

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

HÉLIO JUN YANAGIMORI

Aspectos relativos à estampabilidade de chapas de latão 70/30

São Paulo
2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

HÉLIO JUN YANAGIMORI

Aspectos relativos à estampabilidade de chapas de latão 70/30

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo

Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica

Orientador: Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

São Paulo
2006

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que sempre me motivaram a seguir em frente.

Ao meu Professor Dr. Ronald Lesley Plaut pela paciência e cooperação em me orientar.

Aos meus amigos que sempre estarão me apoiando.

RESUMO

Atualmente muitas indústrias utilizam a estampagem como parte de seu processo de fabricação. Portanto o estudo deste assunto possui interesse contínuo. Como existem várias variáveis que influem na estampabilidade de uma chapa, faz-se necessário conhecer alguns métodos para determinar as propriedades do material.

Uma forma de estudar a estampabilidade de uma chapa metálica é levantar sua curva limite de conformação (CLC). Para isso pode-se utilizar ensaios mecânicos entre eles, o de estiramento (ensaio Erichsen) e o de tração uniaxial para levantar as curvas CLC.

Este trabalho tem como objetivo estudar aspectos de estampabilidade das chapas de latão 70/30 e comparar os resultados disponíveis na literatura.

ABSTRACT

Nowadays several industries use the stamping operations as part of the manufacturing procedure. Therefore, its study is a subject of continuing interest. As several variables influence the sheet metal formability it becomes necessary to know several methods in order to evaluate the material properties. To study of the formability of a sheet metal is relevant to obtain its forming limit curve (FLC). This can be obtained with the help of mechanical tests such as the Erichsen test and the uniaxial tensile testing.

This work aims at the study several forming aspects of brass (70/30) sheets and compare the obtained results with those available in the literature.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 O cobre e suas ligas.....	10
3.2 Ensaio de tração.....	14
3.3 Estampabilidade.....	17
3.4 Ensaio de estampabilidade.....	23
3.5 Curva limite de conformação (CLC).....	25
3.6 Parâmetros n , m , r e Δr	26
3.7 Ensaio Erichsen: década de 60.....	32
3.8 Ensaio Erichsen: hoje.....	37
3.9 Lubrificantes.....	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1 Materiais.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
6. CONCLUSÃO.....	56
7. REFERÊNCIAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

O processo de estampagem consiste em conformar mecanicamente uma chapa plana (metálica) para obter-se um formato final. Não pode ocorrer neste processo ruptura ou afinamento excessivo durante a conformação [1]. Inicialmente, a estampagem era um processo empírico ou considerado uma arte, mas nos dias atuais, devido à automação do processo de estampagem e as grandes demandas provenientes do mercado, é necessário uma grande capacidade de repetição das propriedades do material estampado [2].

Existem diversas maneiras de se estampar uma chapa, com velocidades e equipamentos diversificados, que se torna necessário realizar uma série de ensaios para que se possa caracterizar a estampabilidade de uma chapa. A figura 1.1 é uma esquematização da diversidade de insumos necessários para a estampagem. A estampabilidade está relacionada com o material e o seu comportamento durante a estampagem.

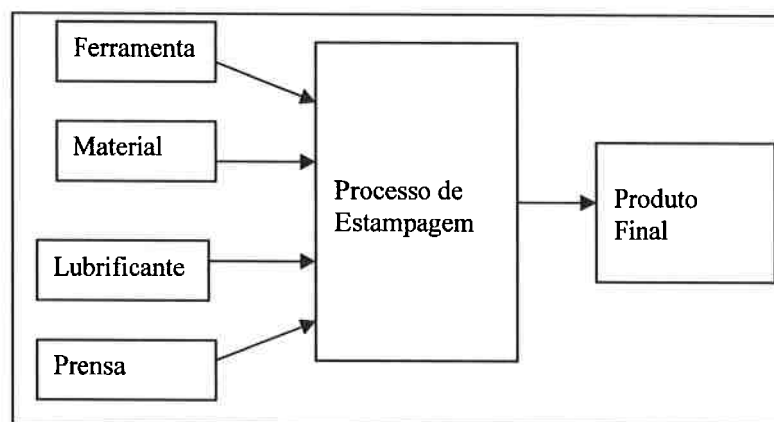


Figura 1.1 – Ilustração do sistema de conformação por estampagem.

Além disso, neste processo há muitas variáveis e entradas que tornam difíceis relacioná-las com os complexos caminhos de deformação. Decorre daí, a necessidade de entendermos as microestruturas, as leis constitutivas e as respostas dos materiais aos complexos tratamentos termomecânicos e sua relação com a estampabilidade [1].

Para que se possa verificar a grande diversidade de parâmetros relacionados à estampabilidade foi criado um diagrama representado na figura 1.2.

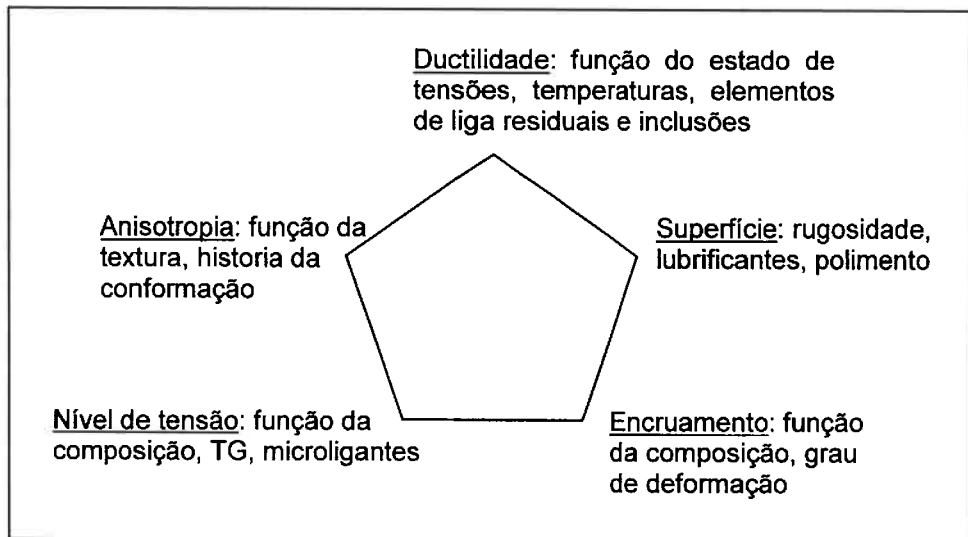


Figura 1.2 – Parâmetros que influem na estampabilidade [3].

Este estudo mostra alguns aspectos e análises de uma primeira abordagem que envolve a estampabilidade de latão 70/30 realizando-se ensaios mecânicos. O latão 70/30 é um material muito utilizado no processo de estampagem.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Este trabalho tem como foco principal o estudo dos aspectos relativos sobre a estampabilidade das chapas de latão 70/30. No presente trabalho efetua-se o levantamento de curvas CLC com o auxílio do ensaio Erichsen e de ensaio de tração. Efetua-se também a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os dados da literatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O cobre e suas ligas

O cobre e suas ligas possuem certas características interessantes. Destes, as propriedades mais significativas são a condutividade elétrica, condutividade térmica, resistência à corrosão, usinabilidade, resistência à fadiga, maleabilidade, conformação e resistência mecânica. Além disso, o cobre possui uma bonita coloração, não é magnético e é facilmente polido ou laqueado. O cobre pode ser brasado e é facilmente soldado [4].

Se for necessário melhorar estas características básicas, especialmente resistência mecânica, sendo que esta melhora não pode afetar outras propriedades desejadas, então se utilizam as ligas como solução para resolver estes problemas. Também são usados materiais comerciais como os latões, bronzes, ligas de cobre-níquel, ligas de cobre com níquel-prata e bronzes especiais desenvolvidos para diversas finalidades [4].

O sistema cobre-zinco com até 40% de zinco forma uma série de ligas denominadas latões. São denominados latões ligados os latões com adição de outros elementos, como alumínio, silício, manganês, níquel e chumbo, num total que raramente ultrapassa 4% em peso. As finalidades destas adições são para melhorar uma ou mais propriedades dos latões comuns, permitindo explorar outras aplicações não atendidas por estes latões [5].

A melhor combinação de ductilidade e resistência para os latões comuns ocorre para a liga 70Cu-30Zn ("cartridge brass"), que possui excelente estampabilidade, sendo utilizado entre outras aplicações em cartuchos, radiadores, tanques e soquete de lâmpadas.

Os latões, além de possuírem uma boa condutividade térmica, podem ser revestidos eletroliticamente por níquel ou cromo-zinco. Latões de diferentes teores de zinco exibem vasta gama de cores, abrindo extensa gama de utilizações para fins ornamentais.

No gráfico 3.1 está o diagrama de equilíbrio das ligas Cu-Zn. As ligas Cu-Zn exibem características de ligas peritéticas. No diagrama é possível observar cinco peritéticos e um eutético.

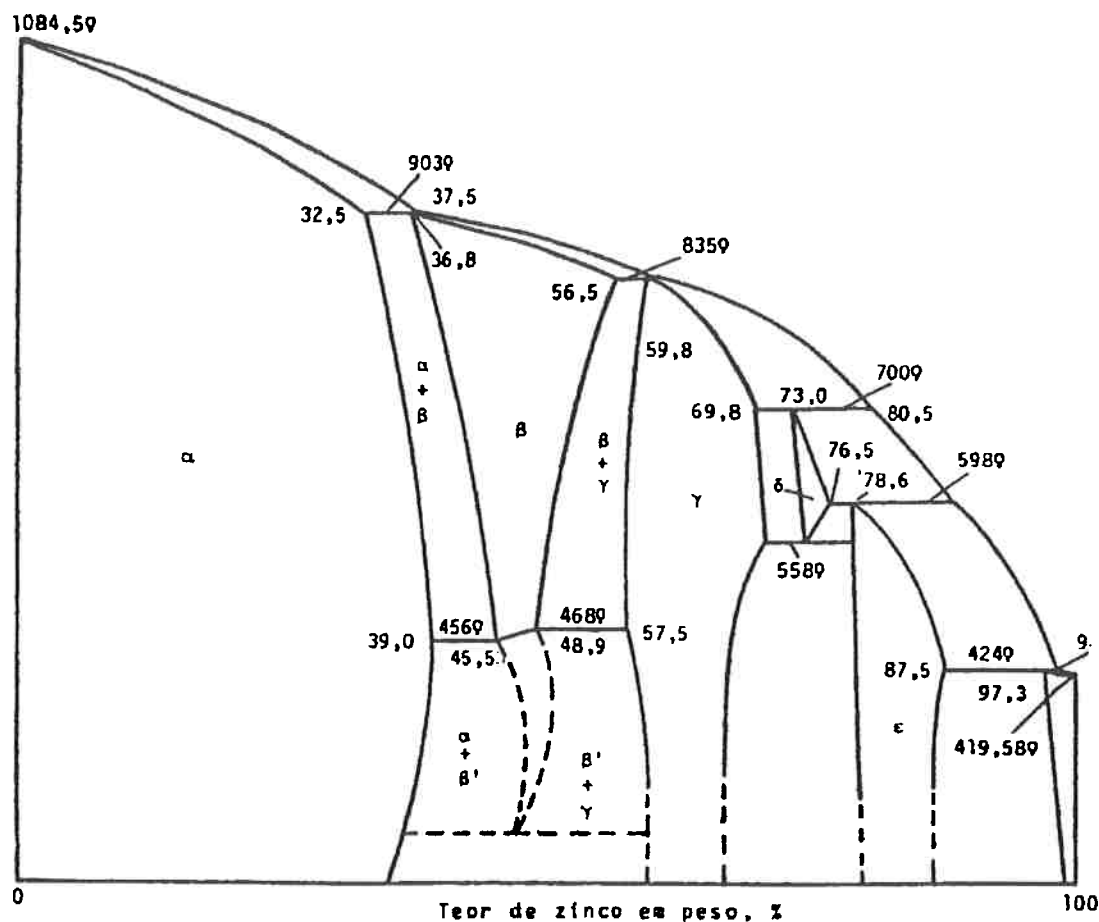


Gráfico 3.1 – Diagrama de equilíbrio Cu-Zn [5].

As fases presentes são descritas como:

- α – CFC (dúctil, solubilidade máxima de 39%);
- β – CCC (dúctil, fase intermetálica desordenada);
- β' – CCC (dura e frágil, fase intermetálica ordenada);
- γ – CC (cúbica complexa, dura e frágil).

Os latões comerciais são divididos em dois grupos com base no diagrama Cu-Zn:

- Latões alfa, formados apenas de fase alfa e contendo cerca de até cerca de 35% de Zn;
- Latões alfa-beta com estrutura bifásica, com composições ao redor de 40% de Zn.

Os latões alfa possuem uma faixa de 0 a 39% de Zn, no qual estes latões são sólidos à temperatura ambiente. Apesar de permitido pelo diagrama de equilíbrio, as ligas comerciais possuem menos de 35% de Zn para evitar a retenção de fase beta metaestável.

Para uma mesma deformação a frio, a subestrutura de discordâncias do material se altera com a elevação do teor de zinco, devido à diminuição da energia de falha de empilhamento (EFE). No cobre puro a EFE é elevada e há o escorregamento cruzado fácil, resultando num reduzido espaçamento entre as linhas de escorregamento. Com a adição de zinco, o escorregamento cruzado vai ficando cada vez mais difícil e as discordâncias tendem a permanecer em seus planos de escorregamento. A elevação no teor de zinco implica em um maior volume de maclas de recozimento [5].

O grande emprego dos latões alfa está associado à sua elevada ductilidade, com adequada resistência mecânica, boa resistência à corrosão, cor agradável e facilidade de brasagem [4].

Os latões alfa-beta estão situados na faixa de 38 a 47% de zinco. Estes latões solidificam diretamente como fase beta, que no resfriamento subsequente se transforma, em maior ou menor grau, em fase alfa. A liga mais empregada do grupo é a liga 60Cu-40Zn, denominada metal Muntz [5]. A estrutura bruta de fundição da liga 60Cu-40Zn é formada por dendritas de fase alfa em uma matriz de fase beta, facilmente refinada por deformação plástica a quente, pois a presença de fase beta na microestrutura dificulta o trabalho a frio. Apesar de ser passível de tratamento térmico, as propriedades obtidas não são vantajosas, ocorrendo sensível diminuição da ductilidade.

A transformação $\beta \rightarrow \beta'$ é uma transformação de ordem-desordem onde a fase ordenada dificilmente mostra o aspecto característico de domínios. A ordenação tem um pronunciado efeito endurecedor e é responsável pela baixa ductilidade a frio desses latões [5].

Em relação às propriedades mecânicas do latão, tem-se:

Latões de baixo zinco ("low brasses") – 80 a 95% de Cu, 5 a 20% de Zn:

- O aumento do zinco eleva a resistência, dureza e ductilidade;
- A cor varia do vermelho até o amarelo-esverdeado, passando pelo dourado;

- A trabalhabilidade a quente é comparada ao do cobre comercial desde que o teor de chumbo seja menor que 0,01%;
- No estado recozido, estes latões tem elevada ductilidade, fácil deformabilidade por métodos usuais de conformação.

Latões com alto zinco ("high brasses") – 60 a 80% de Cu, 20 a 40% de Zn:

- Na faixa de 20 a 30% de Zn, a resistência mecânica e a ductilidade continuam aumentando com o aumento do teor de zinco. Quando o teor de zinco excede 35%, a ductilidade começa a cair devido à presença de fase beta, mas a resistência e a dureza continuam a crescer até cerca de 45% de Zn;
- Os latões alfa com zinco entre 20 e 35% são mais difíceis de trabalhar a quente e exigem teores residuais de chumbo no nível de traços;
- Os latões alfa-beta podem ser facilmente trabalhados a quente. A trabalhabilidade a frio é dificultada pela presença da fase beta, que fica tanto mais difícil quanto mais elevada a quantidade de fase beta.

Para o caso dos latões ligados ("alloy brasses"), pequenas adições de elementos de liga não alteram acentuadamente as propriedades mecânicas. Contudo, adições simultâneas de elementos como Mn, Fe e Sn podem resultar em aumento significativo da resistência. A adição de até 3% de chumbo melhora a usinabilidade com acentuada diminuição da ductilidade [4].

Um dos principais motivos para o extenso emprego dos latões é sua elevada resistência à corrosão atmosférica e à água do mar. Apesar disto, em certas condições eles podem sofrer dois graves tipos de corrosão:

- Corrosão sob tensão: latões alfa encruados com mais de 15% de Zn em contato com amônia na presença de oxigênio e umidade estão sujeitos a corrosão sob tensão. A trinca é usualmente intergranular podendo ser transgranular em materiais severamente encruados. Este tipo de corrosão pode ser eliminado por um alívio de tensões a baixas temperaturas (recuperação);

- Dezincificação: um tipo de ataque em que alguns latões estão sujeitos e onde ocorre corrosão preferencial do zinco resultando num cobre poroso e produtos de corrosão. Parece que o zinco difunde para a superfície do latão reagindo com o meio, deixando um resíduo de liga rico em cobre.

Atualmente são utilizados dois tipos de processos de laminação de latões no Brasil. O primeiro é a laminação a frio com etapas posteriores de recozimento. Já o segundo é a laminação à quente.

3.2 Ensaio de tração

O Ensaio de Tração é amplamente utilizado para o levantamento de informações básicas sobre a resistência dos materiais e como um teste de aceitação de materiais que se faz pelo confronto das propriedades determinadas pelo ensaio e ajustes especificados em projeto. O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial crescente a um corpo de prova especificado, ao mesmo tempo em que são medidas as variações no comprimento. As especificações quanto à forma e dimensões dos corpos de prova, velocidade de tensionamento, base de medida, entre outros, são ditadas pela norma técnica correspondente, que no caso de materiais metálicos é a NBR 6152 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A figura 3.1 descreve um ensaio de tração. O gráfico 3.2 é o da tensão pela deformação.

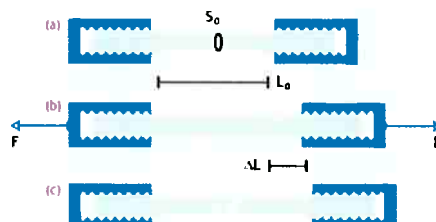


Figura 3.1 – Ensaio de tração [6].

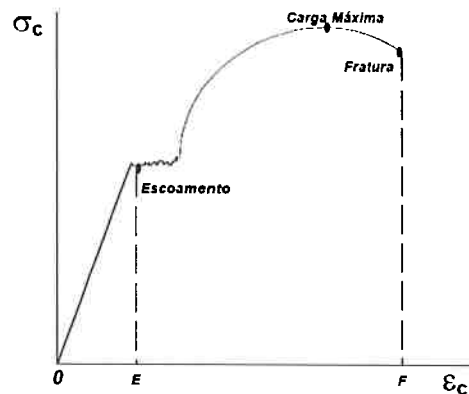


Gráfico 3.2 – Curva tensão x deformação.

O diagrama tensão-deformação indica a existência de duas regiões de comportamento mecânico distintas: a região elástica (OE) na qual uma vez aliviada a carga uniaxial não resta nenhuma deformação residual no corpo de prova, e uma região plástica (EF) no qual deformações permanentes vão sendo geradas no corpo de prova à medida que se aumenta a magnitude da carga uniaxial aplicada, até o ponto de fratura. A fronteira entre estas duas regiões é conhecida como ponto de escoamento.

Em alguns materiais este início da deformação plástica é caracterizado por uma queda brusca na carga de ensaio, o que faz surgir um ponto de escoamento superior e um inferior. Neste caso o limite de escoamento é representado pela tensão do ponto superior de escoamento, conforme preconiza a norma técnica correspondente.

Na maioria dos materiais o ponto de escoamento não é tão evidente (escoamento imperceptível), e sua determinação é feita através de uma quantidade de deformação plástica convencionada, $x\%$, onde na maioria das situações $x = 0,2\%$. O limite de escoamento é então determinado traçando-se uma paralela ao trecho linear do diagrama tensão-deformação, a partir do ponto $x = 0,2\%$ do eixo das deformações.

A realização do ensaio de tração em equipamentos que permitam o registro da variação instantânea da secção transversal do corpo de prova para cada carga aplicada permite que sejam determinados os vetores reais de tensão e deformação e conseqüentemente que se obtenha o diagrama tensão-deformação real.

$$\sigma_R = \frac{P}{S} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_E = \ln \frac{l}{l_0} \quad (3.2)$$

onde: σ_R - Tensão real

ε_R - Deformação real

Admitindo que a variação de volume na região plástica é desprezível, então:

$$\frac{l}{l_0} = \frac{S_0}{S} \quad (3.3)$$

Logo:

$$\varepsilon_R = \ln \frac{S_0}{S} \quad (3.4)$$

Considerando a correlação entre tensões e deformações reais, então:

$$\varepsilon_R = \ln(1 + \varepsilon_C) \quad (3.5)$$

$$\sigma_R = \sigma_C (1 + \varepsilon_C) \quad (3.6)$$

A partir do ponto de máxima carga do ensaio ocorre o efeito de redução localizada da secção transversal (estricção) e estabelece-se um estado triplo de tensões, a partir do qual as expressões obtidas para o cálculo de tensões e deformações não são mais exatamente aplicáveis.

No presente trabalho, nos corpos de provas foram estampadas grades por eletro-corrosão, para que fosse possível realizar os cálculos de deformação.

3.3 Estampabilidade

A estampabilidade é um termo utilizado para definir a capacidade de um material metálico, geralmente uma chapa plana, de ser conformada mecanicamente até obter-se uma forma final definida [4].

A operação de estampagem geralmente não é a última operação dentro de um sistema de fabricação. Na maioria das vezes, a peça estampada é parte de um processo de montagem de um produto e, portanto, sofrerão soldagem, junção mecânica ou até mesmo colagem nas etapas posteriores. Nesse sentido é necessário que a peça tenha uma grande qualidade na hora de ser estampado, pois o produto final pode não ser aquele previsto pelo fabricante [1].

Além disso, busca-se sempre a otimização em relação ao uso dos materiais, como redução de espessura a fim de diminuir a massa dos componentes finais. Busca-se também neste sentido, manter ou até mesmo aumentar a resistência mecânica destes componentes, para efetivamente reduzir os custos de fabricação.

É interessante notar que há uma certa dose de complexidade para reunir o projeto do produto final com seu processo de fabricação. Existem dois estágios importantes que devem ser levados em conta: a visão do projetista de produto que determina a aplicação final do produto e a visão do projetista de processo que determina todo o processo produtivo, da chapa metálica plana até que se chegue no produto desejado [2].

Devido às diversas formas geométricas do material estampado, existem muitas maneiras de se classificar as operações básicas de estampagem com a finalidade de se analisar a estampagem de chapas. Pode-se determinar, por exemplo, a classificação dependendo do grau de complexidade crescente. Neste exemplo, subdivide-se em operações lineares e superficiais, como mostrado na tabela 3.1 [1].

Tabela 3.1 – Resumo das principais operações elementares de estamparia de chapas [1].

Operações Lineares	
Retilíneas	Curvilíneas
Dobramento	Flangeamento
Dobramento com estiramento	Flangeamento com estiramento
Deformação planar	Expansão de furo
Operações Superficiais	
"Blank infinito"	"Blank limitado"
Estiramento biaxial	Estampagem profunda

A seguir estão descritas os principais tipos existentes de conformação por estampagem [2]:

- Corte ("cutting") – a preparação de um *blank* metálico partindo de uma chapa por uma operação de corte (figura 3.2) é facilmente identificada como a primeira etapa em um processo de conformação de quase todas as estampagens de chapas metálicas. Em alguns casos o *blank* por si próprio já é a peça, como no caso de laminas de motores. O corte pode gerar apenas um furo, um novo perfil, um ajuste de largura ou comprimento da chapa;

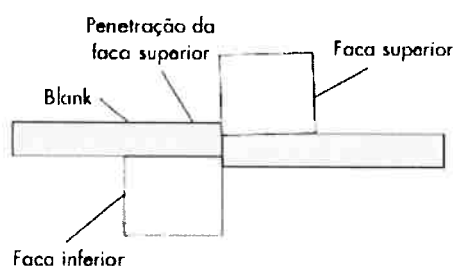


Figura 3.2 – Operação de corte [7].

- Dobramento ("bending") – a dobra é um dos mais comuns métodos usados para alterar a forma da chapa do metal. É a operação de conformação plástica na qual a tira (peça) é submetida a um estado de carregamento devido a um estado fletor, fazendo com que a linha neutra (situada a meia distancia da espessura) se desloque em direção à superfície interna do material dobrado, à medida que a deformação plástica prossegue (figura 3.3) assim, no estágio final, mais de 50% do

material fica submetido a um estado de tensões de tração, fazendo que haja, obrigatoriamente, diminuição da espessura da tira.

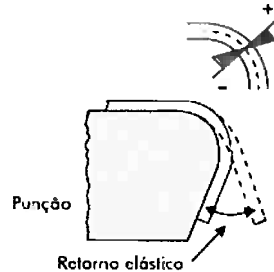


Figura 3.3 – Ilustração de dobra [7].

- Dobra e estiramento (“bending-and-straighten”) – o resultado final do processo de dobra e estiramento é muito semelhante ao encontrado no processo de dobra. A diferença está na configuração do processo que possui uma prensa-chapas, uma matriz e um punção com formatos diferenciados.
- Deformação planar de estiramento (“plane strain stretch”) – a deformação planar de estiramento é similar à operação de dobra, porém uma componente de deformação de tração é adicionada através do raio.
- Flangeamento (“flanging”) – outro grau de complexidade é adicionado a dobra quando a linha de dobramento é alterada da reta para a curvada. A deformação ao longo desta linha passa a ser diferente de zero, podendo ser positiva ou negativa. O flangeamento pode ser dividido em dois grupos: de enrugamento e de estiramento.
- Expansão de furo – consiste basicamente na conformação de uma chapa com um furo pré-existente.
- Estampagem (“drawing”) – a operação mais comum de estampagem é a formação de um copo cilíndrico. A chapa é estampada em uma

cavidade ou matriz pela ação de um punção plano. A deformação é restrita às áreas de flange da chapa. Não há deformação no “fundo do copo”. Isto é o oposto que ocorre no estiramento. A característica única da estampagem profunda é o estado de deformação do flange (figura 3.4). Enquanto a chapa é empurrada pela linha da matriz, a circunferência do mesmo reduz-se. Esta redução na circunferência gera tensão compressiva na direção circunferencial, resultando em um alongamento radial.

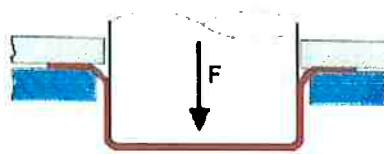


Figura 3.4 – Estampagem de um copo [7].

- Estiramento biaxial (“stretching”) – estiramento biaxial é o único modo de conformação no qual ambas as deformações (maior e menor) são positivas. Um exemplo comum é a penetração de um punção hemisférico em uma chapa de aço travada por um “anti-rugas” (figura 3.5). Isto implica que, sendo as duas deformações no plano da chapa positivas e a soma das três deformações principais é nula, a deformação na direção da espessura será obrigatoriamente negativa [2].

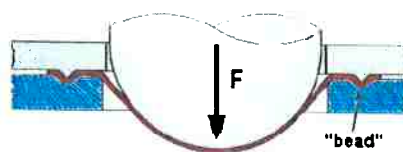


Figura 3.5 – Estiramento [7].

Com o desenvolvimento de novos processos de fabricação de chapas tem-se que considerar cada vez mais a relação entre a microestrutura e a estampabilidade, para que se possam criar novos produtos.

Existem duas variáveis que controlam as microestruturas: a dinâmica e a estática. A estática descreve a estrutura da chapa, antes da operação de estampagem; a dinâmica descreve a evolução da estrutura durante a estampagem

[2]. A microestrutura estática está associada ao histórico de fabricação e conformação da chapa, ou seja, relacionada à solidificação do material, bem como a sua modificação devido aos processos de laminação e tratamentos térmicos. As variáveis a serem consideradas são nesse caso: composição da liga, solutos, partículas de segundas fases, discordâncias, energias de falha de empilhamento, orientação preferencial (textura), além do tamanho, forma e distribuição das inclusões. Na microestrutura dinâmica há a observação das mudanças que ocorrem durante o processo de estampagem, por exemplo, o aumento na densidade de discordâncias, o efeito de partículas, contornos de grão e interfaces. Portanto pode-se incluir neste quesito que as modificações na microestrutura estática através da mudança na morfologia dos grãos e de inclusões, fratura de partículas, formação de vazios e da textura cristalográfica decorrente da operação de estampagem [1].

Com isso, deve-se levar em conta além da estampabilidade, as noções de microestrutura estática e dinâmica. Devido à presença da não-homogeneidade das duas microestruturas, além da não-homogeneidade adicional devido à deformação ao qual uma placa é submetida, ocorrem deformações localizadas e/ou falhas prematuras com o desenvolvimento da microestrutura dinâmica mostrado esquematicamente na figura 3.6.

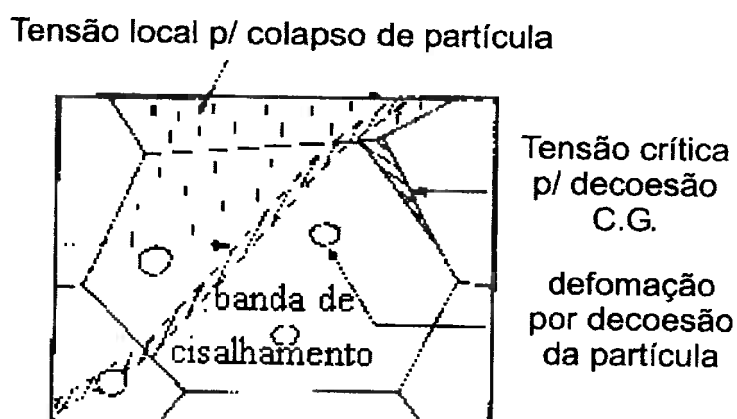


Figura 3.6 – Eventos locais que influem na microestrutura dinâmica [1].

A figura 3.7 é um diagrama de Ishikawa mostrando resumidamente o sucesso na obtenção de uma peça estampada, que depende de uma série de fatores relacionados ao material, ao processo e ao equipamento.

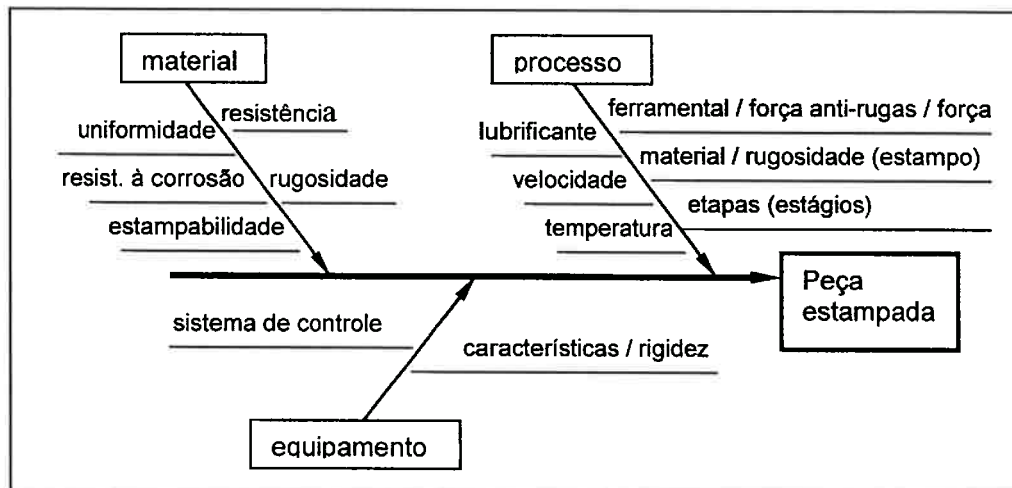


Figura 3.7 – Fatores que influem na estamparia de peças [1].

Para a literatura técnica de estampagem de chapas, é comum subdividir as operações acima citadas entre dois casos: estampagem profunda e estiramento, como ilustrado na figura 3.8 [1].

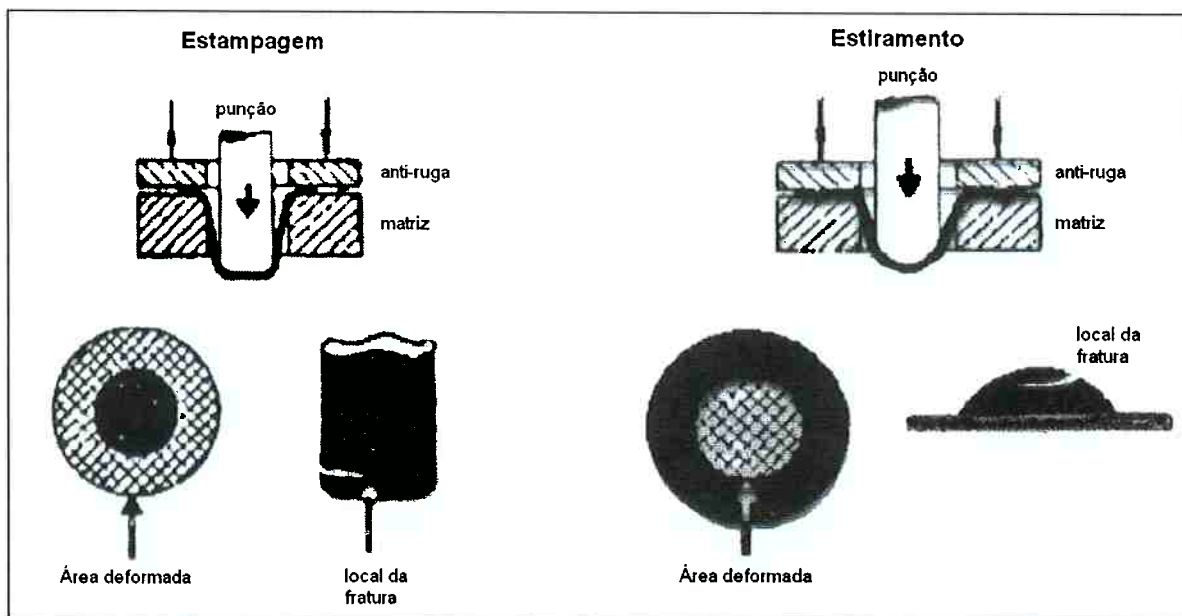


Figura 3.8 – Operações básicas de estampagem profunda e estiramento [1].

Em um processo produtivo, existe uma série de operações que envolvem dobramentos, corte, estiramento, flangeamento, expansão de furo, estampagem profunda, afinamento de paredes e variações destas que uma peça pode apresentar

um grau intenso de complexidade mesmo que sua forma seja aparentemente bem simples. Nota-se que existem neste processo variações de espessura, variação na aplicação de esforços, lubrificação não uniforme, anisotropia que influem e dá a diversidade que tem sido estudada tanto na teoria quanto na prática [2].

Para que haja a otimização da estampabilidade, o material deve possuir certas características [1] como:

- Distribuir uniformemente as deformações;
- Atingir altos níveis de deformação sem formar “pescoço” ou fraturar;
- Suportar tensões planares de compressão sem que haja enrugamento ou fratura;
- Conservar a superfície lisa e resistir a danos superficiais (riscamento);
- Conservar o formato de peças recém estampadas devido ao recuo elástico (“springback”), de maneira repetitiva e apresentar resistência ao indentamento;
- Ter boa soldabilidade (convencional e a “laser”);
- Ter boa resistência à corrosão;
- Ter facilidade de aplicação de tintas / camadas protetivas;
- Ter baixo custo.

O material deve preencher todos estes requisitos, além de passar pelos testes e ensaios que viabilizam a estampabilidade do mesmo.

3.4 Ensaios de estampabilidade

Para que se possam caracterizar as chapas metálicas, são realizados ensaios laboratoriais. Neste caso, estes são classificados como intrínsecos e simulativos. No caso intrínseco, o corpo de prova não depende da espessura nem das condições superficiais [1]. Por exemplo, o ensaio de tração uniaxial, ensaio de tração em estado plano de deformação, ensaio de expansão hidráulica, entre outros. No ensaio simulativo, os corpos de provas são sensíveis em relação à espessura, condições superficiais, lubrificantes, tipo e geometria do ferramental. Existem inúmeros ensaios

de estampabilidade, dos quais os mais empregados são os ensaios de embutimento Erichsen, o ensaio Olsen e o ensaio de Nakazima, em que predomina a operação de estiramento, e o ensaio Swift, em que predomina a operação de estampagem, Fukui, Marciniak, recuo elástico, entre outros [2].

Através do ensaio de tração uniaxial, que é um dos mais importantes, são obtidos valores como o L.E. (limite de escoamento), L.R. (limite de resistência), $Al_{uniforme}$ (alongamento uniforme) e Al_{total} (alongamento total), a taxa de encruamento n e os valores dos índices de anisotropia r e Δr [1].

Em estampagens que envolvem basicamente estiramento, o material a ser selecionado deve possuir valores elevados de n , pois quanto maior for, melhor será a distribuição das deformações sob gradientes de tensão. Neste caso, a peça terá menor quantidade de concentrações de deformações, ou seja, menor será o afinamento localizado [2].

Na tabela 3.2 estão especificados alguns parâmetros do latão destinados para estampagem [8].

Material		$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	δ_m	$\delta_{5\%}$	δ_{tot}	r	r_{med}	Δr
latão 70/30-8	direção de laminação	197	398	0,46	0,50	0,51	0,85		
	45° da direção	183	378	0,49	0,54	0,54	0,87		
	direção transversal	188	379	0,48	0,52	0,53	0,73		
								0,83	-0,08
latão 70/30-31	direção de laminação	137	364	0,58	0,64	0,64	0,90		
	46° da direção	134	337	0,62	0,68	0,69	1,18		
	direção transversal	140	348	0,59	0,65	0,66	0,74		
								1,00	-0,36
latão 70/30-82	direção de laminação	106	337	0,65	0,71	0,71	0,72		
	46° da direção	101	303	0,77	0,82	0,82	1,36		
	direção transversal	110	325	0,69	0,74	0,75	0,74		
								1,04	-0,63
latão 64/36-32	direção de laminação	114	331	0,59	0,65	0,66	0,88		
	47° da direção	112	315	0,69	0,74	0,74	0,87		
	direção transversal	122	331	0,58	0,63	0,63	0,69		
								0,83	-0,09

Tabela 3.2 – propriedades mecânicas [8].

3.5 Curva Limite de Conformação (CLC)

A curva limite de conformação (CLC) permite representar visualmente, através de um gráfico, a estampabilidade de uma chapa. O limite de conformação é o estado em que se dá início do afinamento localizado.

Estes diagramas indicam as deformações principais ε_1 e ε_2 na instabilidade difusa ou localizada no estado plano de tensão, para diferentes caminhos de deformação [1].

Elas são construídas empiricamente e descrevem o estado de deformações principais, mostrando uma zona de deformação de afinamento intenso ou localizado, tornando-os visíveis. Existem diagramas que podem correlacionar com a CLC como os diagramas de fratura.

Existem ainda os ensaios com carregamento “no plano”, no qual não há o contato com a ferramenta, e o ensaio com carregamento “fora do plano”, no qual existe o contato, cujo atrito da ferramenta e o dobramento da chapa por sobre a ferramenta são levados em conta [1]. No gráfico 3.3 estão as representações de CLC de latões 70/30. De acordo com a norma UNS, o latão 70/30 (“cartridge brass”) corresponde à liga C26000 apresentados na tabela 3.3.

Os valores das condições de cada latão 70/30 aplicáveis para o estudo das curvas CLC estão destacados na tabela abaixo:

Tabela 3.3 – Ligas de latão 70/30 estudados usando análise de conformação limite [9].

Designação UNS	Nome comum	Condição dos materiais aplicáveis à CLC
C23000	Latão vermelho	Recozido; 0,69mm de espessura; 0,024mm de tamanho de grão; 293MPa
C26000 (1)	Latão de cartucho	Recozido; 0,64mm de espessura; 0,025mm de tamanho de grão; 345MPa
C26000 (2)	Latão de cartucho	Meio endurecido; 0,69mm de espessura; 345MPa
C26000 (3)	Latão de cartucho	Endurecido; 0,51mm de espessura; 531MPa

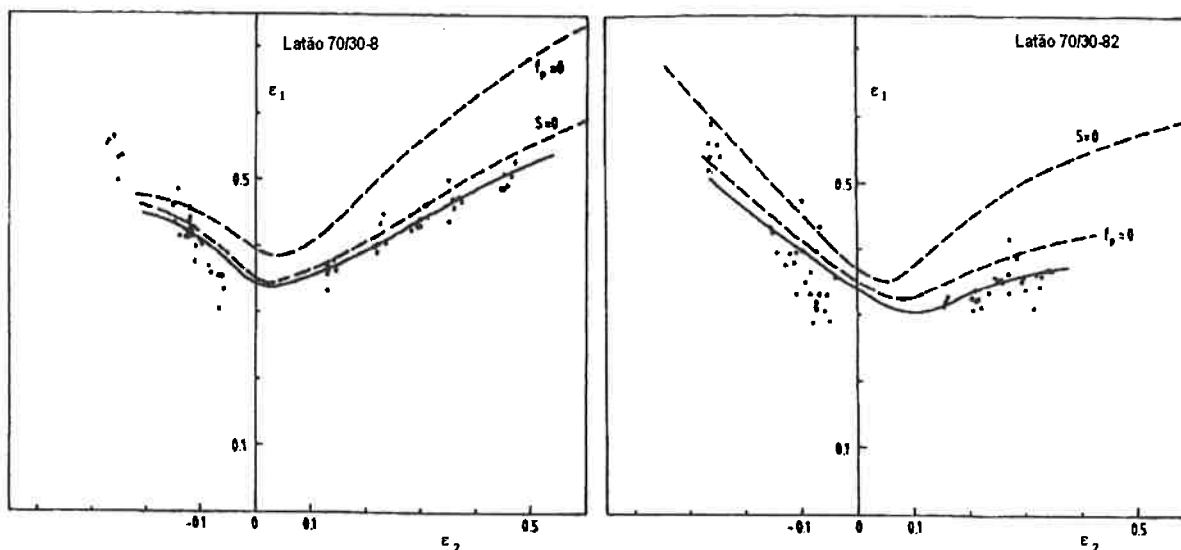


Gráfico 3.3 – Exemplos de CLC para latão 70/30 [9].

Realizam-se medições das deformações sobre a chapa previamente gravada com círculos por meio eletroquímico ou fotográfico e levada até a fratura [1].

Melander e Thuvander [8] descrevem uma teoria no qual existem dois fatores que iniciam a estricção: distribuição heterogênea de inclusões e o acabamento superficial (rugosidade). Na teoria original apenas o acabamento superficial fora levado em conta.

Para levantar a curva CLC, utiliza-se diferentes geometrias para os corpos de prova.

3.6 Parâmetros n , m , r e Δr

O coeficiente de encruamento n é um parâmetro para se definir a capacidade de distribuição de deformações que uma chapa metálica realiza perante um gradiente de tensão. Neste caso, em estampabilidade, geralmente é desejável que o material possua o maior parâmetro n possível.

Isso se dá devido ao fato de que um elevado valor no coeficiente n (de um determinado material metálico) indicar que a região deformada apresentará uma resistência mecânica elevada, de modo a poder transferir à região não deformada o esforço necessário a sua deformação, retardando a estricção [2].

Além disso, o coeficiente n refere-se à capacidade do material diminuir sua espessura sem que ocorra instabilidade plástica. Para um estado plano de deformação ($\varepsilon_2 = 0$) o valor de ε_1 tem o valor de n [1].

Na tabela 3.4 estão descritos coeficientes de encruamento n de alguns materiais.

Tabela 3.4 – coeficiente de encruamento n e coeficiente de resistência [10].

Metal	Condição	Coef. de encruamento	Coef. de Resistência (MPa)
Aço com 0,05 % C	Recozido	0,26	530
SAE 4340	Recozido	0,15	640
Aço com 0,6 % C	Temp. e revenido a 540°C	0,10	1570
Aço com 0,6 % C	Temp. e revenido a 705°C	0,19	1230
Cobre	Recozido	0,54	320
Latão 70/30	Recozido	0,49	900

O coeficiente de encruamento calcula-se geralmente pela equação de Hollomon, descrito a seguir:

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \text{ (Hollomon)} \quad (3.7)$$

onde: k – coeficiente de resistência;

σ – tensão efetiva;

ε – deformação efetiva correspondente.

O coeficiente de deformação n pode ser obtido também por outras equações. Dentre elas tem-se:

$$\sigma = k \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \text{ (Swift)} \quad (3.8)$$

$$\sigma = k \cdot \varepsilon^m \cdot (\varepsilon + \Delta\varepsilon)^n \text{ (Ramburg-Osgood)} \quad (3.9)$$

onde: k – coeficiente de resistência;

σ – tensão efetiva;

ε – deformação efetiva correspondente;

m – coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação.

O parâmetro m é proveniente da equação constitutiva, porém de modo mais completo, ou seja, leva-se em conta além da deformação, a taxa de deformação que ocorre na estampagem [2]. Pela seguinte equação, tem-se:

$$\sigma = k' \cdot \varepsilon^n \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^m \quad (3.10)$$

onde: k – coeficiente de resistência;

σ – tensão efetiva;

ε – deformação efetiva correspondente;

m – coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação.

O valor m é considerado desprezível, mas sabe-se que tem influência na formação de estricção localizada. Quanto maior o coeficiente m , semelhante ao que ocorre com o coeficiente n , melhor será a distribuição das deformações sobre o material, retardando o escoamento localizado.

Em um processo de estampagem as propriedades plásticas de uma chapa metálica podem não ser iguais nas diferentes direções (transversal, longitudinal e diagonal à direção de laminação) mostrando a anisotropia do material. Para medir a anisotropia do material, realiza-se um ensaio de tração uniaxial de um corpo de prova. Submete-se este corpo de prova a tensões próximas ao do seu limite de resistência. Neste caso, os corpos de provas são feitos considerando-se as várias direções de laminação da chapa. O coeficiente de anisotropia r é calculado pela razão entre as deformações na largura e na espessura do corpo e prova [2].

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_h} = \frac{\ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_f}{h_0}\right)} \quad (3.11)$$

onde: ε_w – deformação verdadeira ao longo da largura de um cp de tração;

ε_h – deformação verdadeira ao longo da espessura do mesmo cp;

w_f – largura final do cp;

w_0 – largura inicial do cp;

h_f – espessura final do cp;

h_0 – espessura inicial do cp;

l_f – comprimento final do cp;

l_0 – comprimento inicial do cp.

O parâmetro r influi sobre o caminho da deformação, no qual para valores maiores de r este caminho torna-se não-linear e se desloca para pontos mais altos da CLC [1].

Em tiras finas há a dificuldade em se medir precisamente a variação da espessura. Neste caso, pode-se utilizar a equação 3.6 deduzida da equação 3.5. Esta equação considera a lei de conservação de volume quando o material atinge o regime plástico e descreve-se da seguinte forma:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w_f}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{l_0 w_0}{l_f w_f}\right)} \quad (3.12)$$

Para avaliar de forma mais precisa a anisotropia, tem-se dois parâmetros: o coeficiente de anisotropia normal (\bar{r} ou r_m) e o coeficiente de anisotropia planar (Δr).

O coeficiente de anisotropia normal indica a capacidade do material em resistir ao afinamento quando esta é submetida a esforços de tração no plano da mesma. Um coeficiente de anisotropia normal elevado significa que a resistência à deformação na espessura é maior em que outras direções [2].

O coeficiente de anisotropia planar indica o comportamento mecânico que o material pode apresentar no plano da chapa. Quando $\Delta r = 0$ o material apresenta características isotrópicas. Quando o $\Delta r \neq 0$, indica a tendência a formação de defeitos (“orelhas”), durante a operação de estampagem. Portanto em um processo de estampagem o coeficiente de anisotropia é desejável que os valores sejam próximos do zero. As equações que se seguem abaixo são referentes aos coeficientes de anisotropia normal e planar [2].

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (3.13)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (3.14)$$

onde: $r_{0^\circ}, r_{45^\circ}, r_{90^\circ}$ são valores de r medidos em corpos de prova tomados em três direções, ou seja, $0^\circ, 45^\circ$ e 90° da direção de laminação [2].

No caso do latão 70/30 o valor de r medido a aproximadamente a 25% de deformação aumenta com o aumento no tamanho de grão na direção de 45° , porém o valor permanece constante para as direções 90° e 0° . Além disso, o valor de r_{med} e o valor de Δr aumenta com o aumento do tamanho de grão [8].

O gráfico 3.4 mostra o gráfico da tensão efetiva pela deformação efetiva para o latão 70/30-8.

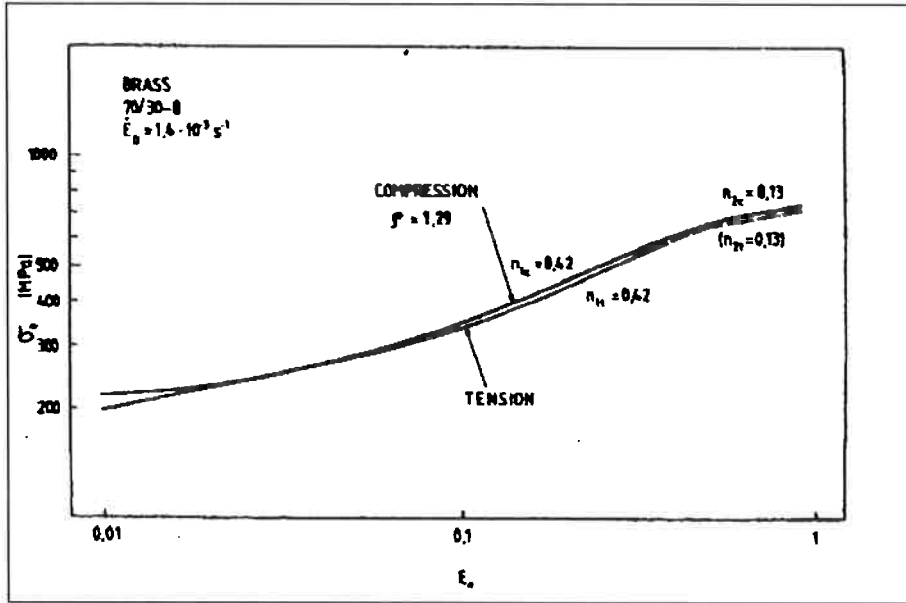


Gráfico 3.4 – Tensão efetiva pela deformação efetiva do latão 70/30-8 [8].

Para o cálculo da tensão efetiva e da deformação efetiva utilizou-se a teoria de plasticidade anisotrópica de Hill considerando anisotropia normal. Neste caso os valores são obtidos por:

$$\varepsilon_e = -\sqrt{\frac{b(b + 2\rho + b\rho^2)}{b^2 - 1}} \cdot \frac{1}{1 + \rho} \cdot \varepsilon_{33} \quad (3.15)$$

$$\sigma_e = \sqrt{2\left(1 - \frac{1}{b}\right)} \cdot \sigma_{33} \quad (3.16)$$

onde: $b = \frac{1+r}{r}$

$$\rho = \varepsilon_{22} / \varepsilon_{11}$$

O índice 3 denota a direção normal da placa. O parâmetro ρ indica a taxa de deformação.

As deformações no sentido da espessura podem ser calculadas por:

$$\varepsilon_{33} = -(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \quad (3.17)$$

O latão 70/30 apresentou comportamento muito variado sob tensão e compressão. Sabe-se que a mais importante aplicação desta curva ocorre em altas deformações onde se formam estricções localizadas, portanto a região com 10% de deformação efetiva não é levado em conta.

3.7 Ensaio Erichsen: década de 60

Historicamente os ensaios de punção de bolas, como o ensaio Erichsen e o ensaio Olsen, tem sido usados para determinar as propriedades das chapas metálicas em estiramento.

O ensaio Erichsen é um método empregado como guia em estampagem e como método de controle de qualidade. A configuração do ensaio Erichsen e as principais dimensões estão descritas na figura 3.9. Nesta especificação, uma chapa metálica é deformada contra uma punção de formato esférico, sob uma determinada força. O ensaio Erichsen é padronizado por normas internacionais, sendo freqüentemente realizado para comparação de materiais e para se verificar se a chapa possui a ductilidade desejada. A profundidade de penetração medida em mm no instante em que a fratura ocorre é conhecida como o número Erichsen [11].

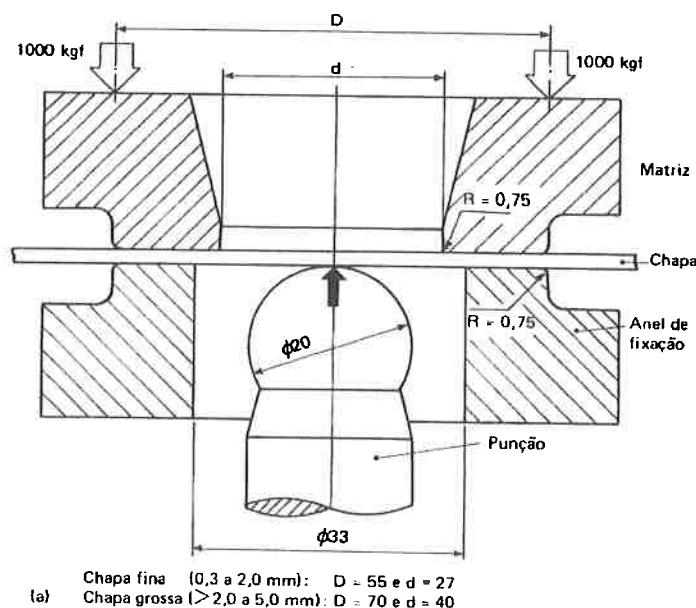


Figura 3.9 – Configuração do ensaio Erichsen [12].

Os primeiros pesquisadores foram Fukui et. Al. , Krüger, Kokkonen e Nygren. Fukui realizou vários testes de conformação e achou um certo grau de correlação entre o LDR (limiting drawing ratio) medido para o final da região convexa, o alongamento e o valor Erichsen, este último que não pode ser expresso quantitativamente [11]. Krüger descobriu que o ensaio Erichsen obtém melhores indicadores em relação à estampagem profunda para muitos tipos de chapas metálicas, do que os ensaios de estampagem de copos. Além disso, o ensaio Erichsen é mais sensível a qualquer mudança de propriedade da chapa. Kokkonen e Nygren estudaram os variados efeitos de mudança no acabamento superficial dos ferramentais e diversos materiais. Eles limitaram as incertezas para a determinação do número Erichsen. Deram também as incertezas entre máquinas diferentes [11].

Geralmente a literatura sobre este assunto considera este ensaio muito prático, mas não incluem um sistemático estudo sobre as variáveis. Particularmente, nenhuma investigação foi realizada em relação às deformações que ocorrem na chapa durante o teste, portanto a relativa quantidade de estampagem profunda e estiramento que ocorrem não foram determinados. Claramente a placa de metal é deformada pela punção principalmente por estiramento, mas também deve existir um “*drawing-in*” da placa para dentro do raio da matriz (anel inferior). O *drawing-in* ocorre quando o carregamento da prensa-chapa não é suficientemente alto e a chapa é puxada para dentro do anel inferior, falseando o resultado do ensaio [11].

A partir do momento que a ruptura ocorre sempre no mesmo local, o componente estiramento torna-se o mais importante. O ensaio Erichsen assegura à placa metálica resistir às falhas de tensões instáveis biaxiais quando começa a ser estirada sobre uma superfície esférica sob uma dada condição de fricção. Porém devido ao *drawing-in* (escorregamento relativo da chapa e o anti-rugas), o número Erichsen pode não descrever corretamente o que foi analisado, influenciando em futuros erros. Se ocorrer muito *drawing-in*, o resultado será um número Erichsen tão alto quanto um número obtido com um grande estiramento [11].

Na prática, em operações de prensagem, estiramento e estampagem ocorrem simultaneamente, tanto que é possível de alguma forma especificar o quanto de cada um é requerido nos processos. Isto necessita de um conhecimento de uma grande quantidade de processos de estiramento e estampagem que ocorrem no processo prático e esse dado é raramente conhecido com alguma precisão. Em muitas conformações complicadas estes elementos variam em todo o componente,

então são necessários testes: um para estiramento sobre a cabeça do punção e outro para a habilidade de estampagem profunda. Inicialmente o número Erichsen confina-se apenas ao resultado advindo do estiramento, no qual o *drawing-in* é um resultado totalmente indesejado no processo, pois este influi nos futuros erros.

Existem várias especificações de chapas, que exigem um valor mínimo do número Erichsen para cada espessura de chapa, ou tipo de estampagem para qual a chapa foi fabricada (média, profunda ou extra-profunda) [12].

Os fatores que influenciam o número Erichsen (assumindo as propriedades do material constantes) são as seguintes:

- Formato e dimensões da amostra;
- Espessura;
- Rugosidade;
- Polimento da superfície e ferramental;
- Uso e alinhamento do ferramental; rigidez da máquina;
- Tipo de prensa-chapa;
- Lubrificantes;
- Velocidade e temperatura do teste.

Para realizar o teste são necessárias temperaturas constantes e velocidade muito baixa, para que seja mais fácil observar o início da fratura. Também é necessário que haja um alinhamento dos ferramentais e rigidez da máquina. Além disso, o uso de lubrificantes e o polimento dos ferramentais são fatores que influenciam no teste [11].

Os metais mais usuais no teste são o aço, latão e ligas de alumínio, todos revenidos.

Antes de iniciar o teste levanta-se vários parâmetros para cada material selecionado: carregamento do prensa-chapa, espessura da amostra, tamanho, formato, lubrificação recomendada e a sensibilidade do sensor cut-off que deve ser determinado para cada espessura de cada material para justamente dar o tamanho de fratura mínima [11].

Para checar a consistência do lubrificante, conformam-se três chapas idênticas na espessura e no diâmetro. A diferença entre os números Erichsen devem

ser entre 0,1mm, nunca superior a esse valor. Se o valor estiver dentro da faixa de 0,1mm então a precisão aceita para o teste é satisfeita e o lubrificante está de acordo com a norma prática.

Para calibrar o sensor cut-off, Kaftanoglu e Alexander utilizaram as normas técnicas usuais, menos para o alumínio. Já para o latão houve dificuldades para obter a fratura desejada deixando apenas para o sensor parar o ensaio, pois a fratura ocorria muito rapidamente. Eles contornaram a situação, pois toda vez que a fratura ocorria ouvia-se um barulho e o indicador de profundidade de repente saltava de 0,2mm. Com estes sinais foram possíveis obter o número Erichsen real do latão estudado.

Sobre a amostra são impressos círculos (grades), nos quais são medidas o estiramento ou redução dos mesmos, como indicado na figura 3.10. Os círculos podem ser feitos por meio de eletro-corrosão.



Figura 3.10 – Círculos desenhados sobre a amostra por eletro-corrosão

Após o teste se limpa a amostra. As grades distorcidas são então medidas em quatro paralelas perpendiculares às direções radiais e perpendiculares à direção de laminação da placa. Os quatro conjuntos de medidas radiais nunca são iguais, já que a fratura nunca ocorre de forma uniforme. Foram realizadas as medições de espessura da protuberância cortando-a de forma meridional e usando um micrômetro [11]. Hoje em dia, podemos realizar esta função sem a necessidade de cortar a amostra, pois se evita a alteração do resultado. Simplesmente pode ser usado um relógio comparador para medir a espessura.

Para o cálculo da deformação utiliza-se a equação que se segue abaixo:

$$\varepsilon_{\theta} = \ln \frac{r_m}{r_0} \quad (3.18)$$

onde: ε_θ – deformação circunferencial logarítmica;

r_m – raio médio do círculo deformado;

r_0 – raio inicial do círculo.

A espessura após a deformação é calculada pelas equações:

$$\varepsilon_t = \ln \frac{t_m}{t_0} \quad (3.19)$$

onde: ε_t – o logaritmo da espessura verdadeira após a deformação;

t_m – espessura média após a deformação;

t_0 – espessura inicial.

Com os valores das deformações podem-se gerar as curvas dos gráficos CLC e dos gráficos da deformação. Os gráficos ajudam na análise preliminar da estampabilidade e está exemplificada pelo gráfico 3.5 que é a representação das deformações circunferenciais e radiais versus a posição em relação ao pólo.

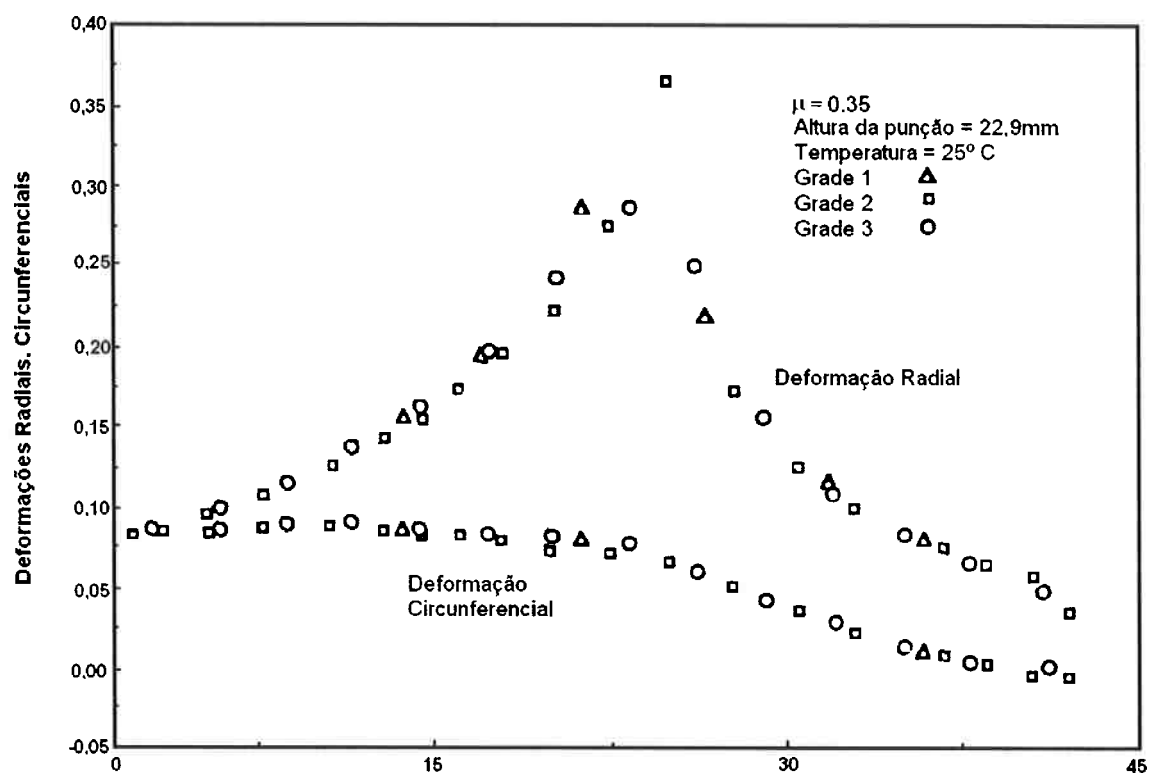


Gráfico 3.5 – Deformações radiais e circunferenciais versus distância do pólo [13].

3.8 Ensaio Erichsen: hoje

O ensaio Erichsen sofreu muitas mudanças no decorrer do tempo, em relação aos seus parâmetros. Além disso, a utilização de sensores para parar o teste e computadores para determinar os gráficos dos esforços são a tecnologia empregada atualmente.

Em relação às dimensões o ensaio Erichsen, que é muito utilizado na Europa, possui uma punção de esfera com 20 mm de diâmetro, uma matriz com diâmetro interno de 27 mm e o raio da matriz (anel inferior) com 0,75 mm. A figura 3.11 é um exemplo de máquina para ensaio Erichsen.

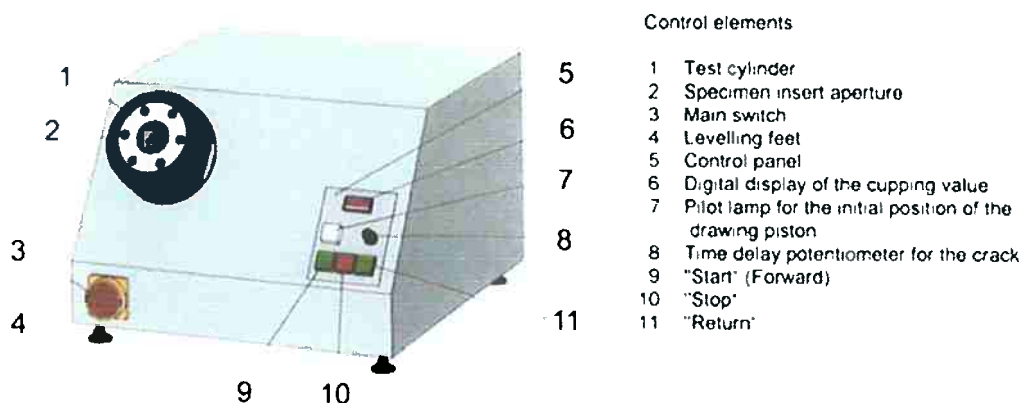


Figura 3.11 – Máquina de ensaio Erichsen [14].

Neste ensaio, a altura da fratura é usada para medir o estiramento. O critério preferencial para determinar este ponto é o carregamento máximo. Quando este valor não pode ser determinado, o início de uma estricção ou fratura visíveis podem ser usadas, mas este procedimento resulta em um valor ligeiramente diferente. A altura do copo medido pelo procedimento da fratura é de 0,3 a 0,5 mm maior do que a altura medida com o carregamento máximo [15].

A reprodutibilidade do ensaio Erichsen é muito baixa, a não ser que as condições experimentais sejam cuidadosamente controladas. Esta variação entre os testes são atribuídas ao pequeno diâmetro da punção, presença de *drawing-in* e lubrificação inadequada. O pequeno diâmetro da punção conduz a dobras excessivas, particularmente em chapas finas e geralmente não representa as condições de produção fabril. Já o *drawing-in* pode ser um tanto controlado padronizando o corpo de prova e usando uma força de fechamento muito alto (em torno de 71 kN). Um maior controle pode ser alcançado usando "lock-beads" (mossas) ou matrizes entalhadas (matrizes que evitam o escorregamento da chapa) [15].

Uma boa lubrificação pode ser alcançada usando óleos de polietileno. Os problemas que ocorrem nos ensaios Erichsen e Olsen levaram ao desenvolvimento de testes de estiramento que usam uma punção com diâmetros maiores e *lock-bead* para evitar o *drawing-in* [15].

As máquinas atuais não só realizam o ensaio Erichsen, mas sim um conjunto de testes como o de estampagem profunda e o de estampagem profunda com expansão, tornando a máquina mais prática no uso laboratorial (figura 3.12).



Figura 3.12 – Máquina de ensaio de estampabilidade universal [16].

3.9 Lubrificantes

Lubrificantes e lubrificação são componentes de baixo custo no processo de conformação de metais e ainda assim são importantes, muitas vezes indispensáveis para a conformação de peças de qualidade [9].

Os três principais fluidos (água, óleo e sintéticos) são os ingredientes principais dos lubrificantes para conformação de chapas que são combinadas com aditivos para garantir as operações desejadas.

A seleção de um lubrificante [9] apropriado para uma operação de conformação de uma chapa metálica depende de um número diverso de critérios que devem ser satisfeitos:

- Efeito do lubrificante em operações de conformação;
- Método de aplicação e eficiência;
- Manutenção da performance do lubrificante, levando-se em conta os problemas de recirculação, teste e disposição;
- Corrosão das ferramentas, máquinas e partes acabadas;
- Limpeza;
- Responsabilidade dos operários;
- Suporte do fornecedor;
- Toxicidade;

- Custo.

Para a conformação de cobre e suas ligas as manchas e a corrosão são as preocupações mais importantes. Os lubrificantes escolhidos devem prevenir esses dois problemas. Para a estampagem profunda, dependendo da severidade, lubrificantes a base de óleo ou água, em forma fluida ou de pasta são os mais efetivos. Compostos de sabão e gordura, assim como compostos contendo inibidores de cloro são os aditivos mais comumente usados [17].

Quando o lubrificante é bem eficiente no estiramento à ruptura ocorre próxima ao pólo como mostra a figura 3.12.

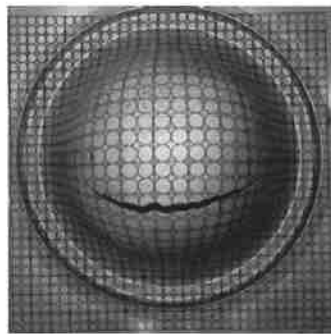


Figura 3.12 – Fratura próxima ao pólo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho são latões do tipo 70/30 e as suas composições químicas nominais estão descritas na tabela 4.1 em vários padrões como ASTM, JIS e DIN. Na tabela 4.2 estão descritas uma série de parâmetros para o latão 70/30 recozido.

Tabela 4.1 – Composição química do latão 70/30 em padrões variados [10].

Padrão	BS 2871 Part	ASTM B –135	NFA 51 102	IS 407	JIS H 3300	AS 1572	DIN 17671	IS 1545
Símbolo	CZ-126	c 26000	CuZn 30	CuZn 30 As	c 2600	259	CuZn30 2.0265	CuZn30 As
Cu	69.0-71.0	68.5-71.5	68.5-71.5	68.5-71.5	68.5-71.5	69.0-71.0	69.0-71.0	69.0-71.0
Sn	–	–	–	–	–	–	.05	–
AL	–	–	–	–	–	–	.02	–
Pb	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.07
Ni	–	–	–	–	–	–	0.2	–
Fe	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06
Zn	Rem	Rem	Rem	Rem	Rem	Rem	Rem	Rem
As	0.02-0.06	–	0.02-0.06	0.02-0.06	–	0.02-0.06	–	0.02-0.06
Total de impurezas Max.	0.30	–	0.30	0.30	–	–	0.1	0.30
Condição	M TA O	H 58 H 80	–	O TA HD	O 1/4H 1/2H H	O OH 1/2H H	F28 F35 F42	O TA HD
Limite de Escoamento N/mm ²	–	–	–	–	–	–	180 Max. 200 Max. 320 Max.	–
Tensão N/mm ²	–	370 Min. 455 Min.	–	285MpaMin 300MpaMin 400MpaMin	275 Min 275 Min 373 Min 451 Min	280-350Mpa 320MpaMin – 400MpaMin	280-350 350-420 420 Min	375 Max 340 Min 385 Min
Elongação %	–	–	–	–	45 Min 45 Min 20 Min	40 Min 35 Min	–	55 Min
Dureza HV 5	150 Min 80-105 75 Max	–	80-105	75 Max 80-110 135 Min.	–	80 Max 80-105 95-130 150 Min.	–	80 Max 80-105 130 Min.
Tamanho de grão Mm (75X)	0.05 Max	–	.010-045	–	.025-.060 .035 Min. – –	.065 Max .035 Max – –	–	–

Tabela 4.2 – Parâmetros para o latão 70/30 recozido.

Posição		LR (N/mm ²)	LE (N/mm ²)	Al. A5 (%)	r	r _{médio}	n	n _{médio}	E mod. (N/mm ²)	K (N/mm ²)
A1	0°	332,42	111,84	64,92	0,92	1,04	0,423	0,42	77179,2	731,17
A2	45°	326,14	110,59	61,19	1,15	1,04	0,410	0,42	113441,7	708,15
A3	90°	332,14	114,66	60,24	0,95	1,04	0,420	0,42	98173,6	729,01

Tanto o corpo de prova para o ensaio Erichsen, quanto para o ensaio de tração foram previamente estampados com círculos de 2,2 mm de diâmetro por eletro-corrosão. Após o ensaio Erichsen, há a formação de uma protuberância com uma fratura bem visível (figura 4.1).



Figura 4.1 – Corpo de prova.

Para medir a espessura da chapa na região da protuberância utilizou-se o relógio comparador. Este por sua vez funciona pressionando a ponta da haste do relógio contra uma tira metálica e uma haste usinada. A base, presa a uma morsa, permite que o aparelho não se mova, possibilitando uma maior precisão durante a medição. A medida do aparelho era na ordem de décimos de milímetro. O relógio comparador está descrito através da figura 4.2.

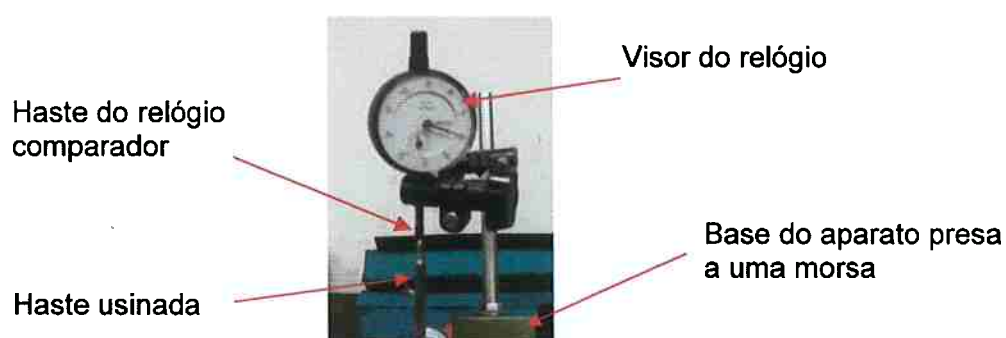


Figura 4.2 – Relógio comparador

Depois da medição foram obtidos os valores das espessuras, desde a base (valor máximo), até o topo da protuberância (valor mínimo). Para a medição da espessura na base, foi utilizado um micrômetro.

No caso dos círculos, as deformações principais coincidirão sempre com os eixos maior e menor da elipse que se forma no estágio de conformação. Neste caso a figura abaixo esquematiza uma situação próxima ao estiramento (deformações

positivas) e uma situação próxima à estampagem profunda (uma deformação positiva e uma negativa) [9].

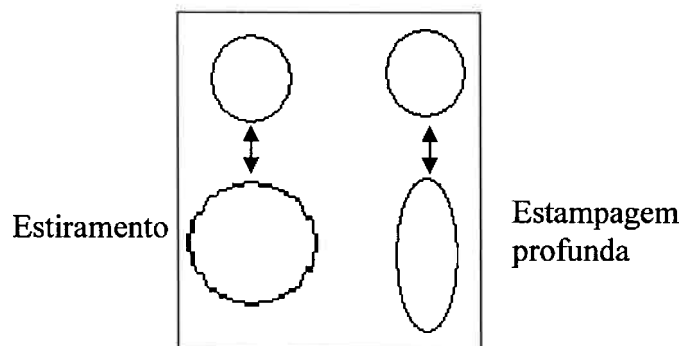


Figura 4.3 – Representação esquemática dos círculos originais e depois da sua respectiva conformação.

As medidas das deformações são feitas através do auxílio de microscópio ótico e uma objetiva que possui uma mira em forma de X. As medições foram da parte interna dos diâmetros da circunferência (figura 4.4).

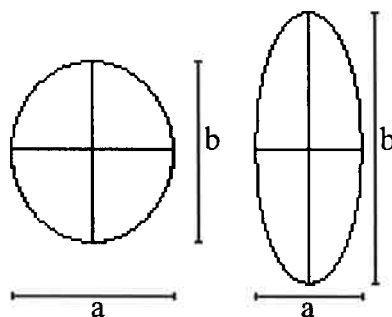


Figura 4.4 – Medidas a e b dos diâmetros internos da grade.

Depois de efetivado todas as medições, os corpos de prova foram cortados para que fosse realizado a metalografia ótica e o ensaio de microdureza. O embutimento das amostras foram feitas em baquelite e cada amostra foi lixada e polida. A granulometria utilizada foi de 100 a 1200 mesh no caso do lixamento e de 6 μ a 1 μ em relação ao polimento com pasta de diamante. Utilizou-se cloreto férrico em água para atacar as amostras.

A microscopia ótica foi realizada em um microscópio Olympus com aumento que variava de 100 a 200 vezes. Para a tomada de fotos utilizou-se a câmera digital ALTRA 20 e um computador com um programa de captura de imagens.

Para o ensaio de microdureza, foi utilizado um durômetro da marca Zwick & Co. KG. As figuras 4.5 e 4.6 são respectivamente o durômetro e o conjunto câmera, microscópio e computador.



Figura 4.5 – Durômetro.



Figura 4.6 – Microscópio, câmera e computador.

A figura 4.7 mostra o corpo de prova ensaiado. O losango são os furos feitos pelo durômetro. Com as medidas das diagonais e com auxílio de uma tabela, pode-se calcular a dureza do material.



Figura 4.7 – Ensaio de microdureza.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ensaio de tração, foram obtidas as seguintes curvas ε_1 (direção de laminação) versus ε_2 (direção transversal) e ε_1 e ε_2 versus pontos, onde o último ponto está mais próximo da estrição, como mostram os gráficos 5.1, 5.2 e 5.3.

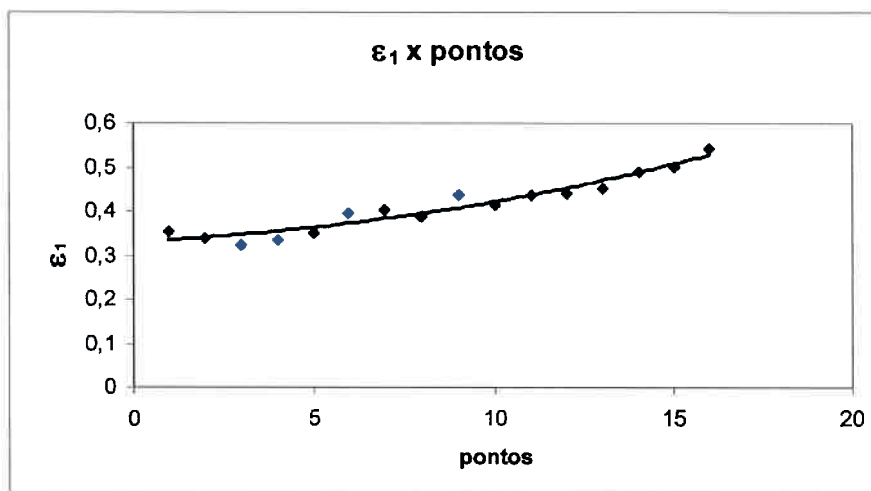


Gráfico 5.1 – Deformação na direção de laminação x pontos.

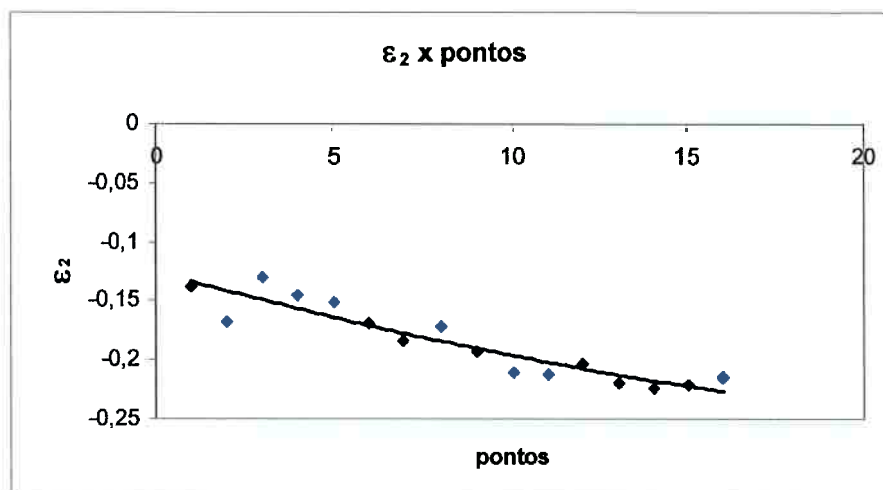


Gráfico 5.2 – Deformação na direção transversal x pontos.

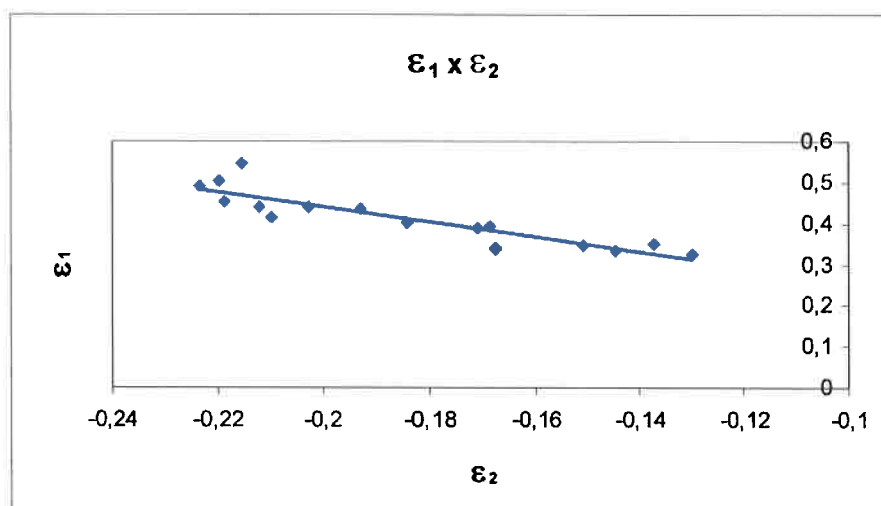


Gráfico 5.3 – Deformação nas direções transversais pelas direções de laminação.

O ensaio Erichsen permitiu obter os valores de deformações radiais e circunferenciais com base nas grades circulares previamente estampadas. Após o levantamento dos dados, plota-se o gráfico das deformações (circunferenciais e radiais) em relação à distância do pólo (gráfico 5.4). A região utilizada para se efetuar os cálculos das deformações está representada na figura 5.1.

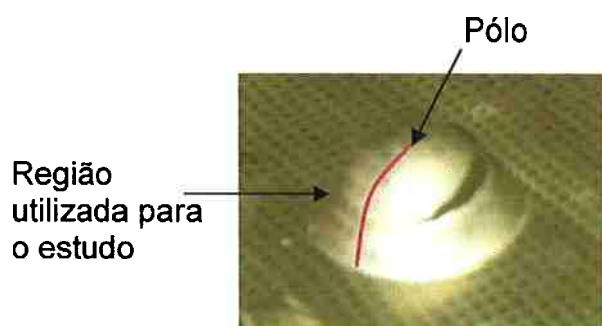


Figura 5.1 – Região utilizada para o cálculo das deformações.

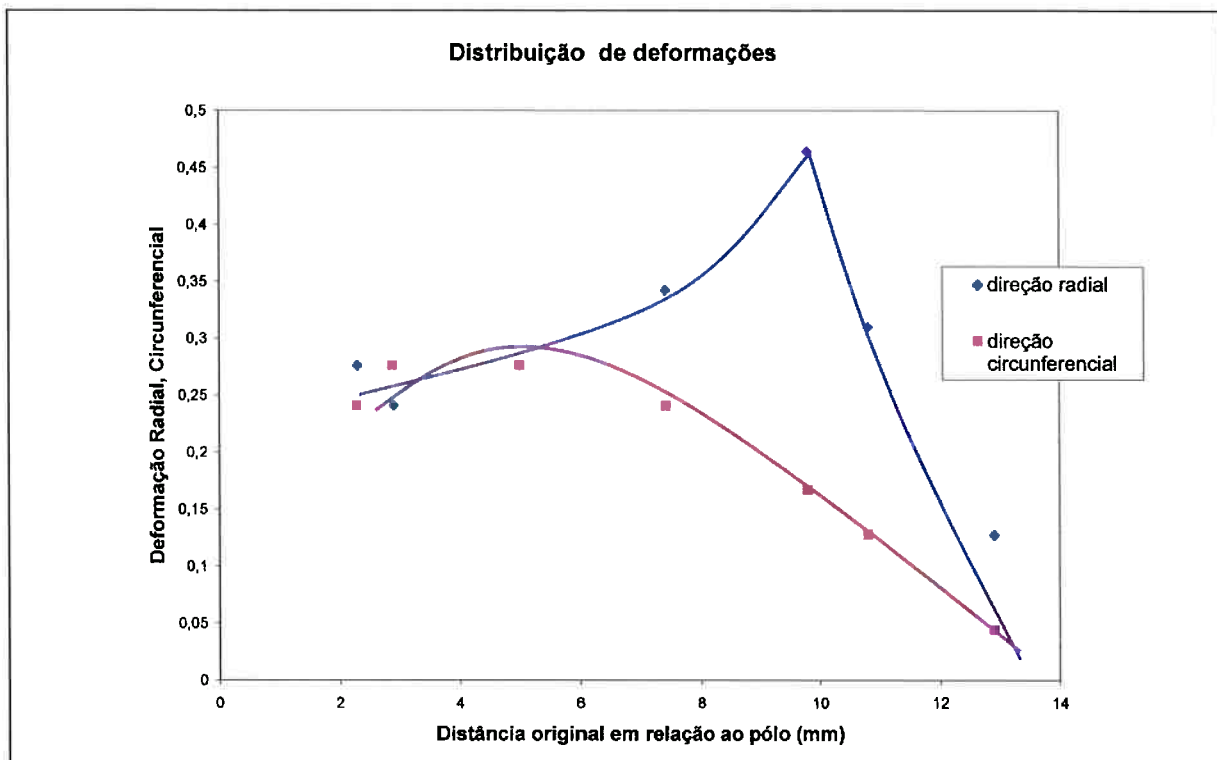


Gráfico 5.4 – Distribuição de deformações radiais e circunferenciais.

A CLC deste corpo de prova está apresentada no gráfico 5.5 abaixo. A região estudada para o levantamento da curva está representada na figura 5.2.



Figura 5.2 – Região estudada para levantamento de CLC.

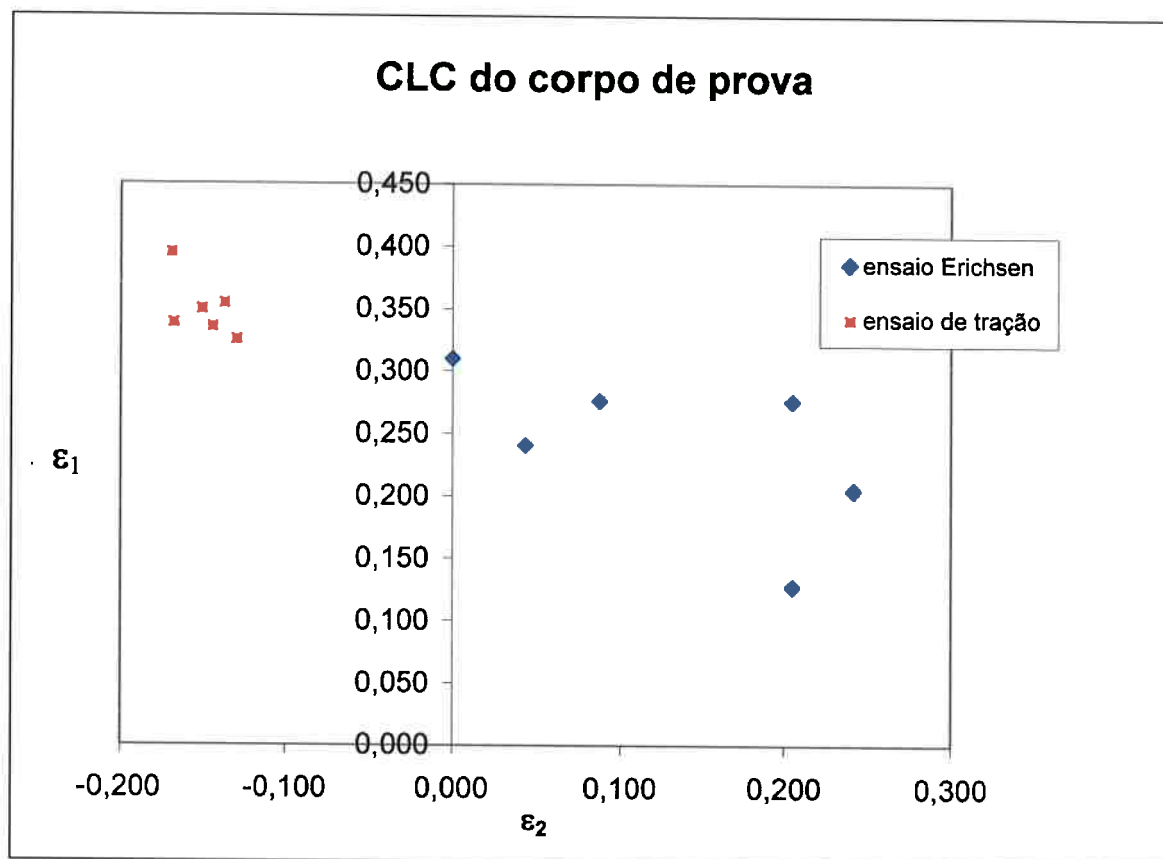


Gráfico 5.5 – CLC do corpo de prova.

A CLC do corpo de prova (gráfico 5.5) foi obtida através dos dados da tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores de deformação máxima e mínima

Ensaio de tração		Ensaio Erichsen	
ϵ_1	ϵ_2	ϵ_1	ϵ_2
0,35	-0,14	0,31	0,00
0,34	-0,17	0,24	0,04
0,33	-0,13	0,28	0,09
0,34	-0,14	0,28	0,21
0,35	-0,15	0,21	0,24
0,39	-0,17	0,13	0,21

Para melhor visualização da CLC do corpo de prova e os dados da literatura plota-se no gráfico 3.3 os valores da tabela 5.1. Desta forma, o gráfico abaixo é a representação da CLC do corpo de prova em relação aos dados da literatura.

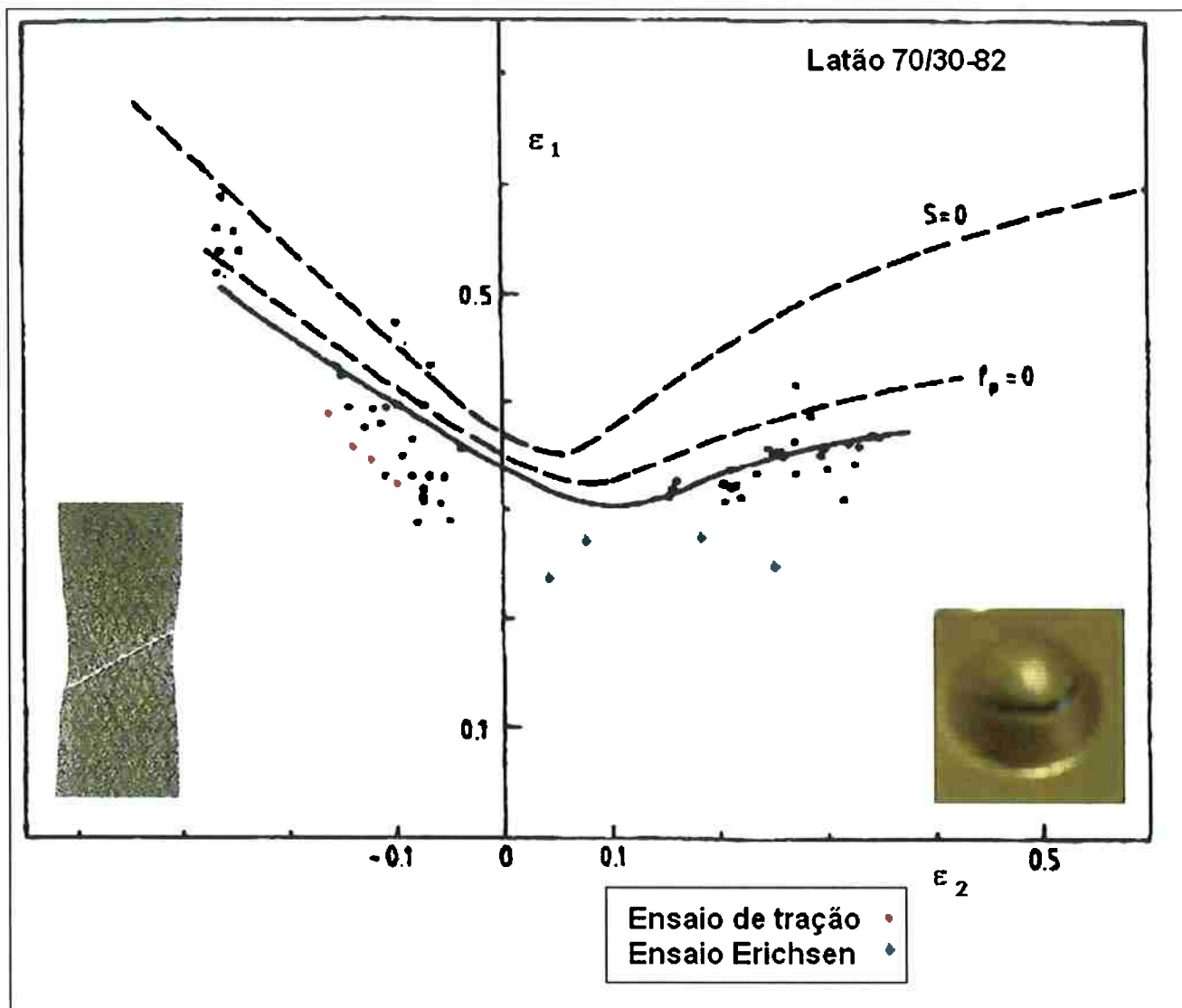


Gráfico 5.6 - CLC do corpo de prova em relação aos dados da literatura.

A partir da CLC do corpo de prova (gráfico 5.5) e comparando com a CLC do latão 70/30 é razoável dizer que os valores são compatíveis com os descritos na literatura, pois os pontos de deformação máxima e mínima estão distribuídos dentro da faixa estipulada, para as curvas do latão 70/30 mostradas no gráfico 5.6.

Com o relógio comparador medem-se as espessuras em variados pontos. A espessura máxima está na chapa (seta número 5 da figura 5.3), esta que mede 0,55 mm. A espessura mínima está no topo da protuberância com valor de 0,40 mm (tabela 5.2).

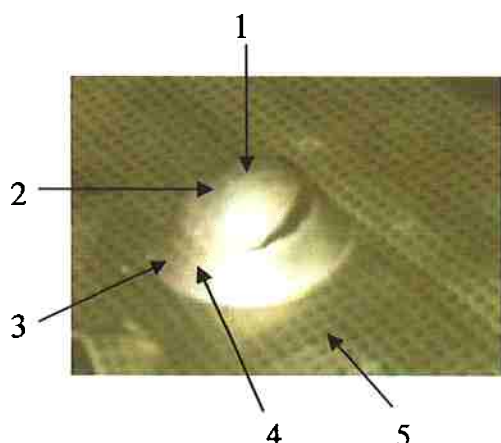


Tabela 5.2 – Valores da espessura

Número	Espessura (mm)
1	0,40
2	0,45
3	0,44
4	0,42
5	0,55

Figura 5.3 – Pontos onde foram medidas as espessuras e os valores obtidos na medição.

Nota-se que pela tabela 5.1 há uma deformação positiva, tanto na direção circunferencial quanto na radial, com valores muito próximos, demonstrando que houve um estiramento no topo da protuberância. Isto é plausível já que houve um afinamento na espessura do mesmo visto na tabela 5.2. Portanto para manter o volume constante, o estiramento nas direções radiais e circunferenciais determinaram um afinamento do topo da protuberância.

A partir das medidas das deformações é possível calcular as espessuras. A equação 5.1 leva em conta a espessura inicial (da chapa) com a espessura final (após a conformação).

$$\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t_f}{t_0}\right) \quad (5.1)$$

Portanto, para o cálculo da espessura final t_f , tem-se:

$$e^{\varepsilon_3} = \frac{t_f}{t_0} \quad (5.2)$$

Logo, pode ser montada a relação entre as espessuras observadas (tabela 5.2) e as espessuras calculadas pela equação (5.2) resultando na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado entre as espessuras calculadas e as observadas.

	espessura observada (mm)	medida radial (mm)	medida circunferencial (mm)	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3 calculado	espessura calculada (mm)
0	0,55	2,2	2,2	0	0	0	0,55
1	0,40	2,5	2,5	0,13	0,13	-0,26	0,43
2	0,45	2,9	2,4	0,28	0,09	-0,36	0,38
3	0,44	2,9	2,1	0,28	-0,05	-0,23	0,44
4	0,42	2,8	2,0	0,24	-0,10	-0,15	0,48

A partir da tabela 5.3, pode-se obter o gráfico das espessuras observadas pelas as espessuras calculadas.

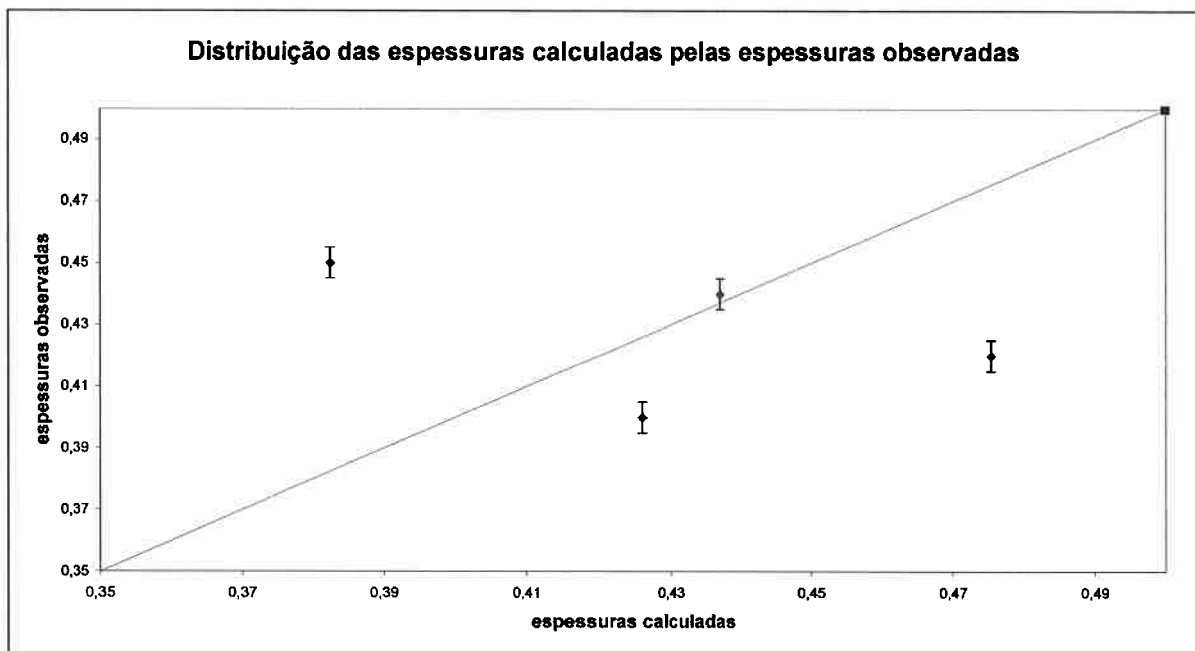


Gráfico 5.7 – Espessuras calculadas e observadas no sentido da espessura.

A grande diferença de valores entre as espessuras calculadas e as espessuras medidas ocorre devido ao manuseio do relógio comparador. Neste aparelho é necessário que a espessura do corpo de prova a ser medida esteja na direção da haste do relógio comparador, como demonstra a figura 5.4.

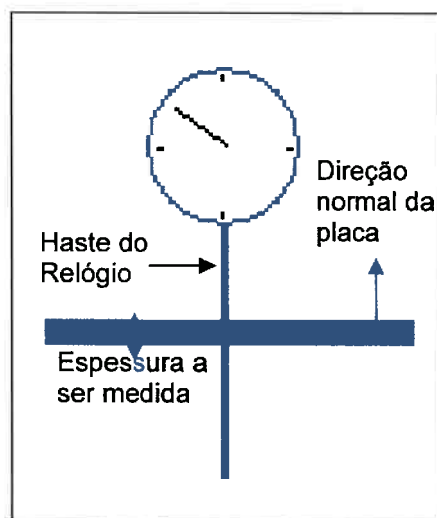
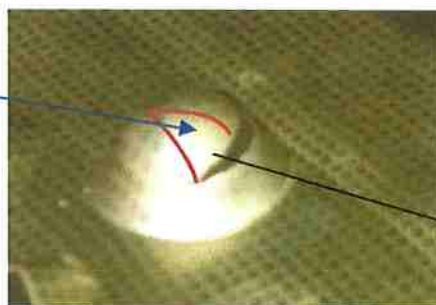


Figura 5.4 – Relógio comparador.

Como a medida foi realizada na protuberância do corpo de prova, a curvatura da mesma impediu uma leitura clara do relógio. Além disso, o valor calculado possui erros de flutuação inerentes ao cálculo, principalmente quando o valor é muito pequeno, no caso décimos de milímetros.

As figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 mostram as regiões de uma amostra que foi embutida para ser analisada. Com o auxílio do microscópio e da câmera digital foi possível capturar as microestruturas com aumento de até 200 vezes.

Região estudada



Topo

Região da fratura

Figura 5.5 – Região para o estudo da microestrutura.



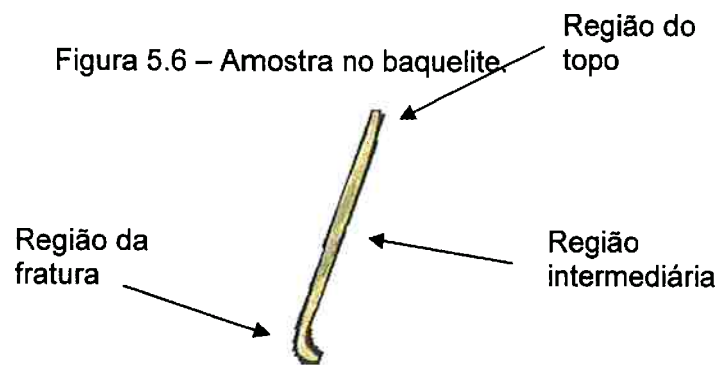


Figura 5.7 – Regiões da amostra que foram estudadas.

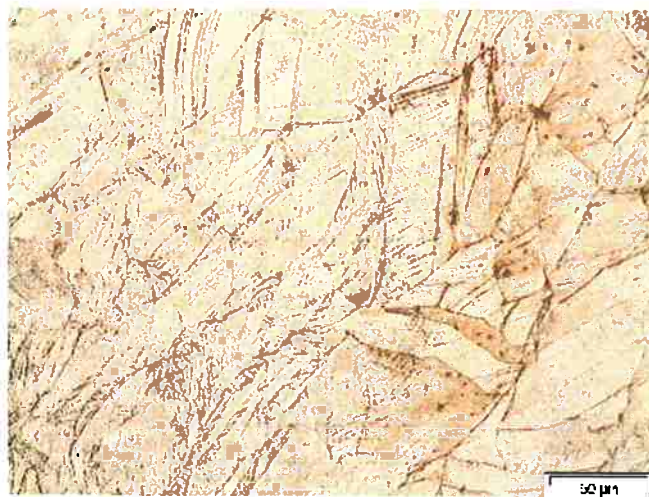


Figura 5.8 – Região próxima à fratura (200x de aumento).



Figura 5.9 – Região intermediária (200x de aumento).



Figura 5.10 – Região próxima ao topo (200x de aumento).



Figura 5.11 – Região da base (200x de aumento).

O ensaio de microdureza revelou os dados (tabela 5.4) descritos abaixo. Para a realização deste teste foi colocada uma carga de 25g.

Tabela 5.4 – Resultado do ensaio de dureza.

Região	Dureza 1 (HV)	Dureza 2 (HV)	Dureza média (HV)
Fratura	131,0	134,0	132,5
Intermediária	100,0	107,0	103,5
Pólo	32,1	30,0	31,1

Portanto a dureza aumenta consideravelmente perto da fratura, demonstrando que a região está muito encruada.

Para o cálculo das deformações e tensões equivalentes utilizam-se as fórmulas (3.7), (3.15) e (3.16). Além disso, têm-se como dados de entrada os valores

de $r_{\text{médio}}$ e de K dispostos na tabela 4.2. Com todas essas informações gera-se a tabela abaixo referente à deformação equivalente do material estudado para dois pontos extremos da curva CLC.

Tabela 5.5 – Deformações equivalentes de dois pontos extremos da curva CLC.

Ponto	$r_{\text{médio}}$	ϵ_1	ϵ_2	ρ	b	ϵ_{eq}	K_{med} (N/mm ²)	σ_{eq} (N/mm ²)
1	1,04	0,39	-0,17	-0,44	1,96	0,391	729,01	491,6
2	1,04	0,13	0,21	1,62	1,96	0,346	729,01	467,1

6. CONCLUSÃO

Neste presente trabalho foi utilizado o latão 70/30 ("cartridge brass") como material para a realização de aspectos relativos à estampabilidade.

Com o ensaio de tração e o ensaio Erichsen foi possível obter o gráfico CLC do latão 70/30 e compará-lo com os dados já estabelecidos. Deste modo, vê-se que a amostra gerou uma CLC compatível com a CLC da literatura.

A metalografia demonstrou que houve um encruamento na região fraturada, pois a microestrutura desta possuía grãos mais alongados e maclados, como era esperado o resultado. No caso da base e do topo as microestruturas são similares. Mas há uma perceptível mudança na região próxima à fratura.

O ensaio de microdureza apenas confirmou o que de fato era mostrado pela metalografia, indicando um aumento abrupto na dureza da região próxima à fratura.

Referências

- [1] PLAUT, R. L. Estampabilidade de chapas: ensaios e aplicações, Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: deformação plástica, recristalização, crescimento de grão, IPEN, 2ª ed., p. 266-305, 2003.
- [2] LOPES, A. S. Aspectos da melhoria da estampabilidade de chapas de aço baixo teor de carbono, Dissertação de Mestrado (FD-442), São Paulo, 2006
- [3] EMBURY, J. D. Formability and metallurgical structure - proceedings, Metallurgical Society – Symposium on Formability and Metallurgical Structure, 383 p., 1987.
- [4] ASM Committee on Application of Copper. The Selection and Application of Wrought Copper and Copper Alloys, Metal's Handbook , vol. 1, 8a. edição, p. 960-967, 1961.
- [5] CESCOT, T. Apostila de PMT 2402, Metalografia e tratamentos térmicos – Latões, 70 p., 2003.
- [6] SOARES, M. Ciência dos Materiais I – Ensaios de tração e outros. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/ciemat/cie_mat1.asp#ens_trac>. Acesso em: 02 jan. 2007.
- [7] MESQUITA, E. L. A.; RUGANI, L. L. Conformação dos Aços Inoxidáveis. Disponível em: <http://www.acesita.com.br/port/aco_inox/pdf/apostila_aco_inox_conformacao.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2007.
- [8] MELANDER, A.; THUVANDERS, A. Forming limit diagram of brass, Scandinavian Journal of Metallurgy, vol.12, p. 219-226, 1983.
- [9] MANDINGO, F.; CRANE, J., Forming of Copper Alloys, Metal's Handbook, 9a. edição , vol.14, p. 809-824, 1988.
- [10] ESMIL: Condensor and Heatexchanger Tubes. Disponível em: <<http://www.coppernickel.nl/7030.brass.htm>>. Acesso em: 16 jan. 2007.
- [11] KAFTANOGLU, B.; ALEXANDER, J. M. An investigation of the Erichsen test, Journal of the Institute of Metals, vol. 90, p. 457-470, 1963.
- [12] UNISINOS. Ensaio de embutimento. Disponível em <http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Aula16_EnsaioDeEmbutimento.doc>. Acesso em: 06 jan. 2007.

- [13] WAGONER, R. H.; LATREILLE, S.; SILES, J. L.; KIM, Y. H. Nonisothermal Punch Stretching: Measurements and finite modeling simulations, Metallurgical Transactions, V.22, p. 3003-3011, 1991.
- [14] QUALITEST. Advanced test technologies: Model 111 – Automatic Erichsen Cupping Test Machine. Disponível em:
<<http://www.worldoftest.com/erichsen111.htm>>. Acesso em: 16 jan. 2007.
- [15] TAYLOR, B. Formability Testing of Sheet Metals, Metal's Handbook, 9a. edição, vol. 14, p. 877-899, 1988.
- [16] GIMRET: Engineering & Industrial Services. Erichsen Cupping Test Machines. Disponível em: <<http://www.scientificdealers.com/gimret/>>. Acesso em: 16 jan. 2007.
- [17] NACHTMAN, E.S. Selection and Use of Lubricants in Forming of Sheet Metal, Metal's Handbook, 9a. edição, vol.14, p. 512-520, 1988.