

Simulação de processos de micro fabricação: Influência do efeito de escala ⁽¹⁾

Renato Luiz Lehnert Portela Cerveira ⁽²⁾

Flávia Renata Dantas Alves Silva ⁽³⁾

Gilmar Ferreira Batalha ⁽⁴⁾

Resumo: Com o surgimento de novas tecnologias de conformação muitos trabalhos estão sendo desenvolvidos na área de fabricação de macro e nanocomponentes, existindo poucos estudos sobre microcomponentes. Este trabalho tem o intuito de fazer uma breve revisão bibliográfica e estudar as diferenças dos efeitos da conformação de metais para macro e microcomponentes, simulando numericamente e comparando com procedimentos experimentais e com a teoria analítica.

Palavras-chaves: efeito de escala, conformação, simulação, fabricação.

Abstract: With the advent of new metal forming technologies many works are being developed in the area of manufacture of macro and nanocomponentes, however this here are few studies on microcomponentes. This work aims to make one brief bibliographical review and to study the differences, influences and effects of the metal forming processes for macro and microcomponentes, simulating and comparing with experimental procedures and the analytical theory.

Key-Words: effect of scale, metal forming, simulation, manufacture.

(1) contribuição apresentada no I Workshop de Engenharia de Fabricação – EPUSP-ITBA-AHK – 30/11/2004

(2) Laboratório Engenharia de Fabricação – Dept. Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos Escola Politécnica da USP – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.900 S. Paulo - Brasil

(3) Laboratório Engenharia de Fabricação – Dept. Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos Escola Politécnica da USP – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.900 S. Paulo - Brasil

(4) Laboratório Engenharia de Fabricação – Dept. Eng. Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos Escola Politécnica da USP – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.900 S. Paulo – Brasil

1. Introdução

A última década apresentou um grande salto na pesquisa e aplicação de microcomponentes. O fruto desse desenvolvimento pode ser visto em produtos mais populares como câmeras fotográficas embutidas em aparelhos celulares e impressoras a jato de tinta de alta precisão e também em outros ramos como a biomedicina e o automobilístico. Porém, a tendência da miniaturização gerou um certo desconforto para a indústria, uma vez que esse tipo de componente necessita de tratamento diferenciado, não contando com o auxílio da teoria já conhecida para macrocomponentes. Dessa forma, o processo de fabricação de microcomponentes está baseado em resultados empíricos e individuais de manufatura, sendo um dos desafios da nova geração estudar o efeito de escala a fim de criar novas técnicas de produção em massa viáveis e com baixo nível de retrabalho. Na figura 1 tem-se a comparação de um microcomponente com uma formiga.



Figura 1: Exemplo de microcomponente

Como alternativa, utiliza-se a conformação mecânica, que normalmente proporciona processos de produção viáveis, além de apresentar muitas vantagens como a economia de material, o controle de propriedades mecânicas, a alta razão de produtividade e o baixo impacto ambiental [1, 3, 4]. O processo de simulação numérica através de elementos finitos vem se tornando um instrumento importante para o entendimento dos efeitos dessa técnica [2], uma vez que os resultados obtidos na simulação, quando bem tratados, retratam uma realidade muito próxima à obtida em processos experimentais.

2. Aplicações e Limites

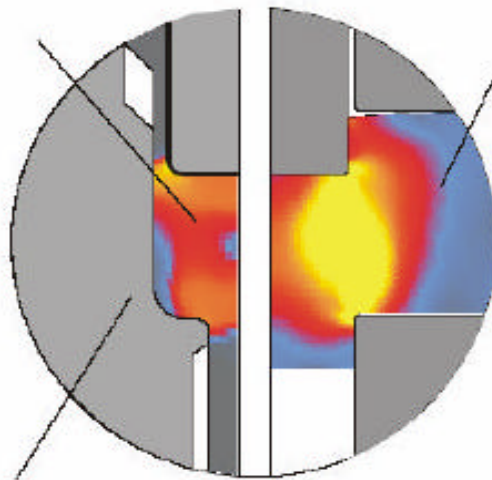
A tendência da miniaturização é mais forte na indústria de eletrônica, onde a cada dia que passa, novas funções tecnológicas estão sendo compactadas em equipamentos utilizados no cotidiano. Tecnologias que até pouco tempo eram tidas inviáveis foram possíveis com redução da escala dos componentes [7, 8]. Um dos maiores problemas ainda enfrentados no processo de miniaturização é que a tecnologia conhecida e estabelecida para macrocomponentes não pode ser proporcionalmente escalonada e aplicada para micropeças. A figura 2 evidencia os principais problemas a serem tratados no trabalho com micropeças. Além de toda influência da microestrutura do material, o tipo de aplicação da peça pode definir o processo de fabricação e a ferramenta correta a ser utilizada. Métodos alternativos de manufatura precisam ser desenvolvidos para suprir a demanda do processo [9]. O estudo da microconformação envolve diferentes áreas como características do material, do processo, das ferramentas e de máquinas/ferramentas e para utilizar esses resultados para aplicações industriais é necessária uma pesquisa detalhada dos fenômenos e dos processos básicos de conformação mecânica.

Material

- Tensão de escoamento
- Anisotropia
- Ductilidade
- Limite de conformação
- Fluxo de material

Processos

- Forças de conformação
- Exatidão das peças
- Simulação
- Dispersão
- Tribologia
- Retorno elástico



Ferramental

- Fabricação de ferramentas com tecnologias novas e avançadas
- Materiais para ferramentas
- Exatidão das ferramentas
- Laser como ferramenta

Máquinas e Equipamentos

- Drives
- Automação
- Novos conceitos de manuseio

Figura 2: Problemas do mundo de micro conformação (Geiger et. Al.) [8]

3. Comportamento do material

Efeito de escala é um fenômeno que descreve a diferença de comportamento de um material em um processo de conformação, cuja escala foi diminuída. [6] Na conformação de metais, os parâmetros mais importantes que descrevem o comportamento do material são: a tensão de escoamento e a curva de escoamento. O efeito de miniaturização na tensão de escoamento está relacionado com o aumento da quantidade de grãos superficiais quando há diminuição nas dimensões do corpo enquanto o tamanho do grão continua o mesmo [4, 10]. Durante o processo de conformação os grãos externos estão sujeitos a pequenas forças quando comparados com os grãos que ficam internos ao volume. Em consequência, a tensão de escoamento integral deve diminuir com a redução da dimensão das peças fabricadas. [10]. Devido ao fato das superfícies livres não apresentarem uma fronteira bem definida e comparável ao elemento de grão superficial, o movimento das discordâncias em grãos de superfície não está restrito como para grãos internos. Tanto para o campo de temperatura, quanto para a tensão de escoamento, a miniaturização das dimensões ocasiona mudanças nas condições de contorno durante a conformação [3]. É possível reduzir o elemento até que haja apenas um grão no interior de seu volume [4, 5]. Os grãos internos sofrem uma resistência à deformação plástica diferente dos grãos da borda do volume, por isso a análise do efeito de borda é especialmente importante para conformação de microcomponentes. Em ensaios feitos em corpos de prova redondos e quadrados, com microestrutura similar, verificou-se que nos corpos circulares a tensão de escoamento é significativamente mais alta. [10]

4. Miniaturização, heterogeneidades microestruturais, efeito de escala na deformação e micro fabricação a frio.

Diversos eventos locais que influenciam a microestrutura dinâmica ocorrem durante a deformação (figura 3), resultando na heterogeneidade da deformação. Esse comportamento é importante para o estudo do efeito de escala durante a miniaturização dos processos de fabricação na microconformação ou microusinagem, uma vez que as heterogeneidades contribuem para a inabilidade da previsão do comportamento do encruamento e das mudanças de orientação durante a deformação.

Durante a deformação de monocristais, uma parte do grão sofre rotação num sentido e outra parte no sentido oposto, gerando, na interface, uma região de acomodação dessas rotações, chamada de “banda de transição”. As regiões que sofreram rotação são chamadas de “bandas de deformação”. Nas “bandas de deformação” os grãos deformados subdividem-se em regiões com orientação cristalina constante, significativamente diferente da orientação presente em qualquer outra região naquele grão [13]. Analisando um único grão de um material policristalino deformado plasticamente é possível encontrar várias bandas de deformação [11].



Figura 3– Eventos locais que influem na microestrutura dinâmica durante a deformação.

5. Ensaio de dobramento

Um processo bem usual na indústria para manufatura de microcomponentes é o dobramento. Existem inúmeros modelos que regem o comportamento da peça durante o dobramento, entretanto esse comportamento perde a validade quando aplicado a peças de tamanho reduzido. Um exemplo é o cálculo da força de dobramento, que chega a ter um desvio de até 60% quando comparada a resultados experimentais realizados com microcomponentes [3]. Outro fato importante é que a precisão do produto final depende fortemente do retorno elástico (“springback”) que está, por sua vez, diretamente ligado ao tamanho do grão do elemento e ao efeito de borda presente em microcomponentes. Conforme Kocanda & Prejs [1] o ângulo de retorno elástico diminui com o aumento do grão, ou seja, com o aumento do efeito de borda, o que pode ser explicado pela maior facilidade de deformar plasticamente que um número menor de grãos na seção transversal terá.

A aplicação do Método de elementos finitos em processos de conformação começou como uma extensão da Técnica de análise estrutural para regimes de deformação plástica. As primeiras aplicações foram baseadas na matriz força-tensão desenvolvida pelas equações de Prandtl-Reuss. Extrusão hidrostática e compressão foram analisadas utilizando essa matriz e formulações de variações infinitesimais. Desde então, ocorreu um grande desenvolvimento nas técnicas numéricas, assim como um crescimento constante dos campos de aplicação. Porém, a aplicação na conformação mecânica ainda é limitada. O avanço mais importante foi a inclusão de efeitos da razão de tensões e da influência da temperatura nas propriedades dos materiais. [12]

5.1. Confecção do dispositivo

Com o intuito de verificar tais conclusões e ainda avaliar métodos de elementos finitos para tal aplicação foi elaborado um modelo para o ensaio de corpos de prova de tamanho reduzido, simulando o dobramento de componentes para a avaliação de retorno elástico, “springback”. Um dispositivo preliminar foi construído a fim de testar a funcionalidade do conjunto e pode ser visto na figura 4. Foram utilizadas duas mini morsas dispostas perpendicularmente para a fixação do micrômetro e dos corpos de prova. O micrômetro utilizado é um modelo manual e possui abertura de 0-25 mm. A idéia do dispositivo é ensaiar o dobramento através da aplicação de um deslocamento em uma das extremidades da chapa pela haste do micrômetro, enquanto a outra

extremidade é fixada por uma morsa. Após um curto intervalo de tempo da aplicação do deslocamento, deve-se soltar a haste do micrômetro e medir o retorno elástico.



Figura 4: Dispositivo preliminar

5.2. Confeção dos corpos de prova

Os materiais mais indicados para se realizar o ensaio proposto são o cobre, o latão e o alumínio, devido a suas propriedades físico-químicas. As chapas escolhidas para esta série de ensaios foram as de latão, devido à facilidade de conformação e ao baixo custo. Nos primeiros corpos de prova foram utilizadas chapas de 0.25 mm. Para testar a influência do efeito de escala foram testados, inicialmente, três tamanhos de peças, conforme mostra a figura 5.



Figura 5: Corpos de prova em 3 tamanhos em comparação com um dedo.

Os corpos de prova possuem as seguintes dimensões:

Tipo 1: 0.045 X 0.008 x 0,00025 m.

Tipo 2: 0.045 x 0.005 x 0,00025 m.

Tipo 3: 0.045 x 0.003 x 0,00025 m.

5.3. Ensaio experimentais

Nessa primeira fase do projeto foram ensaiadas 3 amostras de cada tipo de corpo de prova. A tabela 1 mostra os resultados desse experimento.

Tabela 1: 1º ensaio de dobramento

Tipo 1 (0,045 x 0,008 x 0,00025)

ensaio	deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
1	13,00	4,71
2	13,00	4,85
3	13,00	4,34
média	13,00	4,63

Tipo 2 (0,045 x 0,005 x 0,00025)

ensaio	deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
1	13,00	4,53
2	13,00	4,60
3	13,00	4,63
média	13,00	4,59

Tipo 3 (0,045 x 0,003 x 0,00025)

ensaio	deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
1	13,00	4,56
2	13,00	4,48
3	13,00	4,41
média	13,00	4,48

Após a realização dos ensaios, pode-se perceber que o retorno elástico diminui com a largura do corpo de provas. A fim de comprovar esse resultado, foi elaborado mais um ensaio com um corpo de provas ainda menor: tipo 4: 0,040 x 0,001 x 0,00025 m. Foram feitos 4 ensaios para esse tipo de amostra, como mostra a tabela 2.

Tabela 2: 2º ensaio de dobramento

Tipo 4 (0,040 x 0,001 x 0,00025)

ensaio	deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
1	10,00	2,33
2	10,00	2,13
3	10,00	2,05
4	10,00	2,28
média	10,00	2,20

Conforme o esperado, a amostra do tipo 4 obteve o menor retorno elástico de todos os tipos testados.

5.4. Simulação numérica 1 - ADINA

Inicialmente o ensaio de dobramento foi simulado através de elementos finitos utilizando o software ADINA. Foram criados modelos tridimensionais utilizando-se elementos do tipo 3D Solid. Após aplicar as condições de contorno necessárias para restringir o movimento na extremidade da chapa na qual foi presa na morsa, foi aplicado o deslocamento no ponto desejado, simulando assim as condições do ensaio. As propriedades utilizadas para o latão seguem na tabela 2.

Tabela 3 - Propriedades do latão vermelho

Densidade (mg/m ³)	Mod. Elasticidade E(Gpa)	Tensão de escoam. (Mpa)	Coef.Poisson	Coef. Exp. Térm.
8,74	101 / 37(transversal)	70	0,35	18

Foram discretizados e simulados 3 modelos correspondentes aos três primeiros tipos de ensaios experimentais citados no item anterior, como pode ser visto nas figuras a seguir:

Tipo 1 (0,045 x 0,008 x 0,00025 m)

deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
12,70	1,49

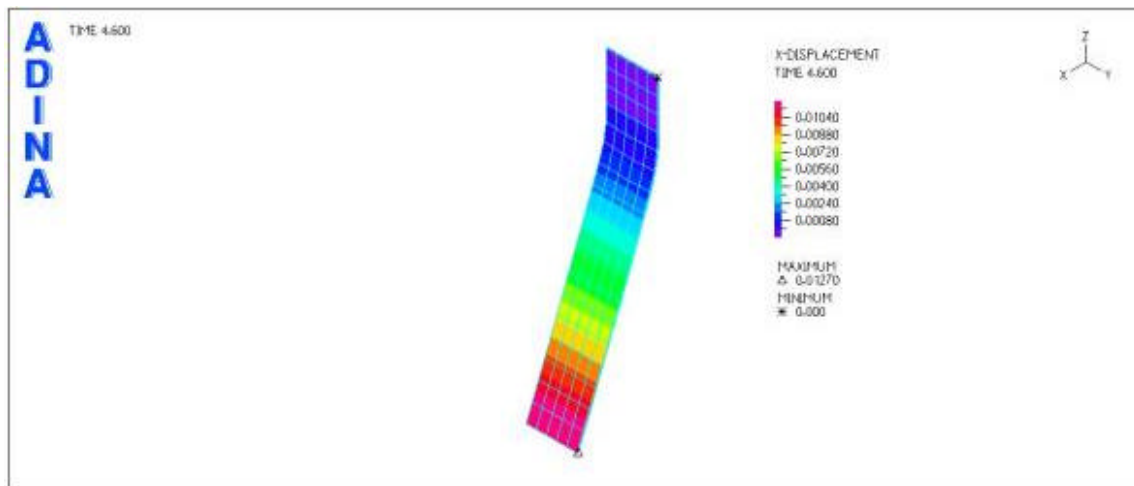


Figura 6: Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 1

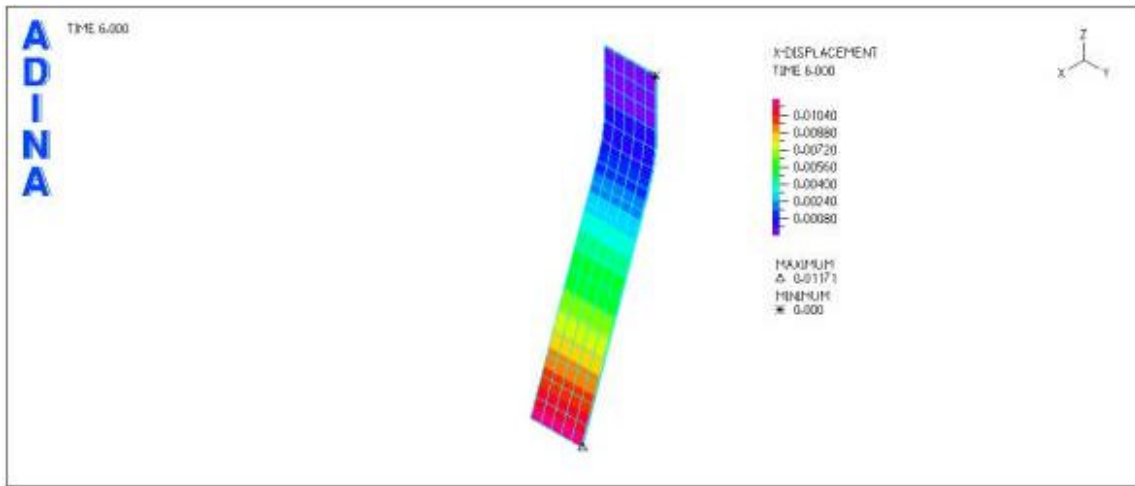


Figura 7: Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 1

Tipo 2(0,045 x 0,005 x 0,00025 m)

deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
12,69	1,37

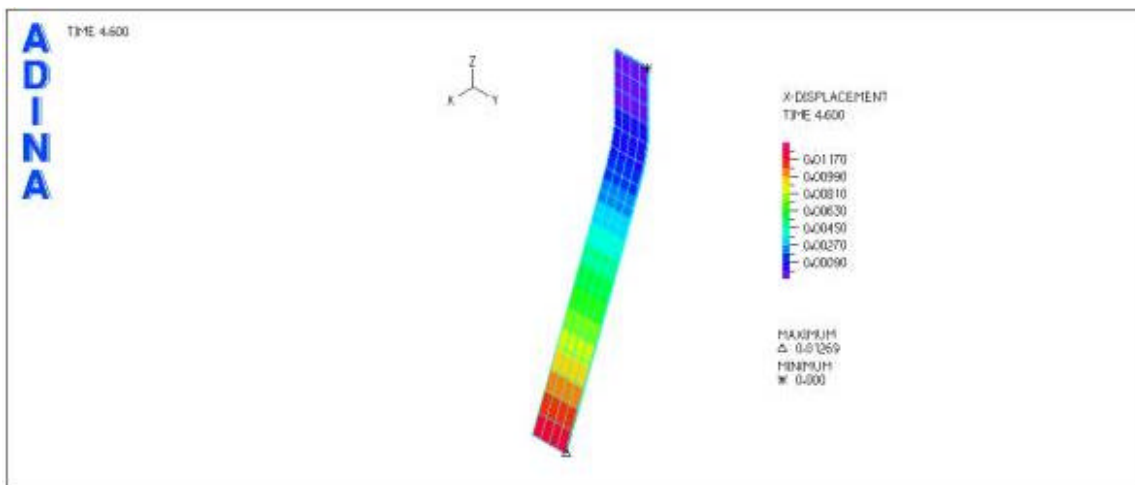


Figura 8: Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 2

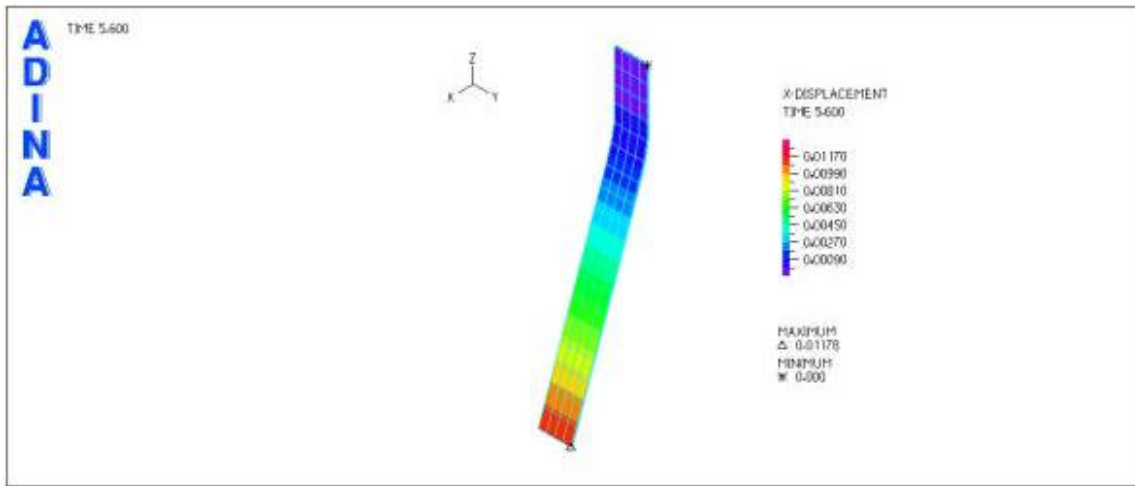


Figura 9: Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 2

Tipo 3(0,045 x 0,003 x 0,00025)

deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
12,13	1,29

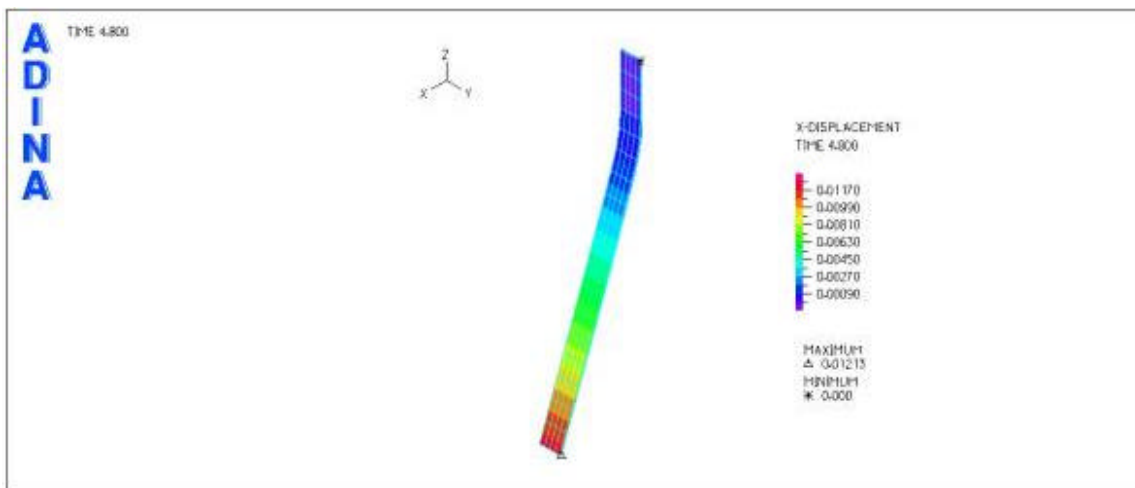


Figura 10: Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 3

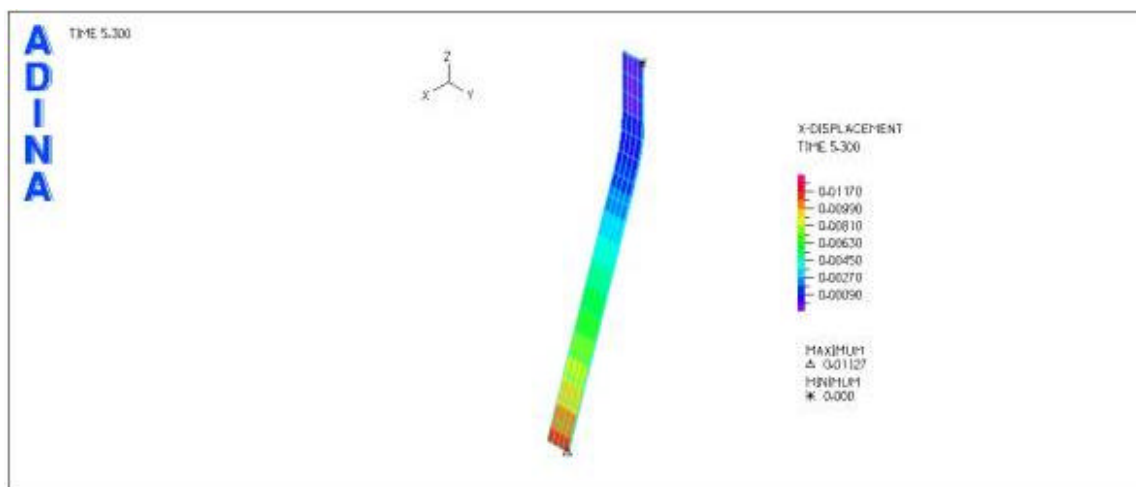


Figura 11: Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 3

Analisando os resultados simulacionais e comparando com os dados experimentais, pode-se concluir que a simulação obteve o mesmo comportamento, uma vez que o retorno elástico também diminuiu com a largura do modelo. Por outro lado, os resultados obtidos na simulação foram em média 3 vezes menores do que os encontrados nos ensaios, o que pode ter ocorrido tanto por falha humana sistêmica na apuração dos dados experimentais quanto na não conformidade do modelo discretizado com a realidade do ensaio.

5.5. Simulação numérica 2 – LS DYNA

Visando corrigir a discrepância observada na comparação entre os resultados da simulação e dos ensaios, resolveu-se utilizar um software mais adequado para conformação mecânica, como essa proposta neste trabalho, o LS DYNA. O modelo proposto é composto de dois elementos: a amostra (chapa) e o punção.

A chapa foi modelada através do elemento `Mat_peicewise_linear_plasticity`, onde foram necessários os dados de densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tensão de escoamento, de acordo com a tabela 3. A discretização da malha foi de 50 divisões no comprimento e 3 divisões na largura. Além disso, a espessura foi considerada constante e igual a 0,25 mm. Todos os movimentos e rotações da chapa foram restringidos, exceto translação em z, e na região de contato com a morsa, os pontos foram considerados fixos. Já o punção foi modelado como um corpo rígido através do elemento `Mat_rigid`.

Para simular o deslocamento da chapa ocasionado pelo deslocamento do punção em direção à chapa, foi necessário criar uma região de contato no corpo rígido. O contato definido foi do tipo `Contact_automatic__nodes_to_surface_ID` e para isso, a chapa foi definida como master e o punção como slave.

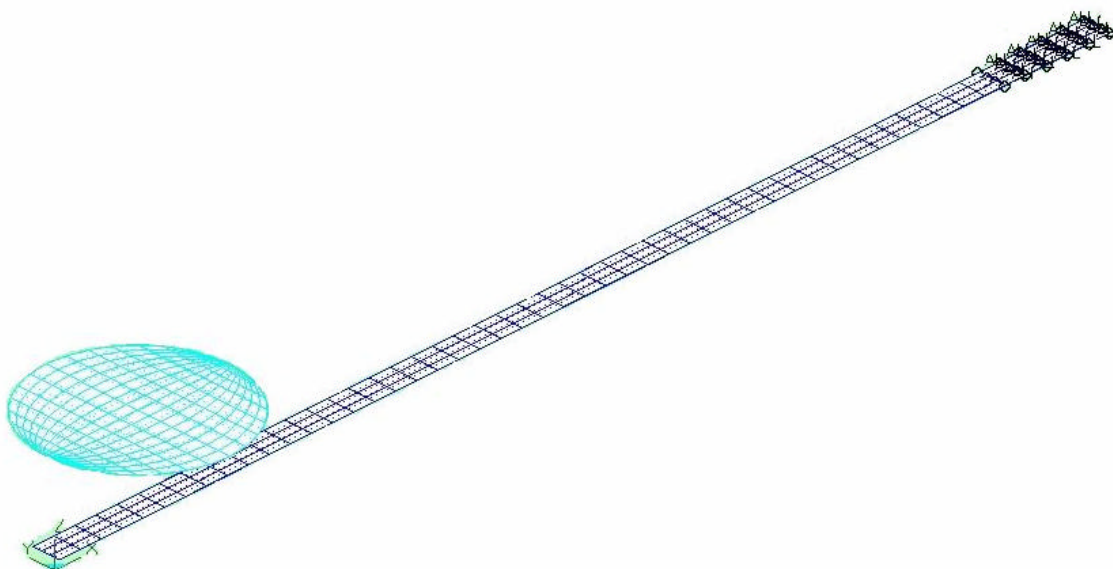


Figura 12: Modelo discretizado em LS DYNA

O movimento do punção foi definido de acordo com uma curva de deslocamento em função do tempo como a mostrada na tabela 4.

Tabela 4 – Curva de deslocamento do punção

Tempo (s)	Desloc. (m)
0.000	0.0000
0.006	-0.0029
0.012	-0.0035
0.030	-0.0080
0.036	-0.0090
0.054	-0.0120
0.078	-0.0130
0.096	-0.0130
0.102	0.0000
0.400	0.0000

Como citado anteriormente, esse modelo de simulação foi elaborado para amostras do tipo 4. Os resultados obtidos foram:

Tipo 4

deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
12,866	6,50

LS-DYNA USER INPUT

STEP 17 TIME = 9.5988826E-002

Z component



Figura 13: Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 4

LS-DYNA USER INPUT

STEP 71 TIME = 4.1999999E-001

Z component

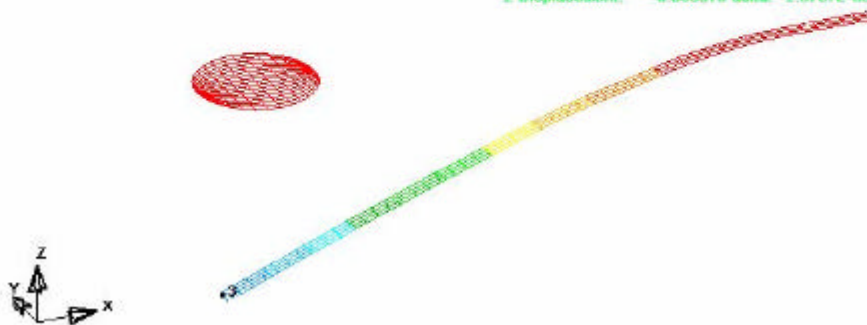
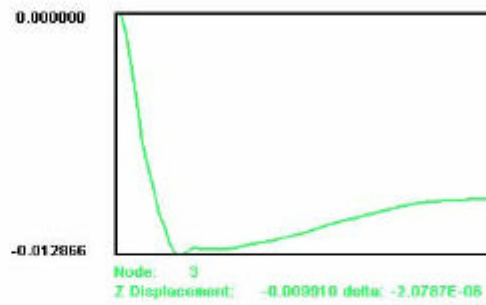


Figura 15: Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 4

A análise dos resultados simulacionais mostrou um comportamento inesperado que foi um retorno elástico computacional maior do que o retorno elástico real. A conclusão que pode-se chegar é que o tipo de modelagem computacional pode influenciar e muito os resultados da simulação. Desta forma, o próximo passo é estudar o melhor modelo simulacional para representar os ensaios experimentais.

6. Conclusões

O estudo de propriedades de materiais, assim como de métodos de conformação é de extrema importância para o controle do produto final obtido na produção de microcomponentes. Os métodos numéricos utilizados para a previsão e análise de fabricação convencional devem passar por uma grande reavaliação para englobar também os efeitos de miniaturização. Nesse contexto os ensaios realizados servirão como base de comparação com resultados da bibliografia e ainda com resultados numéricos obtidos através da simulação por elementos finitos.

Nos resultados simulacionais preliminares obtidos, pode-se verificar que o efeito de miniaturização já é percebido, pois conforme era esperado, o retorno elástico foi menor nos componentes menores. Os primeiros ensaios ainda ficaram um pouco distantes dos resultados obtidos na simulação, o que pode ser devido a alguma propriedade do material estar diferente, ou mesmo a alguma deformação devido a obtenção dos corpos de prova. Em um próximo momento deverá ser feita a adequação desses dados para que o desvio fique dentro de um patamar aceitável. O novo modelo que está sendo preparado leva em conta também o atrito entre a peça e o punção.

7. Referências

- [1]KOCANDA, A.; PREJS, T. - The effect of miniaturization on the final geometry of the bent products – Metal Forming 2000, Proc. of the 8th International Conference on Metal Forming, Rotterdam, A. A. Balkema, 2000, 375-78
- [2]GRONOSTAJSTKI, Z – Model describing grain size evolution of select copper alloys during and after deformation - Metal Forming 2000, Proc. 8th International Conference on Metal Forming, Rotterdam, Balkema, 2000, 447 - 52
- [3]GEIGER, M.; VOLLERTSEN, F.; KALS, R. – Fundamentals on the Manufacturing of Sheet Metal Micro parts – Annals of CIRP Vol. 45/1/1996, 277-82
- [4]ENGEL, U.; MESSNER, A. - Numerical simulation of metal forming processes for the production of microparts – Wire - 2/98, 94-100
- [5]ECKSTEIN, R.; ENGEL, U. – Behavior of grain structure in micro sheet metal working - Metal Forming 2000, Proc. of the 8th International Conference on Metal Forming, Rotterdam, A. A. Balkema, 2000, 453 – 59

- [6]TIESLER, N.; ENGEL, U. – Micro forming – Effects of miniaturization - Metal Forming 2000, Proc. of the 8th International Conference on Metal Forming, Rotterdam, A. A. Balkema, 2000, 355 – 60
- [7]MICHEL, J.F.; PICART, P. Size effects on the constitutive behavior for brass in sheet metal forming J. of Materials Processing Technology 141 (2003) 439 – 46
- [8]GEIGER, M.; KLEINER, M.; ECKSTEIN, R.; TIESLER, N.; ENGEL, U – Microforming – Annals CIRP, 50/2/2001, 445 – 62
- [9]ALTING, L.; KIMURA, F.; HANSEN, H.; BISACCO, G. MicroEngineering - Annals CIRP, 52/2/2003, 635-57
- [10]MESSNER, A – Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile – Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozessauslegung – Meisenbach Verlag Bamberg; 1997.
- [11]BORTOLUSSI R. - Análise numérica e experimental da hidroconformação de produtos tubulares - Tese de doutorado; UNICAMP-FEM-DEMA. 2001
- [12]CARLEER B. D.- Finite element analysis of deep drawing- PhD-Thesis, Univ. of Twente, Netherlands; March 1997
- [13]Textura e relações de orientação - Deformação plástica, recristalização, crescimento de grão – epusp, dezembro de 2001