

## Ensaio

# Simulação numérica prevê comportamento do aço na estampagem de micropeças

A tendência crescente à miniaturização de produtos em setores como o eletroeletrônico, biomédico e automobilístico tem levado ao desenvolvimento de processos que permitem fabricar peças em tamanhos bastante reduzidos. A miniaturização de peças é um desafio para a indústria, uma vez que esse tipo de componente requer um tratamento diferenciado. Neste trabalho, a simulação numérica computadorizada foi empregada para prever o comportamento de dois tipos de aço na conformação de micropeças. A comparação dos resultados da simulação com os obtidos em ensaios práticos confirmou a eficácia da análise numérica computadorizada para prever defeitos na peça durante a conformação e para auxiliar no projeto das ferramentas.

*U. Boff e L. Schaeffer*

**A** miniaturização de peças surgiu em meio à grande competição existente na indústria e ao surgimento de novas tecnologias, impulsionada por uma tendência crescente à fabricação de produtos portáteis.

A concepção de produtos micro tem de levar em conta as limitações e potenciais relacionados às novas tecnologias de

produção. Por um lado, a miniaturização constitui uma limitação para a aplicação da maioria das tecnologias de fabricação; por outro, abre possibilidades para o emprego de novas tecnologias. A quantidade e a diversidade de tecnologias usadas para produzir micropeças e microcomponentes são enormes.

Processos de conformação mecânica são os que conseguem

produzir a maior quantidade de peças, em um menor tempo e com o menor custo, além de possibilitar um controle mais acurado dos parâmetros do processo. O entendimento de como os materiais irão se comportar na conformação de micropeças é de extrema importância. Durante a miniaturização de peças, nem todos os parâmetros podem ser alterados, como é o caso do atrito, que aumenta com a diminuição do porte do processo. Isso impede o fluxo

de material e, conseqüentemente, reduz a relação de estampagem<sup>(7, 8, 4)</sup>.

Outro aspecto está relacionado ao desenvolvimento de ferramentas e máquinas de alta precisão que sejam adequadas à produção de peças miniaturizadas<sup>(3)</sup>. Além disso, também estão relacionados com a miniaturização de peças o tamanho de grão<sup>(6)</sup> e o enrugamento do material. O enrugamento ocorre pelo simples fato de que a área de contato entre o blaque e o prensa-chapas é muito pequena, o que faz com que a força, que tem grande importância para um processo convencional, se torne insignificante quando a peça é miniaturizada<sup>(1)</sup>.

A simulação numérica torna-se um importante instrumento para avaliar os efeitos dessa técnica, uma vez que os resultados obtidos na simulação, quando

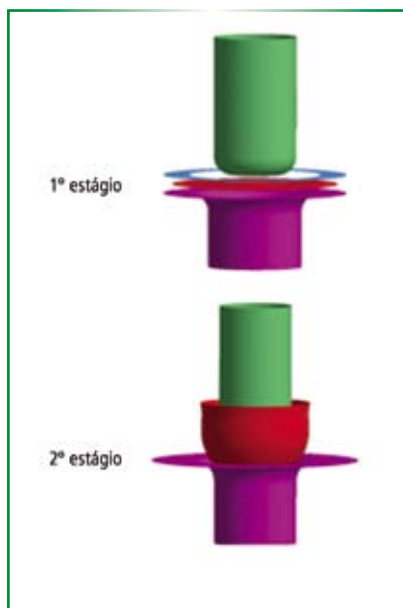


Fig. 1 – Representação esquemática da montagem no Dynaform para uma simulação em dois estágios para o aço inoxidável 304 e aço 1010

Tab. 1 – Propriedades usadas para definir o material da geratriz no Dynaform

Propriedades do material	Inox 304	ABNT 1010
Densidade	7,85 g/cm <sup>3</sup>	7,83 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Young	207.000 N/mm <sup>2</sup>	207.000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0,28	0,28
Índice de encruamento ( <i>n</i> )	0,50	0,185
Constante do material (C)	1.426	726
Índice de anisotropia	1	1,38
Tensão de escoamento	300 N/mm <sup>2</sup>	272 N/mm <sup>2</sup>

bem tratados, mostram uma realidade muito próxima à obtida em processos experimentais. Este trabalho procurou analisar o comportamento da simulação numérica durante o processo de estampagem de um copo miniaturizado e compará-lo aos resultados obtidos em experimentos práticos.

## Metodologia

A simulação numérica fornece um meio para estudar em detalhes problemas complexos que conduzem a uma melhor compreensão e, eventualmente, à otimização do processo. Métodos numéricos podem ser aplicados de diversas maneiras, permitindo comparar resultados obtidos experimentalmente com resultados

obtidos pela simulação, alcançando um nível mais alto de precisão nos parâmetros de identificação. Dessa forma, uma síntese entre experimentos e simulação busca atingir um maior conhecimento entre os materiais e processos.

Para as análises com simulação numérica empregadas no presente estudo, foi usado o *software* de simulação em estampagem Dynaform versão 5.6, com o *solver* LS-Dyna versão 971, desenvolvidos pela empresa norte-americana ETA (Engineering Technology Associates, Inc.). O Dynaform combina as análises do LS-Dyna versão 971 com as funções pré e pós-processador do próprio Dynaform.

Os materiais empregados na simulação foram chapas de aço-carbono 1010 e aço inoxidável 304, ambas com espessura de 0,4 mm. As propriedades aplicadas a esses materiais, usadas como dados de entrada no Dynaform, estão descritas na tabela 1.

Utilizou-se como critério de falha a curva-limite de conformação (CLC) criada pelo Dynaform pelo encruamento do material “*n*”, e pela espessura inicial da

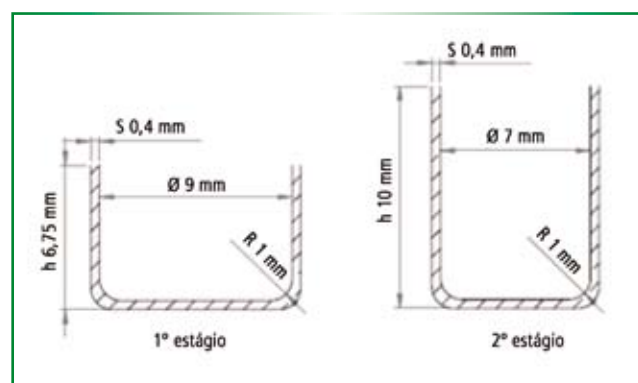


Fig. 2 – Vista em corte do copo a ser obtido em dois estágios pelo processo de estampagem

## Ensaio

Tab. 2 – Parâmetros geométricos para estampagem do copo em dois estágios

Primeiro estágio	
Diâmetro da geratriz $D$ (mm)	18,0
Diâmetro do copo $d_1$ (mm)	9,0
Altura do copo $h_1$ (mm)	6,75
Relação de estampagem $\beta$	1,98
Segundo estágio	
Diâmetro do copo $d_2$ (mm)	7,0
Altura do copo $h_2$ (mm)	10,0
Relação de estampagem $\beta$	1,3

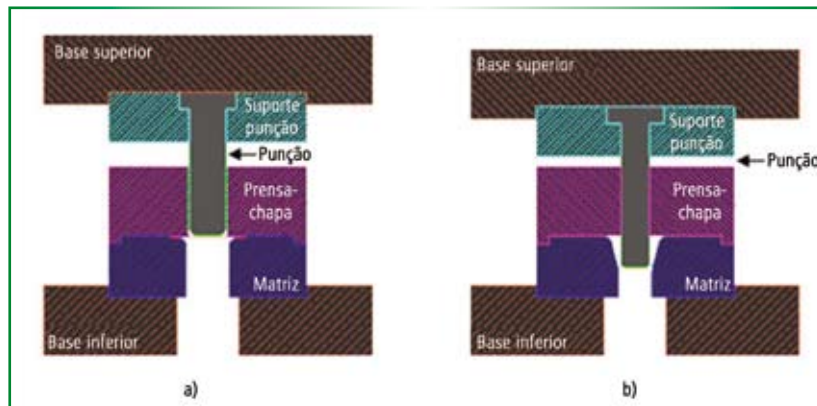


Fig. 3 – Desenho em corte das ferramentas utilizadas para estampagem do copo: a) conjunto de ferramentas para o primeiro estágio; b) conjunto de ferramentas para o segundo estágio.

geratriz. Essa forma de criação da CLC foi concebida por Keeler por meio de uma relação empírica. A CLC criada por esse método é bastante próxima da maioria das CLCs medidas por meio de ensaios.

Alguns parâmetros foram definidos para realizar as simulações: o raio de curvatura (filete) de todas as matrizes foi de 2 mm; a matriz, o punção e o prensa-chapas foram modelados como corpos rígidos; o coeficiente de atrito entre as ferramentas e o blanque foi de

0,05. Para modelagem do blanque foram usados elementos finitos de casca com malha de 0,5 mm.

A figura 1 (pág. 27) mostra uma representação esquemática das ferramentas montadas no Dynaform para uma simulação em dois estágios para o aço *inox* 304 e o aço 1010.

Para os experimentos práticos, as ferramentas de estampagem do copo foram projetadas e construídas com base nos re-

sultados obtidos pelo método de simulação empregado, porque a simulação numérica, além de prever os defeitos que podem ocorrer na peça, também possibilita otimizar as ferramentas para a obtenção da geometria final do componente. A figura 2 (pág. 27) ilustra uma vista em corte do copo a ser obtido em dois estágios. A tabela 2 apresenta os parâmetros geométricos para estampagem do copo em dois estágios.

act.cut2d - act.cut3d - act.tubes - act.weld - act.unfold - act.bend

A gama de software CAD/CAM para corte 2D/3D e tubos

| Corte 2D | Corte 3D | Corte de tubos | Solda robotizada | Dobra/Planificação |

Programame a excelência

**alma**

Alma do Brasil - Porto Alegre / RS

Fone: (51) 3023 2717 • www.almacam.com.br

As ferramentas utilizadas no processo de estampagem do copo são compostas por duas bases – superior e inferior –, matriz, punção, prensa-chapas e suporte do punção. Uma representação em corte dessas ferramentas pode ser vista na figura 3 (pág. 28). A ferramenta construída é completamente independente da prensa, não necessitando ser fixada por meio de espigas ou grampos. Sendo assim, a prensa age somente fornecendo a força para o processo de estampagem, diminuindo a possibilidade de desalinhamentos entre punção e matriz.

O equipamento utilizado para o processo de estampagem foi uma



Fig. 4 – Equipamento utilizado para estampagem do copo

prensa hidráulica com capacidade de 294 kN. A figura 4 mostra a máquina, junto com a ferramenta de estampagem. A escolha por este equipamento deve-se ao fato de que a força exigida para estampar o copo é relativamente baixa; além disso, ele permite que se tenha um maior controle do processo.

Os lubrificantes utilizados para os ensaios práticos são de uso comercial e de base mineral. A metodologia de aplicação do lubrificante consistiu em passar o produto em ambos os lados da chapa a ser estampada. Como a quantidade de lubrificante espalhada na chapa foi excessiva, este se espalhou para o punção e as ferramentas, não necessitando assim lubrificá-las.

## Resultados e discussões

### Resultados da simulação numérica para o processo de estampagem do copo

Neste estudo foram desenvolvidos modelos utilizando, para

Comprovado

Robusto

Confiável

Flexível

Rápido



## Sistemas de Automação Servo Motorizados

### Sistemas Transfer

Destacker de blanks

Empilhamento de peças e blanks

Automação entre prensas

Alimentação e saída de peças

Soluções em automação e tooling

Projectos Turn-Key



Vendas@ebglobal.com.br  
11 2759 1544 / 9700 8033  
www.ebglobal.com.br

[www.lineartransfer.com](http://www.lineartransfer.com)

## Ensaio

uma mesma geometria, o aço 1010 e o aço *inox* 304. O objetivo foi avaliar o comportamento da simulação numérica durante o processo de miniaturização de um copo pelo processo de estampagem, possibilitando também o dimensionamento de forma otimizada do conjunto de ferramentas utilizado nos experimentos práticos para a estampagem do copo.

As simulações foram realizadas de forma a obter o copo em dois estágios. A figura 5 mostra os resultados obtidos por simulação numérica para o aço 1010.

Os resultados da simulação mostraram que, para o aço 1010, há regiões na borda do copo em que ocorrerá enrugamento severo. Esse enrugamento leva ao amassamento e ao surgimento de trincas na lateral do copo durante o segundo estágio, inviabilizando a utilização desse material em um processo em dois estágios, quando miniaturizado. Isso ocorre porque a força necessária para um processo em que a peça é miniaturizada torna-se insignificante em comparação com um processo convencional, devido à diferença de pressão na área de contato, ou seja, em um processo de miniaturização, a área de contato entre o blanque e o prensa-chapas é muito pequena, levando, assim, ao enrugamento do copo.

A figura 6 mostra os resultados obtidos pela simulação numérica para o aço *inox* 304. Para o aço *inox*, o enrugamento não foi tão severo quando comparado ao

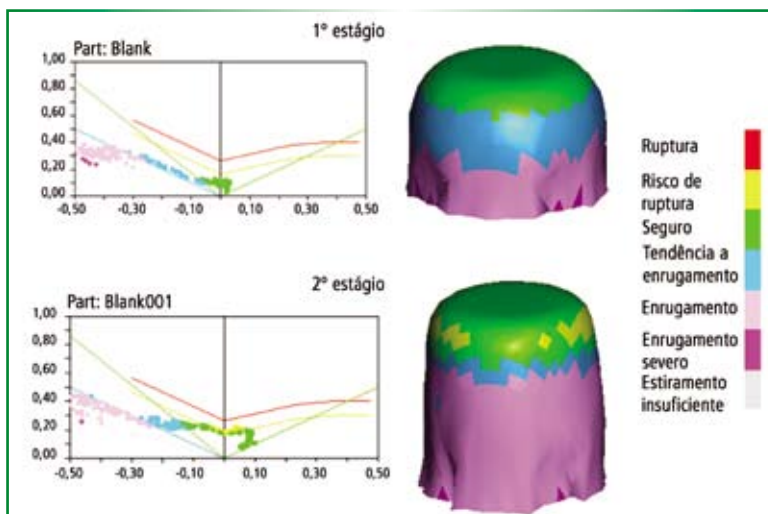


Fig. 5 – Resultados da simulação numérica para a estampagem do copo em dois estágios para o aço 1010

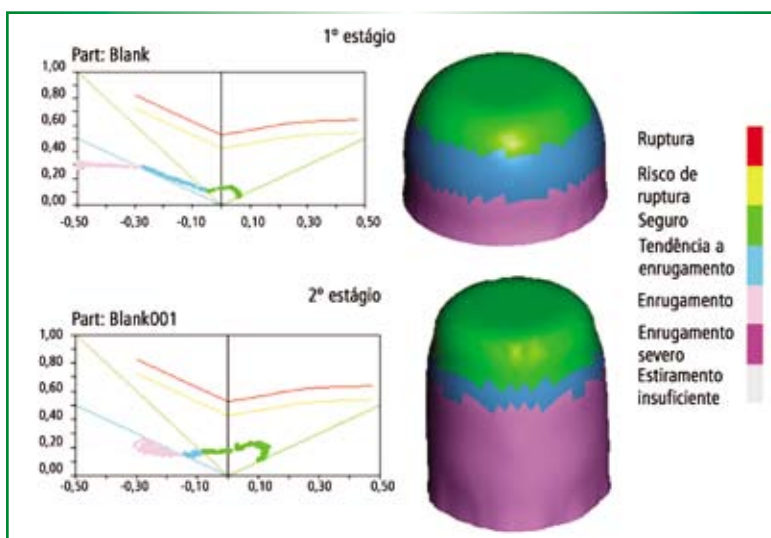


Fig. 6 – Resultados da simulação numérica para a estampagem do copo em dois estágios para o aço *inox* 304

do aço 1010. Isso pode ter ocorrido devido às características de estampabilidade do material, que o levam a apresentar um

melhor comportamento durante o processo de miniaturização em dois estágios.

### Estampagem do copo

Primeiramente foram retirados os blanques a partir de uma ferramenta de corte por cisalhamento representada na figura 7a. Posteriormente ao corte, foram embutidas cinco peças em aço 1010 e outras cinco em aço *inox* 304, por meio de um conjunto de ferramentas construído especificamente para este

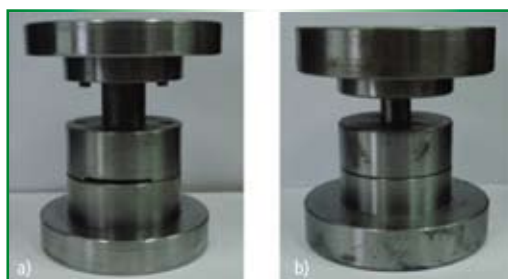


Fig. 7 – Ferramentas utilizadas para o processo de estampagem do copo: a) ferramenta de corte do blanque; b) ferramenta de estampagem do copo.

## Ensaio

processo, o qual pode ser visto na figura 7b.

O processo de estampagem ocorreu da seguinte forma: na primeira etapa, com o uso da ferramenta do primeiro estágio, foram estampadas as cinco peças de cada material. Em seguida fez-se o segundo estágio, a partir das peças do primeiro estágio. O resultado do processo de estampagem para o primeiro e o segundo estágios do aço 1010 pode ser visto na figura 8; para o aço *inox* 304, o resultado é mostrado na figura 9. Em ambos os casos, o prensa-chapas serviu apenas para alinhamento do conjunto, não sendo exercida nenhuma força sobre ele.

Os resultados obtidos nos ensaios mostraram algumas particularidades do processo quando miniaturizado, o que já havia sido previsto na simulação numérica. Foi mostrado que ocorreria enrugamento tanto no primeiro quanto no segundo

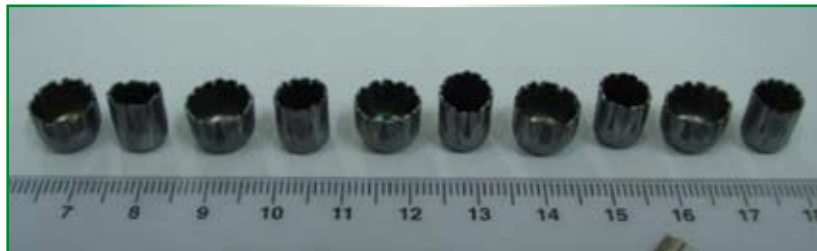


Fig. 8 – Estampagem do copo em dois estágios para o aço 1010



Fig. 9 – Estampagem do copo em dois estágios para o aço *inox* 304

estágio, e que o aço 1010 apresentaria um comportamento pior que o do aço *inox* 304.

### Conclusões

A simulação numérica pelo *software* LS-Dyna apresentou uma boa concordância com os

resultados obtidos nos ensaios práticos, prevendo os defeitos que ocorreriam ao longo do processo, como o enrugamento das peças durante os dois estágios. Além de prever os defeitos, a simulação numérica possibilitou o dimensionamento das ferramentas de forma



### ESPECIALIZADA EM EQUIPAMENTOS PARA CONFORMAÇÃO DE METAIS

Linhas de corte longitudinal (slitters)  
Linhas de corte transversal (cut-to-length)  
Guilhotinas equipamentos especiais sob consulta  
Prensas hidráulicas até 50.000 kN | Prensas de ajuste de  
moldes | Prensas excêntricas até 20.000 kN | Dobradeiras



Tel.: 11 2362 8883  
contato@vollmac.com.br

otimizada. Isso mostra que a simulação é uma grande aliada em processos em que a peça é miniaturizada.

Assim como na simulação, os ensaios de estampagem do copo também mostraram algumas particularidades do processo quando miniaturizado, como é o caso do enrugamento, que ocorre porque a área de atuação do prensa-chapas é muito pequena.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento das bolsas, à Escola de Engenharia da UFRGS e ao Laboratório

de Transformação Mecânica (LdTM) pelo uso de sua infraestrutura.

### Referências

- 1) BASTI, A.; KHORASANI, A.; NATEGHI, A. R. Analysis and Comparison of Micro Scale and Bulk Scale Deep Drawing Process. In: *10<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity – ICTP 2011*. Aachen, 2011.
- 2) BATALHA, G. F.; CERVEIRA, R. L. L. P.; SILVA, F. R. D. A. Simulação de processo de microfabricação: influência do efeito de escala. In: *3<sup>o</sup> COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. Joinville-SC, 2005. *Anais do 3<sup>o</sup> COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*; v. 3. Joinville-SC : ABCM-IST-UDESC-UFSC, 2005; p.1-10.
- 3) GEIGER, M.; KLEINER, M.; ECKSTEIN, R.; TIESLER, N.; ENGEL, U. Microforming. *Ann. CIRP*, 50/2/2001, p. 445-462.
- 4) HU, Z.; SCHULZE NIEHOFF, H.; VOLLERTSEN, F. Determination of the friction coefficient in deep drawing, process scaling. In: Vollerstsen, F.; Hollmann, F. (eds). *Proceedings of the 1st colloquium of DFG priority program process scaling*. BIAS-Verlag ISBN 3-933762-14-6. Bremen, 2003; p. 27-34.
- 5) *LS-Dyna Theory manual*. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- 6) VOLLERTSEN, F.; HU, Z.; SCHULZE NIEHOFF, H.; THEILER, C. State of the art in micro forming and investigations in micro deep drawing. *Journal of Material Processing Technology*, 151, 2004; p.70-79.
- 7) VOLLERTSEN, F.; HU, Z. Tribological Size effects in Sheet metal Forming Measured by a Strip Drawing Test. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 55, n. 1, 2006; p.291-294.
- 8) VOLLERTSEN, F.; HU, Z. On the Drawing Limit in Micro Deep Drawing. *Journal for Technology of Plasticity*, v. 32, n. 1-2, 2007.

## Máquinas e Acessórios para Soldagem

**Smarter tools**

As principais linhas de produtos SMARTER incluem: transformadores para solda, retificadores de solda, inversores de solda em processo MMA/eletrodo revestido, TIG, MIG, MAG, corte a plasma e multiprocesso e carregador de bateria, entre outros.



**Ampla estoque para pronta entrega!**

**Preço competitivo e 12 meses de GARANTIA**

Smarter do Brasil

Wanshun Comercial de Equipamentos Elétricos do Brasil Ltda

Rua Dr. Olímpio Carr Ribeiro, 26 - Vila Califórnia | CEP: 04775-120 - São Paulo - SP.

e-mail: [vincent@zjwanshun.com](mailto:vincent@zjwanshun.com) | [www.smarterbrasil.com.br](http://www.smarterbrasil.com.br)