formulação geral da mecânica das estruturas

Esse trabalho apresenta um conjunto de resultados de análises numéricas via método dos elementos finitos para trazer uma descrição da sensibilidade do efeito do retorno elástico frente à variação dos principais parâmetros do próprio processo de conformação de chapa em latão 70/30, a discussão sobre a sensibilidade do efeito do retorno elástico em relação aos parâmetros da modelagem não é tratada nesse trabalho.

2. METODOLOGIA

Esse trabalho conta com a criação do modelo computacional para análise a numérica de um canal curto com chapa em latão 70/30, cuja geometria e as condições de atrito estão indicadas na Fig. 2a e na Fig. 2c. O hardware utilizado para o conjunto das análises conta com um processador i7 3.3GHz, 8GB de memória RAM e sistema operacional de 64 bits, sendo que o tempo médio de processamento foi da ordem de 45 minutos, chegando em alguns casos a 90 minutos.



Dados gerais

Chapa a ser conformada:
Dimensões: (L)350mm x (T)35mm e
Espessura: (N)0,74mm.
Matriz:
Raio de arredondamento das faces: 5mm.

Punção:
Largura (na direção L): 50mm;
Curso total (na direção N): 70mm e
Raio de arredondamento das faces: 5mm.

Folga matriz/punção: 1mm de cada lado da chapa.
(Sempre mantida inclusive no modelo com variação de espessura da chapa em latão).

Coefficiente de atrito: μ
Interface chapa e matriz: $\mu = 0,13$
Interface chapa e punção: $\mu = 0,13$
Interface chapa e suportes: $\mu = 0,13$

Aplicação do carregamento constante: 100mm/s.

Em todas as interfaces, inclusive entre a chapa e o suporte, foram incluídas condições de contato para impedir os movimentos de corpo rígido.

Figura 2. Modelo base: (a) 1/4 da geometria modelada, (b) Condições de contorno consideradas com “√” para movimento livre e “-” para movimento impedido.

A seguir estão as propriedades mecânicas do material que constitui a chapa extraído de Dhaiban, et al., 2014:

• Descrição do material utilizado:

θ	E(GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	r
0°	103,3	143,2	545,5	0,91
45°	101,6	138,7	551,2	1,09
90°	100,9	136,3	550,1	0,87
Valor médio	101,9	139,4	548,9	0,99

- Módulo de elasticidade longitudinal:
- $E_L = E_N = 103,3 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$;
- $E_T = 100,9 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$;
- Coeficiente de Poisson: $\mu_L = \mu_T = \mu_N = 0,35$
- Módulo de elasticidade transversal:
- $G_{LT} = G_{LN} = 38,3 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$; $G_{TN} = 37,4 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$;
- Coeficientes de Lankford: $r_0 = 0,91$; $r_{45} = 1,09$; $r_{90} = 0,87$
- Relação Tensão-Deformação no escoamento: $\sigma = 679 \epsilon_p^{0,41}$

Tabela 1. Propriedades mecânicas da chapa em latão 70/30

Em que θ é o ângulo entre a direção da laminação e a direção da extração do corpo de prova. Matriz, suportes e punção em material com rigidez muito superior a da chapa.

- **Principais características do modelo de referência para a análise pelo método dos elementos finitos:**
 - Elemento de casca com 4 nós;
 - Três pontos de integração ao longo da espessura;
 - Análise com integração implícita no tempo;
 - Critério de escoamento Hill-1948;
 - Algoritmo de contato alvo rígido (*Rigid Target*), trata-se uma simplificação do método da penalidade aplicável em conformação;
 - Grandes deslocamentos e grandes deformações plásticas com formulação ULJ (updated lagrangian Jaumann) e
 - Carregamento aplicado com deslocamento.

3. RESULTADOS

Esse trabalho considera como retorno elástico o giro da aba livre, cujo comprimento do trecho final reto é aproximadamente 84,3mm. Foi produzida inicialmente uma análise da convergência do retorno elástico com o refinamento h da malha para a definição de um modelo de referência, a Fig. 3a mostra a configuração deformada de acordo com o número de elementos da malha e a Fig. 3b resume essa análise e indica que o retorno elástico inicia sua estabilização e tende de forma assintótica para o valor de $\sim 25^\circ$, definindo assim o modelo de referência com 300 elementos na direção L. Embora o problema em questão seja absolutamente não linear, uma sequência de variação de cada parâmetro isoladamente oferece uma tendência capaz de auxiliar no projeto do processo.

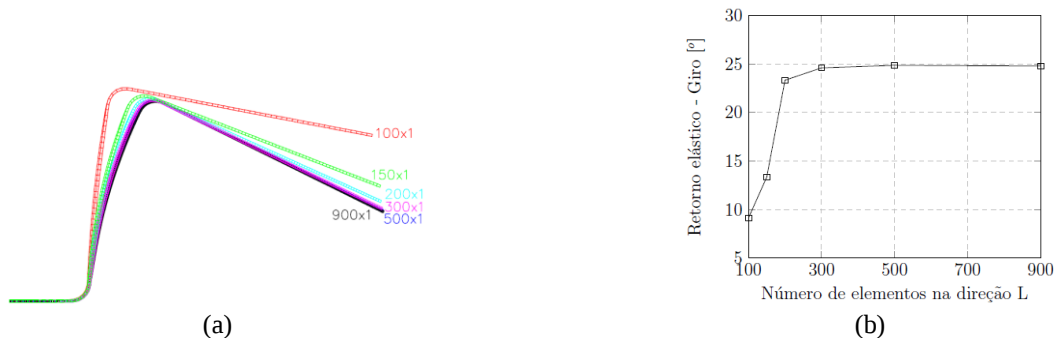


Figura 3. Análise da convergência: (a) Configurações deformadas e (b) Evolução do retorno elástico.

Definido o modelo de referência se introduziu a variação do coeficiente de atrito entre todas as interfaces, não foi considerada nesse trabalho a interferência da temperatura desenvolvida no processo, fator que pode se tornar importante. A Fig. 4a mostra as configurações deformadas finais e a Fig. 4b mostra a evolução. Já a Fig. 5a mostra a força de conformação desenvolvida ao longo do processo de conformação do modelo de referência e a Fig. 5b mostra a evolução da força máxima de conformação em função do coeficiente de atrito mantido entre todas as interfaces.

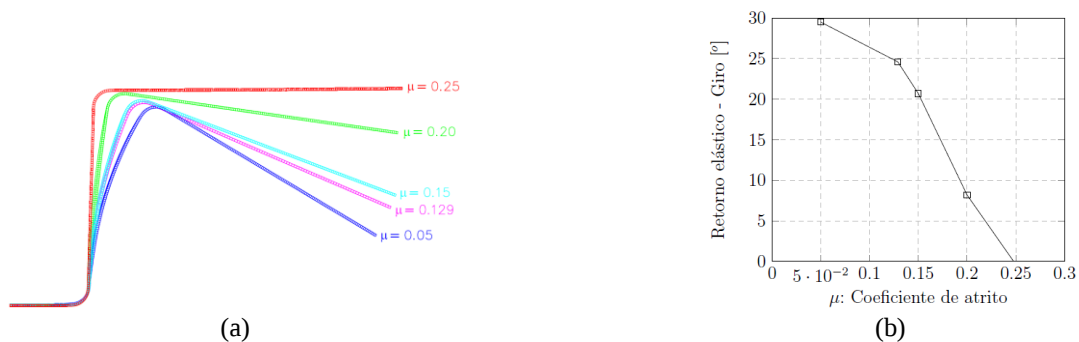


Figura 4. Sensibilidade ao coeficiente de atrito: a) Configuração deformada e b) Evolução do retorno elástico

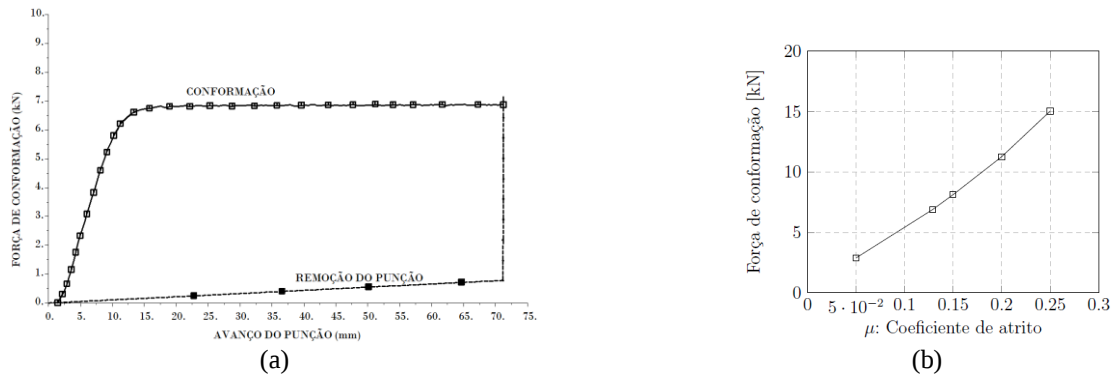


Figura 5. Força de conformação: a) Evolução da força no modelo de referência e b) Relação: força de conformação x coeficiente de atrito

O raio de arredondamento das arestas do punção foi variado e sua influência no retorno elástico está indicada na Fig. 6a e na Fig. 6b em que se percebe relativamente pouca sensibilidade em relação à variação deste parâmetro.

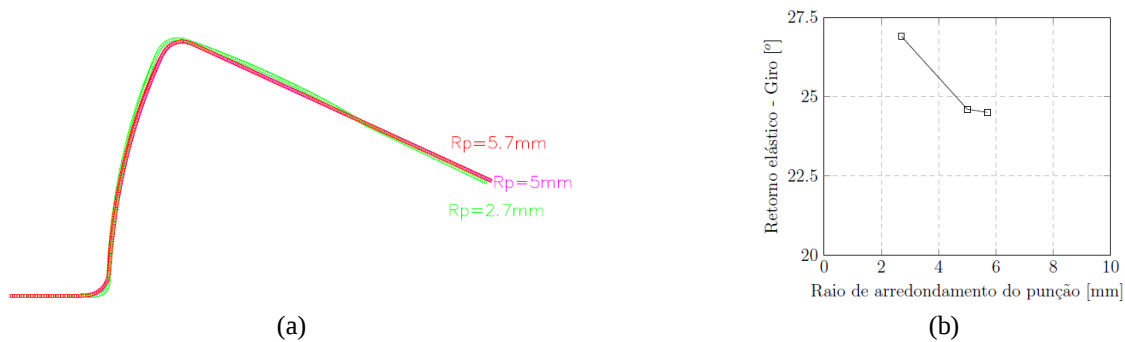


Figura 6. Sensibilidade ao raio de arredondamento das arestas do punção: a) Configuração deformada e b) Evolução do retorno elástico

Na sequência se introduziu a variação do raio de arredondamento das arestas e uma sensibilidade significativa pode ser notada na Fig. 7a e na Fig. 7b com a variação deste parâmetro.

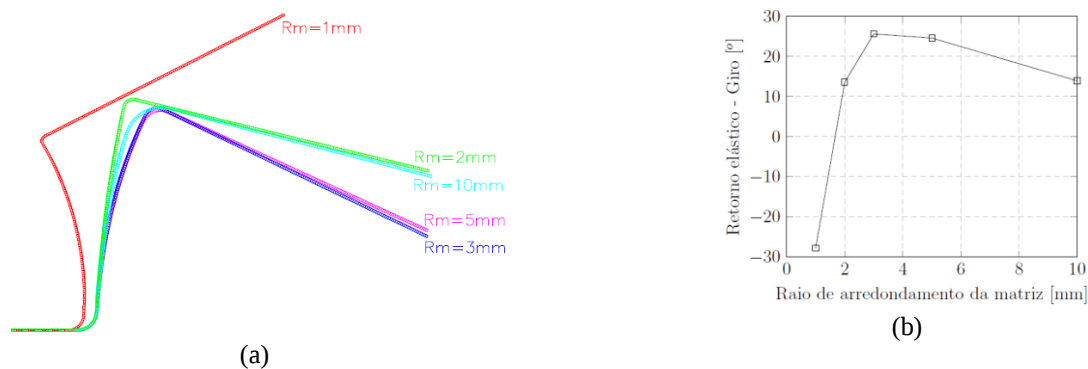


Figura 7. Sensibilidade ao raio de arredondamento das arestas da matriz: a) Configuração deformada e b) Evolução do retorno elástico

Finalmente se introduziu a variação da espessura da chapa conformada, como indicado na Fig. 2 as folgas no ferramental foram mantidas, e a sensibilidade do retorno elástico à variação deste parâmetro está indicada na Fig. 8a e na Fig. 8b, embora com o aumento da espessura da chapa haja uma redução do retorno elástico, trata-se um parâmetro fortemente associado ao custo total do produto.

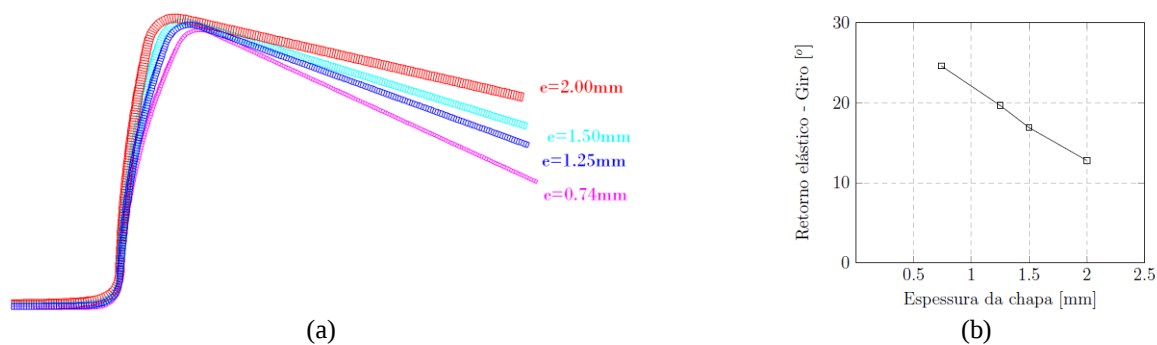


Figura 8. Sensibilidade à espessura da chapa: a) Configuração deformada e b) Evolução do retorno elástico

Com base na variação do coeficiente de atrito, do raio de arredondamento das arestas do punção e do raio de arredondamento das arestas da matriz no modelo em questão, é possível se perceber certa tendência com a possibilidade a definição por inspeção rápida dos valores para esses parâmetros de modo a minimizar o retorno elástico no processo de conformação praticamente sem alteração do custo. Observando-se os gráficos de evolução do retorno elástico com a variação isolada de cada um dos parâmetros pode-se perceber que com a manutenção de um coeficiente de atrito $\mu=0,15$, raio de arredondamento das arestas do punção $R_p=4\text{mm}$ e raio de arredondamento da $R=1.85\text{mm}$ se produz uma condição que diminui consideravelmente o retorno elástico sem custo adicional, como representado na Fig. 9.

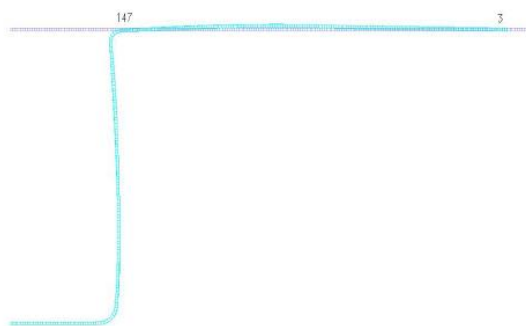


Figura 9. Modelo com retorno elástico minimizado

3. CONCLUSÕES

A obtenção do modelo com retorno elástico minimizado indicado na Fig.9 se deu por inspeção rápida e organização dos modelos com variação isolada dos parâmetros, o que indica certo desacoplamento entre a interferência dos parâmetros analisados na sensibilidade ao efeito do retorno elástico, embora se trate de um problema altamente não linear. A definição das faixas de variação dos parâmetros está diretamente ligada à especificidade do produto final desejado, nesse trabalho a escolha das faixas de variação dos parâmetros foi bem abrangente, baseada em condições de projetos reais usuais, entretanto sem nenhuma consideração da técnica *Design of Experiments* (DoF).

O modelo analisado refletiu bem a noção geral da influência de alguns parâmetros de conformação no retorno elástico: diminuição do retorno elástico com o aumento da espessura da chapa conformada e com o aumento do coeficiente de atrito. A variação do raio de arredondamento das arestas do punção mostrou pouca interferência no retorno elástico do modelo, entretanto a variação do raio de arredondamento das arestas da matriz se mostrou bastante significativa na variação do retorno elástico.

O procedimento descrito permite a visualização da sensibilidade do retorno elástico em relação à variação de alguns parâmetros do processo de conformação, de modo que se torna mais simples o estabelecimento de uma linha de busca para a minimização do retorno elástico. A eliminação total do procedimento usual da tentativa e erro é praticamente impossível em se tratando da previsão precisa do retorno elástico nos processos de conformação de chapas metálicas, entretanto pode ser minimizado, pois com esse trabalho se percebe que alguns ajustes na geometria dos dispositivos podem ser propostos com base na criação e comparação de diversos modelos numéricos, cujo custo e tempo de produção e processamento são muito menores que as respectivas versões físicas. O melhor projeto de processo se dará com uma combinação entre incorporação de resultados das simulações numéricas e informações incorporadas obtidas de modelos físicos.

3. AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento ao departamento de pesquisa e desenvolvimento da Termomecanica São Paulo SA, bem como à Fundação Salvador Arena pela realização de alguns ensaios para o desenvolvimento desse trabalho.

4. REFERÊNCIAS

Banabic, D., 2010. Sheet Metal Forming Processes: Constitutive modelling and numerical simulation, Springer-Verlag. New York.

Bathe, K. J., 2014. *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 2ª edição.

Dhaiban, A. D., Soliman M.-E S. e El-Sebaie, M. G., 2014. Finite element modeling and experimental results of brass ellipticcups using a new deep drawing process through conical dies, *Journal of Materials Processing Tech.*, vol 214, páginas 828-838.

Groover, M. P., 2017. *Fundamentos da Moderna Manufatura*, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Rio de Janeiro, 5ª edição.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INFLUENCE OF THE METAL FORMING PARAMETERS ON THE SPRINGBACK OF SHEET IN BRASS 70/30 BY NUMERIC ANALYSIS

Edson Bispo Ferreira

Givanildo Alves do Santos

Federal Institute of Sao Paulo (IFSP), Rua Pedro Vicente, 625 , Sao Paulo 01109-010, Brazil
bispo@ifsp.edu.br givanildo@ifsp.edu.br

Márcio Rodrigues da Silva

Educational Center of Salvador Arena Foundation, Estr. dos Alvarengas, 4001, Sao Bernardo do Campo – 09850-550, Brazil
marcio.rodrigues@termomecanica.com.br

Vinicius Torres dos Santos

Educational Center of Salvador Arena Foundation, Estr. dos Alvarengas, 4001, Sao Bernardo do Campo – 09850-550, Brazil
vinicius.santos@termomecanica.com.br

Abstract. *The aim of this work is to present a systematic procedure to assist to minimize the springback in metal sheet forming process design. Springback is the counter movement, wich a part of the forming element shows when the forming devices are removed. It is associated to elastic energy of the system. In this work are presented the results of numerical simulations of the springback of a model with a brass 70/30 sheet highlighting the sensitivity of springback to the forming parameters like friction coefficient, radii of rounding of tools edges and sheet thickness. The numerical simulation developed in this work used an educational version of the commercial computational tool: Adina®.*

Keywords: *Cold sheet metal forming process. Springback. Finite Element Method.*