

EDOUARD HASSIB SROUR JUNIOR

**DETERMINAÇÃO DO GRAU DE CONFORMABILIDADE DE CHAPA DE
AÇO PARA SUPORTE DE COLUNA DE DIREÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE
SIMILAR NACIONAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Paulo Victor Prestes Marcondes

Curitiba
Novembro, 2002

TERMO DE APROVAÇÃO

EDOUARD HASSIB SROUR JUNIOR

DETERMINAÇÃO DO GRAU DE CONFORMABILIDADE DE CHAPA DE AÇO
PARA SUPORTE DE COLUNA DE DIREÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE
SIMILAR NACIONAL

Dissertação aprovada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica, Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná, pela seguinte
banca examinadora:

Orientador: Prof. Paulo Victor Prestes Marcondes
Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR

Banca Examinadora:

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira
Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC

Prof. Silvio Francisco Brunatto
Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR

***Aos meus pais,
Edouard H. Srour (in memoriam)
e Córdula Srour,
Márcia, Amanda e Nicolas***

AGRADECIMENTOS

- À Deus, que me deu forças para persistir;
- À minha família, pela paciência e incentivo;
- Ao Prof. Paulo Victor Prestes Marcondes, pela orientação, amizade, compreensão e por acreditar na realização deste;
- Ao aluno Ravilson Chemin Filho, pela ajuda na execução dos trabalhos experimentais;
- Ao aluno Erik Jackson de Camargo, pela ajuda no ensaio de dobramento;
- À empresa Styner & Bienz, pela sua colaboração e amostras de chapas para realização dos ensaios;
- À empresa Brasmetal, pelas amostras de matéria-prima nacional;
- À Usiminas, pelo fornecimento de literatura específica;
- À empresa Comp, pela execução dos cortes a laser;
- A todos os companheiros do Laboratório de Mecânica da UFPR.

RESUMO

A coluna de direção é um componente de alta responsabilidade e é considerado de extrema segurança, pois dela, dependem vidas humanas, sendo todos os seus componentes, caracterizados como de alta performance.

Um dos principais itens que compõe este produto é o chamado suporte de coluna de direção. Trata-se de um componente produzido a partir de uma chapa de aço que confere sustentação ao conjunto no “cockpit” do automóvel.

Neste trabalho, foram feitos ensaios em máquina de tração para determinação do coeficiente de anisotropia (R de Lankford) e coeficiente de encruamento n , além da determinação da Curva Limite Conformação (CLC) para comparação e determinação de matéria prima nacional similar.

A anisotropia destaca-se pelo fato da chapa de aço deformar-se de forma distinta nas várias direções de laminação. As propriedades mecânicas de um material trabalhado mecanicamente podem variar conforme a direção em que se retira o corpo de prova para ensaio. A anisotropia aparece por causa da orientação preferencial do metal após uma grande deformação por trabalho mecânico (anisotropia cristalográfica) ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios, segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada por causa também de trabalho mecânico.

Já com relação às Curvas Limite de Conformação pode-se definir com sendo um critério de falha empírico onde se medem as deformações maior e menor (ϵ_1) e (ϵ_2) que podem ser aplicadas à um determinado material a fim de avaliar a severidade das deformações do material submetido a processos de conformação por estiramento, estampagem profunda, e tração.

A matéria-prima base para elaboração do estudo foi o material ST4 LG (DIN 1624) sendo seu correspondente nacional o material G4 RL (NBR 5007).

Após a identificação das propriedades R e n e determinação da curva CLC foi avaliada a possibilidade de se obter resultados próximos ao material importado com o material nacional.

Como resultado pode-se destacar que o comportamento do material nacional apresenta características que se entende serem suficientes para uma substituição do material importado. Este fato se confirmou na prática, e, durante a elaboração deste estudo, partiu-se para a utilização do material nacional como normal de série.

ABSTRACT

The steering column is a high responsibility component and it is considered as safety equipment, because life depends of its performance and, in this matter, all components that are used to produce the steering column are consequently called of high performance.

One of the main items that make part of the steering column is the support. It is a component made of steel metal sheet that sustain the assembly in the vehicle cockpit.

It will be made tests in the stress tensile machine to determine the anisotropy coefficient (Lankford R) and the work hardening coefficient n , besides of this, the determination of the Forming Limit Diagrams (FLD's) to compare and specify the similar local raw material in substitution to the imported one.

Anisotropy is defined by the different proprieties values in the different directions, where we can emphasize the distinct deformation of the blank in the different rolling direction. The mechanical proprieties of the material can vary according to the specimen rolling direction. The anisotropy appears because of the metal grains orientation after a high mechanical deformation (crystallographic anisotropy) or because the inclusion arrangement blanks, segregation or a second phase caused by mechanical work.

We can define the Forming Limit Diagrams as empiric failed criterion where the maximum and minimum principal strain (ϵ_1) e (ϵ_2) are evaluated for the verification of the deformation severity of the material that was submitted to forming processes like, stretching, drawing and tensile stress.

The based raw material for this study is the ST4 LG (DIN 1624) and the related local material G4 RL (NBR 5007).

After proprieties R and n identification and FLD determination it was evaluated the similar local raw material that allow us to get results near to the imported raw material.

As a result, we can say that the local raw material has enough characteristics to substitute the imported raw material. This was confirmed in the practical experiences, as during this study the raw material was localized.

LISTA DE FIGURAS

Figura2.1 -	Tensões e Deformações nas várias regiões da peça.....	24
Figura2.2 -	Curva tensão x deformação teórica para dois valores de encruamento n	27
Figura2.3 -	Gráfico tensão x deformação de um metal ou liga metálica.....	29
Figura2.4 -	Diagrama Tensão x Deformação.....	33
Figura2.5 -	Efeito de n na forma da curva $s = K\varepsilon^n$	33
Figura2.6 -	Diagrama log-log de s x n	34
Figura2.7 -	Construção de Considère.....	34
Figura2.8 -	Curva teórica mostrando os limites de escoamento superior e inferior.....	36
Figura2.9 -	A curva tensão x deformação verdadeira.....	40
Figura2.10 -	Cálculo do valor de n	40
Figura2.11 -	Esquema do modo de medir o valor R de Lankford.....	42
Figura2.12 -	Método de amostragem para obtenção de R médio e ΔR	43
Figura2.13 -	Deformação na espessura versus deformação na largura.....	44
Figura2.14 -	Anisotropia normal para vários materiais x RCD.....	46
Figura3.1 -	Classificação dos testes de acordo com o modo de deformação...	51
Figura3.2 -	Dispositivo para execução do ensaio de Erichsen.....	52
Figura3.3 -	Corte do dispositivo para execução do Ensaio de Swift.....	53
Figura3.4 -	Ferramentas para o Teste CCV e forma da peça rompida após o Teste.....	55
Figura3.5 -	Curva limite de conformação esquemática.....	57
Figura3.6 -	Curva limite de conformação de acordo com o método do IRSID...	60
Figura3.7 -	Curva limite de conformação. Método Nakajima.....	61

Figura3.8 -	Medida da rede de círculos para obtenção das deformações principais.....	63
Figura3.9 -	CLC para diferentes materiais.....	63
Figura3.10 -	CLC com limite superior de ruptura e inferior de segurança.....	65
Figura3.11 -	Influência do tamanho das inclusões no nível da CLC para um aço qualidade estampagem extra profunda.....	66
Figura3.12 -	Nível da CLC para diferentes aços.....	66
Figura3.13 -	Mudanças da CLC, obtida para uma trajetória linear (curva central), para uma onde as deformações preliminares são inicialmente de embutimento (curva à esquerda) ou de estiramento (curva à direita), seguidas por diferentes razões das deformações no plano da chapa.....	67
Figura3.14 -	Diferentes CLC's obtidas por diferentes trajetórias de deformação.....	68
Figura3.15 -	Efeito do trabalho a frio no nível da curva limite e no coeficiente de encruamento n	69
Figura3.16 -	Efeito do expoente de encruamento n e espessura da chapa na curva limite de conformação para aço baixo carbono.....	69
Figura3.17 -	Influência do diâmetro dos círculos da malha de marcação eletrolítica sobre a medida das deformações principais da CLC.....	70
Figura3.18 -	CLC intrínseca para um aço doce acalmado ao alumínio.....	71
Figura3.19 -	Variação da CLC em função do tamanho do círculo de medida.....	71
Figura4.1 -	Corpo de prova para o ensaio de tração.....	81
Figura4.2 -	Prensa Hidráulica onde serão realizados os ensaios de embutimento.....	85
Figura4.3 -	Ferramenta utilizada no ensaio de Nakajima.....	88
Figura4.4 -	Corpos de prova para ensaio Nakajima.....	89
Figura4.5 -	Corpos de prova utilizados nos ensaios Nakajima.....	90
Figura4.6 -	Tipos de malhas.....	90
Figura4.7 -	Tela utilizada para impressão da malha de círculos.....	91
Figura4.8 -	Prensa hidráulica e seus componentes.....	93
Figura4.9 -	Elipses formadas após a deformação do material.....	94

Figura4.10 -	Corpos de prova ensaiados.....	94
Figura5.1 -	Região superficial da chapa importada e nacional.....	96
Figura5.2 -	Seção longitudinal da chapa importada.....	97
Figura5.3 -	Seção longitudinal da chapa nacional.....	97
Figura5.4 -	Máquina de tração e computador.....	98
Figura5.5 -	Corpos de prova material nacional ensaiado.....	101
Figura5.6 -	Corpos de prova material importado ensaiado.....	101
Figura5.7 -	Curva CLC material importado x nacional (região posterior à fratura).....	103
Figura5.8 -	Curva CLC material importado x nacional (região de início da fratura).....	104
Figura5.9 -	Curva CLC material importado x nacional (região acima e abaixo da fratura).....	105
Figura5.10 -	Faixa de deformações válidas para o aço nacional.....	106
Figura5.11 -	Faixa de deformações válidas para o aço importado.....	106

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela4.1 -	Dimensões em mm para o corpo de prova de tração.....	80
Tabela5.1 -	Comparativo das propriedades <i>LR</i> , <i>LE</i> , <i>AL</i> e <i>DOB</i>	99
Tabela5.2 -	Comparativo das propriedades <i>R</i> e <i>n</i>	99

LISTA DE SÍMBOLOS

R	coeficiente de anisotropia de Lankford
\bar{R}	coeficiente de anisotropia normal
ϵ	deformação verdadeira
ϵ_w	deformação verdadeira na largura
ϵ_t	deformação verdadeira na espessura
ϵ_L	deformação verdadeira longitudinal
ϵ_u	deformação verdadeira no ponto de carga máxima
ϵ_{ra}	deformação radial
ϵ_e	deformação no escoamento
ϵ_θ	deformação tangencial
ϵ_1	maior deformação verdadeira
ϵ_2	menor deformação verdadeira
w_0	largura inicial
w_f	largura final
t_0	espessura inicial
t_f	espessura final
l_0	comprimento inicial
l_f	comprimento final
R	raio de curvatura
K	coeficiente de resistência
n	coeficiente de encruamento por deformação
s	tensão verdadeira
s_θ	tensão de compressão tangencial
s_r	limite de resistência

S_f	tensão de ruptura
S_o	tensão convencional
S_{ra}	tensão radial
S_n	tensão normal
S_e	limite de escoamento
e	deformação convencional
e_u	deformação convencional no ponto de carga máxima
e_{10}	deformação convencional p/ 10% de deformação
e_{1F} e e_{2F}	deformação convencional entre as fraturas e os pontos da elipse na direção de maior deformação
e_1	maior deformação convencional
e_2	menor deformação convencional
P	carga
P_u	carga máxima
P_{10}	carga p/ 10% de deformação
P_a	carga p/ 0.2% de deformação
P_f	carga de ruptura
P_b	carga máxima
A	área da secção transversal
A_o	Área inicial
Al	Alongamento total
ΔL	variação de comprimento
ΔR	anisotropia planar
\ln	logaritmo natural
E	módulo de elasticidade ou módulo de Young
ϕ	deformação na direção da largura
e	base dos logaritmos neperianos
M	coeficiente de atrito
Par	pressão no antirruga
S	spline cúbica
V_f	volume final
V_o	volume inicial

CCV	Conical Cup Value
D_o	diâmetro inicial do corpo de prova
D_1	diâmetro maior final da elipse
D_2	diâmetro menor final da elipse
D_{1F} e D_{2F}	comprimentos entre as fraturas e os pontos da elipse na direção de maior deformação
D_m	diâmetro médio do corpo de prova
$D_{máximo}$	diâmetro máximo do corpo de prova
$D_{mínimo}$	diâmetro mínimo do corpo de prova
d_p	diâmetro do punção
r_o	raio do corpo de prova
r_d	raio da matriz
r_p	raio do punção
X	força restritiva do corpo de prova
FLD	Forming Limit Diagram (Curva Limite Conformação)
RCD	Razão crítica dos diâmetros
LDR	Limit drawing ratio
IE	Índice de embutimento

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	17
PROPRIEDADES MECÂNICAS FUNDAMENTAIS.....	22
2.1 Generalidades.....	22
2.2 O ensaio de tração e as relações com as propriedades fundamentais	29
2.3 A tensão de escoamento	34
2.4 Dureza.....	37
2.5 Coeficiente de encruamento	39
2.6 A anisotropia e o <i>R</i> de Lankford	41
TESTES SIMULATIVOS PRÁTICOS	48
3.1 Introdução	48
3.2 Teste de estiramento	51
3.3 Testes de estampagem	52
3.4 Testes combinados.....	54
3.5 Teste de dobramento.....	55
3.6 Curvas limite de conformação	56
3.7 Impressão das linhas de deformação.....	74
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	77
4.1 Generalidades.....	77
4.2 Materiais utilizados.....	77
4.3 Ensaio metalográfico.....	78
4.4 Realização do ensaio de tração para determinação das propriedades fundamentais.....	80
4.4.1 Preparação dos corpos de prova	80
4.4.2 Preparação da máquina de tração.....	81
4.4.3 Ensaio de tração.....	82

4.5 Ensaio de dobramento	84
4.6 Ensaio simulativo prático para levantamento da curva CLC	84
4.6.1 Projeto da ferramenta para os ensaios de embutimento	84
4.6.2 Preparação dos corpos de prova	89
4.6.3 Preparação da prensa de ensaio	92
4.6.4 Ensaio de conformação	94
RESULTADOS E DISCUSSÕES	96
5.1 Ensaio metalográfico	96
5.2 Ensaio de tração	98
5.3 Ensaio de dobramento	101
5.4 Ensaio de Nakajima	102
CONCLUSÃO	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE A – O Método “Spline”	113
ANEXO A – Relatórios ensaios de tração	116
ANEXO B – Desenhos ferramenta ensaio Nakajima	122
ANEXO C – Curvas CLC	126
ANEXO D – O Algoritmo “Spline”	128

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O suporte de coluna de direção é um item em chapa de aço conformado pelo processo de prensagem e que requer, em virtude de seu alto volume de produção, uma alta produtividade e performance de qualidade.

Além disso, por causa de sua exigência quanto à segurança procura-se evitar pontos de solda, substituindo-se estes por dobras a 180° e rebiteagem com o próprio material da chapa (“ponto tox”).

A conformabilidade do material nesta aplicação é de grande importância, pois o item sofre grandes transformações durante o processo produtivo e deve resistir a todo e qualquer defeito como trincas, fissuras e rugas.

Nos últimos 50 anos foram desenvolvidos um grande número de testes de laboratório visando avaliar, a priori, o desempenho do material em escala industrial. A maioria deles esbarra sempre na dificuldade do processo de conformação industrial ser complexo e um teste de laboratório, além do efeito de escala – uma vez que em laboratório se utilizam equipamentos de pequeno porte – avalia apenas uma característica do material e não pode prever o comportamento do material em condições diferentes daquela característica.

Em geral, o melhor procedimento é a realização de mais de um teste e comparar os resultados de laboratório das curvas limite de conformação (CLC) com as deformações sofridas pelo material processado em escala industrial.

Conforme orientação do fascículo de informação técnica nr. 6 da Usiminas, (1999), pode-se classificar a avaliação do material em escala de laboratório em três grupos distintos:

- a) Testes simulativos – visam simular em escala de laboratório as deformações que o material sofrerá em escala industrial.
- b) Testes relativos às propriedades básicas do material – em geral são obtidas a partir do teste de tração.
- c) Avaliação da “severidade” de deformação – É feita comparando curvas limite de conformação (CLC) realizadas em laboratório com os resultados obtidos por experiência em escala industrial, através da marcação dos corpos de prova com redes de círculos.

Neste trabalho, pela obtenção dos índices de R e n e construção da curva limite de conformação (CLC), procurou-se avaliar a performance do material importado comparativamente ao material nacional visando a substituição/nacionalização da matéria-prima importada pela nacional.

O trabalho foi dividido em dois grandes grupos de testes:

- Testes relativos às propriedades fundamentais dos materiais.

Foram levantadas informações referentes à caracterização dos materiais em escala de laboratório utilizando testes relativos as propriedades microestruturais e mecânicas básicas do material como Limite de escoamento, Limite de Resistência, Alongamento, Dureza, e Coeficiente de Encruamento n (coeficiente de endurecimento por deformação) e R de Lankford (anisotropia de deformação).

- Testes simulativos práticos.

Procurou-se levantar informações, em escala de laboratório, referentes às deformações que o material sofre em escala industrial. Foram avaliadas as características com relação a embutibilidade/ estiramento através de testes de dobramento e levantamento de curvas limite de conformação que possibilitaram a avaliação da severidade de deformação pela comparação das curvas obtidas em laboratório com os resultados obtidos em escala industrial.

Através do índice R de Lankford pôde-se avaliar indiretamente a conformabilidade das chapas de aço. O índice de anisotropia R é definido pela deformação verdadeira na largura, ε_w , dividida pela deformação verdadeira na

espessura, ε_e , do corpo de prova. Foram medidas as larguras e a espessura em diversos pontos da parte útil do corpo de prova antes do ensaio e depois de ser atingida a tensão específica a 18% de deformação. Com os valores obtidos, calcularam-se as deformações atingidas ε_w e ε_e e colocou-se essas deformações num gráfico, tendo ε_w em ordenadas e ε_e em abscissas.

A curva real para o gráfico *tensão x deformação* pode ser aproximadamente representada pela expressão exponencial do tipo:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.1)$$

onde, K e n são constantes para cada material, denominados respectivamente “coeficiente de resistência” e “coeficiente de encruamento”, que descrevem completamente a forma da curva real. Embora essas grandezas sejam consideradas como constantes, elas podem variar conforme o processo de fabricação do material. K mede a tensão real quando $\varepsilon = 1,0$, tendo, portanto, dimensão de tensão. Seu valor fornece alguma indicação do nível de resistência do material. O valor de n , porém, é considerado como uma característica de grande importância, pois ele fornece a medida da capacidade ou a habilidade do material poder distribuir a deformação uniformemente, principalmente para o estudo dos aços para estampagem. Quanto maior o valor de n de um material, maior a inclinação será a curva real desse material e mais uniforme a distribuição das deformações na presença de um gradiente de tensões; e em consequência, para materiais com valores baixos de n , sua curva será mais horizontal.

A conformabilidade pode ser radicalmente influenciada por vários fatores. Esses fatores podem representar a diferença entre sucesso e fracasso nas operações de estampagem.

Conforme descrito por Keeler, (1968), o primeiro destes fatores é a direcionalidade. Os valores das propriedades das chapas de aço variam com a direção de laminação. Valores das propriedades transversais à direção de laminação são diferentes daquelas paralelas à direção de laminação. Este fenômeno chamado anisotropia, é relacionado à estrutura cristalográfica básica do metal, que influencia fortemente a forma da curva tensão-deformação, e, portanto o escoamento e propriedades de tensão da chapa.

Um segundo tipo de anisotropia – textura mecânica – é criado quando um material é laminado a partir de um lingote em chapa. Inclusões, segregações, porosidade e outras imperfeições são todas orientadas e alongadas paralelamente à direção de laminação.

Na presença desta anisotropia, a máxima força e a maior deformação sem falha são possíveis quando a máxima deformação (ou tensão) ocorre ao longo da direção de laminação.

Uma condição que pode causar problemas é quando a tensão de escoamento na tração não é igual à compressão. Esta condição é o chamado efeito Bauschinger, e ocorre quando uma peça de metal é trabalhada em uma direção (exemplo, compressão) e então submetida à tração em uma direção oposta.

A velocidade de deformação tem um grande efeito na conformabilidade do metal. Muitas vezes um determinado material pode ter uma estampabilidade satisfatória em baixas velocidades de trabalho e ser completamente insatisfatório em altas velocidades. O oposto também pode acontecer. As características do lubrificante também mudam com a velocidade e é um outro fator que pode influenciar a conformabilidade do material.

Variações nas propriedades do material entre os diferentes lotes de produção e mesmo de bobina para bobina do mesmo lote de produção, também precisam ser consideradas. O problema é quantos testes precisam ser feitos e quais pontos na bobina precisam ser testados para obter as propriedades típicas do material.

Na estampagem profunda, um copo de parede paralela é criado de uma chapa em forma de blank (chapa de aço nas dimensões de projeto). O blank pode ser circular ou retangular, ou de uma geometria mais complexa. Este blank é conformado dentro de uma cavidade de ferramenta. A deformação é restrita nas áreas da lateral do blank e nenhuma deformação ocorre abaixo do fundo do punção. Como o punção forma um copo, a quantidade de material nas laterais diminui.

No capítulo 2 é apresentado um descritivo das propriedades mecânicas fundamentais enquanto no capítulo 3 encontram-se informações sobre alguns testes simulativos práticos.

No capítulo 4 é relatado o procedimento experimental adotado e no capítulo 5 os resultados e discussões.

Por fim, no capítulo 6 apresenta-se a conclusão e no capítulo 7 as referências bibliográficas citadas no trabalho.

No apêndice encontra-se a base teórica para o cálculo da curva “Spline”, utilizada para traçagem das curvas CLC’s e nos anexos encontram-se: os relatórios dos ensaios de tração, o projeto da ferramenta para ensaio de Nakajima, as curvas CLC’s resultantes e o algoritmo “Spline” em linguagem de programação Fortran, utilizado na definição das curvas CLC’s.

CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES MECÂNICAS FUNDAMENTAIS

2.1 Generalidades

O conceito de “conformabilidade” é baseado em primeiro lugar na ruptura. Isto quer dizer que um material com boas características de conformabilidade não deve romper durante a conformação. Mas não é apenas este o único fator. Em segundo lugar vem o conceito de rigidez de forma (ocorrência de efeito de mola – “spring back” - rigidez do produto acabado – “oil canning”, “drumming” e “looseness”), e também a ocorrência de rugas.

Conforme descrito no fascículo de informação técnica nr. 6 da Usiminas, (1999), para visualizar os modos básicos de conformação deve-se analisar as tensões e deformações envolvidas no processo, de acordo com a figura 2.1. As tensões principais desenvolvidas situam-se no plano da chapa ($s_1 \equiv s_{ra}$, radial e $s_3 \equiv s_{\theta}$, circunferencial, enquanto $s_2 \equiv s_n \equiv 0$, normal ao plano da chapa). Estas tensões (s_1 e s_3) podem ser de compressão ou de tração dependendo da região, da geometria (forma) das ferramentas e de outras condições.

Para obter-se uma peça com formato tridimensional a partir de uma chapa (corpo de prova) plana o material tem que ser submetido a esforços de dobramento. Isto se dá no “ombro” da matriz e também no “nariz” do punção. Portanto a peça é conformada inicialmente com tensão de compressão na direção circunferencial ($s_3 \equiv s_{\theta} =$ compressão) e de tração na direção radial ($s_1 \equiv s_{ra} =$ tração) na região do

flange, figura 2.1. Estes esforços fazem com que o flange diminua de diâmetro, se dobre no raio de curvatura da matriz e se mova para dentro da matriz formando a parte da peça que consiste a parede lateral. Pode-se denominar este modo de deformação de “redução” ou “encolhimento” do flange. Na parede lateral, os esforços são de tração na direção radial ($s_1 \equiv s_{ra} = \text{tração}$) e nulos na direção circunferencial ($s_3 \equiv s_\theta = 0$). Nesta situação o material se deforma apenas segundo a direção radial e na direção da espessura. Daí a expressão “estado plano de deformação” que significa deformação apenas em duas direções ($\epsilon_{ra}, \epsilon_t \neq 0; \epsilon_\theta = 0$). Se por alguma razão a resistência à deformação por compressão no flange for muito grande (estas razões são: pressão no antirruga muito elevada, relação entre diâmetro de recorte do corpo de prova e do punção muito grande, raio de curvatura da matriz pequeno e do punção muito grande, etc.) o material da região do flange para de fluir para dentro da matriz e com o aumento da força aplicada no punção toda deformação ocorre apenas na região situada na cabeça do punção. Tem-se então esforços biaxiais de tração [$(s_1 = s_{ra}, s_3 \equiv s_\theta) = \text{tração}$] e o material compreendido na região situada sob a cabeça do punção irá diminuindo de espessura (porque o volume durante a deformação plástica é constante e sendo $\epsilon_{ra}, \epsilon_\theta > 0$; como $\epsilon_{ra} + \epsilon_\theta + \epsilon_t = 0$, logo $\epsilon_t < 0$) até atingir a instabilidade plástica e se romper. Este modo de deformação se denomina estiramento do flange. (Denomina-se “flange” a região do corpo de prova ou da peça presa entre o antirruga e a face horizontal da matriz e também a região situada sob o “nariz” do punção, em oposição à parede lateral que em geral forma um ângulo próximo de 90° com estas duas regiões).

Portanto do ponto de vista das deformações pode-se classificar três modos “básicos”:

- a) Encolhimento do flange
- b) Dobramento
- c) Estiramento do flange.

A região da parede (estado plano de deformação) geralmente se deforma pouco e a fratura nesta região ocorre apenas em situações especiais.

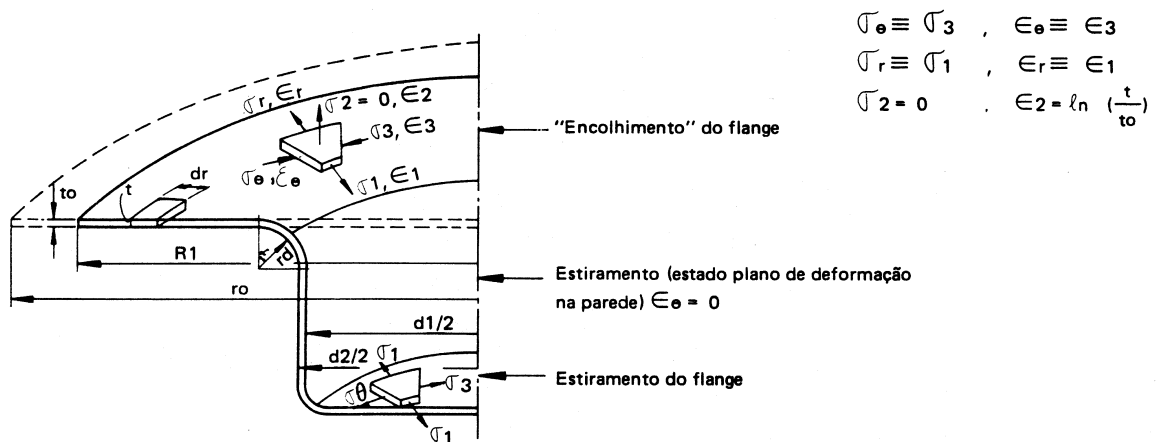


Figura 2.1 – Tensões e Deformações nas várias regiões da peça - Usiminas, 1999.

A partir dos modos básicos de deformação, do formato da ferramenta e do fluxo de material durante a conformação, pode-se agora classificar os modos básicos de conformação:

- Estampagem profunda – combinação de encolhimento do flange com dobramento.
- Estiramento puro – apenas estiramento do flange.
- Conformação combinada – encolhimento do flange + estiramento do flange.
- Dobrimento – apenas dobramento.
- Flangeamento – dobramento + estiramento do flange (sob estado plano de deformação – $\epsilon_{ra} = 0$)

Segundo Keeler, (1968), um bom entendimento da conformabilidade dos metais é essencial para a produção de estampados de qualidade. Não há qualquer índice que permita que a conformação de um material específico seja previsível para todas as condições de produção ou todos os estampos. Um material que é facilmente conformável para um determinado design pode vir a falhar quando este é usado para um estampado de uma configuração diferente.

No "try out" (teste) de ferramentas é muitas vezes necessário mudar para um material mais conformável, modificar o design da ferramenta ou até mesmo modificar o design do estampado de maneira a alcançar o sucesso em um novo estampado.

Mesmo após dezenas de testes feitos na fase de “try out” não existe total garantia de que o comportamento do material permanecerá igual e estável durante a estampagem em produção.

Velocidade maior, ferramentas desalinhadas, deficiência na lubrificação e variação das propriedades da matéria-prima podem ser algumas das razões para que isto aconteça. E ainda mesmo após milhares de peças produzidas ainda podem aparecer problemas de estampagem pelos mesmos motivos supracitados. O problema é que tudo isso causa perda de tempo e aumento dos custos.

Conforme já descrito no capítulo 1 existem dois métodos principais de determinação das características de conformação – determinação das propriedades mecânicas fundamentais e determinação das propriedades mecânicas simulativas. O teste de dureza é o mais popular dentre os testes de propriedades mecânicas fundamentais. A razão está na simplicidade do teste. Geralmente, qualquer pedaço de chapa pode ser testado sem qualquer preparação especial da amostra. O teste pode ser feito em poucos minutos em um equipamento simples e sem necessidade de cálculos adicionais com resultados diretos.

A dureza varia ao longo da superfície de uma chapa e é fortemente afetada pelo tipo de trabalho sofrido pela chapa como, por exemplo, laminação a frio, ou mesmo pelo tratamento superficial sofrido pela chapa como, por exemplo, a têmpera.

Entretanto a dureza é bastante útil quando se quer fazer comparações entre vários lotes de material de uma determinada especificação de aço. Ela serve como indicador se os diferentes lotes foram processados da mesma maneira.

Testes de tensão uniaxial garantem mais precisão de informação em comparação com a dureza. A curva derivada das medidas de carga-deformação é chamada curva tensão-deformação, figura 2.2. O eixo Y (vertical) indica a carga aplicada por unidade de área da amostra e o eixo X (horizontal) indica o alongamento, dado pela variação de comprimento da seção sobre o comprimento inicial, medido em percentual.

Quando o teste inicia, a carga aumenta rapidamente. Nesta porção elástica da curva se a carga é liberada em qualquer ponto a amostra retornará ao comprimento original. Uma vez atingido a tensão de escoamento, o material deforma plasticamente e terá uma deformação permanente quando a carga for liberada.

Conforme Keeler, (1968), várias propriedades da curva tensão-deformação têm sido usadas de maneira a avaliar a conformabilidade do metal - a tensão de escoamento, a tensão de ruptura e o alongamento total. A tensão de escoamento tem a desvantagem de ser mais sensível à velocidade de deformação. Ela aumenta com o aumento da velocidade de deformação. Visto que os testes de laboratório ocorrem em velocidades menores do que na produção, o valor da tensão de escoamento medida em laboratório será menor do que a encontrada durante a estampagem.

A maior parte das operações de conformação podem ser qualitativamente, não quantitativamente, caracterizadas como principalmente estiramento ou principalmente repuxo, ou taxas variadas de cada uma. Seria muito útil, portanto, saber quais propriedades influenciam ou no estiramento ou no repuxo. Com isto uma modificação inteligente nas especificações do material poderia ser feita para melhorar a conformabilidade de uma dada estampagem. O problema disto é que as propriedades mecânicas mais comumente mensuradas hoje em dia têm uma relação desconhecida ou uma relação indireta com o estiramento ou repuxo (Keeler, 1968). As propriedades mecânicas incluídas nesta categoria são tensão de escoamento, tensão de tração, alongamento no escoamento e dureza. Na figura 2.1 a tensão convencional s_0 é a carga requerida para deformar o corpo de prova dividido pela área da secção transversal inicial. O outro eixo, deformação convencional (e) é a mudança de comprimento, dividido pelo comprimento inicial da área útil do corpo de prova.

O material com alto valor de n é caracterizado por uma curva tensão-deformação mais acentuada. Isto significa uma maior separação entre a tensão de ruptura e a tensão de escoamento. A deformação na carga máxima é também maior para altos valores de n .

A curva tensão x deformação convencional não retrata verdadeiramente o comportamento de cada elemento na amostra. Observando-se a curva, a tensão requerida para continuar a deformação da amostra tensionada parece estar decrescendo após estrição. Isto ocorre porque a tensão convencional reflete somente a mudança de carga e não a mudança que ocorre na área da secção transversal.

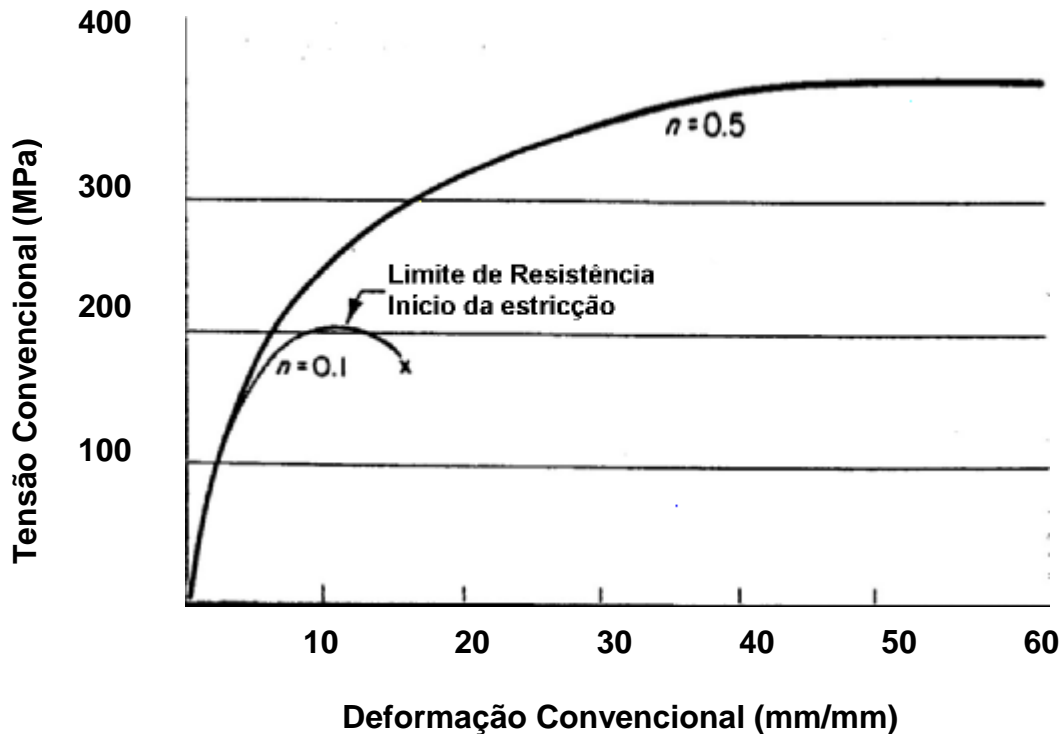


Figura 2.2 - Curva tensão-deformação teórica para dois valores de encruamento n – Keeler, 1968

Após o início da estricção, toda deformação fica restrita a uma porção muito pequena do comprimento útil – a área de estricção. Para a estricção iniciar, a redução de carga devido à redução da área da secção transversal precisa ser maior do que o aumento de carga requerido para sustentar cada incremento adicional de alongamento (encruamento do material).

Uma vez que a estricção começa, a carga requerida para manter a deformação decresce, portanto a curva tensão deformação começa a descer. Se medidas pudessem ser feitas para elementos independentes do material dentro da região de estricção, a tensão requerida para continuar a deformação aumentaria.

Um modo mais realista de descrever o comportamento do material é plotar a tensão verdadeira (s) e deformação verdadeira (ϵ) para cada elemento. Tensão verdadeira é definida como carga dividida pela área instantânea da secção transversal, e a deformação verdadeira é o somatório de cada incremento de alongamento dividido pelo comprimento útil instantâneo. Para fins de cálculo conforme Keeler, (1968):

$$s = P / A \quad (2.1) \quad e$$

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1+e) \quad (2.2)$$

onde P é a carga requerida para deformar a amostra, A é a área instantânea da secção transversal, L_0 é o comprimento antes do alongamento, L é o comprimento após alongamento e \ln é o logaritmo natural.

Quando um corpo de prova metálico é submetido a um ensaio de tração, pode-se construir um gráfico tensão x deformação, pelas medidas diretas da carga (ou tensão) e da deformação que crescem continuamente até quase o fim do ensaio.

Conforme enunciado por Souza, (1974), verifica-se inicialmente que o diagrama é linear e é representado pela equação:

$$s = E \varepsilon \quad (2.3)$$

que corresponde à lei de Hooke (proposta em 1678 por Sir Robert Hooke). A constante de proporcionalidade, E , é conhecida por módulo de elasticidade ou módulo de Young.

A linearidade do diagrama termina num ponto A , denominado limite elástico, definido como a maior tensão que o metal pode suportar, sem deixar qualquer deformação permanente quando o material é descarregado.

Verifica-se na figura 2.3 que, na parte OA da curva, o material está dentro de sua zona elástica, isto é, além de obedecer à lei de Hooke, se, em qualquer ponto dentro da linha OA , a carga for aliviada, o descarregamento seguirá também a mesma reta OA e, para um descarregamento total, o metal volta à origem (ponto O), sem apresentar qualquer deformação residual ou permanente. A estrutura de um metal no estado sólido é constituída de átomos dispostos segundo um arranjo cristalino uniforme nas três dimensões. Quando o metal é solicitado com um esforço de intensidade tal que a deformação fique no intervalo da linha OA , os átomos são deslocados de sua posição inicial de uma distância muito pequena e, assim que o esforço é retirado, os átomos voltam à sua posição inicial, devido às forças de ligação entre os mesmos, desaparecendo a deformação.

Ao ser atingida uma tensão em que a deformação não é proporcional à tensão, chega-se ao ponto A' denominado limite de proporcionalidade. A posição relativa entre A e A' é muito discutível e alguns autores colocam A' abaixo de A . Na verdade, esses dois pontos muitas vezes se confundem e torna-se muito difícil

determiná-los com precisão, devido ao fato de que o desvio da linearidade é sempre gradual e não há precisamente um ponto bem determinado para cada um desses limites mencionados. O limite elástico pode mesmo estar na parte curva do gráfico. Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma simples constante de proporcionalidade e em qualquer ponto do diagrama, havendo descarregamento do material até tensão igual a zero, o metal fica com uma deformação permanente ou residual. A figura 2.3 mostra um descarregamento do ponto B na zona plástica até a linha das abscissas. Nota-se que a linha BC é paralela à linha OA, pois o que se perde é a deformação causada na zona plástica, restando a deformação ocorrida na zona elástica.

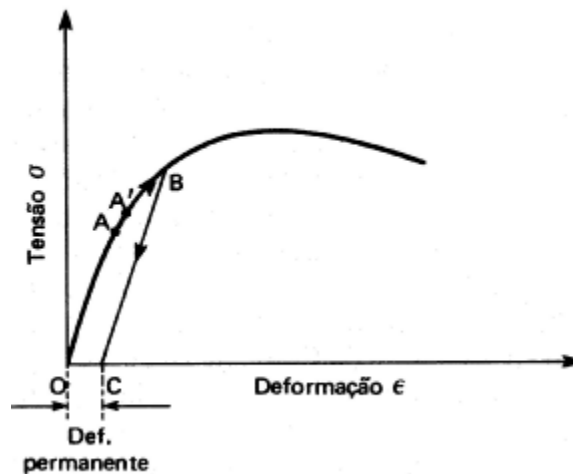


Figura 2.3 – Gráfico tensão x deformação de um metal ou liga metálica – Souza, 1974.

2.2 O ensaio de tração e as relações com as propriedades fundamentais

Conforme enunciado no fascículo de informação técnica nr. 6 da Usiminas, (1999), o ensaio de tração é feito tomando-se um corpo de prova que tenha uma parte paralela, de área inicial constante ($A_0 = w_0 \times t_0$; w_0 – largura e t_0 – espessura) e ensaiando-o em uma máquina, sob estado uniaxial de tração ($s_1 \neq 0$, $s_2, s_3 = 0$). A máquina registra P – carga, versus $\Delta L = (\Delta L = (l_0 - l_f) / l_0$ – comprimento inicial; l_f – comprimento final), de acordo com a figura 2.4.

Então pode-se definir:

$$\text{Tensão convencional: } \sigma_0 = \frac{P}{A_0}$$

$$\text{Tensão verdadeira: } \sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_0} = \frac{A_0}{A} = \sigma_0(1 + e) \quad (2.4)$$

Da curva (1), figura 2.3, obtêm-se os valores convencionais do ensaio de tração que são:

$$\sigma_e = P_a/A_0 \quad - \text{ limite de escoamento, sendo } P_a \text{ a carga para } 0,2 \% \text{ de deformação quando o escoamento não for definido.}$$

$$\sigma_r = P_b/A_0 \quad - \text{ limite de resistência, sendo } P_b \text{ a carga máxima.}$$

$$AI\% = \frac{\Delta L}{l_0} \cdot 100 = \frac{(l_f - l_0)}{l_0} \cdot 100, \text{ alongamento total.}$$

A curva de tensão x deformação verdadeira pode ser construída ponto a ponto a partir da curva convencional pelas equações (2.2) e (2.4).

A equação da curva (2), figura 2.4, relacionando $s = f(\epsilon)$ tem sido proposta por vários autores, sendo, no entanto apenas equações empíricas, sem base física, atendendo-se em geral a qual modelo se “ajusta” melhor ao formato da curva. Segundo o fascículo de informação técnica nr. 6 da Usiminas, (1999):

- (1) $s = K\epsilon^n$ (eq. de Holloman)
- (2) $s = K(\epsilon_e + \epsilon)^n$ (eq. de Swift)
- (3) $s = s_e + K\epsilon^n$ (eq. de Ludwik)
- (4) $s = a + (b - a)[1 - \exp(-n\epsilon)]$ (eq. de Voce; a, b e n são constantes)
- (5) $s = s_e \tanh(E\epsilon/s_e)$ (eq. de Prager; E – módulo de Young)

n – coeficiente de encruamento por deformação.

K – constante plástica de resistência.

s_e - tensão inicial de escoamento.

A equação de Holloman é considerada satisfatória para aços ao carbono (especialmente baixo carbono) e adotada por quase todos autores e entidades de vários países, inclusive o IDDRG (International Deep Drawing Research Group) pela simplicidade e facilidade de determinação dos parâmetros K e n . No entanto, não se aplica em alguns casos, como por exemplo, materiais que sofrem mudança de fase por deformação (aços tipo “dual-phase” e alguns inoxidáveis austeníticos).

A forma de curva para n variando de 0 a 1 é mostrada na figura 2.5. Considerando agora a figura 2.6:

$$n = \frac{a}{b} = \frac{d(\log s)}{d(\log e)} = \frac{d(\ln s)}{d(\ln e)} = \frac{\varepsilon d\sigma}{\sigma d\varepsilon} \text{ ou } \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

O valor $d\sigma/d\varepsilon$ é a velocidade de encruamento por deformação e não é exatamente igual do coeficiente n de endurecimento por deformação.

No ponto de carga máxima (Pb) da curva $\sigma_0 = f(e)$, figura 2.4, esta passa por um máximo, no entanto para a mesma deformação $\varepsilon_u = \ln(1 + e_u)$, na curva (2) $\sigma = f(\varepsilon)$, este ponto nada tem de especial. Então precisa-se estabelecer um critério para avaliar este ponto que é onde se inicia a instabilidade plástica. Como o ponto é máximo, $dP = 0$, então:

$$P = \sigma \cdot A \text{ e: } dP = \sigma \cdot dA + Ad\sigma = 0 \text{ ou: } -\frac{dA}{A} = \frac{d\sigma}{\sigma}$$

Supondo de novo a constância de volume:

$$\frac{dL}{L} = -\frac{dA}{A} = d\varepsilon$$

$$\text{onde: } \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (2.6)$$

A equação (2.6) define a condição de instabilidade:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{1}$$

Pode-se expressar este critério de instabilidade em função da deformação convencional (construção de Considère) figura 2.7:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma}{de} \cdot \frac{de}{d\varepsilon} = \frac{d\sigma}{de} \cdot \frac{dL/l_0}{dL/l} = \frac{d\sigma}{de} \cdot \frac{l}{l_0} = \frac{d}{de} \cdot (1 + e) = \sigma$$

$$\text{ou: } \frac{d\sigma}{de} = \frac{\sigma}{1 + e} \quad (2.7)$$

Da eq. (2.5): $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\sigma}{\varepsilon}$, com a eq. (2.6): $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma$, vem:

$$n = \varepsilon_u \quad (2.8)$$

ou o coeficiente de encruamento por deformação é igual à deformação verdadeira no ponto de carga máxima, ou seja, no início da instabilidade $[n = \varepsilon_u = \ln(1 + e_u)]$. Este

é um método de determinar n . O inconveniente é que o valor de e_u (alongamento uniforme) não pode ser determinado experimentalmente com a exatidão necessária. Um segundo método é traçar um gráfico como o da figura 2.6 e plotar-se vários pontos de $\log \sigma_i = \log K + n \log \epsilon_i$, (o IDDRG - International Deep Drawing Research Group - recomenda um mínimo de 8 pontos), sendo $n = \text{tga}$, ou então através de dois pontos pode-se obter:

$$n = \frac{\log \sigma_1 - \log \sigma_2}{\log \epsilon_1 - \log \epsilon_2} \quad (2.9)$$

Nelson & Winlock, 1949, propuseram o seguinte método que é bastante prático. Substituindo a eq. (2.2) e (2.4) na eq. de Holloman obtém-se:

$$s_0 = K \cdot \frac{1}{(1 + e)} \cdot [\ln(1 + e)]^n \quad (2.10)$$

lembrando que $\sigma_0 = P/A$ e considerando a eq. (2.10) para dois pontos (P_{10} , e_{10}) e (P_u , e_u) para a deformação de 10% e carga máxima, lembrando que $n = \ln(1 + e_u)$ ou $e^n = (1 + e_u)$ temos que:

$$\frac{P_u}{P_{10}} = \frac{(1 + e_{10})}{(1 + e_u)} \cdot \left[\frac{\ln(1 + e_u)}{\ln(1 + e_{10})} \right]^n \quad \text{ou:} \quad \frac{P_u}{P_{10}} = \frac{1,1}{e^n} \cdot \left[\frac{n}{\ln 1,1} \right]^n \quad (2.11)$$

A equação (2.11) mostra que P_u/P_{10} , valor facilmente obtível do gráfico de tração, depende apenas de n . No entanto como é difícil explicitar n em uma função de P_u/P_{10} o método a seguir é elaborar uma tabela para vários valores de n e calcular P_u/P_{10} , ou então utilizar o cálculo computacional.

O valor de K pode ser calculado da seguinte forma:

$$\sigma = \sigma_0(1 + e) \quad \text{e} \quad \epsilon = \ln(1 + e) \quad \text{ou} \quad e^\epsilon = (1 + e) \quad \text{como} \quad \sigma = K\epsilon^n \quad \text{vem:} \quad \sigma_0 \cdot e^\epsilon = K\epsilon^n$$

$$\text{ou} \quad K = \sigma_0 \cdot e^\epsilon \cdot \epsilon^{-n} \quad \text{fazendo} \quad \sigma_0 = \sigma_r \quad \text{e} \quad \epsilon = n \quad \text{vem:}$$

$$K = \sigma_r \left(\frac{e}{n} \right)^n \quad (2.12)$$

Onde se conclui que K pode ser determinado a partir do limite de resistência e n .

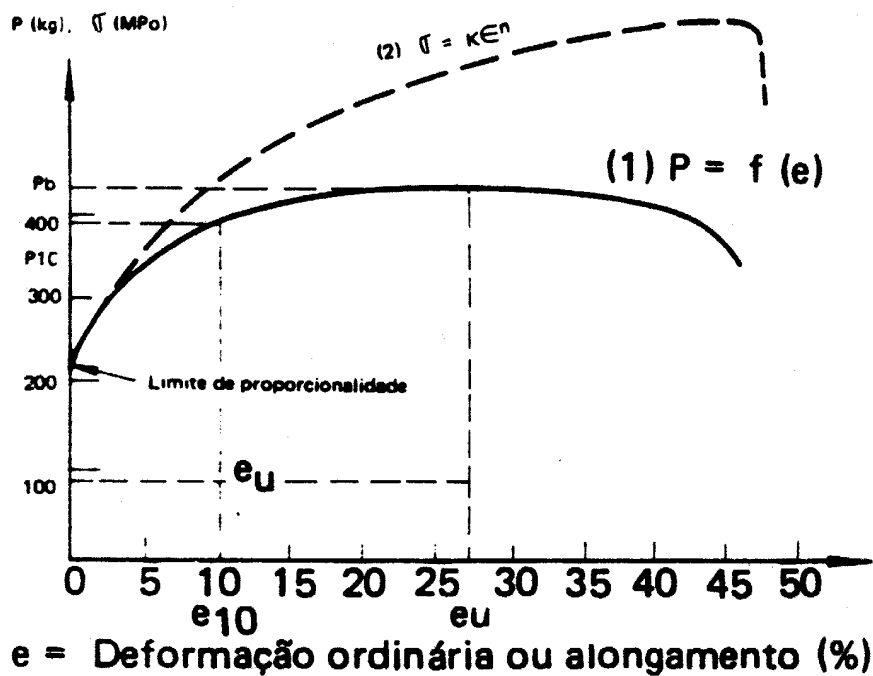


Figura 2.4 – Diagrama Tensão x Deformação - Usiminas, 1999.

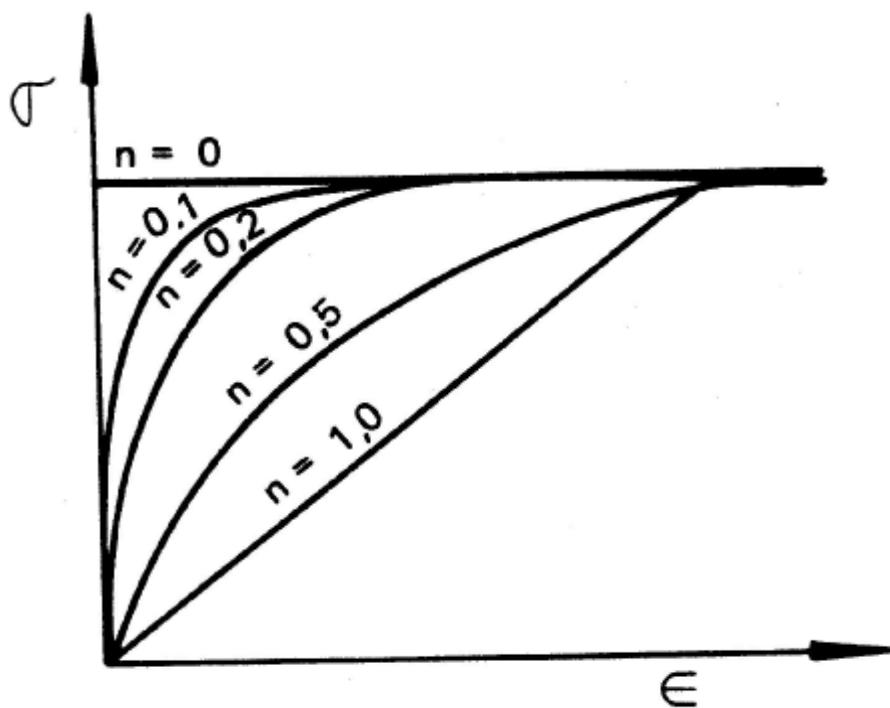


Figura 2.5 – Efeito de n na forma da curva $s = K\epsilon^n$ - Usiminas, 1999

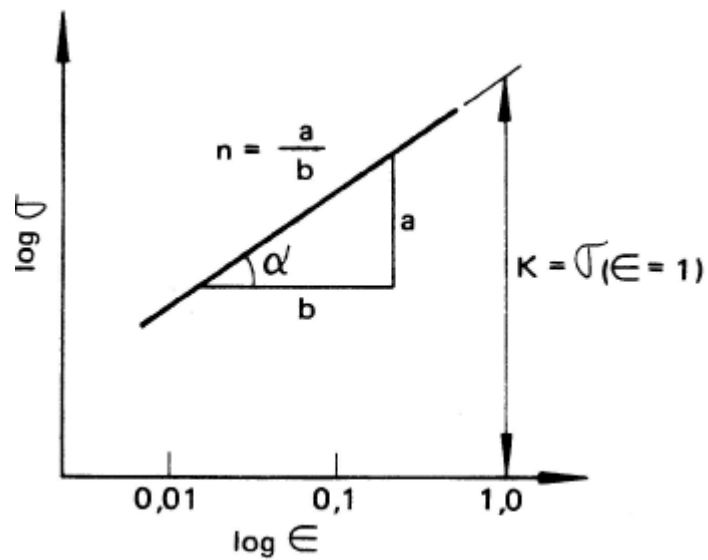


Figura 2.6 – Diagrama log-log de $\sigma \times \epsilon$ – Usiminas, 1999

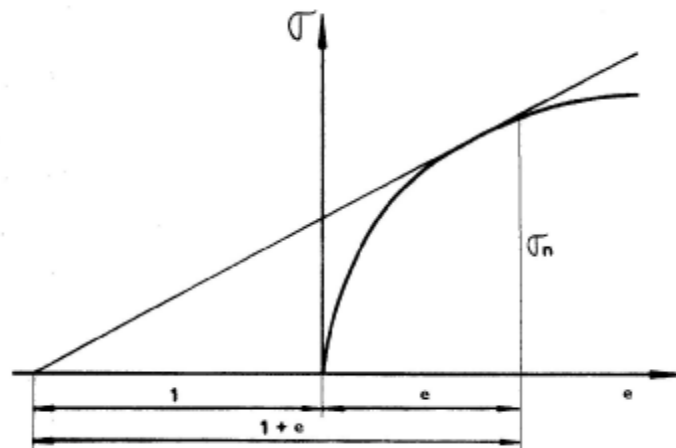


Figura 2.7 – Construção de Considère – Usiminas, 1999

2.3 A tensão de escoamento

Conforme Souza, (1974), uma propriedade mecânica comum usada para avaliar a conformabilidade é a tensão de escoamento. Como regra geral, a conformabilidade decresce com o aumento da tensão de escoamento. Apesar desta informação poder ser verdadeira para uma variedade de lotes de aços similares

processados de uma maneira similar, é uma generalização muito fraca. A tensão de escoamento meramente indica a tensão onde se inicia a deformação plástica e não indica a quantidade de deformação plástica permissível antes da estricção. Uma comparação de aço baixo carbono e aço inoxidável é um excelente exemplo. A tensão de escoamento do aço inoxidável pode ser o dobro do aço baixo carbono, mas a conformabilidade é geralmente melhor.

O início da deformação plástica é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. Segundo Souza, (1974), o escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão durante a sua maior parte. Depois do escoamento, o metal está encruado.

Quando um projeto requer um metal dúctil, onde a deformação plástica deva ser evitada, o limite de escoamento é o critério adotado para a resistência do material. Para aplicações estruturais, desde que as cargas sejam estáticas, as tensões de trabalho são geralmente baseadas no valor do limite de escoamento.

Na figura 2.8 observa-se a caracterização do patamar de escoamento. A tensão A é chamada de limite de escoamento superior, que é a tensão máxima atingida antes da queda repentina da carga (começo da deformação plástica no escoamento). Após a estabilização da carga ou da tensão, o material sofre uma deformação relativamente grande sem aumento da tensão, que é o patamar de escoamento. A tensão B, constante estabelecida, é o limite de escoamento inferior do material e durante o fenômeno, o alongamento que o metal sofre é chamado alongamento durante o escoamento. Alguns autores, porém, consideram o limite de escoamento inferior como a menor tensão, designada por C na figura 2.8, atingida durante o escoamento, que pode vir a ser inferior à tensão do patamar.

Esses dois limites não são constantes para um determinado metal, mas dependem de diversos fatores como a geometria e condições do corpo de prova, do método de ensaio, da velocidade de deformação e principalmente das características da máquina de ensaio.

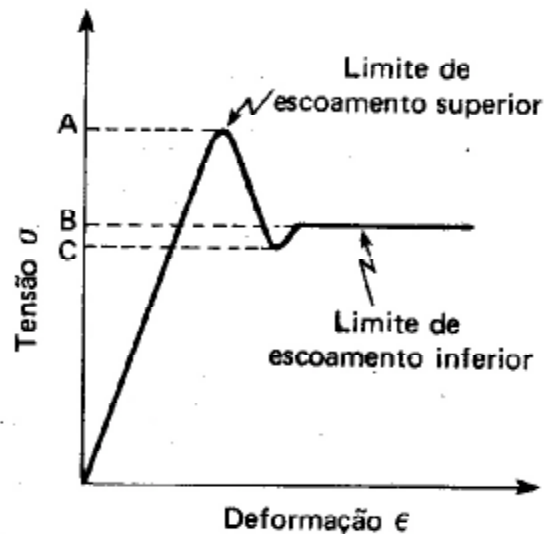


Figura 2.8 – Curva teórica mostrando os limites de escoamento superior e inferior - Souza, 1974.

O limite de resistência (s_r) é calculado pela carga máxima atingida no ensaio. Para os materiais dúcteis, o valor do limite de resistência dá a medida da carga máxima que o material pode atingir sob a restrita condição de carregamento uniaxial. Mesmo nesse caso, a tensão que o material sofre ao ser atingida a carga máxima é maior que o s_r , devido à diminuição da área, que não é computada naquela fórmula. O limite de escoamento hoje em dia, é mais usado nos projetos, do que o limite de resistência, para os metais dúcteis. Entretanto, o limite de resistência serve para especificar o material, do mesmo modo que a análise química identifica o material. Por ser fácil de se calcular e ser uma propriedade bem determinante, o limite de resistência é especificado sempre com as outras propriedades mecânicas dos metais e ligas. Para os metais frágeis, porém, o limite de resistência é um critério válido para projetos, pois nesse caso, o escoamento é muito difícil de ser determinado (como por exemplo, para os ferros fundidos comuns) e a diminuição da área é desprezível por causa da pequena zona plástica que esses materiais apresentam. Desse modo, o limite de resistência para os metais frágeis caracteriza bem a resistência do material.

O limite de resistência é influenciado pela anisotropia de metais trabalhados mecanicamente, se bem que em menor grau, comparativamente ao limite de escoamento.

A carga que produz a ruptura do material é geralmente menor que a carga máxima do limite de resistência. A propriedade mecânica denominada limite de ruptura s_f é dada pela equação:

$$s_f = P_f / A_0 \quad (2.13)$$

onde P_f é a carga de ruptura. Quanto mais dúctil é o material, mais ele se deforma ou se alonga antes de romper, mais a carga, P_f diminui pelo decréscimo da secção final. Além disso, a carga P_f é muito difícil de ser determinada com precisão, devido a não ser possível interromper o ponteiro da máquina no exato instante da ruptura, para a leitura da carga. Quanto mais frágil o material, mais s_f se aproxima de s_r e, no estudo da fratura frágil, muitas vezes se menciona s_f em lugar de s_r .

2.4 Dureza

Como proposto por Souza, (1974), a propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais. Entretanto, o conceito físico de dureza não tem um mesmo significado para todas as pessoas que tratam com essa propriedade. Esse conceito divergente da dureza depende da experiência de cada um ao estudar o assunto.

Para um metalurgista, dureza significa a resistência à deformação plástica permanente; um engenheiro mecânico define a dureza como a resistência à penetração de um material duro no outro; para um projetista, a dureza é considerada uma base de medida para o conhecimento da resistência e do tratamento térmico ou mecânico de um metal e da sua resistência ao desgaste; para um técnico em usinagem de metais, a dureza fornece uma medida da resistência ao corte do metal; e para um mineralogista, a dureza tem um significado diferente, ou seja, o de medir a resistência ao risco que um material pode fazer em outro.

Assim, não é possível encontrar uma definição única de dureza que englobe todos os conceitos acima mencionados, mesmo porque para cada um desses significados de dureza, existem um ou mais tipos de medida adequados. Sob esse

ponto de vista, segundo Souza, (1974), pode-se dividir o ensaio de dureza em três tipos principais, que dependem da maneira com que o ensaio é conduzido,

- 1) por penetração;
- 2) por choque e
- 3) por risco.

Com esse tipo de medida de dureza, vários minerais e outros materiais são relacionados quanto à possibilidade de um riscar o outro. A escala de dureza mais antiga para esse tipo é a escala de Mohs (1822), que consiste em uma tabela de 10 minerais padrões arranjados na ordem crescente da possibilidade de ser riscado pelo mineral seguinte. Assim, verifica-se que o talco tem dureza Mohs 1 (isto é, pode ser riscado por todos os outros seguintes), seguindo-se a gipsita (2), calcita (3), fluorita (4), apatita (5), ortoclásio (6), quartzo (7), topázio (8), safira (9) e diamante (10). Desse modo, por exemplo, o quartzo risca o ortoclásio e é riscado pelo topázio. O cobre recozido tem dureza Mohs 3, pois ele risca a gipsita e é riscado pela fluorita; a martensita tem dureza Mohs aproximadamente igual a 7, e assim por diante.

Para os metais, essa escala não é conveniente, porque os seus intervalos não são propriamente espaçados para eles, principalmente na região de altas durezas e a maioria dos metais fica entre as durezas Mohs 4 e 8, sendo que pequenas diferenças de dureza não são precisamente acusadas por esse método.

Os tipos de dureza por penetração e por choque são mais usados no ramo da Metalurgia e da Mecânica, sendo que a dureza por penetração é a mais largamente utilizada e citada nas especificações técnicas. Os tipos mais comuns de avaliação de dureza são por penetração:

- 1) Brinell;
- 2) Rockwell;
- 3) Vickers;
- 4) Knoop;
- 5) Meyer e a dureza;
- 6) por choque Shore (escleroscópica).

2.5 Coeficiente de encruamento

Para ter melhor conformabilidade, um material precisa ser capaz de suportar maior deformação antes da falha, ou, precisa ter a capacidade de resistir à deformação. A experiência prática mostra duas propriedades fortemente influenciadas pela habilidade do material de ser conformado. Estas duas propriedades podem ser avaliadas usando-se uma tensão padrão e tensão normal. A primeira é o coeficiente de encruamento, mais conhecido como n . O valor de n determina a habilidade do material de ser estirricionado. A segunda propriedade é o coeficiente de anisotropia, ou R de Lankford. Esta propriedade controla fortemente a habilidade do material de ser repuxado dentro de copo com fundo plano.

Segundo Keeler, (1968), um método de observação do valor de encruamento é plotar a curva tradicional tensão x deformação convencional obtida do teste uniaxial de tensão.

A curva tensão x deformação verdadeira equivalente para os valores de n plotados na figura 2.9 são mostrados na figura 2.10. Como pode ser visto, a tensão continua a subir sem um máximo para o aumento da deformação.

As curvas tensão x deformação para muitos metais, especialmente aço, podem ser aproximadas pela equação da conservação de energia (equação de Holloman - $\sigma = K \epsilon^n$). Da equação de conservação de energia, n é definido como o expoente da relação tensão deformação. Também chamado de coeficiente de encruamento, ele determina o aumento de tensão para cada incremento de deformação. Quanto maior o valor de n , mais duro será o material. Quanto maior o valor de n , maior a resistência à estirricção.

Existem vários métodos para medir o valor de n . A base para a maioria é reescrever a equação da lei de conservação de energia como:

$$\log \sigma = \log K + n \log \epsilon \quad (2.14)$$

que representa uma linha reta tendo a equação $y = a + nx$ quando plotado no gráfico log-log. Se o gráfico é uma linha reta, n é uma constante e é obtido medindo-se o ângulo da reta. O valor de K é a tensão obtida pela intersecção da reta na deformação igual a 1.

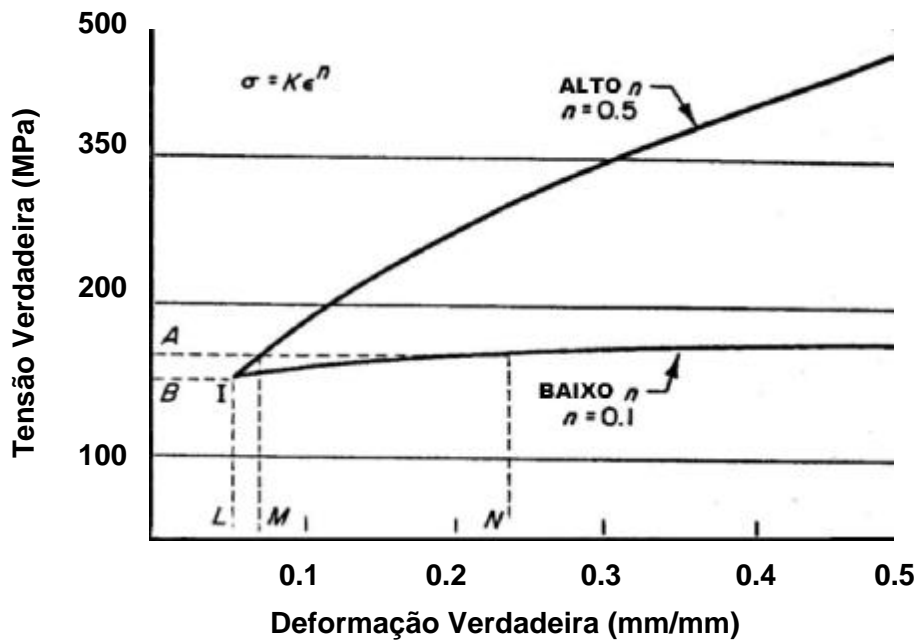


Figura 2.9 - A curva tensão x deformação verdadeira – Keeler, 1968.

Se a linha é curva, um n instantâneo precisa ser calculado para cada valor de deformação de interesse. A linha pode ter dois segmentos retos. Isto ocorre para alguns aços inoxidáveis. Neste caso cada segmento precisa ser descrito pelo seu próprio valor de n . Para a maioria dos aços baixo carbono e muitos dos não ferrosos comumente usados na conformação industrial, uma constante n irá aproximar a curva tensão x deformação.

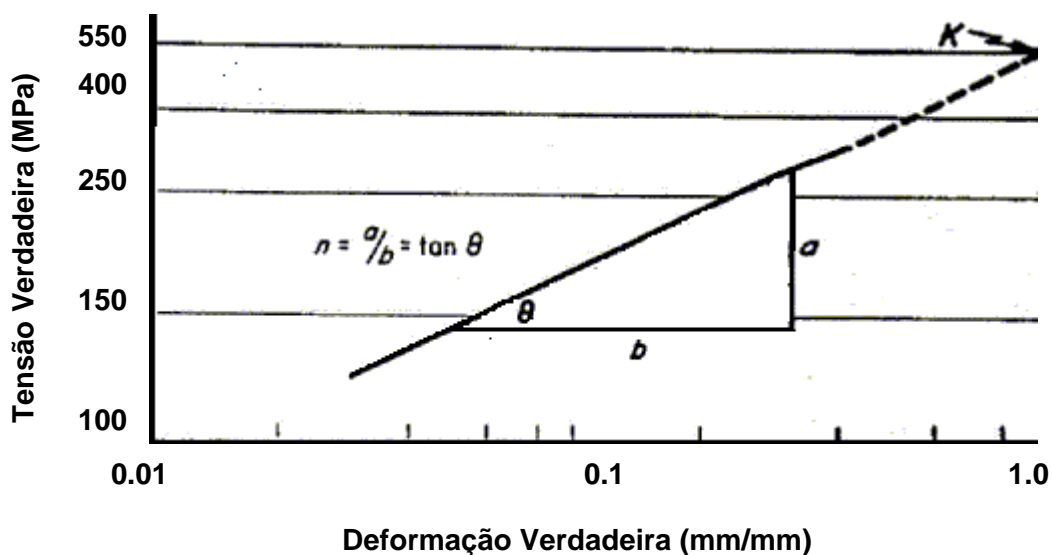


Figura 2.10 - Cabulo do valor de n .

2.6 A anisotropia e o R de Lankford

Ductilidade é a habilidade de um aço de resistir à fratura quando submetido à deformação plástica; a falha ocorre quando o nível de ductilidade é menor do que a requerida na operação de conformação. Medidas dessa ductilidade pode incluir o maior diâmetro de blank que pode ser repuxado com sucesso dentro de um copo de altura fixa.

Já foi mencionado que as propriedades mecânicas de um material trabalhado mecanicamente (laminado, forjado, estampado, etc.) podem variar conforme a direção em que se retira o corpo de prova para ensaio. Esse fenômeno é chamado de anisotropia. A anisotropia aparece por causa da orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal após uma grande deformação por trabalho mecânico (anisotropia cristalográfica) ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada por causa também de trabalho mecânico. Um valor útil para se avaliar a anisotropia plástica é o índice de anisotropia R que será visto a seguir.

Conforme Keeler, (1968), qualquer que seja a medida da ductilidade assume-se comumente que o material é isotrópico, ou, independente das direções de medida dentro da chapa. A transformação do metal de um lingote em uma chapa, e sua subsequente fabricação, com vários tipos de direcionalidade, originam a anisotropia de propriedades em quase todos os metais.

Em um material completamente isotrópico, todas as orientações estão presentes em uma base igual. O material é isotrópico com respeito às propriedades mecânicas associadas. Na maioria dos casos, no entanto, existe uma tendência dos grãos terem certos planos cristalográficos ou direções, claramente alinhadas com a direção da primeira conformação. Como resultado, alguns sistemas são orientados, o que permite uma deformação mais fácil em algumas direções do que em outras. Esta condição cria anisotropia plástica, em que as propriedades na direção de laminação são diferentes das direções transversais.

A forma total da curva tensão-deformação, e propriedades como tensão de escoamento, força de tração e taxa de encruamento, são afetadas por esta orientação cristalográfica.

O índice de anisotropia plástica R é definido como a razão da deformação verdadeira na largura e a deformação verdadeira na espessura no teste de um corpo de prova padrão de comprimento útil de 50 mm, figura 2.11. Um método de obter R é plotar a deformação na largura (ϵ_w) versus a deformação na espessura (ϵ_t) para várias amostras tracionadas até a estricção. Para a maioria dos materiais comuns de conformação o resultado será uma linha reta. O valor de R é constante e é simplesmente a inclinação da curva.

Considerando que o gráfico seja uma reta, um método de dois pontos pode ser usado. O primeiro ponto é a deformação zero. O outro é algum alongamento conveniente, como 15 ou 20%. Após conformação, o valor de R é calculado da expressão:

$$R = \frac{\ln(w_f/w_0)}{\ln(t_f/t_0)} \quad (2.15)$$

onde w_0 e t_0 são a largura e espessura iniciais respectivamente, e, w_f e t_f são a largura e espessuras finais.

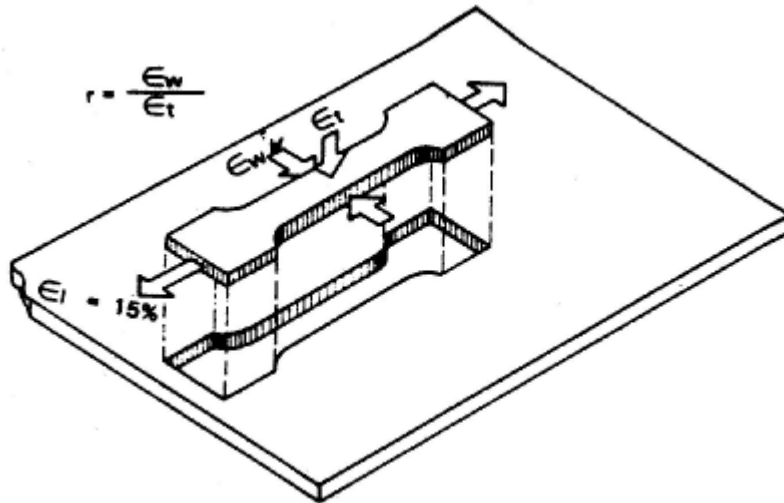


Figura 2.11 – Esquema do modo de medir o valor R de Lankford – Usiminas, 1999.

Infelizmente, são possíveis grandes erros na medição de espessura de chapas finais. Considerando-se o fato de que o volume de material permanece constante durante a deformação plástica, a expressão pode ser reescrita em termos largura e deformação no comprimento da amostra:

$$R = \frac{\ln(w_f/w_0)}{\ln(l_f w_f/l_0 w_0)} \quad (2.16)$$

onde l_0 e l_f são os comprimentos iniciais e finais, respectivamente.

O procedimento geral é:

1. É usinada uma amostra padrão ASTM com comprimento útil de 50 mm ou outra com laterais paralelas. Amostras duplicadas são recomendadas.
2. Um comprimento útil, geralmente de 2 polegadas, é marcado sobre a amostra, e tomado como l_0 . A largura total da amostra é medida em quatro pontos dentro do comprimento útil e tomado como w_0 .
3. As amostras são alongadas aproximadamente a 15% (abaixo da deformação em que se inicia a estricção) a uma taxa de deformação conveniente.
4. O comprimento útil final l_f e a largura útil w_f são medidas como descrito na etapa 2.
5. O valor de R é calculado usando-se a equação 2.16.

O parâmetro de anisotropia R pode ser obtido para diferentes direções na chapa. Normalmente, amostras são removidas de chapas a 0° , 45° e 90° da direção de laminação. Testando-se chapas perfeitamente isotrópicas ou não direcionais, todos os valores de R seriam iguais a uma unidade. Para a maioria dos aços e outros materiais, entretanto, há variações dos valores de R com a direção. Essa variação de R dentro do plano da chapa, figura 2.12, é chamada de anisotropia planar.

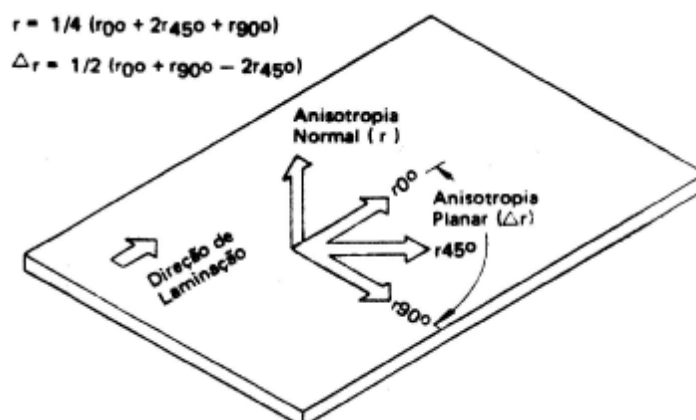


Figura 2.12 – Método de amostragem para obtenção de R médio e ΔR - Usiminas, 1999.

A equação matemática da anisotropia planar é:

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \quad (2.17)$$

Os valores de R podem ser plotados com função do ângulo. Então ΔR é a diferença entre R_{45} e a média dos valores de R_0 e R_{90} .

A direcionalidade ocorre em três direções, entretanto, sua ausência no plano da chapa não significa que propriedades medidas em uma direção perpendicular ou normal à chapa são iguais àsquelas do plano da chapa. A importância prática desta anisotropia normal não foi totalmente reconhecida até recentemente por duas razões – as propriedades na direção da espessura são geralmente desconhecidas e nem podem ser medidas, e os efeitos da anisotropia normal não são visualmente evidentes, como no caso da trinca. Ultimamente, tem sido dado reconhecimento ao fato que chapas de metal muitas vezes exibem um fluxo de força na direção de sua espessura bem diferente daquela de seu plano. É de fato possível ter um nível de anisotropia normal muito alto (espessura) em uma chapa com pouca ou nenhuma anisotropia planar (rotacional).

Em geral toma-se o corpo de prova em várias direções em relação à direção de laminação; a 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação, normalmente, obtendo-se assim R_{0° , R_{45° e R_{90° , respectivamente (figura 2.12 e 2.13).

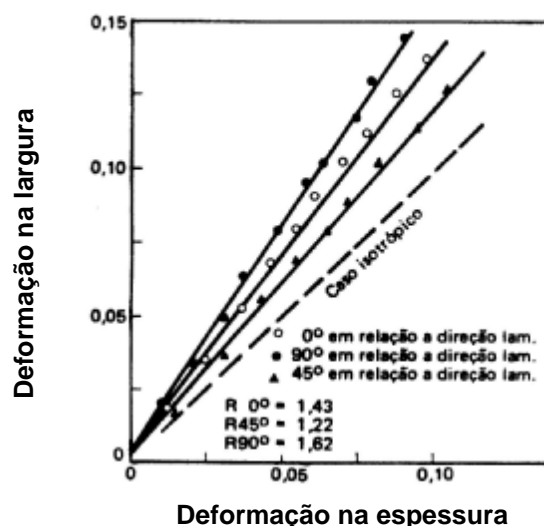


Figura 2.13 – Deformação na espessura versus deformação na largura – Usiminas, 1999.

Analisando estes valores, pode-se ter os seguintes casos limites:

- Primeiro caso: $R_{0^\circ} = R_{45^\circ} = R_{90^\circ} = 1,0$ (isotropia total);
- Segundo caso: $R_{0^\circ} = R_{45^\circ} = R_{90^\circ} \neq 1,0$ (anisotropia normal pura e isotropia planar);
- Terceiro caso: $R_{0^\circ} \neq R_{45^\circ} \neq R_{90^\circ} \neq 1,0$ (anisotropia normal + anisotropia planar).

É de interesse notar que no segundo caso, o material apresenta curvas tensão x deformação iguais, apesar de ser anisotrópico. Por isso este tipo de anisotropia é difícil de ser visualizado.

Uma outra maneira de determinação de R é na direção normal à superfície da chapa laminada. O valor de \bar{R} , denominado anisotropia normal é dado pela expressão:

$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \quad (2.18)$$

Se \bar{R} for maior do que uma unidade, o material é caracterizado como tendo resistência a diminuição de espessura e tem um aumento da força transversal à espessura.

Infelizmente, um material com uma anisotropia normal alta geralmente tem uma alta anisotropia planar também. Muitos fabricantes de aço estão trabalhando no problema de obter-se uma chapa de metal com alto valor de \bar{R} e um DR com valor zero.

O grau de anisotropia é estreitamente relacionado a estrutura cristalina do metal ou liga. Em geral, a anisotropia desenvolve-se mais fortemente em metais com estrutura hexagonal (berílio, titânio, zircônio) do que em metais com estrutura cúbica de corpo centrado ou face centrada (aço, cobre, alumínio, bronze). O tipo e quantidade de elementos de liga também influenciam a natureza da anisotropia. Um excelente exemplo é o efeito do alumínio no aumento da anisotropia. Para um dado metal e composição, a anisotropia plástica é uma consequência de toda sua história de processamento. Especialmente importante para o aço são a temperatura de acabamento, temperatura de resfriamento, percentual de redução à frio e ciclo de recozimento.

A influência da anisotropia é graficamente mostrada na figura 2.14.

Mudando-se a anisotropia normal de 0,2 para o zinco para 6,0 para o titânio, a razão crítica dos diâmetros aumenta de 2 para 3. Traduzido, a altura de um copo de diâmetro fixo é aumentada de um fator três.

A capacidade de conformação de vários materiais pode ser comparado com base em seus valores de R . Quanto menor o \bar{R} , pior a capacidade de conformação.

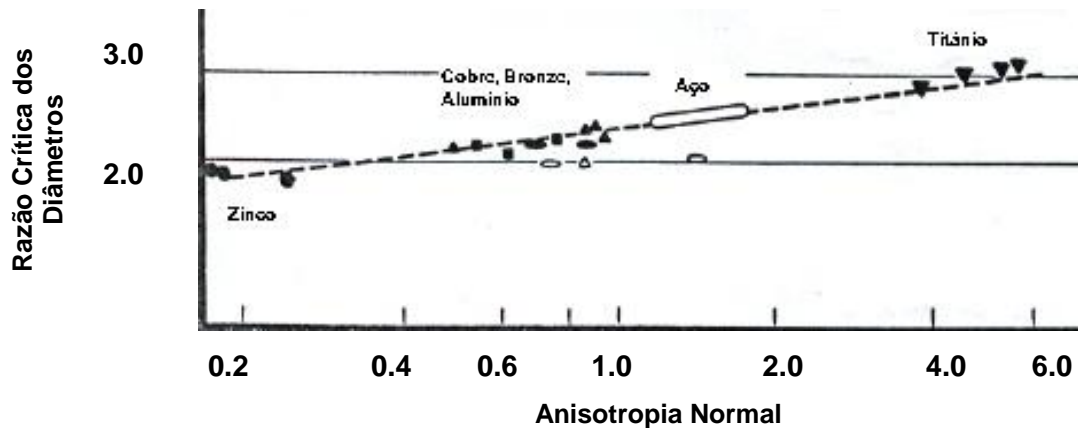


Figura 2.14 – Anisotropia normal para vários materiais versus RCD (Razão Crítica dos Diâmetros). Um valor alto de \bar{R} indica boa conformabilidade – Keeler, 1968.

Aplicações específicas de engenharia muitas vezes estipulam uma espessura mínima para um estampado após conformação. Muitas peças são rejeitadas por uma redução excessiva, que ocorre em áreas de alta deformação.

Uma alta resistência à redução de espessura, ou um aumento na força transversal à espessura do aço, reduzirá a quantia desta redução e ajudará a reter a dimensão de espessura mais próxima da original.

Falando-se agora na conformação por estiramento, a influência da anisotropia na capacidade de estiramento é ilustrada por descobertas contraditórias, embora qualquer influência seja pequena comparada a estampagem profunda. Melhores estudos serão necessários para delinear os efeitos da anisotropia na instabilidade, fratura e distribuição de deformação, todas as quais contribuem à quantidade total de deformação possível.

O valor R tem uma boa base física, tendo sido interpretado em termos da orientação cristalina (textura) do material, por vários autores. Também pode ser introduzido nas equações da teoria da plasticidade de Hill.

Outro valor também considerado a partir das propriedades fundamentais é o definido por Ueda, (1965), como segue:

Supondo o volume constante durante a deformação plástica:

$$l_0 w_0 t_0 = l_f w_f t_f \quad (V_f = V_0) \text{ ou:}$$

$$\varepsilon_L + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0$$

ε_L - deformação longitudinal

ε_w - deformação na largura

ε_t - deformação na espessura

como $R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_L}$ e $\varepsilon_t = \varepsilon_u = n$ na instabilidade vem: $n + \varepsilon_w + \frac{\varepsilon_w}{R} = 0$ ou:

$$\Phi = -\varepsilon_w = n \cdot \frac{R}{R+1} \quad (2.19)$$

onde o valor ϕ , deformação do corpo de prova na direção da largura no instante do início da instabilidade é proporcional a n e R . Portanto pode-se através de n , R e K (ou ϕ) definir as características do material quanto à conformabilidade.

CAPÍTULO 3

TESTES SIMULATIVOS PRÁTICOS

3.1 Introdução

De acordo com Lloyd, (1962), a experiência de operação proporciona uma interpretação prática da relação entre conformação de metais e a complexidade do ferramental. Conformabilidade define a capacidade de suportar deformação plástica, resistindo à fratura; a complexidade define a necessidade de esforço durante a operação da ferramenta.

A existência de dois tipos de deformação exige duas distribuições de capacidade de tensão para satisfazê-las. Elas são representadas pelas deformações de embutimento e estiramento em ferramentas e suas correspondentes propriedades, valor de R e alongamento uniforme na chapa. A estampagem profunda requer ductilidade moderada na direção planar, enquanto estiramento necessita de alta ductilidade traduzida como alongamento uniforme. A conformabilidade pode, portanto, ser dividida simplesmente em duas partes; primeiro, capacidade para deformação plástica e segundo, o grau em que tal deformação mostra orientação preferencial favorável (valor de R). Estes dois fatores são medidos separadamente, visto que eles não são necessariamente relacionados. Alongamento pode ser dado como um valor absoluto, enquanto R é uma razão de distribuição.

Metalurgicamente, é muito mais vantagem utilizar estampagem profunda tanto quanto possível, enquanto estiramento deveria ser usado somente quando se quer

acuracidade e para formas que não podem ser produzidas de outra forma. As necessidades de ductilidade para embutimento são relativamente baixas, enquanto o controle de estiramento, especialmente próximo ao nível máximo é crítico e particularmente influenciado por defeitos superficiais.

Embora a influência de R em embutimento puro pode ser facilmente demonstrada, comparativamente pouco é conhecido sobre a influência desta propriedade em operações que são principalmente estiramento. Em alguns casos uma mudança de um pequeno para um alto valor de R melhora a estampagem com pouca alteração na regulagem do equipamento; isto pode ser muitas vezes conseguido simplesmente posicionando o blank numa direção favorável de R .

O termo estampagem profunda também precisa de uma definição mais exata quando aplicada à qualidade do aço. Quando a chapa de aço que é isotrópica, ou tem uma orientação preferencial favorecendo a deformação na espessura, isto é, tem um valor de R menor que 1,0, resultar em baixa performance na estampagem profunda, seu valor na estampagem geral será baixo somente na extensão dependente da faixa envolvida na deformação da estampagem profunda.

Torna-se cada vez mais urgente a definição da nomenclatura padrão em função das atuais mudanças nos processos de fabricação do aço e técnicas de laminação. O resultado da estampagem profunda depende diretamente do valor R com a ductilidade sendo uma necessidade secundária. No momento, uma chapa de aço é comercializada como “Estampagem Profunda” quando ela tiver um valor de R um pouco maior que uma unidade, embora sua ductilidade para conformação por estiramento possa ser adequada. Tem-se então, que material de qualidade “Extra Profunda” deva ter R de 1,7 ou maior, enquanto “Qualidade Normal” deva ser 1,2 a 1,7.

O objetivo do “try out” não é produzir amostras aceitáveis de estampados, mas garantir que a ferramenta seja fornecida à fábrica numa condição satisfatória. Um estiramento excessivo revelado durante o “try out” pode ser corrigido por alterações na ferramenta que permitem um incremento de estampagem profunda. Este aumento pode necessitar um novo desenvolvimento da forma do blank que é uma parte essencial da função do “try out”. Uma grande proporção dos problemas de

fábrica pode ser rastreada fazendo-se a ligação da falha ocorrida aos problemas da fase de “try out”.

Os limites de segurança devem ser escolhidos de forma a se adequar ao tipo de trabalho e às chapas de aço disponíveis. Quando uma grande quantidade de aço é envolvida, um pequeno componente de estiramento permite o uso de graus baixos de aço com uma considerável redução de custo.

Os testes da categoria simulativa visam avaliar, em escala de laboratório, o tipo de conformação que a chapa vai sofrer em escala industrial. Em geral, pode-se simular um dos modos de deformação descritos anteriormente ou mais de um, combinados.

Estes tipos sofrem influência de uma série de variáveis devido principalmente ao efeito escala, que freqüentemente mascaram os resultados obtidos. Entre elas podem-se citar (da chapa e da ferramenta), condições de lubrificação, velocidade de deformação, revestimentos superficiais, etc. São variáveis difíceis de controlar e simular.

Conforme orientação do fascículo de informação técnica nr. 6 da Usiminas, (1999), podem, portanto ser classificados, de acordo com o modo de deformação, que visam simular:

- a) Testes com predomínio de estiramento
- b) Testes com predomínio de estampagem profunda
- c) Testes combinados (estiramento + estampagem)
- d) Testes que simulam o flangeamento
- e) Testes de dobramento

Na figura 3.1 é mostrado o quadro de Yoshida e a posição de cada teste em relação ao modo de deformação.

A seguir descreve-se detalhadamente o teste mais importante de cada tipo.

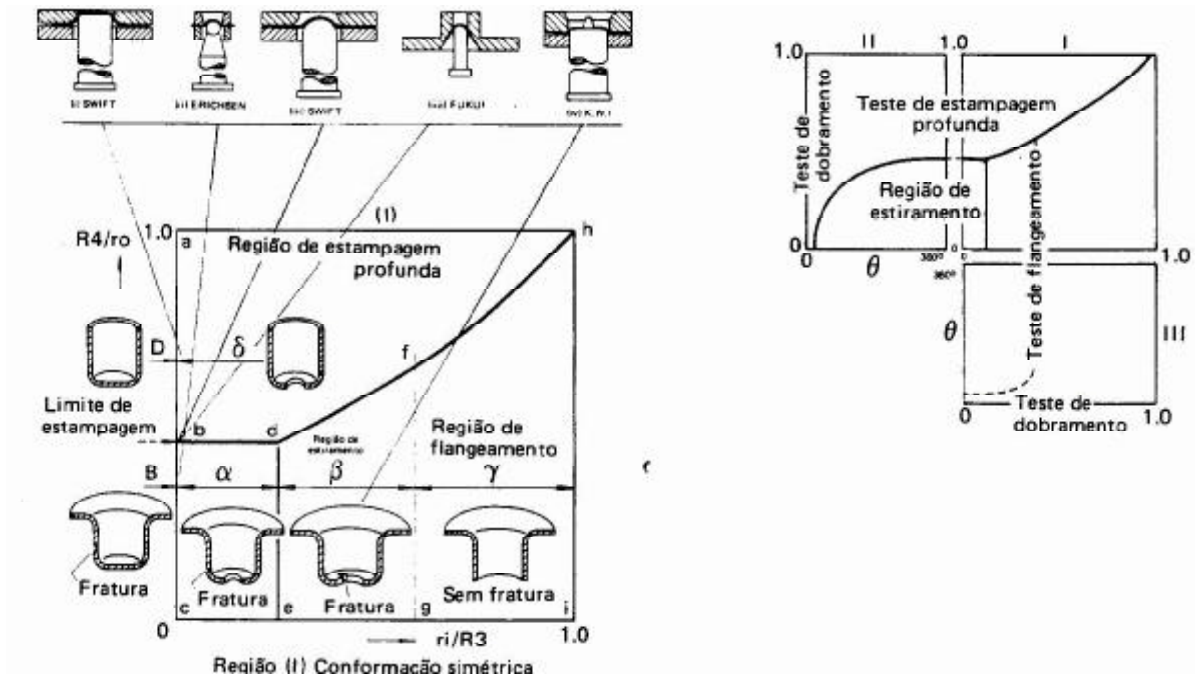


Figura 3.1 – Classificação dos testes de acordo com o modo de deformação – Usiminas, 1999.

3.2 Teste de estiramento

Nestes testes o material é submetido a um sistema biaxial de tensões de tração, em geral simétrico, simulando uma operação de conformação por estiramento, através de um punção sólido hemisférico (Erichsen) ou através de pressão hidráulica (Bulge Test).

Além do fato de sua longa utilização e da existência de inúmeros trabalhos sobre a sua reprodutibilidade, tem como principal vantagem a rapidez e simplicidade operacional.

A grandeza medida é a profundidade de penetração do punção no início da ruptura (em mm). A pressão no anti-ruga é bastante elevada (da ordem de 1 tonelada), mas a ausência de entalhe para impedir que a chapa corra para dentro da cavidade da matriz impede que o teste tenha apenas deformações de estiramento.

O valor Erichsen correlaciona-se razoavelmente com o índice n , mas não é capaz de prever o comportamento da chapa quanto à estampagem profunda. Tem o inconveniente de não ser um número adimensional e depende essencialmente da

espessura do material ensaiado, não se podendo estabelecer correlação entre materiais de espessuras diferentes.

Na figura 3.2, mostra-se um esquema, do ensaio de Erichsen com as dimensões de punção e matriz para a faixa de 0,6 a 1,6 mm.

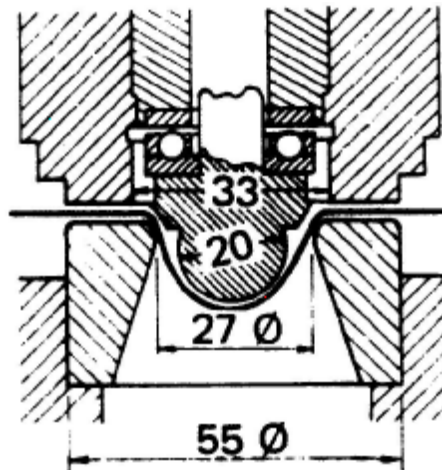


Figura 3.2 – Dispositivo para execução do ensaio de Erichsen. Punção de cabeça esférica e matriz de seção circular. Cotas em mm – Usiminas, 1999.

No ensaio denominado “Bulge” o punção é substituído por pressão hidráulica e a chapa é firmada através de pressão elevada no anti-ruga, que também dispõe de ressalto que se encaixa no entalhe da matriz, evitando que o flange corra para dentro da matriz. Neste teste simula-se o estiramento puro e o valor medido é a altura da calota hemisférica (em mm) no momento da ruptura. Uma das vantagens é a eliminação do efeito do atrito entre a cabeça do punção e o corpo de prova.

3.3 Testes de estampagem

Nos testes do tipo estampagem, em geral a pressão no anti-ruga é a mínima para evitar a formação de rugas e permitir, o mais livremente possível, que o material do flange sob o anti-ruga flua para dentro da matriz. Na verdade não é possível uma conformação até a fratura por pura estampagem, pois o material se deforma até certo ponto por estampagem, passando a seguir para estiramento. Portanto quando

se refere a teste de estampagem profunda, deve-se entender “teste onde predomina o modo de deformação por embutimento profundo”.

O teste mais representativo deste modo de conformação é o ensaio Swift, que está esquematizado na Figura 3.3. O procedimento é o seguinte: realiza-se uma série de ensaios nos quais vai-se aumentando gradativamente as dimensões do corpo de prova até que não se consiga mais estampar o material, isto é, até que o material se rompa antes de ser completamente embutido.

O valor medido é o denominado RCD ou razão crítica dos diâmetros (LDR: “limit drawing ratio”) que consiste na razão entre o diâmetro máximo do corpo de prova que estampou sem romper pelo diâmetro do punção (D_0/d_p , na Figura 3.3).

O grande inconveniente do teste Swift é o elevado número de ensaios, com corpos de prova de tamanhos diferentes, para se obter um único valor. As condições de lubrificação também afetam o valor do teste, mas o valor medido é uma grandeza adimensional e praticamente independe da espessura do corpo de prova.

O teste Swift correlaciona-se excelentemente com o valor R de Lankford, mas correlaciona-se mal com o índice n , fornecendo, portanto, informações quanto ao comportamento do material em operações de embutimento profundo, apenas.

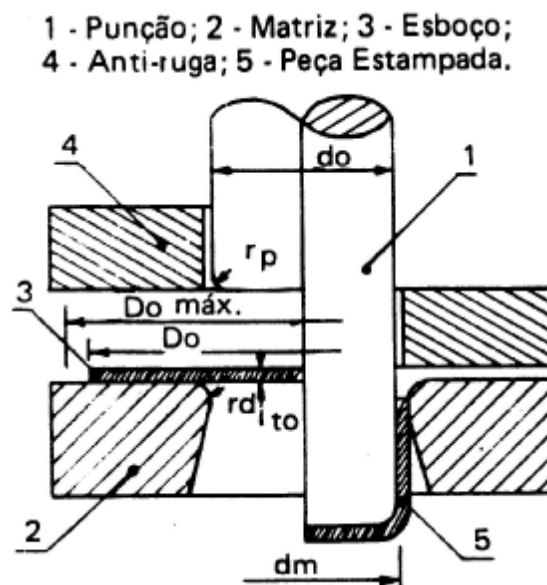


Figura 3.3 – Corte do dispositivo para execução do Ensaio de Swift.

Punção de cabeça chata, matriz circular – Usiminas, 1999.

3.4 Testes combinados

Nos testes denominados combinados, procura-se simular operações em que haja estampagem e estiramento simultaneamente. Existem inúmeros tipos dos quais o mais conhecido é o ensaio Fukui ou CCV (“Conical Cup Value”), utilizando punção de cabeça esférica.

Neste teste a matriz é cônica na parte de apoio do corpo de prova conforme mostra a figura 3.4 sendo o corpo de prova de forma circular apoiado simplesmente, eliminando o dispositivo de anti-ruga. Quando o punção desce, o corpo de prova toma o formato cônico e, em seguida, é conformado cilíndricamente através da cavidade da matriz até iniciar-se a ruptura. A forma final da peça está indicada na parte inferior da figura 3.4. O valor medido através de dispositivo especial, é a média dos diâmetros máximo e mínimo (na direção circunferencial da parte mais larga do corpo de prova) – D_m – na figura 3.4. As variações de diâmetros ocorrem por causa de anisotropia planar ΔR da chapa. Então, tem-se que:

$$\text{Valor CCV} = D_m = \frac{D_{\text{máximo}} + D_{\text{mínimo}}}{2} \quad (3.1)$$

O valor CCV tem o inconveniente de ser dimensional (mm) e de depender do diâmetro inicial do corpo de prova que é padronizado por faixa de espessura, assim como o conjunto matriz e punção, tornando-se problemática a comparação de valores referentes a faixas de espessura diferentes. O posicionamento do corpo de prova na matriz influi notavelmente nos resultados, tornando sensível à influência do operador.

O teste CCV, sendo combinado, correlaciona bem, tanto com o valor R de Lankford, como com o índice n de endurecimento por deformação, sendo esta uma de suas vantagens.

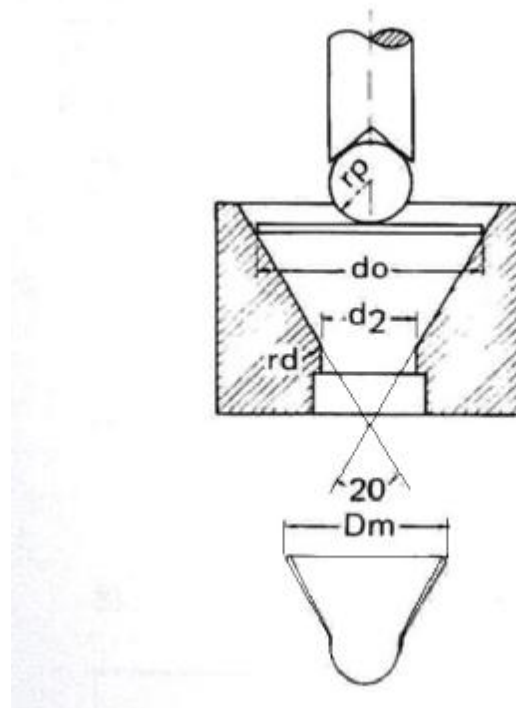


Figura 3.4 – Ferramentas para o Teste CCV (acima) e forma da peça rompida após o Teste (abaixo) – Usiminas, 1999.

3.5 Teste de dobramento

O teste de dobramento consiste em dobrar vários pedaços retangulares de chapa através de uma cunha com raios de curvatura decrescentes até o dobramento sobre a própria espessura (raio nulo), medindo-se o menor valor $D = R/t_0$ (R – raio de curvatura; t_0 – espessura) que o material consegue ser dobrado sem romper. Como é um tipo de ensaio descontínuo, é preferível realizar-se um ensaio de tração com entalhe e medir-se o alongamento com uma base de medida bem pequena nas proximidades do entalhe. Isto porque o estado de deformação gerado pelo entalhe é um estado plano de deformação similar ao do dobramento.

3.6 Curvas limite de conformação

Como referenciado por Woodthorpe, (1969), o conceito das curvas limite de conformação (CLC) foi desenvolvido por Keeler em 1965, quando este sugeriu um critério de falha empírico, baseado no par de medidas da maior (ϵ_1) e menor (ϵ_2) deformação principal superficial em um ponto crítico de falha. Este par de deformação foi definido como o ponto onde eventualmente uma fratura poderia ocorrer. Goodwin estendeu as CLCs para valores negativos da menor deformação.

As curvas limite de conformação (CLC), são empregadas para avaliar a severidade das deformações do material submetido a processos de conformação por estiramento, estampagem profunda, e tração. A complexidade destas deformações torna difícil a avaliação da estampagem durante a etapa industrial. Contudo, o que se faz para o controle das falhas mecânicas no processo é a comparação da distribuição das deformações das chapas com as CLCs do material, obtidas em laboratório. Esta comparação é feita durante o ajuste do ferramental ou em uma análise de ruptura da peça.

A aptidão à conformação a frio de chapas metálicas é de difícil avaliação, devido ao caráter complexo das deformações introduzidas durante o processo. Foram revisados por Ferran, (1975), os diversos critérios utilizados para avaliar a aptidão à conformação das chapas metálicas, chegando-se a conclusão de que a curva limite de conformação seria um dos critérios mais adequados.

O interesse prático de uma CLC é esclarecido por dois fatos:

- Nenhuma peça fraturada numa operação simples de conformação de chapa pode ter deformações inferiores às situadas abaixo da CLC do material, ou seja, na região compreendida entre a curva e o eixo de coordenadas ϵ_2 ;
- A comparação das deformações observadas na peça conformada com a CLC do material permite saber se as deformações da peça são críticas ou não; ou seja, permite ter uma idéia do grau de segurança na fabricação em série. Este grau de segurança estaria relacionado com a distância entre o ponto que representa as deformações nas zonas

críticas da peça e a CLC, ou seja, a distancia AA', conforme a figura 3.5.

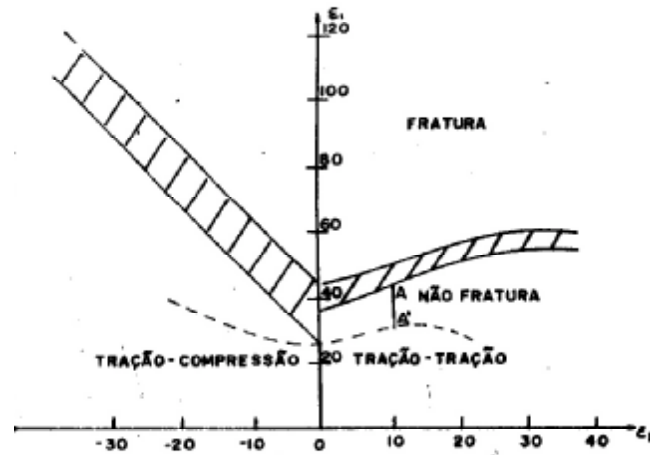


Figura 3.5 – Curva limite de conformação esquemática – Ferran, 1975.

Estas curvas são aplicadas com aparente sucesso em algumas indústrias siderúrgicas produtoras de chapa e também em indústrias consumidoras de chapa de grande porte como, por exemplo, os setores de eletrodomésticos e de automóveis na Europa, USA e Japão; porém ao comparar os resultados experimentais e os critérios adotados nos diversos laboratórios para traçar as curvas, aparecem divergências consideráveis. Esta falta de coerência é em função da noção real da CLC e a sua determinação experimental apresentarem vários problemas, sendo alguns dos mais importantes indicados a seguir:

- Depende a CLC de um material de suas características estruturais?
- Qual é o melhor critério para definir as deformações ϵ_1 e ϵ_2 ; fratura, estrição localizada ou início de estrição localizada?
- Geralmente as CLCs, são obtidas mediante ensaios em que as direções das deformações principais não mudam. No entanto, nas condições de estamparia, as direções das deformações principais podem variar durante o processo. Neste caso, qual é a relevância da curva para prever a capacidade de deformação do material na prensa?

Keeler, (1974), num trabalho de revisão esclareceu alguns destes problemas. Em particular sugere que se pode distinguir três tipos de curvas limites de conformação:

O primeiro tipo, denominado curva limite de conformação à fratura, é obtido por ensaios de conformação industriais ou de laboratório, utilizando-se punções rígidos e medindo as deformações nas zonas de início de fratura.

O segundo tipo, designado como curva limite de conformação a estrição, é obtido também por ensaios de conformação industriais ou de laboratório, utilizando-se punções rígidos e tomando como pontos a serem representados os valores das deformações correspondentes ao início de estrição visível ou aparição de uma maior rugosidade.

O terceiro tipo de curva é a obtida no laboratório com ensaios de deformação num plano "in plane stretching". Neste caso, mediante uma técnica adequada, consegue-se evitar os efeitos do atrito, da curvatura do punção e da pressão, que coexistem quando se utiliza um punção. Os valores das deformações ϵ_1 e ϵ_2 máximas atingidas são menores que as obtidas quando se utiliza um punção rígido. O interesse da curva "in plane stretching" é teórico, servindo de base ao estabelecimento de novos modelos de escoamento plástico, enquanto que as curvas obtidas com punção rígido aproximam-se mais das condições reais de conformação industrial.

As CLCs apenas dão os valores máximos das deformações permissíveis numa chapa, porém, não fornecem nenhuma informação de como se atingem estas deformações, nem do tipo do gradiente das deformações ao redor de um ponto severamente deformado. É também importante assinalar que um aço acalmado ao alumínio (qualidade estampagem extra profunda) e um aço efervescente (qualidade estampagem média), sendo os dois da mesma espessura, apresentam CLC na mesma faixa, apesar de terem diferentes aptidões à conformação. Isto significa que desenvolvem diferentes gradientes de deformação durante o processo, apresentando o aço qualidade estampagem extra profunda uma distribuição de deformações final mais homogênea.

A estampagem depende principalmente do limite de deformação do material e da uniformidade na distribuição das deformações. A deformação limite é sensível ao

estado de deformação do material. A representação mais utilizada do limite de conformação é feita pela CLC, onde a sua forma e o seu nível proporcionam um importante guia para a conformação.

Através das curvas é possível comparar as deformações localizadas, de algumas regiões da chapa estampada, com o limite de deformação do material. No caso de falha do material é possível, portanto, identificar o modo de deformação e as possíveis causas do defeito. As causas mais comuns estão relacionadas com variáveis de processo, de projeto e material. Entre as causas de processo, destacam-se problemas de lubrificação, ajuste de ferramental, e mão-de-obra. As principais causas de projeto estão relacionadas com as formas do produto final, dos desenhos da matriz, do punção e do anti-rugas. Quanto às variáveis do material, destacam-se a presença de patamar de escoamento no metal, limites de escoamento e resistência não apropriados, baixa ductilidade, além de valores não apropriados do coeficiente de encruamento n , e anisotropia normal (coeficiente de anisotropia de Lankford R).

Existem dois tipos de curvas limite de conformação (CLC) quanto às técnicas de obtenção: as experimentais e as teóricas. A obtenção das curvas experimentais é feita através de ensaios de chapas em laboratório. As curvas teóricas são estimadas usando-se algumas das propriedades mecânicas do material, análises de critérios de instabilidade e superfícies de fluência.

A diferença entre os vários métodos para se determinar a CLC experimental consiste no tipo de ensaio utilizado para obter os pontos da curva. Os métodos mais comuns são: o método de IRSID, figura 3.6, e o método de Nakajima, figura 3.7. O método IRSID utiliza corpos-de-prova de tração com entalhe e ensaios de embutimento, como por exemplo, Erichsen, Swift. O método de Nakajima, que utiliza apenas uma ferramenta, é o mais simples e o mais usado. O ensaio de laboratório consiste na marcação sobre a superfície da chapa de uma rede de círculos, seguida de teste mecânico até a fratura ou a estricção. Neste teste, diferentes formatos de chapa são deformados em uma prensa hidráulica sob a ação de um punção sólido ou do próprio óleo. Os círculos são deformados, transformando-os em elipses ou em círculos de maior diâmetro. Pode-se facilmente, então, determinar as deformações ao longo da superfície medindo os diâmetros maiores e menores das elipses. As

deformações obtidas na fratura (ou estrição) são plotadas em um gráfico, tendo como eixo da abscissa a menor deformação e da ordenada a maior deformação principal verdadeira. A característica fundamental do método é que todos os pontos obtidos no teste para um mesmo material estão sobre a mesma curva limite de conformação daquele material. No caso do ensaio até a ruptura têm-se a CLC à ruptura, e no caso de ensaio até a estrição têm-se a CLC à estrição.

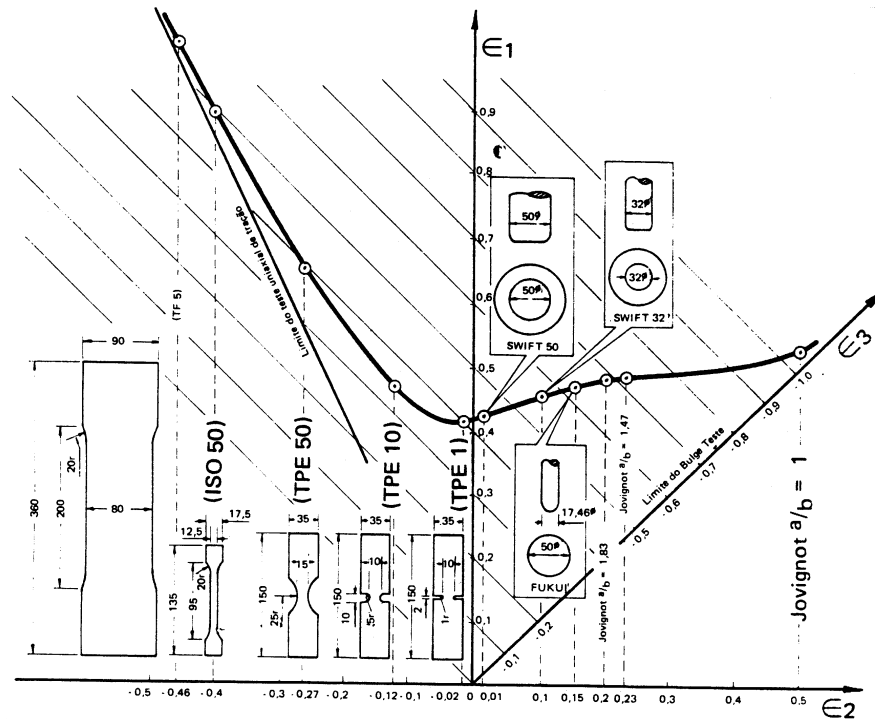


Figura 3.6 – Curva limite de conformação de acordo com o método IRSID – Usiminas, 1999.

Para obtenção da CLC, o laboratório da USIMINAS utiliza um procedimento experimental baseado no método Nakajima. Diversos pontos da curva são obtidos variando-se as dimensões dos corpos-de-prova em 10 mm na largura (de 180x40 mm até 180x180 mm). Cada dimensão do corpo-de-prova corresponde a um ponto na curva CLC. Cada ponto representa a média aritmética do ensaio de três amostras de mesma dimensão. Uma vez marcada a rede de círculos e estampada a peça até a ruptura, é feita a medição das deformações. Deve-se escolher uma elipse de forma que a fratura passe por seu centro, caso contrário a elipse fica desfigurada na forma de um ovóide e as medidas não serão exatas, figura 3.8.

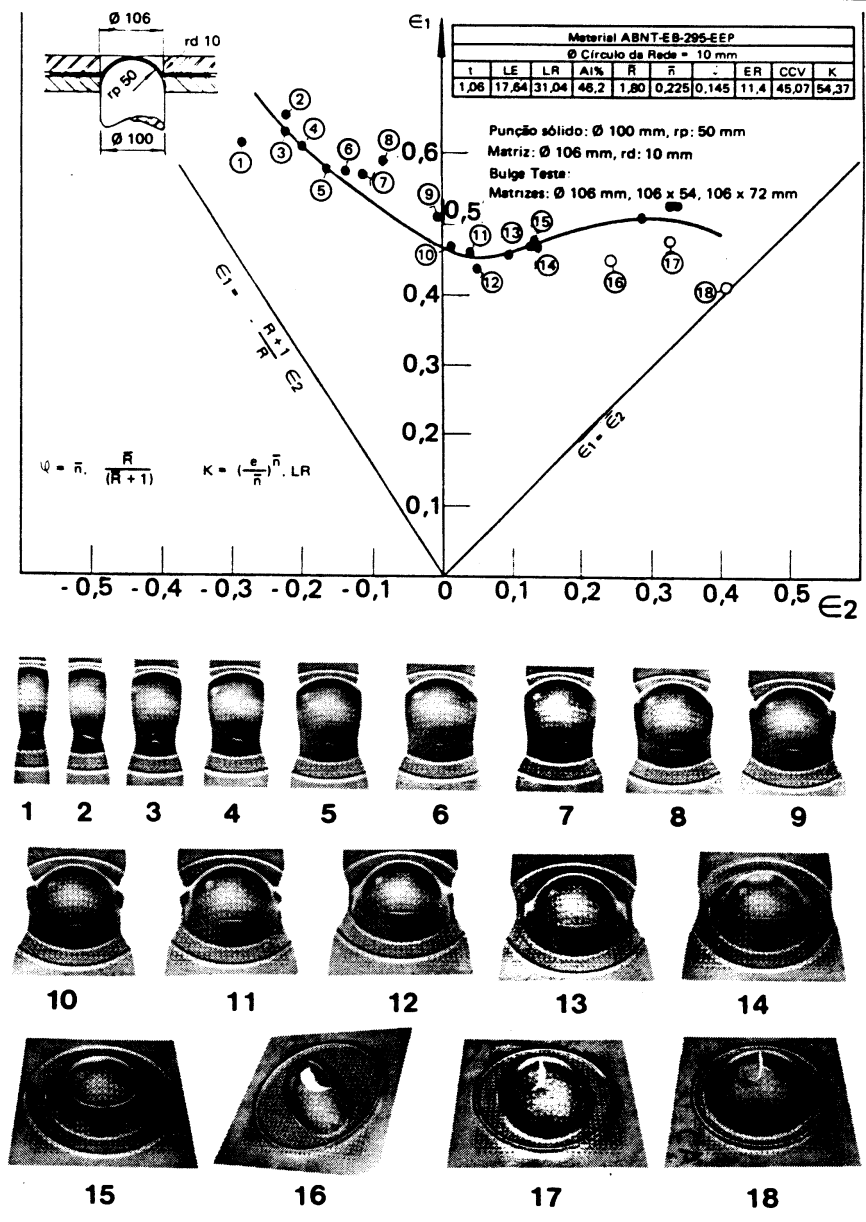


Figura 3.7 – Curva limite de conformação. Método Nakajima – Usiminas, 1999.

Escolhida uma elipse adequada para a medição das deformações, tem-se no diâmetro maior da elipse a maior deformação principal convencional, e no menor diâmetro a menor deformação principal convencional. As deformações convencionais e as verdadeiras são calculadas através das seguintes fórmulas:

maior deformação:

convencional
$$e_1 = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (3.2)$$

$$\text{verdadeira} \quad \varepsilon_1 = \ln(1 + e_1) \quad (3.3)$$

menor deformação:

$$\text{convencional} \quad e_2 = \frac{D_2 - D_0}{D_0} \quad (3.4)$$

$$\text{verdadeira} \quad \varepsilon_2 = \ln(1 + e_2) \quad (3.5)$$

onde:

- D_0 é o diâmetro inicial do círculo.
- D_1 é o diâmetro maior final da elipse.
- D_2 é o diâmetro menor final da elipse.

Para medir os diâmetros e calcular as deformações, são utilizados escalas graduadas ou, paquímetros. No caso do uso da escala, a medida do diâmetro final maior da elipse é acrescida da fratura. Para fazer o cálculo correto da deformação utiliza-se medir o comprimento final de cada borda da elipse, entre a fratura e a ponta da curva. O cálculo é feito com relação ao diâmetro inicial através das equações (3.6), (3.7) e (3.8), onde D_{1F} e D_{2F} são os comprimentos entre a fratura e as pontas da elipse na direção de maior deformação:

deformação de um lado da elipse:

$$e_{1F} = \frac{D_{1F} - D_0}{D_0} \quad (3.6)$$

deformação do segundo lado da elipse:

$$e_{2F} = \frac{D_{2F} - D_0}{D_0} \quad (3.7)$$

deformação do diâmetro maior da elipse é:

$$e_1 = e_{1F} + e_{2F} + 1 = \frac{D_{1F} - D_0}{D_0} + \frac{D_{2F} - D_0}{D_0} + \frac{D_0}{D_0} =$$

$$\frac{D_{1F} + D_{2F} - D_0}{D_0} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \quad (3.8)$$

O diâmetro menor da elipse não é alterado pela presença da fratura, sendo possível medir a deformação diretamente. Depois da medida das deformações de engenharia deve-se fazer a conversão das deformações para a unidade verdadeira e assim plotar a CLC experimental.

A figura 3.9 mostra a CLC para vários materiais. O coeficiente de sensibilidade à taxa de deformação é bastante baixo para a maioria dos metais à temperatura ambiente, entre 0,0 e 0,03 segundo Hosford, (1983), e, portanto, tem pouca influência nos processos de estampagem.

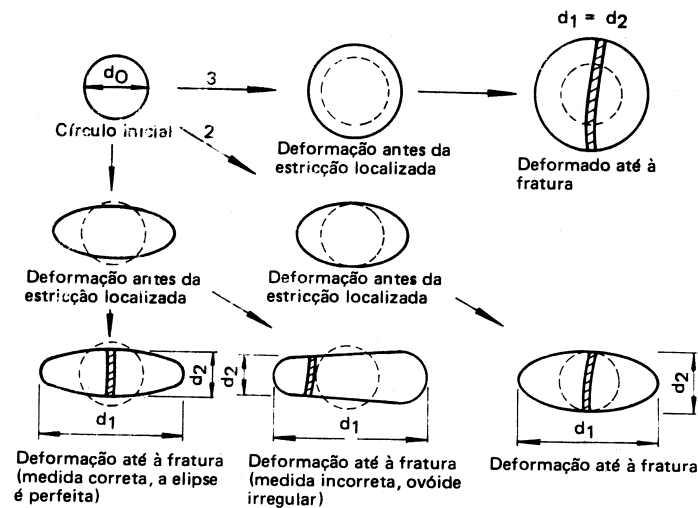


Figura 3.8 – Medida da rede de círculos para obtenção das deformações principais - Usiminas, 1999.

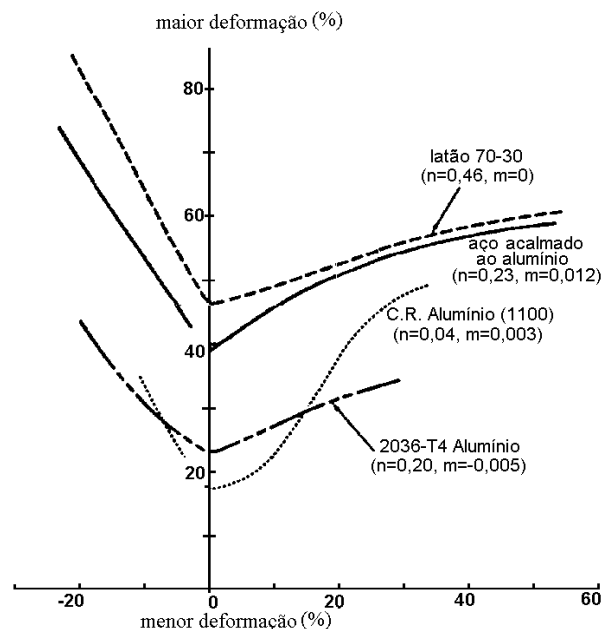


Figura 3.9 - CLC para diferentes materiais – Hosford, 1983.

A interpretação da CLC é direta. Para produzir uma peça não fraturada, todos as combinações de pontos ε_1 e ε_2 da chapa precisam estar na região de segurança, abaixo da linha limite. Contudo, mesmo conseguindo uma peça sem ruptura, alguns pontos podem se aproximar da curva limite. Em tal caso, a CLC proporciona um aviso indicando um problema em potencial, porque uma pequena mudança nas condições de operação ou nas propriedades materiais poderia resultar no deslocamento do par de deformação (ε_1 e ε_2), para a região de falha. Em uma circunstância como esta, fica clara a necessidade de mudança nas condições de estampagem, como por exemplo, alteração das condições de lubrificação, da geometria do ferramental ou das propriedades do material. Um exemplo típico do uso da CLC, é citado por Haberfield e Boyles, (1975). A figura 3.10 representa o caso de um processo de estampagem em que a deformação crítica, ponto A, se aproxima da região de falha. Pela mudança das condições de estampagem esse par de deformação pode ser transferido para uma região mais segura, ponto B. Apesar do aumento total da deformação, deste exemplo, o estado de deformação foi afastado da curva limite para uma região mais segura.

Outro exemplo de uso das CLCs é a de avaliação do material utilizado. Mesmo que diferentes materiais possam ter semelhantes CLCs, a distribuição das deformações pela chapa será ditada por algumas propriedades tais como o coeficiente de anisotropia, R de Lankford, o coeficiente de encruamento n , ou espessura da chapa. Portanto, se o estado de deformação de um material se aproxima perigosamente da curva limite, a troca do material ou da espessura da chapa pode propiciar uma melhor distribuição das deformações para uma mesma aplicação. Isto está exemplificado na figura 3.10, onde a região X corresponde ao estado de deformação alcançado por um material com ($R=1,4$) e ($n=0,226$), e a região Y é relativa a outro material com ($R=1,8$) e ($n=0,236$). As CLCs dos dois materiais são semelhantes, e estão dentro da faixa da figura 3.10. Considerando que os materiais tenham a mesma espessura, fica claro que a condição conseguida para o material Y é mais segura do que a do material X. Embora este exemplo mostre que a troca do material possibilita a redução das deformações do local crítico, o mesmo efeito poderia ser conseguido com a alteração da geometria do ferramental ou da lubrificação.

Existem alguns parâmetros que alteram as curvas limite. Entre eles podemos destacar o efeito da espessura da chapa, a qualidade e limpeza do material, a orientação da amostra, a trajetória de deformação, a pré-deformação a frio, o coeficiente de encruamento n e o tamanho da malha de círculos usada para a medição das deformações.

Haberfield e Boyles, (1975), demonstram a influência do tamanho das inclusões no nível da CLC. Segundo o autor, reduções no nível da CLC dos aços baixo carbono ocorrem na presença de inclusões não metálicas de comprimento superior a 0,3 mm e espessura de 0,05 mm. Para inclusões de tamanho inferior à estes valores, a estampabilidade destes aços não é alterada.

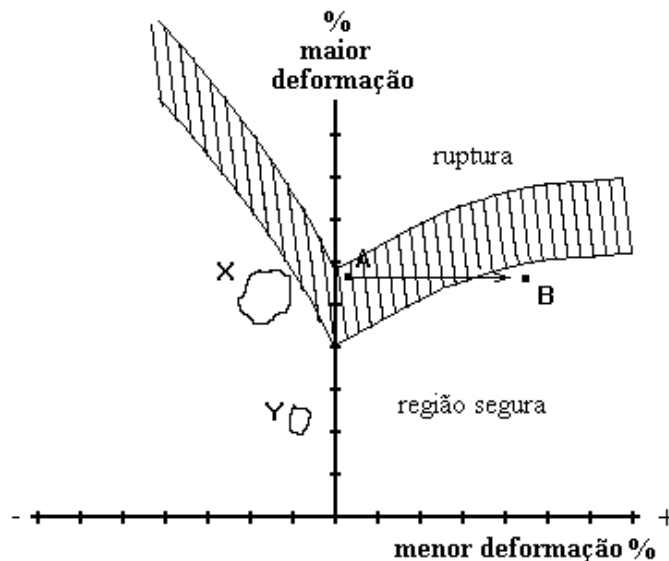


Figura 3.10 - CLC com limite superior de ruptura e inferior de segurança - Haberfield e Boyles, 1975.

No mesmo trabalho é relatado que o mesmo não ocorre quando se trata de aços de alta resistência e baixa liga, quando a maior deformação principal está alinhada perpendicularmente à direção de laminação. A figura 3.11 ilustra a alteração do nível da CLC com a inclusão não metálica.

A influência da qualidade do material é claramente devida à mudança de vários parâmetros que influenciam na resistência mecânica e na distribuição das deformações no material. A figura 3.12 ilustra a diferença entre as curvas CLCs para dois materiais diferentes, o aço USI-STAR-350 (aço refosforado, da classe de 350 MPa de resistência) e o aço USI-IF (interstitial free).

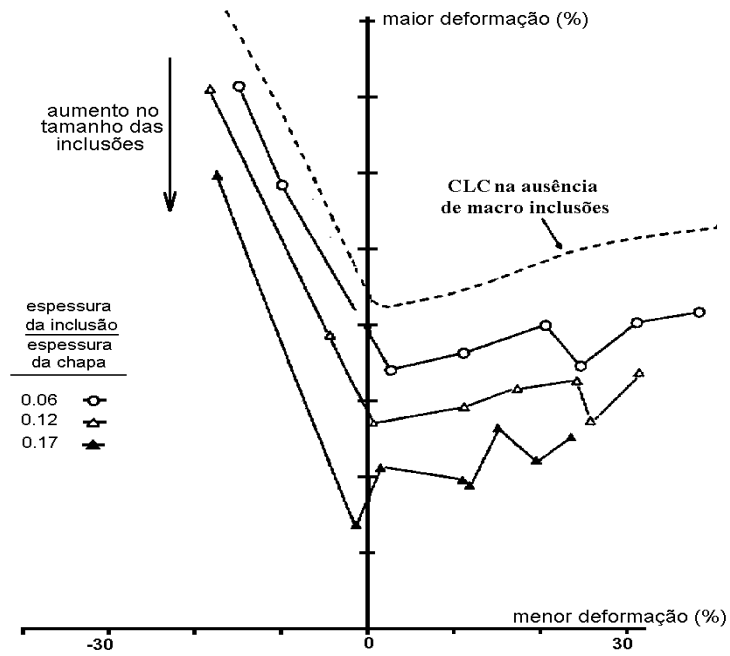


Figura 3.11 - Influência do tamanho das inclusões no nível da CLC para um aço qualidade estampagem extra profunda - Haberfield e Boyles, 1975.

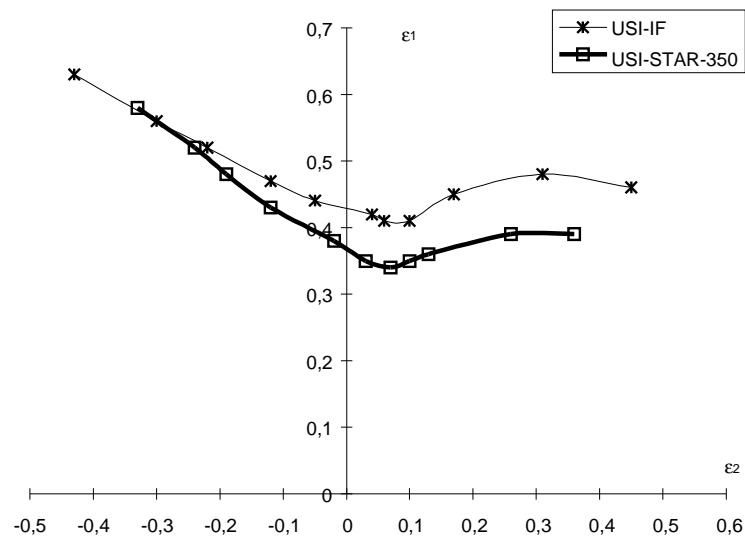


Figura 3.12 - Nível da CLC para diferentes aços. Espessura: 0,8 mm.

Vários trabalhos mostram que a conformação de chapas é fortemente influenciada pelas trajetórias de deformação. Rocha e Jalinier, (1983), analisaram o comportamento das curvas limite, em trajetórias simples e complexas, usando modelos teóricos baseados em estrição localizada devido a heterogeneidades

iniciais das chapas. Instabilidade prematura é observada para trajetórias de deformação consistindo inicialmente de uma deformação biaxial seguida por um estado de tensão uniaxial. Em sentido oposto, uma trajetória consistindo inicialmente de um estado de tensão uniaxial seguido por estiramento biaxial aumenta consideravelmente o limite de deformação. Em todos os casos, a mudança na trajetória de deformação para um estado de deformação plana resulta em uma significativa perda de estabilidade do material. Semelhantes resultados foram encontrados por Haberfield e Boyles, (1975), onde em geral, a deformação total no momento da fratura é menor quando um estado plano de deformação é selecionado como sendo a deformação subsequente em um processo de múltiplos estágios. As figuras 3.13 e 3.14 ilustram os comportamentos descritos anteriormente.

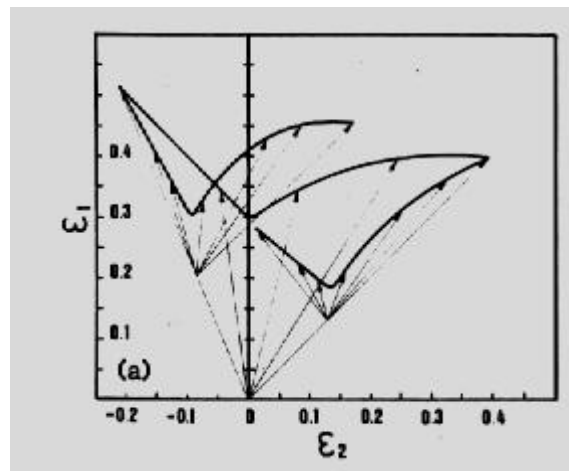


Figura 3.13 - Mudanças da CLC, obtida para uma trajetória linear (curva central), para uma onde as deformações preliminares são inicialmente de embutimento (curva à esquerda) ou de estiramento (curva à direita), seguidas por diferentes razões das deformações no plano da chapa - Rocha e Jalinier, 1983.

Pode-se observar, na figura 3.13, a mudança da CLC obtida com uma trajetória de deformação linear (curva central), para aquelas onde houve uma variação na primeira trajetória de deformação. Quando a trajetória de deformação é composta inicialmente por um embutimento, seguido por deformações proporcionais no plano da chapa, ocorre a elevação da CLC (curva à esquerda da original). Quando a trajetória inicial é de estiramento biaxial, ocorre a diminuição da curva (curva à direita).

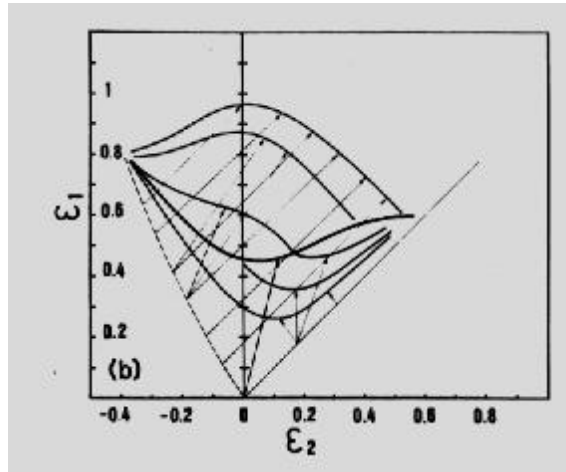


Figura 3.14 - Diferentes CLCs obtidas por diferentes trajetórias de deformação - Rocha e Jalinier, 1983.

Pode-se observar na figura 3.14 a mudança da CLC com a variação da segunda trajetória de deformação. Quando a segunda trajetória de deformação varia de embutimento para estiramento ocorre uma elevação da CLC. Este efeito pode ser observado do lado direito da curva da figura 3.14. O mesmo efeito ocorre quando a primeira trajetória é de embutimento e a segunda trajetória tende ao estiramento biaxial (lado esquerdo da figura 3.14).

Pode ser notado nos experimentos de Woodthorpe e Pearce, (1969), na região positiva de maior e menor deformação, que o trabalho a frio diminui o nível das curvas limite, assim como diminui o coeficiente de encruamento n , mas que não tem nenhum efeito sobre o coeficiente de anisotropia de Lankford. O trabalho a frio sobre o material provoca ainda a alteração da forma da CLC, tornando os picos menores até eventualmente desaparecer, como ilustrado na figura 3.15.

O aumento do coeficiente de encruamento n e, ou, aumento da espessura da chapa do material, provocam a elevação do nível das CLCs. Este efeito está ilustrado na figura 3.16, para aços baixo carbono, onde o índice FLD (Forming Limit Diagram) é o nível da maior deformação principal (ϵ_1) no estado plano de deformação ($\epsilon_2=0$), ou seja, interseção da curva limite com o eixo vertical do gráfico.

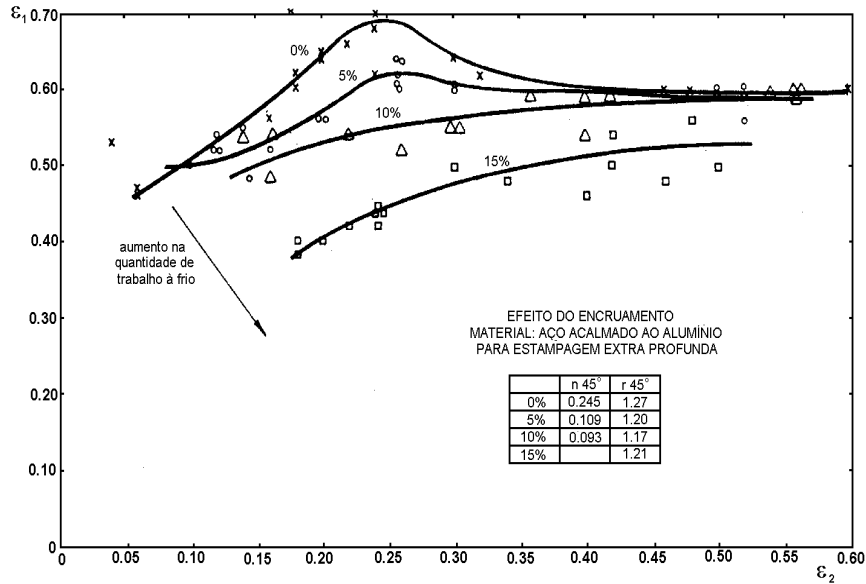


Figura 3.15 - Efeito do trabalho a frio no nível da curva limite e no coeficiente de encruamento n – Woodthorpe e Pearce, 1969.

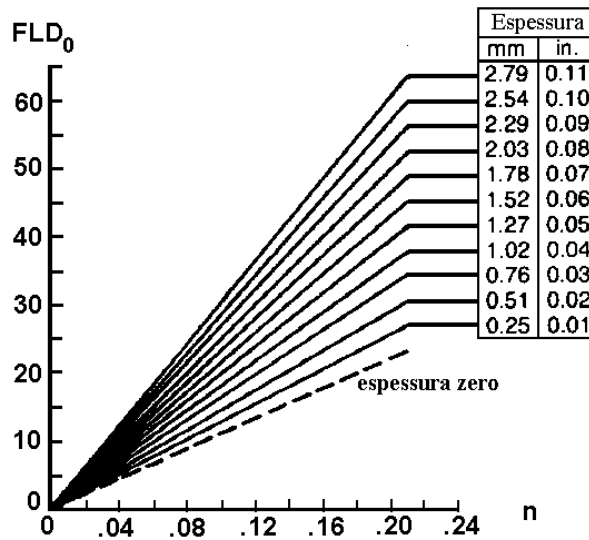


Figura 3.16 - Efeito do expoente de encruamento n e espessura da chapa na curva limite de conformação para aço baixo carbono - Hosford, 1983.

O tamanho do círculo usado na malha de marcação eletrolítica e a escolha da elipse deformada que será medida para se traçar a curva, têm grande importância na curva limite, Parniere e Sanz, (1976). A figura 3.17 apresenta a variação das deformações principais de acordo com o diâmetro dos círculos de marcação eletrolítica, para diferentes tipos de teste. Pode ser observado que a variação do diâmetro tem efeito sobre as maiores deformações principais (ϵ_1), mas nenhum efeito

sobre as menores deformações (ε_2). Isso pode ser explicado pela direção da fratura (estricção). Como a fratura é perpendicular à direção da deformação (ε_1), tem-se deformações localizadas na estrição e deformações uniformes ao longo do diâmetro da elipse. As deformações localizadas na estrição não variam com o diâmetro do círculo, mas com maiores círculos esta deformação localizada torna-se menor em relação à deformação total (uniforme e local) nesta direção. Considerando que a variação do comprimento final (ΔL) para diferentes diâmetros é a mesma, diâmetros iniciais maiores produzem menores deformações (Eq. (3.2)). Portanto as deformações calculadas utilizando círculos de comprimento iniciais maiores diminuem o nível da CLC. Como a fratura é paralela à direção da menor deformação (ε_2) e, normalmente, atravessa completamente a elipse, a variação do diâmetro inicial do círculo não produz o mesmo efeito sobre esta deformação.

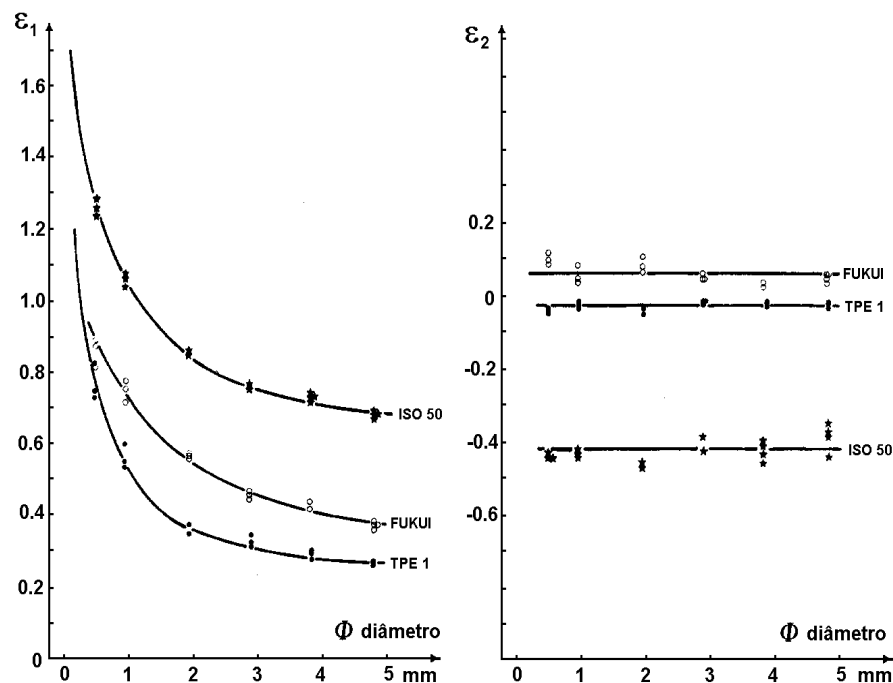


Figura 3.17 - Influência do diâmetro dos círculos da malha de marcação eletrolítica sobre a medida das deformações principais da CLC – Parniere e Sanz, 1976.

Parniere e Sanz, (1976), analisam ainda qual seria a CLC real se fosse possível levantar as curvas utilizando diâmetros infinitamente pequenos. Baseando suas considerações na constância de volume e em que a deformação na espessura

também não é influenciada pelo diâmetro inicial do círculo, os pesquisadores levantaram as curvas mostradas nas figuras 3.18 e 3.19.

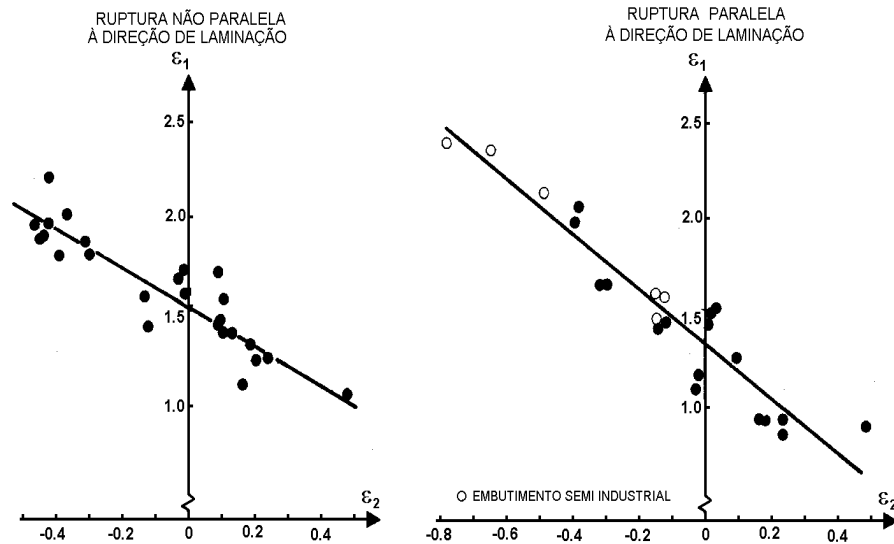


Figura 3.18 - CLC intrínseca para um aço doce acalmado ao alumínio – Parniere e Sanz, 1976.

Neste caso, as maiores deformações principais (ϵ_1), variam linearmente com as menores deformações principais (ϵ_2). A figura 3.19 ilustra que a medida que se diminuir o diâmetro da rede de círculos obtém-se um aumento da Curva Limite de Conformação.

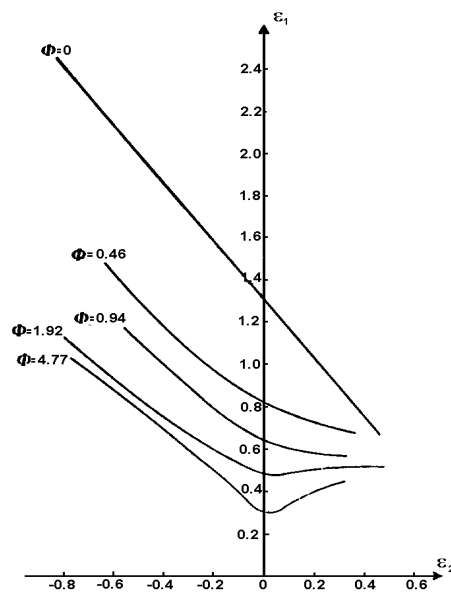


Figura 3.19 - Variação da CLC em função do tamanho do círculo de medida – Parniere e Sanz, 1976.

Existem vários métodos de escolha da elipse a ser medida no levantamento da CLC. Woodthorpe e Pearce, (1969), levantam algumas possibilidades. O importante na escolha da elipse é observar que a ruptura esteja localizada no seu centro e que ela, a elipse, possua simetria em relação à fratura, como explicado anteriormente.

Como dito anteriormente, a estampabilidade depende do limite de deformação e também da distribuição das deformações ao longo do material. Para avaliar a resposta de um dado material à deformação sobre um processo combinado de estiramento e estampagem profunda, além do uso das CLCs, outros tipos de teste têm sido desenvolvidos. Haberfield e Boyles, (1975), e Chilcott, (1982), pesquisam o chamado "Stretch-Draw test". Este método relaciona a estampabilidade de uma chapa com a mudança nos valores do coeficiente de encruamento n , coeficiente de anisotropia, R de Lankford e a espessura considerada.

Uma limitação importante do uso das CLCs nos processos de estampagem é que estas curvas não indicam a variação das deformações ao longo da superfície da chapa. As curvas indicam o limite de deformação, mas é a marcação da malha de círculos na chapa que indica a distribuição das deformações. Portanto, a CLC não prediz, para o projetista, o desempenho do material. Diferentes materiais podem ter CLCs semelhantes como indicado na figura 3.9. No entanto, diferentes valores de anisotropia e do coeficiente de encruamento, produzirão diferentes distribuições das deformações. Em tal circunstância, o material que possui a melhor distribuição desenvolverá menores combinações de deformação em áreas críticas no final da estampagem, como já exemplificado na figura 3.10.

Como já mencionado, as CLCs podem ser obtidas em laboratório ou através de simulações teóricas que considerem algumas poucas variáveis. Há a necessidade de avaliação de diversos parâmetros durante o levantamento da CLC no ensaio de laboratório. A CLC assim obtida é função não apenas do material de que é feita a chapa, mas também, de variáveis como espessura do material, eficiência da lubrificação no ensaio, das trajetórias de conformação durante o ensaio, marcação e medição da malha de círculos, etc. Portanto, a CLC de laboratório é específica para um determinado ensaio.

Um outro ponto importante da CLC experimental refere-se a sua dependência com relação à trajetória de deformação, como discutido anteriormente. Quando a trajetória de deformação é composta, estas curvas experimentais não se aplicam apropriadamente. O modo de deformação na parede é inicialmente de embutimento, ou seja, a $\varepsilon_1 > 0$ e $\varepsilon_2 < 0$, e depois ocorre um estado plano de deformação, onde a deformação circunferencial é nula. Neste caso, o limite de deformação do material é inferior à CLC obtida com trajetória simples de deformação, ver figura 3.13.

Ainda como observação importante relacionada à CLC experimental devem ser considerados os erros laboratoriais e a imprecisão dos métodos usados para o seu estabelecimento. No caso do método Nakajima algumas fontes de erro da CLC são causadas pela impressão da malha de círculos, pela medição das deformações registradas na malha após a conformação, pelo critério de escolha do círculo apropriado de medida da falha do material e pela limitação do diâmetro dos círculos usados na malha. Outro fator a ser considerado é a interferência humana em todas as fontes relacionadas anteriormente.

Pode-se concluir, a partir do que já foi mencionado, que as curvas limite de conformação, por si só, não predizem a estampabilidade de um material ao final do processo, e que uma imagem de como as deformações se distribuem na chapa proporcionaria melhores informações para as necessidades dos projetistas e engenheiros. No entanto, pode-se utilizar as CLCs, em parceria com as técnicas de simulação numérica, como indicadores do desempenho do material, produzindo assim não apenas uma imagem final mas uma imagem dinâmica ao longo do processo. Neste caso a estampabilidade do material seria avaliada em cada instante durante a conformação. Com o aperfeiçoamento dos recursos computacionais e dos programas de simulação, torna-se cada vez mais viável este tipo de análise.

Além das curvas limite de conformação experimentais, existem outros métodos para se considerar a ruptura do material metálico, ou sua deformação limite antes da falha, durante processos de conformação. Várias propostas têm sido estudadas por diversos autores. Hosford e Caddell, (1983), descrevem uma teoria para formação de estricções localizadas, no estado biaxial de tensão. Swift, (1952), desenvolveu um critério teórico para a instabilidade plástica sob um estado plano de

tensão, e a formação de estrição difusa. Takuda et al, (1997), apresenta um critério para fratura dúctil. Na realidade, todos estes critérios tentam prever, analiticamente, a instabilidade mecânica do material, e são posteriormente comparados com os valores de curvas limite, obtidas experimentalmente.

3.7 Impressão das linhas de deformação

Conforme Zaat, (1957), para investigar o comportamento do metal durante a deformação, é necessário um método para dimensionar a deformação de seus componentes e muitas tentativas foram feitas para formular um processo capaz. Como a equação da continuidade é aplicável à deformação plástica, somente duas componentes de deformação devem ser medidas visto que a terceira componente depende das outras duas. Se um elemento de volume retangular com um comprimento l_0 , uma largura w_0 , e uma espessura t_0 , é deformado em outros elementos retangulares com um comprimento l_f , uma largura w_f e uma altura t_f . Então, de acordo com a equação da continuidade,

$$l_0 w_0 t_0 = l_f w_f t_f \quad (3.9)$$

Os logaritmos naturais dão a equação:

$$\log_n l_f/l_0 + \log_n w_f/w_0 + \log_n t_f/t_0 = 0, \text{ ou}$$

$$S1 + S2 + S3 = 0 \quad (3.10)$$

Conseqüentemente, se as deformações logarítmicas são consideradas, a soma das três deformações principais é zero e, portanto, medindo dois componentes de deformação é suficiente para conhecer as três componentes.

De forma a estar em uma posição de determinar duas componentes de deformação, deve-se aplicar uma rede de linhas favorável sobre a chapa de aço. Adicionalmente, a rede de malhas deve possuir o seguinte:

- 1) Deve aderir firmemente ao material;
- 2) Deve acompanhar todas as deformações sem quebrar ou desaparecer;
- 3) As linhas devem ser claramente visíveis;

- 4) As linhas devem ter contorno preciso e precisam permanecer assim durante a deformação plástica;
- 5) A malha não deformada deve manter suas dimensões e deve ser aplicada precisamente sobre o metal, de forma que as várias dimensões não precisem ser dimensionadas repetidamente antes de se iniciar a deformação;
- 6) As linhas não podem causar efeito de nó;
- 7) O método de aplicação não pode causar corrosão na superfície do metal;
- 8) A espessura da malha deve ser pequena em comparação à espessura da chapa;
- 9) O método de aplicação deve ser simples.

Abaixo se encontram alguns processos possíveis para impressão da malha e os respectivos comentários:

- Riscar/marcar com objeto de ponta (prego, riscador...) ou utilizar graxa/parafina – processo demorado e não preciso que não garante as condições acima;
- Utilizar tinta de impressão – a malha pode desaparecer quando submetida à deformação;
- Aplicação eletroquímica utilizando-se estêncil – as linhas não são consistentes já que são produto de pontos originados do estêncil. Um resultado melhor pode ser conseguido utilizando-se estêncil eletrônico que são feitos de borracha, mas também por este método não se garante resultados consistentes;
- Utilização de silk-screen – idem aplicação eletroquímica;
- Processo Kodak “Transferrotype” – semelhante ao processo fotográfico, porém, demora muito e requer muita experiência, sendo que o resultado final não é muito bom em função da baixa adesão e que provoca excessiva corrosão no metal;
- Laser - que é atualmente o mais moderno, porém ainda muito caro.

Na verdade existem diversos métodos que podem ser utilizados, todos, entretanto com suas desvantagens. O importante, entretanto é que se utilize um

método capaz de garantir a consistência dos resultados para as condições específicas do ensaio. Neste caso considera-se a experiência do executor, o conhecimento deste frente ao método utilizado, o conforto com relação ao método utilizado.

De forma a obter informações da deformação que ocorre durante a conformação plástica, uma adequada malha, aplicada sobre a superfície do metal a ser deformado, pode ser de grande ajuda.

Ainda segundo Keeler, (1968), se uma chapa de metal pode ou não ser conformada sem falha depende das propriedades do material, condições superficiais, tamanho e forma do blank, lubrificação, velocidade da prensa, pressão do prensa chapas, design do punção e da matriz, e muitos outros fatores conhecidos e desconhecidos.

A quantia de deformação determina quando o metal falhará. As áreas da chapa que estão sujeitas às maiores deformações e por conseqüência as que estão mais sujeitas à fratura, são identificadas e marcadas através de linhas retas e/ou círculos que se deformam quando solicitados. As linhas de deformação são claramente visíveis depois da deformação.

O mais importante fator de qualquer sistema de linhas é o espaçamento entre as linhas. Visto que todo o material entre as linhas adjacentes é considerado como uma unidade, qualquer variação de deformação de ponto a ponto entre as linhas é indetectável. Somente uma média de deformação é obtida. Portanto as linhas precisam ser suficientemente perto uma das outras para que as diferenças localizadas possam ser detectadas.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Generalidades

Como já discutido anteriormente, o objetivo deste estudo foi a determinação das características e propriedades fundamentais do aço baixo teor de carbono de fornecimento nacional e importado, com a determinação do índice de anisotropia, R de Lankford, coeficiente de encruamento, n , além do levantamento da curva limite de conformação e testes de dobramento na matéria prima do suporte da coluna de direção de automóveis. O suporte, bem como a matéria prima utilizada em sua confecção são atualmente importados e procurou-se determinar as suas propriedades através de ensaios práticos fundamentais em máquina de tração e em análises simulativas práticas (curva CLC) visando a nacionalização da produção desse componente.

4.2 Materiais utilizados

Inicialmente foram obtidas junto à empresa produtora, amostras de blanks utilizados na fabricação do suporte da coluna de direção de automóveis. Este material, oriundo do fornecedor alemão Bilstein GmbH & Co. KG, foi especificado como St 4 LG BK, segundo norma DIN 1624. Através da norma, podem ser obtidas algumas informações como composição química e propriedades mecânicas, que determinam a produção deste material conforme sua especificação. A norma, porém, estabelece uma faixa de valores para cada propriedade do material, ou seja, um limite mínimo e máximo para a propriedade específica que não determina, de forma

definitiva e completa, o comportamento do material sob uma determinada condição de trabalho. Este fato permite conhecer de forma genérica as propriedades do material, o que gera a necessidade de realizar-se testes adicionais para levantar com maior detalhamento as características do material e, desta forma, avaliar suas condições de uso.

Obteve-se amostras de chapas metálicas nacionais com especificação semelhante ao aço importado. Buscou-se desta forma um material nacional similar, conforme norma NBR 5007 G4 RL antes da realização dos ensaios de tração, uma vez que seria importante a realização destes testes em conjunto, ou seja, realizar todos os ensaios ligados ao mesmo equipamento (máquina de tração) em uma única bateria de testes. O objetivo da realização dos testes do aço nacional juntamente com o material importado foi o de atestar ao final do projeto, o seu potencial como possível substituto do aço importado, visando a nacionalização da produção do componente investigado, conforme mencionado anteriormente.

O material nacional fornecido pela Brasmetal foi especificado segundo a norma acima, e entende-se como chapa de aço baixo carbono (máx. 0,08%) relaminada a frio assim como o material importado. Ambas as chapas com 3,0 mm de espessura.

4.3 Ensaio metalográficos

As análises metalográficas foram realizadas no Laboratório de Materiais, no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR.

A preparação do corpo de prova seguiu o procedimento padrão, de forma geral: embutimento em baquelite, sob condições controladas de pressão e temperatura, lixamento, em que utilizou-se quatro tipos de lixa com diferentes granulagens, polimento e o ataque químico, onde a amostra foi mergulhada por alguns segundos em nital (solução de ácido nítrico e álcool). Finalizado o ataque químico encaminhou-se a amostra ao microscópio, onde observou-se então sua microestrutura.

Esta análise realizou-se com dois objetivos principais. O primeiro visando comparar a morfologia dos grãos dos materiais nacional e importado, o que influencia diretamente as propriedades mecânicas de cada aço e, conseqüentemente sua estampabilidade. O segundo objetivo foi a identificação da direção de laminação das chapas, que se necessitava conhecer, uma vez que os ensaios de tração são realizados com corpos de prova recortados formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação do material.

A direção de laminação é caracterizada pela forma alongada dos grãos do material, sendo este o sentido que a tira percorreu entre os rolos laminadores. Esta forma alongada dos grãos deve-se ao encruamento (achatamento) sofrido pelo material durante o processo, o que pode ser observado em aços laminados a frio ou relaminados, como no estudo em questão. Aços laminados a quente não evidenciam estas características, uma vez que, por se tratar de um processo com o material aquecido, o mesmo sofre o fenômeno de recristalização dinâmica, fazendo com que os grãos achatados retomem um formato equiaxial, porém mais refinados que o formato inicial.

Para identificar o alongamento dos grãos e, assim determinar a direção de laminação do material, a metalografia foi realizada nas seções transversal e longitudinal de uma amostra retangular retirada do “blank” original. Esta amostra foi retirada cuidadosamente, de forma que ficasse bem alinhada com os eixos que corresponderiam aos ângulos de 0°, 45° e 90° da direção de laminação.

4.4 Realização do ensaio de tração para determinação das propriedades fundamentais

4.4.1 Preparação dos corpos de prova

Identificada a direção de laminação do material, a etapa seguinte correspondeu à preparação dos corpos de prova para os ensaios de tração.

O dimensionamento e o formato adotados para os corpos de prova foram tomados a partir das normas ABNT NBR6673, ASTM E 646 e DIN EM 10 002-1 que descrevem o ensaio. Desta forma convencionou-se a utilização dos corpos de prova com formato “gravata”, figura 4.1, considerado ideal para o ensaio, com suas dimensões estabelecidas de forma a atender as três normas indicadas. Isto foi possível, uma vez que nenhuma das três normas estabelece medidas exatas para os corpos de prova e sim dimensões mínimas e máximas dentro das quais os corpos de prova atendem às exigências de ensaio.

A tabela 4.1 e a figura 4.1 mostram as normas de referência e as dimensões adotadas para o corpo de prova, respectivamente.

Dimensões	ABNT	ASTM	DIN	Projeto
Comprimento útil mín. (Lc)	(56 - 75) recomendado: 75	57	75	70
Comprimento total mín. (L)	–	200	–	200
Comprimento inicial (Lo)	50 +/- 0,1	50,0 +/- 0,1	50	50 +/- 0,1
Largura (b)	12,5 +/- 1,0	12,5 +/- 0,2	12,5 +/- 0,09	12,5 +/- 0,09
Comprimento da cabeça	–	50	–	desenho
Largura da cabeça	20 +5 -0	20	20 a 40	22 +/- 1,0
Raio	>= 15	12,5	>= 12	15,5 +/- 0,5

Tabela 4.1 – Dimensões em mm para o corpo de prova de tração – Comprimento útil x extensômetro.

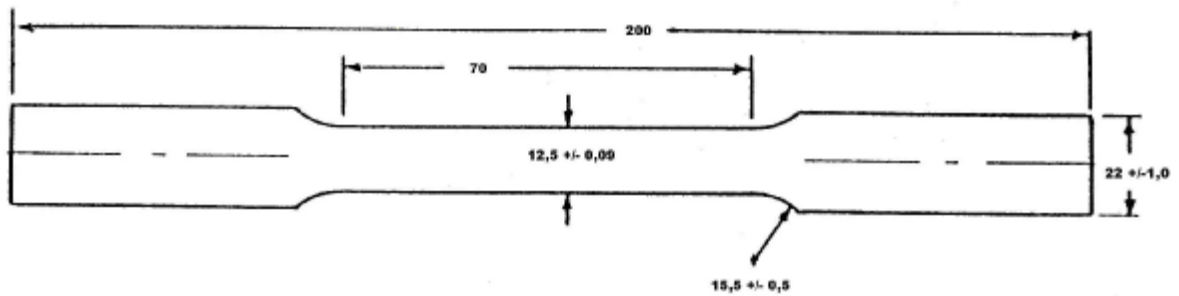


Figura 4.1 – Corpo de prova para o ensaio de tração – Dimensões em mm.

Determinado o corpo de prova padrão a ser adotado, realizou-se a marcação nas chapas das posições onde deveriam ser recortados os corpos de prova, de forma que fossem extraídos formando ângulos de 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação. Todos os corpos de prova foram cortados à laser com o propósito de se reduzir a incidência de sulcos ou rebarbas que poderiam acarretar pontos de concentração de tensão e mascarar os resultados obtidos.

Foram retirados um total de oito corpos de prova para cada direção, das chapas nacional e importada, visto que estava prevista a utilização de seis corpos de prova para cada direção, restando outros dois como segurança. Desta forma, foi preparado um total de vinte e quatro corpos de prova da chapa importada e outros vinte e quatro da chapa nacional. O número de corpos de provas depende do número de ensaios programados, podendo variar de três a cinco para cada direção de laminação.

4.4.2 Preparação da máquina de tração

Com os corpos de prova prontos, realizou-se a preparação da máquina de tração para o início dos ensaios. A máquina de tração é da marca EMIC, com capacidade de 10 toneladas e está alocada no Laboratório de Materiais, no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR.

Para a utilização do equipamento foi necessária a montagem dos dispositivos apropriados para o tipo de ensaio a ser realizado, bem como a adaptação do

programa Tesc, para captação dos dados de interesse junto ao microcomputador instalado na máquina.

A seguir estão descritas as etapas de preparação do equipamento, com os respectivos cuidados que foram tomados para realização dos ensaios.

- Montagem das garras e célula de carga, tomando o cuidado para que a capacidade da célula de carga seja sempre superior a carga exigida durante o ensaio. Inicialmente, por não conhecer a carga máxima que o ensaio exigiria, foi incluída, no programa da máquina, uma rotina, com a função de interromper o ensaio caso a carga ultrapassasse um limite de 75% da capacidade da célula de carga, a fim de evitar danos ao equipamento.
- Montagem do extensômetro, evitando durante o ensaio, que este ultrapassasse 25 mm de abertura durante a deformação do corpo de prova. Uma abertura superior a este valor ocasionaria a quebra do extensômetro.
- Adaptação do programa Tesc, a fim de se obter os dados previstos para análise dos materiais, além da organização destes dados no relatório de ensaio da máquina.

4.4.3 Ensaio de tração

Com o equipamento e os corpos de prova devidamente preparados, iniciou-se a realização dos ensaios de tração com os materiais nacional e importado.

Buscou-se nestes ensaios determinar os valores do fator de anisotropia R e coeficiente de encruamento n , além do limite de resistência, alongamento e tensão de escoamento de cada material. Estes dados auxiliam na avaliação das características de estampabilidade das chapas, servindo de parâmetro para analisar-se as condições do material em relação ao grau de conformabilidade ao qual será submetido durante o processo de fabricação do componente.

Para realização dos testes, selecionou-se inicialmente no microcomputador, o programa para determinação do fator de anisotropia. Em seguida tomou-se um dos

corpos de prova do aço importado recortado a 0° da direção de laminação, no qual mediu-se os valores da espessura e da largura da região útil do mesmo, antes de prendê-lo às garras da máquina. Com o corpo de prova na máquina, acoplou-se a ele o extensômetro, entrou-se com os dados pedidos pelo programa (espessura inicial, largura inicial, comprimento útil e direção de laminação) e iniciou-se o ensaio. Para o ensaio de anisotropia, assim como para o ensaio de encruamento, o corpo de prova deve ser deformado até um percentual entre 15 e 20% do seu comprimento útil. No caso em questão, os corpos de prova foram deformados até o limite de 18%, onde a máquina parou automaticamente o ensaio.

Retirado o corpo de prova da máquina, mediu-se novamente os valores da espessura e da largura da região útil, estes agora tomados como valores finais, após a deformação do corpo de prova. Registrou-se estes dados (“finais”) no programa, de forma que o computador pudesse calcular o valor da anisotropia R_0 para aquele corpo de prova, retirado a 0° da direção de laminação.

Para os ensaios seguintes apenas repetiu-se o procedimento descrito anteriormente, sendo que foram realizados outros quatro testes com corpos de prova a 0° da direção de laminação. Realizou-se ainda mais cinco testes para os corpos de prova a 45° e outros cinco ensaios para os corpos de prova a 90° da direção de laminação, sempre respeitando esta ordem, 0° , 45° e 90° respectivamente, num total de quinze ensaios.

Com o resultado dos quinze ensaios realizados, o programa calculou ainda o valor médio da anisotropia para cada direção, caracterizada por R_0 , R_{45} e R_{90} (fator de anisotropia médio a 0° , 45° e 90° respectivamente), além da média ponderada \bar{R} e da tendência ao orelhamento **DR**.

Utilizando-se os mesmos dados do ensaio anterior realizou-se o cálculo do coeficiente de encruamento, apenas selecionado o programa correspondente a este ensaio, visto que os testes para anisotropia e coeficiente de encruamento encontram-se em programas separados. Isto foi possível porque os ensaios de anisotropia e coeficiente de encruamento realizam-se de forma semelhante, ou seja, com cinco corpos de prova para cada direção de laminação, deformados até um limite de 18% e calculados a partir dos valores de espessura e largura iniciais e finais do corpo de prova.

Encerrados os quinze testes de anisotropia e coeficiente de encruamento do aço importado, repetiu-se todo o procedimento para o aço nacional, realizando outros quinze ensaios para este material, obtendo os valores de anisotropia e coeficiente de encruamento conforme descrito para o aço importado.

A seguir, realizou-se os testes para obtenção do limite de resistência e alongamento dos aços nacional e importado. Utilizamos três corpos de prova (um para cada direção) de cada material para os testes, os quais foram tracionados até sua ruptura, donde obtivemos o seu limite de resistência e alongamento, finalizando os ensaios de tração num total de 36 ensaios realizados.

4.5 Ensaio de dobramento

Foram preparados e ensaiados três corpos de prova de cada uma das matérias-primas, conforme NBR 6153.

Foram cortadas tiras de chapa de largura 20mm, que foram submetidas à deformação plástica por dobramento, iniciando-se com flexão e finalizando-se com compressão afim de avaliar-se trincas ou fratura.

4.6 Ensaio simulativo prático para levantamento da curva CLC

4.6.1 Projeto da ferramenta para os ensaios de embutimento

Nesta etapa do estudo, em que se visou a realização dos testes simulativos práticos, foi desenvolvido o projeto da ferramenta para os ensaios de embutimento segundo Nakajima; teste escolhido para o levantamento das curvas CLC.

O projeto foi desenvolvido conforme os parâmetros que descrevem o método de ensaio escolhido, de acordo com as características do equipamento a ser utilizado, figura 4.2. Desta forma, foram dimensionados os conjuntos superior (composto pelo porta-punção, inserto e punção) e inferior (composto pela matriz e pelo prensa-chapa), assim chamados por se tratar de itens acoplados ao êmbolo da

prensa (que se move de cima para baixo) e à base do equipamento (que sofre a ação do êmbolo), respectivamente.



Figura 4.2 – Prensa Hidráulica onde foram realizados os ensaios de embutimento.

O desenvolvimento do projeto da ferramenta correspondeu a uma etapa de extrema importância para a continuidade do projeto, uma vez que neste ponto concentrou-se, além da análise científica relativa ao ensaio Nakajima e curvas CLC, o estudo de projeto de ferramentas para conformação de chapas. Estes dois alvos de estudo foram indispensáveis para o projeto do dispositivo, pelo fato de que a ferramenta, que foi confeccionada no Laboratório de Usinagem da UFPR, deve atender aos critérios exigidos para este tipo de projeto, respeitando as condições da prensa hidráulica, figura 4.2, que foi utilizada, além de atender a todos os requisitos referentes ao ensaio Nakajima.

A ferramenta projetada consiste basicamente de um punção de extremidade esférica ($\varnothing = 100 \text{ mm}$), que deforma a chapa metálica através de uma matriz, formando um “copo”. Esta chapa está presa sobre a matriz por um outro anel,

chamado “prensa-chapa”, que não permite que o material escorregue para dentro da matriz durante o embutimento.

Seguindo este princípio, desenvolveu-se o projeto de cada peça, as quais compreendem os dispositivos de fixação da ferramenta na prensa, das diferentes partes que compõem a ferramenta propriamente dita, e os mecanismos de coleta de dados do ensaio, estes fundamentais para a análise dos resultados obtidos.

A primeira peça projetada foi o porta-punção, componente que possui a função de acoplar o punção ao êmbolo da máquina, parte esta que executa o movimento vertical descendente promovendo o embutimento do punção sobre a chapa. O projeto do punção restringiu-se basicamente ao dimensionamento do seu comprimento total, o qual divide-se em duas partes, inserto e extremidade. O cálculo do comprimento do punção foi necessário visto que, para realizar o embutimento até a fratura do material, o punção deveria ser suficientemente longo para ultrapassar toda a espessura do prensa chapa e formar o copo no material até o limite programado, não esquecendo ainda das folgas necessárias para se evitar choques entre o êmbolo do equipamento e a ferramenta. Desta forma o punção ficou dimensionado com comprimento tal, que permitiu dividi-lo em duas partes, inserto e extremidade.

A extremidade corresponde à parte principal do punção, ou seja, ao extremo esférico da peça, o qual foi usinado por uma empresa externa à Universidade, uma vez que necessitou-se de um torno CNC (Comando Numérico Computadorizado) para realização da tarefa. Este componente foi confeccionado em aço VC-131, material de alta resistência, indicado para este tipo de ferramenta, que trabalha em contato direto com o material, sob o efeito do atrito gerado pelo escorregamento da chapa durante o embutimento. Esta extremidade foi acoplada ao inserto por meio de rosca.

O inserto corresponde ao prolongamento do punção, responsável apenas por aumentar o comprimento útil deste item da ferramenta. O inserto foi produzido em aço ABNT 1045, por não trabalhar diretamente em contato com o material durante o ensaio, não existindo assim um desgaste tão severo devido ao atrito gerado pelo escorregamento do punção sobre o material.

Decidiu-se pela utilização do inserto, ao invés de uma peça única, pelo fato de que este item (com dimensões muito superiores às dimensões da extremidade) poderia ser produzido com um material mais barato que o VC-131, reduzindo de forma significativa o custo final da ferramenta. Outro motivo que levou a utilizar o inserto foi o fato de que futuramente pretende-se produzir outros quatro tipos de geometria para a extremidade, garantindo assim o menor custo para a confecção destas peças, uma vez que pode-se utilizar o mesmo inserto da ferramenta atual.

As peças seguintes projetadas foram a matriz e o prensa-chapa, ambas a serem produzidas em aço ABNT 1045. A matriz corresponde a uma flange com o furo para dentro do qual o punção deverá embutir o material formando um copo. Projetou-se a matriz, respeitando-se principalmente o raio da parte superior do furo, onde se deu o início da deformação do material, a folga entre o diâmetro do furo e o diâmetro do punção, dimensionado de acordo com uma espessura máxima de chapa que se pretende ensaiar, e a altura da matriz, a qual deve ser suficiente para a altura do copo que será formado até o material romper-se.

O prensa-chapa corresponde apenas a um anel, posicionado sobre a matriz, que tem duas funções específicas. A primeira é a de prender a chapa que será deformada sobre a matriz, não permitindo o seu escorregamento durante a estampagem. A segunda função é guiar o punção, de forma que todo o ferramental fique alinhado, ou seja, fazendo com que o punção fique perfeitamente alinhado com a matriz. Isto foi possível à medida que o prensa-chapa, simetricamente montado sobre a matriz, possui um furo com diâmetro ajustado ao diâmetro do punção, fazendo com que este passe sem folga através dele.

Foram projetados ainda dispositivos para obtenção da carga de ensaio (resistência que o material oferece para deformar-se) e altura do copo formado até o momento da ruptura da chapa. A princípio não se utilizou recursos eletrônicos na aquisição destes dados, sendo que a leitura da carga foi feita através de um manômetro ligado ao cilindro hidráulico da prensa, e a altura de embutimento foi obtida através de uma régua eletro-óptica. Adicionalmente instalou-se uma micro câmera na parte inferior da matriz para verificação visual do início da fratura.

Na figura 4.3 a seguir, encontra-se a ferramenta utilizada no ensaio com as respectivas descrições dos seus componentes.

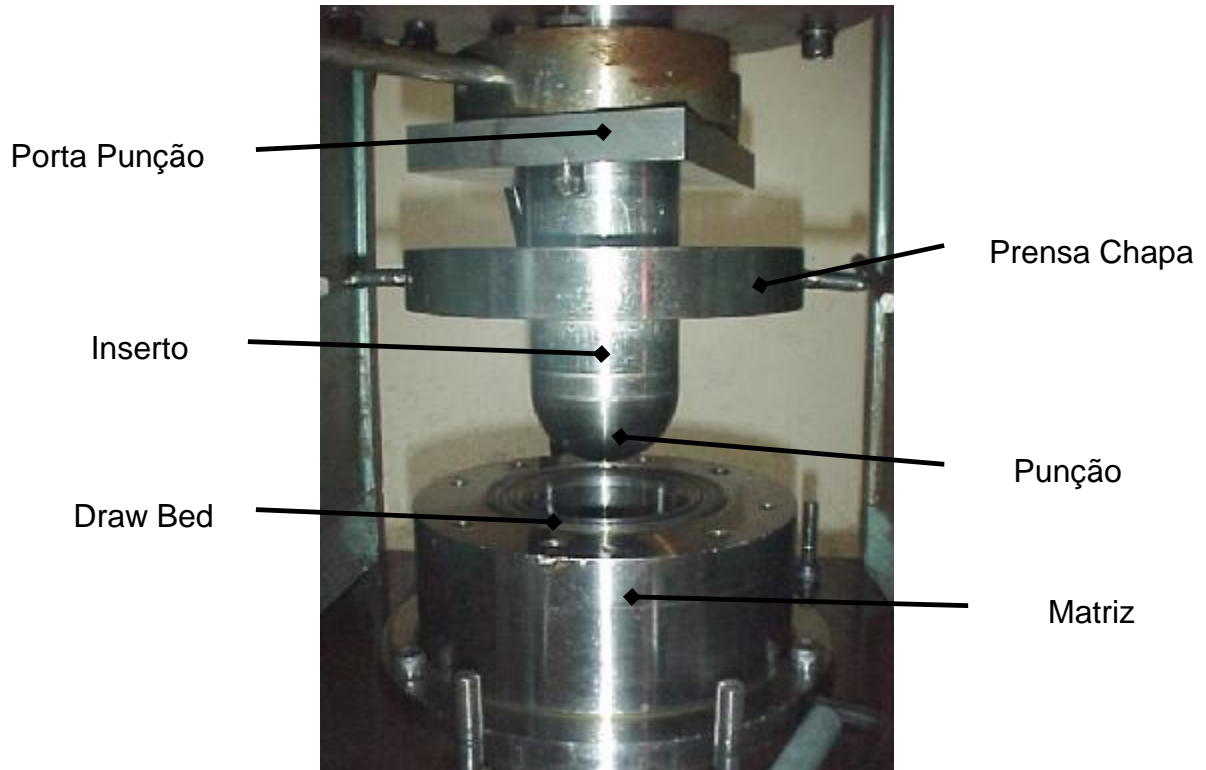


Figura 4.3 – Ferramenta utilizada no ensaio de Nakajima.

- Porta punção - Tem a função única e exclusiva de fixar o inserto e o punção ao êmbolo da prensa;
- Punção - Responsável direto pela deformação do material;
- Inserto - Possui o mesmo diâmetro do punção e está acoplado entre ele e o porta-punção. Serve para aumentar o comprimento útil da ferramenta, ou seja, garante desta forma que a ferramenta terá comprimento suficiente para ultrapassar a espessura do prensa-chapa e embutir o material até uma profundidade limite, na qual a chapa se romperá;
- Matriz - Corresponde ao maior dos componentes da ferramenta, atuará de maneira tal que a chapa será empurrada pelo punção para dentro de seu furo central (precisamente dimensionado para o ensaio), servindo como uma espécie de “forma” que delimita o diâmetro do copo embutido;
- Prensa chapa - Tem função não menos importante que os demais itens para a perfeita realização dos ensaios. Ele será o responsável por posicionar e prender a chapa que será ensaiada, de forma que esta fique

devidamente alinhada com o equipamento e não permita que o material escorregue para dentro da matriz sob o efeito do punção.

No anexo B estão os desenhos do projeto.

4.6.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova para realização dos ensaios Nakajima possuem um formato diferenciado entre eles, além de exigirem a marcação de uma rede de círculos em sua superfície.

Chegou-se ao tipo e formato de corpo de prova utilizando-se dados e informações da CamSys, empresa que desenvolve softwares e sistemas para ensaios de conformação (figura 4.4).

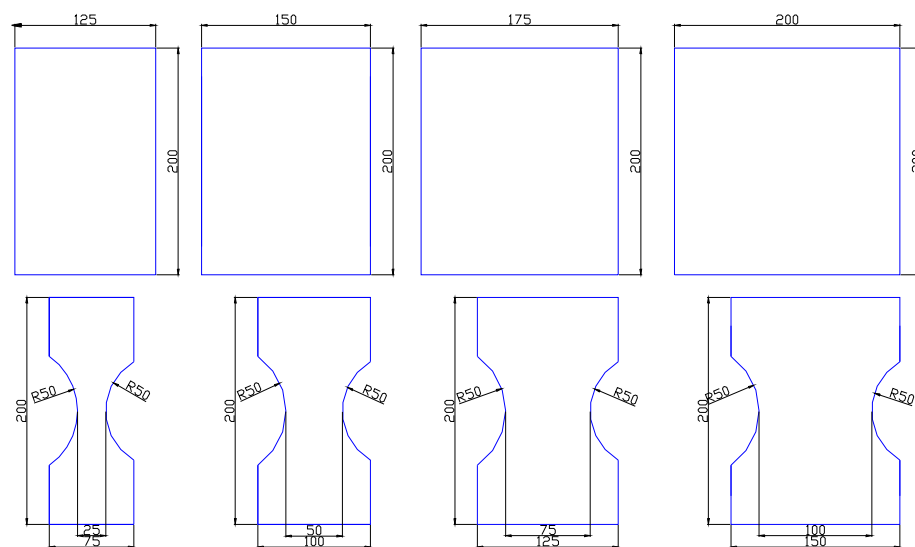


Figura 4.4 – Corpos de prova para ensaio Nakajima – Fonte: CamSys.

Foram ensaiados um total de oito diferentes formatos de CP's, figura 4.5, partindo de um formato quadrado de 200 x 200 mm, até um formato retangular de 125 x 200 mm, variando a largura de 25 em 25 mm, estes quatro sem o entalhe circular. Foram confeccionados ainda outros quatro CP's, estes, porém com a largura variando de 150 a 75 mm (também de 25 em 25 mm), todos com 200 mm de

comprimento e com dois entalhes circulares (50 mm de raio) nas laterais. Os corpos de prova com entalhe foram cortados a laser, enquanto que os demais foram cortados em guilhotina.

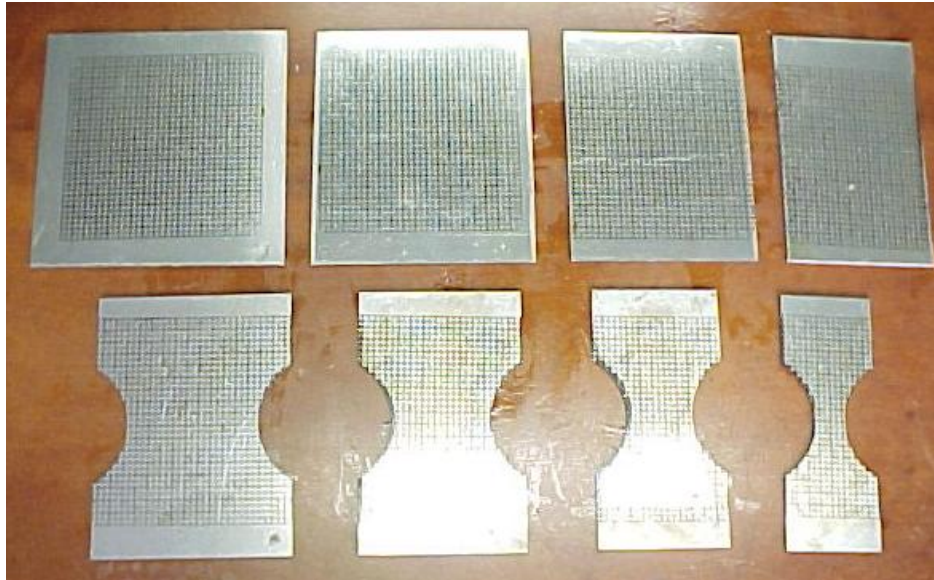


Figura 4.5 - Corpos de prova utilizados nos ensaios Nakajima.

Na figura 4.5, nota-se a existência de uma malha de círculos, com 5 mm de diâmetro, impressa nos corpos de prova. Esta malha é de fundamental importância para este tipo de ensaio, uma vez que através dela é que foi medida e analisada a deformação sofrida pelo material e, a partir destas medidas levantadas as curvas CLC para o aço importado e nacional.

Através de pesquisa chegou-se a oito possibilidades de marcação de malhas sendo que ficou definida a utilização do tipo (H), figura 4.6 abaixo.

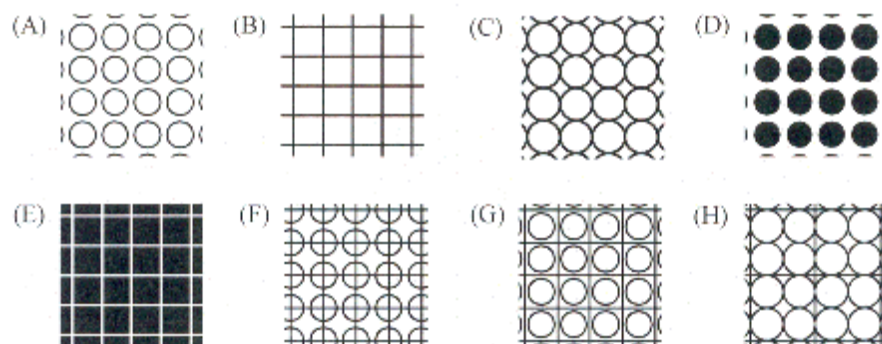


Figura 4.6 – Tipos de malhas – Fonte: CamSys.

Esta malha foi impressa por um novo processo, até então nunca utilizado e que foi desenvolvido durante a pesquisa. Ao contrário dos processos anteriormente utilizados (marcação eletrolítica, por resina foto-sensível ou a laser) este novo processo de marcação utiliza uma tela (máscara), similar às telas utilizadas em serigrafia (silk screen) com o desenho da malha, sendo mais simples, de fácil aplicação e mais barato, além de não exigir equipamentos durante o processo de pintura.

Desta forma foi preparada uma tinta especial para metais, diluída com solvente e ácido nítrico à 25%, com a qual a malha foi pintada sobre os corpos de prova utilizando a tela serigráfica com a figura da malha. Sem a adição do ácido nítrico não há aderência da tinta sobre o metal e a marcação não resiste à deformação. Assim desenvolveu-se uma nova técnica para a impressão da malha de círculos sobre os corpos de prova para embutimento, sendo esta simples, de baixo custo e eficiente pela qualidade de impressão.

A figura 4.7 mostra a tela serigráfica utilizada para impressão da malha de círculos nos CP's.



Figura 4.7 – Tela utilizada para impressão da malha de círculos.

4.6.3 Preparação da prensa de ensaio

Para realização dos ensaios de embutimento Nakajima foi necessária a preparação da prensa hidráulica, inicialmente pela montagem e ajuste da ferramenta de teste e, posteriormente, pela adaptação dos dispositivos necessários para o controle do ensaio. Todo o processo de ajuste da ferramenta e montagem dos dispositivos de controle e medição ofereceu maior confiabilidade e precisão dos resultados.

O ajuste da ferramenta foi necessário para que se regulasse o alinhamento do punção de acordo com a folga existente no diâmetro da base inferior, além da necessidade de se determinar os limites de curso da ferramenta de acordo com a capacidade da máquina. Com isto realizaram-se os primeiros testes, a partir dos quais concluiu-se a fase de ajuste da ferramenta confeccionando um “draw bed”, que corresponde a um leve ressalto no prensa-chapa, o que impediu que a chapa metálica ensaiada escorregasse durante o embutimento, figura 4.3.

Com a ferramenta em perfeita condição de uso, realizou-se então a montagem dos dispositivos de controle e aquisição dos resultados de ensaio, sendo estes uma válvula de controle de fluxo, uma régua eletro-óptica, uma câmera de vídeo e um manômetro.

A válvula de fluxo e o manômetro foram instalados na ligação da mangueira que aciona o pistão hidráulico da prensa. A válvula de fluxo permitiu o controle da velocidade de acionamento do punção, de forma que a ruptura do corpo de prova não excedesse um patamar que comprometesse os resultados dos ensaios. Em outras palavras, a válvula permitiu que, com a redução da velocidade do punção, os corpos de prova não se partissem por completo, de forma a apresentar uma leve trinca que determinava o final do ensaio.

O manômetro por sua vez fornecia a leitura da carga exigida para a deformação do material (resistência da chapa metálica), o que permitiu durante os testes a percepção prévia do instante de ruptura do material. Isto era percebido quando, durante a estampagem, a carga parava de subir devido ao material sofrer estricção (relaxamento de tensões do material), fenômeno este que ocorre num

último instante antes da ruptura. A resistência do material correspondia ao máximo valor da carga indicada no manômetro até a estrição.

Foi acoplada ainda uma régua eletro-óptica à ferramenta. Este acessório, ligado ao êmbolo da prensa (parte que movimenta o punção) e a uma escala digital, permitiu a leitura do índice de embutimento (IE) atingido. O IE corresponde à altura máxima do copo formado no corpo de prova, medido do instante em que o punção tocou a chapa metálica até o instante de sua ruptura.

Uma câmera de vídeo, montada dentro da base inferior da ferramenta (onde ocorria a deformação do material) e ligada a um aparelho de televisão permitia ainda a visualização de todo o processo de embutimento até o surgimento da trinca, sendo este mais um importante mecanismo de monitoramento dos ensaios.

A figura 4.8 mostra a montagem destes dispositivos na prensa hidráulica.



Figura 4.8 – Prensa hidráulica e seus componentes.

4.6.4 Ensaio de conformação

Após o processo de estampagem, os corpos de prova, que possuíam uma malha de círculos uniforme (todos com 5 mm de diâmetro), deformaram-se até o instante de ruptura. Nota-se a deformação sofrida pelo material através do formato diferenciado dos círculos impressos na chapa, figuras 4.9 e 4.10.



Figura 4.9 - Elipses formadas após a deformação do material.

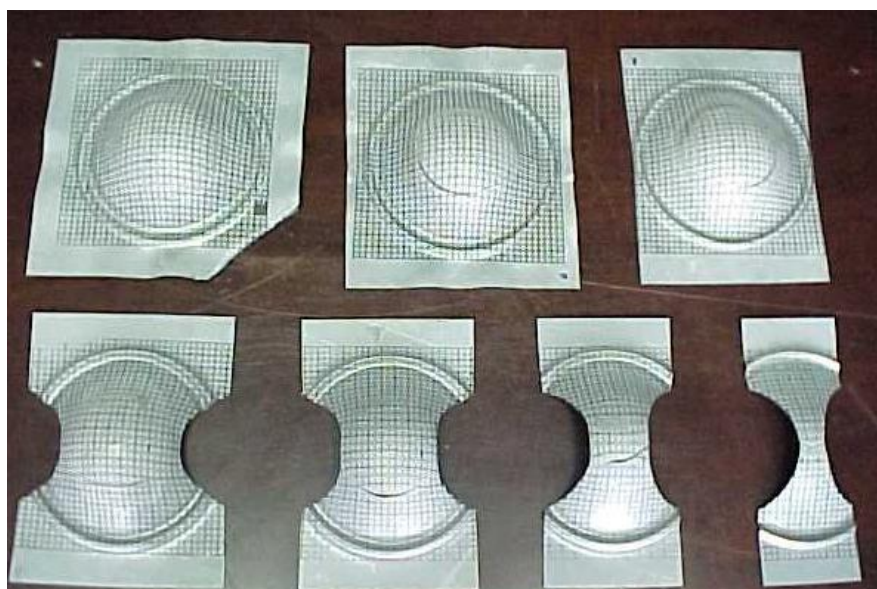


Figura 4.10 - Corpos de prova ensaiados.

Os círculos, inicialmente com 5 mm de diâmetro, tomaram o formato de elipses após a deformação, sendo que o alongamento da elipse foi maior nos pontos de maior deformação. Após deformados, os corpos de prova foram medidos num projetor de perfil, onde foram tomados os valores do eixo maior e menor das elipses formadas pela deformação do material.

Foram medidas as elipses nos pontos de maior deformação do material, sendo estes:

- no lado contrário à trinca mas na mesma latitude;
- na faixa onde o material rompeu-se; e
- nas faixas imediatamente superior e inferior à linha fraturada.

Na região fraturada, a medição foi realizada de maneira especial, ou seja, tomou-se a medida do ponto superior da elipse até a trinca e da trinca até o ponto inferior da elipse, sendo a soma destas medidas o valor correspondente ao eixo maior da elipse.

A partir dos valores do eixo maior e menor da elipse medida, foram calculadas as deformações convencionais maior e menor, e_1 e e_2 respectivamente, segundo as equações 3.2 e 3.4 vistas no Cap. 3.

Com os valores das deformações de engenharia, calculou-se os valores da deformação verdadeira ε_1 e ε_2 através das equações 3.3 e 3.5.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaio metalográficos

Os ensaios metalográficos permitiram identificar a direção de laminação, necessária para que se realize corretamente o corte dos corpos de prova, formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação.

Nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3 pode-se analisar a composição do material, bem como, identificar a direção de laminação da chapa.

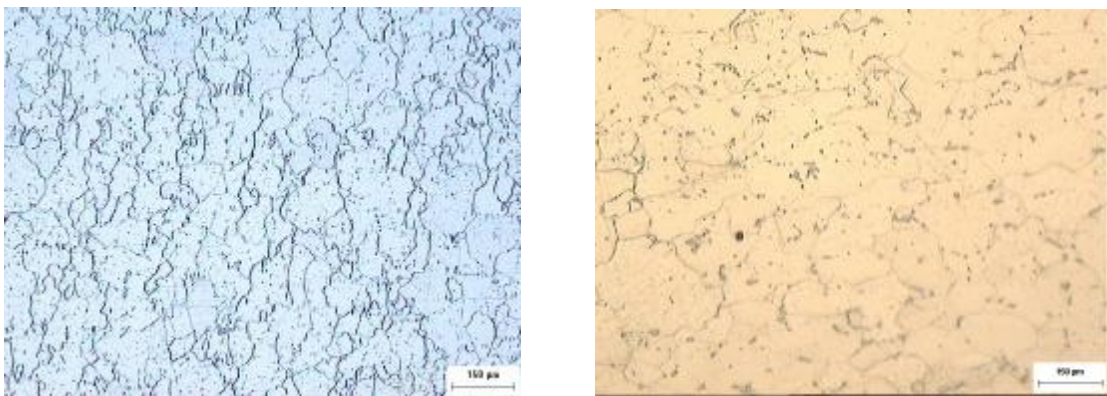


Figura 5.1 – Região superficial da chapa importada (a esquerda) e nacional (a direita).

As microestruturas mostradas na figura 5.1 permitem avaliar algumas características do material, como a morfologia dos grãos e o baixo percentual de

carbono do aço. Pode ser observado uma predominância da matriz ferrítica (parte clara), com pouquíssima quantidade de cementita precipitada (Fe_3C).



Figura 5.2 – Seção longitudinal da chapa importada.

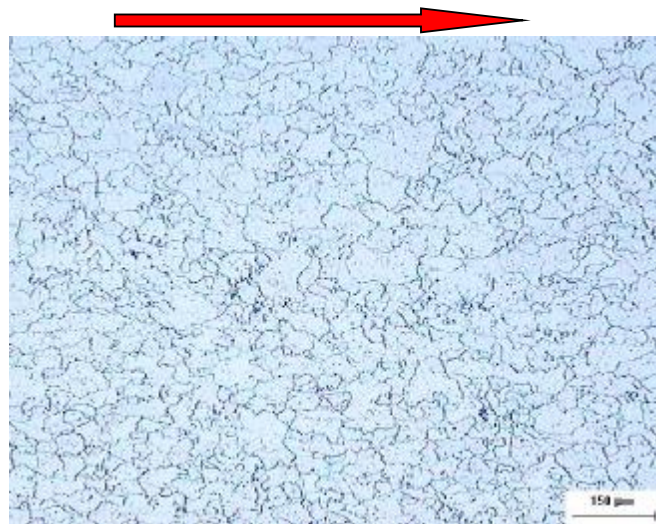


Figura 5.3 – Seção longitudinal da chapa nacional.

Na microestrutura mostrada nas figuras 5.2 e 5.3 pode-se observar que os grãos do material apresentam-se alongados no sentido indicado pela seta, o que permitiu identificar como sendo esta a direção de laminação do material. Fez-se a marcação da direção de laminação do material baseando-se na posição em que a amostra foi retirada da chapa.

5.2 Ensaaios de tração

Cortados os corpos de prova foram então realizados os ensaios de tração com o aço nacional e importado, para os quais foram obtidos dados referentes ao fator de anisotropia e coeficiente de encruamento, além da tensão de escoamento, alongamento e limite de resistência dos materiais.

No anexo A estão apresentados todos os relatórios de ensaio emitidos pelo computador ligado a máquina de tração, figura 5.4, os quais apresentam todos os dados mencionados para cada corpo de prova ensaiado, de acordo com o ângulo que formam com a direção de laminação. Os relatórios apresentam ainda os gráficos de tensão versus deformação para cada corpo de prova, o que permite observar o comportamento do material de acordo com o percentual de deformação obtido.



Figura 5.4 – Máquina de tração e computador.

Nos ensaios para determinação do fator de anisotropia e coeficiente de encruamento, os testes foram paralisados quando o material atingia 18% de deformação em relação ao seu comprimento útil.

Estão apresentados no anexo A os relatórios de ensaio dos testes de tração das chapas nacional (material G4 RL) e importado (material St4 LG BK) respectivamente, sendo três relatórios para cada um dos aços onde constam os

relatórios de anisotropia e coeficiente de encruamento ambos para 0°, 45° e 90°, e o limite de resistência e alongamento para o aço nacional, e na seqüência os relatórios de anisotropia, coeficiente de encruamento, o limite de resistência e alongamento do aço importado, nesta ordem. As tabelas 5.1 e 5.2, apresentam um resumo dos resultados e comparativo com as especificações constantes em norma.

Propriedades	Aço Importado St 4 LG BK	Aço Importado St 4 LG BK DIN 1624	Aço Nacional G4 RL	Aço Nacional G4 RL NBR 5007
LR (MPa)	308.2	270 - 350	305.8	270 - 350
LE (MPa)	202.4	máx. 225	193.9	máx. 235
AL (%)	44.72	40	48.70	38
DOB.	0E	-	0E	0E

Tabela 5.1 – Comparativo das propriedades LR, LE, AL e DOB.

Propriedades	Aço Importado St 4 LG BK	Aço Nacional G4 RL
R0	1.4351	1.1999
R45	1.1039	0.9032
R90	1.3940	1.2587
Rm	1.2592	1.0663
n0	0.1787	0.2012
n45	0.1812	0.1844
n90	0.1844	0.1814

Tabela 5.2 – Comparativo das propriedades R e n.

Os resultados dos ensaios de tração, conforme a tabela 5.1, apontaram um comportamento bastante semelhante para os aços nacional e importado, com valores de LR e LE próximos à 300 MPa e 200 MPa respectivamente, dentro das especificações previstas em norma.

O limite de resistência apresentado pelos dois tipos de aço pode ser considerado equivalente para os materiais em análise, já que a média dos três

ensaios de cada material apresentou uma variação inferior a 3 MPa, valor muito pequeno em relação ao parâmetro de resistência das chapas.

A diferença na tensão de escoamento apresentada pelos materiais, é da ordem de 10 MPa, que também é pouco influente no resultado de performance entre os dois aços.

O alongamento médio do aço nacional apresentou-se aproximadamente 4% superior ao aço importado e mais de 10% superior ao previsto em norma. Este fato deve ser considerado como importante e positivo ao aço nacional já que o alongamento é uma medida comparativa da ductilidade dos dois aços. Quanto maior o alongamento, mais dúctil será o material.

Os resultados do fator de anisotropia, tabela 5.2, indicam uma sensível diferença nas características de estampabilidade das chapas, caracterizado pela diferença nos valores do fator de anisotropia médio a 0° , 45° e 90° e, principalmente na diferença da média ponderada deste fator.

Pode-se dizer que o aço importado apresenta maior resistência à diminuição de espessura do que o nacional, deformando-se mais no plano da chapa e menos na direção da espessura, o que traz uma nítida vantagem quando da conformação do material.

Os coeficientes de encruamento n dos aços apresentam resultados próximos, com a ressalva para os corpos de prova à 0° do aço nacional, que apresentaram valores pouco superiores em relação ao material importado. É importante notar que quanto maior o valor de n maior o limite de instabilidade plástica, isto é, o material tem maior capacidade de diminuir a espessura sem que ocorra a instabilidade plástica que se traduz no aumento da altura da peça conformada sem ocasionar fratura.

Com base nos resultados e diferenças encontradas não se pode definir completamente a possibilidade de nacionalização do material. Até aqui tem-se que o material importado apresenta a vantagem de um R maior e o material nacional um alongamento maior. Uma melhor avaliação adicional encontra-se com os resultados obtidos no ensaio de Nakajima, item 5.4, a seguir.

5.3 Ensaio de dobramento

Os resultados dos testes de dobramento são relativamente simples e rápidos de serem obtidos. Todos os corpos de prova dobraram a 180° (0 E – Zero da espessura) sem maiores problemas com trincas e fissuras.

Nas figuras 5.5 e 5.6 abaixo observam-se os resultados.

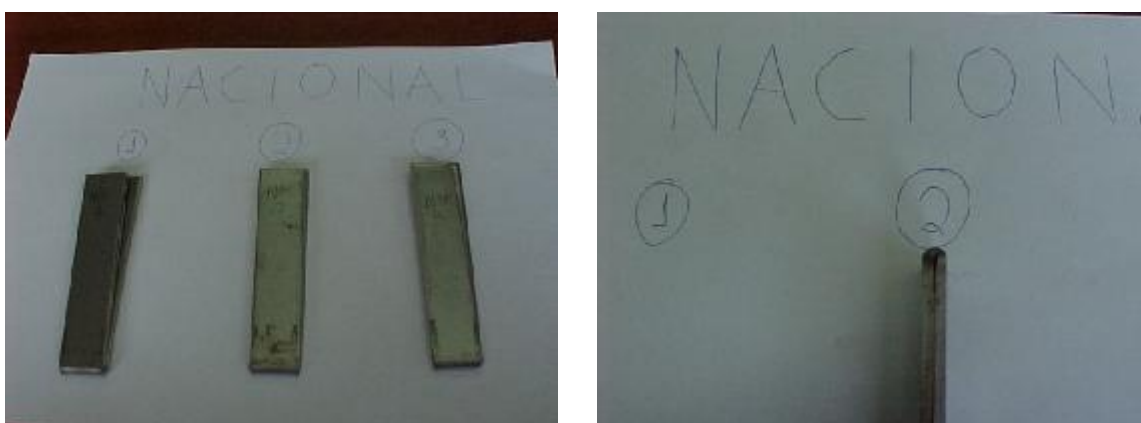


Figura 5.5 – Corpos de prova material nacional ensaiado.



Figura 5.6 – Corpos de prova material importado ensaiado.

5.4 Ensaio de Nakajima

Com os valores das deformações verdadeiras maior e menor foram plotadas as curvas CLC do material importado e nacional (anexo C). Estas curvas apresentam os pontos de máxima deformação das chapas submetidas ao ensaio de estampagem.

Os ensaios foram realizados com corpos de prova com e sem entalhe a fim de se levantar as curvas CLC de forma mais precisa possível. O entalhe, bem como a largura dos corpos de prova influenciou diretamente na forma com que os pontos se espalharam ao longo da curva, uma vez que estas geometrias diferenciadas induzem a deformação do material a uma condição de embutimento profundo ou estiramento, além do grau de deformação atingido em cada caso.

Desta forma, os corpos de prova sem entalhe determinaram os pontos que caracterizaram o fenômeno de estiramento (direita do gráfico), e os corpos de prova com entalhe determinaram os pontos para o fenômeno de embutimento profundo (esquerda do gráfico), uma vez que ofereceram menor resistência para deformação em uma direção, sendo esta mais uniforme.

Em alguns ensaios, para os corpos de prova de 125 x 200 mm sem entalhe, a ruptura estava ocorrendo no ponto de fixação da chapa no “draw bed”, próximo à borda da chapa. Este fato invalidava o ensaio, pois a ruptura ocorria fora do copo formado no embutimento. Segundo CamSys, a forma de se evitar esta ruptura no local errado seria a utilização de corpos de prova com entalhe, o que reduziria a concentração de tensão na região de fixação do corpo de prova. Este fato se confirmou durante os testes, pois os ensaios com os corpos de prova de 125 x 200 mm com entalhe realmente eliminaram este efeito negativo para os resultados.

As curvas são uma importante ferramenta para avaliação dos aços submetidos ao teste, de forma que apresenta tanto o fenômeno de embutimento profundo quanto o de estiramento sofridos pelas chapas conformadas. O lado direito

da curva, onde ambas as deformações são positivas, ou seja, os dois eixos da elipse aumentaram em relação ao diâmetro original do círculo, caracteriza o fenômeno de estiramento, enquanto que o lado esquerdo caracteriza o fenômeno de embutimento profundo, sendo neste caso a deformação menor negativa (eixo menor da elipse ficou menor que o diâmetro original do círculo).

Plotadas as curvas CLC do aço importado e nacional, previamente corrigidas pela função “spline”, apêndice A e anexo D, estabelece-se uma comparação entre elas, sobrepondo-as, a fim de avaliar o potencial da chapa nacional em relação à importada (figuras 5.7, 5.8 e 5.9).

Esta comparação também foi feita nas regiões no lado posterior à fratura, na região da fratura e na região acima e abaixo da fratura para uma caracterização mais detalhada da performance dos dois materiais.

Uma característica notadamente identificada quando se analisa a região posterior à região de fratura, figura 5.7, é de que o aço nacional assimila uma maior deformação no embutimento, mas por outro lado sujeita-se a deformações pouco menores de estiramento em comparação com o material importado. Pode-se reportar-se este fato às análises feitas na tabela 5.2.

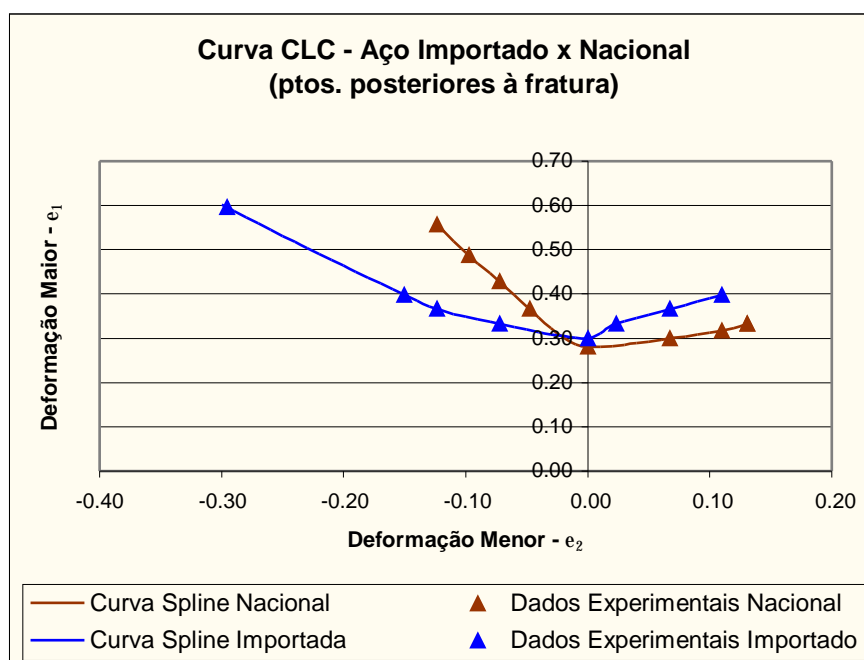


Figura 5.7 – Curva CLC material importado x nacional (região posterior à fratura).

Tendo-se \bar{R} do aço importado maior do que o nacional, significa dizer que a tensão de compressão tangencial (s_{θ}) diminui e a resistência do material na direção da espessura aumenta e como consequência retarda a ocorrência de fratura. Desta forma o aço importado apresentará uma maior resistência ao estiramento do que o aço nacional. Por outro lado, com um alongamento maior e um n ligeiramente superior do aço nacional, encontra-se um aumento da conformação por embutimento.

Já na região de início de fratura, figura 5.8, quando se exige o máximo esforço do material, o material nacional demonstra suportar de forma excelente às deformações de embutimento e estiramento atingindo desta forma o objetivo a que se destina, i. é, ser um material de fácil conformação.

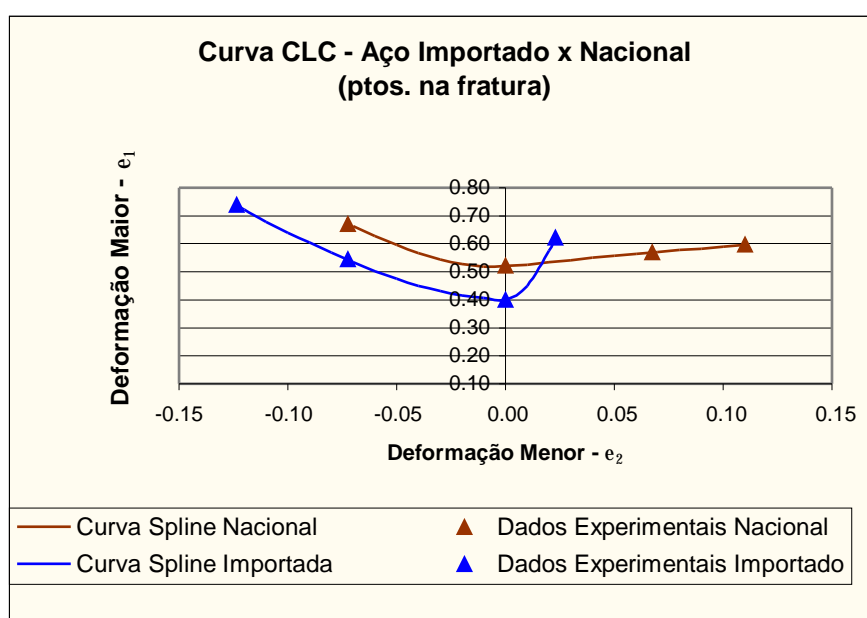


Figura 5.8 – Curva CLC material importado x nacional (região de início da fratura).

Já nas posições acima e abaixo da fratura, figura 5.9, os resultados apresentam-se bem próximos como os da região posterior à fratura, mas sempre com o material nacional levando uma ligeira vantagem quanto à capacidade de absorção das deformações.

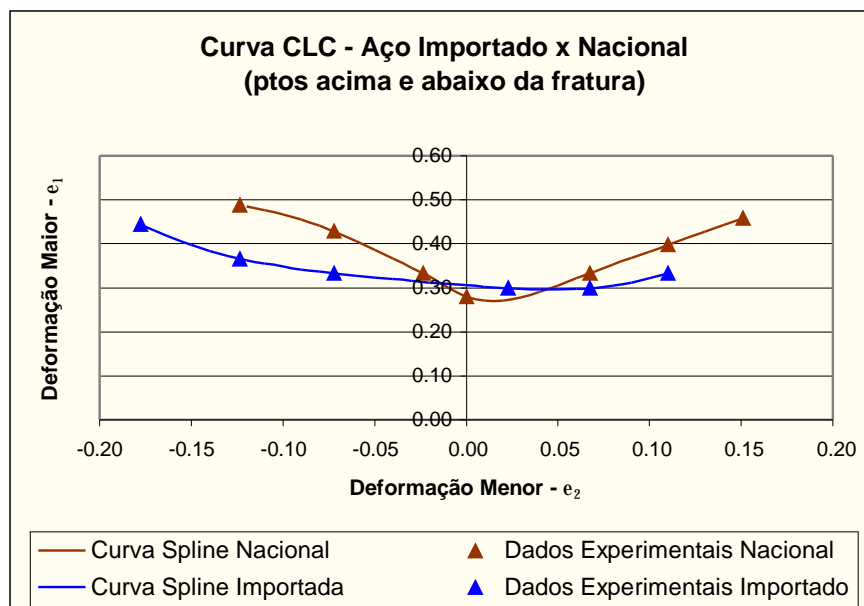


Figura 5.9 – Curva CLC material importado x nacional (região acima e abaixo da fratura).

Nas figuras 5.10 e 5.11 a seguir, encontram-se as faixas de deformações válidas para a matéria-prima nacional e importada. Foram selecionadas as curvas mais conservadoras (curvas inferiores) e as curvas mais arrojadas (curvas superiores) para esta análise. Comprova-se que na região do embutimento os pares de deformação do aço nacional são nitidamente superiores ao aço importado e na região de estiramento o aço importado apresenta uma faixa bem mais ampla, mostrando uma melhor absorção das deformações nesta região.

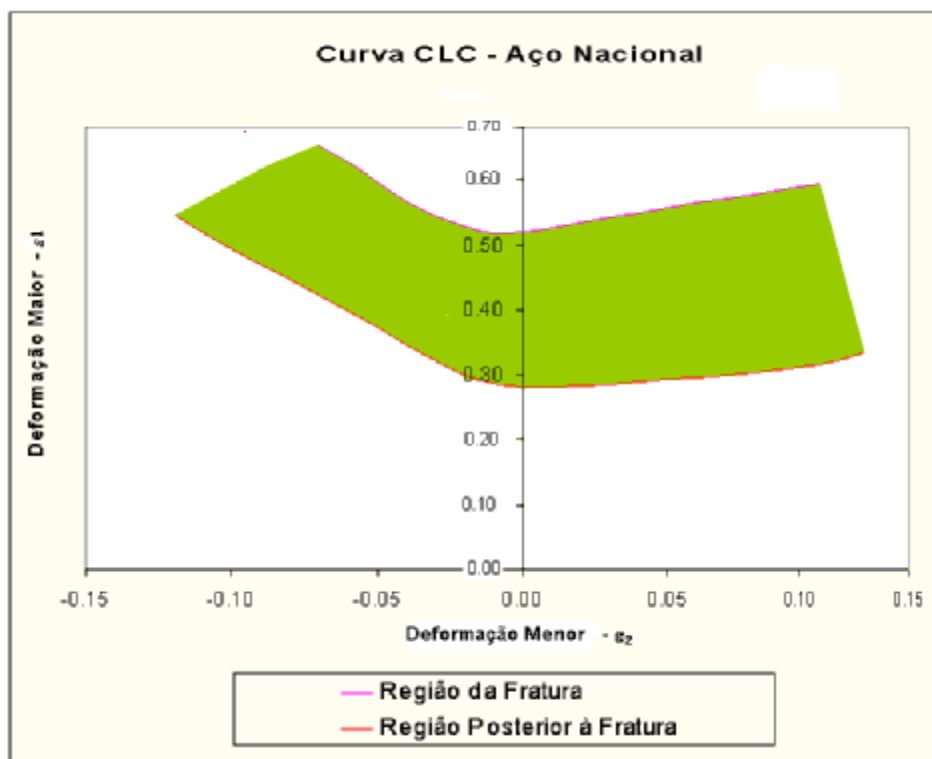


Figura 5.10 – Faixa de deformações válidas para o aço nacional.

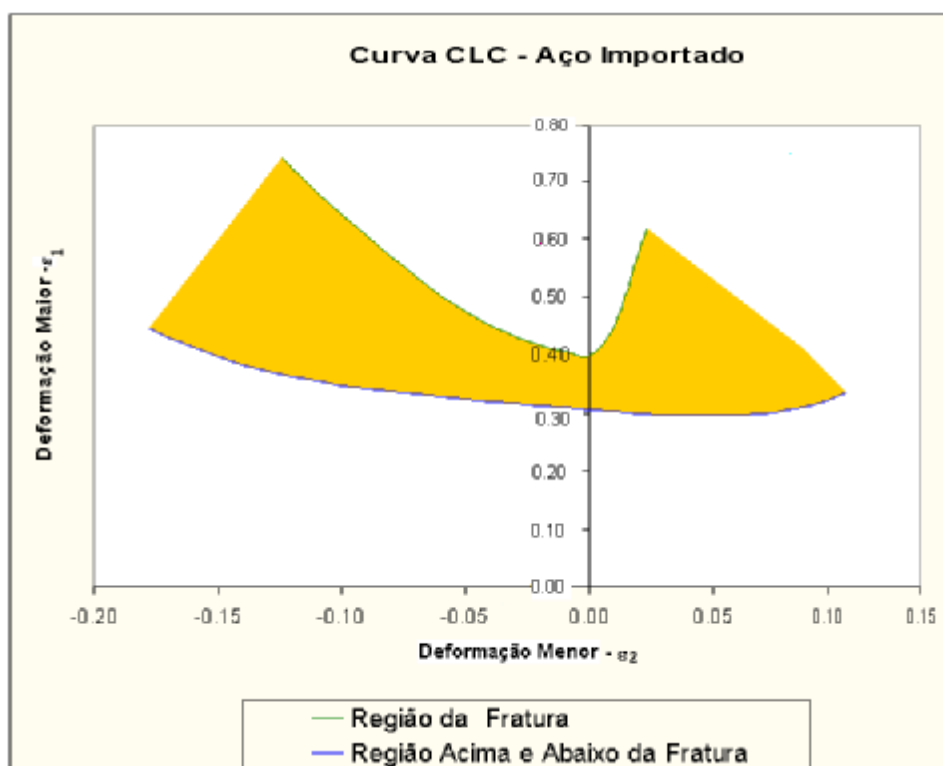


Figura 5.11– Faixa de deformações válidas para o aço importado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Foram realizados cerca de 150 ensaios com os dispositivos, somando-se os testes do ferramental e os ensaios finais para conclusão deste projeto de pesquisa.

Pelos resultados apresentados nos testes de tração concluí-se, pela boa aproximação de resultados entre os aços importado e nacional, que a chapa nacional apresenta grande potencial de substituir o material importado utilizado no componente a ser nacionalizado. Estes resultados já permitem liberar o aço nacional como similar do material importado pela proximidade dos resultados obtidos. Porém, para uma perfeita avaliação, que confirmasse de forma mais precisa essa hipótese, foram levantadas e comparadas às curvas CLC dos materiais.

As curvas CLC levantadas para os aços mostram que a chapa nacional apresentou uma curva ligeiramente superior ao aço importado, ou seja, apresentou um limite de conformabilidade superior principalmente na região de embutimento (lado esquerdo do gráfico).

Isto permite concluir que, se as deformações sofridas pelo componente em seu processo de fabricação não ultrapassam o limite estabelecido pela chapa importada, certamente não ultrapassarão o limite estabelecido pelo aço nacional.

Conclui-se, desta forma, que o aço nacional apresenta boas chances de substituir o material importado utilizado na fabricação do componente.

O ponto considerado mais crítico neste projeto foi com relação aos dispositivos de leitura (aquisição de dados) dos parâmetros de ensaio, como, profundidade de embutimento e resistência oferecida pelo material para deformar-se. Neste caso, como sugestão para continuidade ou para os próximos trabalhos o recomendado seria a utilização de componentes eletrônicos, como sensor de deslocamento (para medir o índice de embutimento) e célula de carga (para medir a resistência do material), com saída para um computador. Com este procedimento se conseguiria uma maior precisão dos resultados, bem como, velocidade na execução dos ensaios.

Outro ponto à se destacar esta no fato da utilidade de realizar-se ensaios mais profundos de caracterização da matéria-prima como, ensaios metalográficos mais detalhados e determinação e comparação das composições químicas dos aços.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASKELAND, D. R. *The science and engineering of materials*. Chapman & Hall, 1996.
- BORSOI, C. A.; HENNIG, R.; SCHAEFFER, L. *Novo Teste Tecnológico no LdTM para a Melhor Determinação da Conformabilidade de Chapas Metálicas*; III Conferência Nacional de Conformação de Chapas, IV Conferência Internacional de Forjamento/Brasil. Porto Alegre: Brasil, p.50-59, 2000.
- BOYLES, M. W.; CHILCOTT, H. S. Recent developments in the use of the stretch-draw test. *Sheet Metal Industries*, p. 149-156, fev. 1982.
- BRESCIANNI, Ettore et al. *Conformação plástica dos metais*. Campinas: Editora da Unicamp, 4ª ed., 1991.
- CALLISTER, W. D. Jr. *Materials Science and Engineering an Introduction*. Wiley e Sons, 4ª ed., 1997.
- CETLIN, P. R.; HELMAN, H. *Fundamentos da conformação mecânica dos metais*. Guanabara Dois, 1983.
- CHIAVERINI, V. *Tratamentos térmicos das ligas ferrosas*. ABM, 1985.
- COLPAERT, H. *Metalografia de produtos siderúrgicos comuns*. Edgard Blucher, 1965.
- DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2ª ed., 1981.
- FAZANO, A. T. V. *A prática metalográfica*. Hemus, 1ª ed., 1980.
- FELBECH, D. K. *Introdução aos mecanismos de resistência mecânica*. Edgard Blucher, 1971.

- FERRAN, Gustau; FERRAN, Elena Moncunill de; ANDRADE, Sergio Leite de; COSTA NETO, Claudio Borges da. *Curvas limites de conformação*; 308 Congresso da ABM. Rio de Janeiro, p. 19-23, jun./jul. 1975.
- GRUNING, K. *Técnica da conformação*. São Paulo: Editora Polígono, 1975.
- HABERFIELD, A. B.; BOYLES, M. W. Modern concepts of sheet metal formability. *Metallurgist and Materials Technologist*, p. 453-456, set. 1975.
- HILL, R. *The mathematical theory of plasticity*. Oxford Press, 1952.
- HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. *Metal forming : mechanics and metallurgy*. Prentice-Hall, 1983.
- KEELER, Stuart P. The state of the Art. *Understanding sheet metal formability*. Machinery, v. 74 n. 6, p. 88–95, fev. 1968.
- KEELER, Stuart P. Proprieties related to forming. *Understanding sheet metal formability*. Machinery; v. 74 n. 8, p. 94-103, apr. 1968.
- KEELER, Stuart P. Visible strain patterns. *Understanding sheet metal formability*. Machinery, v. 74, n. 7, p. 94–101, mar. 1968.
- KEELER, Stuart P. Die design and lubrication. *Understanding sheet metal formability*. Machinery, v. 74, n. 10, p. 98–104, jun. 1968.
- KINCAID, David; CHENEY, Ward *Numerical Analysis, Mathematics of scientific computing*. Brooks, 1991, p. 278-354
- KOBAYASHI, S.; OH, Soo-Ik; ALTAN, T. *Metal forming and the finite-element method*. Oxford University Press, 1989.
- LANGE, K. *Forming Handbook*. New York: Mcgraw Hill and SME, 1993.
- LOYD, D. H.; F.R.I.C.; F.I.M.; A.C.T. (Birm.); A.M.B.I.M. Metallurgical engineering in the pressed-metal industry. *Sheet Metal Industries*. p. 306-314, may. 1962.
- METALS HANDBOOK. Forming. ASM, v.4, 8^a ed., 1970.
- METALS HANDBOOK. Forgings and casting. ASM, v.5, 8^a ed., 1970.
- NELSON, P.G.; WINLOCK, L. *Method of determining the percentage elongation of maximun load in the tension test*. Bulletin ASTM, p. 53-55, jan. 1949.
- PARNIERE, P.; SANZ, G. Appréciation des caractéristiques D'emboutissabilité des tôles minces; *Mise en forme des Métaux et Alliages*. Éditions Du Centre National De La Recherche Scientifique, p. 305-330, 1976.

- ROCHA, A. B. da; JALINIER, J. M. *Plastic instability of sheet metals under simple and complex strain paths*. Transactions ISIJ, v. 24, p. 132-140, jun. 1983.
- SAMPAIO, A. P.; MARTINS, C. A.; SOUZA, P. C. *Caracterização da conformabilidade de aço livre de intersticiais – If – produzido via recozimento em caixa na companhia siderúrgica nacional*, I Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 89-99, 1998.
- SCHAEFFER, L. *Introdução e conformação mecânica dos metais*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1983.
- SCHEY, J. A. *Introduction to manufacturing process*. Tokyo: McGraw-Hill, Kogakuska, 1977.
- SOUZA, S. A. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos*. Edgard Blucher, 1974.
- SPUR, G.; STOEFLERLE, T. *Handbuch der Fertigungstechnik*. München: Carl Hanser Verlag, v. 1, 2/1 e 2/2, 1988.
- SWIFT, H. W. Plastic instability under plane-stress. *J. Mech. and Phys. of Sol.* v. 1, p. 1-18, 1952.
- TAKUDA, Hirohiko; FUJIMOTO, Hitoshi; KURODA, Yoshito; HATTA, Natsuo. Finite element analysis of formability of a few kinds of special steel sheets. *Steel research* 68. n. 9, p. 398-402, 1997.
- UEDA, T.; ASAKURA, K. *A new test value for estimating press formability of metal sheet*. p. 297-304, jun. 1965.
- USIMINAS. *Conformação na prensa*. Usiminas, n. 6, 1999.
- VAN VLACK, L. H. *Princípio de ciência dos materiais*. Edgard Blucher, 1970.
- WHITELEY, R. L. *The importance of directionality in drawing quality sheet steel*. Trans. ASM, v. 52, p. 154-169, 1960.
- WOODTHORPE, J.; PEARCE, R. The effect of r and n upon the forming limit diagrams of sheet steel. *Sheet Metal Industries*, p. 1061-1067, dez. 1969.
- YOSHIDA, Kiyota. *Classification and systematization sheet metal press forming process*. IPCR, v. 53, n. 1514, p. 126-187, 1959.
- ZAAT, J. H. The production of line networks on sheet metal for the investigation of its behavior during deformation. *Sheet Metal Industries*. v. 34, n. 366, p. 737-740, oct. 1957.

Normas Técnicas:

ASTM E 517, “Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal”.

ASTM E 646 – 78, 1984, “Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Metals”.

ASTM E 8M, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”.

NBR 5902, 1980, “Determinação do Índice de Embutimento em Chapas de Aço pelo Método Erichsen Modificado”.

NBR 5915, 1984, “Chapas Finas a Frio de Aço Carbono para Estampagem”.

NBR 6153, 1980, “Determinação da Capacidade ao Dobramento de Produtos Metálicos”.

NBR 6673, 1981, “Produtos Planos de Aço - Determinação das Propriedades Mecânicas ‘a Tração’”.

NBR 8164, 1983, “Folhas e Chapas de Aço de Baixo Carbono – Determinação da Anisotropia Plástica e do Expoente de Encruamento”.

APÊNDICE A – O Método “Spline”

O delineamento da curva CLC para os dois materiais, importado e nacional, é um item de extrema importância já que é através do comparativo das curvas que se fará a avaliação definitiva da equivalência dos dois materiais. Desta maneira procurou-se escolher um método matemático que pudesse suavizar as distorções causadas pela simples aplicação e geração de gráfico no Microsoft Excel.

Uma função “spline” consiste de pedaços de polinômio unidos em subintervalos com certa condição de continuidade. Formalmente, supõe-se que $n+1$ pontos t_0, t_1, \dots, t_n tenham sido especificados e satisfazem $t_0 < t_1 < \dots < t_n$, Estes pontos são chamados de nós. Suponha também que um inteiro $k \geq 0$ tenha sido prescrito. Uma função “spline” de grau k tendo nós t_0, t_1, \dots, t_n é uma função S tal que:

- (i) em cada intervalo (t_{i-1}, t_i) , S é polinômio de grau $\leq k$;
- (ii) S tem uma derivada contínua $(k - 1)$ ésimo em (t_0, t_n) .

Então, assumindo uma tabela de valores conforme abaixo,

x	t_0	t_1	t_n
y	y_0	y_1	y_n

e que uma spline cúbica S deve ser construída para interpolar a tabela. Em cada intervalo $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n]$, S é dado por um polinômio cúbico diferente. Considere S_i ser um polinômio cúbico que representa S em $[t_i, t_{i+1}]$. Assim,

$$S(x) = \begin{cases} S_0(x) & x \in [t_0, t_1] \\ S_1(x) & x \in [t_1, t_2] \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ S_{n-1}(x) & x \in [t_{n-1}, t_n] \end{cases}$$

Os polinômios S_{i-1} e S_i , interpolam o mesmo valor no ponto t_i e, portanto:

$$S_{i-1}(t_i) = y_i = S_i(t_i) \quad (1 \leq i \leq n-1)$$

Então, S é automaticamente contínua. Adicionalmente, S' e S'' são assumidos serem contínuos, e essas condições serão usadas na derivação da função spline cúbica.

Existem $4n$ coeficientes no pedaço polinomial cúbico, de forma que existam 4 coeficientes em cada um dos n polinômios cúbicos. Em cada subintervalo cúbico $[t_i, t_{i+1}]$, existem duas condições de interpolação contínua, $S(t_i) = y_i$ e $S(t_{i+1}) = y_{i+1}$, dando $2n$ condições. A continuidade de S não dá condições adicionais, de forma que isto possa ser considerado na condição de interpolação. A continuidade de S' dá uma condição a cada nó interior, $S'_{i-1}(t_i) = S'_i(t_i)$, somando-se para $n-1$ condições adicionais. Assim, existem juntos $4n-2$ condições para determinação dos $4n$ coeficientes.

A seguir deriva-se a equação para $S_i(x)$ no intervalo $[t_i, t_{i+1}]$. Primeiro define-se os números $z_i = S''(t_i)$. Certamente z_i existe para $0 \leq i \leq n$ e satisfaz,

$$\lim_{x \downarrow t_i} S''(x) = z_i = \lim_{x \uparrow t_i} S''(x) \quad (1 \leq i \leq n-1)$$

porque S'' é contínuo no interior de cada nó. Desde que S_i é um polinômio cúbico em $[t_i, t_{i+1}]$, S'' é uma função linear satisfazendo $S''_i(t_i) = z_i$ e $S''_i(t_{i+1}) = z_{i+1}$ e portanto é dado pela linha reta entre z_i e z_{i+1} ,

$$S''_i(x) = z_i/h_i (t_{i+1} - x) + z_{i+1}/h_i (x - t_i)$$

onde $h_i \equiv t_{i+1} - t_i$. Se este for integrado duas vezes, o resultado será o próprio S_i :

$$S_i(x) = z_i/6h_i (t_{i+1} - x)^3 + z_{i+1}/6h_i (x - t_i)^3 + C(x - t_i) + D(t_{i+1} - x)$$

Onde C e D são constantes de integração. As condições de interpolação $S_i(t_i) = y_i$ e $S_i(t_{i+1}) = y_{i+1}$ podem agora ser impostas para S_i para determinar C e D . O resultado é,

$$S_i(x) = z_i/6h_i (t_{i+1} - x)^3 + z_{i+1}/6h_i (x - t_i)^3 + (y_{i+1}/h_i - z_{i+1}h_i/6)(x - t_i) + (y_i/h_i - z_ih_i/6)(t_{i+1} - x)$$

Para determinar $z_1, z_2, z_3, \dots, z_{n-1}$ nós, a condição de continuidade para S' . No interior do nó t_i , nós precisamos ter $S'_{i-1}(t_i) = S'_i(t_i)$. Então da equação acima,

$$S'_i(t_i) = -h_i z_i/3 - h_i z_{i+1}/6 - y_i/h_i + y_{i+1}/h_i$$

e

$$S'_{i-1}(t_i) = -h_{i-1} z_{i-1}/3 - h_{i-1} z_i/6 - y_{i-1}/h_{i-1} + y_i/h_{i-1}$$

Igualando,

$$h_{i-1} z_{i-1} + 2(h_i + h_{i-1})z_i + h_i z_{i+1} = 6/h_i (y_{i+1} - y_i) - 6/h_{i-1} (y_i - y_{i-1})$$

A equação supra é calculada para $i = 1, 2, \dots, n-1$. Obtém-se então, um sistema de $n-1$ equações lineares para $n+1$ não conhecidos $z_0, z_1, z_2, \dots, z_n$. Pode-se seleccionar arbitrariamente z_0 e z_n (exemplo $z_0 = z_n = 0$) e resolver o sistema para obter z_1, z_2, \dots, z_{n-1} . A função “spline” resultante é chamada de spline cúbica natural.

$$\begin{bmatrix} u_1 & h_1 & & & & & \\ h_1 & u_2 & h_2 & & & & \\ & h_2 & u_3 & h_3 & & & \\ & & & & & & \\ & & & & h_{n-3} & u_{n-2} & h_{n-2} \\ & & & & h_{n-2} & u_{n-1} & \\ & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_{n-2} \\ z_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_{n-2} \\ v_{n-1} \end{bmatrix}$$

onde,

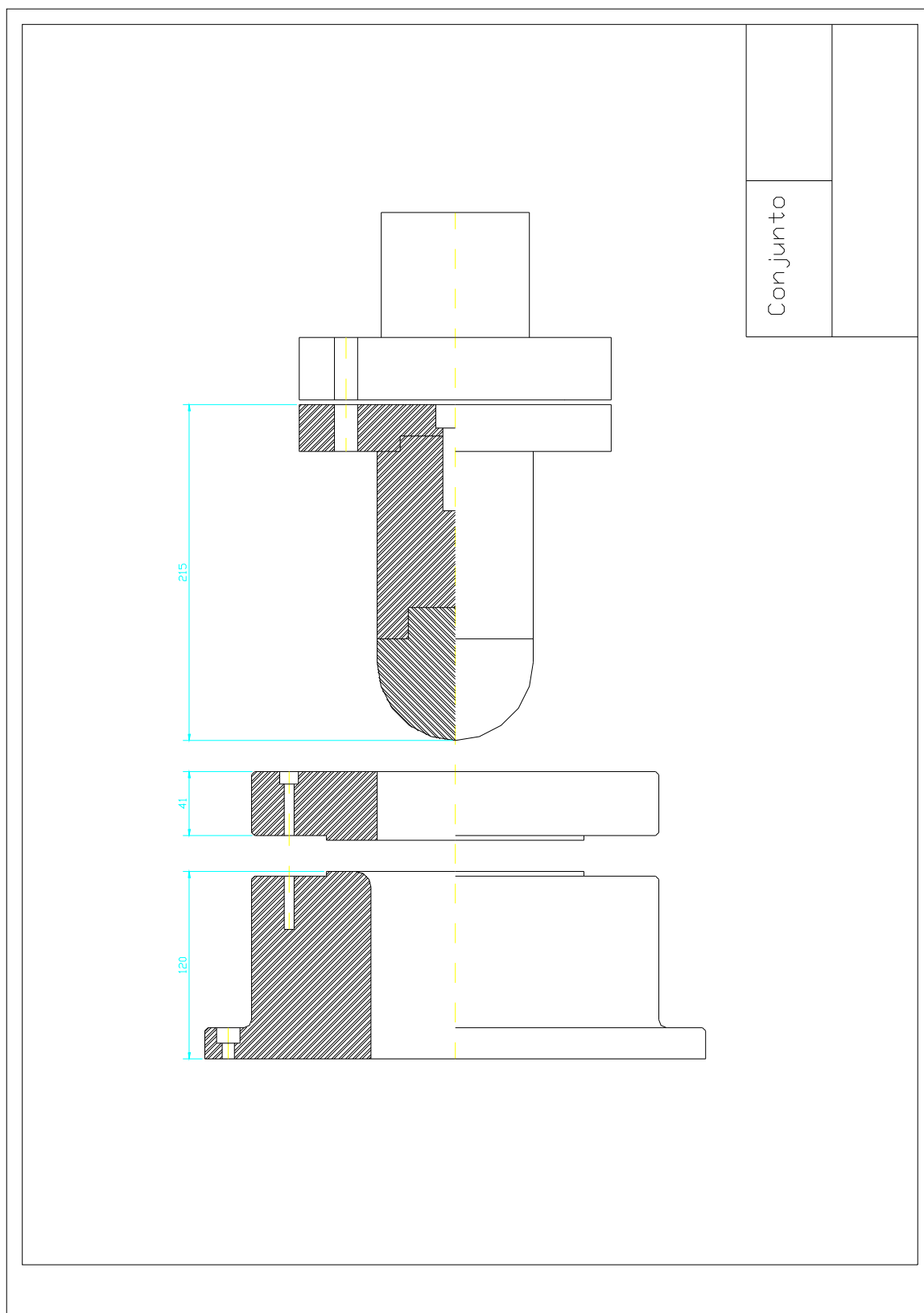
$$h_i = t_{i+1} - t_i$$

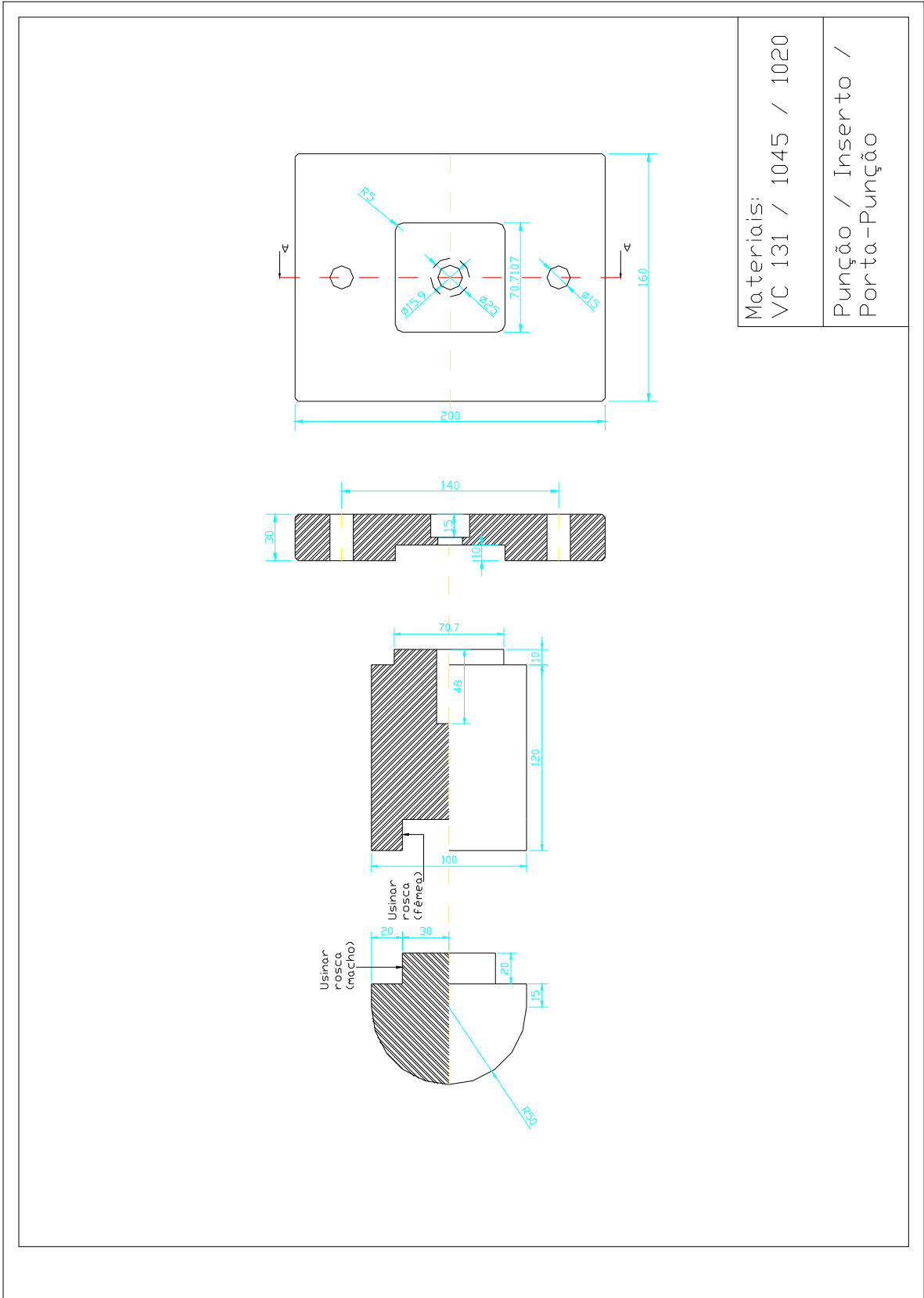
$$u_i = 2(h_i + h_{i-1})$$

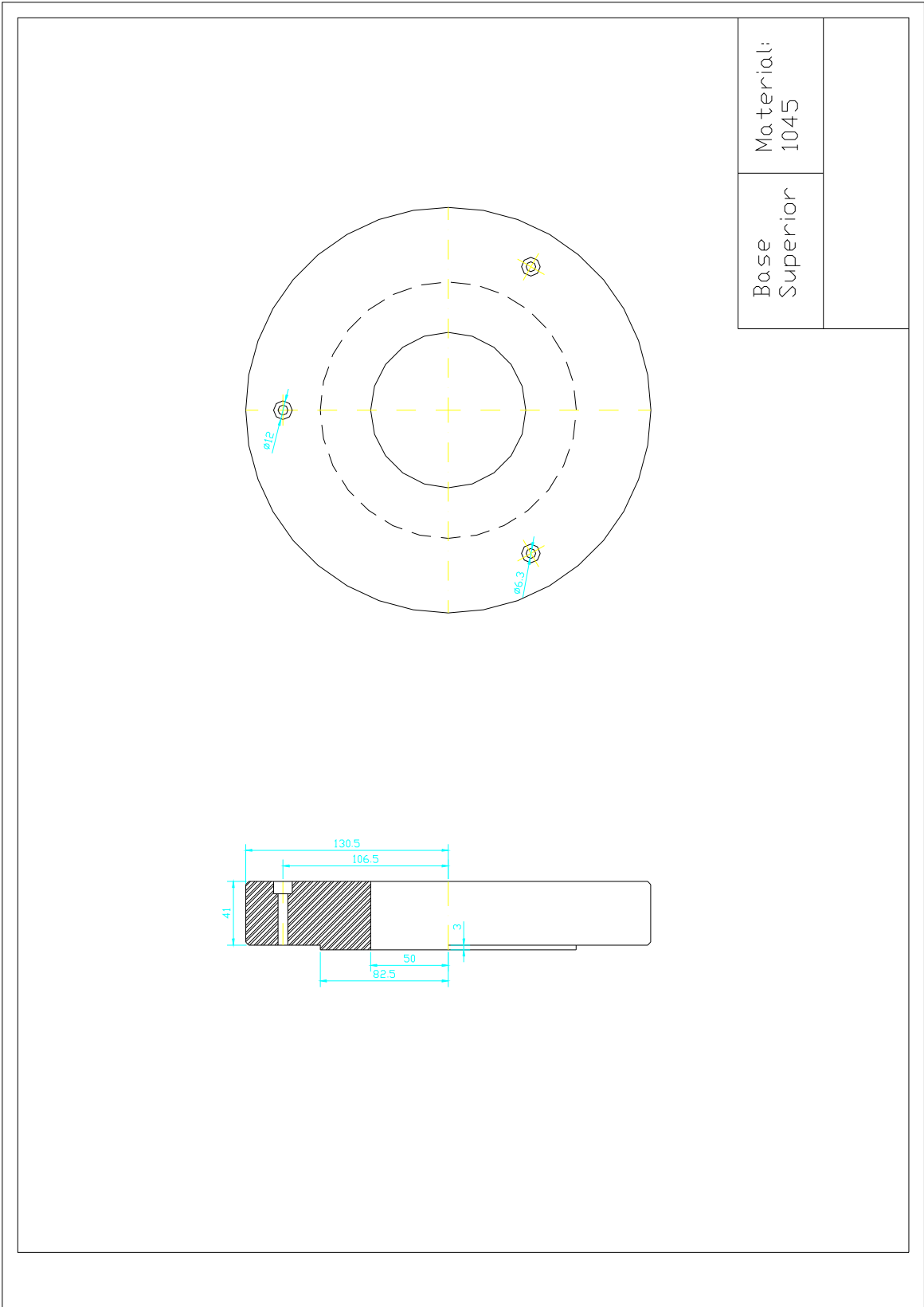
$$b_i = 6/h_i (y_{i+1} - y_i)$$

$$v_i = b_i - b_{i-1}$$

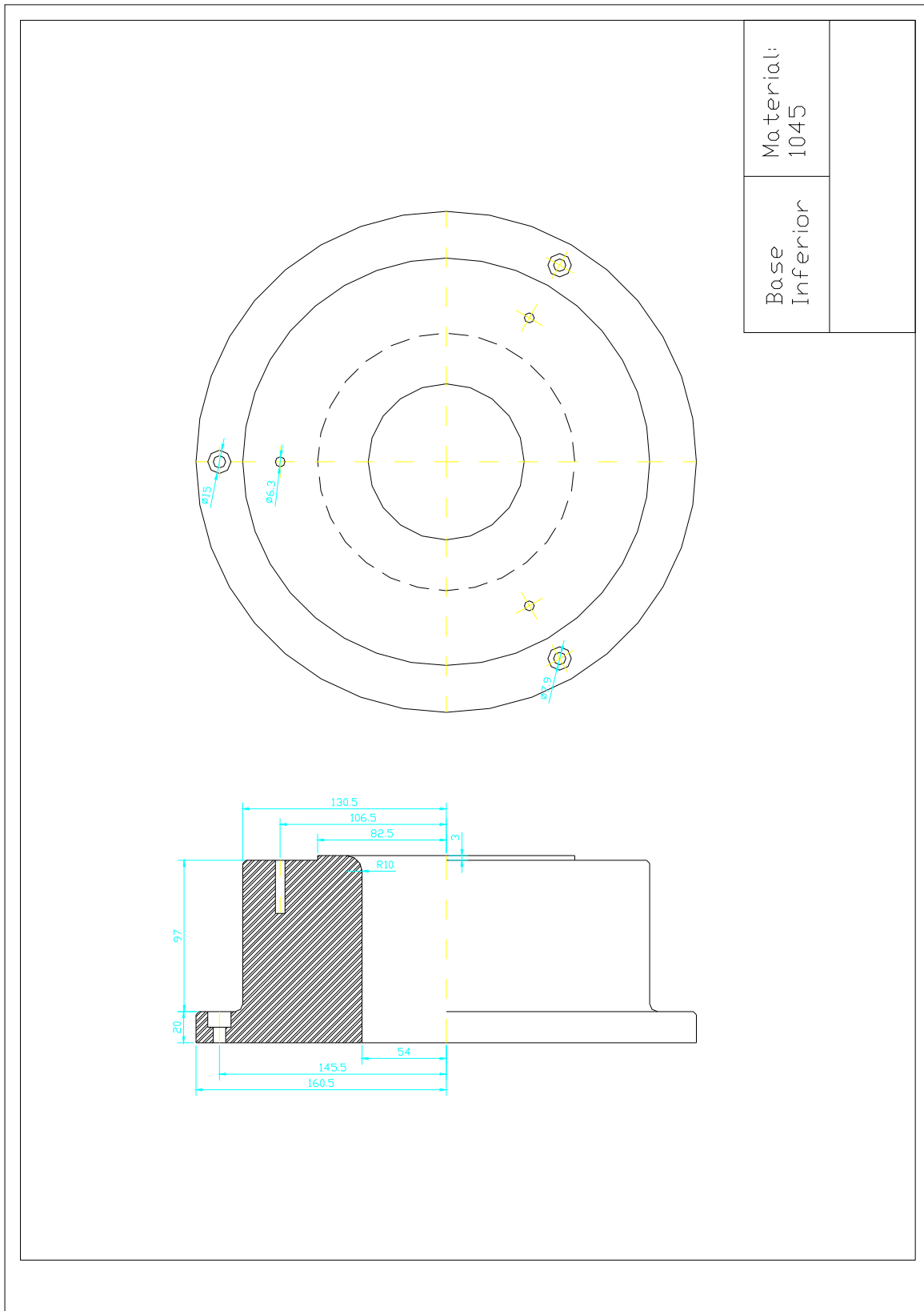
ANEXO B – Desenhos ferramenta ensaio Nakajima



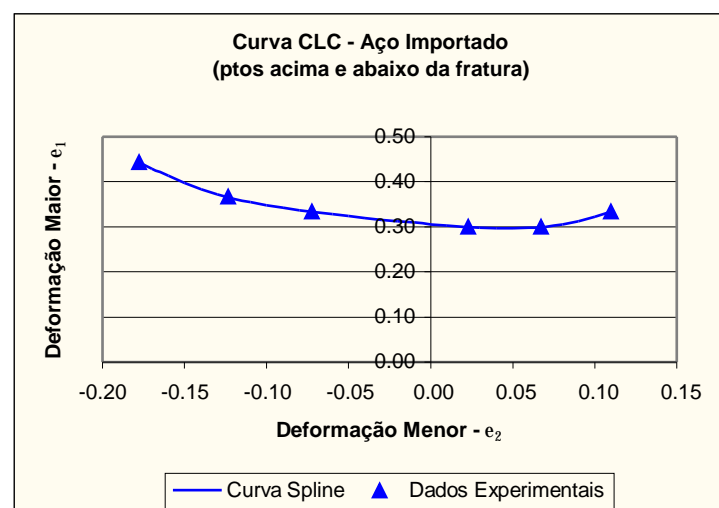
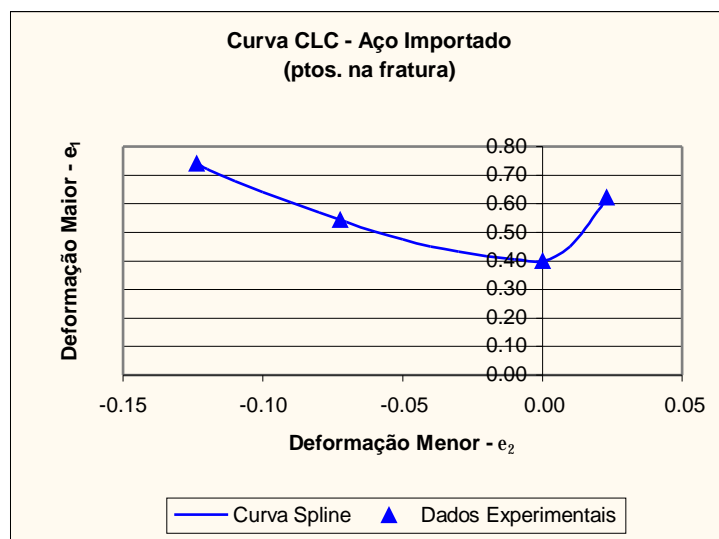
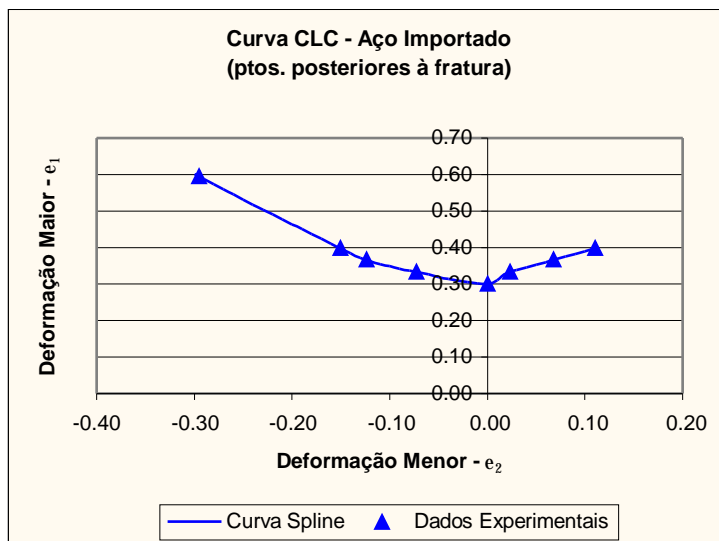


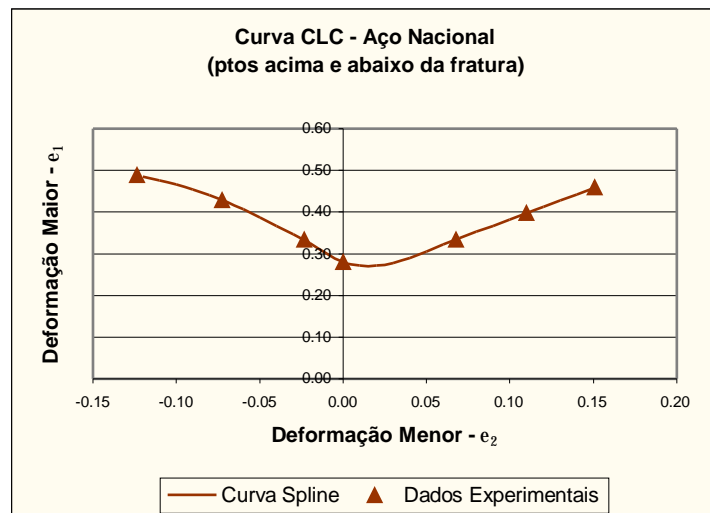
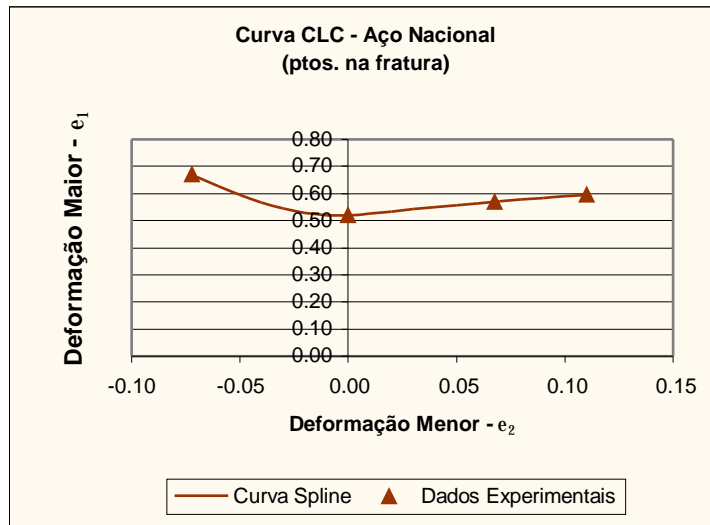
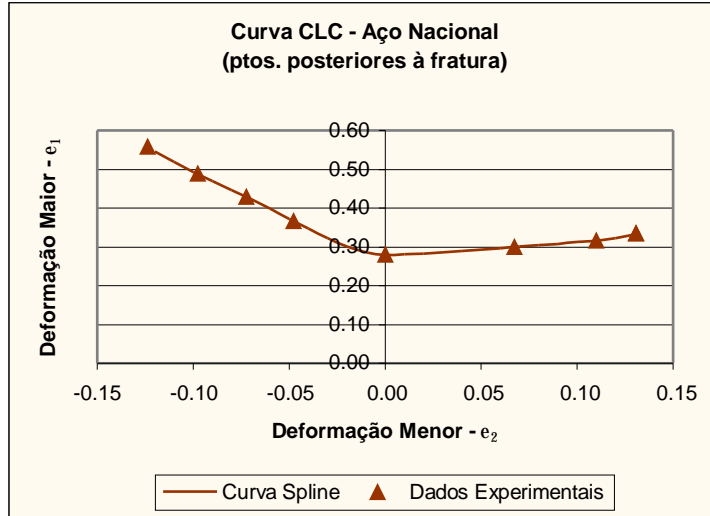


Base Superior	Material: 1045
---------------	----------------



ANEXO C – Curvas CLC





ANEXO D – O Algoritmo “Spline”

```

USE MSIMSL
INTEGER  NDATA
PARAMETER (NDATA=8)

INTEGER  I, NINTV, NOUT
REAL    BREAK(NDATA), CSCOE(4,NDATA),FDATA(NDATA), X,
XDATA(NDATA),S
OPEN (UNIT=1,FILE='SPLINE.TXT',STATUS='UNKNOWN')
! OPEN (UNIT=2,FILE='ORDINATES_ABSISSAS.TXT',STATUS='UNKNOWN')

!           Define function

! F(X) = SQRT(X)

!           Set up a grid
! DO 10 I=0, NDATA-1
DATA XDATA/-0.2955, -0.1503, -0.1236, -0.0723, 0, 0.0230, 0.0674, 0.1100/
DATA FDATA/0.5955, 0.3977, 0.3659, 0.3331, 0.3000, 0.3331, 0.3659, 0.3977/
!       WRITE (*,*) XDATA(I),FDATA(I)
!       WRITE (2,*) XDATA(I),FDATA(I)

! 10 CONTINUE

!           Compute cubic spline interpolant
CALL CSAKM (NDATA, XDATA, FDATA, BREAK, CSCOE)
!           Get output unit number
CALL UMACH (2, NOUT)
!           Write heading
WRITE (NOUT,99999)
99999 FORMAT (13X, 'X', 9X, 'Interpolant')
NINTV = NDATA - 1
!           Print the interpolant on a finer grid
DO 20 I=-NDATA - 22, NDATA + 3
X = I*0.01
S=CSVAL(X,NINTV,BREAK,CSCOE)
!       E=F(X)-CSVAL(X,NINTV,BREAK,CSCOE)
WRITE (NOUT,'(2F20.10,F20.10)') X,S
WRITE (1,*) X,S
20 CONTINUE
END

! REAL FUNCTION  F(X)
! REAL X
! F= SQRT(X)
! END FUNCTION

```