

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DE CURVAS LIMITE DE
CONFORMAÇÃO

Sergio Eglan Silveira Netto

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2004

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DE CURVAS LIMITE DE
CONFORMAÇÃO

Sergio Eglan Silveira Netto
Engenheiro Mecânico,

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2004

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr Ing. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira (UFSC)

Prof. Dr. Jaime Alvares Spim Júnior (PPGEM/UFRGS)

Prof. Dr. Jose Antonio Esmerio Mazzaferro (PROMEC/UFRGS)

Prof. Dr. Carlos Ferreira
Coordenador do PPGEM

Dedico a Deus em primeiro lugar
e aos meus pais
Álvaro Sergio Silveira Netto e
Eglair Verdum Silveira Netto

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Dr. Ing-Lirio Schaeffer pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica LdTM coordenado pelo professor Dr. Ing-Lirio Schaeffer e ao Laboratório de Fundação LAFUN coordenado pelo professor Dr. Jaime Spim pela oportunidade e pronto atendimento quando precisei utilizar as máquinas e instrumentos presentes nestes laboratórios.

Aos colegas Rafael Schilling Crivellaro e Nixon Vieira Malveira pelas sugestões e observações valiosas ao longo de todo o trabalho.

Ao professor Roland Hennig pelas valiosas contribuições tanto no início deste trabalho como no final.

A TRAMONTINA S. A. CUTELARIA pelo fornecimento de matéria prima para realização dos ensaios tecnológicos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro recebido.

" dicentes enim se esse sapientes
stulti facti sun "
Paulus Tarsensem

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| Agradecimentos..... | v |
| Sumário..... | vi |
| Lista de Figuras..... | viii |
| Lista de Tabelas..... | xi |
| Lista de Símbolos..... | xii |
| Resumo..... | xiv |
| Abstract..... | xv |
| 1. Introdução..... | 16 |
| 2. Aspectos da Conformação Mecânica de Chapas..... | 18 |
| 2.1. Propriedades Mecânicas..... | 18 |
| 2.2. Curva Tensão vs. Deformação..... | 18 |
| 2.3. Deformações Principais..... | 23 |
| 2.4. Lei da Constância de Volume..... | 24 |
| 2.5. Deformações no Diagrama Limite de Conformação..... | 25 |
| 2.6. Deformações e Tensões num Caneco..... | 27 |
| 2.7. Grau de Encruamento..... | 29 |
| 2.8. Índice de Anisotropia..... | 30 |
| 3. Ensaio Tecnológicos..... | 34 |
| 3.1. Ensaio Swift..... | 34 |
| 3.2. Ensaio Olsen e Erichsen..... | 35 |
| 3.3. Ensaio sob Pressão Hidráulica “Bulge-Teste”..... | 35 |
| 3.4. Ensaio com Múltiplos Punções..... | 36 |
| 4. Curva Limite de Conformação..... | 37 |
| 4.1. Keeler e Goodwin..... | 40 |
| 4.2. Nakazima..... | 42 |
| 4.3. Variação do Método Nakazima..... | 43 |
| 4.4. Gronostjski e Dolny..... | 44 |
| 4.5. CLC Aplicada a ligas de Alumínio..... | 46 |

| | |
|---|----|
| 5. Considerações sobre ligas de Alumínio..... | 49 |
| 6. Procedimentos Experimentais..... | 52 |
| 6.1. Visioplaticidade..... | 52 |
| 6.2. Corpos de Prova..... | 54 |
| 6.3. Marcação dos Corpos de Prova..... | 55 |
| 6.4. Punções..... | 57 |
| 6.5. Lubrificante..... | 58 |
| 6.6. Quebra rugas..... | 58 |
| 6.7. Equipamento de Medição..... | 59 |
| 7. Resultados..... | 61 |
| 7.1. Propriedades Mecânicas..... | 61 |
| 7.2. Estampabilidade..... | 64 |
| 7.2.1. Medição de Força..... | 64 |
| 7.2.2. Os Corpos de Prova..... | 65 |
| 7.2.3. Curva Limite de Conformação..... | 66 |
| 7.3. Curva Limite Alumínio Aeronáutico (Punção Elíptico)..... | 70 |
| 7.4. Espessura Final..... | 73 |
| 8. Análise dos Resultados..... | 76 |
| 8.1. Propriedades Mecânicas..... | 76 |
| 8.2. Força de Conformação..... | 76 |
| 8.3. Caminho das Deformações..... | 77 |
| 8.4. Curva Limite de Conformação..... | 79 |
| 9. Conclusões..... | 83 |
| 10. Sugestões para Trabalhos Futuros..... | 84 |
| Referências Bibliográficas..... | 85 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Corpo de prova para ensaio de tração..... | 18 |
| Figura 2.2 – Curva tensão x deformação esquemática comparando aço comercial e alumínio puro..... | 19 |
| Figura 2.3 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira. Material Al 1100-O | 20 |
| Figura 2.4 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira. Material Al 5052-O..... | 21 |
| Figura 2.5 – Corpo de prova para ensaio de compressão..... | 22 |
| Figura 2.6 – Deformações principais..... | 23 |
| Figura 2.7 – Desenho esquemático das deformações principais inseridas no diagrama limite de conformação..... | 25 |
| Figura 2.8 – Deformações principais exibidas num caneco..... | 27 |
| Figura 2.9 – Tensões principais exibidas num caneco..... | 28 |
| Figura 2.10 – Tensões principais num diagrama limite..... | 29 |
| Figura 2.11 – Direção de corte dos cp's para determinação da anisotropia..... | 31 |
| Figura 2.12 – Influencia das anisotropias nas tensões..... | 32 |
| Figura 3.1 – Desenho esquemático do ensaio Swift..... | 34 |
| Figura 3.2 – Desenho esquemático do ensaio Erichsen..... | 35 |
| Figura 3.3 – Desenho esquemático do ensaio sob pressão hidráulica..... | 36 |
| Figura 3.4 – Cinco punções..... | 36 |
| Figura 4.1 – Esboço de uma Curva Limite de Conformação..... | 38 |
| Figura 4.2 – Curva Limite de Conformação..... | 41 |
| Figura 4.3 – Comparação entre ensaios..... | 42 |
| Figura 4.4 – Corpos de prova para determinar a CLC pelo método Nakazima..... | 43 |
| Figura 4.5 – O ferramental utilizado por Gronostjski e Dolny..... | 45 |
| Figura 4.6 – CLC levantada por Gronostjski e Dolny..... | 46 |
| Figura 4.7 – CLC de três diferentes ligas de alumínio..... | 47 |
| Figura 4.8 – CLC de alumínio..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.9 – CLC de chapa “sandwich” e alumínio AA5182..... | 48 |
| Figura 6.1 – Esboço da grade impressa antes e após o ensaio Nakazima, CP1..... | 52 |
| Figura 6.2 – Esboço da grade impressa antes e após o ensaio Nakazima, CP8..... | 52 |
| Figura 6.3 – Abertura utilizada para visualizar as deformações nos CP’s..... | 53 |
| Figura 6.4 – Grade utilizada para medir deformações..... | 54 |
| Figura 6.5 – Desenho esquemático do processo de gravação de chapas..... | 57 |
| Figura 6.6 – À esquerda punção hemisférico e à direita punção elipse rasa..... | 57 |
| Figura 6.7 – Disco de poliuretano e ferramental utilizado..... | 58 |
| Figura 6.8 – Esquerda: Máquina Universal para Ensaio de Tração. Direita: Máquina para realização de ensaio Nakazima..... | 59 |
| Figura 6.9 – Esquerda: Sensor de deslocamento longitudinal. Direita: Sensor de deslocamento transversal..... | 60 |
| Figura 7.1 – Curva tensão convencional x deformação relativa. Espessura 1,9mm..... | 61 |
| Figura 7.2 – Deformações ϕ_1 e ϕ_2 utilizados para definir a anisotropia..... | 62 |
| Figura 7.3 - Curva de escoamento..... | 63 |
| Figura 7.4 – Relação entre força de estampagem e o tempo..... | 64 |
| Figura 7.5 – Família de CP’s ensaiados..... | 65 |
| Figura 7.6 – CLC a estrição Al 1050 – O. CP com entalhe. Espessura 1,9mm..... | 66 |
| Figura 7.7 – CLC a estrição. Material Al 1050 – O. CP com entalhe. Espessura 1,9mm..... | 67 |
| Figura 7.8 – CLC a estrição. Material Al 1050 – O. CP sem entalhe. Espessura 1,9mm..... | 68 |
| Figura 7.9 – CLC a estrição. Material Al 1050 – O. CP sem entalhe. Espessura 1,9mm..... | 68 |
| Figura 7.10 –CLC a estrição Al 1050 – O. CP com entalhe. Espessura 1mm..... | 69 |
| Figura 7.11 – CLC a estrição. Material Al 1050 – O. CP com entalhe. Espessura 1mm..... | 70 |
| Figura 7.12 – CLC a estrição e a ruptura. Punção Elíptico. Espessura 1,00mm. Material Al 6061 – O..... | 71 |
| Figura 7.13 – CLC a estrição e a ruptura. Punção Elíptico. CP com entalhe. Espessura 1,60mm. Material Al 6061 – O..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 7.14 – CLC a estrição e a ruptura. Punção Elíptico. CP com entalhe. Espessura 2,55mm. Material Al 6061 – O..... | 72 |
| Figura 7.15 – Espessura final em função das deformações principais. Punção Elíptico. Espessura inicial 1,9mm..... | 73 |
| Figura 7.16 – Espessura final em função das deformações principais. Punção Hemisférico. Espessura inicial 1,9mm..... | 74 |
| Figura 7.17 – Espessura final em função das deformações principais. Punção Elíptico. Espessura inicial 1mm..... | 74 |
| Figura 7.18 – Espessura final em função das deformações principais. Punção Hemisférico. Espessura inicial 1mm..... | 75 |
| Figura 8.1 – Análise das deformações no CP1..... | 78 |
| Figura 8.2 – Caminho das deformações para cada CP..... | 78 |
| Figura 8.3 – Comparação entre curvas limite. Material Al 1050-O. Espessura 1,9mm..... | 79 |
| Figura 8.4 – Comparação entre curvas limite. Espessura 1mm. Material Al 1050-O..... | 80 |
| Figura 8.5 – Comparação entre punções.CP's sem entalhe. Material Al 1050-O..... | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Aproximação das tensões principais no caneco..... | 29 |
| Tabela 2.2 – Propriedades da liga AA1050-O..... | 33 |
| Tabela 2.3 – Parâmetros de conformação da liga AA1050-O..... | 33 |
| Tabela 4.1 – Análise das deformações críticas..... | 40 |
| Tabela 4.2 – Relação do raio R_i [mm] e das larguras b_u e b_0 [mm]..... | 44 |
| Tabela 5.1 – Composição química da liga alumínio 1050..... | 50 |
| Tabela 5.2 – Ligas tratáveis não tratáveis termicamente..... | 51 |
| Tabela 6.1 – Composição química do Eletrólito (5 litros de água deionizada)..... | 56 |
| Tabela 6.2 – Composição química do “Neutrality” (5 litros de água deionizada)..... | 56 |
| Tabela 7.1 – Deformações φ_1 , φ_2 e anisotropia segundo cada direção de laminação, para deformação de 20%. Material AA1050-O..... | 62 |
| Tabela 7.2 – Propriedades mecânicas do alumínio 1050..... | 63 |
| Tabela 8.1 – Deformações medidas em células “boas” e “ruins”..... | 77 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------------------|--|
| A | área instantânea, [mm ²] |
| $A_{elíptico}$ | área sob a curva limite levantada com punção elíptico, [ua] |
| $A_{hemisférico}$ | área sob a curva limite levantada com punção hemisférico, [ua] |
| A_0 | área inicial da seção transversal, [mm ²] |
| b_0 | largura inicial, [mm] |
| b_1 | largura final, [mm] |
| b_u | largura útil, [mm] |
| C | coeficiente de resistência, [MPa] |
| $CLC(s)$ | curva(s) limite de conformação |
| CLC_{est} | curva limite à estricção |
| CLC_{rup} | curva limite à ruptura |
| $CP('s)$ | corpo(s) de prova |
| E | módulo de elasticidade, [MPa] |
| F | Força, [N] |
| k_f | tensão verdadeira, [MPa] |
| $LdTM$ | laboratório de transformação mecânica |
| l_0 | comprimento inicial, [mm] |
| l_1 | comprimento final na direção do comprimento, [mm] |
| Δl | variação do comprimento, [mm] |
| n | grau de encruamento, [-] |
| r | índice de anisotropia, [-] |
| R_i | raio dos corpos de prova, [mm] |
| r_{0° | índice de anisotropia para cp na direção de laminação, [-] |
| r_{45° | índice de anisotropia para corpo de prova cortado a 45° em relação a direção de laminação, [-] |
| r_{90° | índice de anisotropia para corpo de prova cortado perpendicular a direção de laminação, [-] |
| r_m | índice de anisotropia médio, [-] |
| s_0 | espessura inicial, [mm] |

| | |
|----------------|---|
| s | <i>espessura instantânea, [mm]</i> |
| s_1 | <i>espessura final, [mm]</i> |
| V_f | <i>volume final, [mm³]</i> |
| V_0 | <i>volume inicial, [mm³]</i> |
| ε | <i>deformação relativa, [%]</i> |
| φ_{eq} | <i>deformação equivalente (verdadeira), [-]</i> |
| φ_1 | <i>deformação plástica na direção do comprimento, [-]</i> |
| φ_2 | <i>deformação plástica na direção da largura, [-]</i> |
| φ_3 | <i>deformação plástica na direção da espessura, [-]</i> |
| σ | <i>tensão convencional (resultado do ensaio de tração), [MPa]</i> |
| σ_m | <i>tensão máxima, [MPa]</i> |
| σ_n | <i>tensão normal a espessura, [MPa]</i> |
| σ_e | <i>tensão de escoamento, [MPa]</i> |
| σ_r | <i>tensão radial, [MPa]</i> |
| σ_t | <i>tensão tangencial, [MPa]</i> |

RESUMO

Este trabalho analisa o processo de obtenção da Curva Limite de Conformação (CLC) através do procedimento adotado por Nakazima, 1968. Ele variando o formato dos corpos de prova submeteu os mesmos a um ensaio de estiramento simulando uma ampla faixa de deformações que vão desde o embutimento profundo passando pela deformação de tração simples até a deformação biaxial de tração.

Foram feitos ensaios com corpos de prova em formato de tiras, exatamente como Nakazima propôs. A ruptura para estes corpos de prova ocorre de modo aleatório rompendo inclusive na região de contato da matriz com o mesmo. Fez-se ensaios com corpos de prova com tiras entalhadas. Esse entalhe tem a função de promover a estrição ou ruptura dependendo do ponto de parada do ensaio, na região de contato entre punção e corpo de prova ensaiado.

No presente trabalho utiliza-se o mesmo método de Nakazima variando o formato do punção, em vez de um domo ou ponta hemisférica optou-se pela ponta elíptica. Foi analisada a influencia na CLC obtida, uma vez que a forma elíptica proporciona uma área de contato inicial maior gerando menores solicitações mecânicas no início do ensaio resultando numa CLC mais para cima quando comparada com uma CLC gerada com punção hemisférico. Para esta análise utilizou-se como matéria prima o alumínio comercialmente puro liga AA1050-O.

ABSTRACT

This study analyzes the process to obtain the Forming Limit Diagram for (FLD) using the procedure adopted by Nakazima, 1968. Varying the shape of the test specimens, it submitted them to a drawing test, simulating a variety or broad range of deformations that go from deep drawing to simple traction deformation to biaxial traction deformation.

Tests were performed using strip-shaped test specimens, exactly as proposed by Nakazima. The rupture of these test specimens occurs randomly, and it even breaks in the region where there is contact between them and the matrix. Tests were performed with tests specimens, using notched strips. The function of this notch is to promote narrowing or rupture, depending on the point where the test stops, in the contact region between the punch and the test specimen used in the assay.

In this study the same Nakazima method is used, varying the punch shape. Instead of a dome or hemispheric tip, it was decided to use an elliptical one. The influence on the FLD obtained was analyzed, since the elliptical shape provides a larger initial contact area, generating less mechanical demands at the beginning of the test and resulting in a FLD that is further upwards, as compared to a FLD generated with a hemispheric punch.

1. INTRODUÇÃO

Para determinar a estampabilidade de chapas metálicas submetem-se amostras do material a ensaios tecnológicos, tais como Erichsen, Swift, Bulge Teste, Nakazima e “Cinco Punções”. Com tais ensaios, busca-se atingir as máximas deformações principais que o material pode suportar, do estiramento até o embutimento. Estes ensaios caracterizam o comportamento mecânico dos materiais frente às solicitações envolvidas no processo de conformação cobrindo a faixa de deformações de estiramento até estampagem profunda.

Estas deformações, que o material pode suportar, são inseridas em diagramas de fácil manipulação e entendimento denominados Diagrama Limite de Conformação. A Curva Limite de Conformação (CLC) é um polinômio inserido no diagrama, ela indica a fronteira entre deformações permissíveis e deformações catastróficas que o material estará sujeito durante a estampagem. A CLC é um importante critério de falha obtido por meio de ensaios tecnológicos, não havendo necessidade de uma “matemática complicada” para obtê-la ou compreendê-la.

Qualquer combinação de deformação contida na área abaixo da curva significa deformações que uma peça real pode suportar e, conseqüentemente, deformações acima da CLC fatalmente o material não as suportará. Quanto maior for a área abaixo da curva, maiores serão as possibilidades de sucesso ao estampar uma peça, para isso busca-se, neste trabalho, através da troca da geometria do punção aumentar essa área, uma vez que a mesma depende da curva que por sua vez é função das deformações, logo variar a forma do punção é uma forma de melhorar o processo de obtenção das curvas. O conhecimento da CLC “otimizada” para chapas metálicas possibilitará a melhoria dos processos de estampagem (como a eliminação de etapas intermediárias) além de ser uma importante ferramenta quando aplicada a simulação computacional.

O objetivo deste trabalho é discutir o procedimento de construção da CLC através de dois métodos:

- método Nakazima utilizando os parâmetros propostos por ele e largamente encontrados na literatura;
- método Nakazima “alterado” utilizando outra geometria de punção.

Escolheu-se o alumínio liga AA1050-O como material base para realizar o estudo por ser amplamente utilizado na indústria alimentícia (fabricação de panelas, frigideiras, tampas, talheres, etc...), automobilística e aeronáutica com produção de pequenas peças até carroceria e fuselagem respectivamente.

2. ASPECTOS DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA DE CHAPAS

2.1. Propriedades Mecânicas

Para determinar as propriedades intrínsecas de um material se utilizam ensaios mecânicos como tração, compressão e torção. De acordo com Spim et al, 2000, o ensaio de tração é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos por fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. Segundo Altan, 1999, o ensaio de compressão é empregado para determinar dados da tensão de escoamento para materiais em diferentes temperaturas e velocidades de deformações e o teste de torção pode ser empregado para conhecer o comportamento da tensão de escoamento frente a grandes deformações.

2.2. Curva Tensão X Deformação

Conforme normas ABNT 6152 e DIN EN 10002, o ensaio de tração consiste em fixar um corpo de prova numa máquina uniaxial de ensaios mecânicos, a qual deve ter um conjunto de garras que permita prende-lo e aplicar um carregamento, tracionando-o de modo uniaxial, com velocidade controlada e constante até a ruptura registrando a força F [N] e aumento do comprimento l_0 [mm]. Na figura 2.1 tem-se um corpo de prova característico para ensaio de tração em chapas.

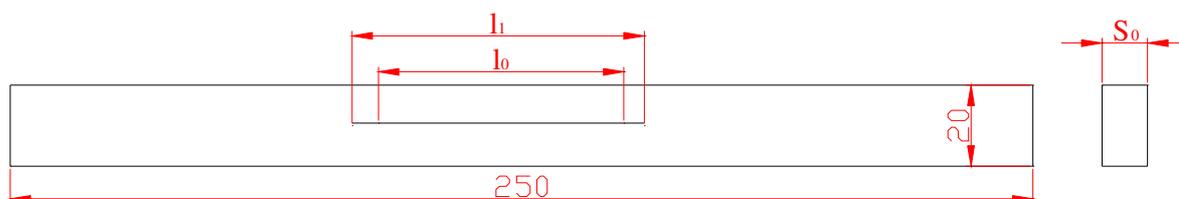


Figura 2.1 – Corpo de prova para ensaio de tração. Unidades em mm.

Fonte: DIN EN 10002:1991.

A força e o deslocamento, medidos durante o ensaio de tração, são dependentes tanto da geometria do corpo de prova como do comprimento inicial não podem por si só descrever o comportamento do material sendo necessário definir parâmetros que o façam.

Matematicamente definem-se nas equações 2.1 e 2.2 a tensão convencional σ que é a razão entre a força F [N] e a seção (inicial) transversal A_0 [mm²] do corpo de prova e a deformação relativa ε como a razão entre a variação do comprimento (l_1-l_0) pelo comprimento inicial (l_0):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0} \quad (2.2)$$

Um esboço da relação entre tensão convencional e deformação relativa é demonstrado no gráfico da figura 2.2

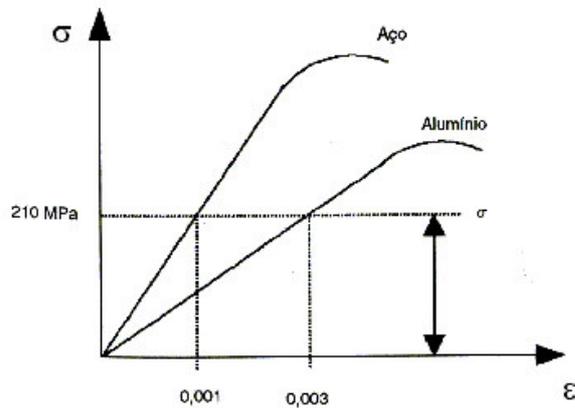


Figura 2.2 – Curva tensão x deformação esquemática comparando aço comercial e alumínio puro. Fonte: Spim et al, 2000.

Extraí-se de um diagrama σ x ε convencional algumas propriedades mecânicas fundamentais que ajudam a caracterizar um material:

- Módulo de elasticidade E [MPa]: uma medida de rigidez do material que relaciona a tensão e a deformação na zona elástica. Nessa região após cessar o carregamento o material retorna a condição inicial em relação a sua deformação;

- O limite de resistência σ_m [MPa]: a tensão máxima que o material suporta situada na região de declividade nula do diagrama $\sigma \times \epsilon$;

- A tensão de escoamento σ_e ou $\sigma_{e0,2\%}$ [MPa]: valor de tensão que marca a passagem da zona elástica para a zona plástica. Quando este valor de tensão não é bem definido, ver figura 2.2, traça-se uma linha paralela a região linear da curva e deslocada 0,2% para a direita sendo aceita a tensão de escoamento do material como o ponto de interseção entre a linha deslocada e curva obtida no ensaio.

O corpo de prova, quando submetido ao estado de deformação característico de um ensaio de tração, sofre um aumento do comprimento inicial l_0 e, conseqüentemente, uma gradativa diminuição da secção transversal, considerando a lei de constância de volume. Mantendo a força do ensaio constante e levando em conta a redução da secção transversal há um aumento da tensão obtida no ensaio, chama-se esta tensão de tensão verdadeira. Tanto a figura 2.3 como a figura 2.4, respectivamente alumínio 1100-O e 5052-O, são exemplos da tensão verdadeira pela deformação verdadeira, ambas levando em conta a diminuição da secção transversal. Essas curvas, obtidas num ensaio de tração, quando avaliadas na região plástica denominam-se curvas de escoamento.

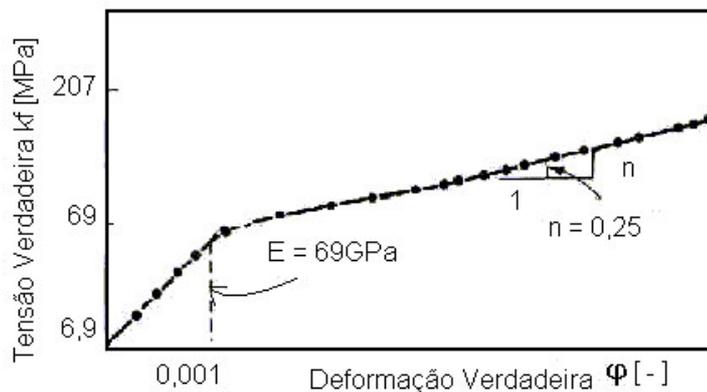


Figura 2.3 – Curva Tensão x Deformação verdadeira. Material alumínio 1100-O.

Fonte: Hosford, 1993.

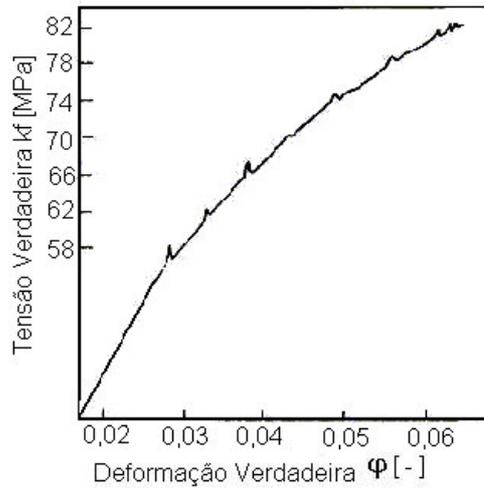


Figura 2.4 –Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira. Material Al 5052-O.

Fonte: Date e Padmanabhan, 2001.

A equação 2.1 considera que a seção transversal do corpo de prova permanece constante durante o ensaio de tração. Na conformação plástica dos metais é utilizada a condição instantânea de deformação onde a cada momento, devido ao aumento infinitesimal do comprimento do corpo de prova, a área sofre uma diminuição infinitesimal.

Nas equações 2.3 e 2.4 k_f [MPa] é a tensão verdadeira, F [N] o carregamento instantâneo, A [mm²] é a área instantânea e φ [-] é a deformação verdadeira.

$$k_f = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.4)$$

Ao analisar a curva tensão verdadeira x deformação verdadeira na região plástica utiliza-se a equação exponencial de Hollomon (eq. 2.5) para descreve-la, considerada uma boa aproximação desde que obedeça a algumas condições iniciais como por exemplo realizar o ensaio a temperatura ambiente. Essa equação é valida para aços baixo carbono e segundo Klein e Cervelin, 1982, não se aplica a aços inoxidáveis austeníticos e “dual-phase” pois os mesmos sofrem mudança de fase por deformação.

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (2.5)$$

Onde C [MPa] é o coeficiente de resistência e n [-] é o grau de encruamento.

Ao utilizar as propriedades provenientes do ensaio de tração pode-se prever com boa precisão a resposta de um material quando submetido à tensão axial. Quando se deseja conformar um material sujeito a um estado bi ou triaxial de tensões ou deformações, a curva de escoamento não traz informações completas. Segundo Blümel et al, 1997, através dos critérios de escoamento conhecidos, Tresca e/ou von Mises, é possível determinar uma tensão (ou deformação) equivalente, partindo de um estado biaxial (ou triaxial) de tensões, a qual compara-se a tensão de escoamento do material. O caminho inverso é praticamente impossível, isto é, detectar por meio de um ensaio de tração algum “fenômeno” bidimensional.

Segundo Volles et al, 2000, uma outra maneira de determinar a tensão de escoamento k_f de chapas para grandes deformações seria através do ensaio de compressão aplicado a um corpo de prova formado por várias camadas do mesmo material (figura 2.5). A equação 2.3 descreve o comportamento da tensão k_f e a deformação passa a ser função da razão entre a secção transversal instantânea e inicial.

$$\varphi = \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad (2.6)$$

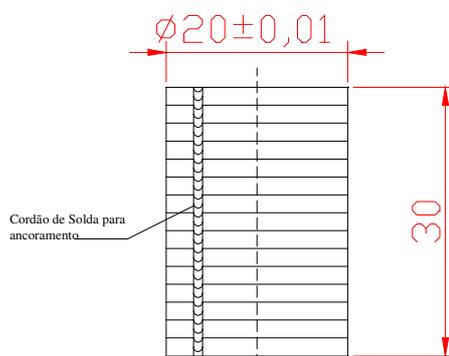


Figura 2.5 – Corpo de prova para ensaio de compressão. Unidades em mm.

Fonte: Volles et al, 2000.

2.3. Deformações Principais

Uma chapa metálica ou corpo de prova, ver figura 2.6, quando submetida a algum tipo de carregamento diferente do ensaio de tração, está sujeito a um estado complexo de tensões e deformações. Partindo de uma geometria inicial conhecida (comprimento l_0 , largura b_0 e espessura s_0) após o findar o carregamento tem-se a geometria final (comprimento l_1 , largura b_1 e espessura s_1) também conhecida.

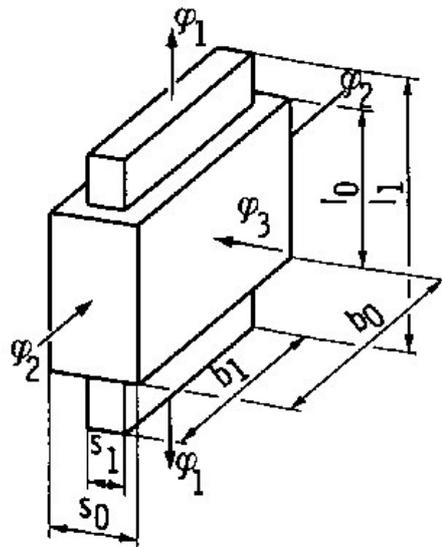


Figura 2.6 – Deformações principais. Fonte: Schaeffer, 1999.

A deformação φ , na equação 2.4, passa a ser “medida” de acordo com os eixos principais de deformação no caso de uma chapa comprimento (l), largura (b) e espessura (s) sendo expressa com índice subscrito indicando o eixo correspondente:

$$\varphi_1 = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) \quad (2.7a)$$

$$\varphi_2 = \int_{b_0}^{b_1} \frac{db}{b} = \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) \quad (2.7b)$$

$$\varphi_3 = \int_{s_0}^{s_1} \frac{ds}{s} = \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) \quad (2.7c)$$

Na equação 2.7 os índices que acompanham as deformações são: 1 deformação na direção do comprimento, 2 na direção da largura e 3 da espessura. Para o caso da figura 2.6 o comprimento final l_1 é maior que o inicial l_0 , a largura final b_1 é menor que a inicial b_0 assim como a espessura final s_1 é menor que s_0 , caso típico de um ensaio de tração, matematicamente a deformação φ_1 é positiva enquanto φ_2 e φ_3 são negativas.

Para o cálculo destas deformações consideram-se as seguintes hipóteses de simplificação:

- corpos de prova submetidos aos ensaios de tração e/ou estiramento são perfeitamente alinhados com o eixo principal de carregamento ao qual são submetidos possibilitando utilizar malha quadrada, isto é, as tensões e deformações cisalhantes são desprezíveis;
- ao analisar um corpo de prova ensaiado a deformação principal φ_1 será a deformação na direção do comprimento e φ_2 a deformação na direção da largura ambas no plano da chapa enquanto φ_3 será a deformação na espessura;
- em corpos de prova nos quais a largura e o comprimento sejam iguais as deformações φ_1 e φ_2 serão iguais, caso isso não aconteça assume-se que φ_1 é maior que φ_2 ;

2.4.Lei da Constância de Volume

A soma dessas deformações principais φ_1 , φ_2 e φ_3 é zero. Chama-se essa definição de Lei da Constância de Volume, a qual é provada matematicamente pelas equações 2.8 a 2.11:

$$V_f = V_0 \quad (2.8)$$

$$l_1 \cdot b_1 \cdot s_1 = l_0 \cdot b_0 \cdot s_0 \quad (2.9)$$

$$\ln\left(\frac{l_1}{l_0}\right) + \ln\left(\frac{b_1}{b_0}\right) + \ln\left(\frac{s_1}{s_0}\right) = \ln(1) \quad (2.10)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (2.11)$$

Essas deformações principais caracterizam a zona plástica de deformações, ou zona própria para conformação e definem a capacidade de uma chapa metálica sofrer deformação sem que haja falha durante o processo de conformação.

2.5. Deformações no Diagrama Limite de Conformação

Para estimar a capacidade de deformação, realizam-se ensaios tecnológicos que caracterizam o comportamento mecânico de um material, de acordo com Doege et al, 1997. Num processo de estampagem ocorrem diferentes combinações de deformações principais φ_1 x φ_2 , as quais são exibidas na figura 2.7.

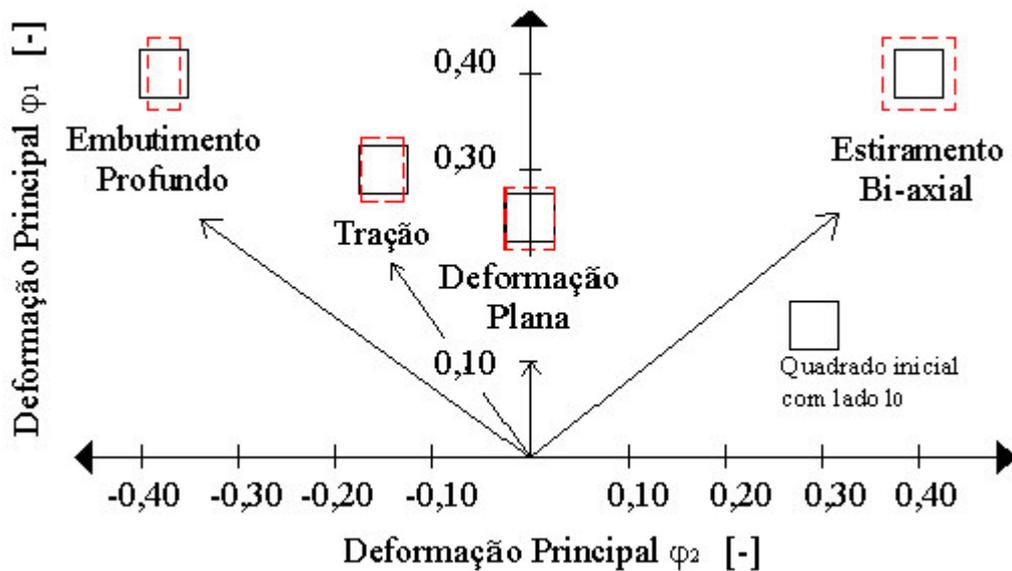


Figura 2.7 – Desenho esquemático das deformações principais inseridas no diagrama limite de conformação. Fonte: Bressan, 1998.

Esta figura é o diagrama limite de conformação onde de acordo com norma ISO 12004:1997 sempre φ_1 corresponde ao eixo das ordenadas e φ_2 ao eixo das abscissas. Nota-se o surgimento de “linhas tendências” que descrevem o caminho das deformações, isto é, funções onde a cada instante uma deformação φ_2 está associada uma deformação φ_1 . Ainda nesta figura vê-se uma geometria quadrada original que quando submetida a diferentes solicitações gera a vista deformada segundo cada uma das seguintes combinações de deformações.

a) embutimento profundo: a deformação principal maior φ_1 é positiva (na direção do comprimento) e a deformação principal menor φ_2 é negativa (na direção da largura), estas duas deformações são iguais em módulo e na direção da espessura não há deformações e pela Lei da Constância de Volume φ_3 (na direção da espessura) é nula;

$$\varphi_1 = -\varphi_2 \quad (2.12)$$

$$\varphi_3 = 0 \quad (2.13)$$

b) tração: caracterizado por deformações trativas na direção do comprimento e compressivas nas direções da largura e da espessura sendo essas últimas iguais entre si;

$$\varphi_1 = -2 \cdot \varphi_2 \quad (2.14)$$

$$-\varphi_3 = -\varphi_2 \quad (2.15)$$

c) deformação plana: a deformação principal na direção da largura é igual a zero, nas direções do comprimento há deformações trativas e deformações compressivas na espessura;

$$\varphi_2 = 0 \quad (2.16)$$

$$\varphi_1 = -\varphi_3 \quad (2.17)$$

d) estiramento biaxial: deformações na direção do comprimento e na largura são positivas (trativas) e iguais, a deformação na espessura é compressiva e igual ao dobro da deformação no comprimento (ou largura).

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (2.18)$$

$$\varphi_3 = -2 \cdot \varphi_1 \quad (2.19)$$

2.6. Deformações e Tensões num Caneco

Durante a estampagem de um copo ou caneco há uma redistribuição do metal quando ocorre a transformação de uma peça bi-dimensional (geratriz) em tri-dimensional, isto é, medida que o punção desce sobre a chapa o metal que entra em contato direto com o punção assume o formato do mesmo sendo forçado para o interior da matriz.

Na figura 2.8 se esboçam as deformações de embutimento profundo, tração, deformação plana e estiramento durante esse processo.

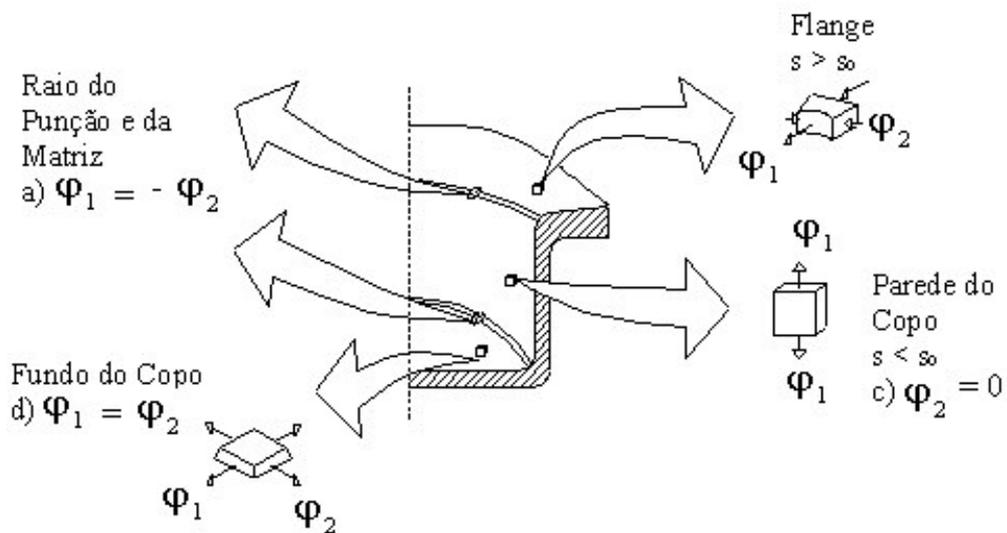


Figura 2.8 – Deformações principais exibidas num caneco.

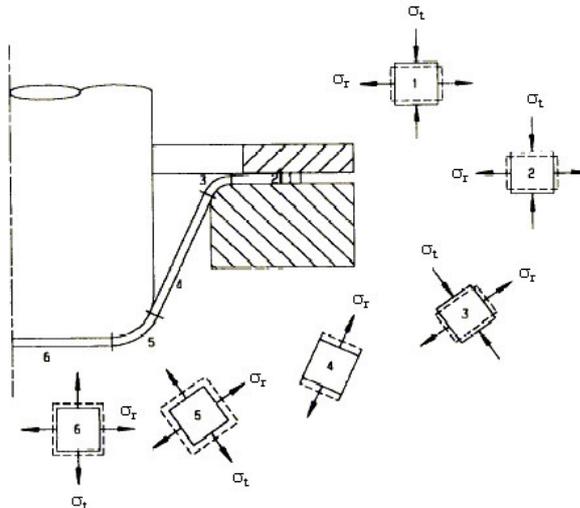


Figura 2.9 – Tensões principais exibidas num caneco.

Fonte Ahmetoglu et al, 1992.

Segundo Blümel et al, 1997, no flange do copo (posição 1 e 2 – fig. 2.9) há tensões tangenciais de compressão e tensões radiais de tração juntamente com tensões compressivas oriundas do prensa chapas. Devido a esse conjunto de tensões, a medida que o punção avança, ocorre um aumento de espessura, pois o mesmo força o metal das bordas na direção do centro. Para evitar que esses esforços compressivos provoquem um excessivo aumento de espessura é necessário um sistema de fixação do disco metálico que, sem evitar o movimento do material para o interior da matriz, tenha a função de impedir esse aumento de espessura.

O metal situado ao redor da matriz (posição 3 – fig. 2.9) é deformado radialmente para o interior da mesma, o metal sofre esforços trativos no sentido radial e compressivos no sentido circunferencial. A medida que o material é forçado contra a matriz há deformações de embutimento profundo, as tensões que atuam no material que está em contato com os raios da matriz e do punção são (posição 5 – fig. 2.9) semelhantes.

Segundo Spim et al, 2000, na região da parede do copo (posição 4 – fig. 2.9) ocorre deformação plana, por ser uma zona de estiramento uniforme. Atuam tensões trativas no sentido radial, como nessa região a distância entre a matriz e o punção é fixa não há tensões no sentido da espessura. Este estado de tensões ocasiona uma diminuição de espessura da geratriz.

No fundo do copo (posição 6 – fig. 2.9) ao longo de todo o processo de conformação há tensões biaxiais de tração e tensões compressivas no sentido da espessura, devido o contato do punção com a geratriz. Spim et al, 2000, escrevem que ocorre uma diminuição de espessura nessa região o que foi comprovado por Hennig, 2001. Segundo Hosford, 1993 não há variação da espessura para essa região.

Estas tensões de estiramento e embutimento são equiparadas as tensões principais na tabela 2.1 e esquematicamente posicionadas no diagrama limite de tensões, ver figura 2.10. Por motivo de comparação este diagrama segue a descrição de uma curva limite de conformação com o eixo das ordenadas correspondendo as tensões principais maiores e o eixo das abscissas ao eixo das tensões principais menores.

Tabela 2.1 – Aproximação das tensões principais no caneco.

| Região do Copo | Tensão (fig. 2.9) | Tensão Principal Equivalente | Caráter |
|----------------|-------------------|------------------------------|---------|
| Flange | σ_r | σ_1 | > 0 |
| | σ_t | σ_2 | < 0 |
| | σ_n | σ_3 | > 0 |
| Parede | σ_r | σ_1 | > 0 |
| | σ_t | σ_2 | > 0 |
| | σ_n | σ_3 | $= 0$ |
| Fundo | σ_r | σ_1 | > 0 |
| | σ_t | σ_2 | > 0 |
| | σ_n | σ_3 | < 0 |

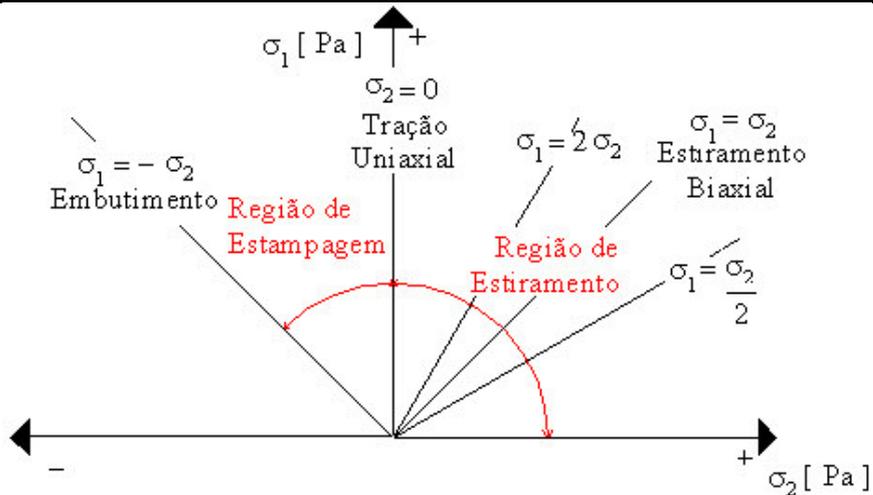


Figura 2.10 – Tensões principais num diagrama limite. Fonte: Klein e Cervelin, 1982.

2.7. Grau de Encruamento

Quando um material sofre deformação plástica o mesmo sofre um endurecimento devido a modificações permanentes na rede cristalina. Este endurecimento por deformação plástica é chamado de encruamento.

Um modo prático de determinar o grau de encruamento n , expoente da equação 2.5, é transpor a curva Tensão Verdadeira x Deformação Verdadeira (figuras 2.3 e 2.4) para a escala logarítmica, onde para a maioria dos materiais é bem definido uma reta cuja inclinação é o grau de encruamento.

Outro modo de definir o encruamento (Spim et al, 2000; Schaeffer, 1999 e Altan, 1999) é através da combinação de equações matemáticas (eq. 2.1 e 2.3) com o ponto de início da zona de estricção localizada, ou ponto de declividade nula (equação 2.20) de uma curva tração x deformação, ver figura 2.2:

$$\frac{dk_f}{d\varphi_1} = 0 \quad (2.20)$$

Chega-se a uma importante definição matemática: A deformação principal maior é igual ao grau de encruamento no ponto de início da estricção dito ponto de carga máxima.

$$n = \varphi_1 \quad (2.21)$$

Quanto maior o grau de encruamento, maior o grau de homogeneização das deformações, isto é, o material distribui melhor as deformações ao longo de seu volume. Há uma maior capacidade de suportar deformações em relação a outro material com menor grau de encruamento.

2.8. Índice de Anisotropia

O índice de anisotropia r é definido como razão entre as deformações principais na direção da largura (φ_2) e espessura (φ_3). Como o erro para medida da deformação na direção da espessura pode ser grande, quando se faz a análise em chapas, é recomendado uma simplificação através da lei de constância de volume:

$$r = -\frac{\varphi_2}{(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (2.22)$$

A anisotropia apresenta valores diferentes, que dependem de como os corpos de prova são cortados de acordo com a direção que o material foi laminado ver figura 2.11, uma vez que a laminação modifica a orientação da estrutura cristalina dos grãos que compõem o material.

Utiliza-se o valor médio de anisotropia r_m para estimar a anisotropia de um material.

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (2.23)$$

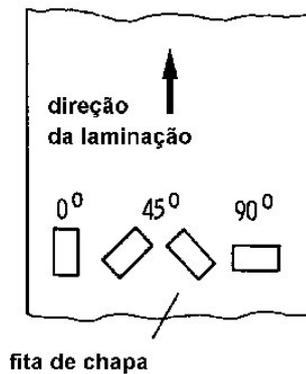


Figura 2.11 – Direção de corte dos corpos de prova para determinação da anisotropia.

Fonte: Schaeffer, 1999.

Na equação 2.24, r_{0° representa o valor de anisotropia para um ensaio onde o corpo de prova é cortado na direção de laminação e r_{45° a 45° da direção de laminação e r_{90° o corpo de prova é cortado na direção perpendicular à laminação.

Um material isotrópico (índice de anisotropia igual a 1) tem suas propriedades mecânicas iguais em todas as direções. Materiais anisotrópicos tem valor diferente da unidade para o índice de anisotropia significando que a diminuição na espessura é menor do que a diminuição na largura em valor relativo para r_m maior que 1. Segundo Novotny e Hein, 2001, materiais anisotrópicos com r_m menor que 1, alumínio por exemplo, não apresentam boa capacidade de se permitir estampar, pois para a mesma sollicitação mecânica uma deformação na espessura será maior que na largura, isto é, há falha prematura na direção da espessura.

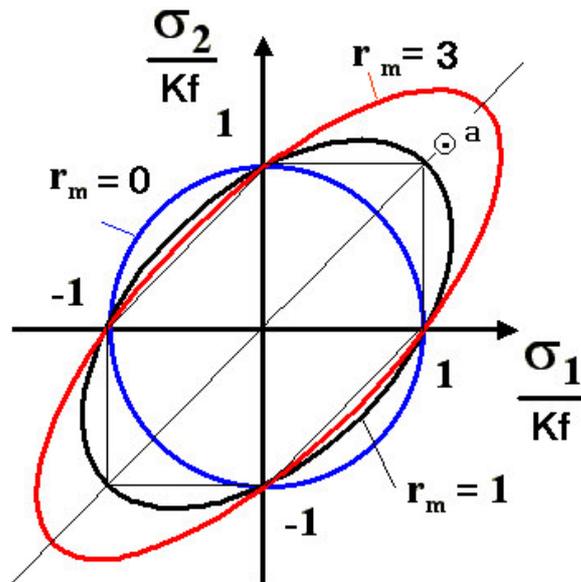


Figura 2.12 – Influência da anisotropia nas tensões.

Fonte: Hennig, 2001.

Quando se compara o comportamento mecânico de materiais anisotrópicos ($r_m \neq 1$) com isotrópicos ($r_m = 1$), deve-se ter um cuidado com o tipo de simplificações feitas durante o processo, ver 1º quadrante da figura 2.12, num caso onde há somente estiramento dependendo das combinações entre tensões ($\sigma_1 > kf$ e $\sigma_2 > kf$, caso do ponto “a”) o material supostamente dentro regime plástico se for considerado perfeitamente isotrópico, não atingiu a zona plástica se for considerada anisotropia do material ($r_m = 3$).

Ao realizar o ensaio de tração, Shim e Park, 2001 determinaram o valor da anisotropia, da constante C e do encruamento para a liga Al 1050-0, os quais são mostrados na tabela 2.2. Shim e Park não divulgaram os valores obtidos para o grau de encruamento nas diferentes direções de laminação (0, 45 e 90 graus) somente indicam o valor médio.

Tabela 2.2 – Propriedades da liga AA 1050-O.

Fonte: Shim e Park, 2001.

| Propriedades | |
|---------------------|---------|
| r_{0° | 0,51 |
| r_{45° | 0,75 |
| r_{90° | 0,48 |
| r_m | 0,62 |
| E | 69 GPa |
| C | 140 MPa |
| n | 0,25 |

Moon et al., 2001, publicaram valores da anisotropia para a liga 1050-0, para isso ele realizou o ensaio de tração variando a direção de corte dos CP's segundo as direções de laminação.

Tabela 2.3 – Parâmetros de conformação da liga AA 1050-O.

Fonte: Moon et al., 2001.

| Direção | C [MPa] | r |
|---------|---------|------|
| 0° | 168,00 | 0,67 |
| 45° | 175,00 | 0,45 |
| 90° | 176,00 | 0,73 |
| Média | 173,50 | 0,58 |

3. ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Os ensaios tecnológicos servem para avaliar ou estimar a capacidade de conformação de materiais metálicos na etapa de produção. Em situações onde possa ocorrer um estado complexo de deformações se exige o conhecimento do comportamento de determinada peça durante o processo de conformação. Através dos ensaios tecnológicos descritos a seguir simula-se experimentalmente as deformações de embutimento profundo, tração, deformação plana e estiramento.

3.1. Ensaio Swift

Este ensaio mecânico simula embutimento profundo, pois há tensão trativa no sentido radial e compressiva no sentido circunferencial do corpo de prova, ambas iguais em módulo. Basicamente o conjunto de ferramenta utilizado para o ensaio Swift é composto por punção cilíndrico, prendedor de chapas e matriz e pode ser visto na figura 3.1. Utilizam-se corpos de prova circulares de vários diâmetros, que são presos em uma prensa de duplo efeito pelo prensa-chapas em forma de anel, o punção é forçado contra os CP's provocando o embutimento, isto é, a chapa é forçada para dentro da matriz até que ocorra fratura, pois o prensa chapas não impede o movimento do material para o interior da matriz, sendo sua principal função diminuir o enrugamento. São exemplos de peças produzidas por embutimento profundo reservatórios de óleo, cilindros de extintores de incêndio, compressores de refrigeração, pias e cubas.

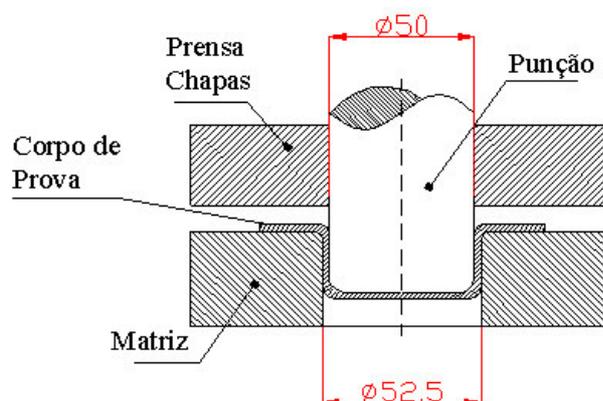


Figura 3.1 – Desenho esquemático do ensaio Swift. Unidades em mm. Fonte: Renó, 1985.

3.2. Ensaio Olsen e Erichsen

São ensaios que servem para determinar a ductilidade de chapas metálicas. Em tais ensaios ocorrem deformações tratativas bidimensionais e se houver condições de lubrificação controladas ocorre deformação biaxial. Ambos simulam estiramento e diferem entre si principalmente pelas dimensões da ferramenta utilizada. O prensa chapas fixa o corpo de prova na matriz enquanto uma esfera de aço endurecida com 22mm de diâmetro (Olsen) ou 20mm (Erichsen – figura 3.2) é forçada contra o corpo de prova preso na ferramenta, o ponto de parada do ensaio é a visualização da fratura. Nesse caso, deforma-se o corpo de prova de modo igual em módulo e direção caracterizando o estiramento.

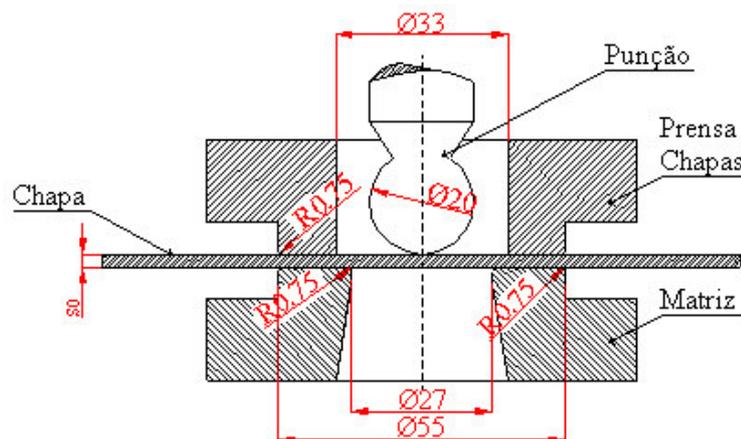


Figura 3.2 – Desenho esquemático do ensaio Erichsen. Fonte: Schaeffer, 1999.

3.3. Ensaio sob Pressão Hidráulica “Bulge Test”

Segundo Schaeffer, 1999, o ensaio sob pressão hidráulica ou “Bulge-Test” é largamente utilizado para fins de pesquisa permitindo realizar grandes deformações de estiramento antes do material romper, isto se dá principalmente por ser este ensaio exclusivamente sem atrito. Há uma câmara vazia coberta pela chapa, ver figura 3.3, a medida que a mesma é preenchida com óleo a pressão interna aumenta e isso força a chapa a deformar-se, pois a mesma é fixa pelo prensa chapas. Sensores de deslocamento e de pressão acoplados ao dispositivo de ensaio que estejam conectados a algum sistema de aquisição de dados permitem acompanhar as deformações que a chapa sofre.

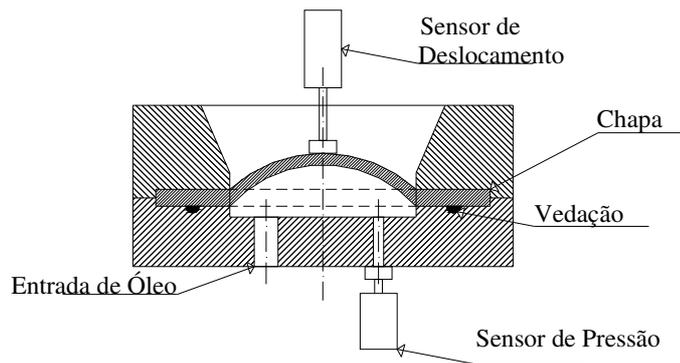


Figura 3.3 – Desenho esquemático do ensaio sob pressão hidráulica. Fonte: Schaeffer, 1999.

Os ensaios Swift, Olsen, Erichsen e Bulge-Teste embora provoquem deformações que atingem a zona plástica não são utilizados individualmente para determinar a CLC de um material, pois eles não são capazes de definir com exatidão o comportamento real de um material durante um processo industrial de estampagem, por seguirem um modo único de deformação, enquanto se sabe que os materiais durante um processo real de conformação estão sujeitos a combinações diversas de deformações.

3.4. Ensaio com múltiplos punções

Um ensaio que é utilizado para simular experimentalmente as deformações num processo de estampagem é o dito ensaio com múltiplos punções, ver figura 3.4. Da esquerda para direita: punção cilíndrico, elíptico, hemisférico, elipse profunda e elipse extra profunda. Segundo Hennig, 1997, utilizam-se estes punções para determinar a capacidade do material suportar deformações de embutimento profundo (cilíndrico) até estiramento (hemisférico) variando o punção. As deformações medidas em corpos de prova ensaiados com este método podem ser utilizadas para determinar a curva limite de conformação e/ou validá-la.



Figura 3.4 – Cinco punções. Fonte: Hennig, 1997.

4. CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

A CLC tem sido estudada desde o início da década de 60. Goodwin utilizando ensaios que simulavam deformações de embutimento e Keeler ensaios de estiramento aplicaram seus resultados na indústria automobilística.

No final da década de 60, Nakazima publicou seu trabalho “Study on the formability of Steel Sheets” no qual através de um único ensaio ele propôs determinar tanto deformações de embutimento como de estiramento. Neste trabalho ele compara seus resultados com outros obtidos utilizando ensaios tecnológicos conhecidos em sua época (Bulge Teste e Erichsen). Gronostjski e Dolny em 1980, buscando otimizar o método Nakazima, descrevem uma variação onde era utilizado o punção Marciniak. Lachmann, 1996, sugere modificar o formato dos corpos de prova buscando maiores deformações.

Atualmente vários pesquisadores (Gu et al, 2002; Butuc et al, 2002; Date e Padmanabhan, 2001; Yoshida e Hino, 1997 e Doege et al, 1997) tem procurado desenvolver métodos matemáticos que estimem a curva limite partindo de propriedades mecânicas como grau de encruamento e índice de anisotropia, isto é, através de um único ensaio, por exemplo de tração definir todas as propriedades do material e estimar a CLC. Não há atualmente grandes melhoramentos no método de determinação de uma curva limite para cada material mas busca-se estimá-la.

Convém salientar que a CLC embora não sendo propriedade intrínseca do material trata-se de uma das mais importantes ferramentas para o projeto de peças estampadas (Ávila e Vieira, 2003) via simulação computacional, pois a mesma é utilizada como finalização de uma simulação numérica, isto é, um programa qualquer de simulação numérica que internamente utilize iterações matemáticas tem como ponto de convergência a CLC, garantindo que resultados matemáticos obtidos na simulação tenham sentido físico.

A curva limite de conformação (CLC) é um critério de falha. Ela indica da capacidade de um material suportar diferentes tipos de deformação, de acordo com Kaluza, et al, 2002, uma CLC é utilizada para prever a falha de um material num processo de estampagem. Segundo Spisak e Stachowicz, 1995, ela fornece uma estimativa de quão próximo o metal se encontra da ruptura revelando se uma operação de estampagem é crítica ou não. Ávila e Vieira, 2003, escrevem que a CLC é uma “técnica” que permite prever as deformações que conduzirão o material a falha através de diferentes caminhos de deformações. Conforme norma ISO 12004:1997, se colocam em um diagrama limite as deformações de:

- (a) embutimento profundo ($\varphi_1 = -\varphi_2$);
- (b) tração uniaxial ($\varphi_1 = -2 \cdot \varphi_2$);
- (c) deformação plana ($\varphi_2 = 0$);
- (d) estiramento biaxial ($\varphi_1 = \varphi_2$).

Na figura 4.1, esboça-se essas deformações onde a deformação principal φ_1 corresponde ao eixo das ordenadas e o eixo das abscissas a deformação principal φ_2 , definindo duas zonas separadas pela CLC e dois quadrantes separados pelo eixo das ordenadas:

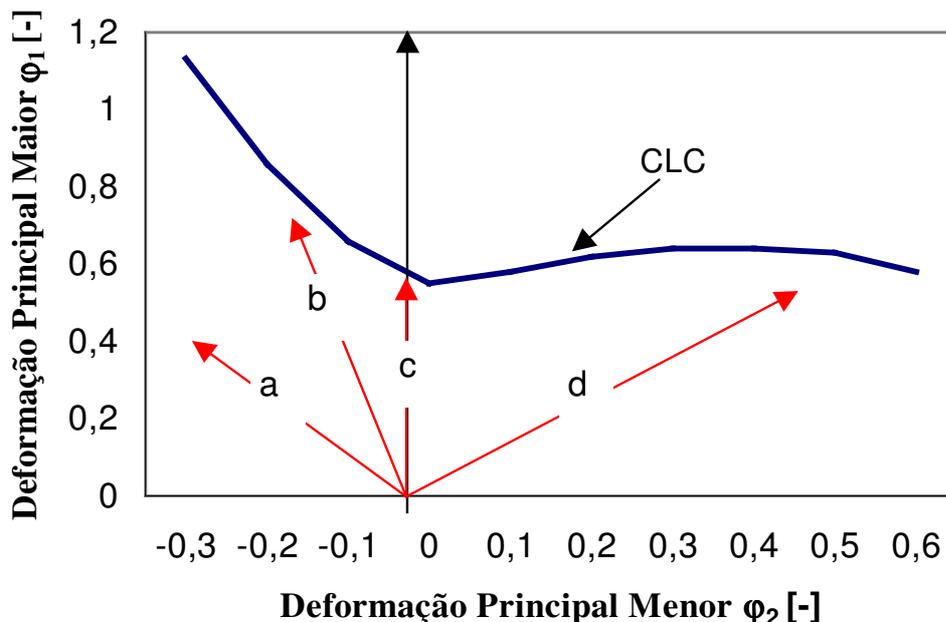


Figura 4.1 – Curva Limite de Conformação (esquemática). Fonte: ISO12004:1997

- zona própria para conformação, abaixo da curva;
- zona imprópria para conformação, acima da curva;
- 1º quadrante: deformações principais φ_1 e φ_2 trativas;
- 2º quadrante: deformação principal φ_1 de tração e φ_2 compressiva.

Vários autores (Ragab et al, 2002; Gu et al, 2002; Rees, 2001; Shakeri, Sadough e Dariani, 2000; Lange, 1985; Klein e Cervelin, 1982; Gronostjski e Dolny, 1980) relatam fatores que influenciam a CLC:

- 1) Espessura do material: maiores espessuras geram maiores deformações, isto é, há um deslocamento para cima da curva, e vice-versa;
- 2) Atrito entre punção e corpo de prova: quanto menor for o coeficiente de atrito, maiores serão as deformações e conseqüentemente mais para cima as curvas;
- 3) Direção de laminação: corpos de prova cortados na direção de laminação apresentam maiores deformações e quando cortados na direção perpendicular à laminação têm menores deformações;
- 4) Pré-deformação: corpos de prova que tenham sofrido pré-deformações trativas tendem a gerar uma CLC posicionada mais para baixo e quando submetidos à pré-deformações compressivas tendem a elevar a curva limite;
- 5) Tamanho de Grão: quanto maior o tamanho de grão inicial a CLC é posicionada mais para baixo, isto é, quanto mais fino o grão maior a estampabilidade do material;
- 6) Anisotropia: o material tem sua capacidade de deformação aumentada no 2º quadrante e diminuída no 1º quando $r_{90^\circ} > r_{0^\circ} > r_{45^\circ}$, isto é, a CLC é sofre uma rotação no sentido horário;
- 7) Grau de encruamento: quanto maior o grau de encruamento mais para cima a CLC;

- 8) Velocidade do punção: quanto menor a velocidade do punção, maior a capacidade do material de ser deformado, isto é, CLC é posicionada mais para cima.

Com o conhecimento da CLC para materiais produzidos e empregados no país busca-se a otimização dos processos de estampagem (como a eliminação de etapas intermediárias) além de ser uma importante ferramenta quando aplicada a simulação computacional.

4.1. Goodwin e Keeler

Goodwin, 1968, com a intenção de melhorar o processo de estampagem de aços de baixo carbono da empresa “Stamping Group Chrysler Corporation” comparou deformações medidas em corpos de prova e áreas de interesse dos “blanks” que seriam estampados, essa comparação consistia em fixar uma grade circular, por método eletroquímico, e após a estampagem medir a malha deformada tanto nos CP’s como nos “Blanks” com auxílio de uma fita flexível. Com esse procedimento ele obteve informações importantes que buscavam otimizar o processo de estampagem.

As deformações que ele mediu situavam-se estritamente no 2º quadrante da CLC ou lado esquerdo da mesma gerando uma banda crítica onde abaixo correspondia a medições feitas em peças que não falharam e acima peças que falharam, logo o campo de deformações medidas restringia-se a embutimento ou tração-compressão, ver figura 4.1. Como conclusão de seu trabalho Goodwin faz as seguintes sugestões, ver tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Análise das deformações críticas

Fonte: Goodwin, 1968

| Acima da CLC | Deformações na CLC | Muito abaixo da CLC |
|---|---------------------------------------|--|
| Utilizar material com melhores propriedades mecânicas | Não é necessário modificar o material | Mudar o material para reduzir custos |
| Modificar o ferramental para melhorar a distribuição de deformações | Pode-se modificar o ferramental | Não é necessário modificar o ferramental |
| Melhorar a lubrificação | Melhorar a lubrificação | Reduzir a quantidade de lubrificantes |

Keeler, 1971, sugeriu determinar em laboratório as deformações críticas, ou deformações principais, que um material pode suportar durante a conformação e aplicar as informações obtidas em peças utilizadas na indústria automobilística, para isso ele propôs marcar corpos de prova extraídos de chapas metálicas com grade circular e submetê-los a ensaios de tração biaxial. Tal procedimento deformava os círculos impressos nos corpos de prova gerando elipses, posteriormente eram medidos os diâmetros maiores e menores da elipse e calculado o logaritmo da razão entre diâmetros gerando respectivamente deformação principal maior e deformação principal menor.

Com esse procedimento realizado em laboratório ele obtinha informações importantes no lado direito da CLC, ver figura 4.2 onde o eixo vertical corresponde as deformações principais maiores e o eixo horizontal as deformações principais menores. Assim como Goodwin, Keeler também determinou uma região crítica de deformações, acima dessa região o material rompe é considerado zona de ruptura ou imprópria para conformação e abaixo zona boa ou própria para conformação onde o material não rompe.

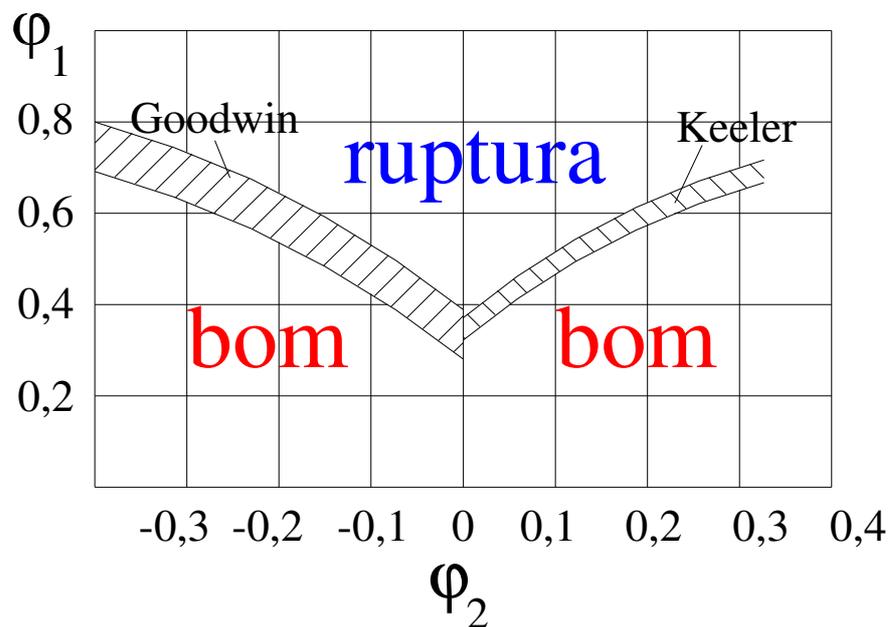


Figura 4.2 – Curva Limite de Conformação. Fonte: Keeler, 1971.

4.2. Nakazima

Segundo Richter, 2003, o ensaio Nakazima propõe levantar a curva limite utilizando um único punção hemisférico de 100mm de diâmetro, uma única matriz, modificando a forma dos corpos de prova, tiras com larguras diferenciadas. Cada tira era presa na matriz enquanto o punção era forçado perpendicularmente contra ela similar ao ensaio Erichsen. Nakazima, 1968, ensaiou sete tipos diferentes de aço, os quais não foram especificados por motivo de segredo industrial, ver figura 4.3.

Tais tiras, ou corpos de prova, são retangulares, com comprimento constante e igual a 200mm variando a largura: 200, 175, 160, 140, 130, 120, 110, 80 e 50mm. Com a aresta de menor dimensão coincidente com a direção de laminação. Através desse ensaio, Nakazima pode determinar a capacidade limite dos aços ao sofrerem estiramento puro ou uma combinação de estiramento e embutimento, pois ao variar a largura do CP muda-se a restrição lateral do mesmo, isto é, a quantidade de material que é permitido fluir para o interior da matriz na direção da largura simulando vários tipos de solicitações mecânicas desde o estiramento até o embutimento.

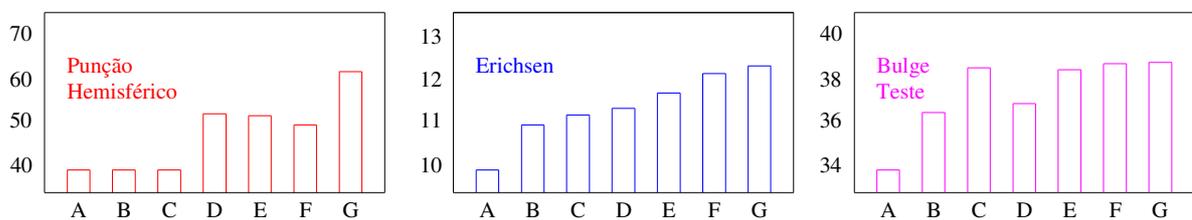


Figura 4.3 – Comparação entre ensaios. Ordenadas indicam profundidade de penetração do punção. Unidades em mm. Fonte: Nakazima, 1968

Além do punção hemisférico Nakazima utilizou uma prensa hidráulica de duplo efeito com capacidade de 150ton, uma matriz de 108mm de diâmetro sem quebra rugas e outra de 106mm com quebra rugas, a força máxima do prensa chapas de 60ton, todos os ensaios variando a lubrificação.

Em seu trabalho Nakazima, 1968, observou que:

- As propriedades mecânicas (grau de encruamento e índice de anisotropia) influenciam diretamente o comportamento da curva.
- O atrito entre punção e corpo de prova também influencia a curva, menor coeficiente de atrito gera maiores deformações.
- A menor deformação, na direção principal de deformação, ocorre quando há a condição de deformação plana ($\varphi_2 = 0$), e aumenta quando atinge as condições de tração uniaxial ($\varphi_2 < 0$) e deformação biaxial ($\varphi_2 > 0$).
- As deformações medidas dependem do valor da célula inicial gravada no corpo de prova, isto é, com grade menor tem-se maior capacidade de medir maiores deformações e vice-versa.
- A curva é influenciada pelo tipo de aço, isto é, a capacidade do material conformar depende da composição química do mesmo.

4.3. Variação do Método Nakazima

Klein e Cervelin, 1982 descreveram uma modificação para os corpos de prova Nakazima, agora com tiras entalhadas. A presença de entalhes modificava a restrição lateral da tira quando submetida ao ensaio de estiramento forçando a ruptura na região central do CP. Na figura 4.4 e tabela 4.2 é mostrada esta variação.

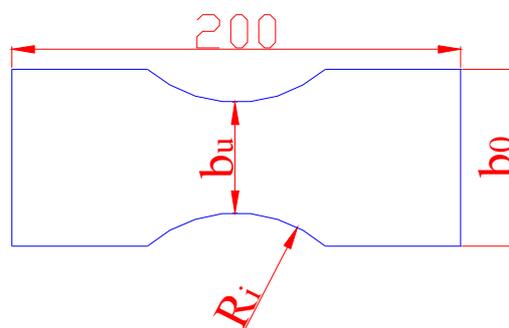


Figura 4.4 – Corpos de prova para determinar a CLC pelo método Nakazima.

Unidades em mm.

Tabela 4.2 – Relação do raio R_i [mm] e das larguras b_u e b_0 [mm].

Fonte: Lachmann, 1996

| CP | R_i [mm] | b_u [mm] | b_0 [mm] |
|----|------------|------------|------------|
| 1 | 100 | 10 | 40 |
| 2 | 90 | 20 | 50 |
| 3 | 80 | 30 | 60 |
| 4 | 70 | 40 | 70 |
| 5 | 60 | 50 | 80 |
| 6 | 50 | 60 | 100 |
| 7 | 40 | 80 | 120 |
| 8 | 25 | 100 | 150 |

Para cada par de coordenadas R_i e b_0 , tem-se uma largura interna b_u , dita largura útil, a medida que essa largura varia há uma alteração do tipo de deformação no corpo de prova, isto é, para b_u menor o corpo de prova, submetido ao ensaio de estiramento, sofre deformação de embutimento profundo e variando b_u até atingir o valor máximo onde ocorre deformação de estiramento bi-axial.

Então, por causa dessa variação de geometria os mesmos são deformados de tal forma que a quantidade de material que flui para dentro da matriz é controlada e simula as diferentes deformações de embutimento puro, embutimento, tração, deformação plana, estiramento e estiramento biaxial.

4.4.Gronostjski e Dolny

Gronostjski e Dolny, 1980, partindo de estudos feitos por Marciniak e Kucznski, desenvolveram um método para determinar a CLC utilizando um punção cilíndrico buscando eliminar certas imperfeições que existiam nos métodos até então conhecidos por ele, ver figura 4.5.

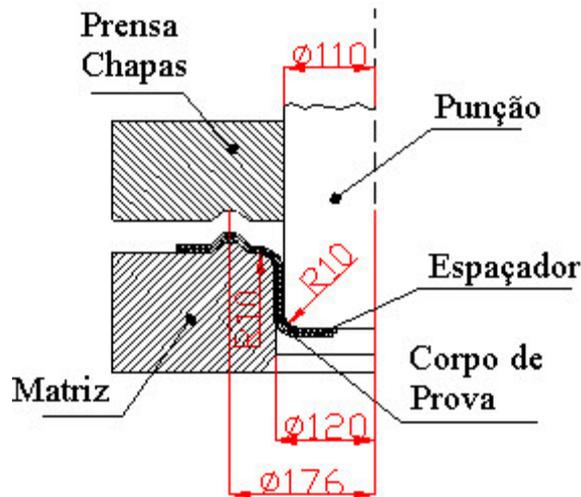


Figura 4.5 – O ferramental utilizado por Gronostajski e Dolny, 1980, para determinar a CLC. Unidades em mm.

Através do método proposto buscava-se eliminar atrito entre o material e a superfície do punção criando uma superfície plana no corpo de prova durante o processo de estiramento. Até então os métodos experimentais conhecidos tratavam de submeter os corpos de prova até a estricção e/ou até a ruptura variando da condição de uniaxial até biaxial, para isso eram feitos ensaios de embutimento hidráulico, ensaio Swift e ensaios de tração em CP's com larguras diferentes com ou sem incisões, o que somente permitia levantar valores ou pares de deformações a esquerda da curva, isto é, deformações de tração e/ou embutimento.

Esses ensaios apresentavam grandes erros de medição das deformações por ser necessário medir deformações com instrumentos planos em regiões curvas. O método proposto sugere uma variação do método Nakazima, utilizar o punção Marciniak para além de alcançar deformações biaxiais embutindo um CP garantir uma superfície plana para posterior medição num projetor de perfil e também a utilização de um espaçador para reduzir o efeito do atrito entre o CP e a “ponta” do punção, o que aumenta a capacidade de deformação do material. A figura 4.6 mostra duas curvas uma com corpos de prova ensaiados até a ruptura e outra até a estricção.

Gronostjski e Dolny, 1980, utilizaram corpos de prova em formato de tiras, além do CP acima, e evidenciou que a fratura se dava sempre no raio de arredondamento do punção, ficando evidente tanto para as tiras como para os discos que deveria utilizar CP's com incisões, forçando maiores deformações no material, isto é, criar uma geometria de corpo de prova ótima forçando, desse modo, o material a “dar mais de si”.

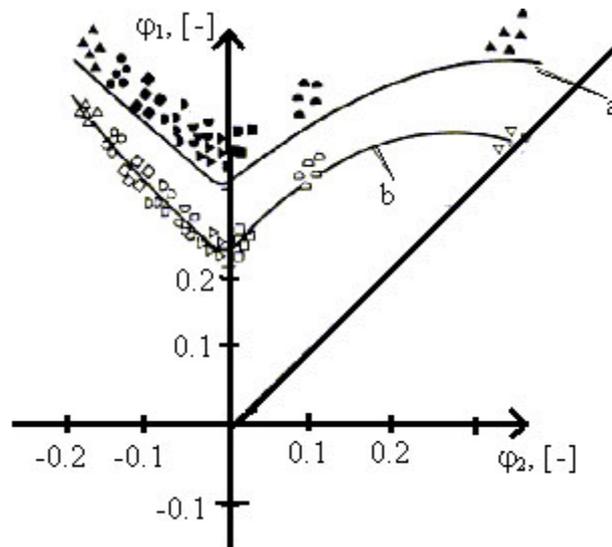


Figura 4.6 – CLC levantada por Gronostjski, 1980, curva (a) é relativa a ruptura e a curva (b) é relativa a estrição. Material: Latão.

4.5. CLC Aplicada a Ligas de Alumínio

Date e Padmanabhan, 2001, para conhecer a estampabilidade de ligas de alumínio aeronáutico, AlCu, AlMg e AlMn determinaram a CLC para essas três diferentes ligas, figura 4.7, extensivamente aplicadas na indústria aeronáutica utilizando o método proposto por Nakazima com duas adaptações uma na geometria das tiras, eles propuseram tiras de 100mm de comprimento com 100, 80, 70, 60, 50, 40, 25 e 15mm de largura e outra na dimensão do corpo de prova, hemisférico com diâmetro de 25mm. A razão da mudança na geometria das tiras é devido à quantidade limitada de material e no punção é por um fator de escala.

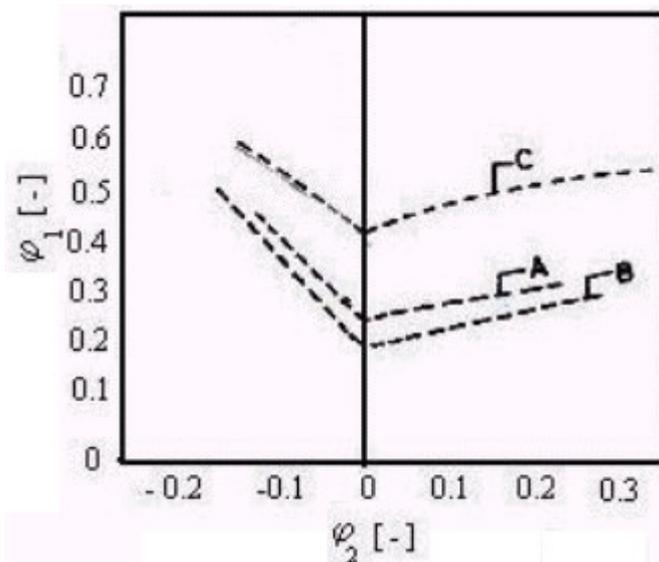


Figura 4.7 – CLC de três diferentes ligas de Alumínio (A) AlCu, (B) AlMg e (C) AlMn.

Fonte: Date e Padmanabhan, 2001.

Para medir deformações, Date e Padmanabhan, 2001, utilizaram gravação de grade circular com diâmetro inicial de 2,5mm. Após o ensaio estes círculos passaram a forma elíptica onde o lado maior da elipse corresponde à direção de maior deformação e o lado menor da elipse a direção em que houve a menor deformação. Aplica-se, então, a equação 2.7 descrita anteriormente, obtendo as deformações principais no plano da chapa.

Yoshida e Hino, 1997, determinaram a CLC de laminas de aço e alumínio de dois modos um analítico e outro utilizando o método proposto por Nakazima. A espessura total para chapa de duas lâminas era 1,73mm e três lâminas 1,52mm. A espessura da chapa de alumínio não foi especificada para a CLC, ver figura 4.8. Por uma análise da curva acredita-se que a espessura não seja maior que 1mm. Yoshida e Hino chegaram a conclusão que a CLC é influenciada pelas propriedades mecânicas de cada material e pela razão de espessura entre cada material, tais conclusões foram obtidas via modelo analítico por meio de simulação numérica, por ser segundo eles muito difícil conhecer o comportamento de cada material experimentalmente.

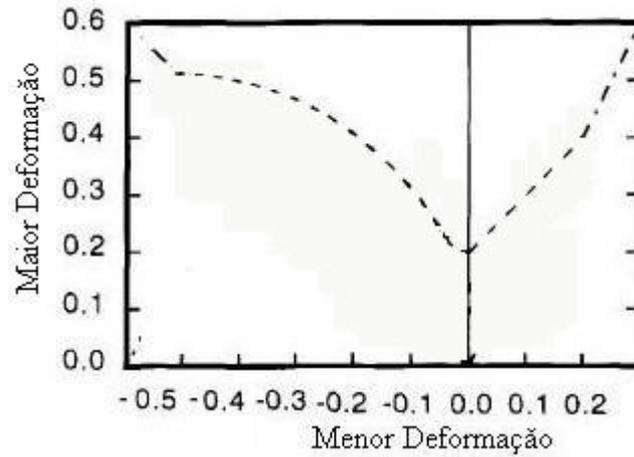


Figura 4.8 – CLC de alumínio. Fonte: Yoshida e Hino, 1997.

Kim et al, 2003, determinaram a CLC de chapas “sandwich” de alumínio AA5182 com 1,2mm de espessura (0,8 na camada de polipropileno e 0,2 em cada camada de alumínio) e da própria chapa de alumínio, ver figura 4.9. A união das chapas foi feita por um filme adesivo cuja espessura não é informada. Foi utilizado método Nakazima com punção de 50mm.

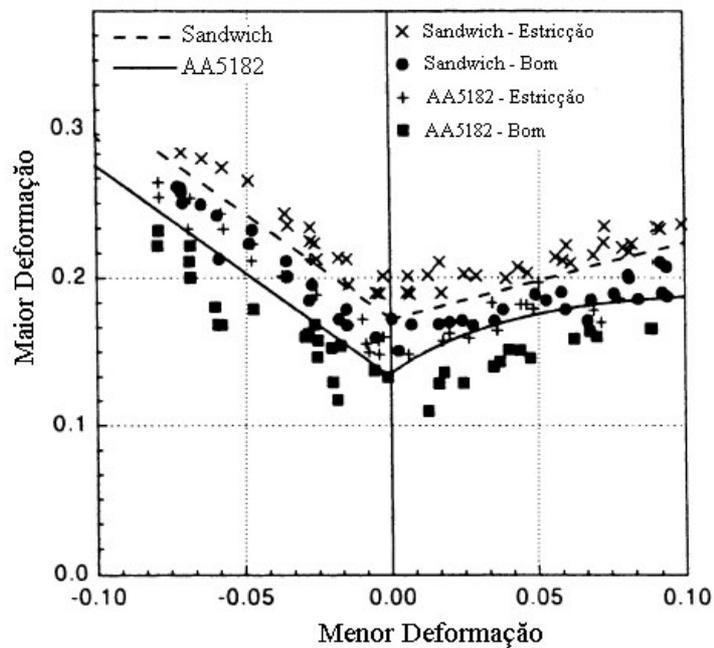


Figura 4.9 – CLC de chapa “sandwich” e alumínio AA5182.

Fonte: Kim et al., 2003.

5. CONSIDERAÇÕES SOBRE LIGAS DE ALUMÍNIO

O alumínio em diferentes graus de pureza é definido comercialmente puro quando varia de 99,00 % até 99,99 %, pelo sistema de classificação da “Aluminum Association” (AA). Nesse sistema, então, os dois últimos algarismos referem-se ao grau de pureza da liga. Assim sendo, o alumínio comercialmente puro com 99,50 % de alumínio é conhecido como 1050. Chiaverini, 1986, considera alumínio puro se a liga apresentar 99,50% de alumínio no mínimo.

O alumínio tem as seguintes características segundo Chiaverini, 1986,:

- estrutura cristalina cúbica de face centrada;
- peso específico de $2,7\text{g/cm}^3$ a 20°C ;
- ponto de fusão baixo de 660°C
- alto ponto de ebulição 2000°C ;
- boa condutividade térmica;
- relativa condutividade elétrica;
- não é magnético;
- baixo coeficiente de emissão térmica;
- tensão de escoamento entre 50 e 60MPa;
- muito dúctil com alongamento máximo de 60 a 70%.

Suas principais aplicações restringem-se a componentes de sistemas térmicos e elétricos, nos quais exige-se alta condutividade sem que haja o mesmo tipo de exigência com relação às propriedades mecânicas. O baixo peso específico do alumínio, quando comparado com o aço, cerca de um terço, torna-o de grande utilidade em sistemas de transportes.

Outra característica importante do alumínio comercialmente puro é sua elevada resistência à corrosão, devido à formação de uma camada de óxido de alumínio (Al_2O_3) que confere essa característica ao evitar o prosseguimento da oxidação. Essa alta resistência à corrosão pode ser diminuída pela introdução de elementos de liga, principalmente de elementos mais afastados do alumínio na tabela de potencial eletroquímico, como o cobre, por exemplo.

Já o magnésio, prejudica muito pouco a resistência à corrosão do alumínio. Por este motivo, as ligas Al-Mg são aquelas que apresentam a maior resistência à corrosão, inferior somente à do alumínio comercialmente puro e muito superior à das ligas Al-Cu.

Devido a essa maior resistência à corrosão, uma outra aplicação importante para o alumínio comercialmente puro é no revestimento de ligas de aplicação aeronáutica, o chamado "cladding". Denomina-se então Alclad 2024 à liga (Al-Cu) 2024 revestida com alumínio comercialmente puro.

Os elementos mais comumente encontrados como impurezas no alumínio comercialmente puro são o ferro e o silício, ver tabela 5.1, em maior ou menor grau, dependendo do nível de pureza. Estes elementos formam fases intermetálicas, como $FeAl_3$, Fe_3SiAl_{12} , $FeSiAl_{18}$ (a), $FeSiAl_{15}$ (b), e $Fe_2Si_2Al_{19}$, devido à limitada solubilidade do ferro no alumínio. Estas fases apresentam-se com diferentes tamanhos, formas e distribuição, mas normalmente só prejudicam as propriedades da matriz quando são grosseiras, alongadas e concentradas nos contornos de grão.

Tabela 5.1- Composição química da liga alumínio 1050.

Fonte: "Metals Handbook", 1990.

| Componente | Em Peso [%] | Quantidade |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| Al | 99,5 | mínimo |
| Cu | 0,05 | máximo |
| Fe | 0,40 | máximo |
| Mg | 0,05 | máximo |
| Mn | 0,05 | máximo |
| Si | 0,25 | máximo |
| Ti | 0,03 | máximo |
| V | 0,05 | máximo |
| Zn | 0,05 | máximo |

Classifica-se em três grandes grupos as ligas de alumínio, não tratáveis termicamente, tratáveis termicamente e ligas fundidas:

I – Ligas tratáveis termicamente: têm suas propriedades mecânicas melhoradas pelo tratamento de endurecimento por precipitação, que é um tipo de tratamento térmico (determinada, entre outras, pela letra "T" seguida por um número, tipo T4, T6 e etc) e também quanto ao tipo de trabalho mecânico (somente no caso das ligas do grupo I - para trabalho mecânico, evidentemente), que do mesmo modo consiste no uso da letra "H" seguida por um número (tipo H12, H16, H32 e etc).

II – Ligas não tratáveis termicamente: têm suas propriedades alteradas somente por trabalho a frio ou encruamento, ver tabela 5.2;

Tabela 5.2- Ligas tratáveis não tratáveis termicamente.

Fonte: "Handbook" - Metal & Ligas, 2003.

| Série | Composição Química | Aplicações principais |
|--------|--------------------------------|--|
| 1XXX.X | Al comercialmente puro | Contatos elétricos e Alclad |
| 2XXX.X | Al-Cu e Al-Cu-Mg | Indústria aeronáutica |
| 3XXX.X | Al-Mn e Al-Mn-Mg | Latas de bebidas. Painéis |
| 4XXX.X | Al-Si | Metal de adição para soldas. Pistões forjados de motores |
| 5XXX.X | Al-Mg | Aplicações náuticas (navios e barcos) |
| 6XXX.X | Al-Mg-Si | Perfis arquitetônicos e Componentes automotivos |
| 7XXX.X | Al-Zn e Al-Zn-Mg | Indústria aeronáutica |
| 8XXX.X | Outras ligas (Al-Li, Al-Fe...) | Várias |

III - Ligas fundidas: devido ao baixo ponto de fusão e alto ponto de ebulição, torna, tanto o alumínio puro como suas ligas, muito utilizados em peças fundidas, utilizando métodos de fundição em areia, sob pressão e de precisão.

6. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

6.1. Visioplaticidade

Segundo Blazynski, 1989, a técnica utilizada para medição das deformações é chamada de visioplaticidade. É o método de medir deformações através da leitura de uma grade impressa na chapa com geometria conhecida, circular e/ou quadrada, ver figuras 6.1 e 6.2. A norma ISO 12004:1997 recomenda tanto uma como a outra geometria de malha desde que estejam dentro da faixa de 1,5mm a 5,0mm para a aresta se for quadrado ou o diâmetro caso circular, utilizou-se malha quadrada com aresta de 2,5mm.

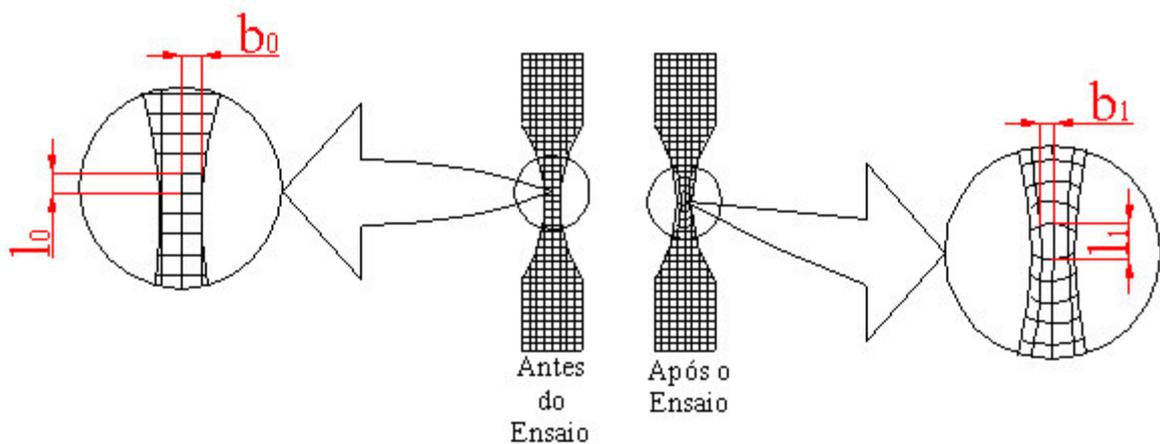


Figura 6.1 – Esboço da grade impressa antes e após o ensaio Nakazima, CP 1.

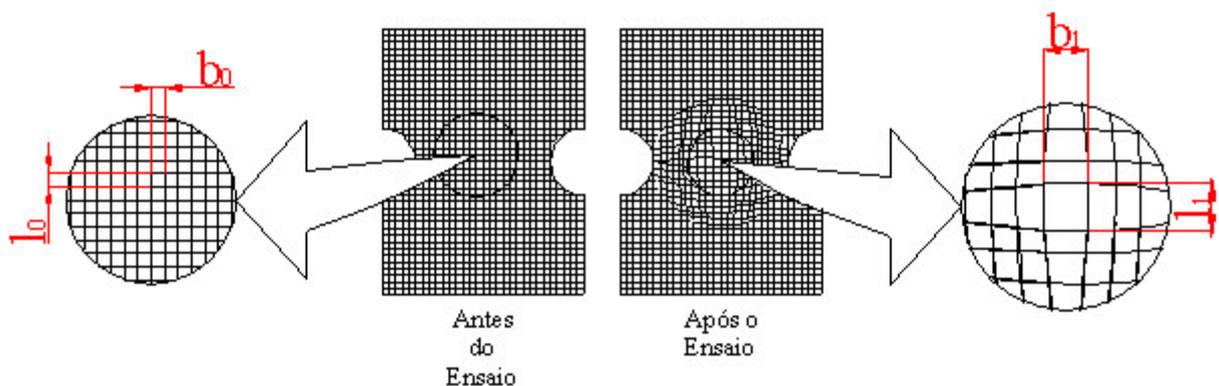


Figura 6.2 – Esboço da grade impressa antes e após o ensaio Nakazima, CP 8.

Após gravar a malha realiza-se o ensaio Nakazima fixando os corpos de prova na matriz prendendo-os nas extremidades com força do prensa chapas controlada, pois se essa for insuficiente o corpo de prova escoa para dentro da matriz e se for excedente o mesmo rompe, o punção é forçado contra o corpo de prova provocando o estiramento, segundo a norma ISO 12004:1997 o ensaio obrigatoriamente deve ser interrompido quando se atinge a estricção localizada, por isso o ferramental deve permitir a visualização do ensaio, ver figura 6.3.



Figura 6.3 – Abertura utilizada para visualizar a deformação dos CP's.

Cada célula inicialmente é perfeitamente quadrada. Neste trabalho foi utilizada a malha com 2,5mm de aresta por ser a existente no laboratório, após o carregamento a malha deforma-se junto com o CP assumindo uma geometria retangular, onde o lado l_1 corresponde à variação do comprimento e sempre será maior que l_0 e b_1 corresponde à variação na largura que dependendo do formato do corpo de prova será maior que b_0 ou menor.

Aplicando a equação 2.7, para a direção de maior e menor deformação obtém-se as deformações principais nas direções de maior e menor deformação, no caso das figuras 6.1 e 6.2 visualmente nota-se que φ_1 é vertical e φ_2 é horizontal.

Um modo de medir essa variação de geometria é utilizar uma fita flexível, ver figura 6.4, que por ser flexível permite acompanhar a variação do formato do corpo de prova. Para evitar má interpretação dos resultados de medição a norma ISO 12004:1997 recomenda medir a célula onde visualmente houver maiores deformações e assumindo que o observador, por exemplo, esteja segurando o CP no mesmo sentido e direção da figura 6.2, medir as células do lado esquerdo e direito da mesma, é considerado ensaio válido se as medições apresentarem uma dispersão de no máximo 10%. No mesmo corpo de prova medem-se também as células acima e abaixo da mesma sendo essas células consideradas células boas, isto é, células onde não houve estricção localizada.

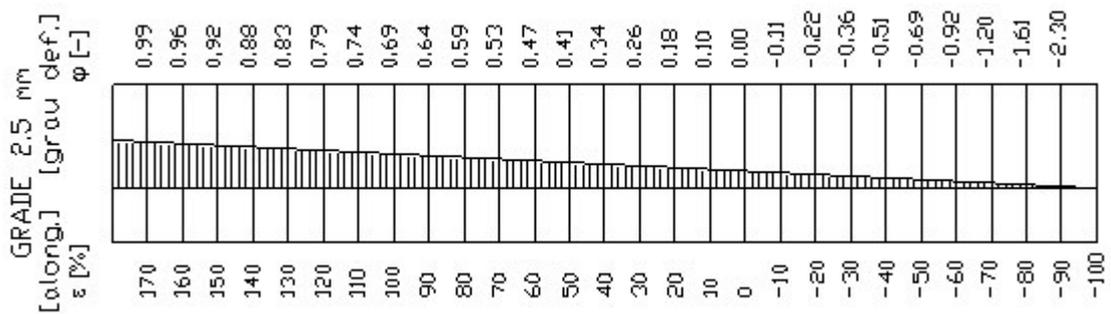


Figura 6.4 – Grade utilizada para medir deformações.

A CLC passa por baixo da nuvem correspondente as deformações medidas, assumindo que qualquer par de deformações $\phi_1 \times \phi_2$ abaixo da curva esteja dentro das condições favoráveis para estampagem e conseqüentemente valores acima já tenham atingido a estricção localizada. Esse procedimento de levantar a CLC foi proposto por Hennig, 1997.

6.2. Corpos de Prova

Utilizou-se três famílias de corpos de prova para realização dos ensaios Nakazima. Segundo o método Nakazima e de acordo com o método Nakazima modificado, respectivamente itens 4.1.2 e 4.1.3. Isto foi feito para além de avaliar o comportamento da curva limite quanto a variação do formato dos punções verificar o comportamento mecânico das deformações nos corpos de prova sem entalhe e com entalhe. Os corpos de prova foram confeccionados de alumínio liga AA1050-O com espessura de 1,9mm e 1mm. Após os resultados com esta liga também ensaiou-se corpos de prova da liga AA6061-O variando a espessura, 1mm, 1,6mm e 2,55mm.

Também se levantou a curva limite de conformação para corpos de prova não entalhados, seguindo a metodologia proposta por Nakazima, somente tomando o cuidado para manter a proporção entre tiras e diâmetro do punção, uma vez que Nakazima utilizou punção com diâmetro de 100mm e para este trabalho tinha-se punção com 50mm. A idéia de utilizar tiras era averiguar a influencia do punção neste tipo de corpo de prova. Cada tira tinha 200mm de comprimento sendo as larguras de 150, 130, 120, 105, 97, 90, 82, 60 e 37.

6.3.Marcação dos Corpos de Prova

Foi utilizado o processo eletroquímico para gravar a malha nos CP's cujo procedimento consiste em:

- Limpar cada corpo de prova para garantir a total ausência de sujeira e/ou gordura na superfície dos corpos de prova evitando assim o desprendimento da malha impressa durante o ensaio de estiramento, optou-se por utilizar álcool isopropílico;
- Posicionar cada corpo de prova em cima de uma chapa metálica, ver figura 6.5, procurando otimizar espaço na bancada e por cima põe-se a tela semipermeável de Stencil com o negativo da malha a ser gravada.
- A seguir coloca-se um feltro embebido em solução com eletrólito, ver tabela 6.1;
- Regula-se o gerador de tensão e corrente, programando-se o nível de corrente/polaridade e forma da tensão corrente continua ou alternada. Para o caso de alumínio tensão alternada (45 Volts) e corrente (50 Ampéres) apresentaram melhores resultados de impressão;

- Passa-se o rolo de aço inox em cima do feltro, que deve sempre ser mantido encharcado em solução com eletrólito, fazendo circular uma corrente elétrica entre o rolo e a chapa o que provocou ataque químico nos corpos de prova, foi feita uma seqüência de 10 passes (5 ida e 5 volta) mantendo unicamente a pressão exercida pelo próprio peso do rolo como pressão atuante, aproximadamente o tempo de duração da marcação é de 10 segundos considerado tempo suficiente para gravação dos corpos de prova sem provocar a queima dos mesmos.
- Caso haja aquecimento do feltro, recomenda-se interromper a gravação até que o mesmo resfrie. Isto por que os resultados de gravação com o feltro aquecido não são satisfatórios

Tabela 6.1 – Composição química do Eletrólito (5 litros de água deionizada)

| Composto | Quantidade em gramas | Composto | Quantidade em ml |
|-------------------------------------|----------------------|----------|--|
| MgCl ₂ 6H ₂ O | 132 g | NaOH | 60 |
| KNO ₃ | 72 g | HCl | quantidade suficiente para junto com NaOH manter o pH de 8,4 |
| NaNO ₂ | 5 g | | |
| Uranin | 2 g | | |

Depois da gravação, com o emprego de líquido “neutralit”, ver tabela 6.2, neutraliza-se o ataque químico no corpo de prova.

Tabela 6.2 – Composição química do “Neutrality” (5 litros de água deionizada)

| Composto | Quantidade | Composto | Quantidade |
|---|------------|----------|--|
| C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈ | 72 g | NaOH | 60 g/litro |
| Na ₂ B ₄ O ₇ | 27 g | HCL | quantidade suficiente para junto com NaOH manter o pH de 8,7 |
| K ₂ HPO ₄ | 32 g | | |

Sendo feito simultaneamente a limpeza da chapelona e secagem dos corpos de prova. Lobão et al, 2003 descreve um procedimento similar de marcação. Ele utilizou tolueno, como desengraxante, para limpar a superfície dos corpos de prova. Embora Lobão tenha feito marcação em aço de baixo carbono acredita-se que esta variação entre tolueno e álcool isopropílico não acarrete falhas no processo de gravação tanto para aço como para alumínio.

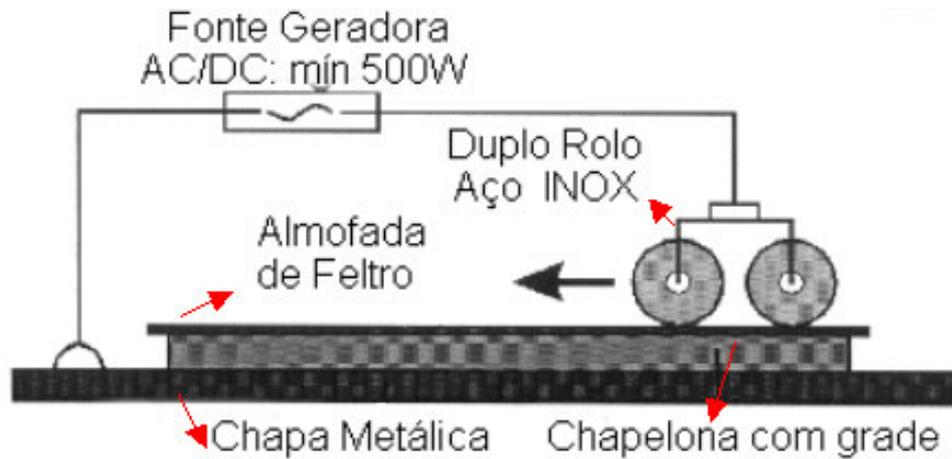


Figura 6.5 – Esquema do processo de gravação de chapas. Fonte: Lachmann, 1996.

6.4.Punções

A forma do punção influencia a posição onde ocorre a estricção, segundo Johnson, 1971. De acordo com Willis, 1954, há uma maior capacidade de embutir alumínio com um punção “cabeça chata” do que um punção hemisférico. Utilizou-se neste trabalho dois punções um hemisférico e outro elipse rasa, ver figura 6.6, embora Nakazima, 1968, tenha utilizado punção hemisférico de 100mm de diâmetro, no presente trabalho utilizou-se diâmetro de 50mm assumindo que tal troca não acarretaria erros no ensaio por ser uma questão de “similaridade geométrica” conforme Hennig, 1997.

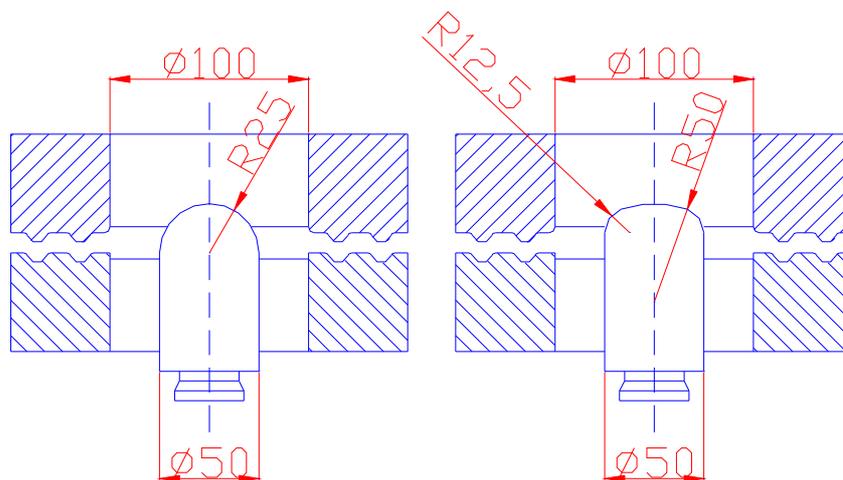


Figura 6.6 – Punções: à esquerda o hemisférico e à direita o elipse rasa. Unidades em mm.

Ao utilizar dois punções diferentes procurou-se averiguar qual influência a CLC sofreria ao variar a forma do punção mantendo os outros parâmetros fixos.

6.5.Lubrificante

O lubrificante utilizado foi um filme de poliuretano PU45 com 7mm de espessura e um diâmetro aproximado de 50mm. Cada disco foi posicionado entre o punção e o corpo de prova a ser ensaiado para minimizar o atrito entre ambos e também evitar danos mecânicos à superfície do punção. Este procedimento foi adotado para ambos os métodos, punção hemisférico e elíptico, evitando influenciar um ou outro resultado. Buscou-se a diminuição do atrito por ser este um dos fatores que influencia a curva limite de conformação como visto no capítulo anterior.



Figura 6.7 – Disco de poliuretano e ferramental utilizado.

Fonte: Silveira Netto et al., 2002

6.6.Quebra Rugas

Na figura 6.7 pode-se notar a presença do quebra rugas que junto com a força do prensa chapas tem a função de prender o material impedindo que o mesmo flua para dentro da matriz. Desse modo garante-se que o material deformado é somente aquele que está em contato com o punção, isto é, ao longo do ensaio para que ocorram as deformações esperadas no material é penalizada a espessura, a largura e o comprimento da região do corpo de prova que está em contato com o punção.

6.7. Equipamento de Medição

Para o ensaio de tração foi utilizada uma máquina universal de ensaios marca KRATOS, ver figura 6.8a. Utilizou-se a escala de 10tf, isto significa que cada 1mV lido representa 98,10N. Para a determinação da CLC utilizou-se uma prensa hidráulica de duplo efeito da marca Dan-Press, ver figura 6.8b, com capacidade de força de até 20 toneladas (6 toneladas no punção inferior). Todos esses sensores na Danpresse e na Kratos foram conectados a um sistema de aquisição de chamado Spider que é específico para aquisição de dados, sendo os mesmos posteriormente tratados no Excel.

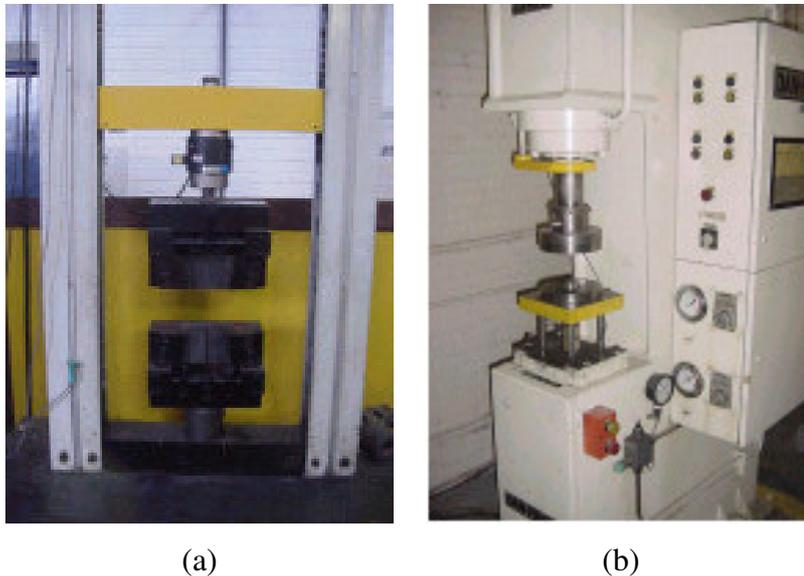
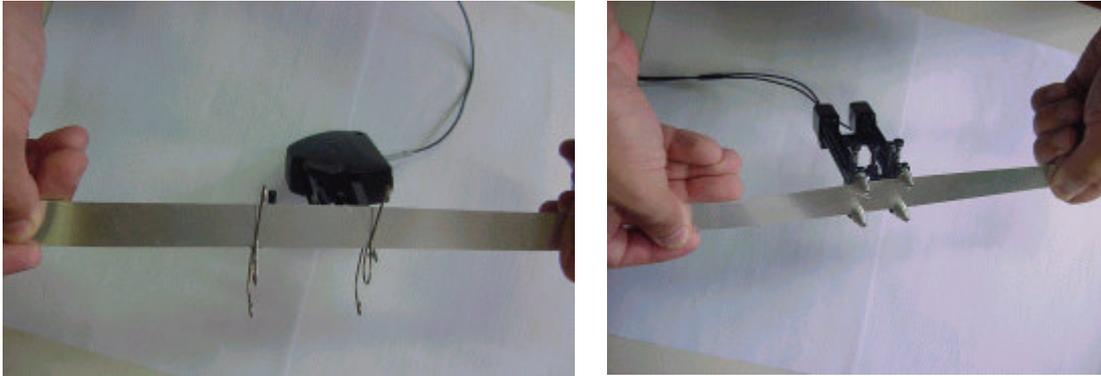


Figura 6.8 – Esquerda: Máquina Universal para Ensaio de Tração. Direita: Máquina para realização de ensaio Nakazima.

A prensa tem acoplado um sensor de deslocamento resistivo Gefram modelo PCM 200E para medir profundidade de estampagem. Há uma célula de carga confeccionada no laboratório acoplada ao punção para medir a força de estampagem durante a conformação, um sensor de pressão de óleo marca Gefram modelo TKG M 1 M 2 C para controlar a força do prensa chapas.

A medição do deslocamento longitudinal, ou alongamento, foi feita através do sensor INSTRON 2630-100, ver figura 6.9a, série Clip-On Extensometers, o erro deste sensor é $\pm 0,06\%$ FS. O deslocamento transversal foi medido por meio de um sensor INSTRON 2640-010, ver figura 6.9b, tipo estático com erro de $\pm 0,06\%$ FS.



(a)

(b)

Figura 6.9 – Esquerda: Sensor de deslocamento longitudinal. Direita: Sensor de deslocamento transversal.

7. RESULTADOS

7.1. Propriedades Mecânicas

Foram realizados ensaios de tração uniaxial para determinar as propriedades intrínsecas do alumínio liga AA 1050-O. Segundo norma DIN 10002 fez-se 15 ensaios sendo cinco na direção de laminação, cinco a 45° e o restante perpendicular a direção de laminação, ver figura 7.1.

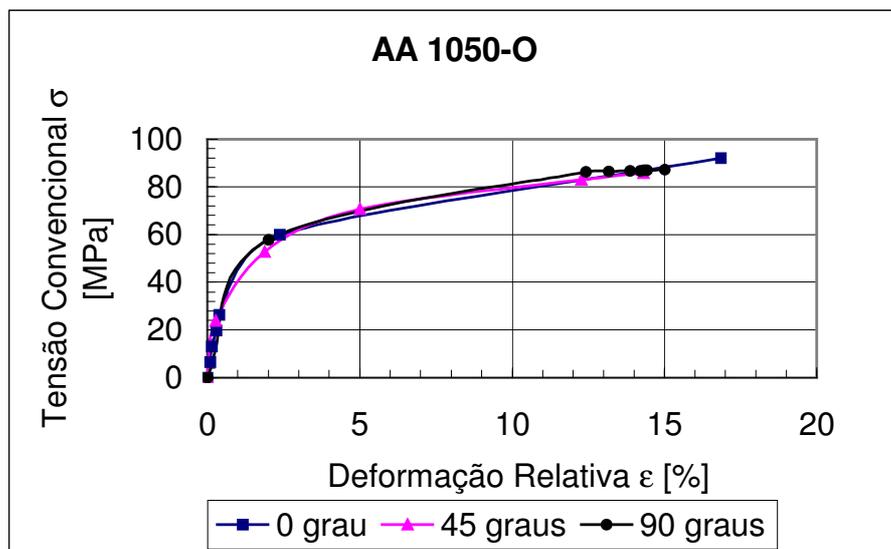


Figura 7.1 – Curva tensão convencional X deformação relativa. Espessura 1,9mm.

Na figura 7.1 nota-se que a tensão de escoamento $\sigma_{e0,2}$ do material é 59MPa quando o ensaio foi feito para corpos de prova cortados na direção de laminação, 71MPa para corpos de prova cortados a 45° e para CP's cortados perpendicularmente a direção de laminação a tensão de escoamento é aproximadamente 58MPa.

Ainda nesta mesma figura, através da relação entre tensão e deformação dentro do regime linear de tração, onde é válida a lei de Hook, é conhecido o módulo de elasticidade para cada direção: E_0 é 69GPa, E_{45} é 85GPa e E_{90} é 69GPa.

Mesmo que se trate do mesmo material acredita-se que este fenômeno de diferentes valores nominais de tensão de escoamento seja devido a presença de grãos fortemente orientados sendo necessário uma tensão diferente para deformar esses grãos, caso de materiais laminados a frio, por exemplo.

Na figura 7.2 vê-se os valores de deformações principais ϕ_1 , na direção do comprimento, e ϕ_2 na direção da largura. Aplicando a equação 2.23 para o nível de deformação de 20% chega-se a anisotropia do material a 0 grau, a 45 graus e a 90 graus da direção de laminação, ver tabela 7.1.

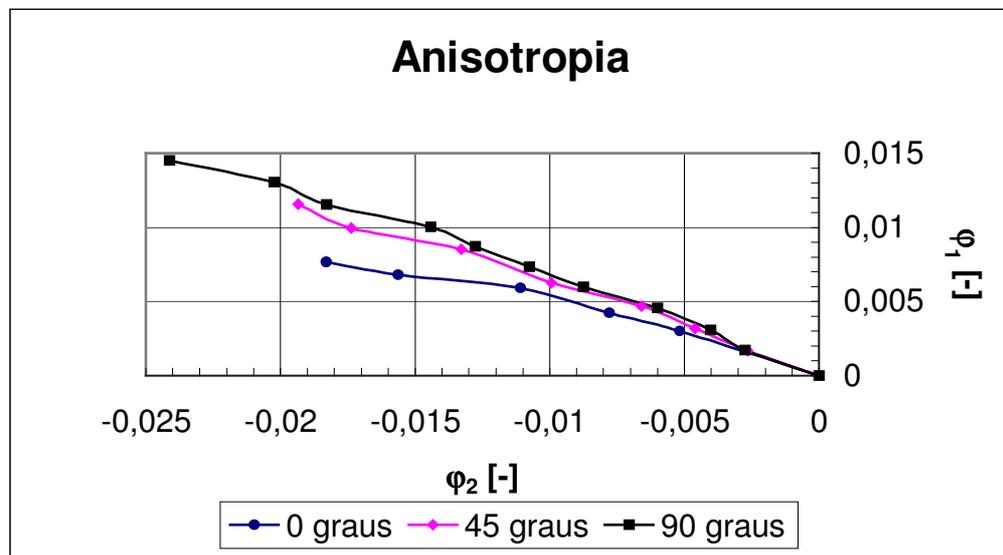


Figura 7.2 – Deformações ϕ_1 e ϕ_2 utilizados para definir a anisotropia. Material AA1050-O.

Tabela 7.1 – Deformações ϕ_1 , ϕ_2 e anisotropia segundo cada direção de laminação, para deformação de 20%. Material AA1050-O.

| | ϕ_1 | ϕ_2 | media | desvio |
|----------|----------|----------|-------|--------|
| r_0 | 0,007 | -0,011 | 0,634 | 0,020 |
| r_{45} | 0,014 | -0,023 | 0,620 | 0,030 |
| r_{90} | 0,010 | -0,015 | 0,605 | 0,026 |

Na figura 7.3 é exibida a curva tensão de escoamento do material para corpos de prova cortados na direção de laminação, a 45° e perpendiculares a direção de laminação. Para encontrar o grau de encruamento e o coeficiente de resistência do material esta curva foi transposta para a escala logarítmica, ver tabela 7.2.

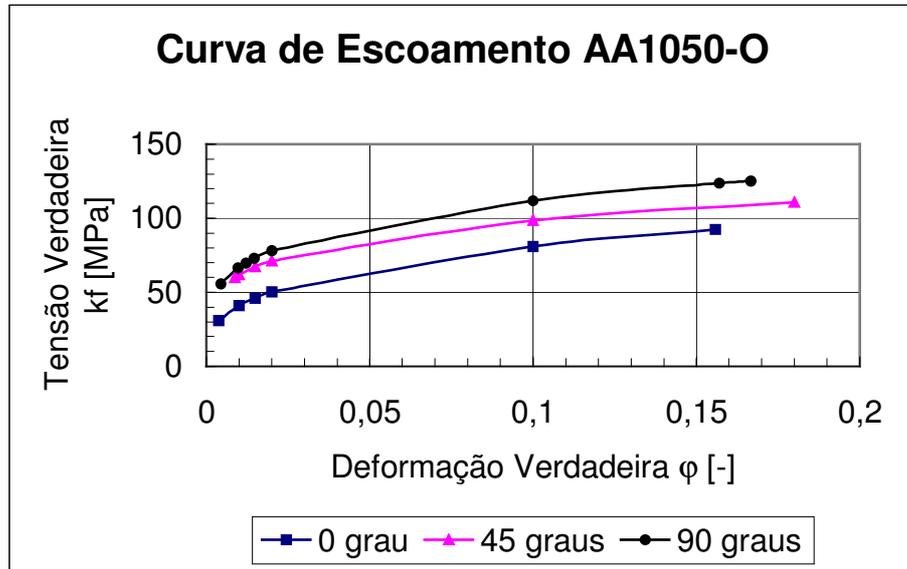


Figura 7.3 - Curva de escoamento. Espessura 1,9mm.

Tabela 7.2 – Propriedades mecânicas do alumínio 1050.

| | Unidade | 0° | 45° | 90° |
|-----------------|---------|-------|-------|-------|
| $\sigma_{e0,2}$ | [MPa] | 59 | 71 | 58 |
| E | [GPa] | 69 | 85 | 69 |
| σ_m | [MPa] | 92 | 86 | 87 |
| r | [-] | 0,634 | 0,620 | 0,605 |
| n | [-] | 0,296 | 0,202 | 0,223 |
| C | [MPa] | 160 | 159 | 186 |

Para obter a curva de escoamento do material AA1050-O, utiliza-se os valores médios do grau de encruamento e do coeficiente de resistência encontrados. Então, rescreve-se a equação 2.5, aplicando-a aos resultados obtidos.

$$k_{f0^0} = 160 \cdot \varphi^{0,296} \quad (7.1a)$$

$$k_{f_{45^0}} = 159 \cdot \varphi^{0,202} \quad (7.1b)$$

$$k_{f_{90^0}} = 186 \cdot \varphi^{0,223} \quad (7.1c)$$

7.2. Estampabilidade

7.2.1. Medição de Força

A figura 7.4 mostra a força média de conformação medida para cada corpo de prova ensaiado pelo método Nakazima com punção elíptico e hemisférico, cada corpo de prova é indicado como CP1...CP8, ver tabela 4.2.

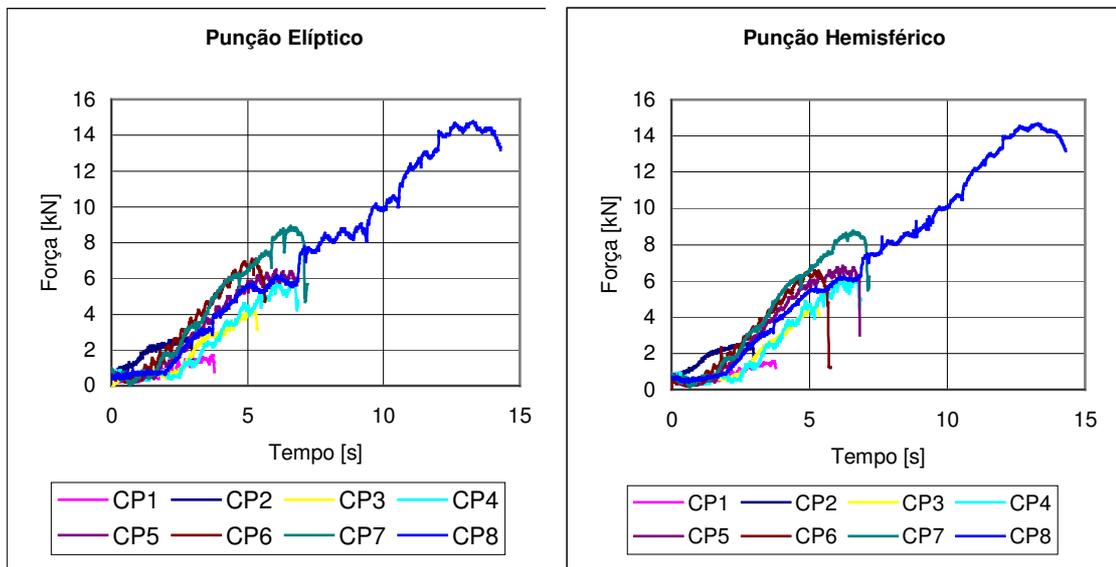


Figura 7.4 – Relação entre força de estampagem e o tempo.

Nota-se que independente do punção a força medida é praticamente a mesma. A força do prensa chapas foi ajustada em torno de 6 toneladas que junto com o quebra rugas garantiu que o corpo de prova não escoasse para dentro da matriz.

7.2.2. Os Corpos de Prova

Mostra-se na figura 7.5 uma família completa de corpos de prova ensaiados (dimensões ver tabela 4.2), onde se pode notar na região central a estrição. Para os corpos de prova 1, 2 e 3 a estrição localizada deu-se com ângulo aproximado de 60° em relação ao comprimento enquanto nos demais CP's a estrição é perpendicular a direção onde ocorre a deformação principal maior ϕ_1 .

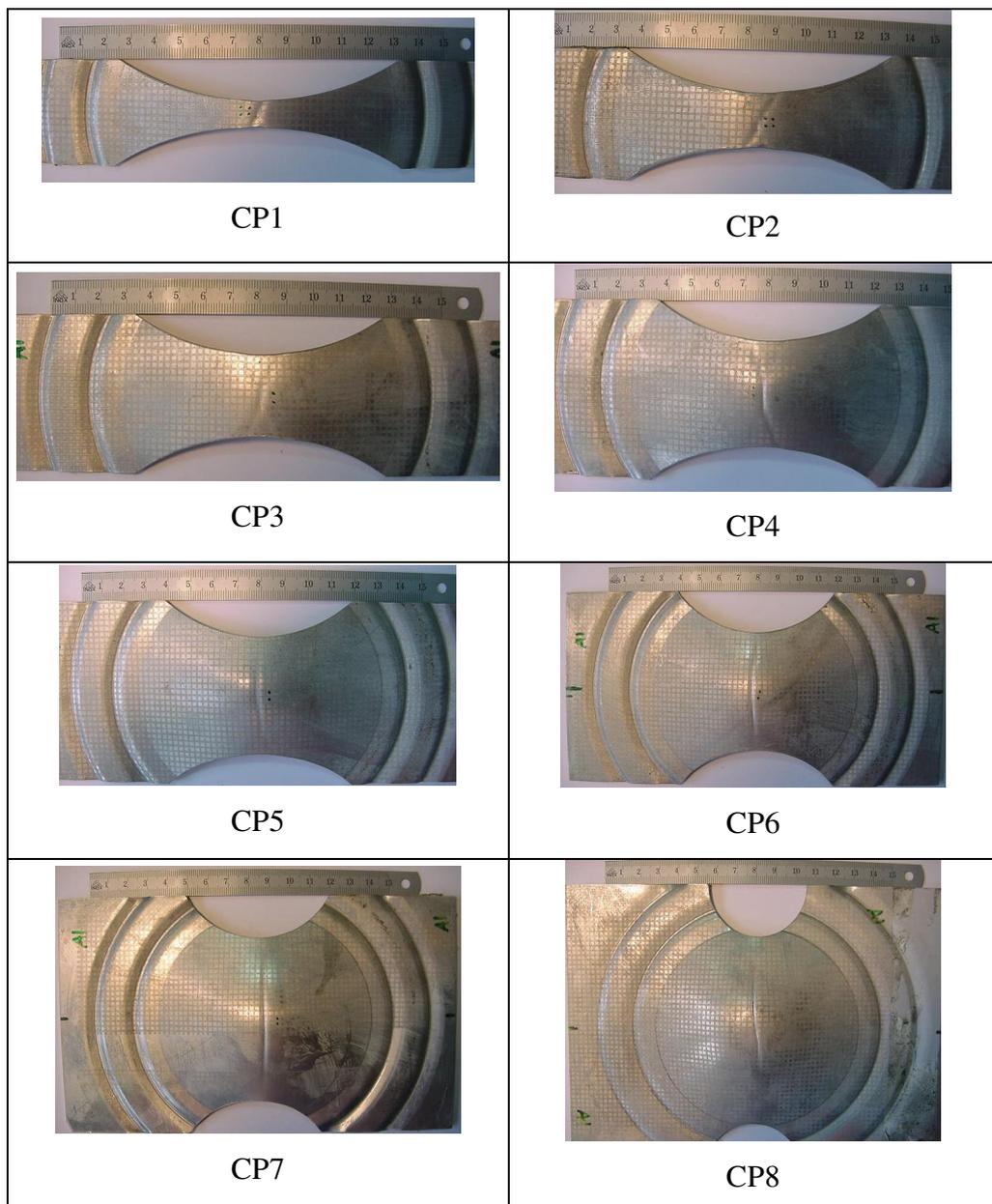


Figura 7.5 – Família de CP's ensaiados. Material Al 1050-O.

7.2.3. Curva Limite de Conformação

Com os corpos de prova ensaiados fez-se a medição das deformações φ_1 e φ_2 em células que foram até a estrição. Fez-se, então, uma aproximação da CLC a estrição (figuras 7.6 a 7.14) por um polinômio de terceiro grau.

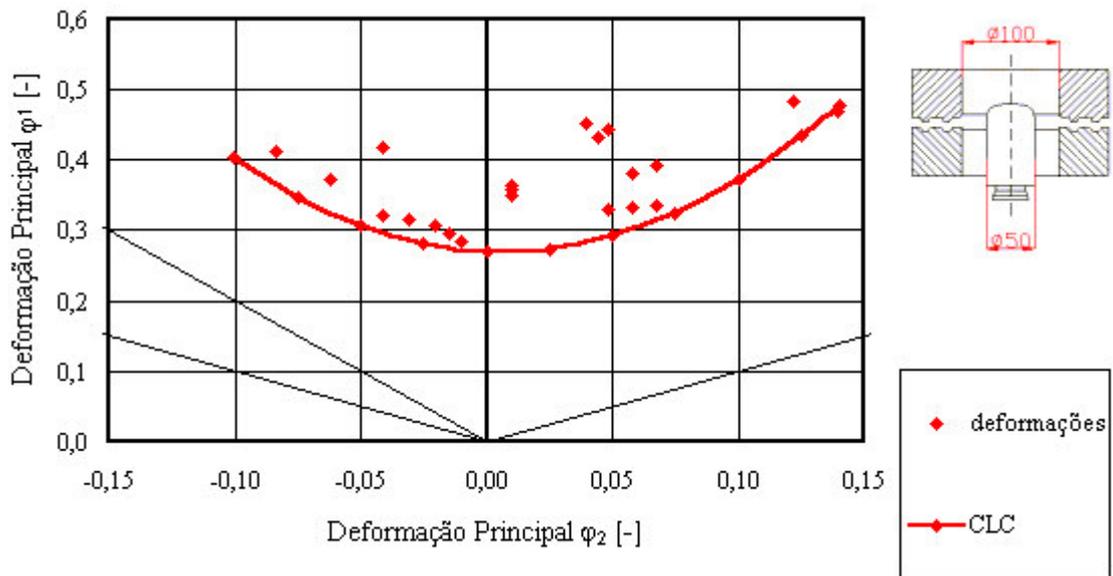


Figura 7.6 – CLC a estrição Al 1050 – O. CP com entalhe. Espessura 1,9mm.

A equação 7.2 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estrição da figura 7.6, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com corpos de prova entalhados e punção elipse rasa.

$$\varphi_1 = -0,55 \cdot \varphi_2^3 + 11,77 \cdot \varphi_2^2 - 0,15 \cdot \varphi_2 + 0,27 \quad (7.2)$$

$$-0,10 < \varphi_2 < 0,15$$

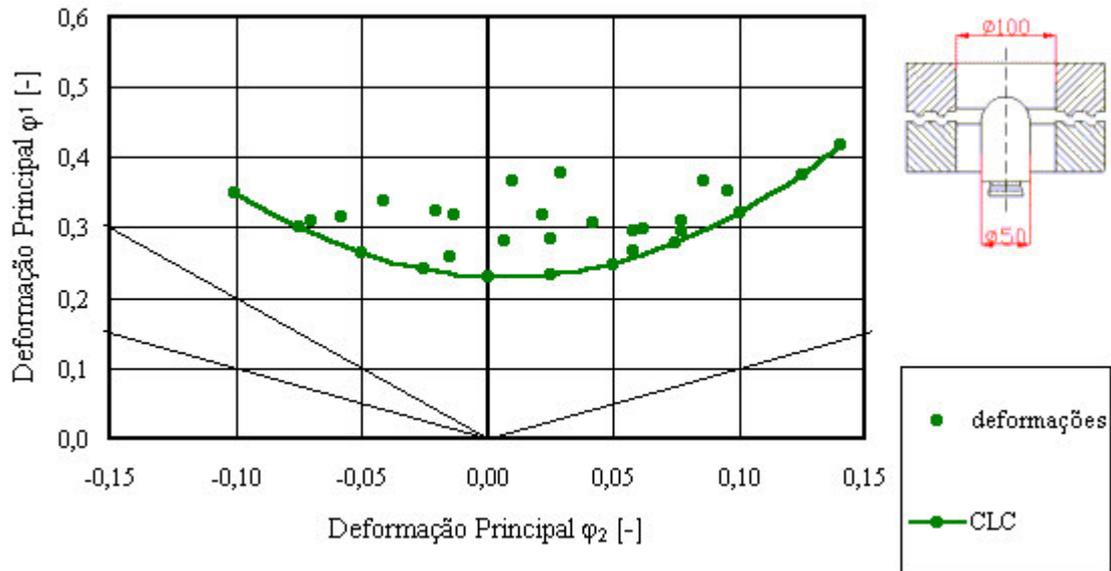


Figura 7.7 – CLC a estricção. Material Al 1050 – O. CP com entalhe. Espessura 1,9mm

A equação 7.3 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estricção da figura 7.7, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com corpos de prova entalhados e punção hemisférico.

$$\varphi_1 = 2,47 \cdot \varphi_2^3 + 10,38 \cdot \varphi_2^2 - 0,18 \cdot \varphi_2 + 0,23 \quad (7.3)$$

$$-0,10 < \varphi_2 < 0,15$$

A equação 7.4 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estricção da figura 7.8, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com punção elíptico e corpos de prova não entalhados, isto é, em formato de tiras.

$$\varphi_1 = -29,71 \cdot \varphi_2^3 + 12,53 \cdot \varphi_2^2 - 0,068 \cdot \varphi_2 + 0,36 \quad (7.4)$$

$$-0,05 < \varphi_2 < 0,10$$

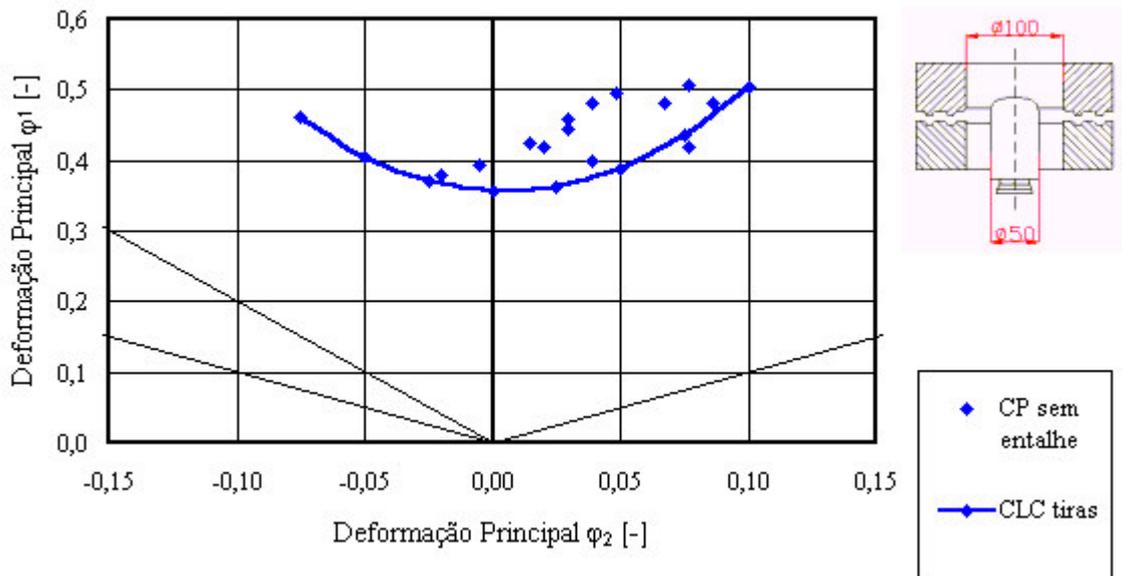


Figura 7.8 – CLC a estricção. Material Al 1050 – O. CP sem entalhe. Espessura 1,9mm

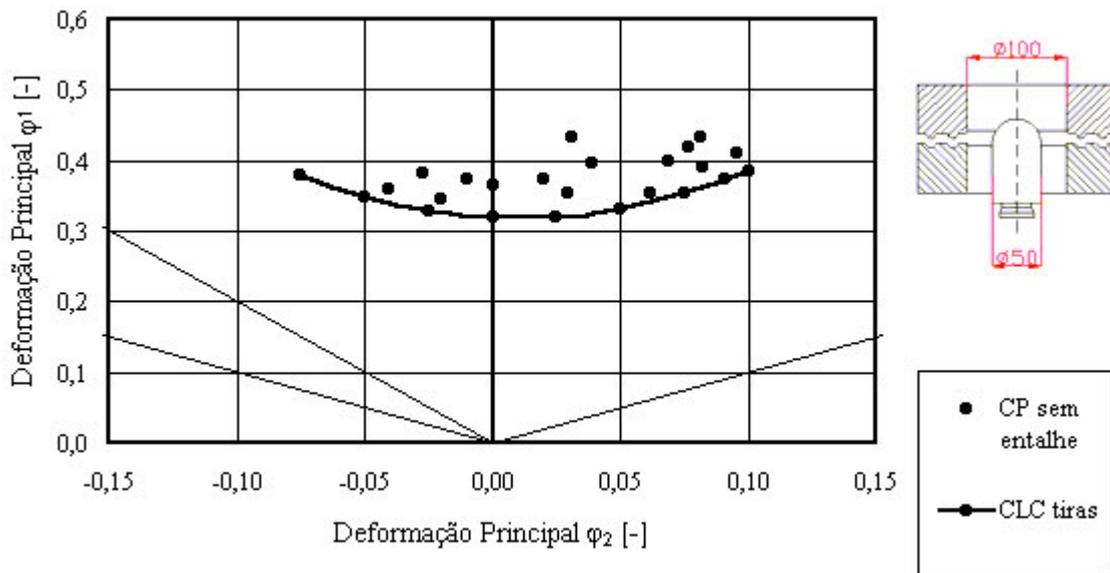


Figura 7.9 – CLC a estricção. Material Al 1050 – O. CP sem entalhe. Espessura 1,9mm

A equação 7.5 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estricção da figura 7.9, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com corpos de prova em formato de tiras não entalhadas e punção hemisférico.

$$\varphi_1 = -11,48 \cdot \varphi_2^3 + 8,81 \cdot \varphi_2^2 - 0,16 \cdot \varphi_2 + 0,33 \quad (7.5)$$

$$-0,05 < \varphi_2 < 0,10$$

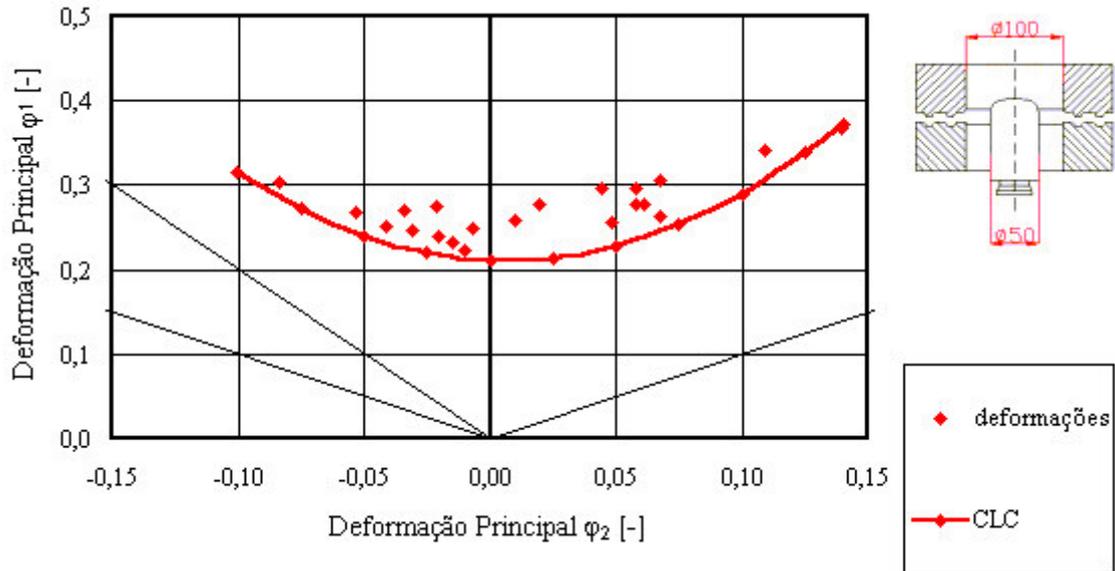


Figura 7.10 – CLC a estrição Al 1050 – O. CP com entalhe. Espessura 1mm.

A equação 7.6 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estrição da figura 7.10, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com corpos de prova entalhados e punção elipse rasa.

$$\varphi_1 = -0,43 \cdot \varphi_2^3 + 9,18 \cdot \varphi_2^2 - 0,12 \cdot \varphi_2 + 0,21 \quad (7.6)$$

$$-0,10 < \varphi_2 < 0,15$$

A equação 7.7 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estrição da figura 7.11, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com corpos de prova entalhados e punção hemisférico.

$$\varphi_1 = 2,93 \cdot \varphi_2^3 + 8,84 \cdot \varphi_2^2 - 0,10 \cdot \varphi_2 + 0,17 \quad (7.7)$$

$$-0,10 < \varphi_2 < 0,15$$

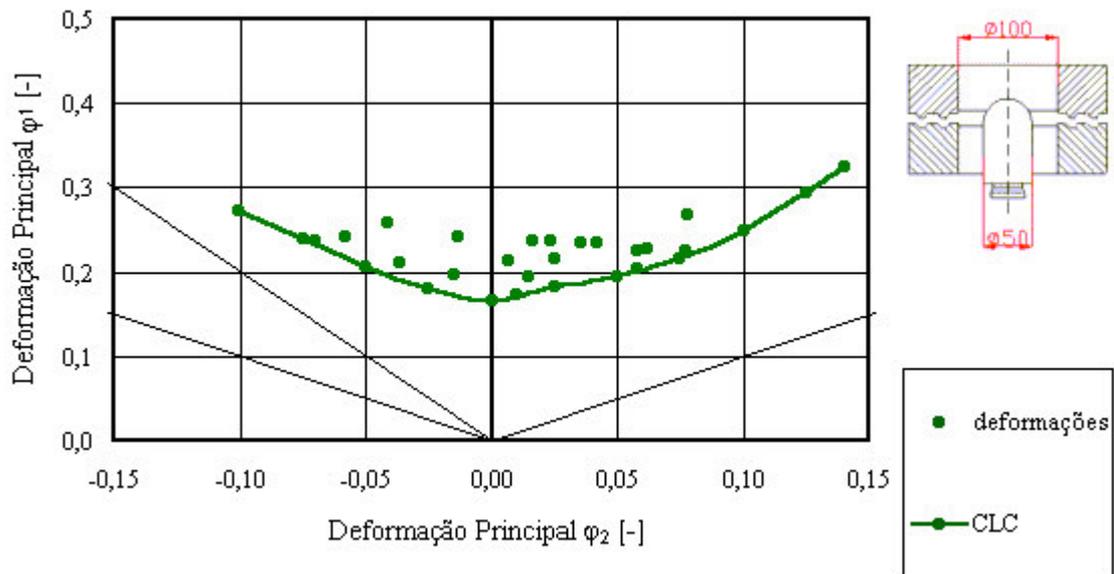


Figura 7.11 – CLC a estricção. Material Al 1050 – O. CP com entalhe. Espessura 1mm

7.3. Curva Limite Alumínio Aeronáutico (Punção Elíptico)

Após os resultados obtidos com o alumínio AA 1050-O onde verificou-se que realmente a CLC é posicionada mais acima quando utilizado o punção elíptico realizou-se o ensaio Nakazima com punção elíptico para assim determinar a CLC da liga AA 6061-O variando a espessura de 1,00, 1,60 e 2,55mm (Silveira Netto et al., 2003). Foram feitos ensaios até a estricção e até a ruptura, sendo levantadas duas curvas por espessura. Mediu-se as deformações nas células boas determinando visualmente o quanto essas deformações se distanciam das curvas de estricção e de ruptura.

A equação 7.8 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estricção da figura 7.12, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com corpos de prova entalhados e punção elíptico.

$$\varphi_1 = 2,05 \cdot \varphi_2^3 + 1,25 \cdot \varphi_2^2 - 0,12 \cdot \varphi_2 + 0,23 \quad (7.8)$$

$$-0,15 < \varphi_2 < 0,20$$

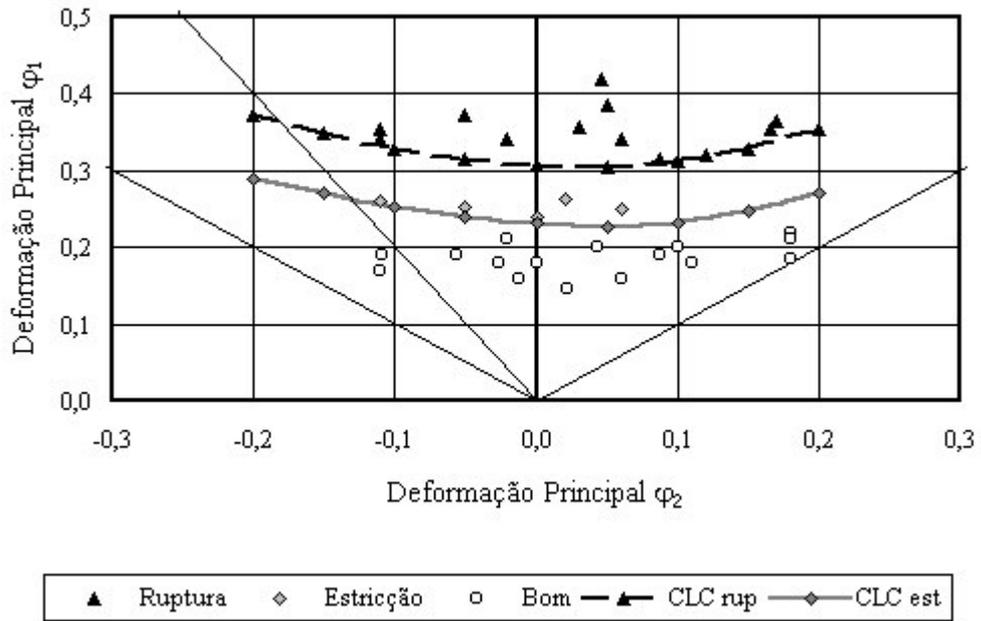


Figura 7.12 – CLC a estricção e a ruptura. Punção Elíptico.
 Espessura 1,00mm. Material Al 6061 – O.

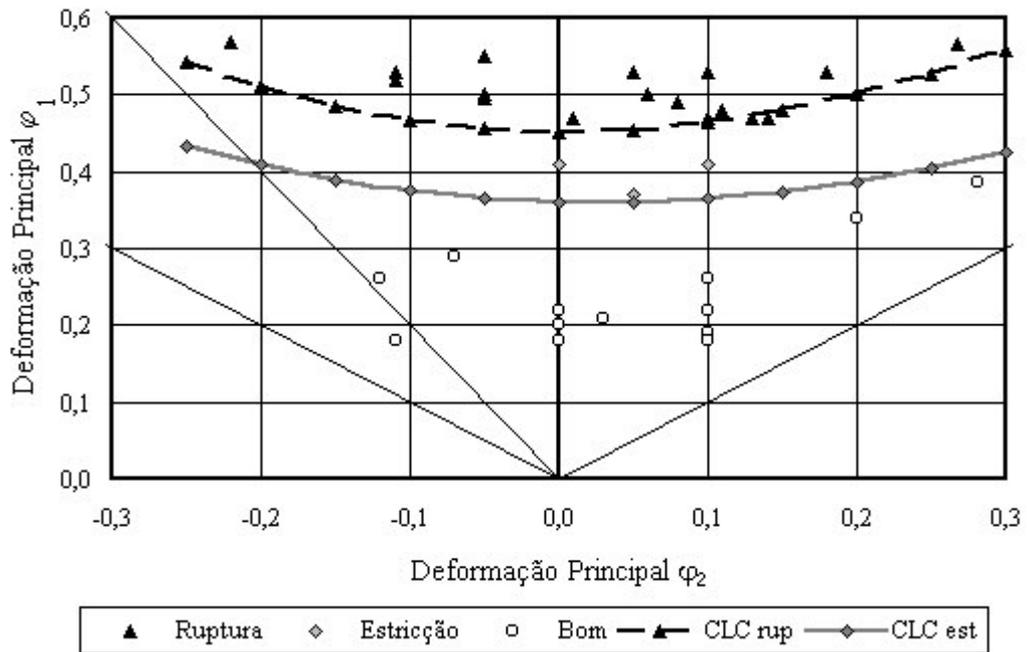


Figura 7.13 – CLC a estricção e a ruptura. Punção Elíptico. CP com entalhe.
 Espessura 1,60mm. Material Al 6061 – O.

A equação 7.9 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estricção da figura 7.13, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com corpos de prova entalhados e punção elíptico.

$$\varphi_1 = -0,18 \cdot \varphi_2^3 + 0,94 \cdot \varphi_2^2 - 0,05 \cdot \varphi_2 + 0,36 \quad (7.9)$$

$$-0,25 < \varphi_2 < 0,30$$

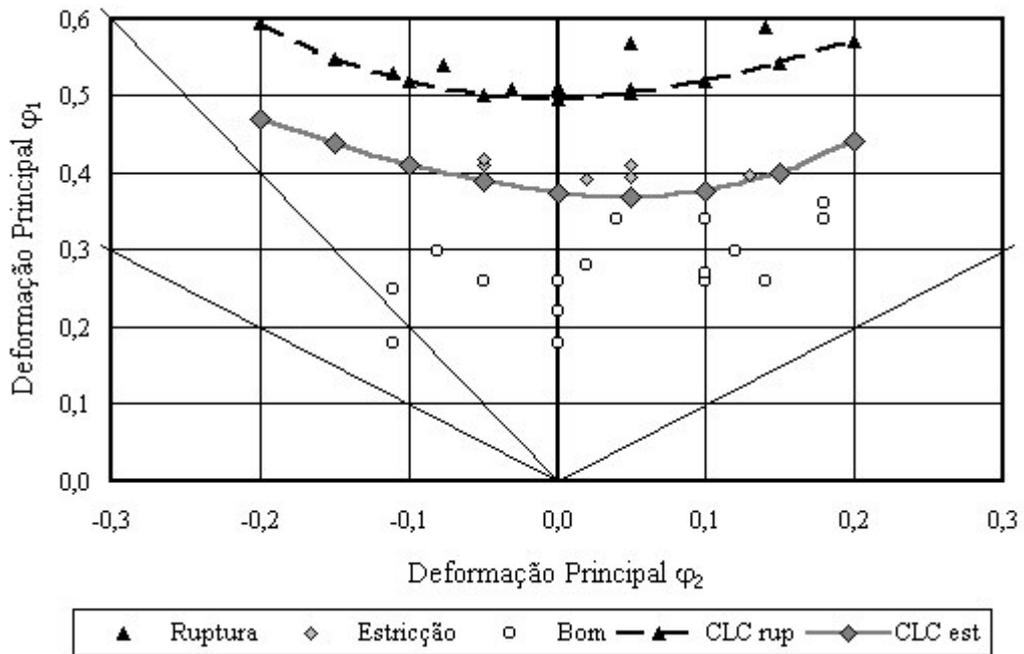


Figura 7.14 – CLC a estricção e a ruptura. Punção Elíptico. CP com entalhe.
Espessura 2,55mm. Material Al 6061 – O.

A equação 7.9 é o polinômio que foi utilizado para descrever a curva limite a estricção da figura 7.14, o ensaio foi feito segundo procedimento proposto por Nakazima com corpos de prova entalhados e punção elíptico.

$$\varphi_1 = 3,33 \cdot \varphi_2^3 + 2,04 \cdot \varphi_2^2 - 0,21 \cdot \varphi_2 + 0,37 \quad (7.10)$$

$$-0,15 < \varphi_2 < 0,20$$

7.4.Espessura Final

As curvas limites determinadas neste trabalho são funções ou equações onde φ_1 é função de φ_2 . Pela lei de constância de volume se assume que φ_3 também é função da deformação φ_2 .

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (7.11)$$

Através da equação 2.7c pode-se determinar a espessura final s_1 que após os devidos ajustes passa a ser:

$$\frac{s_1}{s_0} = e^{\varphi_3} \quad (7.12)$$

Então, partindo das curvas determinadas neste trabalho demonstra-se nas figuras 7.15 até 7.18 a espessura final como função das deformações principais φ_1 e φ_2 .

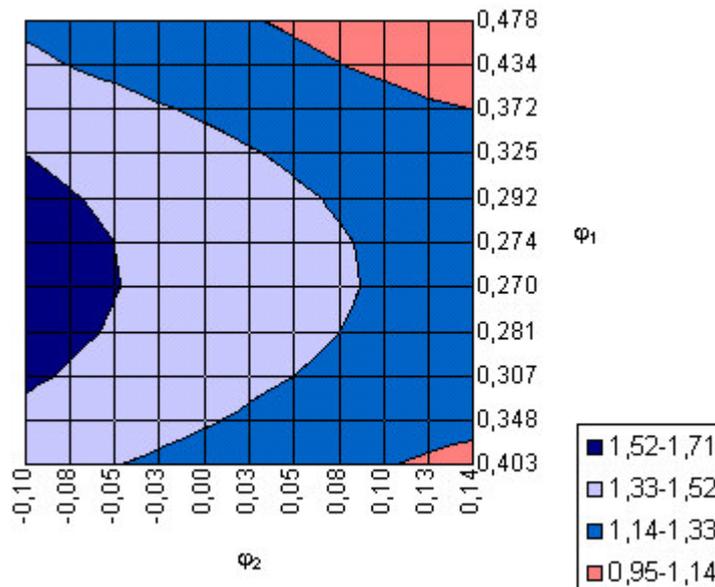


Figura 7.15 – Espessura final em função das deformações principais. Punção Elíptico.

Espessura inicial 1,9mm. Material Al 1050-O. Unidade em mm.

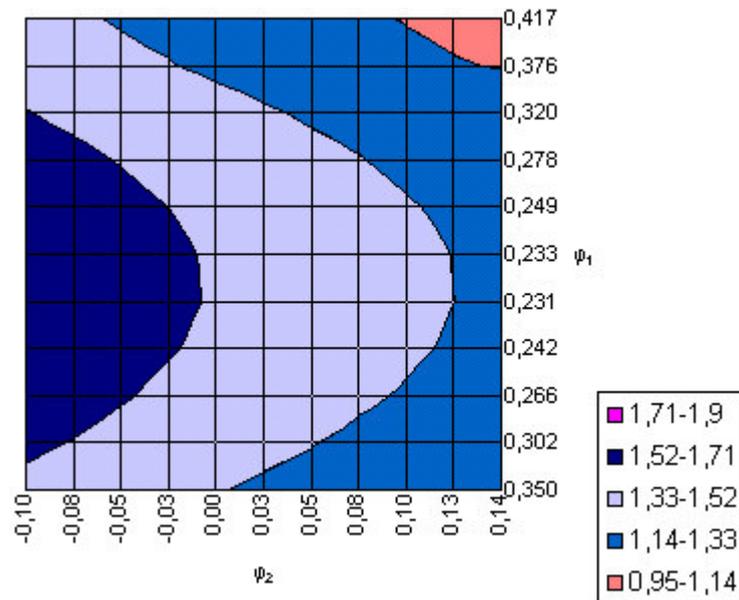


Figura 7.16 – Espessura final em função das deformações principais. Punção Hemisférico.
Espessura inicial 1,9mm. Material Al 1050-O. Unidade em mm.

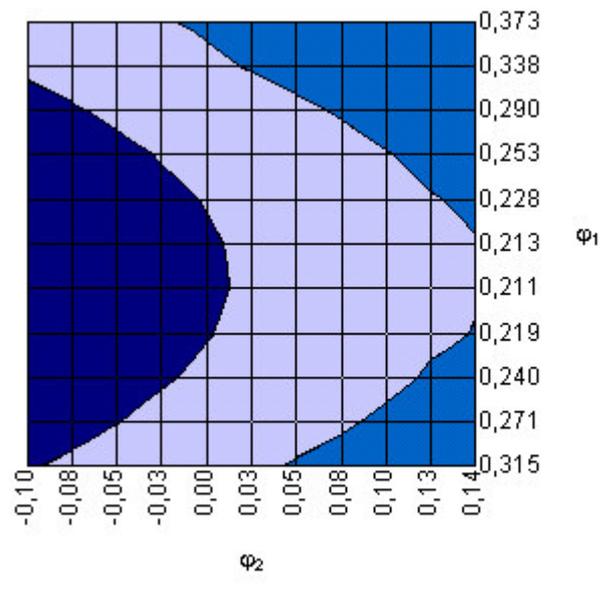


Figura 7.17 – Espessura final em função das deformações principais. Punção Elíptico.
Espessura inicial 1mm. Material Al 1050-O. Unidade em mm.

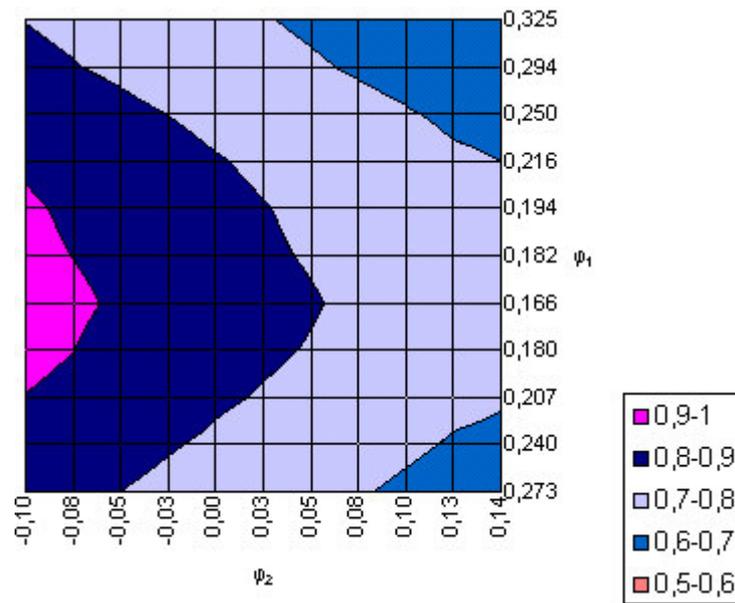


Figura 7.18 – Espessura final em função das deformações principais. Punção Hemisférico.
Espessura inicial 1mm. Material Al 1050-O. Unidade em mm.

Por meio das figuras 7.15 até 7.18 nota-se que para a curva obtida com punção elíptico há uma maior possibilidade de redução de espessura na região de estricção quando comparado com a curva obtida com punção hemisférico.

8. ANALISE DOS RESULTADOS

8.1. Propriedades Mecânicas

Através dos resultados encontrados, ver tabela 7.2, há uma razoável concordância com os encontrados na literatura, ver tabelas 2.2 e 2.3.

A tensão de escoamento média encontrada é 60MPa. Chiaverini, 1986, diz que este valor deveria estar entre 50 e 60MPa, enquanto Spim et al, 2000, relatam que a tensão de escoamento é de 40MPa para alumínio.

A anisotropia média do material é de 0,619. Este valor corresponde a média das três direções (0° , 45° e 90°). Através da tabela 2.2 nota-se que há uma boa concordância entre o valor de anisotropia encontrado e o da literatura (0,62). Já comparando com o valor de anisotropia de 0,58, ver tabela 2.3, há uma diferença 6,3% a mais entre este valor e o determinado neste trabalho.

A equação da curva de escoamento (eq. 7.1) concorda com as curvas encontradas na literatura, ver figura 2.3 e 2.4. Já considerando a média entre as três direções principais de deformação o grau de encruamento médio é 0,231 o que é próximo do valor encontrado na literatura “n” de 0,25 para esta liga Al 1050-O. O coeficiente de resistência médio encontrado é 165MPa e o valor da literatura está entre 140MPa e 170MPa.

Logo, os resultados numéricos das propriedades mecânicas encontrados através do ensaio de tração estão de acordo com os encontrados na literatura.

8.2. Força de Conformação

Ao analisar as forças medidas durante o ensaio Nakazima para o Alumínio 1050-O, ver figura 7.4, é evidente que não há significativa variação das mesmas. Esta análise é feita quando compara-se CP com CP.

Embora, o punção hemisférico tenha uma situação mais severa de estampagem quando comparado com o punção elíptico não há uma significativa influência na força medida, mas como se supunha uma variação na curva limite de conformação ocorreria devido a área inicial de contato entre punção e corpo de prova.

8.3.Caminho das Deformações

As deformações principais foram medidas em três células adjacentes na região de maior interesse, exatamente onde ocorreu a estrição localizada, como recomenda a norma ISO 12004:1997.

Com intuito de demonstrar o caminho das deformações mostram-se na tabela 8.1, para cada corpo de prova, as deformações medidas em células onde ocorreu a estrição localizada e em células exatamente ao lado das mesmas, chamadas células boas, ver figura 8.1. Essas deformações são inseridas num diagrama limite de conformação, ver figura 8.2, onde se torna nítida a distância entre deformações medidas numa célula boa e numa onde ocorreu a estrição.

Tabela 8.1 – Deformações medidas em células “boas” e “ruins”. Material Al 1050-O.

| | Bom | | Estricção | |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | φ_2 | φ_1 | φ_2 | φ_1 |
| CP1 | 0,01 | 0,03 | -0,08 | 0,41 |
| CP2 | 0,03 | 0,04 | -0,04 | 0,32 |
| CP3 | 0,03 | 0,06 | -0,02 | 0,31 |
| CP4 | 0,04 | 0,13 | 0,01 | 0,35 |
| CP5 | 0,05 | 0,08 | 0,04 | 0,29 |
| CP6 | 0,06 | 0,09 | 0,06 | 0,44 |
| CP7 | 0,06 | 0,10 | 0,07 | 0,42 |
| CP8 | 0,09 | 0,15 | 0,13 | 0,47 |

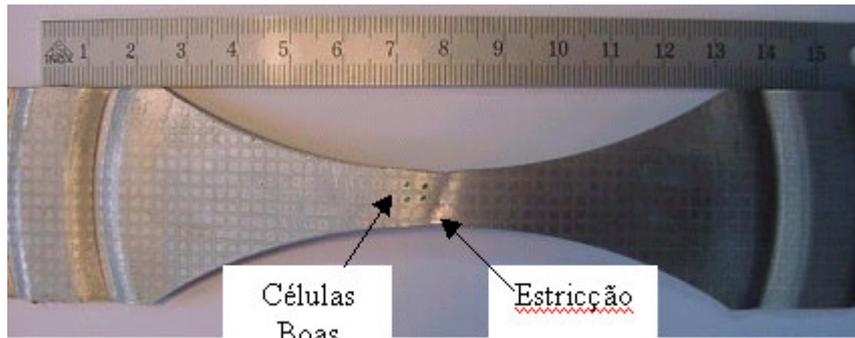


Figura 8.1 – Análise das deformações no CP1.

Para todos os corpos de prova nota-se que as deformações nas células boas são de tração-tração, acredita-se que este fenômeno ocorra por que no início do ensaio predominantemente ocorrem deformações trativas e a medida que aumenta a sollicitação no corpo de prova a deformação continua positiva na direção do comprimento, por ter maior quantidade de material, enquanto as direções da largura e da espessura sejam penalizadas.

Logo, para os corpos de prova com menor largura (CP1, CP2 e CP3) há uma mudança no caminho da deformação enquanto os CP's com maior largura seguem com deformações biaxiais trativas até atingir a estricção, conforme indica a figura 8.2.

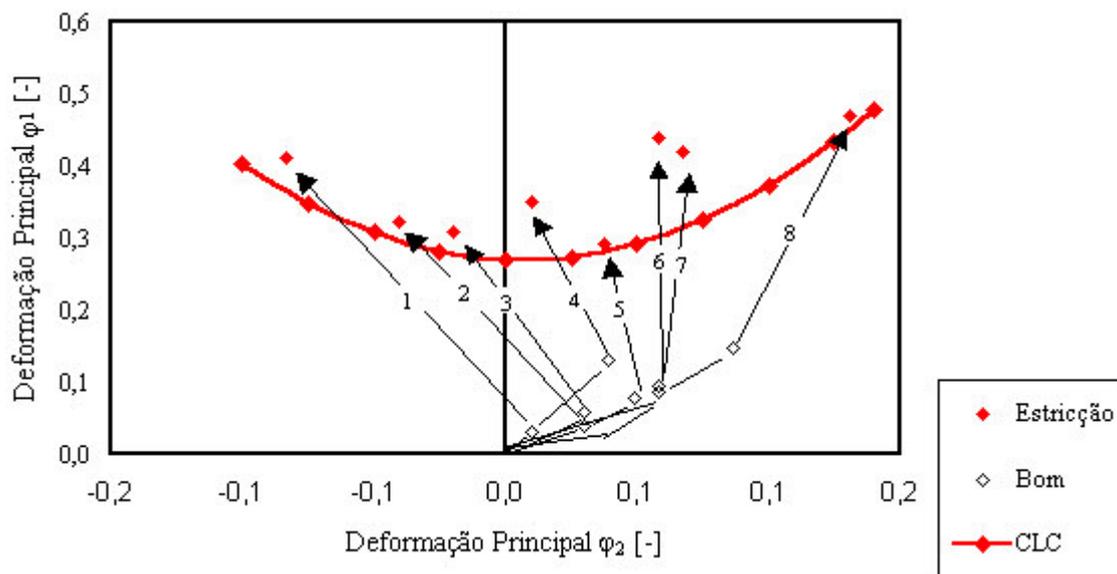


Figura 8.2 – Caminho das deformações para cada CP.

8.4. Curva Limite de Conformação

Nas figuras 8.3 a 8.5 estão postas no mesmo diagrama limite as curvas obtidas para o alumínio 1050-O mostrando a variação que há numa curva limite quando muda-se o punção. Ao comparar estas curvas, visualmente, nota-se que há um aumento na disposição da nuvem de pontos medidos e conseqüentemente um aumento no posicionamento das CLC's.

Para o caso dos ensaios feitos com corpos de prova entalhados (espessura de 1,9mm) o aumento da área sob a curva é obtido integrando as equações 7.2 e 7.3 dentro da faixa de validade ($-0,10 < \varphi_2 < 0,15$) o que é demonstrado a seguir:

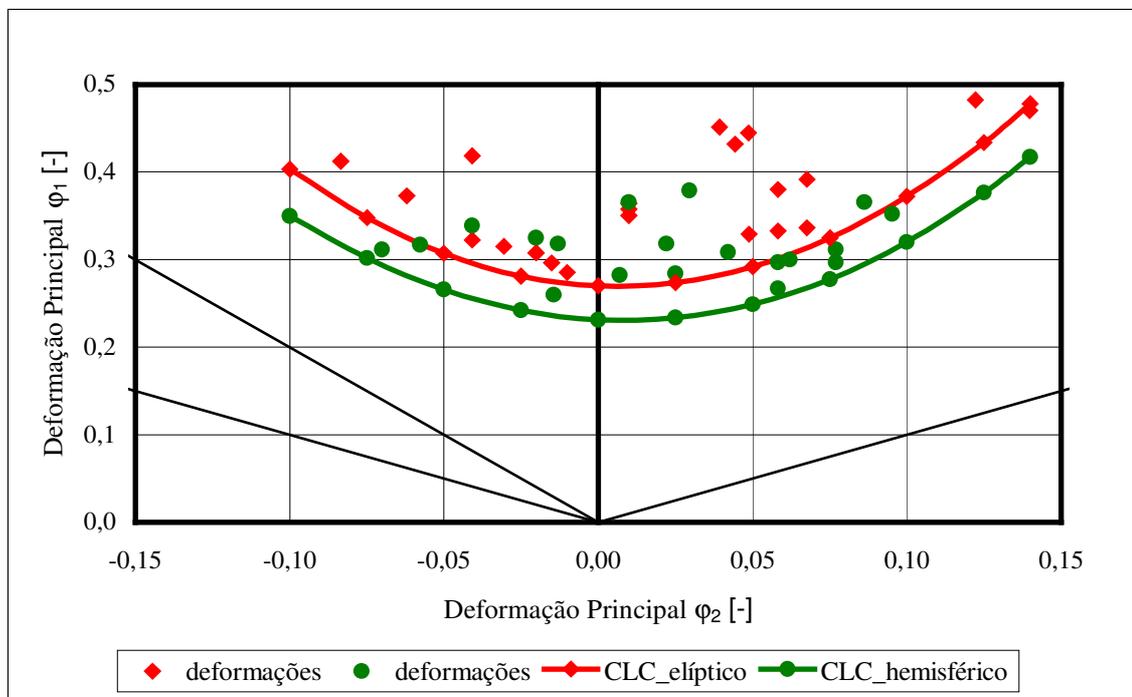


Figura 8.3 – Comparação entre curvas limite. Material Al 1050-O. Espessura 1,9mm

$$A_{elíptico} = \int_{-0,10}^{0,15} (-0,55 \cdot \varphi_2^3 + 11,77 \cdot \varphi_2^2 - 0,15 \cdot \varphi_2 + 0,27) d\varphi_2 \quad (8.1)$$

$$A_{elíptico} = 0,0837 \text{ ua}$$

$$A_{hemisférico} = \int_{-0,10}^{0,15} (2,47 \cdot \varphi_2^3 + 10,38 \cdot \varphi_2^2 - 0,18 \cdot \varphi_2 + 0,23) d\varphi_2 \quad (8.2)$$

$$A_{hemisferico} = 0,0718 \text{ ua}$$

Analisando o resultado destas integrações se obtém as áreas sob as curvas, ver figura 8.3. Há um aumento de 16,59% da área em baixo da curva obtida com ensaio Nakazima simplesmente trocando o punção, em vez de hemisférico um punção elíptico, mantendo os demais parâmetros envolvidos no ensaio constantes (força do prensa chapas, velocidade de avanço do punção, lubrificação...). Aumentar a área sob a curva além de modificar a condição de estampagem significa aumentar a capacidade do material permitir-se deformar numa situação de estampagem.

Fazendo a mesma análise para as curvas obtidas com menor espessura, integrando as equações 7.6 e 7.7, ver figura 8.4, nota-se um aumento de 18,28%.

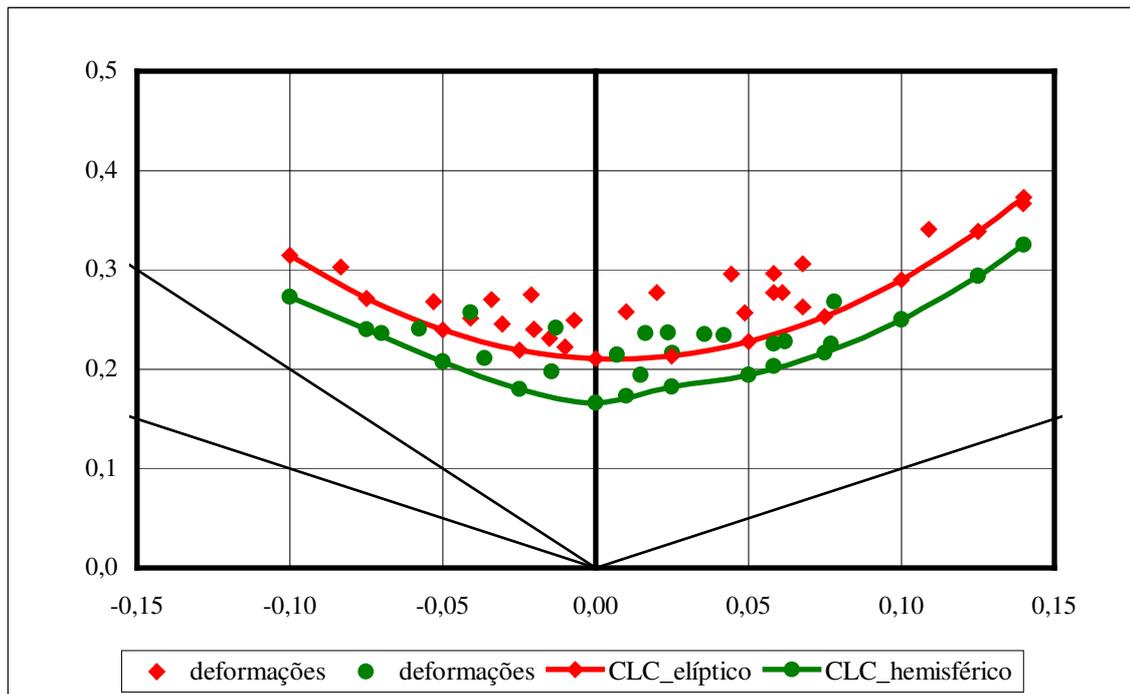


Figura 8.4 – Comparação entre curvas limite. Espessura 1mm. Material Al 1050-O.

$$A_{elíptico} = \int_{-0,10}^{0,15} (-0,43 \cdot \varphi_2^3 + 9,18 \cdot \varphi_2^2 - 0,12 \cdot \varphi_2 + 0,21) d\varphi_2 \quad (8.3)$$

$$A_{elíptico} = 0,0651 \text{ ua}$$

$$A_{hemisférico} = \int_{-0,10}^{0,15} (2,93 \cdot \varphi_2^3 + 8,84 \cdot \varphi_2^2 - 0,10 \cdot \varphi_2 + 0,17) d\varphi_2 \quad (8.4)$$

$$A_{hemisférico} = 0,0550 \text{ ua}$$

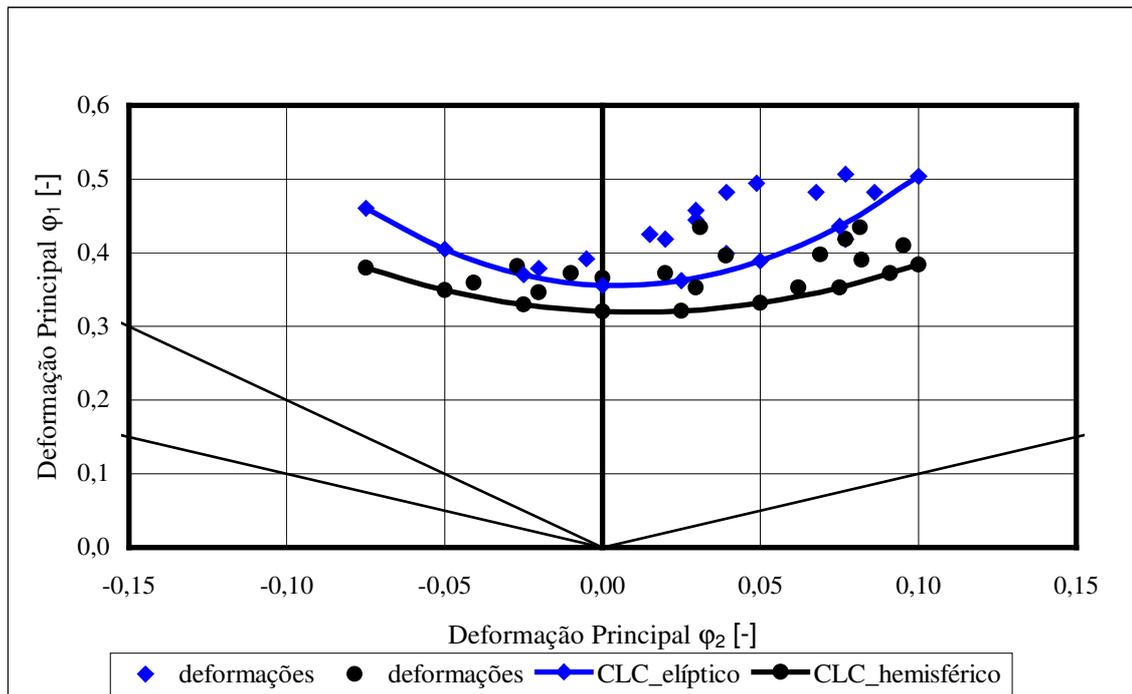


Figura 8.5 – Comparação entre punções.CP's sem entalhe. Material Al 1050-O. Espessura 1,9mm

Já para o caso dos ensaios feitos com corpos de prova em formato de tiras, ver figura 8.5, nota-se nesta figura que as duas curvas obtidas estão posicionadas a cima das curvas na figura 8.3, quando se compara a mesma espessura.

Ao analisar os resultados, acreditou-se que não havia sentido em modificar o formato dos corpos de prova, pois CP's em forma de tira resultavam em CLC's mais para cima. Até então se acreditava que esta modificação, raios nos CP's, era feita somente para forçar a estricção na zona onde a extremidade do punção toca o CP.

Embora esse aumento pareça significativo ao integrar as equações 7.4 e 7.5 dentro da faixa de validade ($-0,05 < \varphi_2 < 0,10$) nota-se que as áreas em baixo da curva são menores devido aos limites de integração serem menores quando comparados com os limites da figura 8.3, isto é, os entalhes produzidos num CP para ensaio Nakazima também tem a função de distribuir mais as deformações no sentido da largura.

$$A_{elíptico} = \int_{-0,05}^{0,10} (-29,71 \cdot \varphi_2^3 + 12,53 \cdot \varphi_2^2 - 0,068 \cdot \varphi_2 + 0,36) d\varphi_2 \quad (8.5)$$

$$A_{elíptico} = 0,0577 \text{ ua}$$

$$A_{hemisférico} = \int_{-0,05}^{0,10} (-11,48 \cdot \varphi_2^3 + 8,81 \cdot \varphi_2^2 - 0,16 \cdot \varphi_2 + 0,33) d\varphi_2 \quad (8.6)$$

$$A_{hemisférico} = 0,0519 \text{ ua}$$

Analisando as áreas sob as respectivas curvas, ver figura 8.5, tem-se, então, um aumento de 11,19% da área em baixo da curva obtida com ensaio Nakazima ao trocar o punção, em vez de hemisférico um punção elíptico, mantendo os demais parâmetros constantes (força do prensa chapas, lubrificação, velocidade de avanço do punção...).

Hennig, 1997, supõe que o punção elipse rasa por ter uma área inicial de contato maior quando comparado com o punção hemisférico teria um menor nível de tensões no início do processo e conseqüentemente distribuiria de modo mais uniforme as deformações. Então, acreditava-se que com a troca de punções as deformações medidas nos corpos de prova e conseqüentemente a CLC estariam posicionadas mais acima quando comparada com uma CLC levantada com punção hemisférico, gerando uma zona própria para conformação maior. Gronostjski, 1980, fez ensaios com punção cilíndrico buscando principalmente criar uma superfície mais plana no corpo de prova após o ensaio facilitando a medição das deformações uma vez que ele utilizou um projetor de perfil. A troca de punção hemisférico por elipse rasa também tinha esse objetivo de manter uma região plana, uma vez que o método para medição das deformações exige superfície plana.

9. CONCLUSÕES

Através da modificação na metodologia proposta por Nakazima - utilizar o punção elíptico - experimentalmente conclui-se que a área abaixo da curva limite de conformação obtida por este método é maior que a área obtida pelo método convencional, com o punção hemisférico, quando o material utilizado é alumínio. Isto significa dizer que trocando o punção há um aumento na estampabilidade do alumínio AA1050-O o que pode ser visto pelas curvas levantadas. Essa diferença é de aproximadamente 12% quando feita com corpos de prova em formato de tiras e cerca de 17% quando feito com CP's entalhados.

$$A_{el\acute{p}tico} > A_{hemisf\acute{e}rico} \quad (9.1)$$

Para o ensaio Nakazima a geometria dos corpos de prova influenciam o posicionamento das deformações quando as mesmas são inseridas no diagrama limite de conformação. Corpos de prova em forma de tiras tem maiores deformações principais φ_1 e menores deformações φ_2 . Corpos de prova com entalhes laterais tem deformações mais homogêneas e φ_1 não é tão grande quando comparado com deformações medidas em cp's entalhados. Embora essa diferença possa parecer significativa, a área abaixo de uma curva limite de conformação, quando gerada utilizando punção elíptico é maior que a obtida por punção hemisférico.

Conclui-se então que o melhor método para determinar uma curva limite de conformação para alumínio é através do ensaio proposto por Nakazima com:

- corpos de prova entalhados;
- utilização de punção elíptico.

Convém salientar que um aumento da área sob a curva trocando o punção só é válido se os demais parâmetros para construção da mesma forem mantidos constantes. Tais parâmetro são o lubrificante, a força do prensa chapas, a velocidade de avanço do punção, o formato dos corpos de prova durante o ensaio.

10. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Faz-se algumas sugestões para possíveis trabalhos posteriores a este:

- sendo uma das principais realizar os mesmos ensaios modificando o material, uma vez que para este trabalho utilizou-se o alumínio como metal base para estudos, acredita-se que validando esta modificação para outros materiais possa-se adaptar o uso do punção elíptico como punção próprio para o ensaio Nakazima;
- propor uma nova configuração de corpos de prova, uma vez que viu-se neste trabalho que somente a presença de entalhes já distribuiu melhor as deformações e acarretou no aumento da área sob a curva;
- utilização de um outro método para medir as deformações;
- a utilização da simulação numérica, aplicando os resultados desta dissertação poderia averiguar ou validar os mesmos através da simulação numérica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABNT NBR-6152 – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas** – 22 paginas.

AHMETOGLU, M. A; ALTAN, T.; KINZEL. Improvement of part quality in stamping by controlling blank-holder force and pressure. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 33, p. 195-214. 1992.

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. L. **Conformação de metais – fundamentos e aplicações**. São Carlos/SP: EESC-USP, 1999. 350p.

ÁVILA, A. F.; VIEIRA, E. L. S. Proposing a better limit diagram prediction: a comparative study. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 141, p. 101-208. 2003.

BRESSAN, J. D. Conformação de chapas anisotrópicas e superplásticas. In: I CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, I., 1993, Porto Alegre, RS. **Anais....** Porto Alegre:Editor Lirio Schaeffer, 1998. 1v., p.151-160.

BLAZYNSKI, T.Z. **Plasticity and Modern Metalforming Technology**. London: Elsevier, 1989. 359p.

BLÜMEL, K.; GERLACH, J.; UFERMANN, P. Biaxial testes to characterize the forming behavior of steel sheets. *Automotive Body Materials*, Alemanha: IBEC, p. 42-46, 1997.

BUTUC, M. C.; BANABIC, D.; ROCHA, A. B.; GRACIO, J. J. The performance of Yld96 and BBC2000 yield functions in forming limit prediction. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 125-126, p. 281-286. 2002.

CHIAVERINI. V. **Tecnologia mecânica – Materiais de Construção Mecânica**. 2ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 388p.

DATE, P. P.; PADMANABHAN, K. A. Deformation behaviour of sheets of three aerospace Al-Alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 112, p. 68-77, jan. 2001.

DOEGE, E.; DRÖEDER, K.; GRIESBACH, B. On the development of new characteristic values for the evaluation of sheet metal formability. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 71, n. 1, p. 152-159, nov. 1997.

EUROPEAN STANDARD. **Tensile Testing of Metallic Materials: DIN EN 10002**. Berlim Colônia, 1991. 19p.

GOODWIN, G. M. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. **La Metallurgia Italiana** n. 8, p. 767-774, 1968.

GRONOSTAJSKI, J.; DOLNY, A. Determination of forming limit curves by means of Marciniak punch. **Memories Scientifiques Revue Metallurgie**. p. 570-578. abril 1980.

GU, L.; TANAKA, A.; TANAKA, K.; NAKAJIMA, K. Prediction of forming limit diagram (FLD) and equivalent work hardening index of sheet metals. *Tetsu-to Hagané*. v. 88, n. 2, p. 88-94, nov. 2002.

HANDBOOK/METAIS & LIGAS - <<http://www.infomet.com.br>> - Acesso em: 05 de setembro de 2003.

HENNIG, R. **Vergleichende Untersuchungen zur Numerischen Simulation des Tiefziehens Nichtzylindrischer Rotationssymmetrischer und Nichtrotationssymmetrischer Teile**. Alemanha, 1997. 131p. Dissertação de Doutorado na Universidade de Dresden.

HENNIG, R. **Ensaios Tecnológicos para Conformação de Chapas**. Porto Alegre; LdTM-UFRGS, nov. 2001. (Curso Interno)

HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. Metal forming – mechanics and metallurgy, 2 ed. USA: Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, 1993. 364p.

IKE, H.; TSUJI, K.; TAKASE, M. In situ observation of a rolling interface and modelling of the surface texturing of rolled sheets. **Wear** v. 225, p. 48-62, 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION for STANDARD. **Metallic Materials – Guidelines** for the Determination of Forming-Limit Diagram: ISO 12004. Suisse, 1997. 7p.

JESWIET, J.; HAGAN, E. Effect of wall angle on Al 3003 strain hardening for parts formed by computer numerical control incremental forming. **Proc. Instn Mech. Engrs Part B: J. Engineering Manufacture**, v. 217, p. 1571-1579, 2003.

JOHNSON, W. **Plasticity for Mechanical Engineers**. London: Van Nostrand Reinhold, 1971. 412 p.

KALUZA, W.; KIM, I.; BLECK, W. Determination of forming limit stress diagram for the characterization of material for sheet metal forming, **Advanced Engineering Materials**, n. 4, p. 191-195, abril 2002.

KEELER, S. P. Predicting forming limits, **Sheet Metal Industries Understanding Sheetmetal Formability** - Part IV, p. 589-593, ago. 1971.

KIM, K. J.; KIM, D.; CHOI, S. H.; CHUNG, K.; SHIN, K. S.; BARLAT, F.; OH, K. H.; YOUNG, J. R. Formability of AA5182/polypropylene/AA5182 sandwich sheets. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 139, p. 1-7. 2003.

KLEIN, L.N.T.; CERVELIN, F. Conformação de Chapas Finas. In; CONGRESSO ANUAL DA ABM, 37, 1982, Rio de Janeiro, RJ **Anais...** Rio de Janeiro: 1982. p

LANGE, K. **Handbook of metals forming**. USA: McGraw-Hill Book Company, 1985. 1232p.

LACHMANN, L. **Beurteilung von Versagensfällen beim Ziehen von Feinblechen durch visioelastische**. Hannover/Alemanha: Formänderungs-und Spannungsanalyse EFB-Arbeitskreissitzung, 1996.

LOBÃO, M. C.; BOLSI, J; FANCELLO, E. A.; SILVA DE OLIVEIRA, C. A. Determinação de curvas limite de conformação por procedimentos experimentais e simulação numérica do processo de estampagem. In: VI CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 2003, Porto Alegre, Rs. **Anais...**Porto Alegre: Gráfica e Editora Brasul LTDA. 1v., p. 50-60.

METALS HANDBOOK. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Mechanical Testing**. 10 ed. v. 2, 1990. p 12-20.

MOON, Y. H.; KANG, Y. K.; PARK, J. W.; GRONG, S. R. Tool temperature control to increase the deep drawability of aluminum 1050 sheet, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 41, p. 1283-1294, jan. 2001.

NAKAZIMA, K.; KIKUMA,T.; HASUKA,K. Study of the formability of steel sheets, **Yawata Technical Report**, v. 264, p. 111-124, 1968.

NOVOTNY, S.; HEIN, P. Hydroforming of sheet metal pairs from aluminium alloys, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 115, p. 65-69, april 2001.

RAGAB, A. R.; SALEH, CH.; ZAAFARANI, N. N. Forming limit diagram for kinematically hardened voided sheet metals, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 128, p. 302-312, out. 2002.

REES, D. W. A. Factors influencing FLD of automotive sheet metal, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, p. 1-8, 2001.

RENÓ, R. T. **Conformabilidade e testura de chapas finas a frio de aço acalmado ao alumínio**. São Paulo, 1985. 207p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP.

RICHTER, A. Comparação dos resultados de diferentes testes para determinação da curva limite de conformação. In: VI CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 2003, Porto Alegre, Rs. **Anais...**Porto Alegre: Gráfica e Editora Brasul LTDA. 1v., p. 24-29.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Brasil: Imprensa Livre, 1999. 167p.

SHAKERI, M.; SADOUGH, A.; DARIANI, B.M. Effect of pre-straining and grain size on the limit strains in sheet metal forming. **Proc Instn Mech Engrs**, v. 214, p. 821-827, fev. 2000

SHIM, M. S.; PARK, J. J. The formability of aluminum sheet in incremental forming, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, p 654-658, 2001.

SILVEIRA NETTO, S. E., MALVEIRA, N., CRIVELLARO, R. S., BORSOI, C. A., SCHAEFFER, L. Determinação da Curva Limite de Conformação para Alumínio Aeronáutico 6061-O In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2003, Uberlândia, MG. **Anais...** Disponível em CD.

SILVEIRA NETTO, S. E., MALVEIRA, N., CRIVELLARO, R., BORSOI, C. A., SCHAEFFER, L. Desenvolvimento de Componentes de Ligas Leves Empregando Curva Limite de Conformação In: V CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 2002, Gramado, RS. **Anais...** Porto Alegre: Gráfica e Editora Brasil LDTA. v.1. p.56-66.

SPIM, J.A.; GARCIA, A.; SANTOS, C. **Ensaaios dos materiais**. Brasil: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2000. 247p.

SPIM, J.A.; SANTOS, C. **Metalografia**. Porto Alegre; LAFUN-UFRGS, 2002. 143p (Caderno Técnico)

SPISAK, E.; STACHOWICZ, F. Deformation analysis of large-sized autobody panels, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 53, p 817-826, 1995.

VOLLES, R.; BERNRATH, G.; KOPP, R. Flow stress measurements for sheet material by multi-layer compression tests. In: IV CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, I., 2000, Porto Alegre, RS. **Anais....** Porto Alegre:Editor Lirio Schaeffer, 2000. 1v., p.64-71.

WILLIS, J. **Deep Drawing** . London. Butterworths Scientific Publications, 1954. 134p.

YOSHIDA, F.; HINO, R. Forming limit of stainless steel-clad aluminium sheets under plane stress condition, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 63, p 66-71, 1997.