

## **Simulação de processos de microfabricação: influência do efeito de escala**

### **Gilmar Ferreira Batalha**

Laboratório Engenharia de Fabricação – Dept. Eng. Mecatrônica e Sistemas Mecânicos Escola Politécnica da USP – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.900 -S. Paulo – Brasil - [gfbatalh@usp.br](mailto:gfbatalh@usp.br)

### **Renato Luiz Lehnert Portela Cerveira**

Escola Politécnica da USP – Rua Max Klaussner, 57 – 04705.050 - S. Paulo – Brasil – [renato.cerveira@poli.usp.br](mailto:renato.cerveira@poli.usp.br)

### **Flavia Renata Dantas Alves Silva**

Escola Politécnica da USP – Rua Fonseca da Costa, 231 – 04151.060 - S. Paulo – Brasil – [flavia.silva@poli.usp.br](mailto:flavia.silva@poli.usp.br)

***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.*

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

## **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 <sup>[15]</sup>

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 <sup>[1, 3, 4]</sup>. O processo de simulação numérica através de elementos finitos vem se tornando um instrumento importante para o entendimento dos efeitos dessa técnica <sup>[2]</sup>, 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

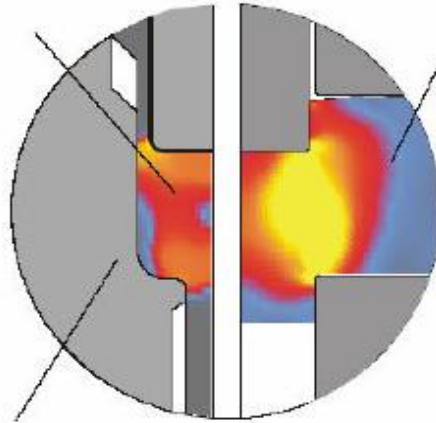
A tendência da miniaturização é mais forte na indústria de eletrônica, onde a cada dia que passa, novas funções tecnológicas estão sendo compactadas em equipamentos utilizados no cotidiano. Tecnologias que até pouco tempo eram tidas inviáveis foram possíveis com redução da escala dos componentes <sup>[8]</sup>. 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 <sup>[9]</sup>. 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.PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

As micropeças de metal são comumente processadas usando “fine blanking”, dobramento, estampagem profunda, estiramento e dobramento de fios e arame. Dependendo da complexidade e da quantidade das peças por minuto pode-se utilizar punçadores de alto desempenho [7,8].

#### 3.1.Forjamento

Para peças de tamanho reduzido é comumente utilizado o método de forjamento em matriz fechada. Além de dar forma a peça, o processo de forjamento tende a melhorar as propriedades mecânicas do metal. Porém, para garantir esse resultado as peças são submetidas a tratamentos térmicos como o recozimento e a normalização. Assim como o teste de atrito, o estudo desse processo procura utilizar amostras de mesmo material e dimensões, porém variando a velocidade de punção a microestrutura, rugosidade da superfície e lubrificação. O resultado mais importante da redução da escala do elemento é a aumento da pressão de punção. Isso pode ser explicado pela dispersão encontrada em testes de atrito e de extrusão, realizados apenas para amostras pequenas [8].

#### 3.2.Dobramento

O processo de dobramento pode ser feito com peças iniciais de diferentes formatos como chapas e tubos, assim como pode ser feito em qualquer ângulo, com raios de discordância diversos. Os esforços que surgem nessa operação criam diversos estados de tensão nas diferentes partes das peças. Isso torna complexa e difícil à previsão do esforço resultante e necessário à conformação e dos esforços nos pontos críticos que podem conduzir à ruptura da peça na conformação. O tipo de esforço predominante

é o de flexão, conduzindo ao surgimento de forças de tração e de compressão em lados opostos da chapa ao longo da direção e através da dimensão da espessura <sup>[8]</sup>.

### 3.3. Estampagem profunda

Processo de conformação onde são formados copos a partir de discos planos, com fundos esféricos ou planos e com paredes laterais retas ou inclinadas. Em decorrência da uniformidade geométrica, as tensões existentes em qualquer plano vertical, passando pelo eixo de simetria, são iguais, e as possibilidades de aparecimento de enrugamento na flange, durante a estampagem, ou de fissura, na região lateral adjacente ao fundo do copo, são as mesmas <sup>[8]</sup>.

### 3.4. “Blanking” e Puncionadora

Especialmente na indústria eletrônica, esses processos têm alta relevância industrial na produção de pequenos componentes. As forças de punção não diminuem com miniaturização desde que a área deformada não tenha uma superfície livre. Pelo contrário, a força cortante é levemente aumentada. Esse fenômeno é independente do tamanho de grão e foi observado em diferentes tipos de materiais <sup>[8]</sup>. A exatidão diminui com altas velocidades do processo de “blanking”, devido às vibrações do conjunto.

## 4. EFEITOS DA MINIATURIZAÇÃO

### 4.1. 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. O estudo dos efeitos de escala requer muitos experimentos, sendo necessário utilizar as leis da Teoria de similaridade a fim de obter processos geometricamente similares, porém, com tamanhos diferentes <sup>[6]</sup>.

Na conformação de metais, os parâmetros mais importantes que descrevem o comportamento do material são: a tensão de escoamento e a curva de escoamento. Com eles torna-se possível controlar as forças de conformação, a carga nas ferramentas e o comportamento local do escoamento <sup>[10]</sup>. 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 <sup>[4, 10]</sup>. Na figura 3 é mostrada a diferença entre um material monocristalino e um policristalino. 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 <sup>[10]</sup>. 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. A tensão de escoamento dos grãos internos deve ser similar a de um agregado cristalino comum <sup>[6]</sup>.

Assumindo que a plasticidade da superfície externa é similar a porção interna e a tensão de escoamento  $\sigma_{f,TS}$  pode ser aproximada pela tensão de escoamento do volume interno. 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 <sup>[3]</sup>. Finalmente é possível reduzir o elemento até que haja apenas um grão no interior de seu volume <sup>[4, 5]</sup>. 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. <sup>[10]</sup>

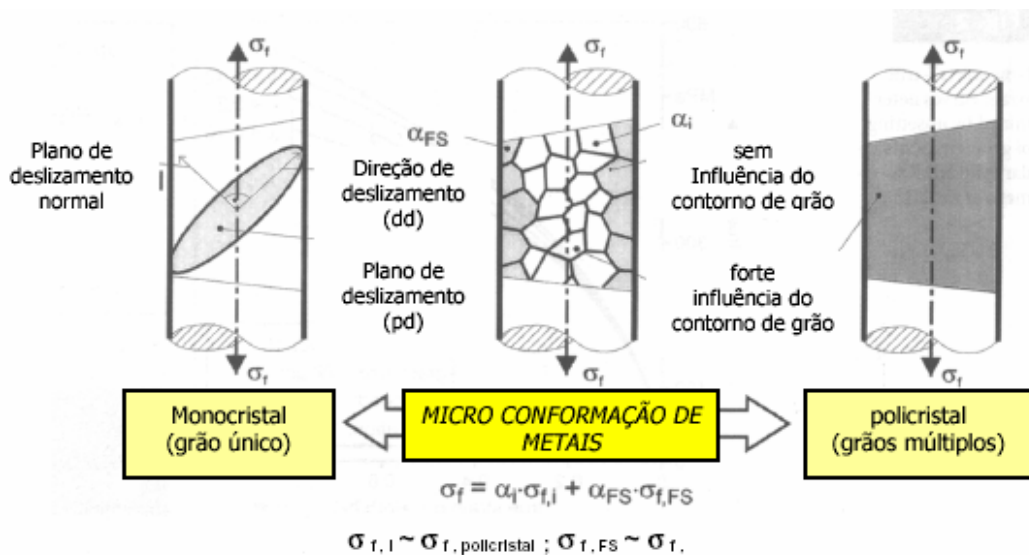


Figura 3: Fundamentos da plasticidade em metais mono e poli cristalinos. (Messner 1998) [10]

### 4.2. Visioplasticidade

Visioplasticidade e medição ótica de força são aplicadas para avaliar dados do material a fim de conferir modelos em MEF e estudar o comportamento da deformação em materiais homogêneos e não-homogêneos. No que diz respeito ao processo de micro conformação, dobramento e corte “blanking”, o comportamento ainda está em fase de investigação. Sabe-se, contudo que há dependência da geometria da aresta cortante na orientação dos grãos na área deformada [8]. A orientação dos grãos que causa resistências diferentes contra a deformação tem efeito na distribuição de força apenas quando existem poucos grãos na área deformada. Para materiais policristalinos, a força é homogênea. No caso de poucos grãos na área deformada, apenas os grãos com orientação favorável são deformados, mas se o número de grãos for ainda menor, cada grão será deformado de acordo com o formato da ferramenta, não considerando a orientação não favorável. A figura 4 mostra a influência da granulação e do estado do material (encruado ou recozido). Quando o material é recozido, seus grãos aumentam e apresentam uma distribuição grosseira, porém quando o material é encruado, suas linhas ficam mais homogêneas.

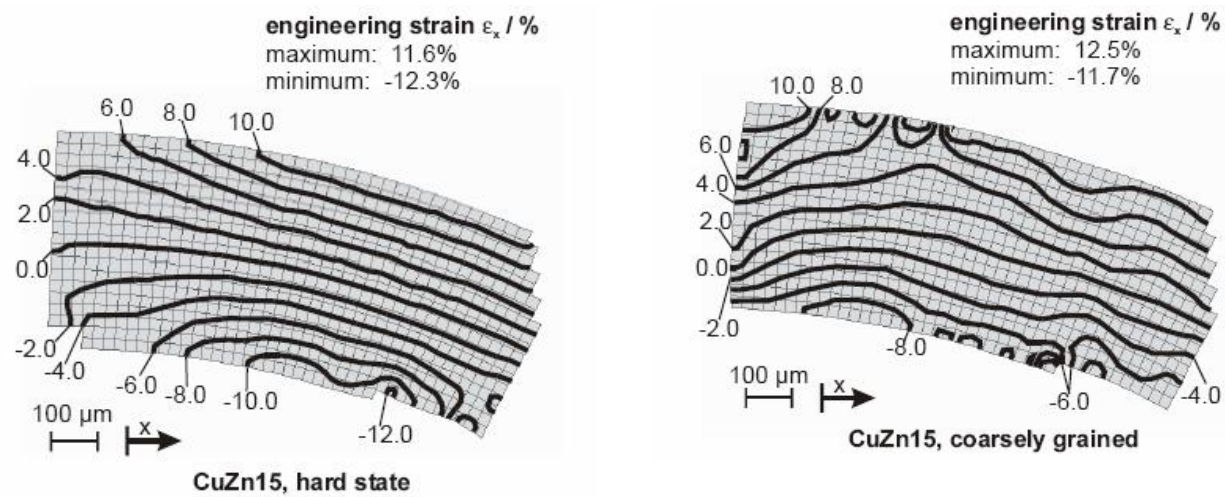


Figura 4: Influência da granulação (a) distribuição mais uniforme da deformação no material encruado. (b) Distribuição não homogênea das deformações para material de granulação grosseira [5].

## 5. 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 5), 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 [24]. Analisando um único grão de um material policristalino deformado plasticamente é possível encontrar várias bandas de deformação [11,13].

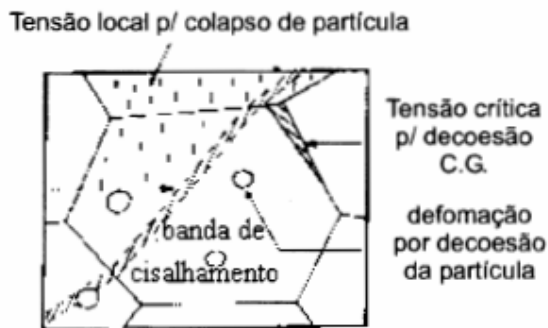


Figura 5: Eventos locais que influem na microestrutura dinâmica durante a deformação.

### 5.1 A camada superficial e subsuperficial encruada no processo de deformação e fabricação

A laminação de encruamento é aplicada com o objetivo de condicionar o tamanho de grão da ordem de 100-150  $\mu\text{m}$  após o recozimento final. Para isso, aplica-se uma deformação de 4 a 8%, onde as discordâncias já estão formando emaranhados, porém sem formar células. No recozimento posterior, a recristalização se inicia mais cedo na superfície, sinalizando encruamento um pouco maior na superfície, porém esta diferença é mínima. [11,14]

### 5.2. Atrito

Durante o processo de fabricação pode ocorrer escoamento e deformação de materiais devido ao impedimento do movimento livre entre as superfícies, ou seja, atrito. O primeiro estudo sobre atrito foi feito usando o teste de recalque de anel, onde foi verificado um aumento no atrito com a redução do tamanho do elemento [8]. A mudança de condições no atrito com a redução do tamanho do elemento pode ser determinada comparativamente, significa aumento no atrito com a diminuição do elemento [6].

### 5.3. Temperatura

O aquecimento isotérmico interfere nas propriedades do material e provavelmente no comportamento do atrito [8]. É importante conhecer o gradiente de temperatura, a média de temperatura e a máxima temperatura para encontrar a definição do fator de escala [3]. Idealmente o aumento de temperatura durante a conformação adiabática a frio é dado pela eficiência  $\eta$ , pela média de tensão de escoamento  $k_{fm}$ , força real e capacidade de calor  $c_p\rho$ .

$$\Delta T = k_{fm} j / h C_p r \quad (1)$$

Propriedades como a densidade e a capacidade de calor podem ser consideradas constantes. A deformação também não muda se o fator de escala é mantido. O contato da ferramenta com o elemento de trabalho é um fator influente no aquecimento do mesmo. Apesar de esse efeito ser mais forte para micropeças, o tempo de contato da ferramenta é muito menor. Pode-se calcular o campo de temperatura assumindo o modelo de sólido semi-infinito, ou seja, a espessura não tem influência sobre o campo de temperatura. Porém esse modelo não é válido para amostras muito finas, neste caso, o gradiente de temperatura será menor quanto menor for a espessura <sup>[3]</sup>.

#### **5.4. Efeito escala e microestrutural sobre o comportamento elétrico**

O tamanho de grão tem um efeito muito forte nas perdas magnéticas. Quanto maior o tamanho de grão, menor a parcela histerética das perdas e maior a parcela chamada "anômala". Esse comportamento mostra que há um tamanho de grão ótimo entre 100 e 150  $\mu\text{m}$  <sup>[2]</sup>.

#### **5.6. Anisotropia**

A anisotropia plástica representa a variação das propriedades mecânicas em função da direção em que as mesmas estão sendo medidas <sup>[11,12]</sup>. Nos metais a causa mais importante da anisotropia plástica é a orientação dos grãos, ou seja, a orientação da estrutura cristalográfica. Macroscopicamente a anisotropia possui ligação direta com o processo de fabricação das peças metálicas, especialmente no caso de chapas laminadas. A laminação reordena os grãos em um determinado sentido, o que gera uma orientação preferencial que irá modificar a capacidade de deformação do material nas diferentes direções em relação à direção de laminação. Por esse motivo, a anisotropia é de tanta importância para processos de conformação, sendo responsável também pela variação de espessura e pela formação de "orelhas" no caso da estampagem profunda <sup>[11]</sup>. Valores altos de anisotropia são preferencialmente utilizados a fim de aumentar a capacidade de deformação na largura com reduções pequenas na espessura, pois significa menor instabilidade plástica (figura 6).



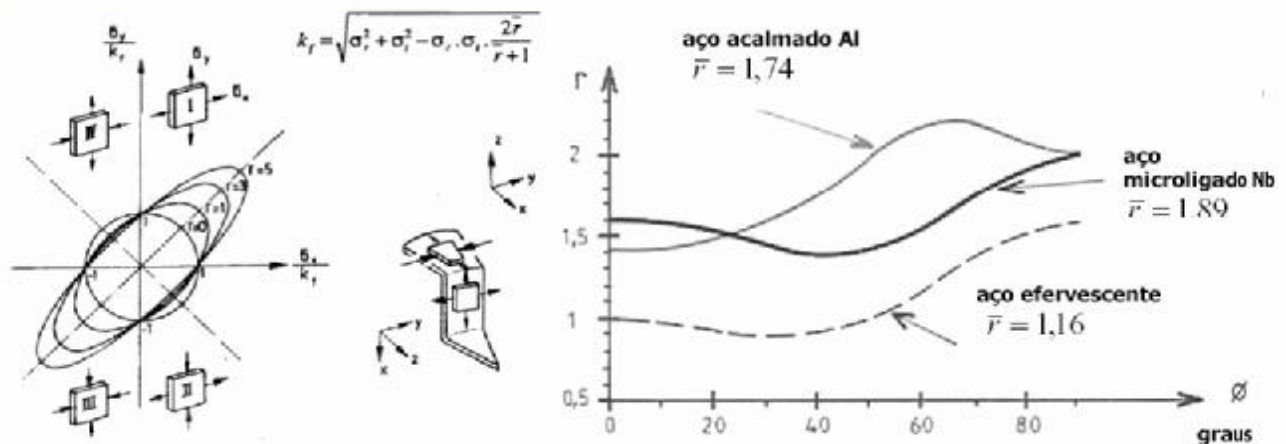
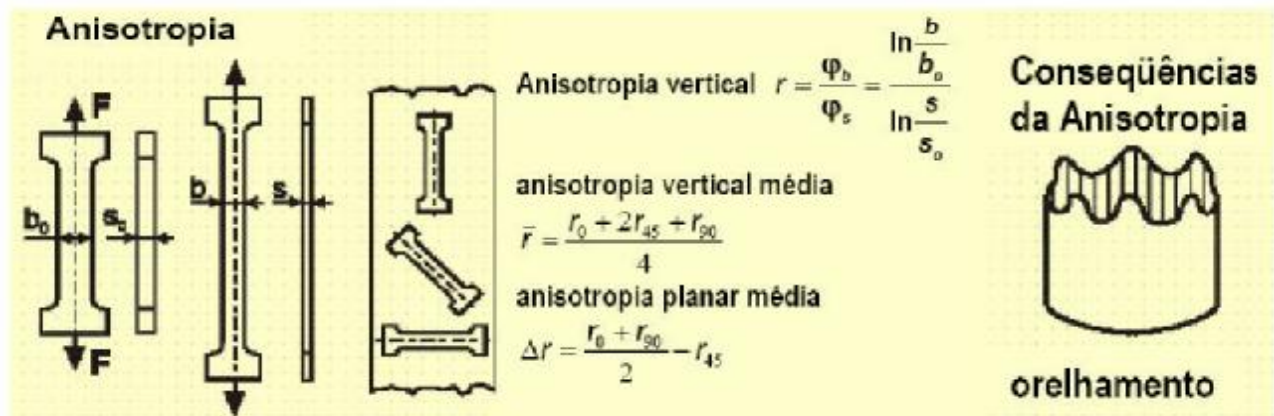


Figura 6 : Anisotropia, superfície de escoamento (yield locus) e variação com a orientação e tipo de material e influencia da anisotropia no formato da altura de orelhamento.

## 6. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O Método de elementos finitos é um poderoso artifício numérico capaz de solucionar problemas referentes às modelagens física e matemática dos processos de conformação plástica dos metais. Além de simular condições muito próximas da realidade, o método pode ser aplicado a configurações geométricas complexas, considerando também todas as variáveis como atrito e variação das propriedades mecânicas do material durante o processo de conformação.

O MEF pode ser resumido nos seguintes passos:

- Modelagem do corpo e divisão do seu volume em diversos elementos idealizados, satisfazendo diversas condições particularmente de natureza geométrica;
- Seleção de uma função de configuração para cada elemento que satisfaça as condições de continuidade dos deslocamentos e as relações de compatibilidade das deformações;
- Determinação da matriz rigidez de cada elemento do volume do corpo aplicando as relações constitutivas do material, com auxílio de computador;
- Montagem da matriz rigidez global, isto é, para todo o volume do corpo discretizado;
- Aplicação das condições iniciais e de contorno para a solução do problema algébrico formado;
- Resolução das equações algébricas e determinação das tensões, dos deslocamentos e das deformações no corpo sólido estudado.



Atualmente, existem softwares de simulação numéricos muito precisos e que substituem os cálculos algébricos citados anteriormente. Nesse estudo foi utilizado o software ADINA.

### 6.1. Ensaio para análise da influência do efeito de escala no “springback”

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.

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 microcomponentes para a avaliação de retorno elástico, “springback”. Além disso foi confeccionado um dispositivo para a realização de experimentos comparativos aos do modelo matemático.

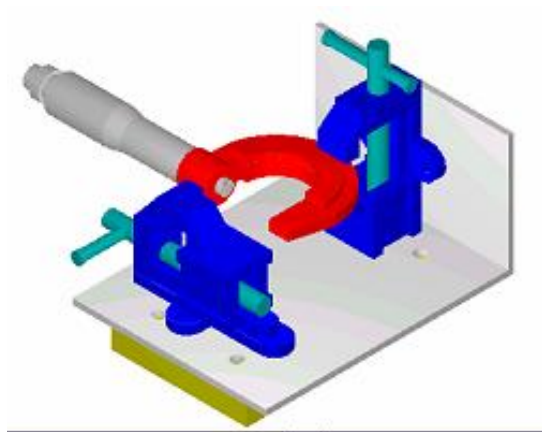


Figura 7: Modelo do dispositivo de ensaio

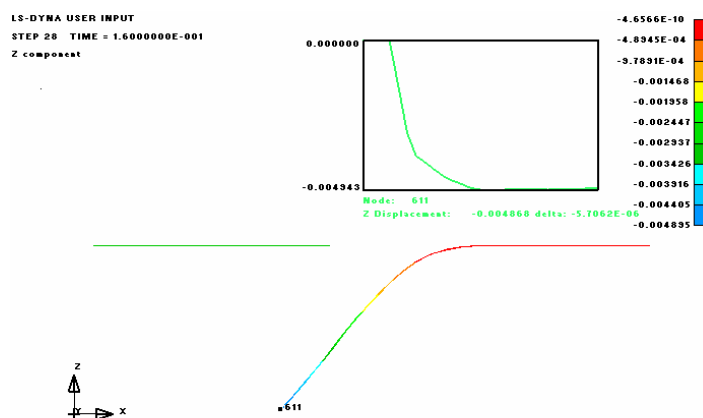


Figura 8: Resultados preliminares (MEF)

Foram realizadas algumas simulações numéricas que evidenciaram a redução do ângulo de retorno elástico com a diminuição do tamanho da peça, entretanto, comparando-se os resultados experimentais com os simulacionais percebe-se uma nítida diferença (as peças ensaiadas obtiveram um retorno elástico um pouco acima).

## 7. CONCLUSÕES

O estudo de fabricação de microcomponentes ainda não é muito difundido no Brasil assim, este trabalho procurou mostrar o quanto ainda pode ser desenvolvido nessa área que é tida como promissora em outros países. A importância de um melhor entendimento dos resultados obtidos através da conformação, no caso de microcomponentes, ficou nítida ao longo do texto, principalmente quanto aos aspectos microestruturais que precisam ser mais estudados e detalhados. A forte tendência da simulação numérica é uma grande aliada para quem quer desenvolver seus estudos nesse campo, porém mesmo sendo uma ferramenta em potencial é necessário ter bons conhecimentos a respeito da influência do atrito, assim como do efeito de borda, e da inclusão destes efeitos nas simulações MEF.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ 1]KOCANDA, A.; PREJS, T. - **The effect of miniaturization on the final geometry of the bent products** – Metal Forming 2000, Proc. of the 8<sup>th</sup> 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. 8<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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, Wirkflächen reibung, 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]BATALHA, G. F. & STIPKOVIC FILHO, M. – **Quantitative characterization of the surface topography of cold rolled sheets – new approaches and possibilities** – Journal of Materials Processing Technology, 113, (2001) 732-8.
- [14]**Textura e relações de orientação - Deformação plástica, recristalização, crescimento de grão** – epusp, dezembro de 2001
- [15] UNIVERSIDADE DE ERLANGEN. Disponível em <<http://www.lft.uni-erlangen.de>> Acesso em: 19 agosto de 2004.