

FLAVIA RENATA DANTAS ALVES SILVA
RENATO LUIZ LEHNERT PORTELA CERVEIRA

nota final
9.8 (muito bom)
ADM

INFLUÊNCIA DO EFEITO DE ESCALA NA CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
Título de Engenheiro

São Paulo
2004

**FLAVIA RENATA DANTAS ALVES SILVA
RENATO LUIZ LEHNERT PORTELA CERVEIRA**

INFLUÊNCIA DO EFEITO DE ESCALA NA CONFORMAÇÃO MECÂNICA

**Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
Título de Engenheiro**

**Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica**

**Professor Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha**

São Paulo

2004

FOLHA DE APROVAÇÃO

Eu, Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha, exercendo a função de Professor Orientador deste trabalho, informo que este Trabalho de Formatura está **APROVADO** para apresentação final perante a Banca Examinadora.

São Paulo, 3 de Dezembro de 2004.

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Renato Lehert
Flávia Aherlone

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha, pelo constante apoio e incentivo. À Prof. Dra. Larissa Driemeier pela constante ajuda.

Aos técnicos da oficina do PMR.

Aos colegas que colaboraram com a execução deste trabalho.

A todos aqueles, que direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem o intuito de 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. Procede-se inicialmente uma revisão bibliográfica dos estudos já realizados nessa área. Através de um software de simulação, será utilizado o método de elementos finitos (MEF) para o estudo das influências em questão.

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

ABSTRACT

The aim of this work is to study the differences of the effect of metal forming for macro and micro components, simulating and comparing with experimental procedures and the analytical theory. A bibliographical review is proceeded initially from the carried through studies already in this area. For this study of the influences in question it will be used a FEM simulation software.

Keywords: scale effect, size effect, forming, simulation, manufacturing.

SUMÁRIO

Lista de tabelas

Lista de figuras

1. <i>INTRODUÇÃO</i>	1
2. <i>APLICAÇÕES E LIMITES</i>	2
3. <i>PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO</i>	5
3.1. <i>Forjamento</i>	5
3.2. <i>Dobramento</i>	6
3.3. <i>Estampagem profunda ou embutimento</i>	6
3.4. <i>Cunhagem</i>	6
3.5. <i>“Blanking” e Puncionadora</i>	7
3.6. <i>Laminação</i>	7
3.7. <i>Trefilação</i>	8
3.8. <i>Extrusão</i>	9
4. <i>EFEITOS DA MINIATURIZAÇÃO</i>	10
4.1. <i>Efeito de escala</i>	10
4.2. <i>Visioplasticidade</i>	13
4.3. <i>Atrito</i>	14
4.4. <i>Temperatura</i>	15
4.5. <i>Tensão de escoamento</i>	16
5. <i>HETEROGENEIDADES MICROESTRUTURAIS E EFEITO ESCALA NA DEFORMAÇÃO E MICRO FABRICAÇÃO A FRIO</i>	18
5.1. <i>A camada superficial e subsuperficial encruada durante o processo de deformação e fabricação</i>	21
6. <i>MODELAGEM TEÓRICA</i>	22
6.1 <i>Introdução</i>	22
6.2 <i>Anisotropia</i>	22
6.3 <i>Equações Constitutivas</i>	24
7. <i>MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)</i>	30
7.1. <i>Conformação de metais e o Método de elementos finitos</i>	31
8. <i>RECALQUE DE ANEL</i>	32
8.1. <i>Determinação do coeficiente de atrito</i>	32
8.2. <i>Ensaios experimentais</i>	34
8.3. <i>Análise em MEF</i>	35
9. <i>Ensaios para análise da influência do efeito de escala no “springback”</i> ..38	38
9.1. <i>Concepção do primeiro dispositivo</i>	39
9.1.1. <i>Confecção dos corpos de prova</i>	41
9.1.2. <i>Ensaios experimentais</i>	41
9.1.3. <i>Simulação numérica 1- ADINA</i>	43
9.1.4. <i>Simulação numérica 2 – LS DYNA</i>	47

9.2. Confecção do 2º dispositivo	50
9.2.1. Confecção dos corpos de prova	51
9.2.2. Ensaios experimentais	52
9.2.3. Simulação numérica – LS DYNA – Parte 1	55
9.2.4. Simulação numérica – LS DYNA – Parte 2	65
10. CONCLUSÕES	74
11. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Exemplo de microcomponente	1
Figura 2 Problemas no mundo da micro conformação (Geiger et al.) {8}	2
Figura 3 Exemplos de microcomponentes e operações de microconformação a frio.....	4
Figura 4 (a) – Fundamentos da plasticidade em metais mono e poli cristalinos. (Messner 1998) {11} (b) Tensão cisalhante resolvida e (c) monocristal de Nb comprimido {7}.....	11
Figura 5 Relação diâmetro da peça e tamanho de grão e grãos na superfície. (Messner 1998) {11}.....	12
Figura 6 Vissiplasticidade: Influência da granulação (encruamento e recozimento) (a) distribuição mais uniforme da deformação no material encruado. (b) Distribuição não homogênea das deformações para material de granulação grosseira (Ekstein 2000 {5}).....	14
Figura 7 Efeito da miniaturização nas áreas de bolsões de lubrificantes abertos e fechados e sua influência sobre o atrito. (Tiesler 2000 {6})....	15
Figura 8 Eventos locais que influem na microestrutura dinâmica durante a deformação. {7}.....	18
Figura 9 Desenho esquemático de microestruturas no estado encruado em amostras após: (a)deformações intermediárias ($\varepsilon = 0,06-0,80$) b) grandes deformações ($\varepsilon > 1$). Adaptado de {5}.	19
Figura 10 (a) Ferro de tamanho de grão grosseiro com 40% de compressão. O eixo de compressão é normal ao papel. Atacada com nital. (b) O eixo de compressão das várias bandas matriz vistas no grão A, em uma amostra de ferro com 40% de compressão. {7}	19
Figura 11 Subestruturas formadas durante deformação plástica de aço e tabela com diferentes nomenclaturas para as estruturas 1 e 2. (1 – banda de deformação, 2 – microbandas, 3 – regiões de contorno de grão, 4 – regiões de inclusão). {7}	20
Figura 12 Efeito da intensidade de deformação (a) dureza HV de aço 2,3% Si a várias distâncias da superfície, uma lâmina de espessura 470 μm . (b) micrografia da superfície da amostra de aço 2%Si com 8% de alongamento. {7}.....	21
Figura 13 Anisotropia, superfície de escoamento (yield locus) e variação com a orientação e tipo de material.....	23
Figura 14 Fatores mecânicos e térmicos de similaridade usados na modelagem proposta por Messner 1998 {11}.....	32
Figura 15 Influência do fator de escala nas curvas de escoamento decrescentes {11}.....	33
Figura 16 medição do atrito em processos de micro conformação. (a) Fundamentos da avaliação do coeficiente de atrito pelo ensaio de recalque de anel. (b) influência da magnitude da área interfacial (pressão interfacial) sobre o coeficiente de atrito para os ensaios de recalque de anel e de extrusão indireta de copo usando fosfato de zinco e sabão. Segundo Burgdorf, Male & Cockcroft e Wagener{21}.	34

Figura 17 Ensaio de recalque de anéis – (a) resultados experimentais; (b) e (c) simulações preliminares	36
Figura 18 Novo modelo para o ensaio de anel	36
Figura 19 Atrito baixo ~ 0,10	37
Figura 20 Atrito zero	37
Figura 21 Atrito alto ~ 0,50	37
Figura 22 Forças de dobramento e limite de escoamento: efeito da miniaturização e do tamanho de grão. {5}	38
Figura 23 modelo para o ensaio de dobramento de microcomponentes	40
Figura 24 Dispositivo preliminar	40
Figura 25 Corpos de prova em 3 tamanhos em comparação com um dedo ..	41
Figura 26 Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 1	44
Figura 27 Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 1	44
Figura 28 Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 2	45
Figura 29 Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 2	45
Figura 30 Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 3	46
Figura 31 Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 3	46
Figura 32 Modelo discretizado em LS DYNA	47
Figura 33 Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 4	49
Figura 34 Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 4	49
Figura 35 Desenho em Microstation do segundo dispositivo	50
Figura 36 Foto do segundo dispositivo	50
Figura 37 Esboço do dispositivo final	51
Figura 38 Corpos de prova em tamanho reduzido	51
Figura 39 Fotos da simulação para a amostra do tipo 1 (a) termino da aplicação do deslocamento (b) retorno elástico	52
Figura 40 Fotos da simulação para a amostra do tipo 2 (a) termino da aplicação do deslocamento (b) retorno elástico	53
Figura 41 Fotos da simulação para a amostra do tipo 3 (a) termino da aplicação do deslocamento (b) retorno elástico	54
Figura 42 Fotos da simulação para a amostra do tipo 3 (a) termino da aplicação do deslocamento (b) retorno elástico	54
Figura 43 Deslocamento máximo para o modelo pouco discretizado do tipo ..	56
Figura 44 Retorno elástico para o modelo pouco discretizado do tipo 1	57
Figura 45 Deslocamento máximo para o modelo mais discretizado do tipo 1 ..	57
Figura 46 Retorno elástico para o modelo mais discretizado do tipo 1	58
Figura 47 Deslocamento máximo para o modelo pouco discretizado do tipo 2 ..	59
Figura 48 Retorno elástico para o modelo pouco discretizado do tipo 2	59
Figura 49 Deslocamento máximo para o modelo mais discretizado do tipo 2 ..	60
Figura 50 Retorno elástico para o modelo mais discretizado do tipo 2	60
Figura 51 Deslocamento máximo para o modelo pouco discretizado do tipo 3 ..	61
Figura 52 Retorno elástico para o modelo pouco discretizado do tipo 3	61
Figura 53 Deslocamento máximo para o modelo mais discretizado do tipo 3 ..	62
Figura 54 Retorno elástico para o modelo mais discretizado do tipo 3	62
Figura 55 Deslocamento máximo para o modelo pouco discretizado do tipo 4 ..	63

Figura 56 Retorno elástico para o modelo pouco discretizado do tipo 4	64
Figura 57 Deslocamento máximo para o modelo mais discretizado do tipo 4	64
Figura 58 Retorno elástico para o modelo mais discretizado do tipo 4	65
Figura 59 Foto das amostras após ensaio experimental.....	65
Figura 60 Deslocamento máximo para o modelo do tipo 1.....	67
Figura 61 Deslocamento máximo para o modelo do tipo 2.....	68
Figura 62 Retorno elástico para o modelo do tipo 2	68
Figura 63 Deslocamento máximo para o modelo do tipo 3.....	69
Figura 64 Retorno elástico para o modelo do tipo 3	70
Figura 65 Deslocamento máximo para o modelo do tipo 3.....	71
Figura 66 Retorno elástico para o modelo do tipo 3	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Cálculo do atrito	35
Tabela 2 Primeiro ensaio de dobramento	41
Tabela 3 2º ensaio de dobramento	42
Tabela 4 Propriedades do latão vermelho	43
Tabela 5 Curva de deslocamento do punção.....	48
Tabela 6 Resultados do ensaio para amostra do tipo 1	52
Tabela 7 Resultados do ensaio para amostra do tipo 2	53
Tabela 8 Resultados do ensaio para amostra do tipo 3	53
Tabela 9 Resultados do ensaio para amostra do tipo 4	54
Tabela 10 Curva de deslocamento do punção.....	56
Tabela 11 Curva de deslocamento do punção.....	66
Tabela 12 retorno elástico para a amostra 2	67
Tabela 13 retorno elástico para a amostra 2	69
Tabela 14 retorno elástico para a amostra 3	70
Tabela 15 retorno elástico para a amostra 4	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

mm	milímetro
μm	micrômetro
MEF	Método de Elementos Finitos
CI	Círculo integrado
η	eficiência
k_{fm}	média da tensão de escoamento
$c_{p\rho}$	capacidade calorífica
ΔT	variação de temperatura
α_{fs}	grãos de superfície
α_i	grãos internos
E	módulo de elasticidade
v	coeficiente de Poisson
L_0	comprimento inicial
A_0	seção transversal
F	força
σ	tensão verdadeira
$\sigma_{f,TS}$	tensão de escoamento
σ_r	tensão plástica
ε	deformação
ε_p	deformação plástica permanente
ε^e	tensor de deformação elástica
$\varepsilon^{\text{total}}$	deformação total
$\dot{\varepsilon}^p$	incremento de deformação plástica
λ	Parâmetro escalar
G	módulo de cisalhamento
L	constante de Lamé
T	tensor de escoamento de quarta ordem

1. INTRODUÇÃO

A última década apresentou um grande salto na pesquisa e aplicação de microcomponentes. O fruto desse desenvolvimento pode ser visto em produtos populares como câmeras fotográficas embutidas em aparelhos celulares, 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.

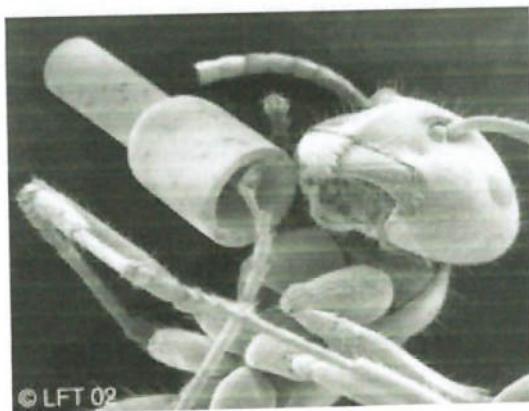


Figura 1 Exemplo de microcomponente {8}

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 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}.

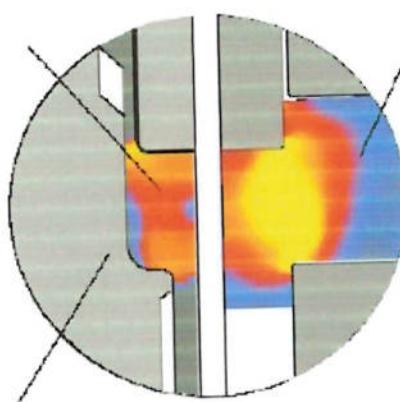
Um dos maiores problemas ainda enfrentados no processo de miniaturização é que a tecnologia conhecida e estabelecida para macrocomponentes não pode ser proporcionalmente escalonada e aplicada para micropeças. A figura 2 evidencia os principais problemas a serem tratados no trabalho com micropeças. Além 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 {3}.

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 no mundo da micro conformação (Geiger et al.) {8}

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. Na Figura 3 podemos ver algumas das aplicações resultantes da microconformação a frio.

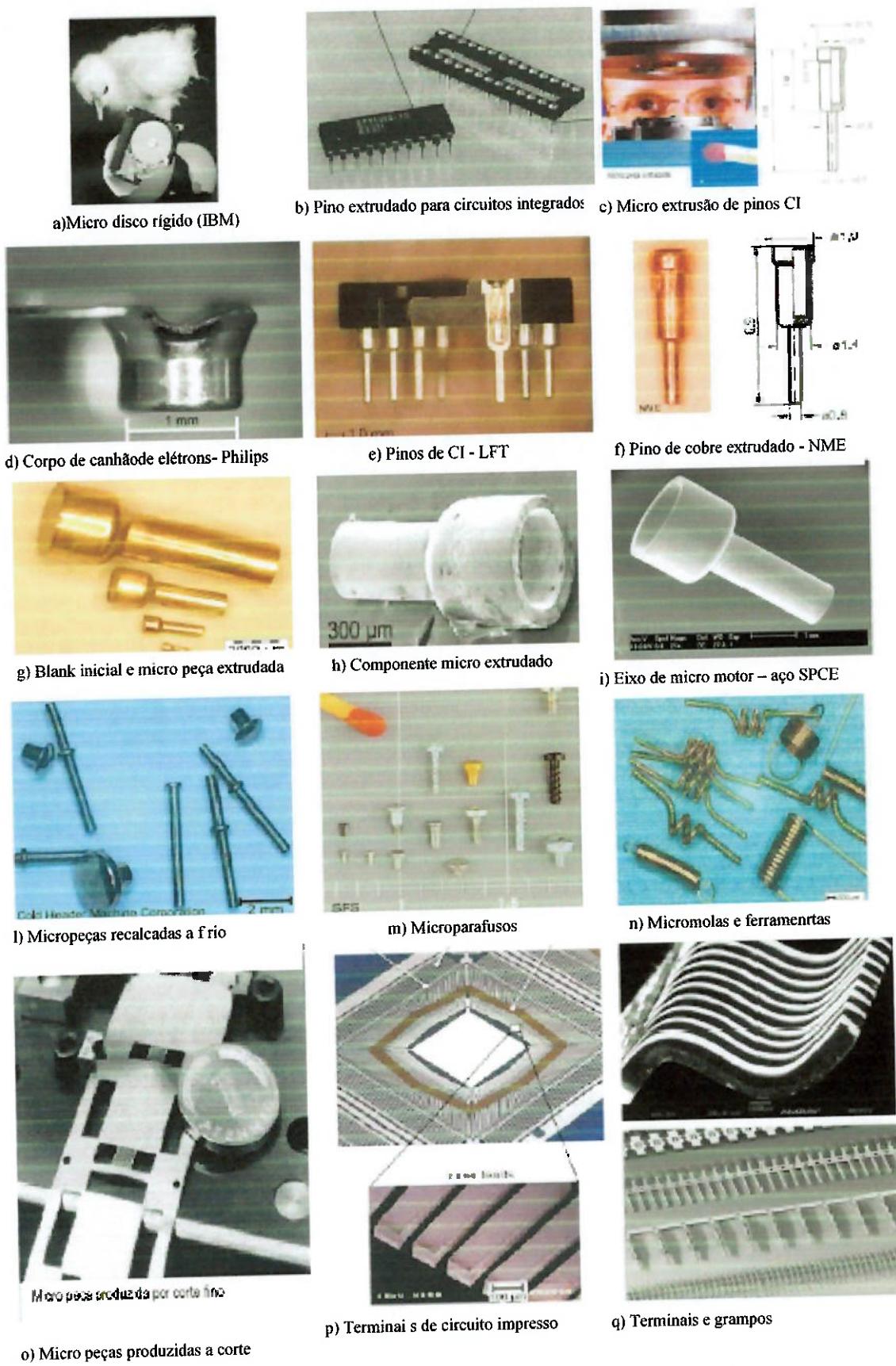


Figura 3 Exemplos de microcomponentes e operações de microconformação a frio.

3. PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

A conformação de metais é a modificação de um corpo metálico para outra forma definida. Nos processos mecânicos de conformação plástica as tensões aplicadas geralmente são inferiores ao limite de resistência à ruptura do material e nos processos de conformação por usinagem as tensões aplicadas são sempre superiores a esse limite. Uma vantagem dos processos de conformação de materiais é a possibilidade de obtenção de peças no estado sólido, com características controladas.{16}

3.1. Forjamento

Forjamento é o processo através do qual se obtém a forma desejada da peça por martelamento ou aplicação gradativa de uma pressão. As peças podem ser forjadas a frio ou a quente. Além de dar forma a peça, esse processo 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. {16}

Existem duas classes principais de equipamentos de forjamento: os martelos e as prensas. Os martelos provocam deformação do metal por impacto enquanto as prensas submetem o metal a uma força de compressão a baixa velocidade. O processo de forjamento é dividido em dois tipos: forjamento livre (matriz aberta) ou forjamento em matriz fechada. Para peças de tamanho reduzido é mais comumente utilizado o método de forjamento em matriz fechada.

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. Através dos resultados descritos na seção 4.3, esse efeito pode ser explicado pelo aumento do atrito.{8}

Os resultados desses testes para partes pequenas mostram quantitativamente a mesma tendência, mas com uma certa variação. Isso pode ser explicado pela dispersão dos testes de atrito e de extrusão, realizados apenas para amostras pequenas.

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 a previsão do esforço resultante necessário à conformação e dos esforços nos pontos críticos que podem conduzir à ruptura da peça na conformação.

Simplificadamente, 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. No estudo do efeito de escala, uma das maiores oportunidades é descobrir o ângulo de retorno ou “springback”

3.3. Estampagem profunda ou embutimento

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.

3.4. Cunhagem

O processo de cunhagem é importante no estudo de efeitos de conformação de microcomponentes devido a sua alta precisão e alta eficiência. O início do escoamento plástico é independente da posição radial do furo e do diâmetro.

Dessa maneira, a posição radial dos furos mostra clara influência na altura das microprojeções, dependendo do tamanho do furo. Para diâmetros maiores, a maior projeção é obtida no centro da moeda, apesar do segundo pico de altura aparecer quando o diâmetro é pequeno. Microprojeções de diâmetros médios mostram distribuição de altura. Esse efeito é explicado pelo escorregamento relativo. {8} Muitos estudos estão sendo feitos nessa área a fim de verificar se essa tecnologia pode ser usada para manufatura de microestruturas com geometria definida para aplicações no campo de micro fluidos e tecnologia de reatores, micro ótica e tecnologia da informação.

3.5. “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.{8} A acurácia diminui com altas velocidades do processo de “blanking”, devido às vibrações do conjunto.

3.6. Laminação

O processo de laminação consiste na passagem de um corpo sólido entre dois cilindros que giram à mesma velocidade periférica, porém em sentidos opostos. A passagem da peça pelos cilindros ocorre através da força de atrito que atua na superfície de contato entre a peça e os cilindros. Essa força é proporcional ao coeficiente de atrito entre peça e cilindro e à força normal na superfície de contato. A força normal dividida pela área da superfície de contato é a pressão exercida pelos cilindros que, por sua vez, resulta da resistência à deformação plástica do material da peça nas condições de processamento (temperatura e velocidade de trabalho). {16}

O processo de laminação pode ser feito a frio ou a quente, de acordo com as dimensões da peça e da estrutura do material. A laminação a quente é

utilizada quando são necessárias grandes reduções de secções transversais, e sua temperatura de trabalho está acima da temperatura de recristalização do material, a fim de reduzir a resistência à deformação plástica em cada passagem e permitir a recuperação da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subsequentes. Já a laminação a frio é aplicada em operações finais ou de acabamento, tendo a temperatura ambiente como temperatura de trabalho. Por estar abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação. Pode ser necessário um tratamento térmico de recozimento, entre uma e outra sequência de passes, a fim de manter as propriedades do produto final.{16}

3.7. Trefilação

Processo que conduz o fio (ou barra ou tubo), através de uma ferramenta denominada fieira, de formato externo cilíndrico e que contém um furo em seu centro, por onde passa o fio. Esse furo, com diâmetro decrescente, apresenta um perfil na forma de funil curvo ou cônico.

A operação é realizada a frio, provocando encruamento com alteração das propriedades mecânicas do material do fio, ou seja, reduzindo sua ductilidade e aumentando sua resistência mecânica.

Entre as diversas etapas de trefilação, pode-se tornar necessário o recozimento a fim de alcançar a ductilidade desejada. Na trefilação de fios, apesar do trabalho ser realizado a frio, as temperaturas no local da ferramenta podem se elevar consideravelmente em função das condições de atrito e da velocidade de trabalho, alterando consideravelmente as propriedades mecânicas do material sob deformação e as condições de escoamento.{16}

As pequenas dimensões do fio dificultam a observação dos modos de escoamento pelos métodos visuais de traçado de riscos em secções longitudinais.

3.8. Extrusão

A extrusão consiste na passagem de um lingote ou tarugo pela abertura existente no meio de uma ferramenta, colocada na extremidade do recipiente, por meio da ação de compressão de um pistão acionado pneumática ou hidraulicamente.

Durante o processo ocorre deformação plástica mas sem efeito de encruamento, uma vez que a temperatura de trabalho está acima da de recristalização do material. Comumente, para obter perfis metálicos com propriedades mecânicas controladas e de comprimento limitado, o processo é realizado a quente.

4. EFEITOS DA MINIATURIZAÇÃO

Na análise da microestrutura de um material conformado, os fatores mais importantes do estudo são: a tensão de escoamento bem como a conformabilidade em várias direções ou anisotropia. Para uma dada microestrutura, a tensão de escoamento é expressa como uma função da deformação, taxa de deformação e temperatura. Para determinar essa relação é necessário fazer testes de torção, compressão e compressão axissimétrica uniforme.

A conformabilidade é a capacidade do material se deformar sem falhas, ou seja, depende das condições existentes durante o processo de deformação como temperatura, taxa de deformação, tensão, histórico de carregamento e das variáveis do material como composição e microestrutura inicial. {17} A seguir estão listados os principais fatores que influenciam a conformação de elementos que sofrem redução de escala.

4.1. Efeito de escala

Efeito de escala é o fenômeno que descreve a diferença de comportamento de um material em um processo de conformação, cuja escala foi diminuída. O estudo desse efeito é importante uma vez que essa redução implica em um aumento na importância da microestrutura do material {1,3}, e requer muitos experimentos, sendo necessário utilizar as leis da Teoria de similaridade a fim de obter processos geometricamente similares, porém, com tamanhos diferentes. {6}

Quando tamanho da peça de trabalho é muito pequeno, o estudo da microestrutura é muito importante, especialmente o tamanho do grão. Na figura 4 é mostrada a diferença entre um material monocristalino e um policristalino. É possível distinguir dois diferentes tipos de grãos dentro do volume da micropeça de material policristalino: os grãos internos e os grãos da superfície. Os grãos internos são rodeados pelos grãos externos que estão localizados próximos aos grãos da superfície livre do componente, que

são chamados de grãos de superfície. A parcela de grãos da superfície e os grãos internos podem ser nomeados por α_{fs} e α_i respectivamente. {1, 4}.

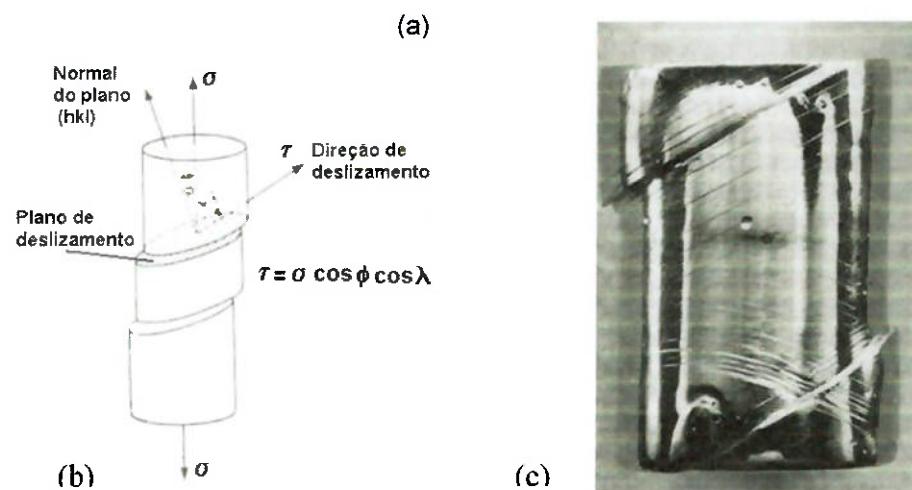
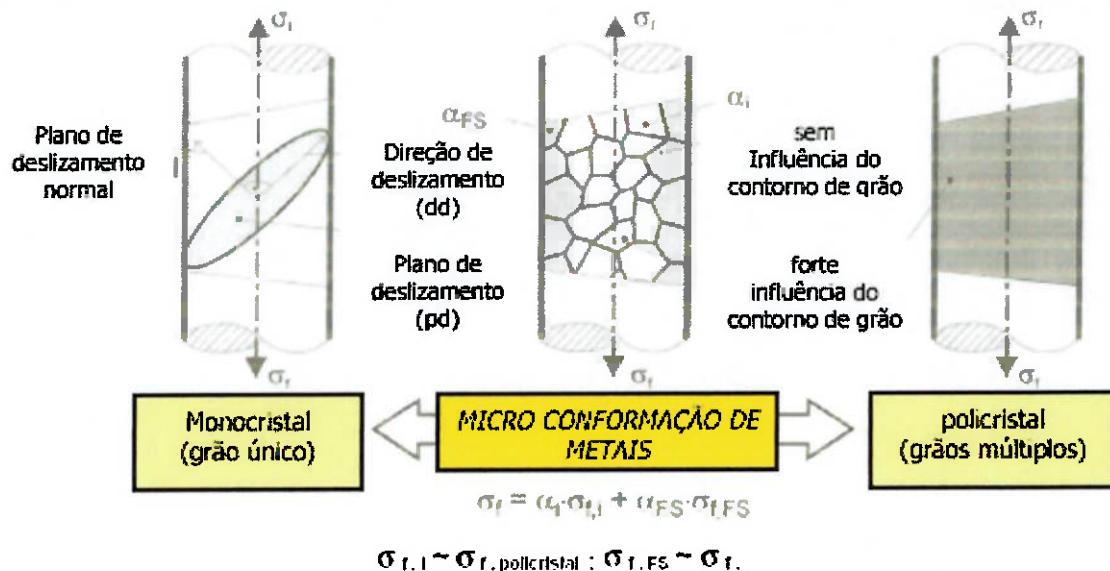


Figura 4 (a) – Fundamentos da plasticidade em metais mono e poli cristalinos. (Messner 1998) {11} (b) Tensão cisalhante resolvida e (c) monocristal de Nb comprimido {7}.

No caso convencional onde a dimensão do componente é muito maior que o tamanho do grão (estrutura polycristalina) não há influência dos grãos externos na deformação. Porém, com a redução da escala, um número crescente de grãos internos passa a ser grãos de superfície, influenciando o aumento de tensão no material. Consequentemente a deformação plástica dos grãos internos pode ser comparada à deformação plástica de um material polycristalino considerando que o comportamento de um único cristal

pode ser aplicado a outros grãos. Finalmente é possível reduzir o elemento até que haja apenas um grão no interior de seu volume. {4, 5}.

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. {6}. 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. {11}.

Na figura 5 podemos ver a variação da influência dos grãos de superfície com a redução do tamanho da peça, evidenciando assim a importância da microestrutura quando se trabalha com microcomponentes e também com o aumento do tamanho do grão.

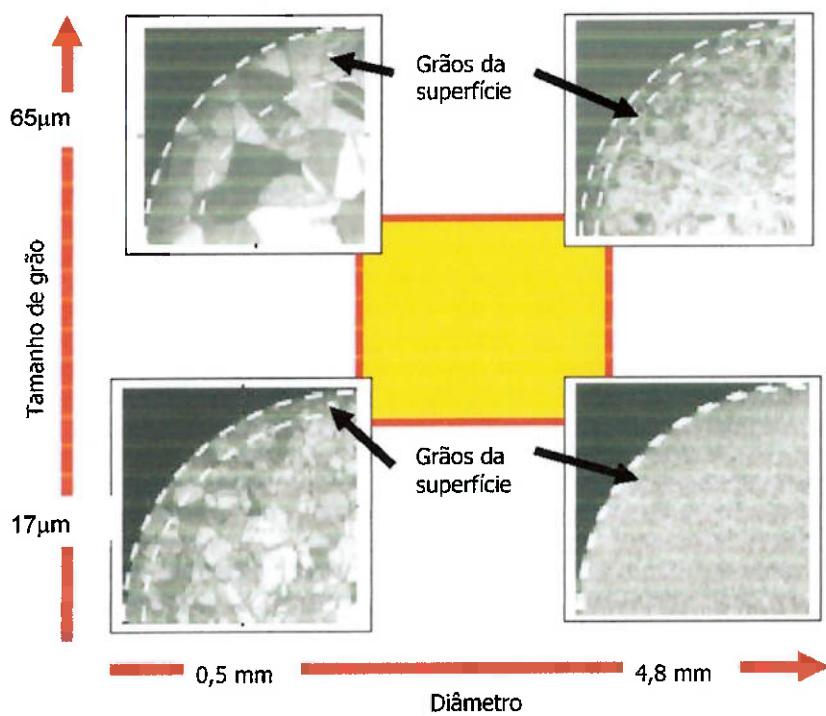


Figura 5 Relação diâmetro da peça e tamanho de grão e grãos na superfície. (Messner 1998) {11}

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.

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. {11}

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 {8}.

No que diz respeito ao processo de microconformação, dobramento e corte “blanking” ainda estão 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. {8} 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 é menor, cada grão será deformado de acordo com o formato da ferramenta, não considerando a orientação não favorável. A figura 6 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.

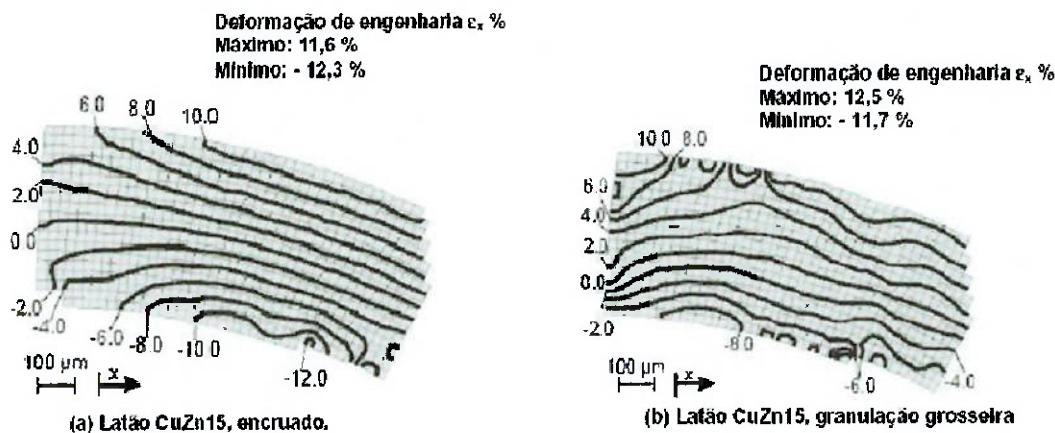


Figura 6 Visioplastidade: Influência da granulação (encruamento e recozimento) (a) distribuição mais uniforme da deformação no material encruado. (b) Distribuição não homogênea das deformações para material de granulação grosseira (Ekstein 2000 {5}).

4.3. Atrito

O atrito é definido como resistência ao movimento relativo entre dois corpos em contato, abaixo da carga aplicada normalmente. Devido ao impedimento do movimento livre entre as superfícies, podem ocorrer escoamento e deformação de materiais durante o processo de fabricação.

As condições de atrito influenciam o escoamento do material, a formação da superfície e os defeitos internos, a ação das tensões e a carga e a energia requerida no processo. Uma maneira de expressar quantitativamente o atrito é através do coeficiente μ ou do coeficiente de atrito m . Existem vários métodos de determinação de atrito, porém os mais utilizados são os testes de recalque de anéis por conformação, onde ocorre um aumento no atrito com a redução do tamanho do elemento {8,17}

A mudança de condições no atrito com a redução do tamanho do elemento pode ser diretamente determinada comparativamente, o que significa um aumento no atrito com a diminuição do elemento {6}. Na figura 7 podemos ver o efeito causado pela miniaturização nos bolsões de lubrificantes, assim como sua influência no atrito {19-21}.

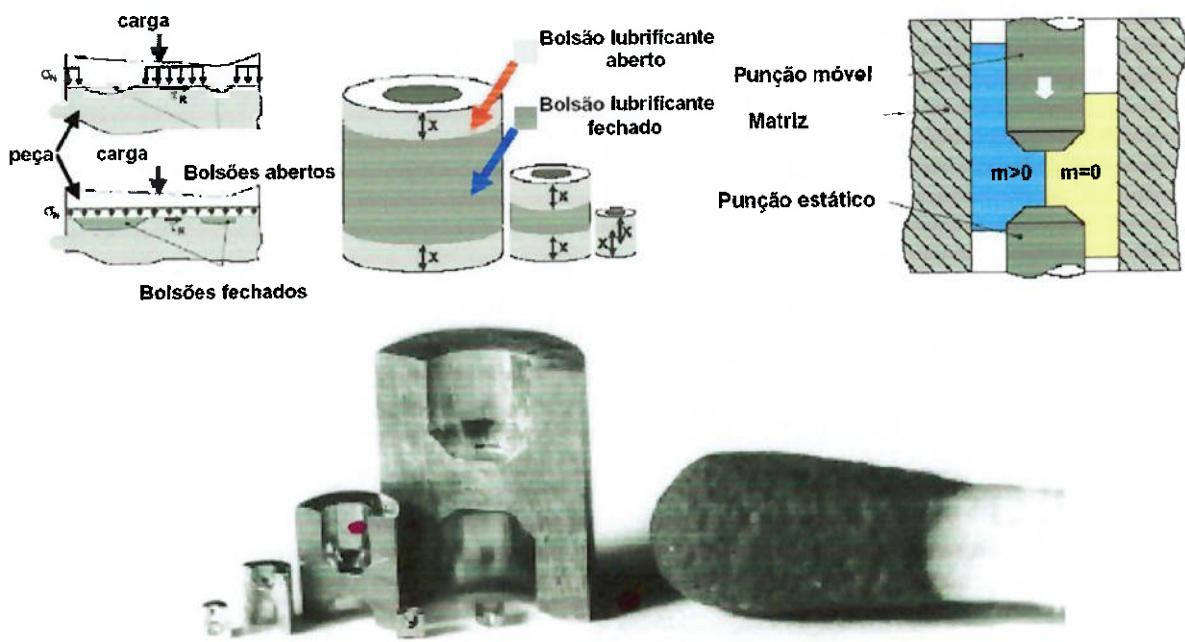


Figura 7 Efeito da miniaturização nas áreas de bolsões de lubrificantes abertos e fechados e sua influência sobre o atrito. (Tiesler 2000 {6})

4.4. Temperatura

No processo de conformação, a deformação plástica como o atrito são os principais responsáveis pela geração de calor. Aproximadamente 90-95% da energia mecânica envolvida no processo é transformada em calor. As temperaturas desenvolvidas no processo influenciam as condições de lubrificação, vida da ferramenta, propriedades do produto final, e mais显著mente a máxima velocidade de deformação que não causa grandes danos à ferramenta.

A magnitude e a distribuição de temperaturas dependem principalmente dos seguintes fatores:

- 1) Temperatura inicial do material e da ferramenta;
- 2) Geração de calor causada pela deformação plástica do material e pelo atrito;
- 3) Transferência de calor entre o material deformado e a ferramenta e entre o material e o meio ambiente.

O aquecimento isotérmico muda as propriedades do material e provavelmente o comportamento no 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 dada pela eficiência η , pela média de tensão de escoamento k_{fm} , força real e capacidade de calor C_p

$$\Delta T = k_{fm} \phi / \eta C_p \rho \quad (4.1)$$

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 influencia sobre o campo de temperatura. Porém esse modelo não é válido para amostras muito finas. Para amostras finas o gradiente de temperatura será menor quando a espessura ficar menor também. {3}

4.5. Tensão de escoamento

No processo de conformação mecânica a tensão de escoamento σ_f é importante, pois as cargas de conformação e as tensões dependem da geometria da peça, do atrito e da tensão de escoamento. Dentre outros fatores, a tensão de escoamento de um metal é influenciada por:

- 1) Fatores não relacionados com o processo de deformação como a composição química, estrutura, fase, tamanho de grão, segregação e histórico de forças.
- 2) Fatores explicitamente relacionados com o processo de deformação como a temperatura, grau de deformação e taxa de deformação.

Assim a tensão de escoamento pode ser expressa em função da temperatura, microestrutura, deformação e taxa de deformação.

$$\sigma_f = f(T, \varepsilon, \varepsilon_r, S) \quad (4.2)$$

Em conformação de metais a quente, com temperaturas abaixo da temperatura de recristalização, a influência de deformação na tensão de escoamento é insignificante, e a influência da taxa de deformação começa a ser importante.

Já na conformação a frio, a influência da taxa de deformação na tensão de escoamento é desprezível e o efeito de deformação é mais importante. O grau de dependência entre a tensão de escoamento e a temperatura varia consideravelmente de material para material.

5. HETEROGENEIDADES MICROESTRUTURAIS E EFEITO ESCALA NA DEFORMAÇÃO E MICRO FABRICAÇÃO A FRIO

Diversos eventos locais influem na microestrutura dinâmica durante a deformação, resultando em uma heterogeneidade da deformação importante para o estudo do efeito de escala durante a miniaturização dos processos de fabricação na microconformação ou microusinagem.

A heterogeneidade da deformação foi reconhecida primeiramente por Barrett (1939), que argumentou que heterogeneidades desse tipo contribuíam para a inabilidade de prever o comportamento do encruamento e das mudanças de orientação durante a deformação. Seguindo aquele autor, os grãos deformados subdividem-se em regiões dentro das quais a orientação cristalina é constante, mas é significativamente diferente da orientação presente em qualquer outra região naquele grão. Barrett chamou essas regiões de “bandas de deformação”.{6}

Estudos da década de 60 mostram o efeito da deformação na microestrutura de monocristais. Observou-se uma rotação de partes do monocristal em relação à normal ao plano da chapa formando estruturas de discordâncias como bandas de transição, bandas de deformação e microbandas (figuras 8 e 9). Alguns autores costumam identificar diferenças mais sutis entre microbandas, paredes com alta densidade de discordâncias (“dense dislocation walls”), blocos de células e outros em estruturas vistas em metais cúbicos de face centrada CFC.

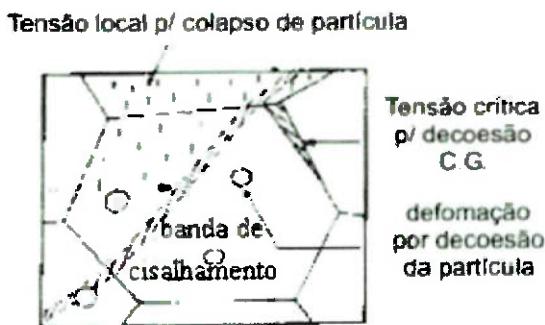


Figura 8 Eventos locais que influem na microestrutura dinâmica durante a deformação. {7}

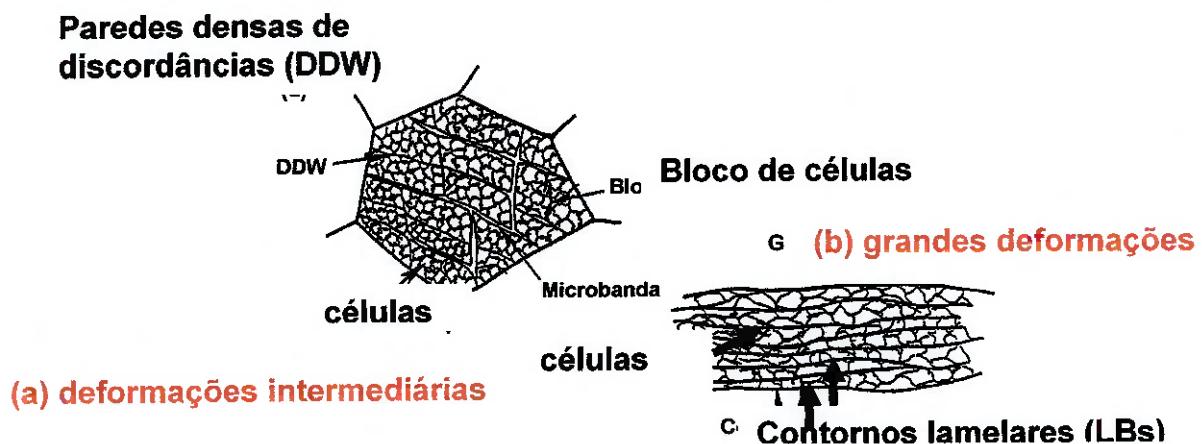


Figura 9 Desenho esquemático de microestruturas no estado encruado em amostras após: (a) deformações intermediárias ($\epsilon = 0,06-0,80$) b) grandes deformações ($\epsilon > 1$). Adaptado de {5}.

De acordo com Walter e Koch {7}, 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. Doherty {7} mostrou que dentro de um único grão de um material policristalino deformado plasticamente pode haver várias bandas de deformação, as chamadas “bandas-matriz”. A Figura 10 mostra que as bandas A1, A2, A3 e A5, apesar de espacialmente separadas, têm orientação bem semelhante, próximas de {100}, enquanto as bandas A2 e A4 estão próximas de {111} e A6 de {411}; as linhas escuras entre as bandas seriam as bandas de transição.

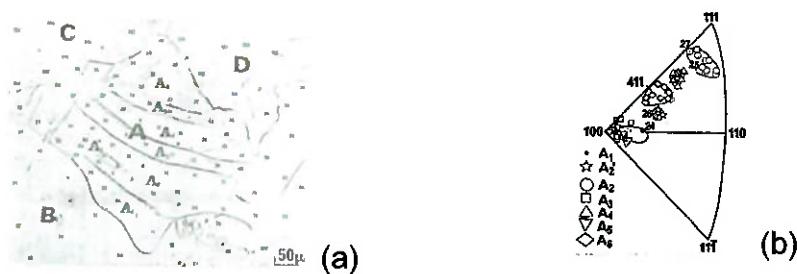


Figura 10 (a) Ferro de tamanho de grão grosso com 40% de compressão. O eixo de compressão é normal ao papel. Atacada com nital. (b) O eixo de compressão das várias bandas matriz vistas no grão A, em uma amostra de ferro com 40% de compressão. {7}

Outro termo encontrado é banda de cisalhamento intragranular (“in-grain shear bands”). Essas bandas de cisalhamento dentro dos grãos são muito similares às encontradas em materiais deformados observados por microscopia óptica ou eletrônica de varredura. No extremo da complicação de nomes, alguns autores usam o mesmo termo para evidências diversas. Visando sistematizar algumas das diferenças de nomenclatura, partiu-se de esboço de Gorelik {7}, que ilustra algumas diferentes estruturas formadas no interior dos grãos durante a deformação plástica.

É provável que a subestrutura seja mais complexa do que a esquematizada na Figura 11, podendo haver mais de um tipo de microbandas. A tabela da figura 11 compara a nomenclatura adotada por diversos autores para as regiões 1 e 2 da figura anterior. A microscopia óptica permite identificar o surgimento de linhas inclinadas a aproximadamente 30 a 45° da direção de laminação (provavelmente associadas às bandas de transição anteriormente descritas) com aproximadamente 20% de deformação.

Autor	Região 1	Região 2
Gorelik	Banda de deformação	Microbanda
Walter e Koch	Banda de deformação	Banda de transição
Dillamore, Morris, Smith, Hutchinson	Banda de deformação	Banda de transição
Doherty	Banda matriz	Banda de deformação
Hu	Banda matriz	Microbanda
Hansen e Bay	Bloco de células	Microbandas de 1 ^a e 2 ^a geração
Barnett e Jonas		Banda cisalhamento intragranular

Figura 11 Subestruturas formadas durante deformação plástica de aço e tabela com diferentes nomenclaturas para as estruturas 1 e 2. (1 – banda de deformação, 2 – microbandas, 3 – regiões de contorno de grão, 4 – regiões de inclusão). {7}

5.1. A camada superficial e subsuperficial encruada durante o processo de deformação e fabricação

A lamination de encruamento ("temper rolling" ou "skin pass") é aplicada com o objetivo principal de condicionar a microestrutura para obter tamanho de grão da ordem de 100-150 μm após o recozimento final. Para isso, aplica-se uma deformação de 4 a 8 %. Um nível de deformação onde as discordâncias já estão formando um emaranhado, mas ainda não formaram células. Não obstante, a expressão "skin pass" levar-se a imaginar que a deformação se concentraria apenas na superfície da peça, existem evidências de que, no recozimento posterior, a recristalização inicia-se um pouco mais cedo na superfície, sinalizando que o encruamento seria um pouco maior na superfície, sendo, porém esta diferença mínima.

A Figura 12 mostra que mesmo uma deformação de apenas 0,5% penetra em toda a espessura da chapa. A variação da dureza HV (carga de 50g), com o grau de deformação, em diferentes distâncias a partir da superfície da chapa é menor que a incerteza da medida, na faixa de 5 unidades Vickers. Tampouco se vê, por microscopia óptica, qualquer evidência de um encruamento na superfície da chapa. Nota-se que o aumento da deformação aumenta continuamente a dureza em toda a espessura da lâmina. Messner {8} também destaca a importância desta camada superficial no estudo do efeito de escala na modelagem microestrutural, conforme ilustrado na figura 12.

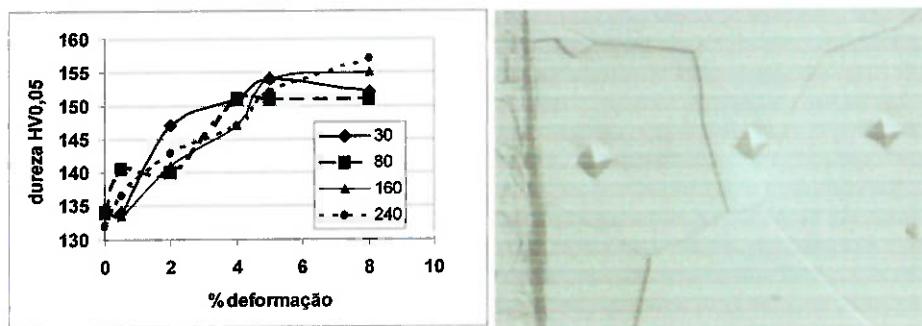


Figura 12 Efeito da intensidade de deformação (a) dureza HV de aço 2,3% Si a várias distâncias da superfície, uma lâmina de espessura 470 μm). (b) micrografia da superfície da amostra de aço 2%Si com 8% de alongamento. {7}

6. MODELAGEM TEÓRICA

6.1 *Introdução*

Quando se pretende estudar processos que envolvam conformação ou deformação de algum material é muito importante que se entenda e se conheça o ponto em que ocorre a passagem de deformação elástica para plástica uma vez que deve ocorrer deformação plástica do material para que este seja conformado, para tanto, os critérios de escoamento são de enorme utilidade {12,13,14,15}.

Quando submetido à tensão um corpo começa a se deformar. Enquanto estiver ocorrendo deformação elástica, o corpo sob tensão retorna ao seu estado inicial caso a tensão seja removida. Nessa zona de deformação a tensão e a deformação estão relacionadas por constantes elásticas, usualmente E e v (Lei de Hooke). Para causar deformação plástica, um nível particular de tensão deve ser alcançado; essa é a chamada tensão de escoamento. Para a maioria dos materiais dúcteis, tanto a extensão da deformação como a mudança na forma do corpo, no estado inicial, podem continuar até um grau elevado antes do rompimento, caso a tensão que causou o escoamento inicial for continuamente aumentada.

6.2 *Anisotropia*

Antes que sejam apresentados critérios de escoamento é importante que se entenda o que é anisotropia e como ela é importante na conformação de metais. A anisotropia plástica representa a variação das propriedades mecânicas em função da direção em que as mesmas estão sendo medidas {12,13}.

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, pois é a laminação que alinha 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, pois assim ela é responsável pela variação de espessura e pela formação de "orelhas" no caso, por exemplo, da estampagem profunda (Figura 13) {12}. Valores elevados de anisotropia significam menos instabilidade plástica, por esse motivo valores altos são preferencialmente utilizados para que se possa aumentar a capacidade de deformação na largura com reduções pequenas na espessura. A equação para a determinação da anisotropia será apresentada a seguir bem como algumas de suas funções e importância.

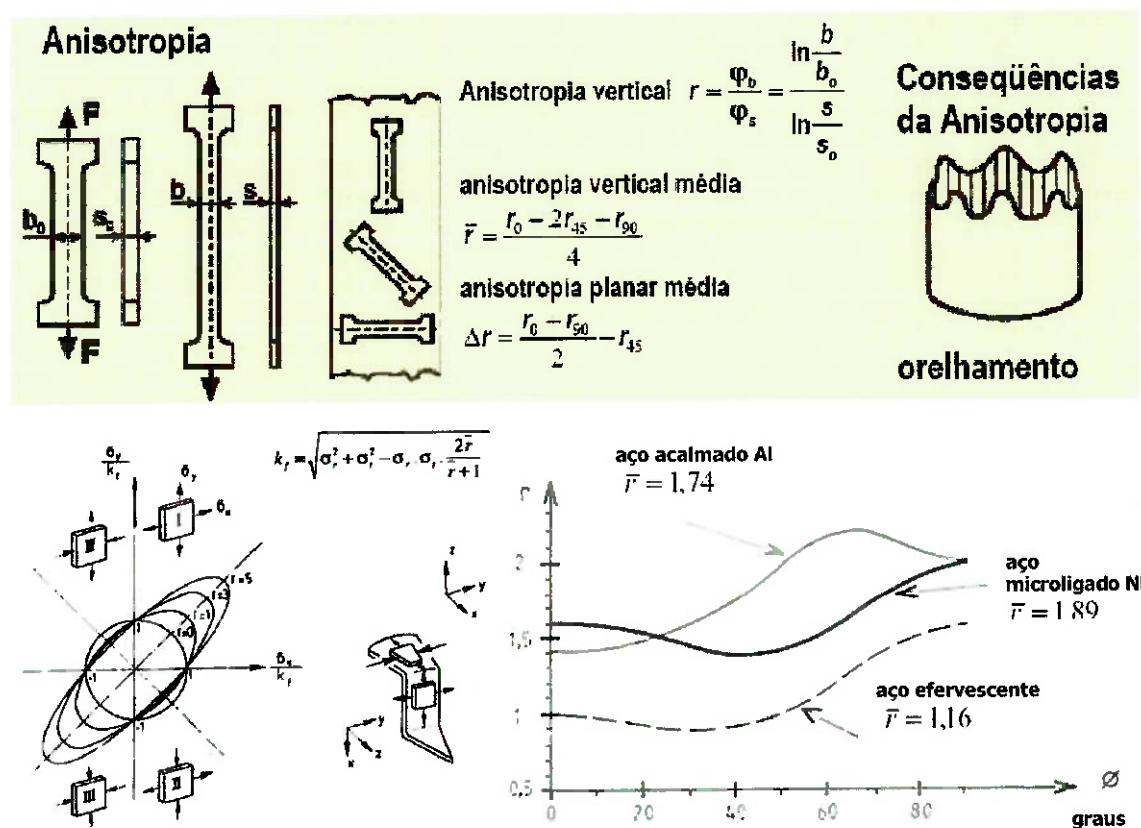


Figura 13 Anisotropia, superfície de escoamento (yield locus) e variação com a orientação e tipo de material.

6.3 Equações Constitutivas

Diferentes materiais se comportam diferentemente sob o mesmo carregamento externo. Para descrever o comportamento surge a necessidade de uma conexão entre as deformações e as tensões em um meio. Essas relações são chamadas de equações constitutivas.

O ensaio de tração uniaxial é um dos testes mais simples para se estudar o comportamento dos esforços e tensões no material durante a conformação do material. Um corpo de prova com comprimento L_0 e uma seção transversal A_0 é sujeito a uma força F . Com isso pode-se traçar uma curva de ductilidade, que demonstra a relação entre a tensão verdadeira σ e a deformação em escala natural ou logarítmica ε até a ruptura do material.

Caso retire-se a força e o material retorne ao seu estado inicial, o comportamento é dito elástico ou reversível. Para a maioria dos metais o comportamento elástico é linear. Portanto, vale a Lei de Hook entre tensão e deformação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.1)$$

Sendo E o módulo de Elasticidade ou de Young. Para certo valor de deformação a tensão de escoamento é atingida. A partir desse ponto o comportamento do material se torna plástico ou irreversível, ou seja, o estado inicial não é mais atingido com a retirada da carga; esse é o ponto que interessa para a conformação de materiais, onde é necessária uma deformação permanente.

A partir da tensão de escoamento a inclinação da curva muda consideravelmente e começa a formar uma parábola. A retirada do carregamento que age no corpo de prova na zona plástica, resulta em uma deformação plástica permanente ε_p . A inclinação da curva durante o alívio de carga é assumida como sendo o mesmo que o da zona elástica, o módulo de Young é assumido como sendo constante.

Assim, as deformações plásticas não afetam as propriedades elásticas do material. Essa é a base da teoria da plasticidade. A deformação total é decomposta em uma componente elástica e outra plástica:

$$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (6.2)$$

Para a maioria dos materiais de engenharia um aumento de tensão é encontrado para deformação contínua. Quando, após o alívio de carga, o material é novamente submetido ao carregamento a partir de ε_p a plasticidade reinicia em um ponto anterior à tensão plástica σ_r . Após alguma deformação a curva se reaproxima da curva que seria encontrada sem que houvesse o alívio de carga.

A restrição do teste de ductilidade é que ele é um teste uniaxial, e estado de tensões multiaxiais não podem ser ilustrados por uma simples curva de tensão-deformação. Uma formulação matemática para o comportamento multiaxial do material é dada abaixo.

Na elasticidade linear é usada a lei de Hooke. Neste caso, o tensor de tensão σ e tensor reduzido de deformação elástica ε^e estão relacionados pelo tensor de elasticidade de quarta ordem E . Quando os tensores de tensão e de deformação são escritos como vetor:

$$\sigma = E \div \varepsilon^e \quad (6.3)$$

e se o tensor de elasticidade é escrito como uma matriz a seguinte expressão para material ortotrópico é encontrada:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2G+l & l & l & 0 & 0 & 0 \\ l & 2G+l & l & 0 & 0 & 0 \\ l & l & 2G+l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{E}{2(l+\nu)} \quad (6.4)$$

Com G = módulo de rigidez ou de cisalhamento. e L =: constante de Lamé. Ambos os parâmetros podem ser expressos pelo módulo de elasticidade E e pelo coeficiente de Poisson ν :

(6.5)

$$l = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

Após carga adicional o comportamento do material se torna plástico. O tensor de deformação total se divide em um componente elástico e outro plástico.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (6.6)$$

A substituição do tensor de deformação elástica ϵ^e na lei de Hooke e derivando em relação ao tempo chega-se a :

$$\dot{\sigma} = E \div (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^p) \quad (6.7)$$

Com o objetivo de distinguir a deformação plástica em um estado de tensão multiaxial é definida uma função de escoamento. A função de escoamento depende das tensões e da deformação plástica acumulada. A deformação plástica ocorre quando $\phi = 0$; na região elástica $\phi < 0$.

O postulado de Drucker diz que para um elemento de volume material qualquer ciclo completo no espaço da tensão requer uma energia não

negativa. O postulado vale para todo incremento de deformação plástica, independente de quão pequeno ele é. O postulado pode ser escrito como:

$$(\sigma - \sigma_0) \dot{\varepsilon}^p \geq 0 \quad (6.8)$$

$$\phi = \phi(\sigma, \lambda) \quad (6.9)$$

Nessa equação σ_0 é o estado inicial de tensão, σ é um valor arbitrário no espaço de tensão e $\dot{\varepsilon}^p$ o incremento de deformação plástica correspondente. O postulado é uma solicitação não física, porém é satisfeita por metais. O postulado expressa duas regras, a primeira regra diz que a função de escoamento deve ser convexa. A segunda diz que o tensor da taxa de deformação plástica é ortogonal à superfície de escoamento. Essa condição de normalidade ou regra de escoamento é escrita:

$$\dot{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \quad \lambda \geq 0 \quad (6.10)$$

O parâmetro λ é um escalar. A regra de escoamento é válida para deformação plástica e quando não ocorre o alívio de tensão. Quando a deformação é elástica o escalar λ tende a zero. Resumindo:

$$\begin{aligned} \lambda = 0 &\leftrightarrow (\phi < 0) \vee (\phi = 0 \wedge \dot{\phi} < 0) \\ \lambda > 0 &\leftrightarrow (\phi = 0 \wedge \dot{\phi} \geq 0) \end{aligned} \quad (6.11)$$

A equação (6-7) pode agora ser escrita como:

$$\dot{\sigma} = E \div \left(\dot{\varepsilon} - \lambda \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right) \quad (6.12)$$

Para encruamento isotrópico a tensão de escoamento depende somente da tensão e do escalar variável λ representando a deformação plástica acumulada. Com a condição de que o estado de tensão permanece na superfície de escoamento λ pode ser determinado:

$$\dot{\phi} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \div \dot{\sigma} + \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} \dot{\lambda} = 0 \quad (6.13)$$

Com a equação (6-12) é encontrado:

$$\lambda = \frac{-\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \dot{\epsilon}}{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}} \quad (6.14)$$

Assim, a equação geral constitutiva para material elástico plástico pode ser escrita como:

Onde Y é o tensor de escoamento de quarta ordem que é escrito como:

$$\dot{\sigma} = E : \left(\dot{\epsilon} - \frac{\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \dot{\epsilon}}{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \right) \quad (6.15)$$

$$Y = \frac{E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E}{\frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}} \quad (6.16)$$

O escalar h é o coeficiente de encruamento:

$$h = \frac{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda}}{\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} : E : \frac{\partial \phi}{\partial \sigma}} \quad (6.17)$$

Uma equação geral, equação (6-16), dependendo de uma função de escoamento arbitrária é encontrada. Essa descrição vale para pequenas

deformações. No caso de grandes deformações, essas deformações são consideradas como pedaços de pequenas deformações.

A única coisa a ser feita é a correção da taxa de tensões para rotações. Isso é feito expressando a taxa de deformações Jaumann em termos da taxa de deformação:

$$\sigma^{\nabla} = \dot{\sigma} - W \cdot \sigma + \sigma \cdot W \quad (6.18)$$

Deve-se agora apenas encontrar uma expressão adequada para a função de escoamento que dependerá do material.

7. 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 em cinco passos:

- 1) Modelagem do corpo e divisão do seu volume em diversos elementos idealizados, satisfazendo diversas condições particularmente de natureza geométrica;
- 2) Seleção de uma função de configuração para cada elemento que satisfaça as condições de continuidade dos deslocamentos e as relações de compatibilidade das deformações;
- 3) Determinação da matriz rigidez de cada elemento do volume do corpo aplicando as relações constitutivas do material, com auxílio de computador;
- 4) Montagem da matriz rigidez global, isto é, para todo o volume do corpo discretizado;
- 5) Aplicação das condições iniciais e de contorno para a solução do problema algébrico formado;
- 6) 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 foram utilizados o software ADINA e o LS-DYNA.

7.1. Conformação de metais e o Método de elementos finitos

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. {17}

8. RECALQUE DE ANEL

8.1. Determinação do coeficiente de atrito

O ensaio de recalque de anel consiste em comprimir um anel entre duas superfícies paralelas, e a partir da geometria final calcular o coeficiente de atrito. Sabe-se que o diâmetro interno aumenta ou diminui de acordo com a redução na altura da peça, que é influenciada pelas condições de atrito nas superfícies. Se o atrito entre as superfícies é nulo, tanto o diâmetro interno quanto o externo expandem como um disco sólido. Porém, o diâmetro interno do anel aumenta se o atrito na superfície é baixo e diminui se o atrito é alto. A figura 14 mostra os fatores mecânicos e térmicos de similaridade importantes para o ensaio de recalque de anel.

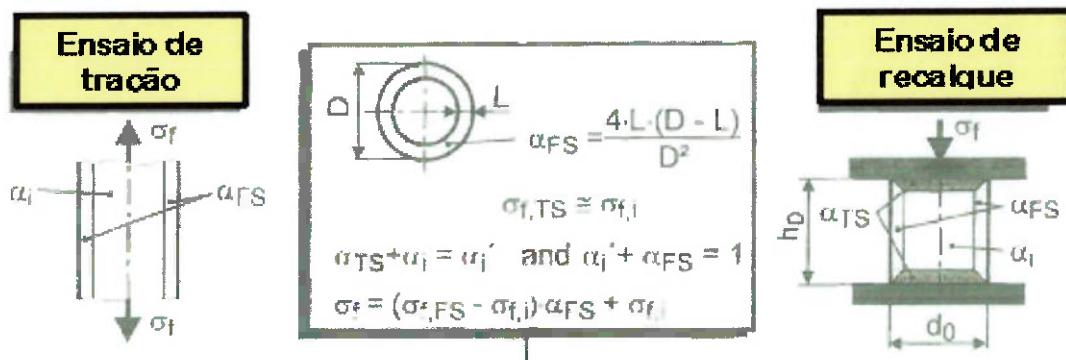
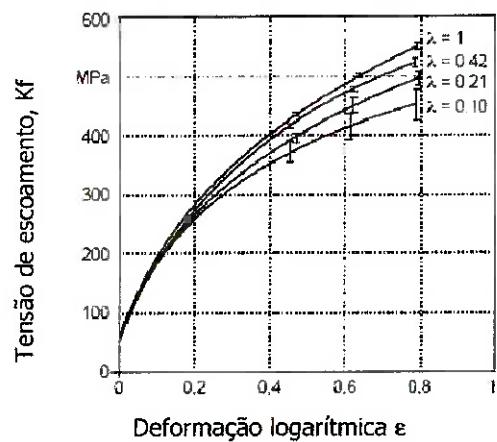


Figura 14 Fatores mecânicos e térmicos de similaridade usados na modelagem proposta por Messner 1998 {11}.

Para determinar quantitativamente a condição de atrito é preciso estabelecer a relação entre a mudança geométrica da peça e a condição de atrito da superfície da ferramenta. Até pouco tempo atrás, vários métodos matemáticos baseados na aproximação da análise das tensões foram desenvolvidos com o intuito de determinar cada vez mais rápido essa relação. Porém, métodos mais acurados e com soluções mais próximas do real se fizeram necessárias.

Na implementação do método de elementos finitos para problemas de conformação mecânica é importante prestar atenção nas condições de contorno. Existe uma classe de problemas, como o recalque de anel na qual ocorre um ponto ou uma região neutra ao longo da superfície da amostra. Nesse ponto a velocidade relativa de deformação do material é igual a zero, e a tensão causada pelo atrito pode mudar essa direção. Para materiais elasto-plásticos também é possível utilizar esse método. Nesses elementos a rugosidade é substituída pelos valores de atrito e a partir disso a análise pode ser feita. {17}

Na compressão de anel, geralmente o atrito é avaliado através de curvas experimentais de calibração. Na figura 15 é possível verificar a diminuição da tensão de escoamento com a diminuição do fator de escala λ .



Ensaio de Recalque	
	Material : Latão CuZn15
	Tamanho de grão : $L = 79 \mu\text{m}$
	Vel. do punção : $v = 1,0 [\text{mm/min}] \cdot \lambda$
	Lubrificação : folha de PTFE ($S \sim 0,12 \cdot \lambda$)
Escala $\lambda = 1$	

Figura 15 Influência do fator de escala nas curvas de escoamento decrescentes {11}

8.2. Ensaios experimentais

A fim de determinar o coeficiente de atrito, uma série de experimentos de recalque foi feita a fim de comparar o resultado obtido a partir da simulação de um modelo com o resultado empírico. Seguindo a metodologia explicitada na figura 16. Para tal, foi utilizada uma prensa hidráulica da marca Máquina Piratininga.

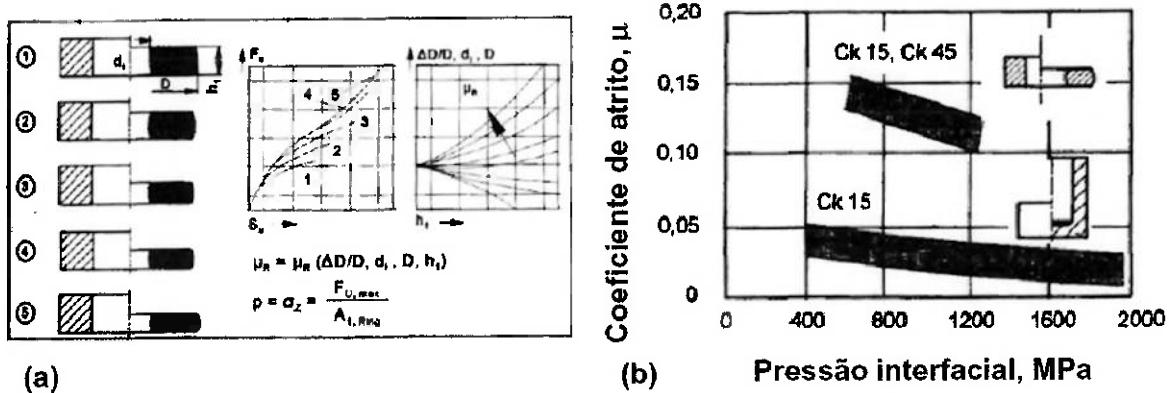


Figura 16 medição do atrito em processos de micro conformação. (a) Fundamentos da avaliação do coeficiente de atrito pelo ensaio de recalque de anel. (b) influência da magnitude da área interfacial (pressão interfacial) sobre o coeficiente de atrito para os ensaios de recalque de anel e de extrusão indireta de copo usando fosfato de zinco e sabão. Segundo Burgdorf, Male & Cockcroft e Wagener{21}.

O latão foi escolhido como material para os corpos de prova. Os testes foram feitos para dois tamanhos diferentes de amostras, de acordo com as dimensões a seguir:

- 1) Tipo 1: altura $h = 6.10$ mm, diâmetro interno $di = 8.90$ mm e diâmetro externo de $= 17.90$ mm
- 2) Tipo 2: altura $h = 8.10$ mm, diâmetro interno $di = 12.20$ mm e diâmetro externo de $= 23.40$ mm

Para o cálculo do coeficiente de atrito é necessário conhecer apenas a geometria inicial e final da peça, não importando o valor da carga utilizada. Dessa forma, os ensaios foram feitos com valores diferentes de carga aplicados pela prensa. Para a determinação do coeficiente de atrito foram calculadas a porcentagem de redução na altura e a porcentagem de redução no diâmetro interno:

$$\Delta di = \frac{di_d - di_a}{di_d} \quad \text{e} \quad \Delta hi = \frac{hi_d - hi_a}{hi_d}$$

(8.1)

Tabela 1 Cálculo do atrito

	Antes			Depois			Cálculo do atrito		
	h	di	de	h	di	de	% di	% h	m
1	8,10	12,20	23,40	6,30	11,50	30,50	5,74	22,22	0,12
2	6,10	8,90	17,90	2,95	7,00	23,90	21,35	51,64	0,12
3	6,10	8,90	17,90	3,05	6,50	22,80	26,97	50,00	0,15
4	6,10	8,90	17,90	4,50	8,55	20,20	3,93	26,23	0,08
5	6,10	8,90	17,90	4,15	8,15	20,60	8,43	31,97	0,11

Observando os resultados, foi possível concluir que o atrito encontrado foi baixo, uma vez que todos os corpos de prova apresentaram o mesmo comportamento: redução de diâmetro interno.

8.3. Análise em MEF

Para a simulação foi utilizado o software Adina. O anel foi discretizado com elementos do tipo 3D- Solid e o punção e a base com elementos do tipo casca.

Nos resultados obtidos foi possível avaliar que se nem o atrito nem o efeito de borda fossem considerados o resultado seria bem próximo ao esperado,

uma vez que o escoamento predomina externamente quando o atrito é baixo, mas com o aumento do mesmo, o ponto neutro aparece ao longo da amostra, resultando em um efeito externo e interno.

A figura 17 mostra os corpos de prova de CuZn15 antes e depois do experimento, assim como os modelos iniciais e finais obtidos da simulação em Elementos finitos.

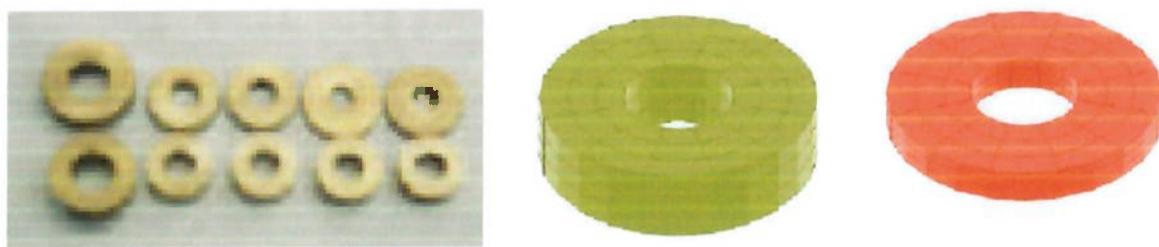


Figura 17 Ensaio de recalque de anéis – (a) resultados experimentais; (b) e (c) simulações preliminares.

Com o objetivo de simular o atrito no anel foi criado um modelo (figura 18), no qual há uma aplicação de uma pressão proporcional ao atrito em uma superfície externa ao modelo. Dessa forma pode-se simular a influência do efeito de escala e dos grãos de borda. Pode-se ver algumas simulações nas figuras 19, 20 e 21

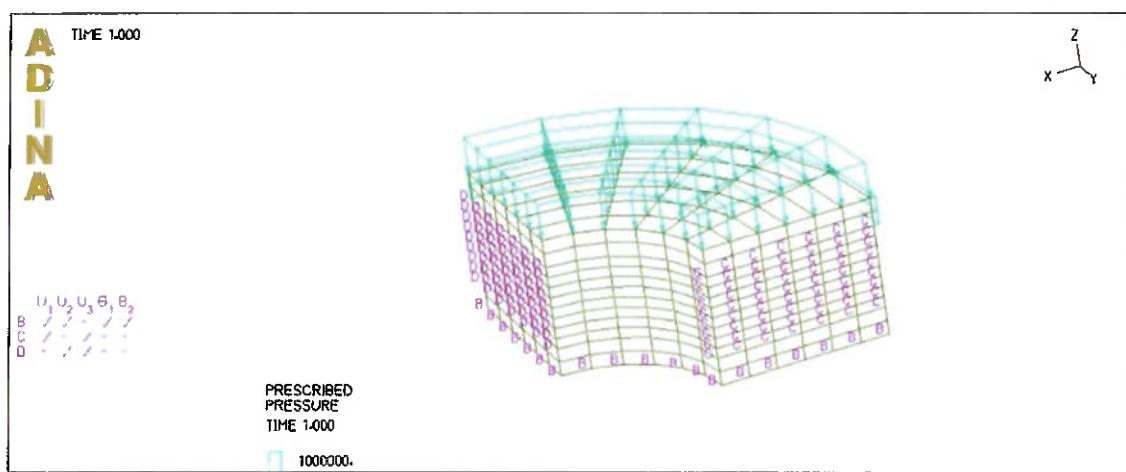


Figura 18 Novo modelo para o ensaio de anel

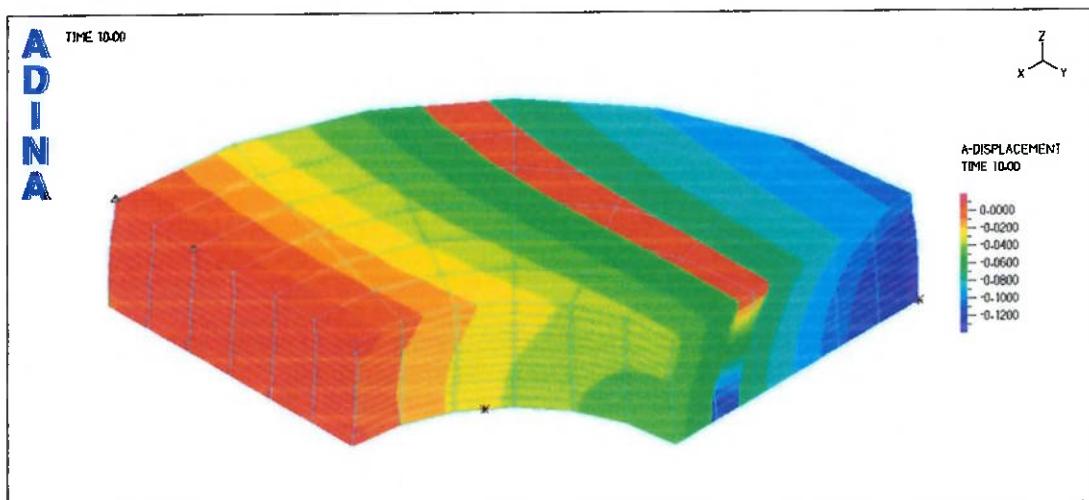


Figura 19 Atrito baixo ~ 0,10

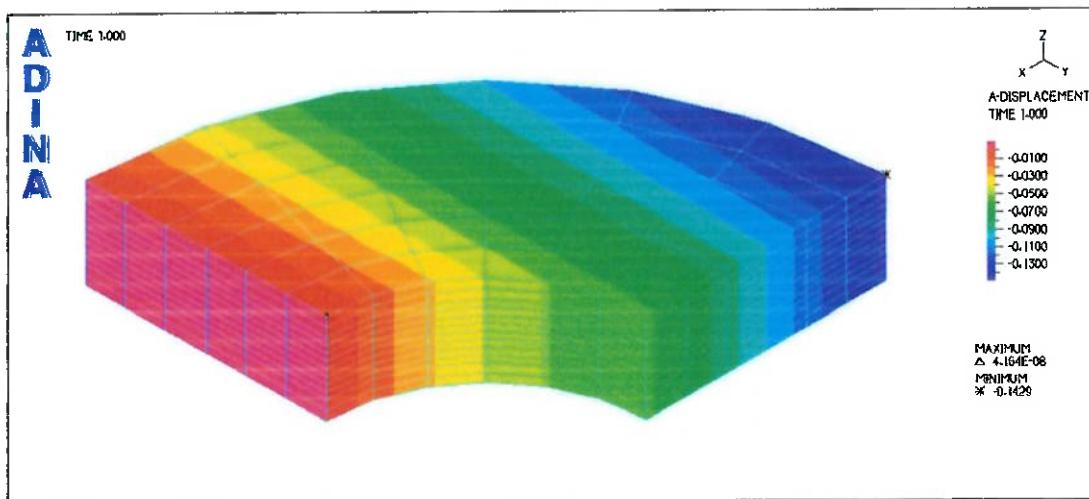


Figura 20 Atrito zero

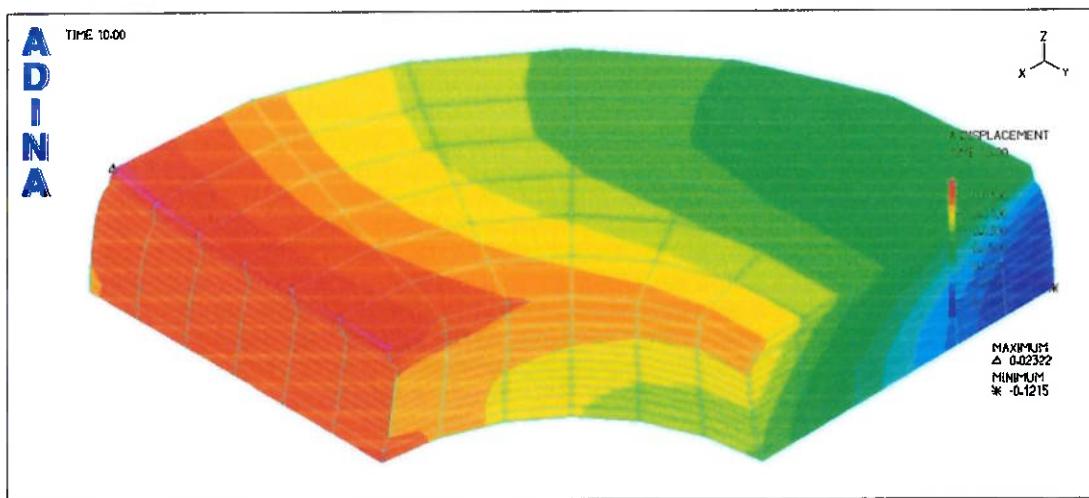


Figura 21 Atrito alto ~ 0,50

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

Um processo bem usual na indústria para manufatura de microcomponentes é o dobramento. A figura 22 mostra a influência dos fatores mecânicos e térmicos nos microcomponentes em processos ensaio de 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.

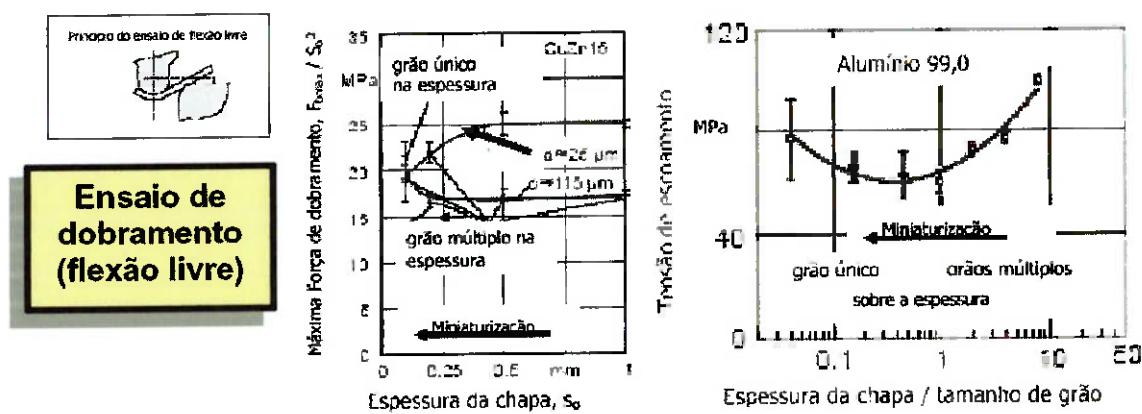


Figura 22 Forças de dobramento e limite de escoamento: efeito da miniaturização e do tamanho de grão. {5}

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}

9.1. Concepção do primeiro 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 microcomponentes para a avaliação de retorno elástico, “springback”.

O primeiro esboço do projeto pode ser visto na figura 23. A idéia do dispositivo é fixar uma das extremidades de uma chapa fina (1) com uma morsa (2) e ensaiar um dobramento através da aplicação de um deslocamento na outra extremidade da chapa pela haste de um micrômetro (3). Após um curto intervalo de tempo da aplicação do deslocamento, deve-se soltar a haste do micrômetro e medir o retorno elástico.

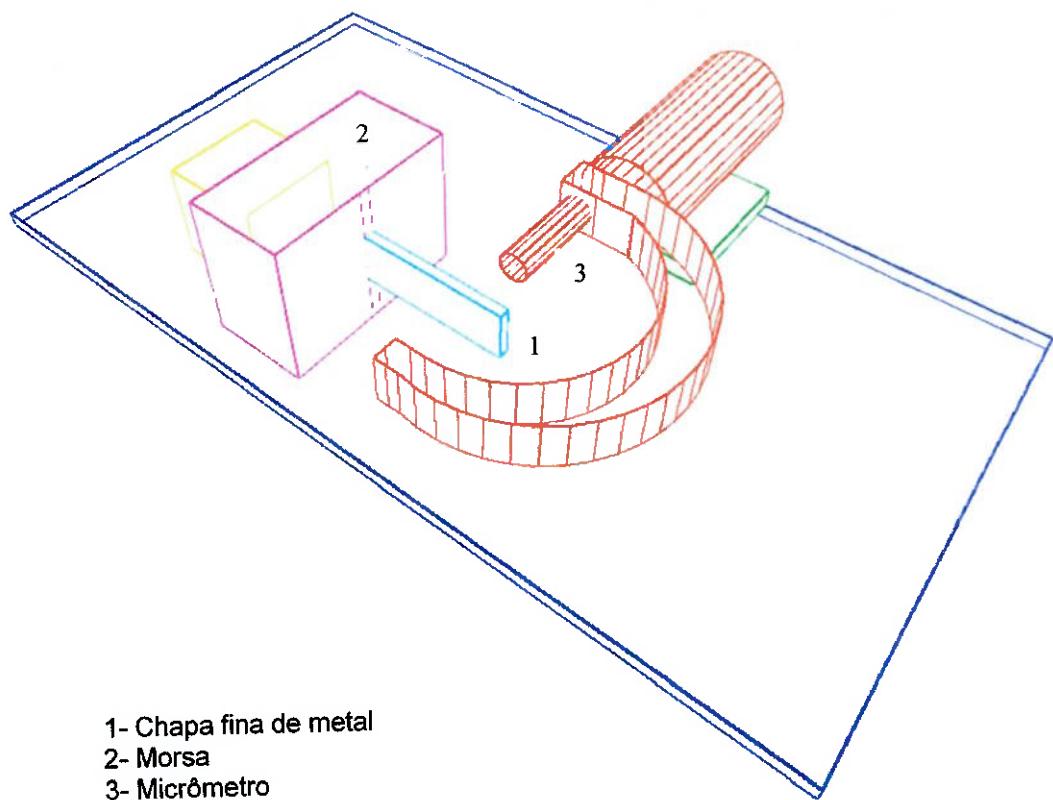


Figura 23 modelo para o ensaio de dobramento de microcomponentes

Um dispositivo preliminar foi construído a fim de testar a funcionalidade do conjunto e pode ser visto na figura 24. Foram utilizadas duas mini morsas dispostas perpendicularmente para a fixação do micrômetro e dos corpos de prova. O micrômetro utilizado é manual e possui abertura de 0-25 mm.



Figura 24 Dispositivo preliminar

9.1.1. Confecção 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 25.

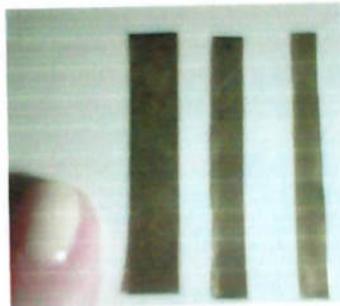


Figura 25 Corpos de prova em 3 tamanhos em comparação com um dedo.

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.

9.1.2. Ensaios experimentais

Nessa primeira fase do projeto foram ensaiadas 3 amostras de cada tipo de corpo de prova. A tabela 2 mostra os resultados desse experimento.

Tabela 2 Primeiro 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 3.

Tabela 3 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.

9.1.3. 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 4.

Tabela 4 Propriedades do latão vermelho

Densidad e (mg/m ³)	Mod. Elasticidade E(Gpa)	Tensão de escoam. (Mpa)	Coef. Poiss on	Coef. Exp. Térn.
8,74	101 / 50(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

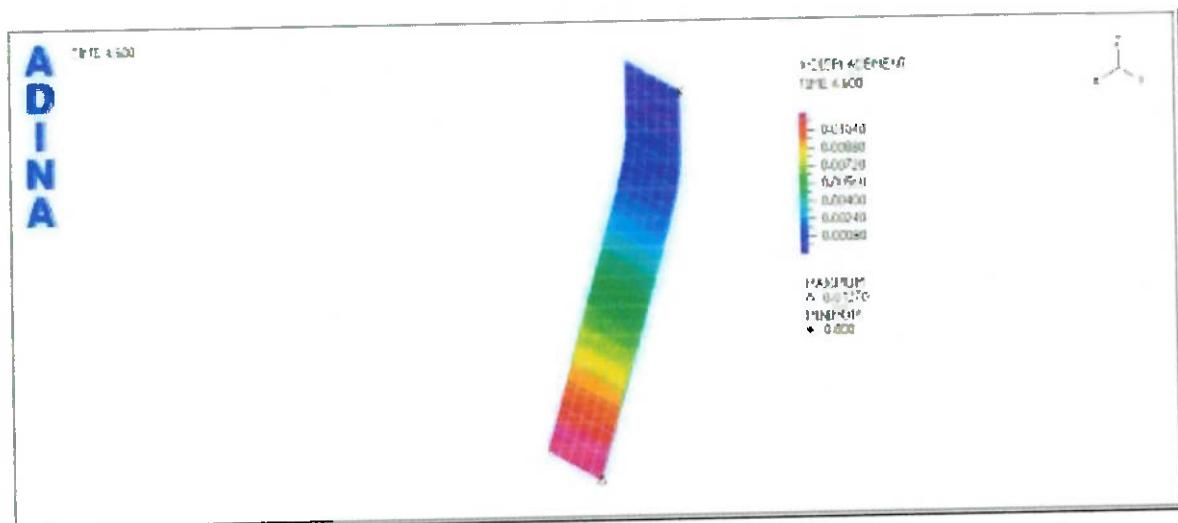


Figura 26 Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 1

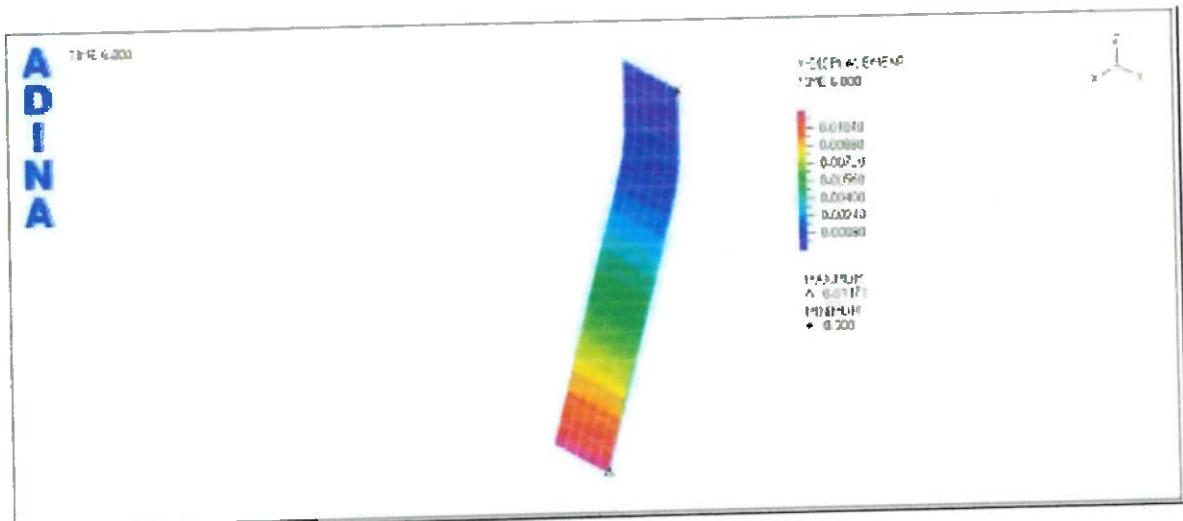


Figura 27 Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 1

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

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

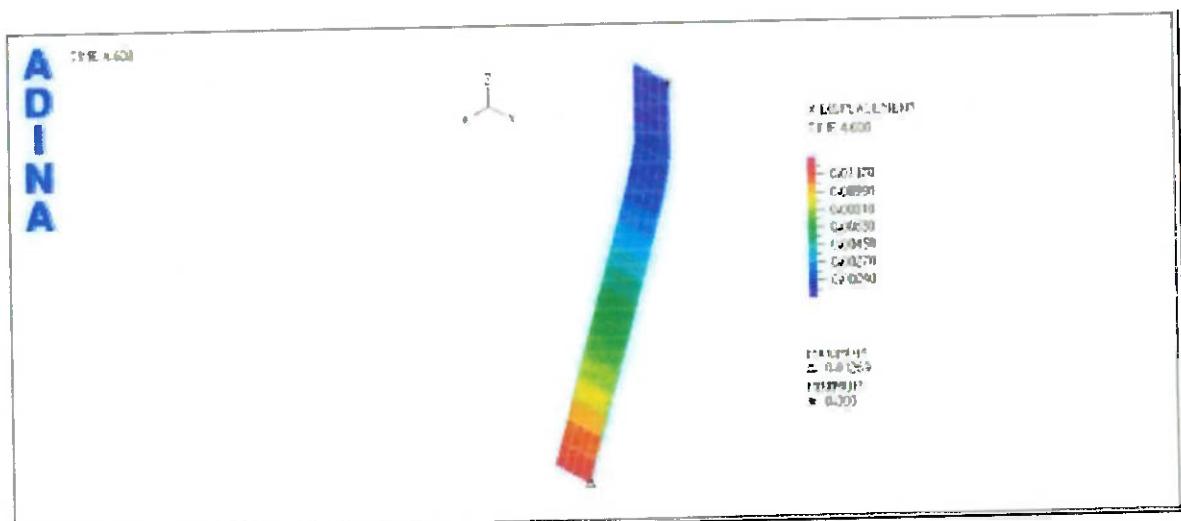


Figura 28 Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 2

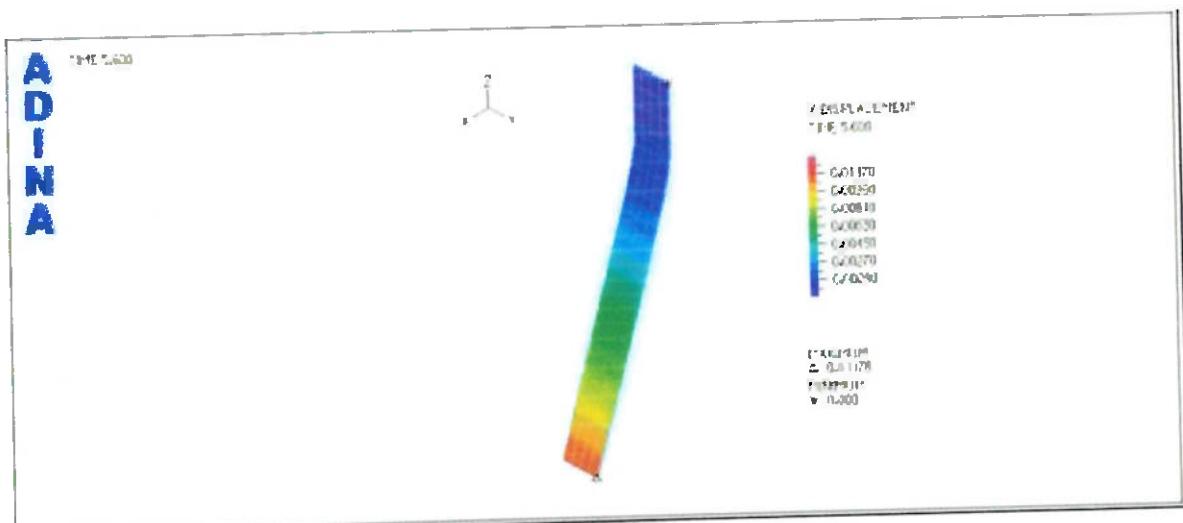


Figura 29 Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 2

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

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

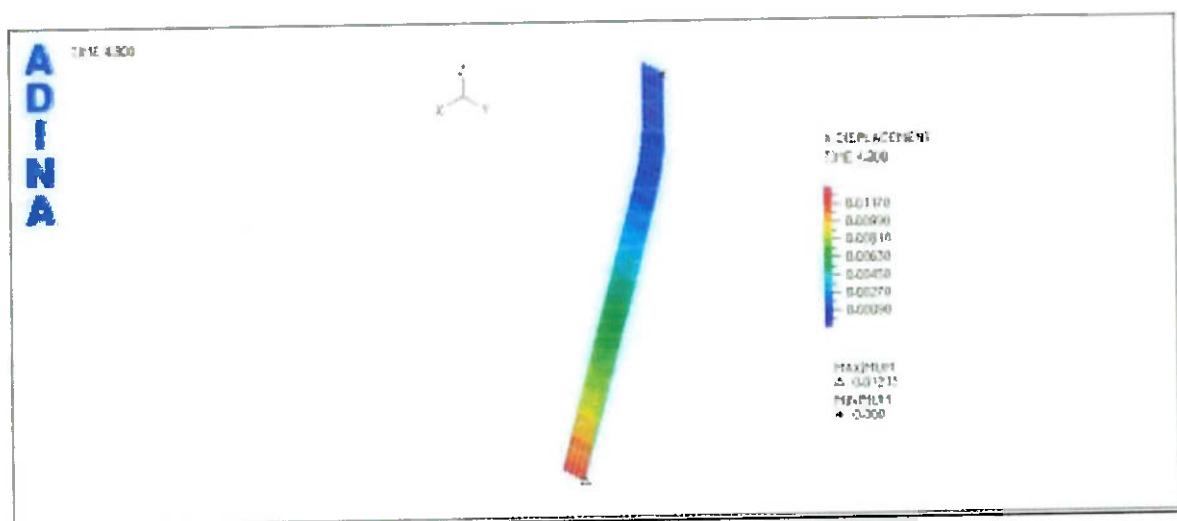


Figura 30 Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 3

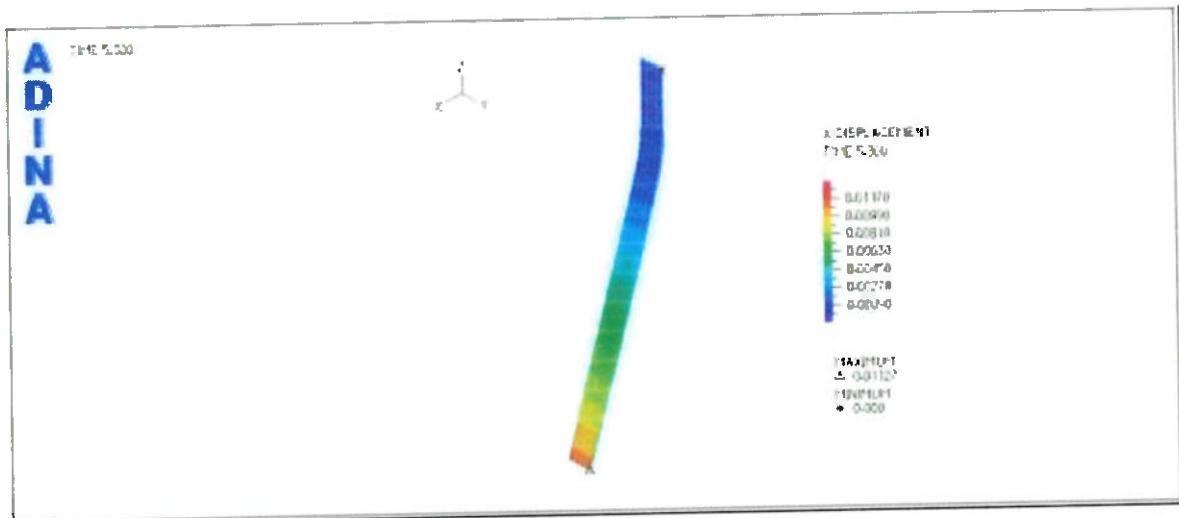


Figura 31 Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 3

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 diminui 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 tanto na não conformidade do modelo discretizado com a realidade do ensaio.

9.1.4. 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 (figura 32).

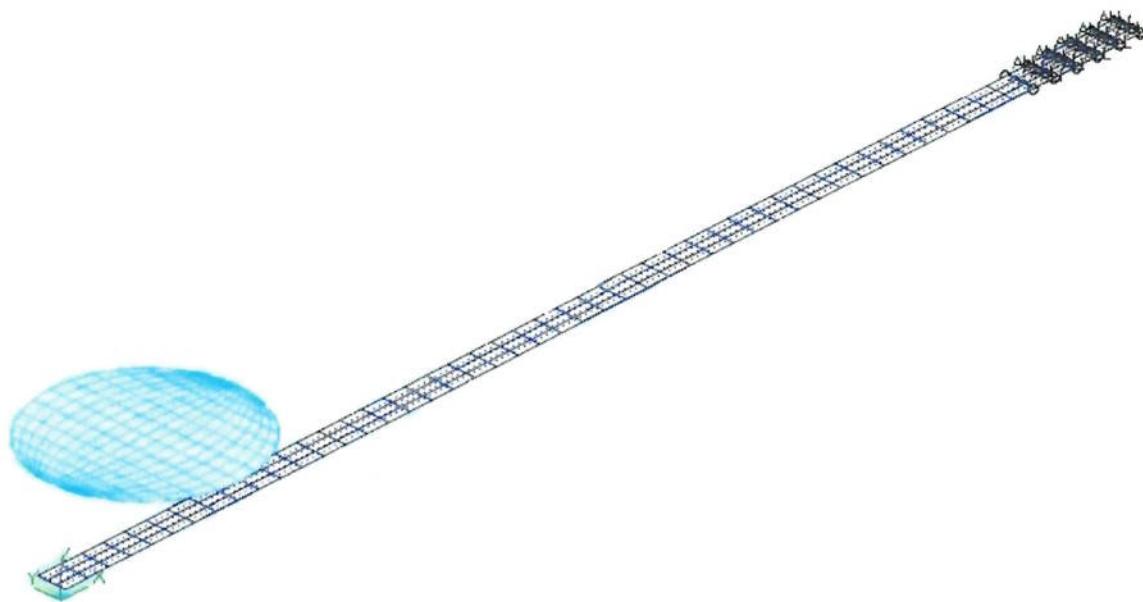


Figura 32 Modelo discretizado em LS DYNA

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 a 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.

O movimento do punção foi definido de acordo com uma curva de deslocamento em função do tempo como a mostrada na tabela 5.

Tabela 5 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:

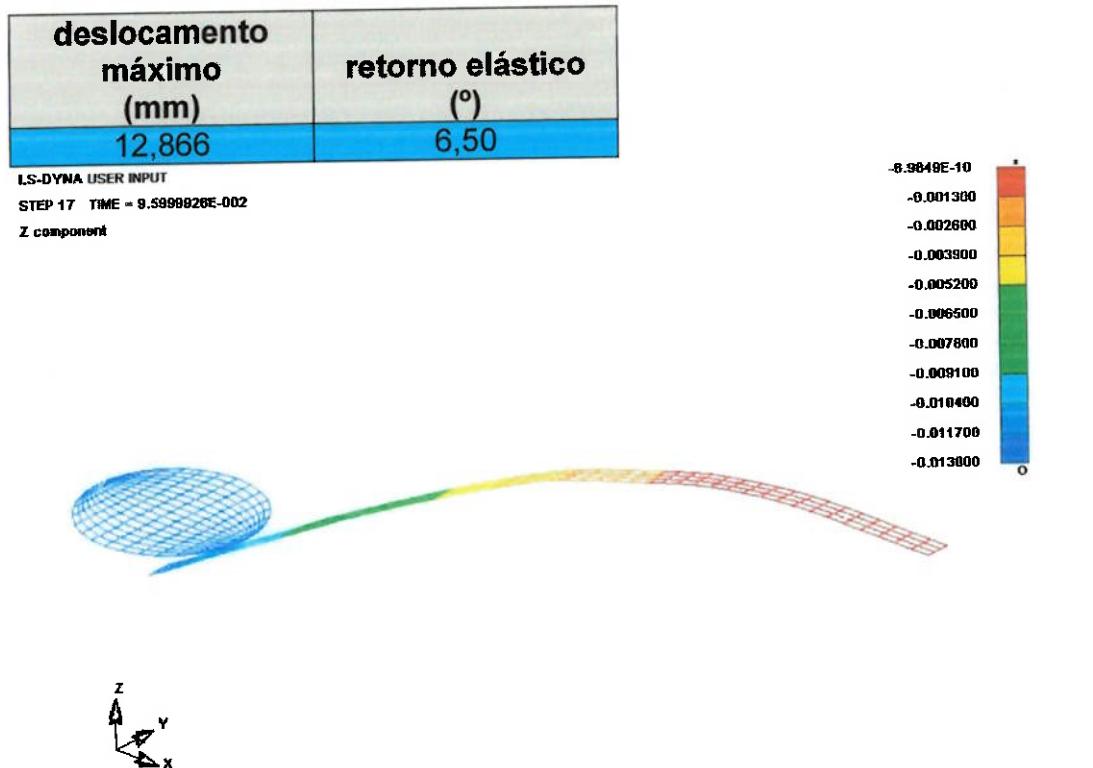
Tipo 4

Figura 33 Deslocamento máximo para o modelo discretizado do tipo 4

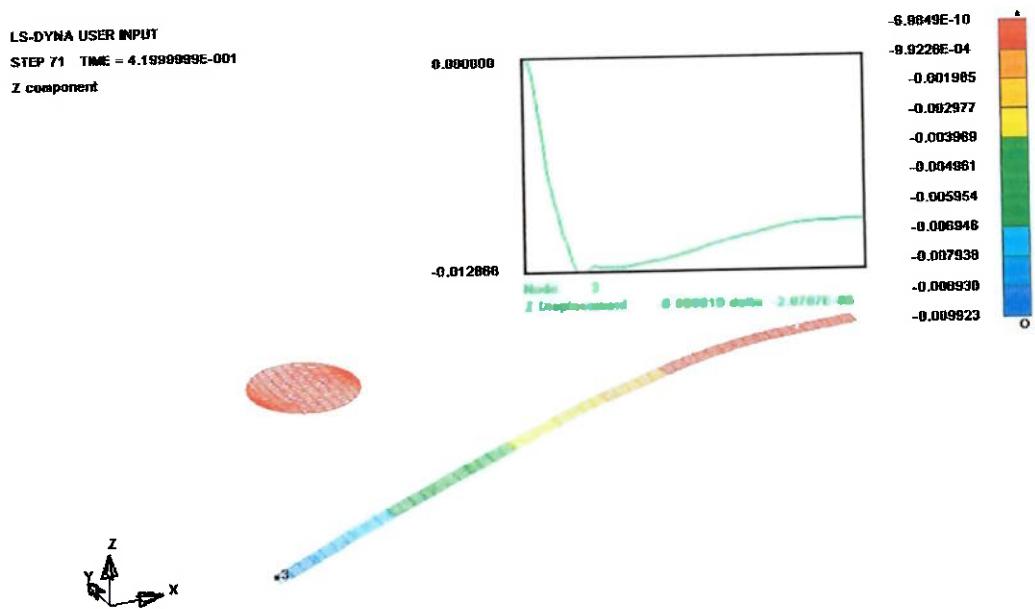


Figura 34 Retorno elástico para o modelo discretizado do tipo 4

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 se pode 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.

9.2. Confecção do 2º dispositivo

Ao longo dos ensaios com o primeiro dispositivo, sentiu-se a necessidade de se trabalhar com elementos ainda menores. Uma vez que esta ferramenta não permitia o ensaio de amostras menores, um novo dispositivo foi proposto. A nova ferramenta de ensaio pode ser vista no esboço da figura 35 e na foto do dispositivo pronto na figura 36.

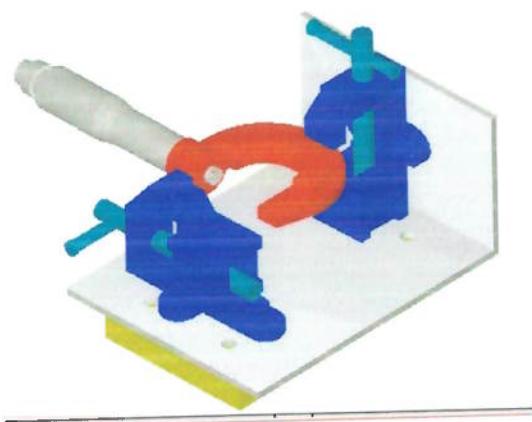


Figura 35: Desenho em Microstation do segundo dispositivo



Figura 36: Foto do segundo dispositivo

Com essa ferramenta foi possível realizar ensaios com peças menores e mais finas e comparar com um modelo numérico para esse novo tipo de ensaio.

A fim de ter um melhor acompanhamento do processo e posteriormente realizar medições mais apuradas do retorno elástico, foi criado um suporte, preso ao dispositivo, que acomoda uma câmera digital. Dessa forma, os

experimentos foram registrados no momento em que ocorre o maior deslocamento e no momento seguinte, quando é não há mais o contato com a haste do micrômetro e a amostra está livre para sofrer o retorno elástico. A figura 37 mostra o dispositivo completo já com o suporte para a câmera fotográfica.



Figura 37: Esboço do dispositivo final

9.2.1. Confecção dos corpos de prova

Para esta parte dos experimentos o material escolhido foi mantido, assim como sua espessura (0.25 mm). O que realmente mudou foram as dimensões dos corpos. Foram ensaiados 4 tipos diferentes de amostras, como mostrado a seguir na figura 38. Os desenhos de fabricação e de conjunto se apresentam no anexo1.

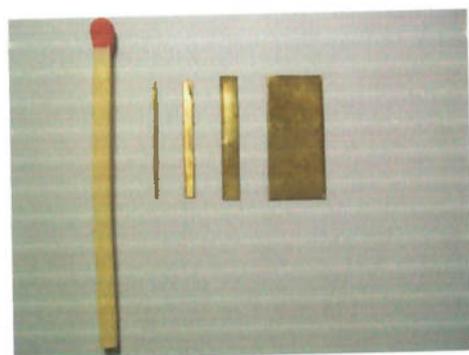


Figura 38: Corpos de prova em tamanho reduzido

Tipo 1: 0.014 m X 0.011m x 0.00025m.

Tipo 2: 0.014m x 0.003m x 0.00025m.

Tipo 3: 0.014m x 0.0015m x 0.00025m.

Tipo 4: 0.0014m x 0.0005m x 0.00025m.

9.2.2. *Ensaios experimentais*

Como para o ensaio anterior, foram ensaiadas 4 amostras de cada tipo de corpo de prova. A tabela 6 mostra os resultados desse experimento.

Tipo 1: 0.014 m X 0.011m x 0.00025m.

Tabela 6: Resultados do ensaio para amostra do tipo 1

ensaio	retorno elástico (°) para 5 mm	retorno elástico (°) para 3 mm
1	6,81	5,68
2	6,75	5,74
3	6,78	5,76
4	6,66	5,70
média	6,75	5,72



(a)



(b)

Figura 39: Fotos da simulação para a amostra do tipo 1 (a) termino da aplicação do deslocamento (b) retorno elástico

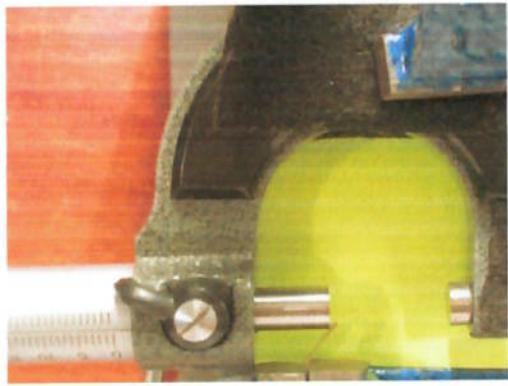
Tipo 2: 0.014m x 0.003m x 0.00025m

Tabela 7 Resultados do ensaio para amostra do tipo 2

ensaio	retorno elástico (°) para 5 mm	retorno elástico (°) para 3 mm
1	6,50	4,81
2	6,45	4,95
3	6,35	4,75
4	6,54	4,73
média	6,46	4,81



(a)



(b)

Figura 40: Fotos da simulação para a amostra do tipo 2 (a) termino da aplicação do deslocamento (b) retorno elástico

Tipo 3: 0.014m x 0.0015m x 0.00025m

Tabela 8: Resultados do ensaio para amostra do tipo 3

ensaio	retorno elástico (°) para 5 mm	retorno elástico (°) para 3 mm
1	4,73	6,27
2	4,68	6,21
3	4,60	6,05
4	4,71	6,11
média	4,68	6,16

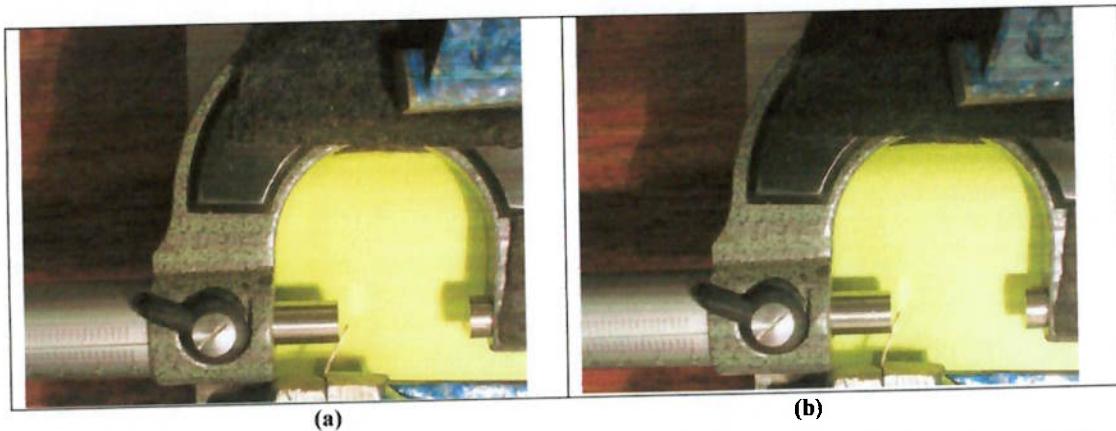


Figura 41: Fotos da simulação para a amostra do tipo 3 (a) termino da aplicação do deslocamento (b) retorno elástico

Tipo 4: 0.0014m x 0.0005m x 0.00025m

Tabela 9: Resultados do ensaio para amostra do tipo 4

ensaio	retorno elástico (°) para 5 mm	retorno elástico (°) para 3 mm
1	4,23	6,32
2	4,33	6,10
3	4,46	6,12
4	4,34	6,10
média	4,34	6,16

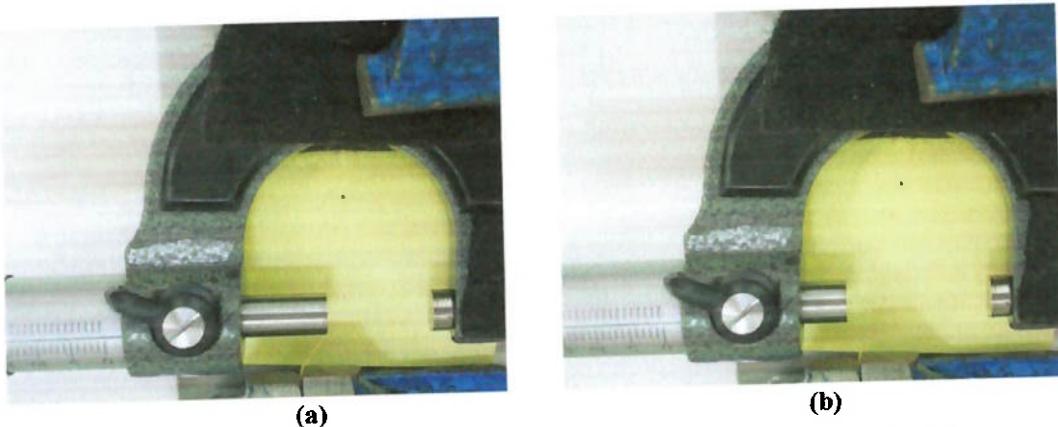


Figura 42: Fotos da simulação para a amostra do tipo 3 (a) termino da aplicação do deslocamento (b) retorno elástico

Analizando os resultados obtidos, percebe-se que realmente ocorreu a diminuição do ângulo de retorno elástico com a diminuição do corpo de prova. Muitos ensaios foram invalidados devido a alta discrepância com o restante dos resultados. A maior dificuldade encontrada foi a obtenção dos corpos de prova em tamanho reduzido, que precisavam ser cortados a partir de uma chapa inteira sem causar deformações iniciais nos mesmos. Outra preocupação foi o posicionamento do corpo de prova na ferramenta de teste. Para validação do ensaio foram ainda simulados corpos de provas de outros materiais como níquel puro e cobre oxygen free. O dispositivo se mostrou suficiente, pois de uma forma geral os resultados seguiram uma tendência constante e os ensaios foram de fácil realização.

9.2.3. Simulação numérica – LS DYNA – Parte 1

Nesta parte do projeto, a simulação em elementos finitos propõe um modelo similar ao apresentado no primeiro ensaio, ou seja, baseado em uma chapa e um punção. Porém foram estudados quatro modelos diferentes de acordo com as dimensões das amostras citadas no item 9.2.1.

Mais uma vez a chapa foi modelada através do elemento **Mat_peicewise_linear_plasticity**, porém a discretização levou em consideração a dimensão do corpo de prova em relação ao conjunto como um todo. 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**.

O contato entre a chapa e o punçal foi do tipo **Contact_automatic_nodes_to_surface_ID** e para isso, a chapa foi definida como master e o punção como slave. O movimento do punção foi definido de acordo com uma curva de deslocamento em função do tempo como a mostrada na tabela 10.

Tabela 10 Curva de deslocamento do punção

Tempo (s)	Desloc. (m)
0.000	0.0030
0.006	0.0020
0.012	0.0010
0.030	-0.0025
0.036	-0.0038
0.054	-0.0045
0.078	-0.0050
0.096	-0.0050
0.102	0.0000
0.400	0.0000

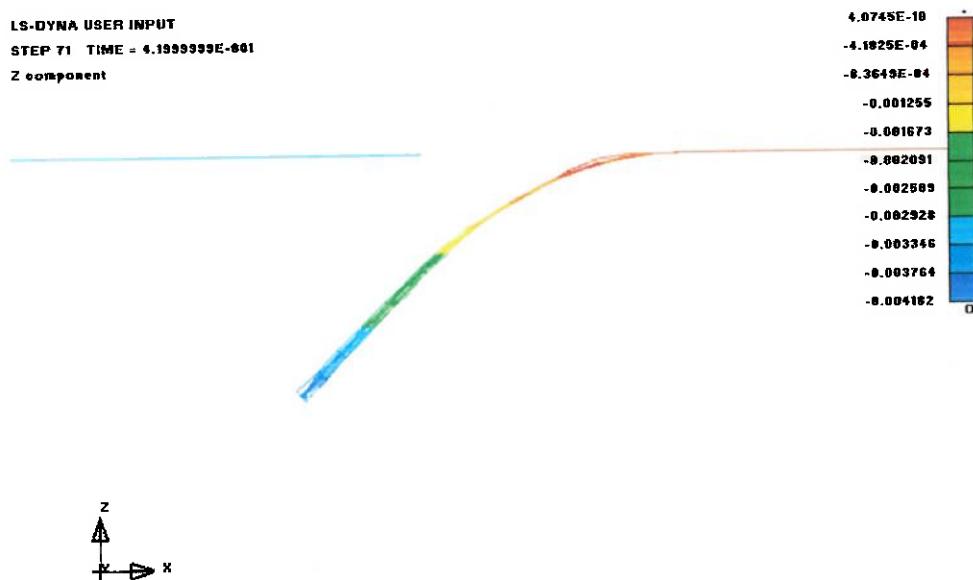
Tipo 1: 0.014 m X 0.011m x 0.00025m

Para cada uma das amostras foram feitas duas séries de simulações, sendo que para cada uma delas, uma malha com discretização diferente foi testada. As figuras 43 e 44 mostram a simulação para a malha menos discretizada, enquanto as figuras 45 e 46 para a mais discretizada.

LS-DYNA USER INPUT
STEP 17 TIME = 0.5999806E-002
Z component



Figura 43 Deslocamento máximo para o modelo pouco discretizado do tipo



1

Figura 44 Retorno elástico para o modelo pouco discretizado do tipo 1

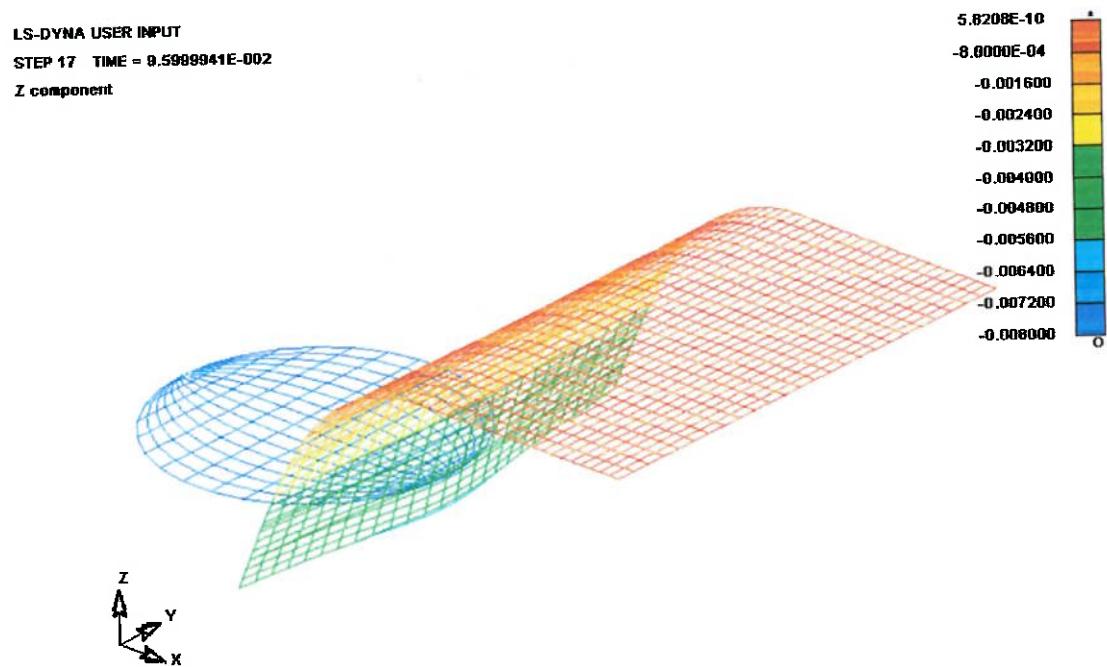


Figura 45 Deslocamento máximo para o modelo mais discretizado do tipo 1

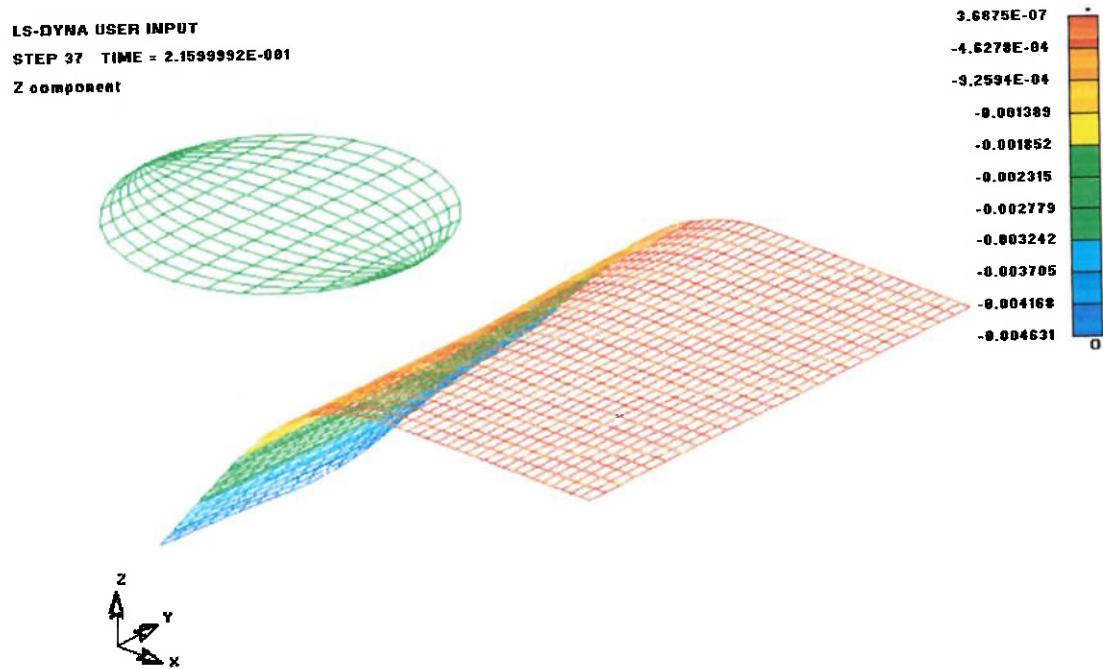


Figura 46 Retorno elástico para o modelo mais discretizado do tipo 1

Tipo 2: 0.014m x 0.003m x 0.00025m

As figuras 47 e 48 mostram a simulação para a malha menos discretizada, enquanto as figuras 49 e 50 para a mais discretizada.

LS-DYNA USER INPUT
STEP 17 TIME = 9.5999941E-002
Z component

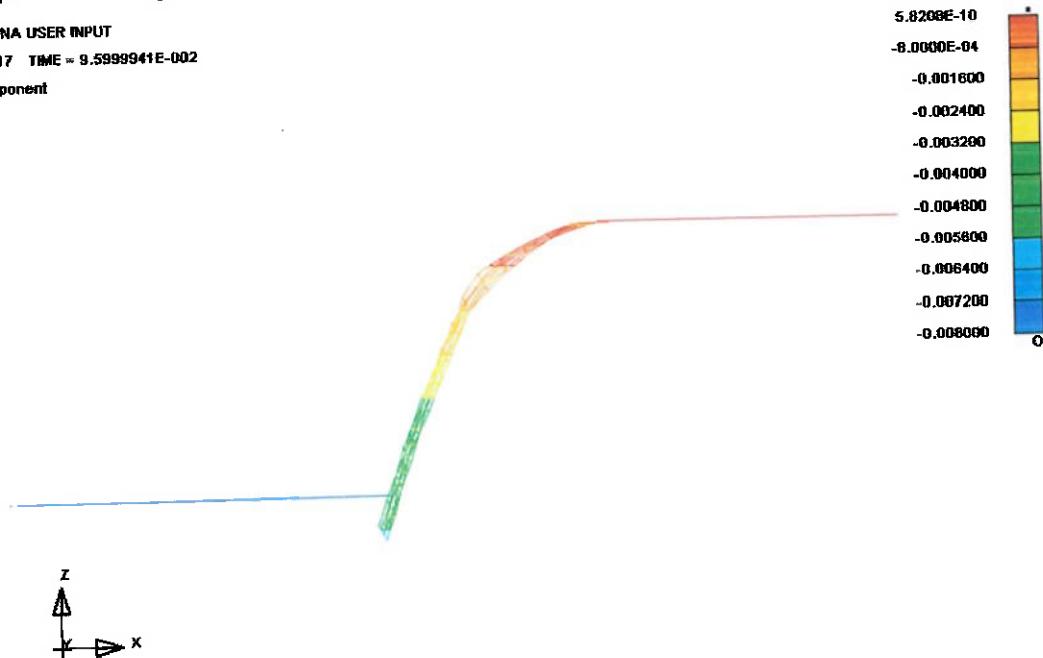


Figura 47 Deslocamento máximo para o modelo pouco discretizado do tipo 2

LS-DYNA USER INPUT
STEP 24 TIME = 1.3799995E-001
Z component

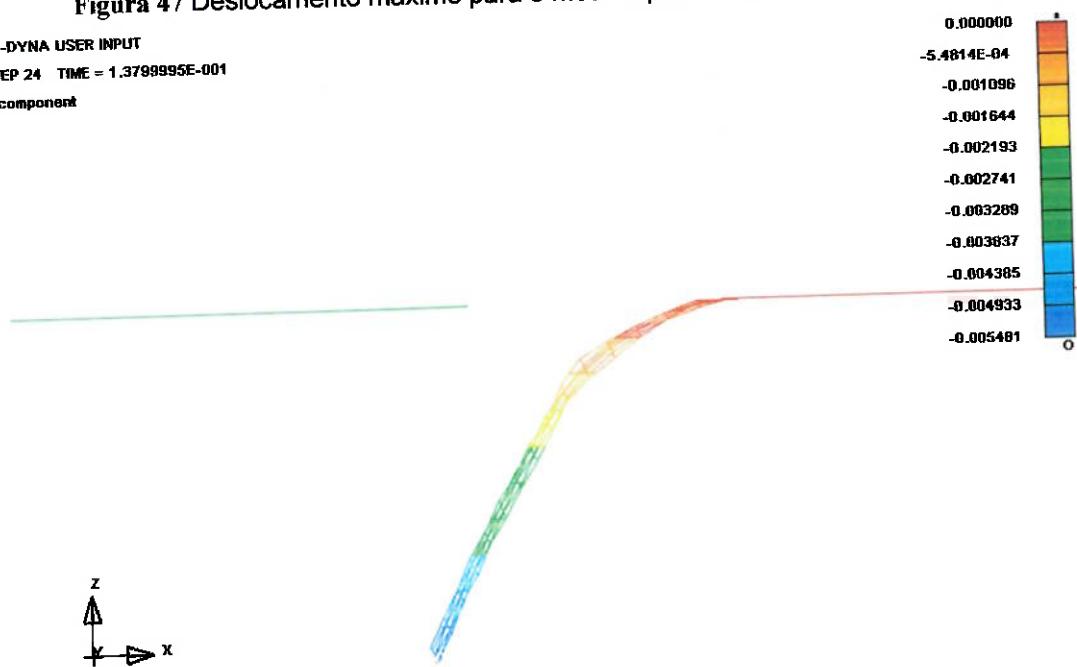


Figura 48 Retorno elástico para o modelo pouco discretizado do tipo 2

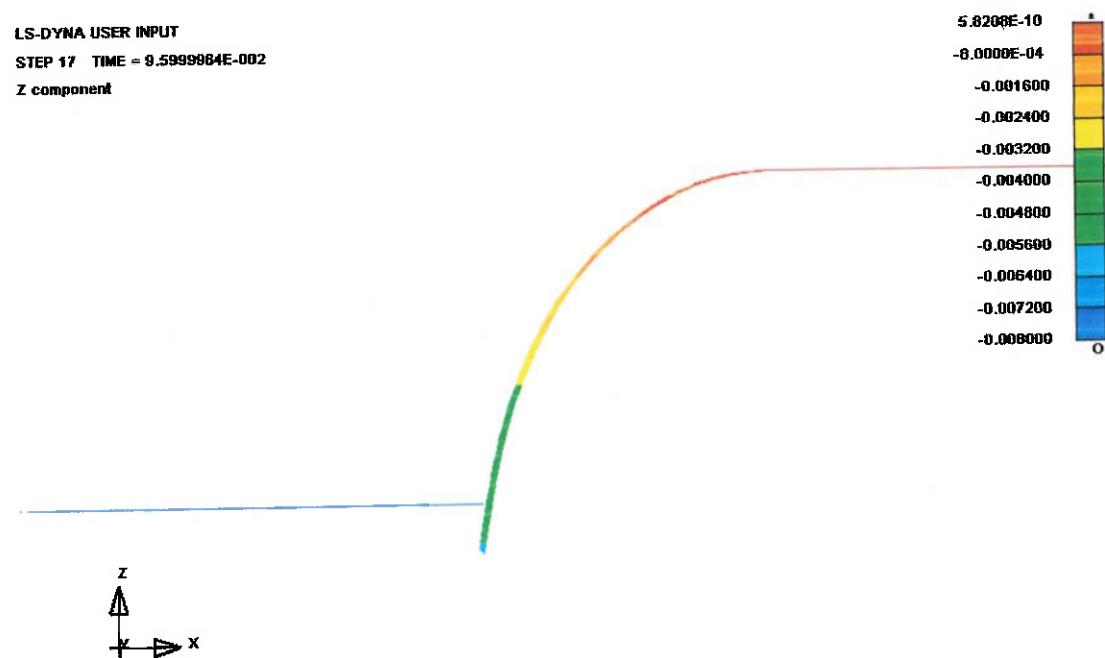


Figura 49 Deslocamento máximo para o modelo mais discretizado do tipo 2



Figura 50 Retorno elástico para o modelo mais discretizado do tipo 2

Tipo 3: 0.014m x 0.0015m x 0.00025m

As figuras 51 e 52 mostram a simulação para a malha menos discretizada, enquanto as figuras 53 e 54 para a mais discretizada.

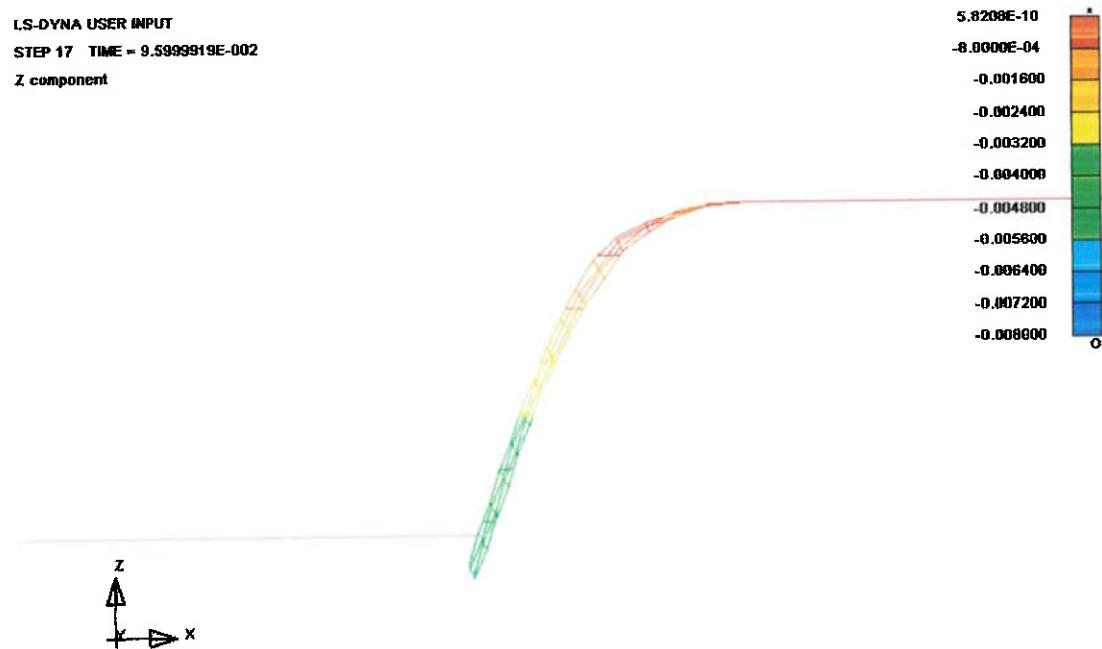


Figura 51 Deslocamento máximo para o modelo pouco discretizado do tipo 3

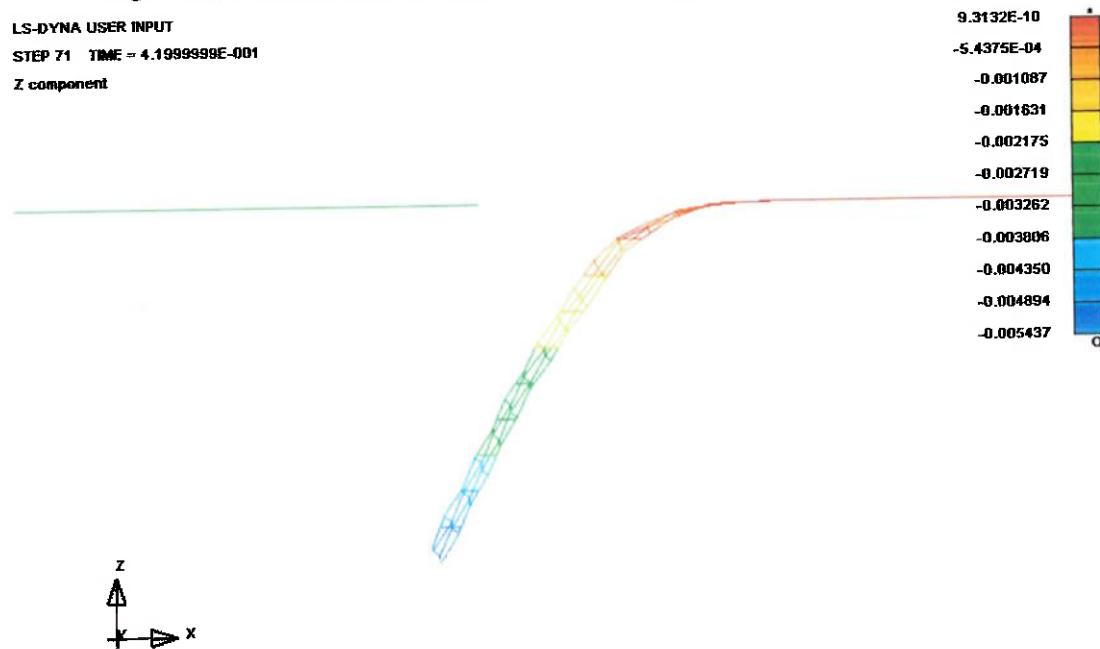


Figura 52 Retorno elástico para o modelo pouco discretizado do tipo 3

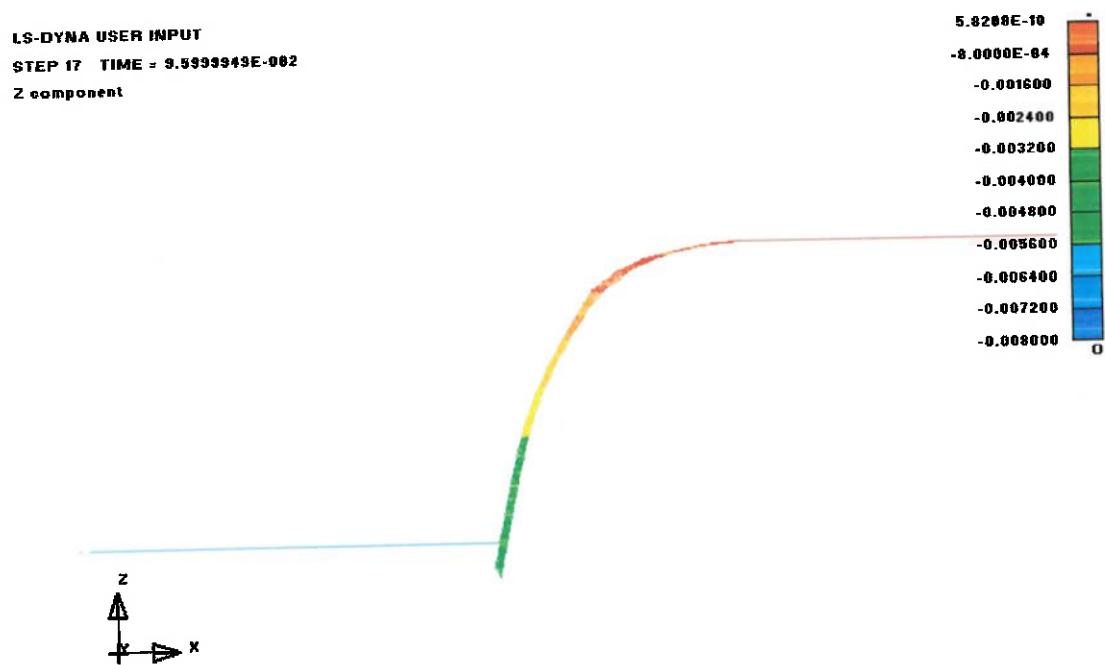


Figura 53 Deslocamento máximo para o modelo mais discretizado do tipo 3



Figura 54 Retorno elástico para o modelo mais discretizado do tipo 3

Tipo 4: 0.0014m x 0.0005m x 0.00025m

As figuras 55 e 56 mostram a simulação para a malha menos discretizada, enquanto as figuras 57 e 58 para a mais discretizada.

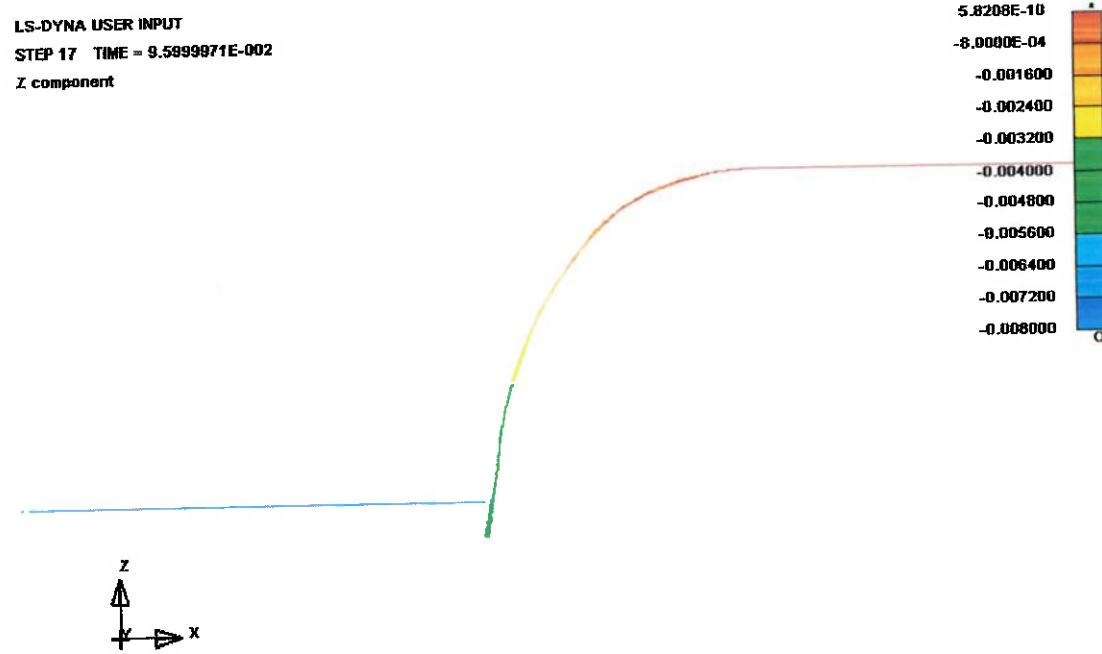


Figura 55 Deslocamento máximo para o modelo pouco discretizado do tipo 4

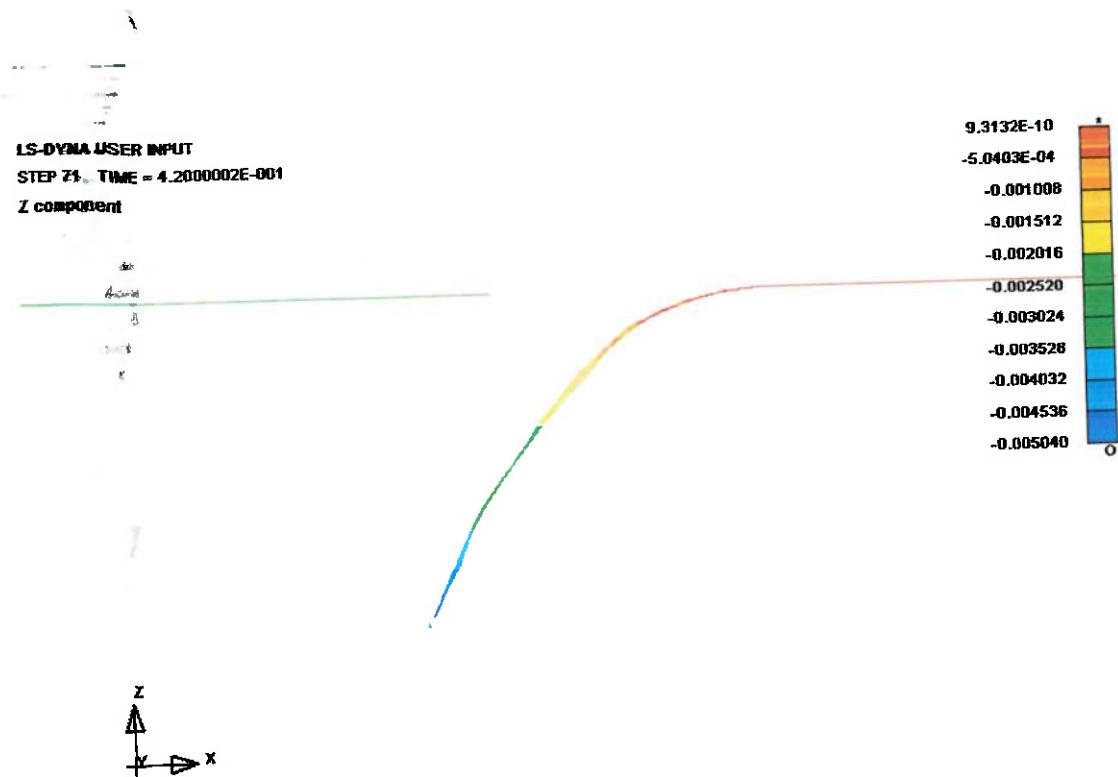


Figura 56 Retorno elástico para o modelo pouco discretizado do tipo 4

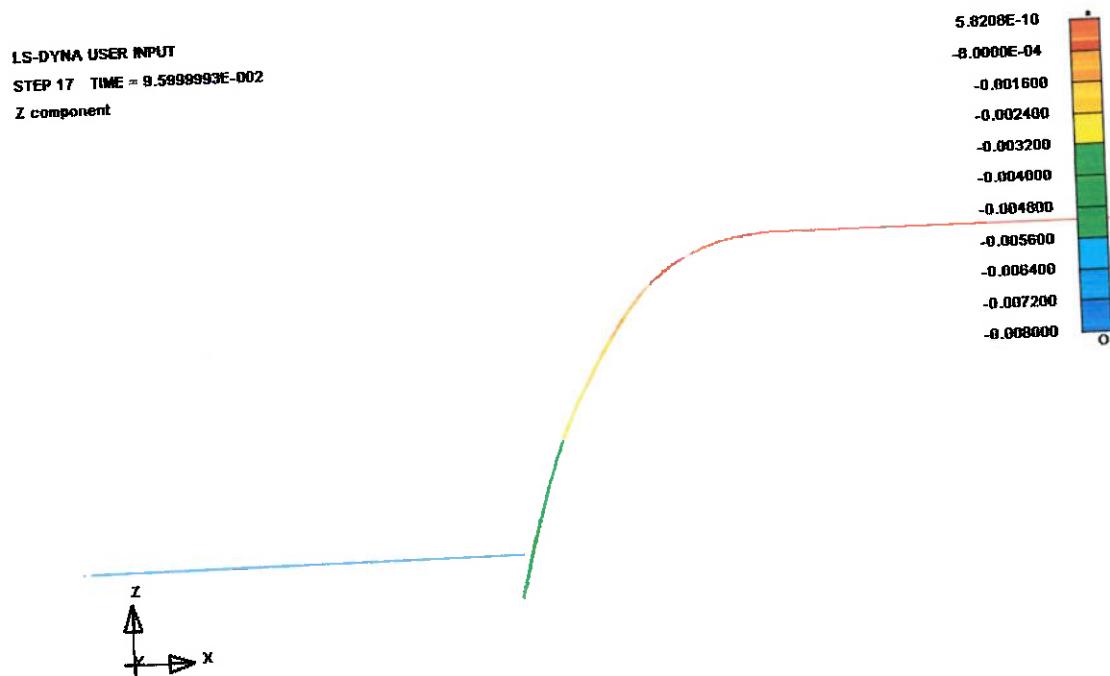


Figura 57 Deslocamento máximo para o modelo mais discretizado do tipo 4

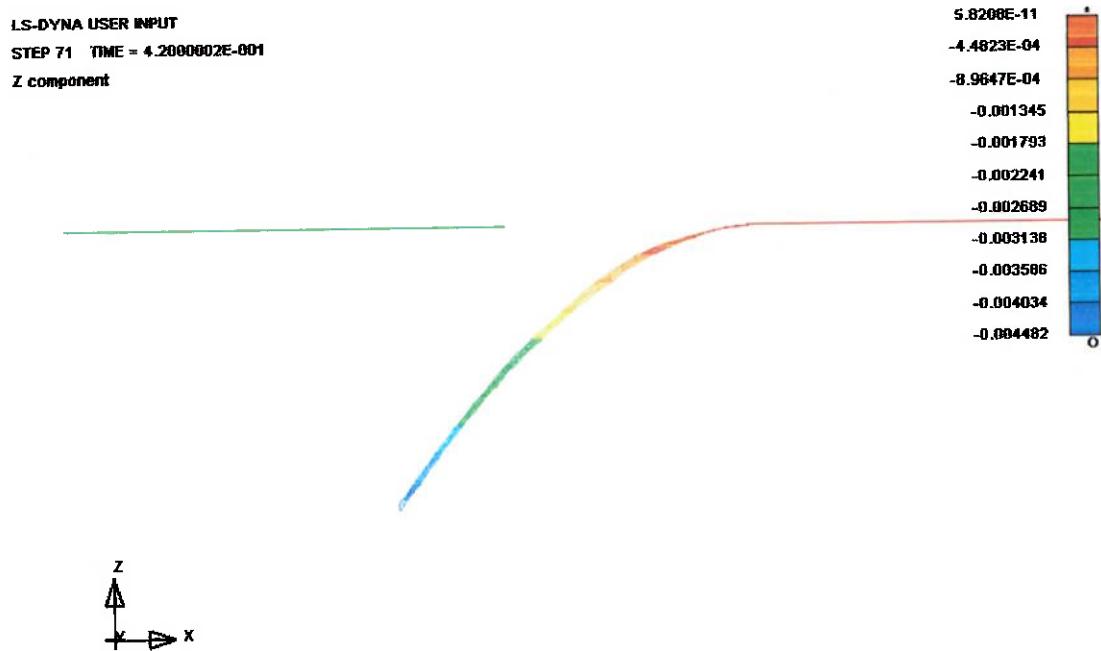


Figura 58 Retorno elástico para o modelo mais discretizado do tipo 4

9.2.4. Simulação numérica – LS DYNA – Parte 2

A análise do comportamento da chapa ao longo da aplicação de deslocamento mostrou uma tendência inesperada que foi o embarrigamento da região próxima à presa pela morsa. Esse efeito não foi observado nos ensaios experimentais, como pode ser visto na figura 59. A conclusão que se pode chegar é que o tipo de elemento utilizado na simulação não é uma boa opção para esse tipo de experiência, pois não condiz com a realidade.

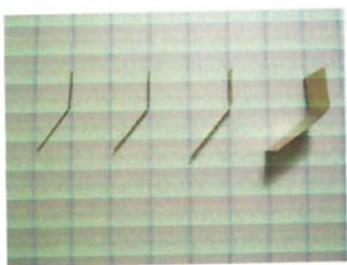


Figura 59 Foto das amostras após ensaio experimental

Visando corrigir a discrepância observada na comparação entre os resultados da simulação e dos ensaios, resolveu-se mudar o material do elemento chapa para mat_anisotropic_plastic, onde foram necessários os dados de densidade, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tensão de escoamento, de acordo com a tabela 3. Em um primeiro momento não foram entrados dados referentes a anisotropia. Mais uma vez a discretização levou em consideração a dimensão do corpo de prova em relação ao conjunto como um todo, sendo diferente para cada um dos corpos. Além de mudar o material, a curva de deslocamento do punção foi alterada a fim de atender aos novos ensaios experimentais.

Tabela 11 Curva de deslocamento do punção

Tempo(s)	Desloc. (m)
0.000	0.0000
0.006	0.0020
0.012	0.0010
0.030	-0.0015
0.036	-0.0020
0.054	-0.0025
0.078	-0.0030
0.096	-0.0030
0.102	0.0000
1.000	0.0000

Tipo 1: 0.014 m X 0.011m x 0.00025m

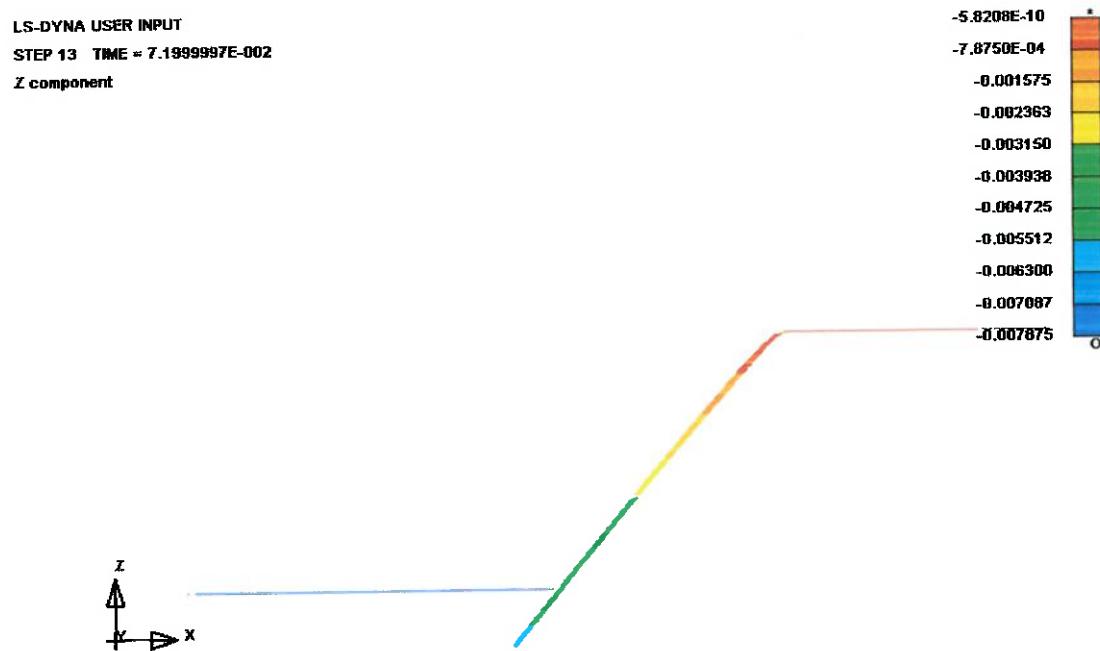


Figura 60 Deslocamento máximo para o modelo do tipo1

Para calcular o retorno elástico da amostra foi utilizado o modelo mais discretizado. O resultado se encontre na tabela 12.

Tabela 12 retorno elástico para a amostra 2

deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
4,558	3,91

Tipo 2: 0.014m x 0.003m x 0.00025m

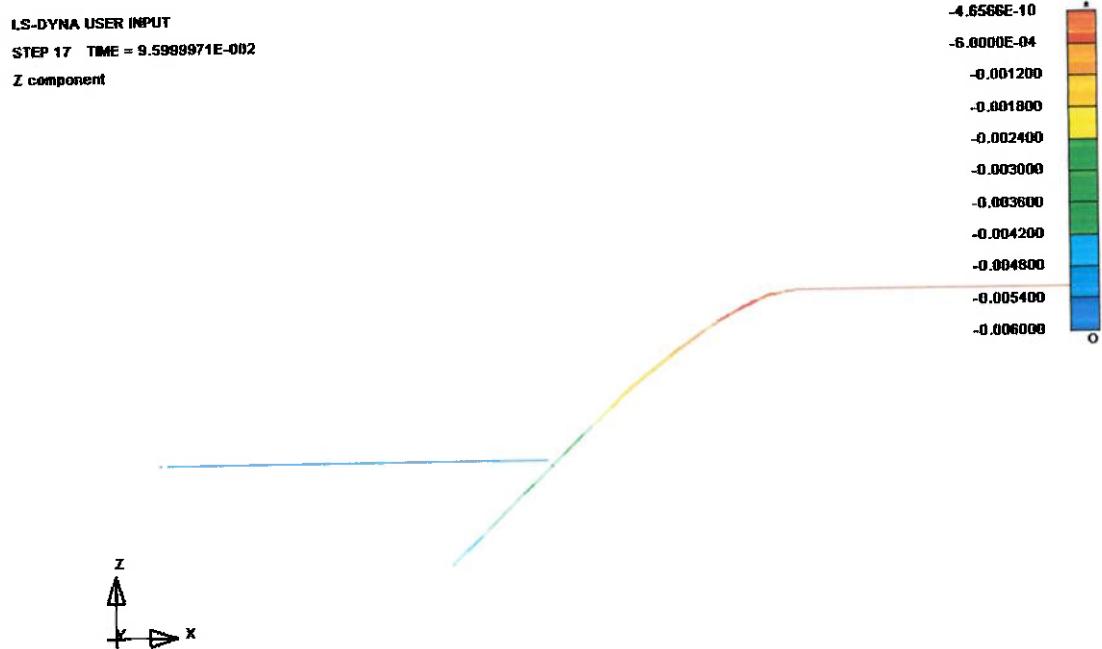


Figura 61 Deslocamento máximo para o modelo do tipo 2

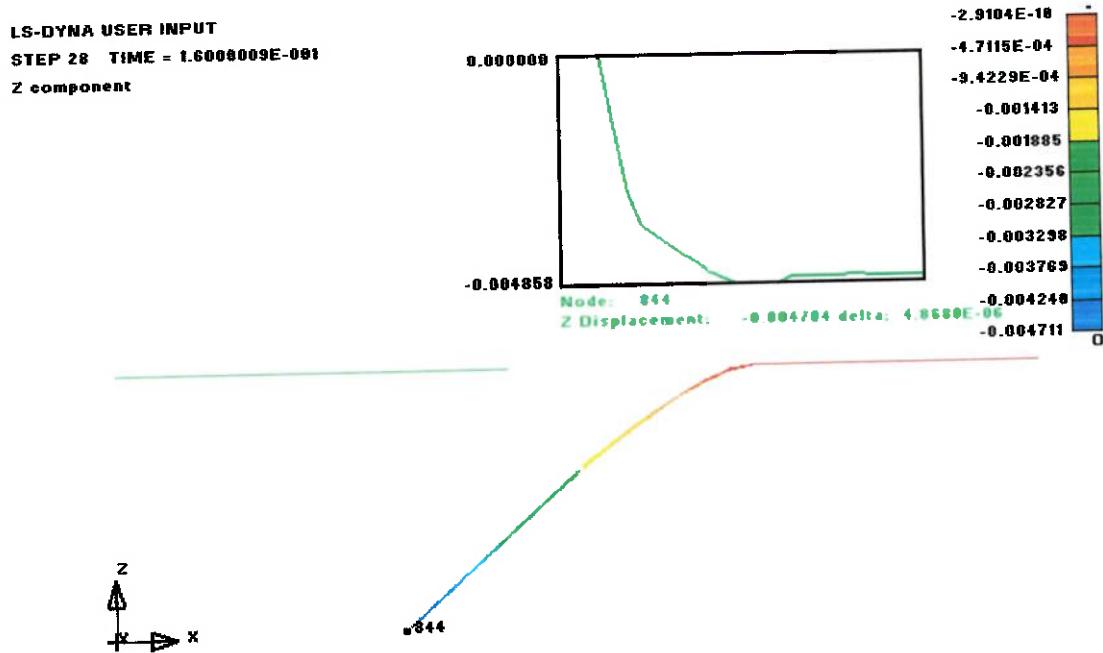


Figura 62 Retorno elástico para o modelo do tipo 2

Para calcular o retorno elástico da amostra foi utilizado o modelo mais discretizado. O resultado se encontre na tabela 13.

Tabela 13 retorno elástico para a amostra 2

deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
4,858	1,50

Tipo 3: 0.014m x 0.0015m x 0.00025m



Figura 63 Deslocamento máximo para o modelo do tipo 3

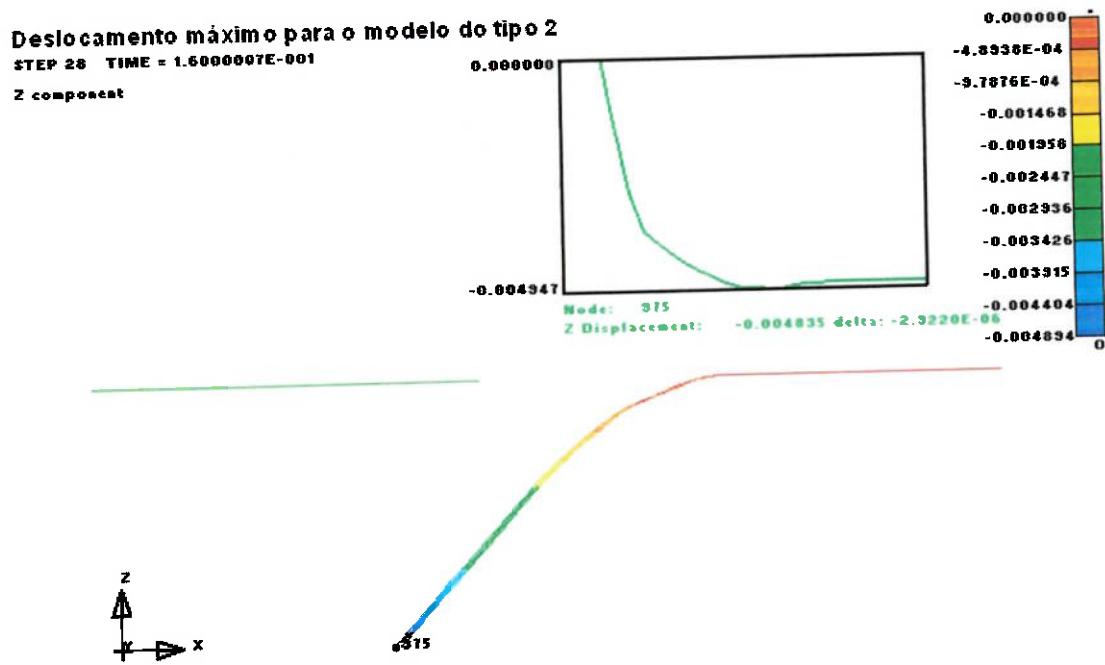


Figura 64 Retorno elástico para o modelo do tipo 3

Para calcular o retorno elástico da amostra foi utilizado o modelo mais discretizado. O resultado se encontre na tabela 14.

Tabela 14 retorno elástico para a amostra 3

deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
4,497	1,01

Tipo 4: 0.0014m x 0.0005m x 0.00025m

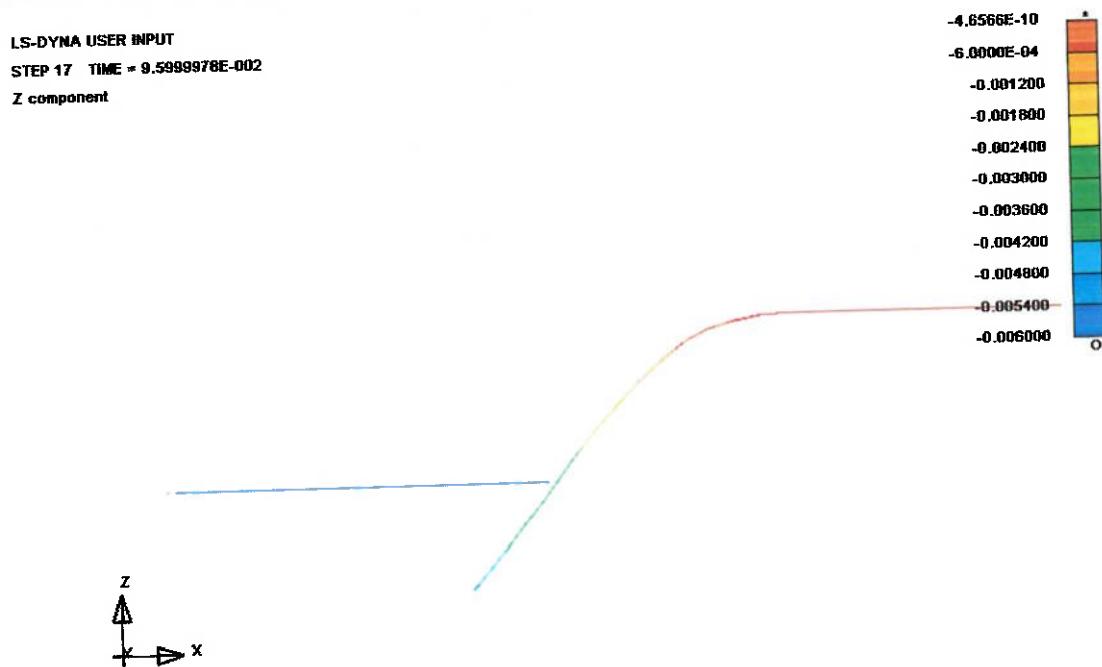


Figura 65 Deslocamento máximo para o modelo do tipo 3

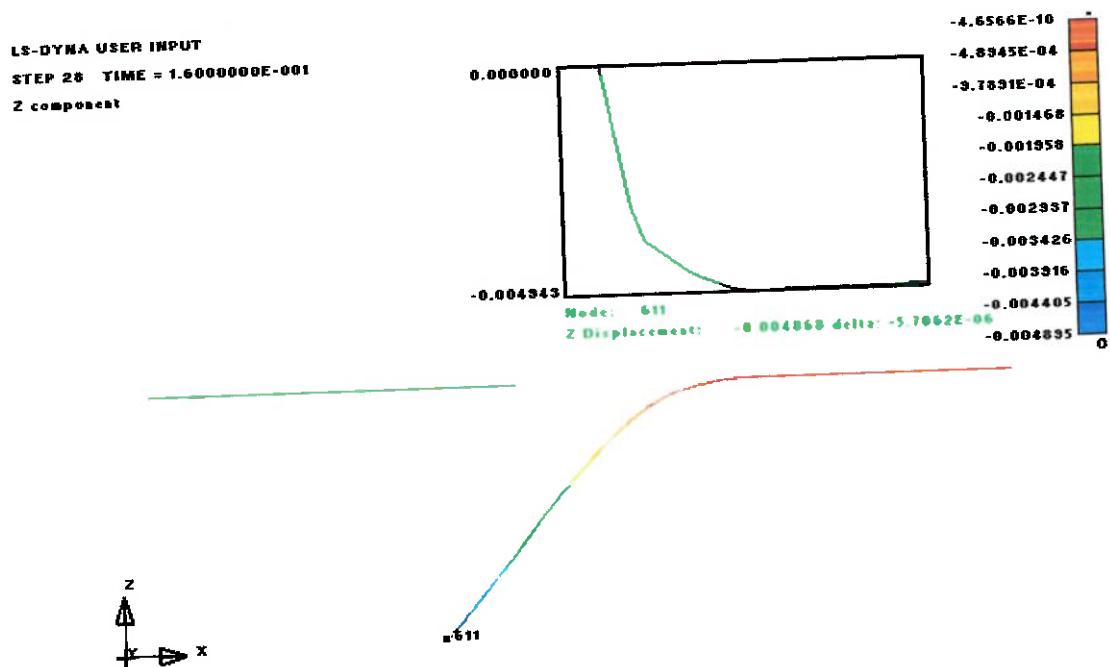


Figura 66 Retorno elástico para o modelo do tipo 3

Para calcular o retorno elástico da amostra foi utilizado o modelo mais discretizado. O resultado se encontra na tabela 15.

Tabela 15 retorno elástico para a amostra 4

deslocamento máximo (mm)	retorno elástico (°)
4,943	0,75

Realizadas todas as simulações numéricas notou-se que fica evidente 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 bem maior). Alguns fatores citados abaixo fazem parte de possíveis fontes de discordância entre os resultados simulacionais e experimentais.

- *Modelo de material e ou elemento utilizado*

Muitas vezes o modelo de material utilizado não se adapta a realidade do ensaio. Procurou-se variar esses modelos, entretanto a diferença obtida não justificou erro na escolha nem do elemento nem do material. Não se testou aqui entrar com valores para a anisotropia, o que poderia ajudar a melhorar o resultado.

- *Parâmetros utilizados*

Pode ocorrer de o material utilizado não estar de acordo com as entradas de propriedades do mesmo no modelo. Isso geralmente ocorre quando se utiliza algum material que sofreu algum tipo de tratamento ou possui alguma tensão residual proveniente de sua produção. Para tentar resolver tal possível problema variou-se as propriedades de entrada, dentro de um patamar aceitável, porém os resultados não demonstraram grandes alterações. Além disso, foram feitas também algumas simulações com

outros tipos de material, exemplo: aço e cobre sem oxigênio, entretanto os resultados seguiram a mesma tendência.

- *Erro sistemático na realização dos ensaios*

Como foram feitos poucos ensaios, uma causa possível para a discrepância encontrada poderia ser algum erro ocorrido durante a realização dos ensaios, porém, como os dados experimentais seguiram um certo padrão, fica reduzida a probabilidade de tal acontecimento.

- *Não adequação do Software a modelos de escala reduzida*

Como a maioria das aplicações de softwares e modelos voltados à estampagem é utilizada para simulação de processos de conformação de chapas de tamanhos médios, uma das causas para a diferença encontrada pode estar no método de cálculo para elementos em escala reduzida. Tal hipótese ganha força quando se percebe que quanto maior a peça simulada menor a distância encontrada em relação ao ensaio.

10. CONCLUSÕES

Neste trabalho fica clara a importância de um melhor entendimento dos resultados obtidos através da conformação no caso de microcomponentes. A simulação numérica vem se tornando uma importante ferramenta nesse sentido, mas ainda é necessário ter uma boa base de dados a respeito da influência do atrito, assim como do efeito de borda, e da importância da inclusão destes efeitos nas simulações MEF.

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 obtidos, pode-se verificar que o efeito de miniaturização já é percebido, pois conforme era esperado, o retorno elástico foi menor nos componentes menores, entretanto esses resultados não refletiram fielmente os resultados obtidos nos ensaios muito provavelmente devido aos motivos citados no capítulo anterior.

11. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo da influência da relação tamanho do componente / tamanho do grão ainda pode ser muito aprofundada. Uma idéia interessante seria desenvolver e montar ferramentas que possibilissem uma grande gama de ensaios com microcomponentes, como ensaio de torção, ensaio de tração, ensaio de compressão etc. possibilitando assim a criação de um banco de dados com informações consistentes sobre o comportamento desse tipo de componente quando sujeito a conformação.

A análise do método dos elementos finitos, assim como de parâmetros que permitam que os softwares consigam reproduzir de forma fidedigna o comportamento real também é de extrema importância para predizer o comportamento de tais componentes.

12. 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 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.; Bissacco, G. – **Micro Engineering** – Annals CIRP, 52/2/2003, 635–57

{10}Dornfeld, D.A.; Oliveira, J.F.; Lee, D.; Valente, C.M. – **Analysis of tool and workpiece interaction in diamond turning using graphical analysis of acoustic emission** - Annals of CIRP v. 52/1/2003, 479 – 82

{11}Messner, A. – **Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile – Werkstoffverhalten, Wirkflächen reibung, Prozessauslegung** – Meisenbach Verlag Bamberg; 1997.

{12}Bortolussi R. - **Análise numérica e experimental da hidroconformação de produtos tubulares** - Tese de doutorado; UNICAMP-FEM-DEMA. 2001

{13}Carleer B. D.- **Finite element analysis of deep drawing**- PhD-Thesis, Univ. of Twente, Netherlands; March 1997

{14}Hill, R. - **The mathematical Theory of Plasticity** - Oxford University Press, 1950.

{15}Johnson, W. e Mellor, P. B.- **Engineering Plasticity** - Van Nostrand, Princeton-NJ, 1973.

{16}Bresciani F., E; et alii - **Conformação Plástica dos Metais** – Ed. UNICAMP, 1991.

{17}Kobayashi, S; Oh, Soo-Ik; Altan, T. – **Metal Forming and the finite-element method** - Oxford Univ. Press, 1989.

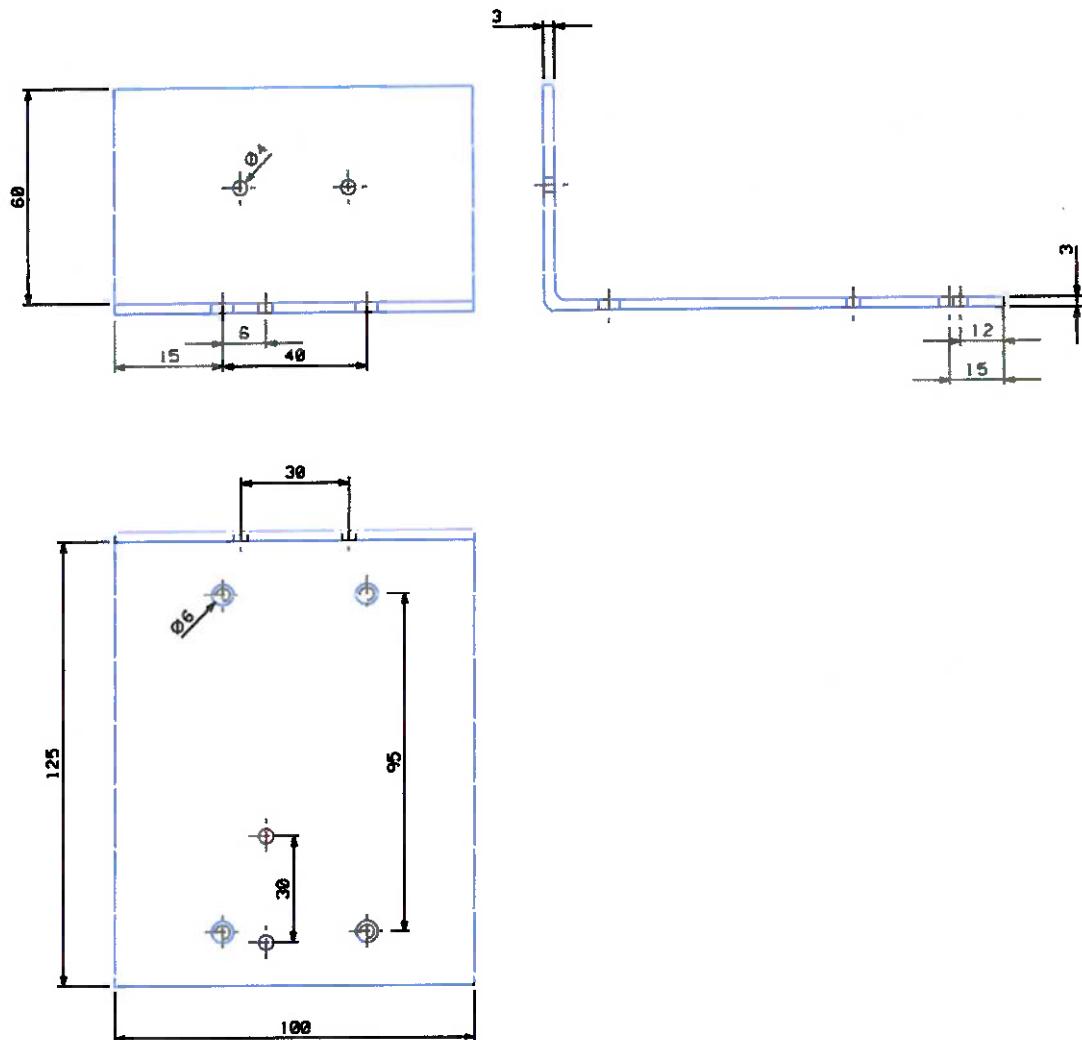
{18}Kalpakjian, S. & Schmid, S. – **Manufacturing Engineering and Technology** – 4^a Ed., Prentice Hall, EUA, 2001.

{19}Batalha, G. F. et al. – **Analysis of the contact conditions and its influence on the interface friction in forming processes**, Metal Forming 2000, Proc. 8th Int. Conf. on Metal Forming, Rotterdam, A. A. Balkema, 2000, 71-8.

{20}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.

{21}Wagener, H-W. – **Tribologische Untersuchungen zur Kaltmassivumformung**, – Shaker Verlag, Aachen 1999, ISBN 3-8265-6022-1 / ISSN 0945-0769.

Anexo A

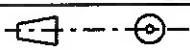


PMR 2550 - PROJETO DE CONCLUSAO DE CURSO

ELABORADO POR
FLAVIA SILVA

DATA
02/12/2004

DESENHO DE FABRICACAO
BASE DO DISPOSITIVO



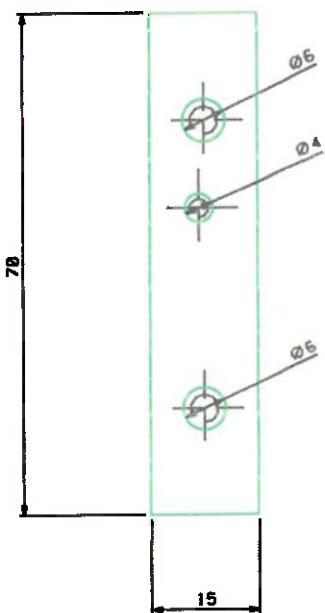
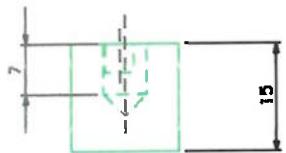
MATERIAL
SAE 1020

UNIDADE
MM

QUANTIDADE
1

ESCALA
1:2

NUMERO
1



PMR 2550 - PROJETO DE CONCLUSAO DE CURSO

ELABORADO POR
FLAVIA SILVA

DATA
02/12/2004

DESENHO DE FABRICACAO
APOIO DA BASE



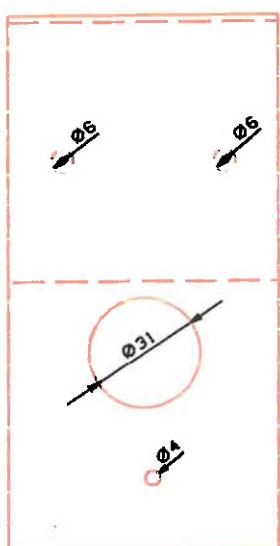
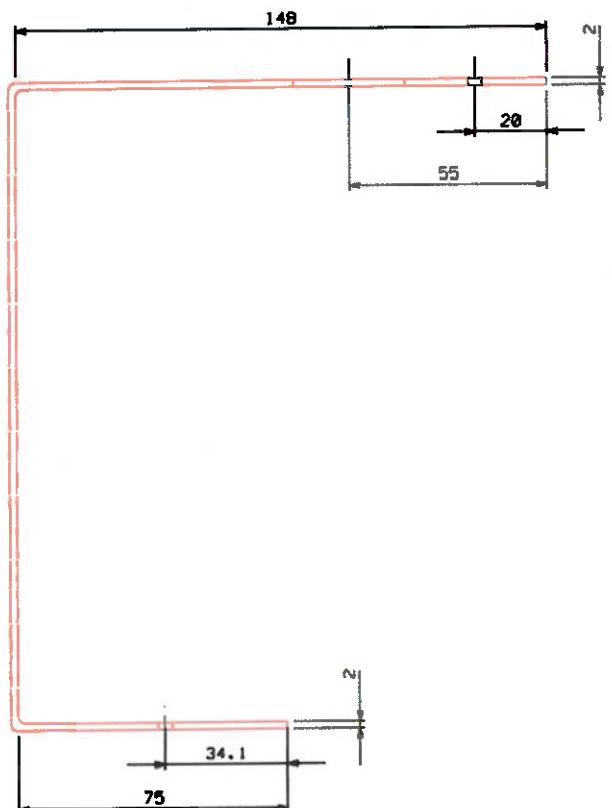
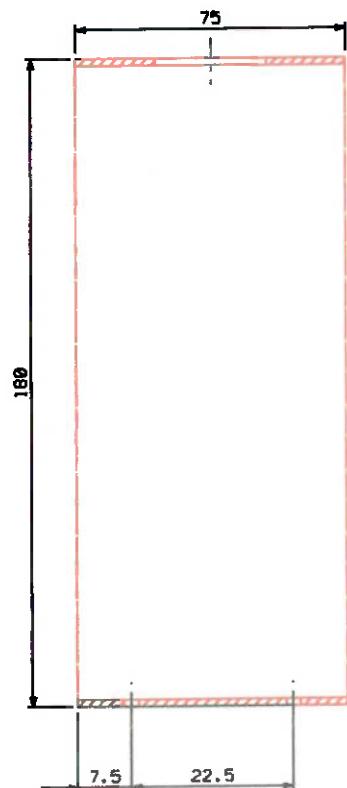
MATERIAL
CUZN15

UNIDADE
MM

QUANTIDADE
2

ESCALA
1:2

NUMERO
2

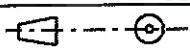


PMR 2550 - PROJETO DE CONCLUSAO DE CURSO

ELABORADO POR
FLAVIA SILVA

DATA
02/12/2004

DESENHO DE FABRICACAO
SUPORTE DA CAMERA



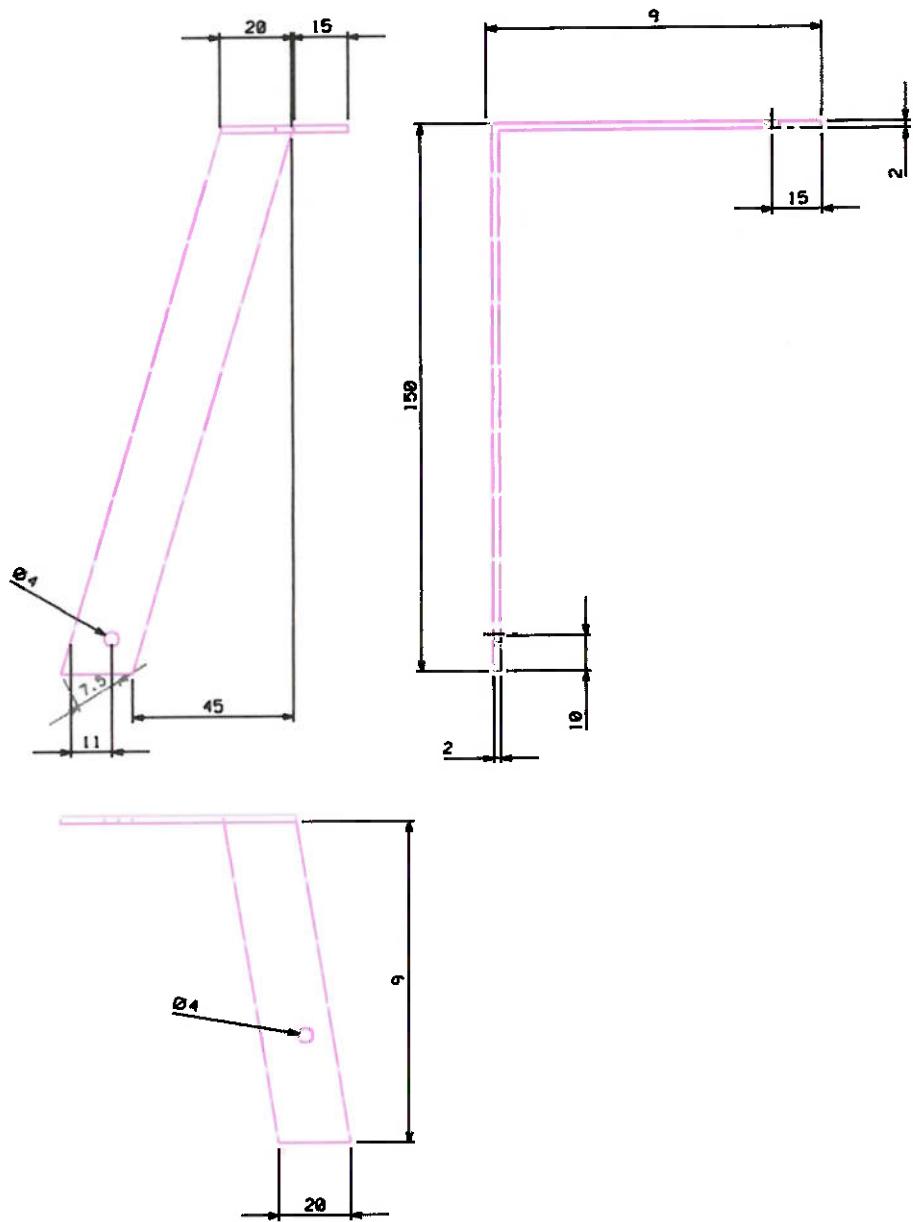
MATERIAL
ALUMINIO

UNIDADE
MM

QUANTIDADE
1

ESCALA
1:2

NUMERO
3



PMR 2550 - PROJETO DE CONCLUSAO DE CURSO

ELABORADO POR
FLAVIA SILVA

DATA
02/12/2004

DESENHO DE FABRICACAO
BARRA DE REFORCO LATERAL



MATERIAL
ALUMINIO

UNIDADE
MM

QUANTIDADE
1

ESCALA
1:2

NUMERO
4